

Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT

Michèle Artigue, Lalina Coulange, Françoise Chenevotot, Élisabeth Delozanne, Jean-Michel Gelis, Brigitte Grugeon-Allys, Pierre Jacoboni, Sylvie Normand-Assadi, Dominique Prévit, Janine Rogalski, et al.

▶ **To cite this version:**

Michèle Artigue, Lalina Coulange, Françoise Chenevotot, Élisabeth Delozanne, Jean-Michel Gelis, et al.. Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT. "Ecole et sciences cognitives : les apprentissages et leurs dysfonctionnements", Ministère de la Recherche et de la Technologie, Projet AD n°22. 2005. hal-00853637

HAL Id: hal-00853637
https://hal.science/hal-00853637

Submitted on 7 Sep 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.

ECOLE ET SCIENCES COGNITIVES

APPEL A PROPOSITION 2002

« LES APPRENTISSAGES ET LEURS DYSFONCTIONNEMENTS »

PROJET AD N° 22

Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT

RAPPORT DE FIN DE PROJET

Coordonné par E. Delozanne et F. Chenevotot
Rédigé par:
M. Artigue, L. Coulange, F. Chenevotot , E. Delozanne, J.- M. Gélis, B. Grugeon-Allys, P. Jacoboni, S. Normand-Assadi, D. Prévit, J. Rogalski, C. Vincent

Mars 2005

ECOLE ET SCIENCES COGNITIVES

mars 2005

APPEL A PROPOSITION 2002

« Les apprentissages et leurs dysfonctionnements »

RAPPORT DE FIN DE PROJET

PROJET AD N° 22

Titre : **Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT**

Mots clés : Régulation des apprentissages, Modélisation, Compétences en algèbre élémentaire, Instrumentation de l'activité d'enseignant, Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain (EIAH)

Durée : 24 mois

Responsable scientifique :

Elisabeth Delozanne (Maître de Conférences),
Adresse professionnelle depuis le 01/09/2003 : CRIP5-UFR de Mathématiques et d'Informatique, Bureau 705 D6, Université Paris 5
45 rue des Saints Pères , 75270 Paris Cedex 6
tél.: 01 44 55 35 67 Fax : 01 44 55 35 35
mél: elisabeth.delozanne@math-info.univ-paris5.fr

Organisme demandeur et gestionnaire de l'opération :

(LIUM, ex-laboratoire de la responsable scientifique)
Laboratoire d'informatique de l'université du Maine av. Olivier Messiaen
72085 le mans cedex 9 ; tél.: (33) 02 43 83 38 58 ;fax : (33) 02 43 83 38 68

Partenaires :

1. **Equipe de Recherche en Didactique des Disciplines**, DIDIREM, EA 1547, Université Paris7, CP 70-18, 2 Place Jussieu, 75 251 PARIS CEDEX 05, Tél. 01 44 27 53 83, Fax : 01 44 27 56 08
2. **Laboratoire Cognition & Activités Finalisées (C&AF)**, FRE 2308, Université Paris8-CNRS, 2 rue de la liberté 93526 Saint-Denis Cédex 2., 2 rue de la liberté, F 93526 Saint-Denis CEDEX2, Tél. 01 49 40 64 88, fax : 01 49 40 67 54.
3. **Equipe STICE, IUFM de Créteil**, rue Jean Macé 94861 Bonneuil-sur-Marne cedex, Tél. 01 49 56 37 24, Fax : 01 49 56 37 95
4. **IUFM d'Amiens** 49, boulevard de Châteaudun 80044 AMIENS CEDEX 1, Tél. 03 22 53 59 80 , Fax 03 22 53 59 90
5. **Equipe SAvoirs et SOcialisation en éducation et formation (SASO),** Université de Picardie Jules Verne, à Amiens, 33 rue St Leu, 80039 Amiens CEDEX 01. Tel : 03.22.82.88.09, Fax : 03.22.82.88.01

Remerciements

Nous tenons à remercier les élèves, les enseignants de mathématiques et les formateurs qui nous ont permis de tester dans les classes les prototypes logiciels mettant en œuvre les modèles élaborés dans le cadre de ce projet. Nous remercions particulièrement M.-F. Delord, F. Delzongle, J.-F. Chesne, M.-C. Marilier, Y. Alvez, C. Saint-Raymond, les enseignants des stages de formation sur la compétence algébrique organisés par les IUFM de Créteil et de Paris et les professeurs de mathématiques du Lycée Martin Luther King à Bussy-Saint-Georges.

Sommaire

Introduction **p. 1**
- Rappel des enjeux et des objectifs
- Rappel du calendrier prévisionnel
- Bilan d'activité
- Difficultés rencontrées
- Principaux résultats
- Publications

Chapitre 1 : Les bases du projet en Juin 2002 **p. 11**
- Les fondements didactiques du projet
- Le premier logiciel Pépite (Pépite1)
- Analyse des retours d'usage de Pépite 1
- Leçons et questions
- Références

Chapitre 2 : Rapport d'activité sur l'axe diagnostic **p. 23**
- Introduction
- Vers un diagnostic automatique plus fiable
- Vers des situations de diagnostic paramétrables
- Vers un assistant à l'exploitation du diagnostic : des profils aux stéréotypes
- Difficultés, résultats et perspectives
- Références

Chapitre 3 : Rapport d'activité sur l'axe apprentissage **p. 71**
- Introduction
- Conception de situations d'apprentissage
- Des situations d'apprentissage adaptées aux profils d'élèves
- Conclusions et perspectives
- Références

Chapitre 4 : Rapport d'activité sur l'axe instrumentation de l'activité des enseignants **p. 91**
- Introduction
- Cadre théorique : une théorie de l'activité et de son organisation
- L'activité de diagnostic de l'enseignant de mathématiques
- Méthodes
- Résultats
- Synthèse et perspectives
- Références

Chapitre 5 : Conclusions et perspectives **p. 109**

Annexes A : Le diagnostic **p. 115**

- A1 L'ensemble des items et des dimensions d'évaluation des réponses [Grugeon 95]
- A2 Analyse a priori de l'exercice du prestidigitateur
- A3 Le corpus des justifications en langage naturel en réponse à l'exercice 2
- A4 Les écrans des maquettes pour la génération d'exercices de diagnostic paramétrables
- A5 Tableau récapitulatif des groupements d'élèves obtenus à l'aide des classes de profils : profil 1, profil 2, profil 3
- A6 Comparaison entre les propositions profil 1, profil 2, profil 3
- A7 Les classes de profils et l'algorithme de classification
- A8 Répartition "manuelle" des élèves du corpus sur les classes de profils
- A9 Structure du fichier XSL servant au calcul du stéréotype d'un élève à partir du fichier classe.xml
- A10 Copies d'écran de PépiStéréo

Annexes B : Les situations d'apprentissage **p. 165**

- B1 Cahier des charges du logiciel AILE
- B2 Complément au cahier des charges du logiciel AILE
- B3 Cahier des charges du logiciel CIME
- B4 Les différentes représentations des expressions
- B5 Variables d'interaction pour les tâches du côté objet

Annexes C : L'instrumentation de l'activité de l'enseignant **p. 215**

- C1 : Les enseignants
- C2 : Interaction d'un duo de stagiaires avec PépiTest
- C3 : Synoptique de l'activité d'un duo de stagiaires
- C4 : Exemple d'un fragment d'entretien (avant tout usage de Pépite)
- C5 : Entretiens

INTRODUCTION

Rapport coordonné par E. Delozanne et F. Chenevotot

1. RAPPEL DES ENJEUX ET DES OBJECTIFS

Le projet Lingot est un projet interdisciplinaire qui se situe dans le domaine de recherche sur les EIAH (Environnements Informatiques d'Apprentissage Humain). L'objectif est de concevoir et de mettre en œuvre des situations d'apprentissage de l'algèbre dans le cadre de la scolarité obligatoire incluant l'utilisation d'environnements informatiques. Il s'agit d'une part, de permettre aux enseignants de prendre en compte la diversité cognitive des élèves pour réguler les apprentissages, en opérationnalisant des résultats récents de recherches en didactique des mathématiques. Il s'agit d'autre part, de fournir aux chercheurs des outils d'observation systématique permettant d'étudier, sur le long terme, les effets sur l'apprentissage des enseignements dispensés. Cet appel d'offres Cognitique nous donne l'occasion de consolider des synergies déjà productives entre des laboratoires universitaires d'informatique (LIUM) et de didactique des disciplines (DIDIREM) mais aussi de les étendre à des équipes d'ergonomie cognitive (EC&AF) et de sciences cognitives (IUFM de Créteil et IUFM d'Amiens, équipe SASO).

L'idée fondatrice du projet consiste à s'appuyer sur un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique à la fin de la scolarité obligatoire pour, d'une part, analyser sur le long terme l'enseignement dispensé aux élèves dans différentes institutions (collège, lycée professionnel, lycée) et, d'autre part, construire pour chaque élève, un profil cognitif permettant de situer les compétences qu'il a construites au cours de sa scolarité par rapport aux compétences que l'institution scolaire estime exigibles à ce niveau d'étude. Ces analyses (thèse de Brigitte Grugeon, DIDIREM, 1995) ont déjà donné lieu à une collaboration EIAH et Didactique des Mathématiques qui a conduit à la réalisation de prototypes (projet Pepite-1, thèse de Stéphanie Jean, 2000 et projet Amico-1 2001) dont certains ont été expérimentés dans des classes. Les équipes membres du projet se proposent d'abord d'améliorer, d'étendre et d'opérationnaliser les modélisations déjà produites et également d'élaborer des situations d'apprentissage, soit pour introduire de nouveaux concepts algébriques, soit pour faire évoluer les profils cognitifs des élèves (remédiation).

Le projet comporte ainsi trois axes : (i) un axe diagnostic des compétences, (ii) un axe apprentissage et (iii) un axe instrumentation de l'activité des enseignants de mathématiques.

En ce qui concerne le diagnostic, l'objectif est de :

- mettre au point des « profils types » en nous appuyant sur une analyse didactique a priori et une analyse statistique des protocoles d'interaction obtenus avec le logiciel de test Pepite1 ;
- à la lumière des expérimentations en classe déjà menées, construire à partir du test diagnostique, des modèles paramétrables d'exercices, par les enseignants ou par les chercheurs, permettant la génération et l'analyse automatique d'activités de diagnostic par le système informatique ;

- mettre au point plusieurs présentations types de résultats du diagnostic à différents types d'utilisateurs (élèves, enseignants, chercheur) et tester leurs effets, par exemple, l'effet du questionnement des élèves sur leur propre compétence pour l'apprentissage.

En ce qui concerne l'apprentissage, notre objectif est :

- d'associer à chaque profil type des situations d'apprentissage susceptibles de les faire évoluer ;
- d'élaborer des situations d'apprentissage s'appuyant sur les spécificités des EIAH ; il s'agira par exemple, d'inciter les élèves à utiliser différents registres sémiotiques via l'interaction avec des compagnons virtuels paramétrables par l'enseignant ou le chercheur, ou encore de concevoir un logiciel de type « jeu de cibles » pour travailler sur des objets constitués par des écritures polynomiales.

En ce qui concerne l'axe instrumentation de l'activité de l'enseignant, notre objectif est :

- d'étudier l'activité de diagnostic des enseignants dans sa diversité,
- de concevoir des logiciels permettant aux enseignants d'intégrer le diagnostic dans leur pratique de classe.

2. RAPPEL DU CALENDRIER PREVISIONNEL DES TRAVAUX

Septembre 2002-Septembre 2003 : analyse a priori et conception de prototypes

Axe 1 : Diagnostic

- DIDIREM : construction de profils types à partir d'une analyse cognitive a priori du test diagnostique ; confrontation de cette analyse aux résultats d'une étude statistique sur les protocoles numérisés d'interaction avec le logiciel Pépite1 obtenus lors des expérimentations menées entre 1996 et 2001 ;
- LIUM et IUFM de Créteil : construction de modèles paramétrables d'exercices diagnostiques du logiciel de test Pépite et modélisation du diagnostic pour permettre de générer un test diagnostic à partir d'exercices types paramétrables ;
- EC&AF: mise au point de questions à poser à l'élève pour l'inciter à établir des rapports entre les propriétés perceptives, fonctionnelles et les rôles des objets algébriques.

Axe 2 : Apprentissage

- LIUM +IUFMs +EC&AF : développement du prototype Amico pour favoriser des apprentissages par interaction avec un compagnon virtuel et tests d'utilisabilité de ce prototype ;
- Didirem + SASO: élaboration d'une analyse cognitive a priori pour la conception de situations d'apprentissage indexées par les compétences et mise en œuvre informatique de ces situations.

Axe 3 : Instrumentation du métier d'enseignant

- DIDIREM + IUFM + C&AF : mise en place de formation et observation par un ergonome de la formation, et de la mise en œuvre dans les classes par les professeurs des situations proposées ;
- LIUM + C&AF : analyse de l'activité de l'enseignant pour la conception d'interfaces différenciées d'élaboration et de présentation des profils ;

Septembre 2003-Septembre 2004 : expérimentation des prototypes et intégration des travaux des équipes

- LIUM+ C&AF : intégration dans le logiciel Pepite-2 des profils types et conception du logiciel proposant aux enseignants le diagnostic et des situations de remédiation ;
- DIDIREM : mise au point d'une expérimentation pour tester les situations de remédiation en début de seconde ;

- SASO + C&AF : réalisation d'un premier prototype mettant en œuvre des situations et test de ce prototype dans les collèges et lycées et auprès des formateurs en IUFM ;
- En commun : construction de modèles paramétrables de nouvelles situations d'apprentissage pour concevoir l'outil permettant de générer des exercices à partir de situations types paramétrables ;
- SASO : production d'une maquette de système auteur et production d'un rapport contenant les modèles de situations d'apprentissage mis en place.

3. BILAN D'ACTIVITÉ

De Juin 2002-septembre 2004 nous avons avancé sur les trois axes en mettant sur pied des groupes de travail sur chacun des objectifs annoncés. Ces groupes de travail exposaient régulièrement l'état de ces travaux lors de réunions mensuelles de l'ensemble des participants. Chacun des groupes de travail a rédigé un rapport qui en constitue l'ossature du présent rapport. Nous résumons ici les résultats obtenus et précisons s'ils ont fait l'objet de publications.

1. axe diagnostic :

Sur cet axe, nous nous sommes concentrés sur trois objectifs principaux.

Un assistant à l'exploitation du diagnostic fondé sur des stéréotypes

L'essentiel de nos efforts a porté sur la conception d'un assistant à l'exploitation du diagnostic en classe par les enseignants. Nous avons émis deux hypothèses de travail.
H1 : Pour prendre des décisions didactiques sur les activités d'apprentissage adaptées au profil cognitif il est nécessaire de disposer d'un niveau de modélisation d'abstraction plus élevé à côté du modèle cognitif très fin proposé par Pépite. Nous avons appelé les modèles de ce niveau des "*profils types*", puis "des *classes de profils*" et enfin des "*stéréotypes*" pour adopter une terminologie en cours dans la communauté de recherche s'intéressant à la modélisation des utilisateurs de systèmes interactifs (user modelling) et plus particulièrement à la modélisation des apprenants (student modelling).
H2 : Le concept de stéréotype constitue un outil conceptuel pour favoriser l'appropriation par les enseignants d'un artefact complexe comme l'est le logiciel Pépite car il permet d'articuler diagnostic individuel et "géographie de la classe" pour organiser la régulation des apprentissages en classe c'est-à-dire de faire progresser la classe en respectant les différences individuelles.
La première étape du projet a consisté à identifier les stéréotypes et à définir la procédure de classement d'un profil dans un des stéréotypes. Ce travail a été mené principalement par B. Grugeon, J.-M. Gélis et J. Rogalski. Parallèlement, une étude ergonomique sur l'activité de diagnostic des enseignants de mathématiques a été menée par J. Rogalski et trois de ses étudiantes.
À partir de ces premiers résultats, un travail de toute l'équipe avec la participation d'enseignants a conduit à concevoir un logiciel fondé sur les stéréotypes pour assister la régulation des apprentissages en algèbre dans la classe. Le travail coordonné principalement par C. Vincent et E. Delozanne a porté sur la définition des catégories et des différents niveaux de modélisation, sur leur expression dans le vocabulaire-métier des enseignants, sur la présentation sous une forme facilitant l'exploitation et enfin sur la réalisation informatique d'un logiciel PépiStéréo mettant en œuvre ces différentes modélisations. Cette recherche a donné lieu à un mémoire de DEA [Vincent 2004] et à une publication en français et en anglais [Vincent et al. 2005 a, b]. Nous avons depuis mis à l'épreuve nos hypothèses auprès d'enseignants du secondaire.

Fiabilisation du diagnostic automatique

Le second objectif vise à *fiabiliser le diagnostic automatique*. Cet objectif nous est apparu un préalable pour étendre l'utilisation du logiciel en dehors du cercle des chercheurs. Nous avons donc cherché à améliorer le diagnostic automatique à partir des réponses aux questions ouvertes. Dans ce cadre deux études exploratoires ont été menées. La première a consisté à mettre en œuvre une analyse automatique des raisonnements algébriques des élèves sur un exercice de preuve. Ce travail

a été mené par deux informaticiennes (D. Prévit, E. Delozanne) et une didacticienne (B. Grugeon). Il a donné lieu à un mémoire de DEA et à deux publications [Prévit 2002, Prévit et al. 2003, Prévit et al. 2004]. La seconde étude concerne l'analyse des justifications que les élèves expriment en utilisant la "langue naturelle" ou plutôt une langue où ils incorporent des expressions mathématiques à des mots d'usage courant. Ce travail a été mené principalement à l'IUFM de Créteil par une linguiste (S. Normand), une didacticienne (L. Coulange), une informaticienne (E. Delozanne) avec la participation de formateurs d'enseignants (M.-C. Marillier, J.-F. Chesné, F. Delzongle). Il a donné lieu à des publications en français et en anglais [Normand et al. 04a et b]. De plus, toujours dans l'objectif de fiabiliser le système, le portage du système dans le langage Java a été initié dans le cadre d'un stage de maîtrise au LIUM [Vaseux 2003]. La version Java de PépiTest est téléchargeable sur le site du projet [site Pépite]. Enfin une étude exploratoire a été menée auprès d'une dizaine d'élèves pour appréhender la vision des élèves sur leur compétence algébrique dans l'objectif de faire un retour vers l'élève du résultat du diagnostic. Ces entretiens sont en cours d'exploitation.

Vers des situations de diagnostics paramétrables

Le troisième objectif consiste à concevoir un système informatique qui supporte des situations de diagnostic adaptables par les enseignants à différents contextes d'évaluation de leurs élèves. Un groupe de travail composé principalement d'informaticiens du LIUM (P. Jacoboni, D. Prévit, E. Delozanne et deux étudiants), et occasionnellement de didacticiennes de DIDIREM (L. Coulange et B Grugeon), d'une ergonome de Paris 8 (J. Rogalski) a travaillé à partir des retours d'utilisation à la définition de scénarios d'utilisation et à la conception d'une nouvelle architecture du système de diagnostic pour en faire un système plus ouvert et adaptable. Ces travaux ont conduit à définir des modèles d'exercices de diagnostic indexés par les compétences algébriques. La conception du système informatique qui les met en œuvre n'est pas encore aboutie mais a donné lieu à des présentations dans des séminaires et des publications de types jeunes chercheurs ou papier court [Prévit 2003].

2. axe apprentissage :

Le groupe de travail pour le développement du prototype Amico n'a pas pu fonctionner suite à la défection d'un étudiant en thèse. Par contre le groupe de travail composé de didacticiens de DIDIREM (B. Grugeon, L. Coulange, J.-M. Gélis, Françoise Chenevotot), assisté de deux informaticiens contractés (E. Artigue, C. Lefranc), a travaillé sur la modélisation des situations didactiques en définissant les paramètres pour les indexer sur les compétences mathématiques des élèves. Ce groupe a défini et complètement spécifié deux situations d'apprentissage dont la mise en œuvre informatique est terminée. Le prototype AILE vise à faire travailler les élèves sur la traduction d'expression algébrique en langage naturel et CIME sur la mise en équation. Ces deux logiciels s'appuient sur des travaux en didactique ceux de B. Grugeon sur le modèle de la compétence algébrique, de C. Bardini pour AILE et de S. René De Cotret pour CIME. Ils permettent de faire générer automatiquement des exercices à partir de valeurs de variables didactiques entrées par l'enseignant.

3. axe instrumentation du métier d'enseignant :

Un groupe de travail comportant des formateurs IUFM (E. Delozanne), des membres de DIDIREM (M. Artigue, B. Grugeon) et des membres de l'équipe d'ergonomie de Paris 8 (J. Rogalski et 3 étudiantes) a monté des formations sur la compétence algébrique des élèves et observé les formations et les pratiques de diagnostic des enseignants qui suivaient ces formations. Une première analyse des protocoles recueillis a éclairé la reconception du logiciel Pépite et suggéré des développements méthodologiques.

L'analyse des interactions des enseignants avec Pépite lors du stage a montré la « transparence » de PépiTest, alors que PépiProf posait des questions à la fois logicielles et dans la compréhension des « profils » proposés. Des entretiens avec les enseignants avant et après le stage ont mis en évidence le fait qu'ils orientent de manière dominante leur diagnostic vers la classe ou vers des groupes

d'élèves : le diagnostic individuel tel que proposé dans PépiProf semblait loin de leurs pratiques. L'utilisation de Pépite après les stages s'est heurtée pour beaucoup aux problèmes classiques d'accès aux ordinateurs et de gestion du temps de la classe. Pour les autres, l'étude a retrouvé les différences d'approche entre PépiTest et PépiProf. L'élaboration de stéréotypes de profils d'élèves et celle de classes d'exercices prend en compte les conditions d'instrumentation du diagnostic et de l'action enseignante.

L'ensemble de ces travaux est développé dans chacun des chapitres suivants du rapport.

4. DIFFICULTÉS RENCONTRÉES

Tout d'abord la gestion financière d'un projet comportant des partenaires de cinq établissements différents s'est avérée très complexe et ce d'autant plus que certains responsables d'équipe ont changé de statut par rapport aux établissements contractants du projet
.
Nous avons mis en place de nombreuses situations d'observation en amont de la conception, pour informer la conception. Ces recueils d'informations préalables ont été nécessaires pour la constitution d'une culture commune et de références communes à l'équipe et aussi pour créer les conditions d'observation par les ergonomes. La mise en place de ces observations indispensables n'était pas prévue dans l'organisation initiale.

Sur l'axe diagnostic : pour mettre en place les formations il est apparu important de disposer d'un logiciel plus fiable et plus robuste. Nous avons donc passé plus de temps que prévu pour améliorer la version 1 de Pépite et avons du recommencer à développer une nouvelle version en Java, ce que nous n'avions pas prévu et qui a retardé nos travaux sur la génération d'exercices de diagnostic.

Sur l'axe apprentissage : L'équipe SASO qui n'a pas l'habitude du travail avec des didacticiens des mathématiques et leurs problématiques de recherche a eu plus de difficulté à s'intégrer que ce que nous avions prévu. Créer une culture commune dans une équipe pluridisciplinaire nécessite du temps. De plus nous avions sous-estimé la complexité de la réalisation informatique pour mettre en œuvre les modèles de situations d'apprentissage dans les logiciels CIME et AILE en particulier pour ce qui concerne l'affichage et la saisie des expressions algébriques. Le développement de ces prototypes a donc pris un retard important qui nous a empêché de mettre sur pied les expérimentations prévues.

5. PRINCIPAUX RÉSULTATS

Par rapport aux objectifs principaux du projet, conformément à nos engagements :

- Nous avons défini des *profils types* de compétence algébrique (appelés stéréotypes) et conçu un *logiciel PépiStéréo* qui propose aux enseignants plusieurs niveaux de modélisations des compétences de leurs élèves et des pistes pour mettre en place des *situations de remédiation* ; l'originalité de ce travail par rapport aux travaux de modélisation à partir de stéréotypes repose d'une part sur l'analyse didactique très fine qui fonde la classification d'un élève dans un stéréotype et, d'autre part, sur l'utilisation des stéréotypes pour articuler personnalisation de l'enseignement et gestion de la classe.
- Nous avons défini des *modèles de tâches paramétrables* pour *générer automatiquement des exercices et l'analyse automatique des réponses* ; deux prototypes logiciel permettant de générer des familles de situations d'apprentissage ont été développés et sont opérationnels : AILE pour la traduction expression algébrique–langage naturel et CIME pour la mise en équation de type rapport différence ; pour les exercices de diagnostic nous avons défini des modèles permettant de générer des batteries de test semblables à Pépite paramétrables. La mise en œuvre informatique d'une classe d'exercices est en cours.

- Nous avons mis en place des situations d'expérimentation du logiciel qui ont permis à des ergonomes *d'étudier l'activité de diagnostic des enseignants de mathématiques* de façon générale et en relation avec Pépite. Ces analyses de l'activité et un travail de formulation important mené avec des enseignants ont permis de fonder la conception des prototypes logiciels développés dans le cadre de ce projet.
- Nous avons de plus pu bénéficier d'une coopération avec une linguiste pour mener une étude exploratoire des justifications mathématiques exprimées par les élèves en langage naturel. Concernant l'analyse de réponses libres des élèves, nous avons implémenté un algorithme permettant d'analyser automatiquement un raisonnement algébrique complexe et crucial pour situer les compétences algébriques d'un élève par rapport à la compétence attendu.

6. PUBLICATIONS

Revue scientifique

J. Rogalski (2003), Y a-t-il un pilote dans la classe ? Une analyse de l'activité de l'enseignant comme gestion d'un environnement dynamique ouvert. Recherches en Didactique des Mathématiques, n° 23(3), 343-388

Chapitre de livres

E. Delozanne (2005), Concevoir des Interfaces en EIAH, in M. Grandbastien et J.-M. Labat (eds.), Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain, chapitre 10, Hermes (à paraître).

Conférences Internationales avec Comité de sélection

S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2004), Linguistic Markers to Improve Students' Assessment in Mathematics: an Exploratory Study, Proceedings of ITS'2004, août 2004, Lectures Notes in Computer Sciences 3220, Springer, 380-389.

D. Rasseneur, E. Delozanne, P. Jacoboni et B. Grugeon (2002), Learning with virtual agents: Competition and Cooperation in AMICO, Actes du colloque ITS'2002, Biarritz, juin 2002.

Article soumis :

E. Delozanne, C. Vincent, B. Grugeon, J.-M. Gélis, J. Rogalski, L. Coulange (2005), From errors to stereotypes: Different levels of cognitive models in algebra, article soumis à la conférence AIED2005.

Conférences d'Audience Nationale avec Comité de sélection

C. Vincent, E. Delozanne, B. Grugeon, J.-M. Gélis, J. Rogalski, L. Coulange (2005), Des erreurs aux stéréotypes : Des modèles cognitifs de différents niveaux dans le projet Pépite, Actes de la conférence EIAH2005, Environnements Informatiques pour l'apprentissage humain, Montpellier, 25-27 mai 2005 (à paraître).

S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2004), Marqueurs linguistiques et compétences mathématiques, Conférence Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement Supérieur, Compiègne, 20-22 octobre 2004, 183-190.

D. Prévit, É. Delozanne, B. Grugeon (2004), Modélisation cognitive en algèbre élémentaire : une conception itérative, Conférence Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement Supérieur, Compiègne, 20-22 octobre 2004, 138-145.

B. Grugeon, L. Coulange, V. Larue (2003), Familles de situations d'interactions en algèbre élémentaire : deux exemples, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, ITEM 2003, Reims, 20-23 juin 2003.
E. Delozanne, D. Prévit, B. Grugeon, P. Jacoboni (2003), Scénarios d'utilisation et conception d'un EIAH, le cas du diagnostic dans Pépite, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, ITEM 2003, Reims, 20-23 juin 2003
E. Delozanne, B. Grugeon, P. Jacoboni (2002), " Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation ", In Proceedings of IHM'2002, International Conference Proceedings Series, ACM, 2002, Poitiers, France 25-32.

Coordination d'ouvrages

E. Delozanne, K. Stacey (2003) (eds), Workshop Advanced Technologies for Mathematics Education, Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Sydney, July 2003, IOS Press, Amsterdam.
J.-F. Nicaud, E. Delozanne, B. Grugeon (2002) (éditeurs), numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre , Revue Sciences et Techniques éducatives, volume 9-n°1-2/2002, Hermès.

Communications orales avec actes, papiers courts

S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2005), "Extraction de pépites de connaissances dans des réponses d'élèves en langage naturel", Atelier "Extraction et Gestion de Connaissances dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain", 5ème journées Extraction et Gestion de Connaissances 2005, Paris, janvier 2005, 23-25.
J. Rogalski, M. El Jaafari, L. Simonneau, & G. Cahors (2004). Analysis of teachers' activity for continued design of a computer-based teaching support. The case of diagnosing students' algebra competencies. Short oral communication. 28thPME Conference, Bergen (Novège), 13-18 Juillet 2004.
É. Delozanne, D. Prévit, B. Grugeon, P. Jacoboni (2003),Supporting teachers when diagnosing their students in algebra, in Élisabeth Delozanne, Kaye Stacey (eds), Workshop Advanced Technologies for Mathematics Education, Supplementary Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Sydney, July 2003, IOS Press, Amsterdam, 461-470.
E. Delozanne, B. Grugeon, D. Prévit (2003), La compétence algébrique du collège aux lycée, Le logiciel Pépite comme support de formation, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, Reims, juin 2003.
B. Grugeon, E. Delozanne, (2003) EIAH et apprentissage de l'algèbre élémentaire : les projets Pépite et Lingot, in V. Durand-Guerrier, C. Tisseron (eds) Actes du Séminaire National de Didactique des Mathématiques, année 2003, 11-43.
D. Prévit (2003), Différentes modélisations pour prendre en compte les usages dans la conception d'un EIAH, Communication Jeune chercheur, EIAH'2003, Strasbourg, avril 2003, annexes des actes, 138-145.

Communications orales

E. Delozanne, B. Grugeon, C. Vincent (2004), Les projets Pépite et Lingot : un premier bilan, 17 décembre 2004, http://www.math-info.univ-paris5.fr/AIDA/
E. Delozanne (2004), Conception d'artefacts pour instrumenter l'activité des enseignants, séminaire Hypermédia et Apprentissage, 12 décembre 2004, Université Paris 6, http://www.stef.ens-cachan.fr/manifs/sem_hef.htm.
C. Vincent, E. Delozanne (2004), Les stéréotypes, un outil pour articuler diagnostic individuel et gestion de classe, Journée "Suivi de l'apprenant", GDR-PRC I3, novembre 2004, Paris.

E. Delozanne, B. Grugeon, L. Coulange (2004), Lingot Project : Monitoring the Learning of Algebra according to Students' Cognitive Profiles, 10th International Commission on Mathematical Instruction, Copenhague, July 4-11th.
E. Delozanne, D. Prévit (2004), Des outils pour supporter l'activité des enseignants : gestion de groupes d'apprenants et personnalisation de l'enseignement, séminaire du Laboratoire d'Informatique de l'université du Maine, 17 juin 2004.
J. Rogalski (2004). Comment un logiciel d'aide au diagnostic peut-il s'intégrer dans l'activité de l'enseignant ? Séminaire AIDA, Paris, mai 2004.
D. Prévit, E. Delozanne, S. Jean-Daubias (2003) Diagnostic de compétences en algèbre élémentaire, Le projet Pépite, Atelier du Cours D « Prise en compte de l'apprenant et modélisation de l'élève », école thématique du CNRS, Théories et méthodes pour la conception, l'évaluation et l'usage d'environnements informatiques pour l'apprentissage humain, Autrans, juillet 2003.
E. Delozanne, B. Grugeon, C. Saint-Raymond, M. Benaissa (2003) Amico, un prototype pour utiliser l'algèbre pour prouver en dialoguant avec un compagnon virtuel, Atelier, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, Reims, juin 2003.
B. Grugeon, L. Coulange (2003) : Une situation d'apprentissage "Bouchons les trous". Séminaire de l'équipe DIDIREM, Université Paris 7, mai 2003.
B. Grugeon, E. Delozanne (2003) EIAH et apprentissage de l'algèbre élémentaire : les projets Pépite et Lingot. Séminaire de l'équipe DIDIREM, Université Paris 7, mai 2003.
B. Grugeon, L. Coulange (2003) : Une situation d'apprentissage "Bouchons les trous". Séminaire de l'équipe DIDIREM, Université Paris 7, mai 2003.
E. Delozanne, B. Grugeon (2003) EIAH et apprentissage de l'algèbre élémentaire : les projets Pépite et Lingot, in Actes du Séminaire National de Didactique des Mathématiques, janvier 2003.
E. Delozanne (2002), Assister les enseignants dans le diagnostic des compétences de leurs élèves : le projet Pépite, Université de Sherbrook, Québec, Canada, 27 mai 2002.
E. Delozanne (2002), Pepite : software to help teachers diagnose students' algebra competencies, Université McGill, Montréal, Canada, 8 mai 2002.
E. Delozanne (2002), Pépite: un outil pour assister les enseignants dans le diagnostic des compétences de leurs élèves, Université du Québec à Montréal, Montréal, Canada, 12 avril 2002.
E. Delozanne (2002), Environnements interactifs pour apprendre et enseigner les mathématiques, LICEF-Télé-Université du Québec, Montréal, Canada, 8 mars 2002.

Mémoires et Rapports de recherche

C. Vincent (2004) PépiStéréo :un logiciel pour organiser des apprentissages différenciés dans une classe, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 2004.
Y Abdelaziz (2004), Vers une analyse automatique du raisonnement algébrique, mémoire de DEA, UFR de Mathématiques et d'informatique de l'université Paris 5, septembre 2004.
G. Cahors (2004), Place du diagnostic dans l'activité de l'enseignant (cas de l'enseignant de mathématiques disposant d'un outil-logiciel) Mémoire de Maîtrise de Psychologie Ergonomique, Université Paris 8, Septembre 2004.
M. El Jaafari (2004), Place du diagnostic dans l'activité de l'enseignant (le cas de l'enseignant de mathématiques de collège), Mémoire de Maîtrise de Psychologie Ergonomique, Université Paris 8, Février 2004.
L. Simonneau (2004), L'activité instrumentée de l'enseignant (le cas de l'enseignant de mathématiques et d'un logiciel d'aide au diagnostic), Mémoire de Maîtrise de Psychologie Ergonomique, Université Paris 8, Février 2004.
É. Delozanne, B. Grugeon , M. Artigue, J. Rogalski (2003), Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec

le projet LINGOT, Projet Cognitique 2002, École et sciences cognitives: Les apprentissages et leurs dysfonctionnements, rapport mi-parcours, décembre 2003, 150 p.

J.C. Pena (2003) Conception et réalisation d'une interface d'assistance au diagnostic : PepiProf-Java, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 2003.

M. Vaseux (2003), Réalisation d'une application clinet-serveur, multiplateforme et multilingue, PépiTest-Java, Mémoire d'Ingénieur-Maître, IUP-MIME, Université du Maine, Juin 2003.

D. Prévit (2002), Vers un diagnostic de compétences inspectable par différents types d'utilisateurs, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 2002.

Revue professionnelle

É. Delozanne, B. Grugeon (2004), Pépites et lingots : des logiciels pour faciliter la régulation par les enseignants des apprentissages en algèbre, Cahiers Éducation et Devenir, Hors série, Les TIC à l'école : miracle ou mirage ?, septembre 2004, 82-92

Traductions d'articles

Neil Heffernan et Kenneth R. Koedinger, MisLinquist : un système fondé sur le dialogue pour apprendre à exprimer algébriquement des énoncés en langage naturel, STE, vol 9- N° 1-2/2002, 11-35

Michele Cerruli, M. Alessandra Marioti, L'Algebrista, un micromonde pour l'enseignement et l'apprentissage de l'algèbre, STE vol 9- N° 1-2/2002, 140-170

Sites

Formation des enseignants du secondaire à la didactique de l'algèbre élémentaire autour du logiciel Pépite :
http://maths.creteil.iufm.fr/Formation_continue/accueil_form_cont.htm

Téléchargement du logiciel pépite et informations sur les projets Pépite et Lingot
http://pepite.univ-lemans.fr

CHAPITRE 1

LES BASES DU PROJET EN JUIN 2002

Rédigé par E. Delozanne

Lors du démarrage du projet en Juin 2002, un travail pluridisciplinaire avait déjà été mené par les équipes du LIUM, de DIDIREM et des IUFM de Créteil et d'Amiens. Nous rappelons ci-après l'état d'avancement du projet en Juin 2002 et les résultats obtenus par les équipes et sur lesquels se sont appuyés nos travaux dans le projet AD22 de l'appel d'offres Cognitique 2002 :

- Une analyse didactique,
- Un prototype logiciel fondé sur cette analyse.

Nous terminons ce chapitre par une études des usages du logiciel et des questions tant d'ordre didactique qu'informatique soulevées par cette première étude, questions auxquelles nous souhaitons sinon répondre du moins apporter des éléments de réponse dans le cadre de ce projet.

1. LES FONDEMENTS DIDACTIQUES DU PROJET

1.1. Un modèle de la compétence algébrique à la fin du collège

Ce projet s'appuie sur un travail préliminaire de recherche en didactique des mathématiques [Grugeon 1995, 1997]. S'appuyant sur des travaux théoriques et expérimentaux menés dans le domaine ainsi que sur une étude de l'activité en algèbre élémentaire d'une cohorte d'élèves sur une période de plusieurs années, B. Grugeon a établi un modèle multidimensionnel des compétences algébriques attendues des élèves en fin de collège. Les différentes dimensions considérées sont : l'utilisation des lettres (inconnue, variable, nombre généralisé, abréviation ou étiquette), le calcul algébrique, la traduction entre différents registres sémiotiques (graphique, géométrique, algébrique, langue naturelle), les types de rationalité.

1.2. Un outil de diagnostic papier-crayon

Afin de situer les élèves par rapport à ce modèle, B. Grugeon a proposé un outil de diagnostic papier-crayon. Les compétences et les difficultés des élèves en algèbre y sont analysées selon trois entrées : le type de problème (l'algèbre comme un outil de résolution de problèmes arithmétiques, de généralisation, de preuve, de modélisation de situations), les objets de l'algèbre (en particulier l'utilisation des lettres, la production et l'interprétation des expressions algébriques), le calcul formel (aspects syntaxiques, techniques, sémantiques et sémiotiques). Elle propose un test : un ensemble d'une vingtaine d'exercices avec des questions fermées et des questions ouvertes. Une grille d'analyse établie à partir du modèle multidimensionnel des compétences est proposée à l'enseignant (ou au chercheur) pour coder les réponses des élèves aux différentes questions du test. Ensuite, par une analyse transversale du codage obtenu, l'enseignant (ou le chercheur) construit le

profil cognitif de l'élève en l'algèbre. Les figures 5, 6 et 7 montrent des écrans qui présentent des extraits du profil cognitif de Laurent. Un profil est une description en trois niveaux des compétences algébriques des élèves :

- Une description quantitative exprimée en terme de taux de réussite et de traitements algébriques maîtrisés.
- Une description qualitative exprimée en terme de modes de fonctionnement : utilisation des lettres, calcul algébrique, conversion c'est-à-dire l'articulation entre le registre algébrique et d'autres registres sémiotiques, type de rationalité.
- Une description de l'articulation entre les différents cadres et registres (graphique, algébrique, géométrique, langage naturel) sous la forme d'un diagramme.

Ce travail est décrit de façon approfondie dans [Grugeon 1997]. Le test papier crayon et la grille d'analyse « manuelle » sont téléchargeables [Formation 2003].

2. LE PREMIER LOGICIEL PEPITE (PEPITE1)

L'outil de diagnostic papier-crayon s'est révélé trop complexe pour être utilisé par les enseignants dans les classes [Lenfant 1997]. Ainsi le premier travail de recherche du projet Pépite a consisté à mettre en œuvre l'idée d'automatiser l'outil de diagnostic papier-crayon. Ce travail avait pour objectif de montrer [Jean et al. 1997, 1999] :

- qu'il était possible à l'aide d'un ordinateur de collecter des données sur les compétences des élèves (à partir de ces données, les experts pourraient construire les profils cognitifs des élèves) ;
- qu'il était possible d'automatiser (au moins partiellement) ce diagnostic ;
- que les profils cognitifs élaborés aideraient les enseignants à prendre des décisions pour leurs élèves.

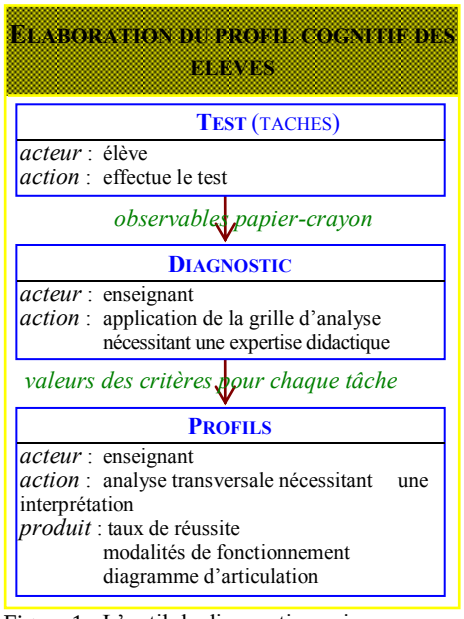


Figure 1 : L'outil de diagnostic papier - crayon.

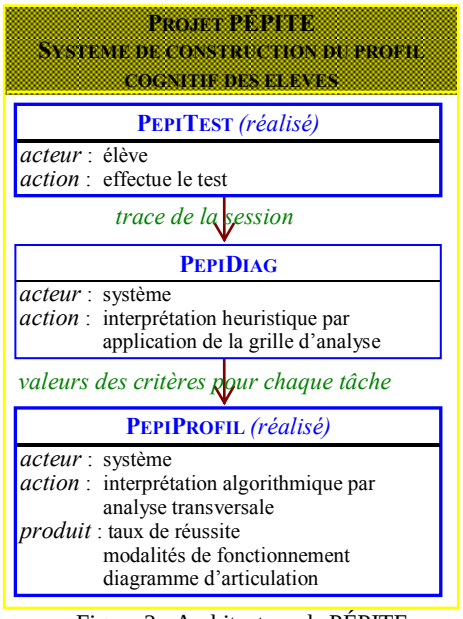


Figure 2 : Architecture de PÉPITE.

Au niveau informatique, ce travail se situe dans les problématiques de conception d'environnements d'apprentissage dans des logiques d'usage développées au LIUM (Vivet et al. 1994, Bruillard et al. 2001]. Il s'appuie sur des méthodologies issues de la didactique des mathématiques [Artigue 1988] et issues du domaine de l'Interaction Humain-Machine [Helander 1997], [Kolski 2001], [Delozanne et al. 2001].

Pépite est un logiciel disponible gratuitement (http://pepite.univ-lemans.fr). La première version a été réalisée en Delphi par Jean [Jean 2000, Jean-Daubias 2002]. Mettant en œuvre la stratégie de diagnostic proposée par B.Grugeon, le logiciel Pépite est constitué de trois modules.

2.1 PépiTest, le logiciel élève

PepiTest est le logiciel destiné aux élèves. Il leur propose de résoudre sur ordinateur 22 exercices inspirés de ceux de l'outil de diagnostic papier-crayon. Il recueille les réponses des élèves aux exercices. Ceux-ci sont constitués de questions fermées (réponses à choix multiples ou de réponse interactives par exemple en cliquant des zones sur un graphique) mais également de questions ouvertes exigeant des élèves la production d'expressions algébriques, de réponses en langage naturel ou de réponses combinant ces deux registres d'expression (nous appelons ce langage le langage mathurel). Pour les chercheurs en didactique, il est important que les élèves puissent formuler eux-mêmes leurs réponses dans leurs propres termes pour pouvoir établir un diagnostic conséquent du point de vue didactique, même si cela rend l'analyse automatique très complexe. L'interface du logiciel a été particulièrement soignée. Il est bien entendu crucial pour le diagnostic que les données recueillies permettent de décrire les compétences des élèves et non les problèmes d'utilisabilité de l'interface. En particulier, dès le début, les chercheurs en didactique des mathématiques s'interrogeaient sur les modifications des tâches mathématiques introduites par les difficultés de l'écriture des expressions algébriques sous forme linéaire avec un clavier et une souris. La figure 3 montre une réponse d'un élève à un exercice proposé par PépiTest.

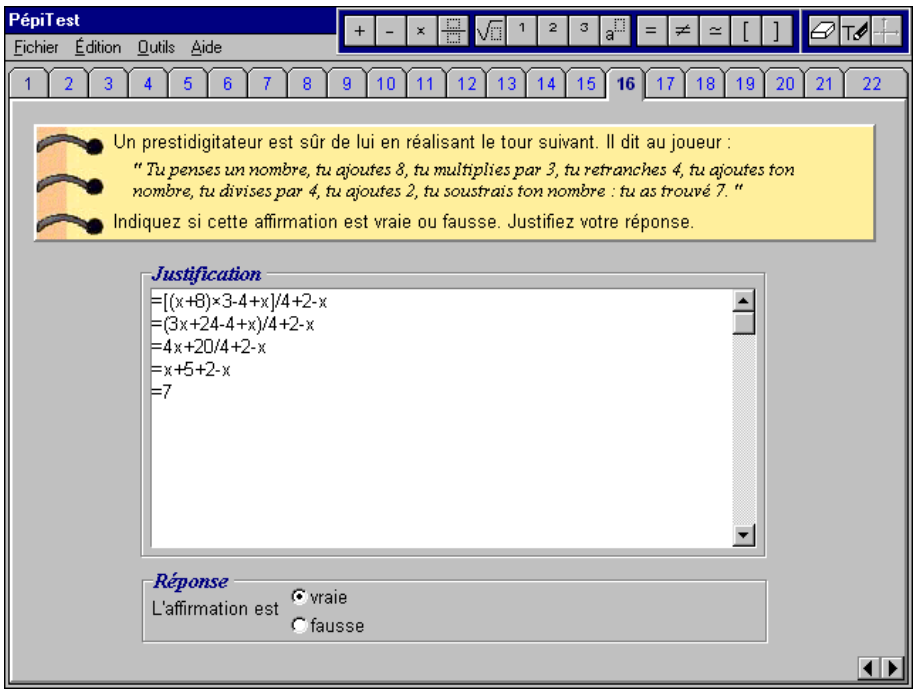


Figure 3 : Les réponses de Laurent à un exercice de PepiTest

2.2. PépiDiag, le logiciel de diagnostic automatique

PépiDiag est le module d'analyse des réponses. Il interprète les réponses des élèves à chaque exercice de PepiTest en appliquant des heuristiques dérivées de la grille d'analyse issue de l'analyse didactique. Comme l'outil de diagnostic papier-crayon, il assortit chaque réponse d'élève avec un item de diagnostic. Nous appelons cette opération le codage des

réponses des élèves et nous en donnons un exemple à la fin de cette section. Ainsi PépiDiag remplit automatiquement une matrice de diagnostic de 55 lignes correspondant au nombre de questions dans PépiTest et de 36 colonnes correspondant aux différentes composantes décrites dans le modèle multidimensionnel des compétences algébriques. En fait, PépiDiag ne remplit que partiellement cette matrice car nous ne savons pas encore comment coder automatiquement toutes les réponses des élèves. Les réponses fermées et les expressions algébriques sont analysées. Les réponses en langage naturel et les réponses mixtes sont très partiellement analysées par recherche de mots clés. Ainsi 75 % des réponses des élèves sont automatiquement analysées.

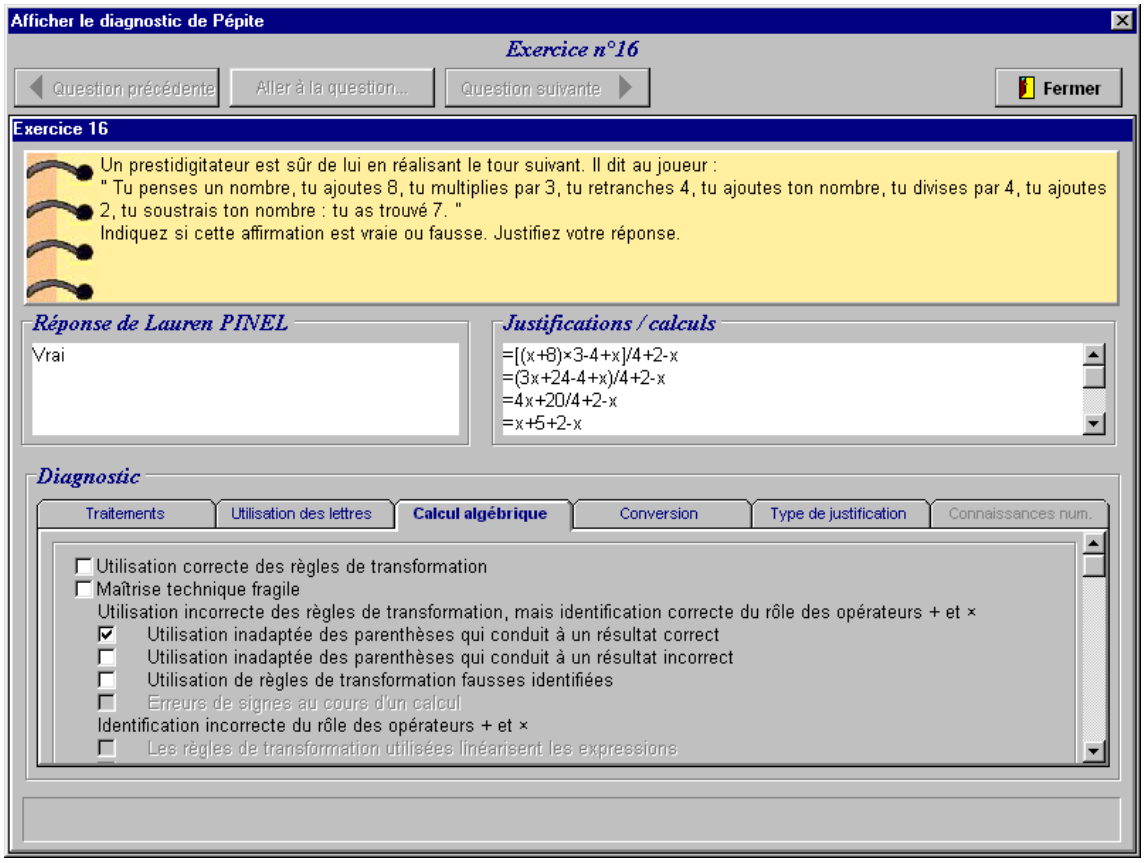


Figure 4: PépiProf, vérification par l'enseignant du codage des réponses de Laurent

2.3. PépiProf, le logiciel enseignant

PépiProf est le logiciel destiné aux enseignants. Il établit le profil de l'élève par une analyse transversale de la matrice et le présente au professeur. Il fournit également un module pour modifier le codage des réponses de l'élève (i.e.. pour modifier la matrice de diagnostic sans qu'elle apparaisse sous cette forme à l'enseignant) afin de permettre à l'enseignant de vérifier le codage effectué par le logiciel et de le corriger ou le compléter, si nécessaire. La figure 4 montre l'interface qui permet au professeur de vérifier et éventuellement corriger le diagnostic du logiciel. Dans la réponse de Laurent représentée sur la figure 3. PépiDiag a codé : traitement incorrect, utilisation correcte des lettres, utilisation incorrecte des parenthèses menant à un résultat correct, traduction correcte du langage naturel en expression algébrique, justification par l'algèbre. L'enseignant peut modifier le codage s'il n'est pas d'accord avec le codage automatique. Les figures 5, 6 et 7 montrent les profils affichés par PépiProf avec les trois descriptions du profil de Laurent. C'est sur cette version 1 de Pépite qu'ont travaillé les différents groupes de travail de l'axe diagnostic entre Septembre 2002 et

Septembre 2003 et en particulier les didacticiens qui ont étudié les réponses des élèves recueillies avec le logiciel PépiTest.

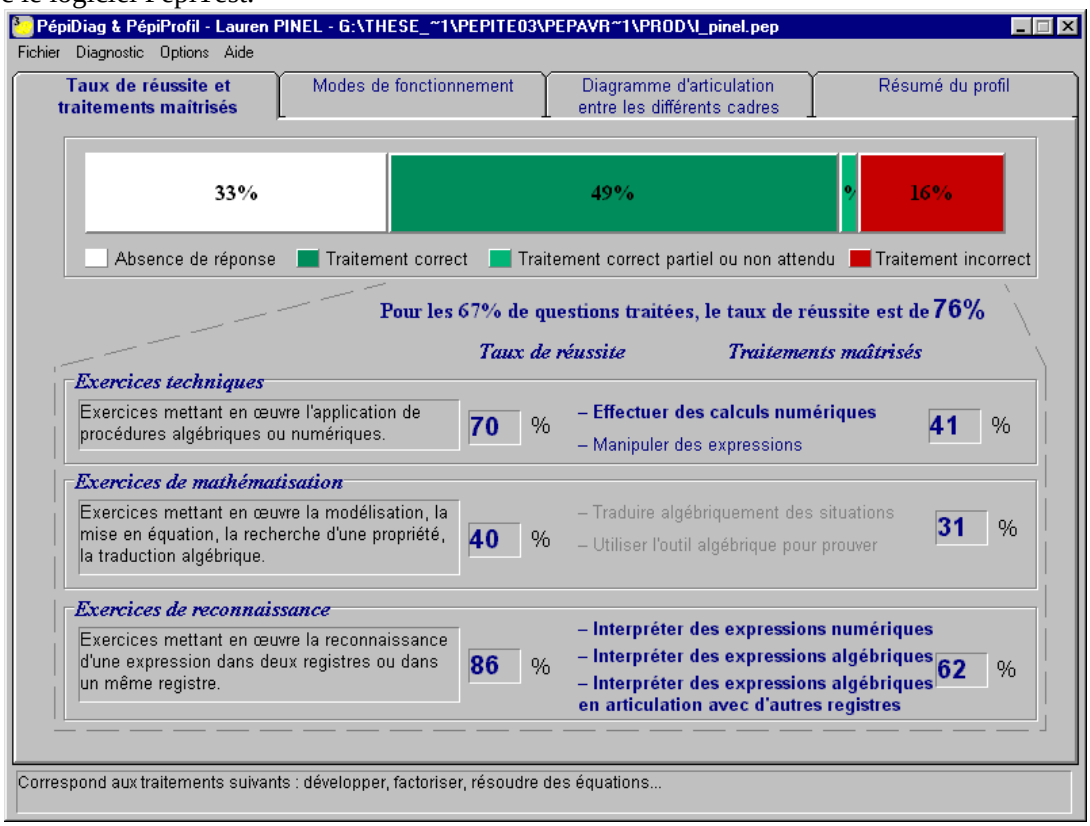


Figure 5 : Description quantitative du profil cognitif de Laurent

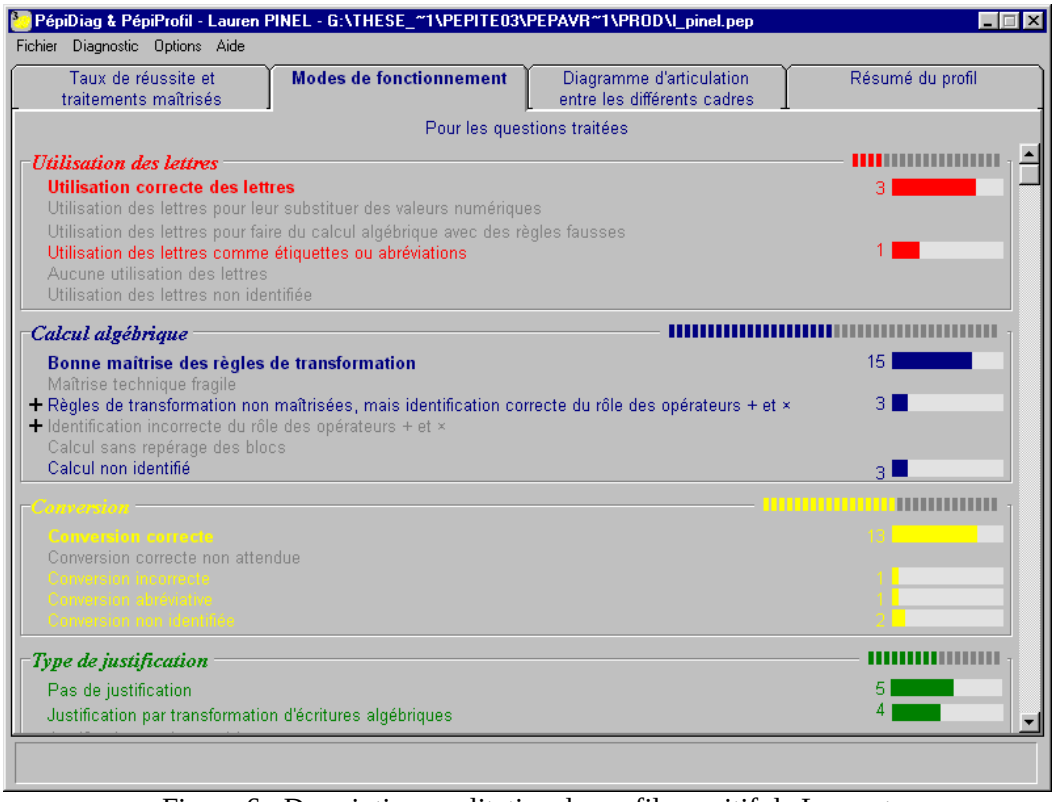


Figure 6 : Description qualitative du profil cognitif de Laurent

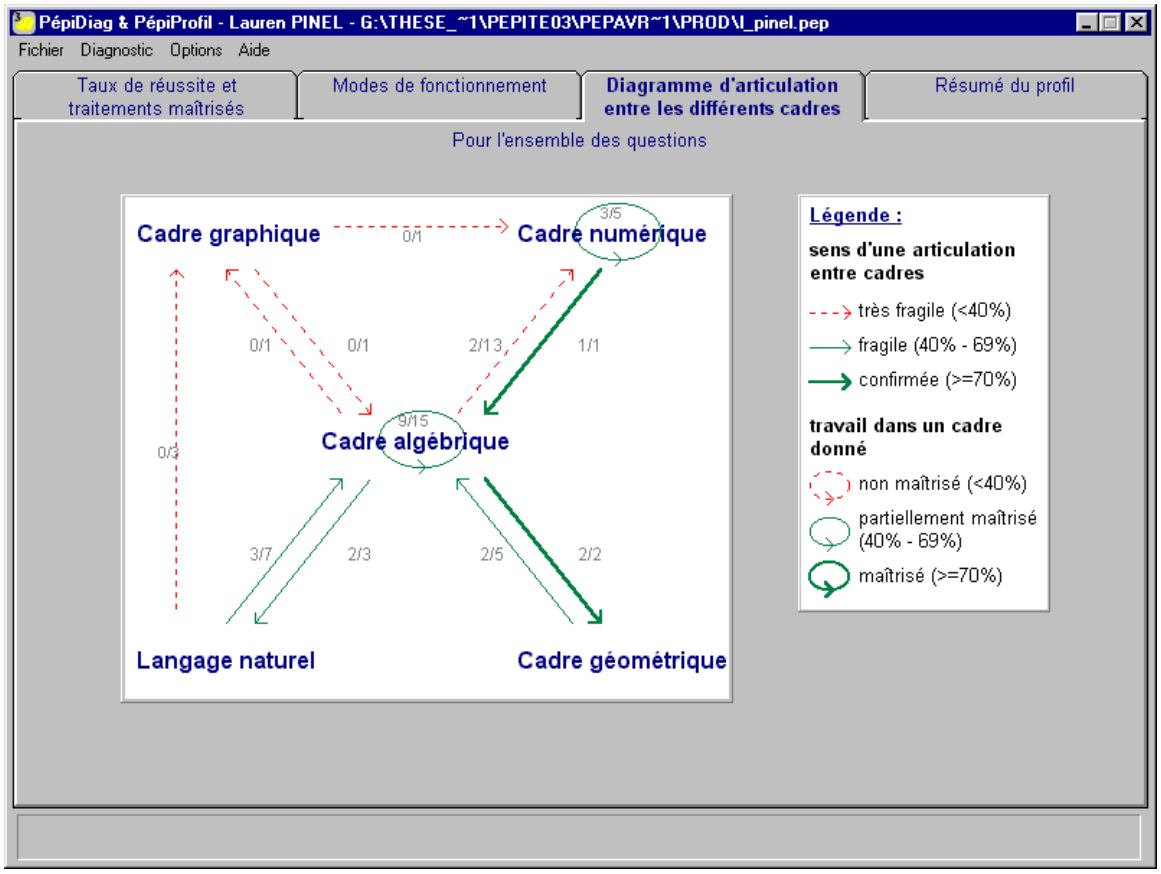


Figure 7 : Diagramme d'articulation entre les différents cadres pour le profil de Laurent

3. ANALYSE DES RETOURS D'USAGE DE PEPITE 1

L'idée de départ du projet Pépite était de tenter d'automatiser (au moins partiellement) un outil de diagnostique papier-crayon construit par des chercheurs en didactique, [Grugeon 1995, Artigue et al. 2001]. Par rapport aux logiciels d'évaluation traditionnels, cet outil a deux caractéristiques principales. D'une part, il donne une description qualitative des compétences des élèves et ne se réduit pas à une analyse en terme de réussite/échec ou de listes d'erreurs, d'autre part, si l'analyse de réponses porte en partie sur des questions fermées (QCM) elle traite un grand nombre de réponses à des questions ouvertes. Nous avons conçu et réalisé un prototype appelé Pépite [Jean 2000] dont l'objectif premier était de montrer la faisabilité informatique du projet [Jean et al. 1999]. L'objectif second était de disposer d'un prototype qui permette d'observer dans un contexte de classe, si les enseignants pouvaient s'approprier l'outil et comment. Dans cette section nous résumons d'abord les utilisations de Pépite1 que nous avons étudiées (entre janvier 2000 et avril 2002) et les leçons que nous en avons tirées.

3.1. Différents contextes d'usage

Nous avons observé l'utilisation de Pépite dans différents contextes [Delozanne et al. 2002]. D'abord nous avons examiné PepiTest en laboratoire, enregistrant une élève en vidéo. Puis environ 200 élèves en fin de collège ou de seconde ont passé le test dans le cadre de leur enseignement normal de mathématiques. Pépite a été utilisé en atelier par des chercheurs ou des formateurs des enseignants. Il a aussi été utilisé dans la formation initiale ou continue des professeurs (IUFM de Créteil, Amiens, Paris, Rennes, Montpellier). Des sessions pilotes ont été menées avec des enseignants expérimentés volontaires. Enfin quelques enseignants nous ont rapporté avoir utilisé Pépite en dehors de notre présence. Le tableau 1 synthétise ces contextes.

Contexte	Situation	Utilisateur	Nombre	Données collectées
Test d'élèves	Classe	élèves	200	Réponses d'élèves Questionnaires Observations Rapports
Recherche didactique	Recherche de régularités dans les profils d'élèves	chercheurs	3	Liste de problèmes d'utilisation ou des bogues Définition de classes de profils
Formation de formateurs d'enseignants	Etude d'un élève en algèbre, étude des compétences en algèbre	formateurs	40	Questionnaires
Formation d'enseignants	Etude d'un élève en algèbre, étude des compétences en algèbre	Stagiaires et professeur en responsabilité	100	Questionnaires Observations
Session pilote	Classes (Aide individualisée et évaluation)	Enseignants	4	Observations Rapports Cassettes audio
Utilisations spontanées	Classes	Enseignants	9	Rapports oral ou courriel

Tableau 1 : Les différents contextes d'expérimentation de la version 1 de Pépite

3.2. Résultats des études sur l'utilisation de Pépite 1

Tous ces tests ont mis en évidence plusieurs résultats au niveau de la conception de chacun des trois modules du logiciel et aussi au niveau de l'activité de l'enseignant avec Pépite.

PépiTest

PepiTest recueille des données, les réponses des élèves, qui peuvent être ensuite utilisées pour le diagnostic. Premièrement, à partir de ces données, les chercheurs en didactique peuvent appliquer la grille d'analyse et construire « manuellement » le profil cognitif de l'élève. Deuxièmement, si nous considérons les réponses de 50 élèves aux exercices de PepiTest, nous obtenons le spectre des réponses prévues par l'analyse didactique a priori. Cela signifie que le logiciel ne diminue pas l'éventail de réponses repérées par l'analyse a priori papier-crayon. Troisièmement, comme nous l'avions anticipé, les élèves ont rencontré des problèmes pour écrire les expressions algébriques « linéaires » avec clavier-souris mais ces difficultés ne les empêchent pas d'en produire. Quatrièmement, malgré des différences locales, des enseignants expérimentés identifient des cohérences de fonctionnement de leurs élèves comparables à celles identifiées avec l'outil papier-crayon [Lenfant 1997]. Ces résultats constituent, à notre sens, une première validation de la faisabilité du projet en ce qui concerne le recueil des données sur l'élève [Jean 2000, Jean-Daubias 2002].

Du côté des enseignants dans les sessions pilotes et les utilisations spontanées, les enseignants ont repéré chez certains élèves des compétences ou encore des fragilités qu'ils n'avaient pas remarquées auparavant chez leurs élèves. La raison principale est que PepiTest propose des exercices plus divers que ceux qui sont habituellement proposés dans les classes de mathématiques. C'est une des raisons pour laquelle les formateurs des enseignants de mathématiques pensent que c'est un outil utile pour aider les enseignants à prendre en compte les différents aspects de la compétence algébrique.

PépiDiag

Les utilisations de PépiDiag ont démontré quelques inconsistances dans la grille d'analyse didactique lorsqu'elle est appliquée de façon systématique et sans discernement par le logiciel. Par ailleurs les utilisateurs doivent compléter 25 % du codage des réponses qui ne sont pas analysées et doivent corriger environ 10 % du codage des réponses effectué par PépiDiag.

Le module PépiDiag ne permet pas un diagnostic complètement automatique fiable. Il permet un diagnostic assisté.

PépiProf

PépiProf assiste l'enseignant dans deux types de tâches : l'analyse des réponses des élèves au test (le codage) et l'étude des profils des élèves. Le module facilitant l'analyse des réponses des élèves (tâche de codage) s'est révélé adapté et est utilisé sans difficulté majeure par chacune des catégories d'utilisateurs. Il est en particulier apprécié par les enseignants stagiaires et par les formateurs. Il donne aux enseignants un cadre pour interpréter les réponses des élèves. Il leur permet de comprendre les items du diagnostic quand ils sont présentés dans le contexte d'un exercice et avec les réponses des élèves.

Le module pour travailler sur le profil de l'élève n'a été utilisé que par les chercheurs en didactique des mathématiques. Ils apprécient particulièrement d'accéder aux items du diagnostic de différentes manières : à partir des réponses d'élèves, à partir des items de diagnostic, à partir de la liste de questions liées à ces items. Mais ce module soulève des difficultés pour les enseignants, particulièrement pour les enseignants expérimentés. Ils ont des difficultés pour comprendre les items du diagnostic quand ils ne sont pas présentés en contexte (dans un exercice avec les réponses des élèves) lorsqu'ils ne connaissent pas le travail didactique sous-jacent. Ce module met en œuvre une expertise didactique qui peut être en contradiction avec des pratiques spontanées de diagnostic.

Dans l'état actuel du développement de logiciel, aucune stratégie d'enseignement n'est proposée pour faire évoluer le profil cognitif. Les enseignants ne sont donc pas motivés pour s'approprier un profil complexe qu'ils ne peuvent pas exploiter.

Exploitation des utilisations de Pépite en classe par l'enseignant

Nous avons observé plusieurs utilisations spontanées de PépiTest pour mettre en place une activité d'apprentissage et non en tant qu'activité de diagnostic, en particulier pour provoquer des débats en binôme ou en classe entière. Les questionnaires remplis par les enseignants, nous ont apportées d'autres informations.

- **Les points positifs relevés par les enseignants :**
  - le logiciel de test propose un large éventail d'exercices ; il donne des idées d'exercices à travailler et de compétences à faire acquérir,
  - l'interface du logiciel de test est soignée et esthétique,
  - le logiciel « marche » du premier coup comme indiqué sur la notice,
  - l'ensemble du logiciel révèle des compétences que les enseignants n'avaient pas remarquées chez des élèves en difficulté et augmente la confiance de l'enseignant dans la réussite de ces élèves (enseignantes confirmées),
  - le logiciel aide à comprendre l'esprit des nouveaux programmes de collège en algèbre (1 enseignante confirmée),
  - le logiciel introduit une médiation qui permet d'instaurer une relation nouvelle avec l'élève sur ses erreurs (1 enseignante confirmée) et 6 mois après l'utilisation du logiciel : « la relation mise en place avec l'utilisation de Pépite a changé l'ambiance en aide individualisée et le regard que les élèves portaient sur mon expertise »,

- le logiciel apporte un éclairage neuf sur les compétences et « aide à prendre conscience des lacunes des élèves » (enseignant débutant) ;

- **Les points négatifs :**
  - des difficultés techniques multiples doivent être surmontées : par exemple pour accéder aux salles informatiques dans certains établissements, pour télécharger et installer le logiciel dans des salles qui ne sont pas reliées au réseau et où tous les disques durs sont verrouillés,
  - des difficultés techniques supplémentaires sont liées à l'utilisation du système : pour récupérer les réponses des élèves, bogues, problèmes d'utilisabilité,
  - la complexité des profils et du vocabulaire utilisé dans ces profils est rebutante, voire rédhibitoire,
  - le test est bien adapté en lycée mais inadapté en collège,
  - l'utilisation de Pépite prend trop de temps auprès des élèves et aussi pour l'enseignant,
  - le logiciel ne fournit pas encore de conseils pour faire évoluer les élèves une fois que l'on a trouvé ce qui ne va pas,
  - les diagnostics automatiques incomplets ou erronés obligent à un travail personnel de l'enseignant conséquent : appropriation du logiciel et de l'analyse didactique, reprise des codages, analyse des profils,
  - certains enseignants disent se sentir pris en défaut car ils ne comprennent pas la description des profils, ou ils n'ont pas réussi à manipuler le logiciel ou bien enfin car le logiciel leur retourne des réponses d'élèves comme un miroir déformant de leur enseignement (professeurs de collège).

Ils font également des suggestions. Comme outil d'évaluation, les enseignants pensent que Pépite est beaucoup trop coûteux en temps. Ils voudraient pouvoir choisir les exercices. Ils demandent à disposer de plusieurs tests avec différents niveaux (4e, 3e, 2nde) afin de pouvoir évaluer l'évolution des apprentissages. La plupart d'entre eux demandent que le logiciel prenne en charge un bilan de compétences à destination de l'élève. En effet il est impossible pour eux de fournir une rétroaction personnelle à chaque élève et il n'est pas viable non plus de faire passer un test sans donner le résultat aux élèves. Certains d'entre eux demandent un profil de la classe au lieu de profils personnels pour organiser les apprentissages en début d'année ou pour créer des groupes de travail. La plupart d'entre eux souhaitent qu'on leur propose des stratégies d'enseignement pour faire évoluer les compétences ou pour remédier aux difficultés qui ont été diagnostiquées. Certains ont rapporté que Pépite fait apparaître pour quelques élèves en grandes difficultés des compétences qu'ils n'avaient pas perçues auparavant et cela augmente alors la confiance de l'enseignant dans les chances de succès de l'élève. Pour une enseignante, l'usage de Pépite augmente aussi la confiance des élèves envers sa compétence professionnelle : l'enseignante s'intéresse à eux individuellement et cherche à les comprendre avec des moyens modernes issues de recherches de pointe.

De l'utilisation de Pépite par des chercheurs notons un fait très intéressant : les experts ne pratiquent pas le diagnostic comme ils le décrivent dans la méthode qu'ils ont proposée et qui est mise en application dans Pépite. Ils procèdent à un « diagnostic adaptatif ». Ils regardent les réponses d'élèves à un exercice significatif et, selon la réponse, ils énoncent une hypothèse générale et vont la confirmer et l'approfondir sur quelques exercices complémentaires. Ainsi lorsqu'ils cherchent à proposer une stratégie de remédiation pour un élève particulier, ils forment leur diagnostic seulement à partir de quelques exercices et non sur le parcours systématique de l'ensemble des exercices du test.

4. LEÇONS ET QUESTIONS

Ce travail auprès des enseignants nous a montré la nécessité de travailler sur deux axes :

- concevoir un logiciel adaptable à différentes situations,
- étudier et instrumenter l'exploitation d'un tel outil de diagnostic dans la classe.

4.1. Définir et caractériser des batteries de tests

En ce qui concerne l'activité des élèves, le modèle de la compétence algébrique nous a permis d'implémenter un logiciel qui recueille des données permettant d'aider les enseignants à identifier les difficultés des élèves en l'algèbre. Même lorsque les enseignants ne connaissent pas le modèle didactique, la manière dont il a été mis en application dans le test et dans le module de codage de PépiProf est bien acceptée et utilisée. Les limitations de ce modèle viennent de ce qu'il est prédéfini et spécifique à un niveau d'étude (fin de collège). Ceci nous amène à de nouvelles questions :

- Est-il possible de définir un modèle des compétences pour chaque niveau scolaire ?
- Comment permettre à des enseignants d'adapter le test à leur pratique de classe ? Comment déterminer les paramètres ?
- Est-il possible de définir des modèles d'exercices à partir desquels les enseignants pourraient construire leurs propres tests ?
- Est-il possible de définir les modèles diagnostiques liés aux modèles d'exercices pour produire du diagnostic quand un professeur a défini un test?

Ces questions sont à la base du travail du groupe 3.

Pour ce qui concerne le module diagnostique, nous avons montré qu'il était possible d'automatiser partiellement le diagnostic en mettant en application le modèle de diagnostic de Grugeon. Deux problèmes se posent.

4.2. Diagnostic assisté

Le diagnostic étant dans la version 1 partiel et non complètement fiable, l'enseignant doit compléter et vérifier le diagnostic. Il est important que le logiciel de diagnostic ait la possibilité d'évaluer le degré de confiance du codage produit afin de permettre à l'enseignant de ne vérifier que les codages qui ne sont pas fiables ou pas faits.

- Comment pouvons-nous introduire cette estimation de la fiabilité dans le logiciel de diagnostic ?

4.3. Diagnostic automatique

Certaines situations nécessitent un diagnostic automatique : par exemple pour étudier de grands corpus ou fournir un bilan de compétences aux élèves. De plus, contrairement à ce que nous pensions au départ, où il nous semblait que les enseignants n'accepterait pas qu'un logiciel évalue leurs élèves, ils sont plutôt demandeurs d'un diagnostic automatique à partir du moment où ils ont compris la façon de coder du système. En effet un diagnostic automatique leur permettrait de gagner du temps pour se consacrer à ce qui les intéresse : organiser les apprentissages.

- Les méthodes linguistiques ou statistiques peuvent-elles nous aider pour améliorer et fiabiliser le diagnostic sur les réponses ouvertes en particulier quand les réponses sont en langue naturelle ?

4.4. Test systématique ou adaptatif ?

Pour ce qui concerne le système entier, il semble que le modèle de diagnostic proposé par les travaux de B. Grugeon soit trop prescriptif. Nous avons noté que B. Grugeon elle-même emploie un

diagnostic adaptatif lié à la réponse des élèves mais également à l'objectif du diagnostic pour définir une stratégie d'enseignement. Ainsi, pour l'analyse ergonomique, le modèle qu'elle a proposé est un modèle de « tâche prévue » et non de « tâche effective ». Ceci explique qu'il soit bien accepté par des débutants mais pas par des experts. Les différences entre les débutants et les experts peuvent être observées aussi dans les termes employés pour décrire le profil de l'élève. Des stratégies de diagnostic adaptatif (i.e. qui posent des exercices différents selon les réponses des élèves) permettraient-elles de mieux modéliser des tâches effectives ?

De plus, un diagnostic adaptatif ne permettrait-il pas de simplifier le diagnostic en proposant un nombre limité d'exercices permettant aux enseignants d'établir un diagnostic rapide qui pourrait être confirmé sur quelques autres exercices ?

A partir de la même analyse didactique, on voit qu'il y a plusieurs méthodes pour diagnostiquer qui sont liées à l'utilisation que l'on veut faire du diagnostic.

- Est-il possible d'identifier plusieurs classes d'utilisations diagnostiques et, pour chaque classe, un logiciel spécifique pour l'instrumenter ?
- Le modèle de compétences des élèves de B. Grugeon est-il assez robuste pour servir de fondement à tous ces logiciels ?
- En particulier, dans ce premier travail, nous nous sommes concentrés sur le transfert sur l'ordinateur des tâches papier-crayon. Comment modifier le modèle pour gérer des tâches algébriques sans équivalent dans le contexte papier-crayon ?

4.5. Exploitation du diagnostic

Pour ce qui concerne le logiciel destiné aux enseignants, la seule partie qui a été employée est, en formation, le module de codage des réponses des élèves et la description quantitative du profil (imprimée pour être donnée aux élèves). Nous avons observé beaucoup d'incompréhension sur la description qualitative. Il semble que ce logiciel soit adapté aux chercheurs en didactique et adapté pour des sessions de formation, moins bien adapté aux professeurs qui, dans la gestion courante de la classe, ont besoin d'un profil plus opérationnel, c'est-à-dire associé à des activités pour le faire évoluer.

- Est-il possible de définir des profils types qui donnent un moyen d'associer des stratégies d'apprentissage de l'algèbre à chacun de ces profils ?
- Ces profils peuvent-ils être présentés de façon compréhensible aux enseignants, voire aux élèves ?
- Comment déterminer les stratégies d'apprentissage associées aux profils ?
- Comment concevoir un logiciel pour aider les enseignants à mettre en œuvre ces stratégies ?

Telles sont les questions auxquelles nous tentons d'apporter des éléments de réponses dans les chapitres suivants sur chacun des trois axes : diagnostic, apprentissage et instrumentation de l'activité des enseignants.

5. REFERENCES

[Artigue 1988] Artigue M. (1988), Ingénierie didactique, Recherche en Didactique des Mathématiques, vol 9, n°2, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1988, p. 281-308.

[Bruillard et al. 2000] Bruillard E., Delozanne E., Leroux P., Delannoy P., Dubourg X., Jacoboni P., Lehuen J., Luzzati D., Teutsch P. (2000), Quinze ans de recherche sur les sciences et techniques éducatives au LIUM. Education et informatique. Hommage à Martial Vivet. Sciences et Techniques éducatives, vol. 7, n°1, Hermès Science, p. 87-145.

[Delozanne 1994] Delozanne E. (1994), Un projet pluridisciplinaire : ELISE, un logiciel pour donner des leçons de méthodes, in Balacheff & Vivet, Intelligence Artificielle et Didactique

des Mathématiques, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble (aussi publié dans Recherches en Didactique des Mathématiques, vol 14 (1/2) p. 211-250, 1994, Éditions La Pensée Sauvage).

[Delozanne et al. 2001] Delozanne E., Jacoboni P. (2001) (Eds.), Interaction Homme Machine pour la formation et l'apprentissage humain, numéro spécial de la Revue Sciences et Techniques Éducatives, vol 8-n°3-4/2001, Hermès 239-274.

[Delozanne et al. 2002] Delozanne E., Grugeon B., Jacoboni P. (2002), " Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation ", In Proceedings of IHM'2002, International Conference Proceedings Series, ACM, 2002, Poitiers, France 25-32.

[formation 2003] http://maths.creteil.iufm.fr, formation continue, algèbre

[Grugeon 1995] Grugeon B. (1995), étude des rapports institutionnels et des rapports personnels des élèves à l'algèbre élémentaire dans la transition entre deux cycles d'enseignement : BEP et Première G, thèse de doctorat, Université Paris VII, décembre 1995.

[Grugeon 1997] Grugeon B. (1997), Conception et exploitation d'une structure d'analyse multidimensionnelle en algèbre élémentaire, Revue de Didactique des Mathématiques, Vol. 17, n°2, pp.167-210, 1997.

[Helander 1997] Helander M., Landauer T., Prabhu P. (1997) (eds.), Handbook of Human Computer Interaction, Elsevier Science B.V., 1997.

[Jean et al. 1999] Jean S., Delozanne E., Jacoboni P., Grugeon B. (1999), A Diagnosis Based on a Qualitative Model of Competence in Elementary Algebra, S. Lajoie & M. Vivet eds, Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Le Mans July 99, IOS Press, Amsterdam, p. 491-498, 1999.

[Jean et al. 1997] Jean S., Delozanne E., Jacoboni P., Grugeon B. (1997), Conception, réalisation et évaluation d'interfaces en EIAO : l'exemple de PéPITE, Actes des 5èmes journées EIAO de Cachan, Hermès, pp. 37-48, 1997.

[Jean 2000] Jean S. (2000), Pépite un système d'assistance au diagnostic de compétences, Thèse de l'Université du Maine, Le Mans, janvier 2000.

[Jean-Daubias 2002] Jean-Daubias S. (2002), Un système d'assistance au diagnostic de compétences en algèbre élémentaire, in Jean-François Nicaud, Élisabeth Delozanne, Brigitte Grugeon (éditeurs), numéro spécial Environnements informatiques d'apprentissage de l'algèbre , Revue Sciences et Techniques éducatives, Hermès, volume 9-n°1-2/2002.

[Kolski 2001a] Kolski C. (2001) (Ed.), Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les systèmes d'information Vol 1, Hermès, 2001, 250 p.

[Kolski 2001b] Kolski C. (2001) (Ed.), Environnements évolués et évaluation de l'IHM, Interaction homme-machine pour les systèmes d'information Vol 2, Hermès, 2001, 250 p.

[Lenfant 1997] Lenfant A. (1997), Étude sur la transposition d'un outil de recherche destiné aux enseignants, Mémoire de DEA de didactique des mathématiques, Université Paris 7.

[pepite 2003] http://pepite.univ-lemans.fr

[Vivet et al. 1994] Vivet M., Bruillard E. (1994), Concevoir des EIAO pour des situations scolaires : approche méthodologique, in N. Balacheff ET M. Vivet, Didactique et Intelligence Artificielle, Éditions La Pensée Sauvage, Grenoble, 1994, p. 273-302.

CHAPITRE 2

RAPPORT D'ACTIVITE SUR L'AXE DIAGNOSTIC

Rapport coordonné par E. Delozanne

1. INTRODUCTION

1.1. Rappel des objectifs

Sur cet axe l'équipe a centré son activité sur les trois objectifs définis dans le projet :

- mettre au point des « profils types » ou plutôt des classes de profils en nous appuyant sur une analyse didactique a priori et une analyse statistique des protocoles d'interaction obtenus avec le logiciel de test Pepite1 ;
- à la lumière des expérimentations en classe déjà menées, construire à partir du test diagnostique, des modèles paramétrables d'exercices, par les enseignants ou par les chercheurs, permettant la génération et l'analyse automatique d'activités de diagnostic par le système informatique ;
- mettre au point plusieurs présentations types de résultats du diagnostic à différents types d'utilisateurs (élèves, enseignants, chercheur) et tester leurs effets, par exemple, l'effet du questionnement des élèves sur leur propre compétence pour l'apprentissage.

La conception d'un système informatique de diagnostic ne pouvant se dispenser de l'analyse de l'activité de diagnostic des enseignants, nous avons travaillé aussi sur l'axe 3 se rapportant à l'instrumentation de l'activité de l'enseignant, mais en adoptant un point de vue de concepteur d'EIAH et non un point de vue ergonomique qui est présenté dans le chapitre 4.

1.2. Organisation du travail et plan de ce chapitre

Nous nous sommes organisés en groupes de travail autour de trois objectifs.

Le premier objectif vise à *fiabiliser le diagnostic automatique* en améliorant le diagnostic des réponses aux questions ouvertes. Dans ce cadre deux études exploratoires ont été menées qui font l'objet de la section 2 de ce chapitre. La première a consisté à mettre en œuvre une analyse automatique des raisonnements algébriques des élèves sur un exercice de preuve. Ce travail a été mené par deux informaticiennes (D. Prévit, E. Delozanne) et une didacticienne (B. Grugeon). Il a donné lieu à un mémoire de DEA et à deux publications [Prévit 2002, Delozanne et al. 2003, Prévit et al. 2004]. La seconde étude concerne l'analyse des justifications que les élèves expriment en utilisant la "langue naturelle" ou plutôt une langue où ils incorporent des expressions mathématiques à des mots d'usage courant. Ce travail a été mené principalement à l'IUFM de Créteil par une linguiste (S. Normand), une didacticienne (L. Coulange), une informaticienne (E. Delozanne) avec la participation de formateurs d'enseignants (M.-C. Marillier, J.-F. Chesné, F. Delzongle). Il a donné lieu à des publications en français et en anglais (Normand et al. 04a et b). Par ailleurs et toujours dans l'objectif de fiabiliser le système, le portage du système dans le langage Java a été initié dans le cadre d'un stage de maîtrise au LIUM [Vaseux 2003]. La version Java de PépiTest est téléchargeable sur le site du projet [site Pépite]. Enfin une étude exploratoire a été menée par l'équipe de l'IUFM de Créteil auprès d'une dizaine d'élèves pour appréhender la vision des élèves sur leur compétence algébrique dans l'objectif de faire un retour vers l'élève du résultat du diagnostic. Ces entretiens sont en cours d'exploitation.

Le deuxième objectif consiste à concevoir un système informatique qui supporte des situations de diagnostic adaptables par les enseignants à différents contextes d'évaluation de leurs élèves. Un groupe de travail

composé principalement d'informaticiens du LIUM (P. Jacoboni, D. Prévit, E. Delozanne et deux étudiants), et occasionnellement de didacticiennes de DIDIREM (L. Coulange et B Grugeon), d'une ergonome de Paris 8 (J. Rogalski) a travaillé à partir des retours d'utilisation à la définition de scénarios d'utilisation et à la conception d'une nouvelle architecture du système de diagnostic pour en faire un système plus ouvert et adaptable. Ces travaux sont présentés dans la section 3 de ce chapitre. La conception de ce système qui n'est pas encore aboutie a donné lieu à des présentations dans des séminaires et des publications de types jeunes chercheurs ou papier court [Prévit 2003].

Le troisième objectif, très lié aux deux autres axes du projet, a concentré l'essentiel de nos efforts. Il fait l'objet de la section 4 de ce chapitre. Il s'agit de concevoir un *assistant à l'exploitation du diagnostic* en classe par les enseignants. Notre recherche se fonde sur deux hypothèses de travail :

- H1 : Pour prendre des décisions didactiques sur les activités d'apprentissage adaptées au profil cognitif d'un élève, il est nécessaire de disposer d'un modèle à un niveau d'abstraction plus élevé à côté du modèle cognitif très fin proposé par Pépite. Nous avons appelé ce niveau des "*profils types*", puis "des *classes de profils*" et enfin des "*stéréotypes*" pour adopter une terminologie en cours dans la communauté de recherche s'intéressant à la modélisation des utilisateurs de systèmes interactifs (« user modelling ») et plus particulièrement à la modélisation des apprenants (« student modelling »).
- H2 : Les stéréotypes constituent un outil conceptuel pour favoriser l'appropriation par les enseignants d'un artefact complexe comme l'est le logiciel Pépite car il permet d'articuler diagnostic individuel et "géographie de la classe" pour organiser la régulation des apprentissages en classe c'est-à-dire pour faire progresser l'ensemble de la classe en respectant les différences individuelles.

Ces hypothèses de travail et les questions de recherche associées sont présentées dans la section 4.1.
La première étape du projet a consisté à identifier les stéréotypes et à définir la procédure de classement d'un profil dans un des stéréotypes. Ce travail a été mené principalement par B. Grugeon, J.-M. Gélis et J. Rogalski et est décrit dans la section 4.2.
Parallèlement, une étude ergonomique sur l'activité de diagnostic des enseignants de mathématiques a été menée par J. Rogalski et trois de ses étudiantes. Ce travail est décrit dans le chapitre 4 de ce rapport. Nous résumons dans la section 4.3 du présent chapitre les résultats pertinents pour la mise en œuvre des stéréotypes.
À partir de ces premiers résultats, un travail de toute l'équipe avec la participation d'enseignants a conduit à concevoir un logiciel fondé sur les stéréotypes pour assister la régulation des apprentissages en algèbre dans la classe. Le travail coordonné principalement par C. Vincent et E. Delozanne a porté sur la définition des catégories et des différents niveaux de modélisation, sur leur expression dans le vocabulaire-métier des enseignants, sur la présentation sous une forme facilitant l'exploitation et enfin sur la réalisation informatique d'un logiciel PépiStéréo mettant en œuvre ces différentes modélisations. Cette recherche a donné lieu a une publication en français et en anglais [Vincent et al. 2005, Delozanne et al. 2005] et est l'objet de la section 4.4.
Enfin la section 4.5 aborde les différentes démarches mises en œuvre pour mettre à l'épreuve nos hypothèses de travail et tester la validité des modèles proposés et compare notre démarche à des travaux sur les stéréotypes dans le domaine du « Student Modelling ».

La section 5 conclut ce chapitre par un bilan des résultats sur l'axe diagnostic, une discussion sur leurs limites et les perspectives ouvertes par ces travaux.

2. VERS UN DIAGNOSTIC AUTOMATIQUE PLUS FIABLE

Rédigé par E. Delozanne, D. Prévit, L. Coulange

Depuis le milieu des années 80 l'ingénierie des Interactions Humains-Machines (IHM) a mis au point un certain nombre de méthodes et de techniques de conception centrée-utilisateur [Norman 1986, Schneiderman 1992, Gould 1997, Kolski 2001]. Toutes ces méthodes s'appuient sur une approche itérative de la conception de logiciels qui recommande de concevoir, développer et tester des prototypes très tôt dans le développement d'un projet. Au début il s'agit de développer des prototypes « low-tech » (histoires, scénarios, maquettes papier-post-it, vidéo, présentation de type PowerPoint) puis quand on avance dans la définition des problèmes et de leur solution, les prototypes se rapprochent du système final. Les itérations s'arrêtent quand un certain nombre d'objectifs sont atteints. Les chercheurs et les professionnels de ce domaine s'accordent sur

le fait que, dans le cas de la conception de système complexes ou très novateurs, il est impossible de faire une analyse des besoins exhaustive a priori car les besoins et l'activité des usagers sont modifiés en profondeur par l'introduction d'un nouveau système informatique. De plus, la construction de prototypes permet d'impliquer les utilisateurs finaux dans la conception et en particulier d'organiser des tests dans le contexte de travail en amont de développements coûteux. Le projet Pépite se situe dans cette approche itérative et incrémentale de la conception de logiciels.
L'idée de départ du projet Pépite était de tenter d'automatiser (au moins partiellement) un outil de diagnostique papier-crayon construit par des chercheurs en didactique, [Grugeon 1995, Artigue et al. 2001]. Nous avons conçu et réalisé un prototype appelé Pépite dont l'objectif premier était de montrer la faisabilité informatique du projet [Jean et al. 1999, Jean 2000]]. L'objectif second était de disposer d'un prototype qui permette d'observer dans un contexte de classe, si les enseignants pouvaient s'approprier l'outil et comment [Delozanne et al. 2002b]. Le chapitre précédent résume ces observations. Ce prototype a permis une étude d'un corpus de 200 réponses d'élèves par trois chercheurs en didactique pour construire les classes de profils. Les résultats de cette étude sont présentés dans la section 4. Mais l'utilisation de Pépite par des chercheurs a été également riche d'enseignement pour l'équipe de conception. Toutes ces études ont montré certains défauts du premier prototype. En particulier elle a mis en évidence certains bogues et l'insuffisance du diagnostic automatique sur des exercices clé pour le diagnostic humain particulièrement les exercices où les élèves expriment leur réponse de façon non contrainte. En effet dans le logiciel Pépite1 seules les réponses à choix multiples et les réponses algébriques sur une ligne étaient analysées ; les réponses en langage naturel et les raisonnements algébriques n'étaient pratiquement pas analysés.
Dans cette section nous présentons deux études dont l'objet est d'améliorer le diagnostic des réponses aux questions ouvertes. La première [Prévit 2002, Prévit et al. 2004] est présentée dans la section 2.1 et concerne l'analyse du raisonnement algébrique des élèves dans un exercice particulier de modélisation pour conduire une preuve. La seconde concerne l'analyse des justifications des élèves en langue naturelle[Normand et al. 2004a et b, Normand et al. 2005] et est présentée dans la section 2.2.

Versions	**Auteurs**	**Caractéristiques**
Pépite 1	S. Jean (2000)	Delphi 1 Diagnostic des questions fermées, des réponses algébriques sur une ligne Très peu de langage naturel
Pepite 1.2 (téléchargeable sur [site pépite])	D. Prévit (2002)	Delphi 1 Amélioration du diagnostic pour un type de raisonnement algébrique
Pepitest-Java (téléchargeable[site pépite])	M. Vaseaux (2003)	Java, - impression du test et des réponses des élèves - version client serveur
PépiStéréo	septembre 2004 C. Vincent	XML et XSL, Java Intégration des stéréotypes
SuperPépite PepiGenExo	En cours de spécifications	Thèse en cours de D. Prévit Génère des exercices de diagnostic du type prestidigitateur

Tableau 1 : Les différentes versions du logiciel de diagnostic

Parallèlement à ce travail de recherche sur l'analyse des réponses ouvertes que nous présentons ici un travail de développement informatique a été mené: Quelques bogues mineurs ont été corrigés. L'analyse des expressions algébriques a été revue et étendue afin d'analyser toutes les réponses algébriques (seules les réponses sur une ligne étaient analysées dans la version 1). Une étude systématique du code informatique de PépiDiag et une simplification de la grille d'analyse didactique de Grugeon ont permis d'éliminer certaines incohérences dans le diagnostic qui sont apparues quand on a systématisé le diagnostic pour l'automatiser. Ce travail s'est avéré indispensable comme préalable à la mise en place des formations des enseignants en algèbre autour du logiciel Pépite et permettre les observations de l'équipe d'ergonomes de J. Rogalski. De plus le logiciel dont le développement a commencé en 1996 est écrit en Delphi 1[1] ce qui commence à poser

[1] La version actuelle est la version 6.

des problèmes de compatibilité avec les systèmes d'exploitation actuels. Enfin il ne tourne que sous Windows et est donc inaccessible aux utilisateurs Mac ou Linux. Nous avons donc décidé de développer une nouvelle version du logiciel en Java pour tourner sous toutes les plateformes. Ce logiciel est opérationnel et téléchargeable [site Pépite]. Nous ne détaillons pas davantage dans ce rapport ces travaux de maintenance informatiques qui sont décrits dans [Prévit 2002] et [Vaseux 2003]

2.1. Vers une analyse automatique des raisonnements algébriques

Un exercice de modélisation pour conduire une preuve, l'exercice dit du prestidigitateur (Cf. Figure 1 dans ce chapitre et Figure 3 dans le chapitre précédent), très important dans le diagnostic humain établi par les didacticiens de l'équipe n'était pas du tout analysé dans la version 1 de Pépite (version 2000). Les élèves, sur cet exercice, répondent souvent sur plusieurs lignes et en utilisant soit plusieurs expressions numériques et algébriques, soit du langage naturel soit les deux. De plus l'analyse didactique a priori de cette exercice est complexe (Cf. Annexe A2). Un travail mené de juin à Décembre 2002 par D. Prévit (en coopération avec B. Grugeon et E. Delozanne) a permis l'analyse automatique de ce type d'exercice par le logiciel Pépite (version 2002).
Nous commençons par présenter l'analyse didactique a priori mis en œuvre par le logiciel à partir d'exemples de réponses et du diagnostic effectué automatiquement par PépiDiag sur ces réponses. Puis nous décrivons la méthode que nous avons mise au point pour obtenir ce résultat capital pour la fiabilité du diagnostic automatique.

2.1.1 Quatre exemples

Le tableau 2 présente les réponses de quatre élèves et le diagnostic établi automatiquement par le logiciel suite à notre travail (c'est que nous appelons le codage des réponses des élèves à un exercice). Pépite ne construit pas un bilan sur un seul exercice mais sur un ensemble d'exercices représentatif de la compétence algébrique.

Khemarak	Nicolas	Karine	Laurent
Soit 5 un nombre ((5+8)×3-4+5)/4+2-5=7 ? ((13)×3-4+5)/4+2-5=7 ? (39-4+5)/4+2-5=7 ? 10+2-5=7 ? 10-3=7 ? 7=7 ? Oui donc cela marche	3 + 8 = 11 11 × 3 = 33 33 - 4 = 29 29 + 3 = 32 32/4 = 8 8 + 2 = 10 10 - 3 = 7	x + 8 = 8x 8x 3 × 8x = 24+3x= 27x 27x-4 = 23x 23x+x=24x 24x/4=6x 6x+2=8x 8x-x=7	=[(x+8)×3-4+x]/4+2-x =(3x+24-4+x)/4+2-x =4x+20/4 + 2-x =x+5 +2-x =7
Preuve par l'exemple	Preuve par l'exemple	*formel scolaire*	*preuve algébrique*
expression globale parenthésée	expression partielle	*expression partielle enchaînée en succession d'opérations*	*expression globale parenthésée*
écritures correctes	écritures correctes	*= annonce un résultat identification incorrect de + et × (assemble les termes)*	*erreur de parenthèse avec mémoire de l'énoncé*

Tableau 2 : solutions proposées et leur analyse automatique par le logiciel Pépite

Cependant à partir du diagnostic des réponses à cet exercice on peut émettre les hypothèses suivantes.

- *Khemarak* n'est pas encore entré dans une démarche d'utilisation de l'algèbre pour prouver (preuve par l'exemple). Par contre il manipule globalement l' expression numérique qui est correctement parenthésée.
- *Nicolas* utilise lui aussi une preuve par l'exemple et maîtrise ces calculs simples. De plus il utilise une démarche arithmétique en indiquant une suite de calculs où le signe égal « annonce » un résultat.

- *Karine*, bien qu'elle utilise la lettre x, sa réponse est considérée comme « justification par le formel scolaire » car elle utilise des règles fausses bien connues des enseignants et des chercheurs en didactique.
- *Laurent* adopte une démarche algébrique et son raisonnement prouve qu'il sait traiter des expressions équivalentes. Il ne maîtrise pas encore parfaitement l'utilisation de parenthèses mais il garde le sens des opérations.

PépiDiag de la version 1 codait automatiquement 75 % des réponses. Il analysait correctement les réponses aux QCM et une partie des réponses aux questions ouvertes (expression algébriques sur une ligne et certaines réponses en langage naturel). Les justifications aux questions ouvertes, en particulier les justifications de l'exercice du « prestidigitateur » qui comportent des expressions algébriques sur plusieurs lignes n'étaient pas analysées dans la version 1.

2.1.2 Fonctionnement du système de diagnostic

Afin de pouvoir coder les réponses à cet exercice, le logiciel doit analyser la production d'expressions équivalentes. Pour cela nous avons repris la construction de l'arbre représentant les expressions algébriques entrées par les élèves en généralisant et systématisant l'approche que Jean [Jean 2000] avait mise en œuvre seulement sur un exercice simple (exercice 3) dans la version 1. Ensuite, nous comparons ces arbres avec les arbres construits à partir des expressions algébriques attendues spécifiées par l'analyse didactique a priori. Le tableau 3 présente quelques règles de transformation erronées spécifiées dans l'analyse didactique a priori de l'exercice.

identification incorrect du rôle des opérateurs + et ×	Utilisation inadaptée des parenthèses qui conduit à un résultat correct	Utilisation inadaptée des parenthèses qui conduit à un résultat incorrect
$x + a \rightarrow x\ a$ $a\ x \pm b \rightarrow (a \pm b)\ x$ $a\ x - x \rightarrow a - 1$	$(a + b) \times c \rightarrow a + b \times c$ puis $a + b \times c \rightarrow$ résultat de $(a + b) \times c$ Il y a mémoire de l'énoncé $(a + b)/d \rightarrow a+b\ /d$ puis $a + b/d \rightarrow$ résultat de $(a/d + b/d)$ Il y a mémoire de l'énoncé (exemple de Laurent)	$(a + b) \times c \rightarrow a + b \times c$ puis $a + b \times c \rightarrow$ résultat de $(a + b \times c)$ Il n'y a pas mémoire de l'énoncé $(a + b)/d \rightarrow a+b\ /d$ puis $a + b/d \rightarrow$ résultat de $(a + b/d)$ Il n'y a pas mémoire de l'énoncé

Tableau 3 : règles erronées de transformation spécifiée dans l'analyse didactique a priori.

Reprenons l'exemple de Laurent dans l'exercice du « prestidigitateur » pour illustrer le fonctionnement du diagnostic automatique que nous avons mis en place. Du point de vue de l'analyse a priori, l'élève est dans une démarche algébrique (code R1 : « Type de justification », justification par l'algèbre). L'analyse de l'expression écrite à la première ligne fait apparaître une expression complètement parenthésée qui traduit globalement l'énoncé du problème (code L1 : « Utilisation des lettres », utilisation correcte des lettres, code C1 : « Conversion », conversion correcte). Les lignes 3 et 4 de la réponse de l'élève témoignent pour le « Calcul algébrique » d'une utilisation inadaptée des parenthèses qui conduit cependant à une réponse correcte (code M31).
L'algorithme que nous avons mis en place commence par construire un arbre représentant l'expression algébrique de la première ligne. Il repère d'abord la présence de l'utilisation de lettres (R1), puis que l'expression produite par l'élève est l'expression globale complètement parenthésée attendue (L1, C1). Il construit ensuite les arbres correspondant aux lignes suivantes et, par comparaison avec les arbres obtenus à partir de l'analyse a priori, repère et code les erreurs éventuelles, ici M31. Enfin l'erreur décelée amène à évaluer le traitement algébrique comme étant incorrect (T3). La Figure 1 présente l'énoncé de l'exercice du prestidigitateur, la réponse d'un élève et une partie du codage établi par le logiciel de diagnostic (affichage en clair du codage M31 : utilisation inadaptées de parenthèses).
Le codage automatique de cet exercice est une amélioration capitale par rapport à la version 1. D'une part, analyser les justifications de cet exercice permet d'envisager l'analyse des réponses à des exercices mettant en

oeuvre des tâches de résolution d'équations, de systèmes d'équations, de mathématisation, de résolution de situations mathématiques appliquées à d'autres domaines que le domaine algébrique (géométrique, numérique, fonctionnel). D'autre part, cet exercice peut être repéré comme un exercice clé en vue d'un diagnostic adaptatif. Il permet d'émettre des hypothèses sur des cohérences locales dans le fonctionnement des élèves en algèbre telles qu'elles ont été définies par B. Grugeon dans son modèle multidimensionnel de la compétence algébrique : au niveau du type de traitement algébrique, du statut des objets et des lettres mis en œuvre dans la résolution, des conversions entre différents registres sémiotiques, de la gestion dans le registre des écritures algébriques, du niveau de rationalité. Enfin l'étude et la mise en œuvre informatique du diagnostic sur cet exercice nous a permis d'envisager une approche du diagnostic plus générale que celle qui avait été mise en œuvre dans la version 1, nouvelle approche que nous exposons à la section 3.

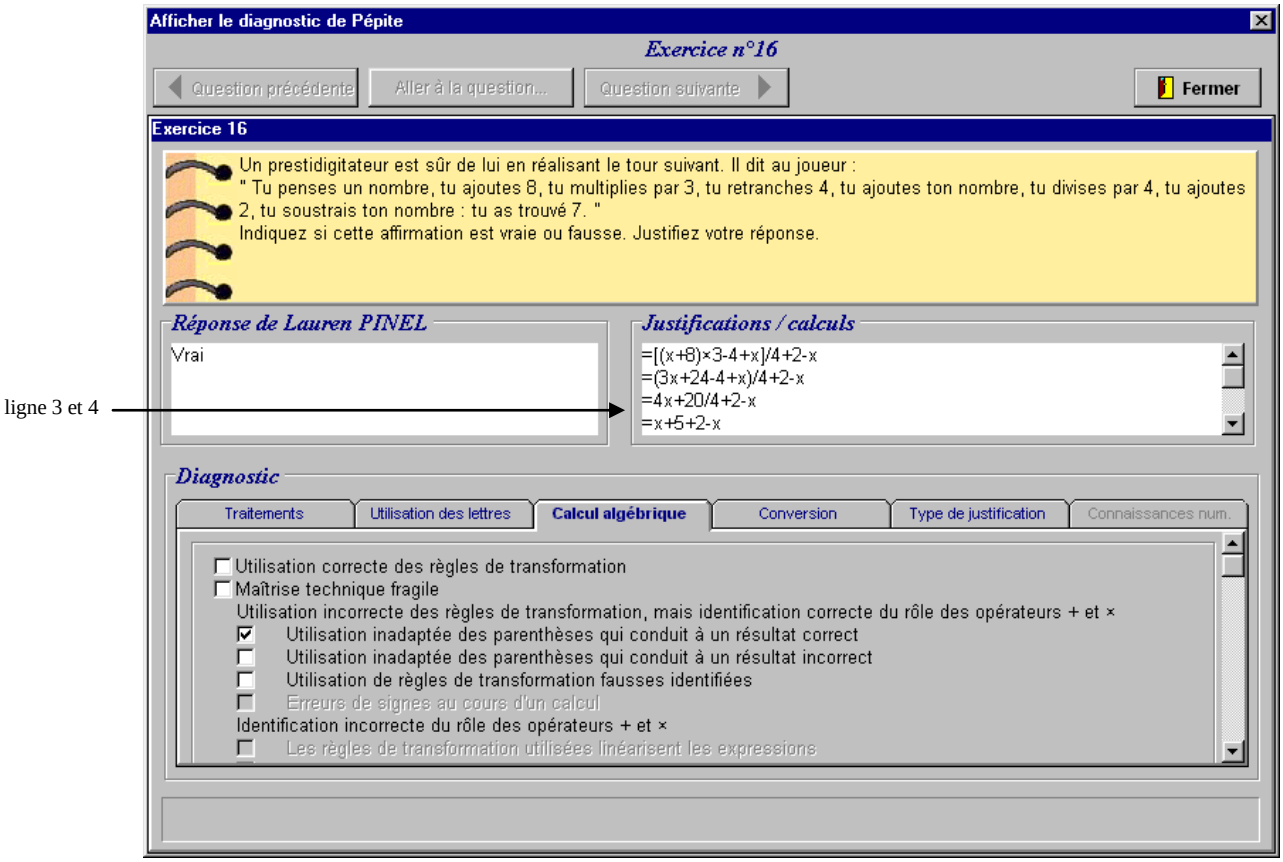


Figure 1 : résultat du codage automatique de l'exercice du prestidigitateur

2.2. Étude exploratoire des justifications en langage naturel

Afin d'améliorer le diagnostic automatique des réponses aux questions ouvertes de Pépite, nous nous sommes posés la question du traitement des productions spontanées d'élèves faisant éventuellement intervenir le langage naturel. De fait, dépassant le cadre même de ce projet, l'analyse des réponses d'élèves exprimées dans leurs propres mots est un verrou sur lequel butent de nombreux projets de e-learning [Aleven et al. 2003 Rosé et al. 2003]. Beaucoup de travaux s'intéressent à l'analyse automatique des explications produites en langage naturel et des interactions verbales d'étudiants (avec des pairs, avec l'enseignant) ou se centrent sur l'utilisation de modèles linguistiques dans la conception de logiciels d'apprentissage. Comment prendre en compte la diversité des productions spontanées d'élèves « dans leurs propres mots » dans une analyse informatisée ? En quoi la nature de ces productions peut-elle nous informer sur les apprentissages ou leurs dysfonctionnements ?

Pour les didacticiens des mathématiques de notre équipe, il s'avère néanmoins indispensable de recueillir des réponses où les élèves s'expriment dans leurs propres termes, même si le logiciel n'est pas capable à ce jour d'en faire une analyse automatique complète et fiable. Nous avons dès lors mis à profit les compétences

d'une chercheure en linguistique au sein de notre équipe (Sylvie Normand) pour amorcer une étude apportant des éléments de réponses aux questions posées ci-dessus, dans le contexte spécifique du logiciel Pépite.

2.2.1 Le deuxième exercice de Pépite

Cette étude se base sur l'analyse des productions en réponse au deuxième exercice de Pépite, qui peut amener la production d'un discours d'élève en langage « mathurel » pour justifier sa réponse. Par mathurel, nous entendons langage utilisé par les élèves, mélangeant le langage naturel et l'emploi de termes spécifiques aux mathématiques [Rasseneur et al. 2002].

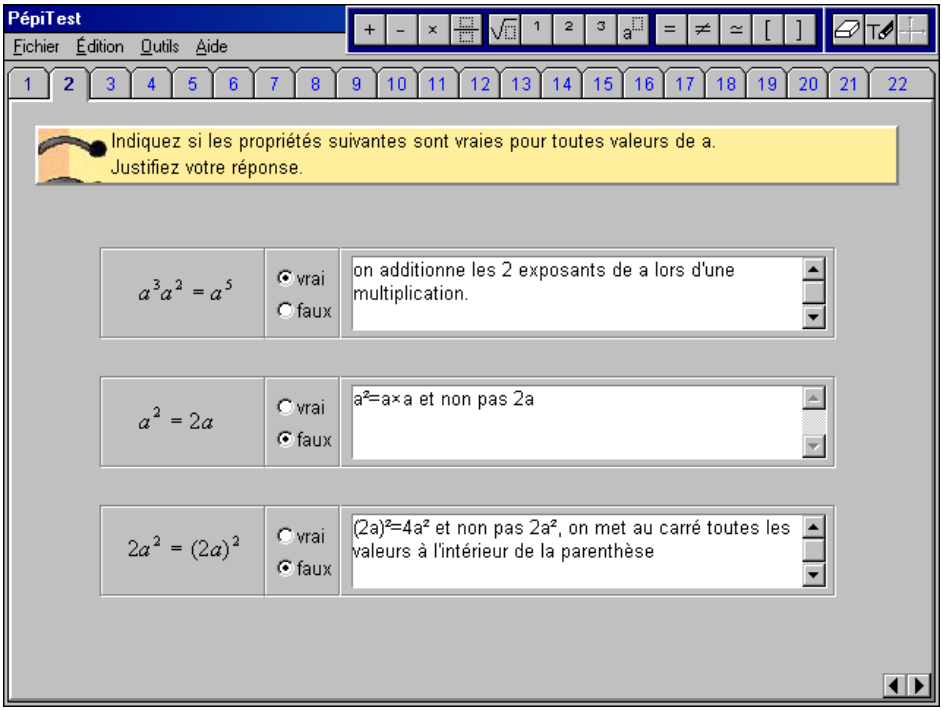


Figure 2: Réponses d'Arthur à l'exercice 2 de PépiTest

Niveau de rationnalité, preuve par…	Type de justifications	Registre	Exemples de justification d'élèves en réponse à la première question de l'exercice 2
Exemple numérique	Essayer avec un ou plusieurs nombres	numérique	$2 \times 2^2 = 32$
Formel scolaire	Donner une règle formelle scolaire	langage mathurel	"On ne doit pas multiplier les exposants" "C'est une loi fondamentale"
Explication	Donner des explications	langage mathurel	"c'est vrai car les exposants sont additionnés"
algèbre	Donner une règle correcte ou une définition	algébrique	$a^2 a^3 = a^{2+3}$ $a^n a^p = a^{n \times p}$
		langage mathurel	Le produit de deux nombres identiques à exposants différents est ce même nombre mais avec leurs exposants ajoutés tous deux, donc a puissance 2+3

Tableau 4. Analyse (humaine) de justifications d'élèves associées à l'égalité "$a^2 * a^3 = a^5$" [Grugeon 1995**]**

Le type de tâche retenue porte dès lors sur « *valider ou invalider l'égalité de deux expressions algébriques par l'assertion vrai/faux puis justifier cette assertion* », correspondant à l'exercice 2 cité ci-dessus (fig. 2). Cet exercice est constitué de trois questions, et pour chaque question, la réponse de l'élève est composée d'un choix (vrai/faux) et d'une justification (correspondant aux arguments donnés pour justifier le choix vrai/faux). Le tableau 4 montre une partie de l'analyse didactique pré-existante des justifications produites par les élèves sur cet exercice. Dans cette analyse didactique pour détecter que les étudiants s'appuient sur des arguments de

l'autorité scolaire, on relève des expressions : « il faut », « on doit », « on ne peut pas » ou aussi des règles fausses. En d'autres termes, il s'agit pour ces élèves de respecter des règles formelles, apparemment dénuées de sens pour eux. Cette première classification semblait suffisante pour le diagnostic humain, mais manquait de précision pour être utilisée de façon systématique par un système informatique.

Pour améliorer le diagnostic automatique les concernant, nous avons décidé de mener une étude exploratoire des données recueillies en réponse à cet exercice, d'un point de vue linguistique et d'articuler ce point de vue avec le point de vue didactique.

2.2.2 Méthodologie

Nous nous sommes fondés dans un premier temps sur un corpus constitué des traces produites en réponse à cet exercice par 168 élèves de troisième et seconde ayant passé le test avec le logiciel Pépite, Les justifications sont de différents ordres : justification algébrique, en langage mathurel, mixte, absence de justification. L'étude porte sur les élèves ayant donné au moins une justification exprimée en langage mathurel (52 productions présentées en annexe A3, triées par question).
Les justifications écrites par les élèves sont étudiées comme des actes de discours [Searle 1969] accomplis par les élèves dans le contexte de la tâche considérée. Nous relions ce que disent les élèves (actes locutionnaires), à ce qu'ils signifient en disant cela (actes illocutionnaires) et à ce qu'ils accomplissent en disant cela [Austin 1962]. Dans le cadre de cette étude, les actes de langage produits par les élèves sont conditionnés par le contexte (ici de justifier leurs choix vrai/faux). Nous apprécions la force illocutionnaire des énoncés produits par les élèves en fonction de l'objectif de l'énonciation, correspondant à la tâche prescrite : « valider ou invalider l'égalité entre deux expressions algébriques par le choix vrai/faux et justifier ce choix ». Nous nous inscrivons dans le courant de la pragmatique intégrée [Ducrot 1984] qui associe à la description linguistique les caractéristiques pragmatiques de l'énonciation. Nous relevons ainsi des marqueurs et des structures linguistiques formelles utilisées par les élèves et les interprétons afin d'octroyer à leurs justifications une orientation qui les inscrit dans un registre discursif.
Nous avons dans un premier temps distingué deux groupes d'élèves en fonction de l'exactitude de leurs choix:
- Groupe 1 : élèves ayant fait des choix corrects « vrai/faux » pour les trois questions de l'exercice (24 élèves)
- Groupe 2 : élèves ayant fait au moins un choix incorrect « vrai/faux » en réponse à une des questions posées (28 élèves).

Pour ces deux groupes, nous avons adopté codé le caractère « correct » (C) ou « incorrect » (I) du choix entre vrai et faux de l'élève ainsi que le caractère « correct » (C), « partiel » (P) ou « incorrect » (I) de sa justification[2]. Nous obtenons ainsi des combinatoires telles que : choix correct / justification correcte (CC), choix correct / justification partielle (CP), choix correct / justification incorrecte (CI), choix incorrect/justification incorrecte (II). Les tableaux suivants (Tableaux 5 et 6) synthétisent les répartitions de ces codages obtenues au sein des deux groupes d'élèves considérés.

questions	CC	CP	CI	total
1) $a^3a^2=a^5$	5	17	2	24
2) $a^2 = 2a$	14	6	2	23
3) $2a^2 = (2a)^2$	15	5	1	21

Tableau 5: Combinatoires du groupe 1 (Gr1: choix corrects pour les trois questions-24 élèves)

[2] Il s'agit ici d'un codage effectué par les chercheurs pas par le logiciel.

questions	CC	CP	CI	II	total
1) $a^3a^2=a^5$	4	9	3	8	25
2) $a^2 = 2a$	8	5	1	10	24
3) $2a^2 = (2a)^2$	4	3	2	5	16

Tableau 6: Combinatoires du groupe 2 (Gr2: au moins un choix incorrect -28 élèves)

Dans cette étude, nous cherchons à dégager les critères linguistiques qui peuvent nous apporter des informations fiables, relativement à la réussite des élèves à l'exercice (choix corrects/incorrects et justifications correctes/incorrectes/partielles), voire à leur niveau d'entrée en algèbre. Pour chaque question, nous relevons des caractéristiques de l'égalité d'un point de vue mathématique qui sont susceptibles d'influencer la nature de ces critères. Puis, pour chaque catégorie de réponses codées, nous mettons en avant les formes linguistiques utilisées par les élèves, qui permettent d'élaborer une typologie des justifications produites.
D'un point de vue didactique, nous distinguons *a priori* différents registres linguistiques employés (argumentatif, descriptif, explicatif, « légal ») par les élèves dans leurs justifications (tableau 7). Nous faisons l'hypothèse que l'emploi de ces registres révèle différents niveaux de discours (conceptuel, contextuel, formel scolaire) qui peuvent être corrélés avec la réussite des élèves à la tâche, voire au développement de leurs compétences en algèbre.

Registre	**Niveau**	**Code**	COMPÉTENCE ALGÉBRIQUE ↑
Argumentatif : L'élève a recours à des relations (conséquence, restriction, opposition) pour expliciter ses arguments.	*Conceptuel :* L'élève manie les concepts	CC	
Descriptif : L'élève décrit les éléments du contexte posé par l'égalité donnée.	*Contextuel :* L'élève reprend des éléments significatifs du contexte	CC, CP	
Explicatif : L'élève a recours à la causalité relativement à l'égalité donnée.	*Formel/Scolaire :* L'élève applique ou reprend des règles formelles et non significatives	CP, CI, II	
Légal : L'élève appuie son discours sur une dimension légale en utilisant des verbes modaux.			

Tableau 7 : classification *a priori* des justifications d'élèves

2.2.3 Analyse des données

a) Question 1: $a^3\,a^2 = a^5$

Caractéristiques mathématiques de l'égalité
Cette égalité est vraie. De plus, elle est très proche d'une règle algébrique ($a^m\,a^n = a^{m+n}$) qui fait partie du curriculum officiel : on la trouve dans chaque manuel scolaire et elle apparaît fréquemment dans les cours d'algèbre.

Analyse linguistique
Voici pour cette première question, les différentes catégories de productions, représentées, selon les codes adoptés.

CC – Choix correct / Justification correcte : argumentatif et conceptuel
L'élève utilise des conjonctions de coordination qui lui permettent de marquer les relations auxquelles il a recours, du type *conséquence*, *restriction*, avec des conjonctions de coordination du type « mais », « donc ». Il inscrit son discours dans le *registre argumentatif* et ancre son raisonnement dans le *conceptuel*.
Exemple: « Le produit de deux nombres identiques à exposants différents est ce même nombre mais avec leurs exposants ajoutés tous deux, donc a puissance 2+3 »

CC – Choix correct / Justification correcte : descriptif et contextuel
L'élève utilise une phrase complexe construite à partir d'une proposition principale et d'une proposition subordonnée situationnelle, soit juxtaposée soit enchâssée, en utilisant des conjonctions temporelles ou spatiales : lorsque, quand, lors, dans. La première proposition porte « l'acte » (on ajoute, on additionne) la seconde pose le « contexte » (lors d'une multiplication, dans une multiplication) qui est défini et nécessaire à la réalisation de l'acte. Il inscrit ainsi son discours dans le registre *descriptif* situationnel et ancre sa justification au niveau *contextuel*.
Exemple: « quand on multiplie des mêmes nombres avec des puissances, on adition les puissances et le nombre reste inchangé »

CP – Choix correct / Justification partielle : descriptif et contextuel
L'élève utilise une phrase complexe identique à celle décrite précédemment. Cependant, sa justification est considérée comme partielle dans la mesure où l'élève ne fait pas mention de toutes les conditions nécessaires à l'application de la règle donnée dans le cours (nombres multipliés identiques). Ceci peut s'expliquer par le fait que l'élève s'appuyant sur le contexte donné par l'item, ne s'attache qu'aux éléments variants d'un membre à l'autre de l'égalité (les exposants 3, 2 et 5), pour délaisser l'élément invariant (le nombre indéterminé *a*). Pour ce type de justifications, les marqueurs linguistiques employés sont identiques à ceux de la catégorie précédente : lorsque, quand, dans.
Exemple : « quand on multiplie des nombres avec des puissances il faut additionner les puissances »

CP – Choix correct / Justification partielle : explicatif, légal et formel scolaire :
Tout comme dans le cas précédent, les élèves considèrent seulement les éléments variants du membre de droite au membre de gauche de l'égalité. Mais au lieu de replacer ces arguments relativement au contexte posé par l'égalité, ils ont recours à la causalité marqué dans son discours par : car, c'est vrai car. Certains d'entre eux utilisent des verbes modaux qui indiquent la faisabilité ou la possibilité, voire l'obligation (il faut).
Par ces recours, l'élève inscrit son discours dans le registre *explicatif*, voire *légal* et ne formule que partiellement la règle sans mentionner le contexte d'application. Ces justifications sont considérées comme *formelles scolaires:* en d'autres termes, les élèves concernés interprètent cette égalité comme respectant les lois formelles du calcul algébriques, sans pour autant lui donner du sens.
Exemples : « c'est vrai car on additionne les 2 exposent », « car il faut additionner les puissants »

Code	**Registre**	**Niveau**	**Exemple**	**Marqueurs**	**Nombre**
CC	*Argumentation*	Conceptuel	Le produit de deux nombres identiques à exposants différents est ce même nombre mais avec leurs exposants ajoutés tous deux, donc a puissance 2+3	*mais, donc*	3 (sur 9 CC) 3 Gr1
CC	*Descriptif*	Contextuel	quand on multiplie des mêmes nombres avec des puissances, on adition les puissances et le nombre reste inchangé	*lorsque, quand, lors, dans*	5 (sur 9 CC) 1 Gr1 4 Gr2
CP			Dans les multiplication à puissances, on additionne les exposants		15 (sur 26 CP) 12 Gr1, 3 Gr2
CP	*Explicatif*	Formel	c'est vrai car on aditionne les 2 exposent	*car, c'est vrai car*	6 (sur 26 CP) 6 Gr2
II	*Légal*	Formel scolaire	il ne faut pas additionné les puissances mais les multiplier	*il faut, il ne faut pas, on doit*	4 (sur 8) 4 Gr2
CC, CP, CI, II *hors catégories repérées*			1 CC (sur 9), 3 CP (sur 26), 5 CI (sur 5), 4 II (sur 8), 4 non justifiés		

Tableau 8 : réponses associées à l'égalité $a^3 a^2 = a^5$

II – Choix incorrect / Justification incorrecte : légal et formel scolaire :
L'élève utilise des verbes modaux tels que « falloir » et « devoir » pour justifier son choix. Ces verbes inscrivent le discours de l'élève dans une dimension légale où le choix n'est pas posé quant à la réalisation du possible mais dicté par une règle incorrecte parfois formulée (comme $a^m a^n = a^{mn}$).
Exemple : « on doit faire une soustraction entre les deux chiffres du haut »

b) Question 2: $a^2 = 2a$

Caractéristiques mathématiques de l'égalité
L'égalité donnée est fausse. Par ailleurs, elle ne ressemble à aucune règle classique donnée dans les cours d'algèbre.[3].

Analyse linguistique

CC – Choix correct / Justification correcte : argumentatif (opposition) et conceptuel :
L'élève utilise la phrase complexe construite à partir d'une proposition principale et d'une proposition subordonnée circonstancielle. Les deux propositions sont articulées par une locution conjonctive d'opposition : « tandis que », « alors que », « et non pas ». L'élève marque explicitement la relation d'opposition existante entre les deux propositions qu'il formule. Il inscrit son discours dans le registre argumentatif qui révèle un niveau conceptuel.
Exemple : « a^2 signifie a×a alors que 2a signifie a×2 »

CC – Choix correct / Justification correcte : argumentatif (coordination) et conceptuel :
Comme pour la catégorie précédente, les élèves utilisent une phrase complexe mais cette fois, les propositions principale et subordonnée sont liées par une conjonction de coordination « et ». Le lien entre les deux propositions est établi mais non spécifié, contrairement au cas précédent où l'opposition est explicitement marquée.
Exemple : « car le premier ça fait a fois a et le deuxième ça fait 2 fois a »

CP – Choix correct / Justification partielle : descriptif et contextuel
Dans cette catégorie, le lien avec un membre de l'égalité devient implicite : seul un des deux membres est considéré. L'élève ne porte son intérêt que sur l'expression algébrique de ce membre et décrit des expressions algébriques équivalentes en les introduisant par « c'est », « ça fait ». Il inscrit son discours dans un registre descriptif et le niveau reste contextuel.
Exemple : « c'est « a+a » qui est égal à 2a. »

II – Choix incorrect / Justification incorrecte : explicatif et formel
L'élève a recours à la causalité marquée dans son discours par l'utilisation de « car » ou « c'est vrai car ». Son discours s'ancre dans le registre explicatif en utilisant des arguments formels erronés.
Exemple : « car le a au carré vaut bien deux fois a »

Code	Registre	Niveau	Exemple	Marqueurs	Nombre
CC	*Argumentation opposition*	Conceptuel	a^2 signifie a×a alors que 2a signifie a×2	*tandis que , et non pas, alors que*	11 (sur 22 CC) 9 Grt1, 2 Gr2
CC	*Argumentation coordination*	Conceptuel	car le premier ça fait a fois a et le deuxième ça fait 2 fois a	*Et, donc*	9 (sur 22 CC) 5 Gr1, 4 Gr2
CP	*Descriptif*	Contextuel	c'est « a+a » qui est égal à 2a.	*C'est, ça fait, c'est, est égal à*	5 (sur 11 CP) 3 Gr1, 2 Gr2
II	*Explicatif*	Formel	c'est vrai car la lettre a qui est élevé au carré donne 2a (a×a = 2a).	*Car, c'est vrai car*	6 (sur 10 II) 6 Gr2
CC, CP, CI, II *hors catégories repérées*			2 CC (sur 22), 6 CP (sur 11), 3 CI (sur 3), 4 II (sur 10), 6 non justifiés		

Tableau 9 : réponses associées à l'égalité $a^2 = 2a$

[3] En ceci elle est différente d'une égalité fausse comme $a^3 a^2 = a^6$ qui ressemble à la règle $a^m a^n = a^{m+n}$.

c) Question 3: $2a^2 = (2a)^2$

Caractéristiques mathématiques de l'égalité

L'égalité donnée est fausse. Comme la précédente elle ne ressemble à aucune règle classique donnée dans les cours d'algèbre. Notons cependant que le membre de droite de l'égalité contient des parenthèses : les professeurs de mathématiques explicitent souvent le rôle des parenthèses dans le calcul numérique ou algébrique.

Analyse linguistique

CC – Choix correct / Justification correcte : argumentatif (opposition) et conceptuel :

Comme pour la question précédente, l'élève utilise une phrase complexe comprenant une proposition principale et une proposition subordonnée. Les propositions sont articulées par une locution conjonctive qui marque l'opposition entre les deux membres de l'égalité donnée : tandis que, alors que, et non pas. L'élève met parfois en avant le rôle joué par les parenthèses dans cette opposition. Son discours se situe dans le registre argumentatif et est de niveau conceptuel.

Exemple : « Dans la première partie de l'équation, seul a est au carré alors que dans la deuxième, le produit de 2a est au carré »

CC – Choix correct / Justification correcte : argumentatif (coordination) et conceptuel :

L'élève utilise à nouveau une phrase complexe de structure similaire à la précédente mais les propositions sont liées par une conjonction de coordination « et ». Il juxtapose les propositions, en considérant séparément chaque membre de l'égalité, sans expliciter d'opposition.

Exemple : « car $2a^2$, c'est a qui est au carré. Et $(2a)^2$, c'est 2a qui est au carré. »

CP – Choix correct / Justification partielle : descriptif (restriction) et contextuel :

Le lien avec l'un des membres de l'égalité reste implicite. L'élève considère un seul des deux membres de l'égalité : il s'intéresse seulement au membre de droite, en introduisant sa description par « c'est ». L'élève explicite souvent le fait que le carré ne s'applique qu'à la variable *a* (à cause de l'absence de parenthèses) en utilisant des termes comme « juste », « seulement ». Son discours est descriptif et ancré au niveau contextuel.

Exemple : « comme il n'y a pas de parenthèses, c'est seulement la valeur « a » que l'on multiplie par elle-même.»

Code	Registre	Niveau	Exemple	Marqueurs	Nombre
CC	*Argumentation opposition*	Conceptuel	Dans la première partie de l'équation, seul a est au carré alors que dans la deuxième, le produit de 2a est au carré	*tandis que , et non pas, alors que*	14 (sur 19 CC) 12 Gr1 2 Gr2
CC	*Argumentation coordination*	Conceptuel	car $2a^2$, c'est a qui est au carré. Et $(2a)^2$, c'est 2a qui est au carré.	*Et, donc*	5 (sur 19 CC) 3 Gr1 2 Gr2
CP	*Descriptif restriction*	Contextuel	comme il n'y a pas de parenthèses, c'est seulement la valeur « a » que l'on multiplie par elle-même	*C'est juste, seulement,*	4 (sur 8 CP) 2 Gr1 2 Gr2
II	*Explicatif*	Formel	car les deux résultats sont égaux.	*Car*	2 (sur 5 II) 2 Gr2
II	*Légal*	Formel scolaire	on a le droit de mettre des parenthèses à un chiffre	*On a le roit, on peu*	2 (sur 5 II) 2 Gr2
CC, CP, CI, II *hors catégories repérées*			2 CP (sur 8), 3 CI (sur 3), 1 II (sur 5), 16 non justifiés		

Tableau 10 : réponses associées à l'égalité $2a^2 = (2a)^2$

II – Choix incorrect / Justification incorrecte : légal et formel scolaire:

L'élève utilise souvent des verbes modaux, comme « pouvoir » ou « avoir le droit » pour justifier son choix incorrect, en se centrant sur le rôle joué par les parenthèses. Par ces recours, il donne une dimension légale à son discours qui le situe au niveau formel scolaire.
Exemple : « on peut metrtre une parenthese, cela ne change rien sauf lors d'un calcul, quand il y a des prioritées. »

II – Choix incorrect / Justification incorrecte : explicatif et formel
L'élève a recours à la causalité en commençant son discours justificatif par « car ». Son discours relève de l'explication avec l'utilisation d'arguments formels erronés.
Exemple :« car on multiplie de gauche à droite »

2.2.4 Interprétation de l'analyse d'un point de vue didactique

L'étude empirique que nous venons de développer, montre que les élèves utilisent de façon récurrente des structures linguistiques formelles pour exprimer leurs justifications en langage mathurel et que l'usage de ces formes révèle des niveaux d'avancée différents dans la pensée algébrique. Il s'agit d'interpréter ces résultats d'un point de vue didactique.

Concernant l'égalité $a^3a^2=a^5$
Le fait que cette égalité vraie soit proche d'une règle souvent vue en cours par les élèves, joue un rôle essentiel. Cela décourage chez de nombreux élèves l'usage du registre argumentatif. Seuls ceux ayant a priori atteint un niveau avancé dans la compétence algébrique produisent une justification de niveau conceptuel : les élèves concernés ont répondu correctement à l'ensemble des questions et ont passé l'ensemble du test avec un certain succès. Inversement, l'usage du registre descriptif est favorisé : il s'appuie sur le contexte représenté par l'égalité donnée pour le rapprocher de la règle « bien connue » : $a^ma^n=a^{m+n}$. Pour les mêmes raisons, les élèves ayant fait un choix incorrect, reconnaissant néanmoins une règle vue dans le cours, ont souvent recours à un discours de type légal.

Concernant l'égalité $a^2=2a$
A l'inverse de l'égalité précédente, le fait que l'égalité soit fausse et non « semi-calquée » sur une règle d'algèbre du cours, fait que le registre descriptif est relativement peu utilisé. On note également de ce fait une quasi-absence du registre légal en ce qui concerne les justifications de réponses incorrectes qui restent dans un mode explicatif. En revanche, dans ce cas de figure, un nombre plus important d'élèves a recours à un registre de type argumentatif. Ces derniers justifient leur choix en mettant en relation les deux membres de l'égalité en spécifiant le type de relation : l'opposition,[4] ou à travers l'emploi d'une conjonction de coordination.

Concernant l'égalité $2a^2=(2a)^2$
Le cas de cette égalité est à rapprocher du cas précédent, à savoir la mise en relation des deux membres de l'égalité fausse. Néanmoins, concernant les élèves ayant apporté une réponse incorrecte, la justification produite s'inscrit à nouveau parfois dans le registre du légal. Ce recours au légal n'est plus sollicité par la forme de l'égalité (qui ne réfère pas à une règle vue en cours) mais plutôt par un élément précis de son contenu, les parenthèses. La parenthèse a une fonction et c'est cette fonction qui est explicitée dans le registre légal. D'une part les parenthèses semblent attirer l'attention, comme seul élément variant d'un membre de l'égalité à l'autre. D'autre part, les élèves tentent de rappeler le rôle de ce symbole, souvent mis en avant ou explicité par les professeurs en cours de mathématiques.

2.2.5 Résultats, limites et mise en perspectives

L'interprétation de nos analyses nous a permis de mettre en relation d'une part l'usage de structures de phrase complexes et de marqueurs linguistiques et d'autre part des caractéristiques de la tâche considérée (par exemple la structure syntaxique marquant l'opposition pour le cas d'égalités fausses). Elle nous a permis de dégager des variables relatives aux égalités données qui nous paraissent influencer le type de discours justificatif produit par les élèves :
- *égalité vraie / fausse*
- *complexité des expressions algébriques (qui peuvent être développées, réduites…)*

[4] Notons que les élèves marquant explicitement l'opposition (une majorité de Gr1), semblent avoir une meilleure réussite à l'exercice que ceux qui emploient la coordination.

- *présence dans l'égalité d'éléments variants/invariants (d'un membre à l'autre)*
- *présence dans l'égalité d'éléments spécifiques des cours d'algèbre (tels les parenthèses ou la proximité apparente de règles algébriques*

Ces premiers résultats constituent une base pour conceptualiser un nouveau matériau d'expérimentations, afin de confirmer nos hypothèses et d'affiner nos catégories.
Nous avons proposé des tâches du type *valider ou invalider l'égalité de deux expressions algébriques* sous la forme d'un test papier-crayon, en modulant les variables dégagées de manière à recouvrir les différents cas de figures pouvant se présenter. Ce test a été passé à ce jour par une centaine d'élèves de Troisième-Seconde. L'analyse des nouvelles données est en cours.
En parallèle, les catégories initiales sont testées à partir de l'analyse de nouvelles productions d'environ 200 élèves de Troisième-Seconde dans le logiciel Pépite. L'analyse ainsi effectuée du point de vue linguistique a été mise en regard des résultats des élèves concernés à l'ensemble du test.

Ces nouveaux travaux en cours tendent actuellement à prouver qu'il sera intéressant à l'avenir d'analyser simultanément les trois réponses d'un même élève à l'exercice 2, afin d'améliorer la mise en regard avec les compétences algébriques révélées par Pépite, et de nuancer nos catégories initiales, voire de les rendre plus subtiles. Par exemple, pour l'élève déjà cité qui écrit « il faut additionner les puissants », justification que nous avons classée dans le registre légal : au vu des justifications qu'il a produite en réponse aux deux autres questions (toutes deux exactes et de niveau conceptuel), nous remettons en question l'aspect dit « formel scolaire » dont nous avions fait l'hypothèse (d'autant plus que cet élève a de bons résultats sur l'ensemble du test). Cette ambiguïté peut venir du fait que l'expression « il faut » peut renvoyer à l'application d'une règle scolaire vidée de sens pour l'élève ou bien au caractère nécessaire des mathématiques.
De plus, nous voyons également intervenir des macro-variables que nous devrions à l'avenir prendre en compte dans l'analyse. Par exemple, les élèves de seconde qui justifient leurs réponses, produisent parfois des discours que nous avons considérés comme partiels et de niveau contextuel dans l'étude présentée. Il est probable que les élèves de niveau plus avancé laissent de fait, tomber dans l'implicite des arguments qui leur paraissent évidents, et que leurs productions ne soient pas pour autant à classer comme contextuelles, mais plutôt conceptuelles et attenantes au registre argumentatif.

Enfin il s'agit à terme d'améliorer le système de diagnostic automatique de Pépite. En étudiant plus en profondeur la justification à l'aide des critères linguistiques dégagés (marqueurs et structures grammaticales), et en affinant cette étude en prenant en compte les travaux évoqués ci-dessus, notre objectif est d'assigner un niveau de rationalité algébrique sur la base d'une analyse linguistique et didactique des productions d'élèves en langage mathurel pour compléter le profil cognitif existant.

2.3. Le point sur le diagnostic automatique

Ces deux études qui ont donné lieu à publications [Normand et al. 2004.a et b, Prévit et al. 2004], ont permis une avancée certaine sur le problème très difficile de l'analyse des réponses d'élèves lorsque leur expression n'est pas contrainte.
Pour ce qui des raisonnements algébriques, l'analyse complète de l'exercice du prestidigitateur prouve qu'à partir d'une analyse didactique précise, il est possible de mettre en œuvre une analyse automatique de raisonnement algébrique complexe. L'analyse actuelle fonctionne parfaitement sur le corpus de 300 réponses d'élèves que nous avons constitué à condition que les élèves ne mélangent pas français et algèbre ; dans ce dernier cas (10 % des réponses), le diagnostic automatique est mis en défaut.
Pour ce qui est des raisonnements en langage naturel, l'étude exploratoire qui a été menée ouvre des perspectives intéressantes pour l'automatisation. Cependant comme nous l'avons évoqué ci-dessus, un travail de validation de ces catégorisations reste à mener. En particulier nous étudions la robustesse de ces catégorisations lorsque l'on change de niveau (passer du niveau classe de troisième au niveau seconde) et sur des tâches analogues. Nous avons pris contact avec des chercheurs spécialistes en traitement du langage naturel pour envisager la mise en œuvre d'une telle analyse.

3. VERS DES SITUATIONS DE DIAGNOSTIC PARAMETRABLES

Parallèlement aux recherches sur la fiabilisation du diagnostic, nous avons mené un travail de conception en vue de spécifier une nouvelle plate-forme de diagnostic qui permette aux enseignants d'adapter les tests diagnostiques à la situation de leur classe. A partir des retours d'usage nous avons travaillé dans un premier temps à la mise au point de scénarios d'utilisation que nous présentons dans la section 3.1. Ces méthodes ont le double avantage de faciliter la communication dans l'équipe de conception en concrétisant les idées de conception et de permettre aux enseignants d'exprimer des idées inscrites dans un contexte et donc de façon souvent plus pertinentes que dans des spécifications abstraites. Puis dans un deuxième temps, nous avons défini les spécifications de cette nouvelle plate-forme de diagnostic que nous appelons SuperPépite. Nous présentons dan la section 3.2 les spécifications de cette plate-forme et dans la section 3.3 les modélisations que nous avons établies pour la conception d'un premier module de cette plate-forme. Enfin dans la section 3.4 nous présentons nos conclusions et perspectives.

3.1. Création de scénarios d'utilisation

En ingénierie des Interfaces Humains-Machines (IHM), une technique de conception est préconisée pour adopter une approche centrée sur le contexte d'utilisation : c'est la mise au point de scénarios d'utilisation [Mackay 97, Caroll et al. 2001]. Il existe deux grandes classes de scénarios : les scénarios observés et les scénarios de conception.
Les scénarios observés partent des observations de l'activité de futurs utilisateurs et consistent à créer une histoire en mêlant plusieurs observations pour dépasser le cas individuel isolé sans perdre les informations sur le contexte d'utilisation. A partir des observations que nous avons faites, nous avons ainsi créé cinq scénarios d'utilisation. Ces scénarios ont mis en évidence par exemple le besoin d'imprimer non seulement le profil de l'élève (fonctionnalité offerte par Pépite 1) mais aussi toutes les réponses au test pour pouvoir en discuter avec l'élève hors machine ou pour y réfléchir calmement et l'annoter hors machine également.
Pour les scénarios de conception, nous avons demandé à des enseignants qui connaissaient très peu Pépite d'imaginer des situations où ils utiliseraient en classe un logiciel de diagnostic. Ils ont inventé des « histoires » que nous leur avons demandé de détailler sur certains points. Ces histoires sont très instructives car elles permettent de capter les besoins non pas d'une manière abstraite mais en contexte. Par exemple, dans les questionnaires au niveau des fonctionnalités souhaitées, les enseignants nous suggèrent de chronométrer le temps mis par les élèves pour répondre à chaque question, de garder la trace de leurs essais successifs etc. Ils réclament des fonctionnalités qui leur semble pouvoir être implémentées mais ne savent pas comment les exploiter. Dans les scénarios d'utilisation les besoins qui apparaissent sont très différents et sont centrés sur l'exploitation du diagnostic en classe.

Le tableau 11 présente un exemple de scénario établi par un enseignant. Dans ce scénario (et dans d'autres) on voit que l'enseignant accorde une importance très grande à l'organisation matérielle et au temps nécessaire à la mise en place et aussi à l'exploitation du test avec les élèves : on voit apparaître le besoin d'imprimer le test avec une correction, de disposer d'une photographie de la classe avec la liste des erreurs récurrentes et des élèves qui les commettent, une géographie de la classe avec des groupes d'élèves que l'on pourrait faire avancer ensemble. S'exprime également la volonté (ou la nécessité) de faire travailler les élèves en binôme avec la possibilité de mémoriser la réponse de chacun des membres quand ils ne sont pas d'accord et de leur donner une correction en comparant leur réponse. Le facteur temps est bien mis en évidence : faire passer le test ce n'est pas seulement une ou deux séances en salle informatique et deux à trois heures de correction c'est aussi installer le logiciel, récupérer les fichiers de réponses, imprimer les écrans pour un retour vers l'élève etc.

Dans l'ensemble des scénarios, on voit apparaître des situations différentes :

- quand un enseignant rencontre une classe pour la première fois, il veut une géographie de la classe avec un test assez complet et un bilan sur la classe ;
- quand l'enseignant travaille en aide individualisée ou en bilan avant un examen il a besoin d'un bilan individuel et de propositions de séquences de travail ;
- en évaluation rapide en fin de séquence pour évaluer une évolution, il a besoin d'un test beaucoup plus rapide et peut-être adaptatif.

• Arthur est enseignant en classe de seconde. Il décide d'utiliser Pépite pour avoir un bilan de

compétences de sa classe en début d'année. Il compte faire effectuer le test à ses 30 élèves au cours d'une seule séance de 50 minutes car il n'a pas la possibilité de réserver à nouveau la salle informatique avant le mois prochain.

- Après avoir téléchargé le logiciel compressé il le sauvegarde sur une disquette. Il installe le logiciel sur chacun des 20 postes de la salle d'informatique car ceux-ci ne sont par en réseau.
- Certains élèves sont seuls, d'autres sont en binôme. Il note précisément la constitution des binômes car le nom d'un fichier obtenu ne correspond qu'à un seul élève. Cela pose d'ailleurs un problème car dans certains binômes chacun veut renseigner les champs obligatoires avec ses informations personnelles.
- Une fois le test effectué, il sauvegarde sur disquette chacun des 20 fichiers obtenus. Il les envoie par la suite au serveur situé à l'université du Maine pour avoir un bilan de compétences de ses élèves.
- Arthur ne donne pas lui-même la correction du test aux élèves. Pour chaque exercice, il envoie au tableau un binôme afin qu'il présente sa solution, ce qui donne lieu à un débat au sein de la classe. Le binôme n'est pas choisi au hasard. Arthur désigne un groupe qui a fait une erreur pouvant être formatrice pour le reste de la classe ou un groupe qui a utilisé une méthode qui suscite des commentaires intéressants.
- Pour cela, Arthur a étudié en détail les productions des élèves. Il les a imprimées et annotées pour les distribuer aux élèves car il est très important que l'élève en conserve une trace. Le bilan de compétences fourni par Pépite permet à Arthur de constituer des binômes ou des trinômes d'élèves (qui peuvent être différents de ceux constitués pour effectuer le test) avec qui Arthur va pratiquer une pédagogie différenciée : les élèves ayant eu des difficultés doivent travailler les connaissances de base alors que ceux qui n'en n'ont pas eu en profitent pour approfondir leurs connaissances.

Tableau 11 : scénario Arthur rédigé par un enseignant

3.2. Spécifications d'une nouvelle plate-forme SuperPépite

Le prototype Pépite 1 est composé d'un nombre fixe d'exercices figés et n'est donc utilisable qu'une seule fois et a un niveau précis de scolarité : fin de troisième début de seconde. Les expérimentations et retours d'usage [Delozanne et al 2002b] ont fait apparaître qu'une des conditions pour qu'un tel système s'intègre dans l'activité des enseignants en classe est qu'il puisse être utilisé à différentes étapes de la construction des compétences en algèbre, à différents niveaux de classes et dans différentes situations d'évaluation. C'est l'objectif que nous nous fixons dans le travail présenté dans cette section. Un tel système nécessite de disposer d'une batterie de tests. En tant que concepteur de ce système, nous sommes donc confrontés à deux problèmes :

1. caractériser ces batteries de tests pour permettre aux enseignants de choisir un test adapté à la situation,
2. produire ces batteries de tests.

Suite aux études que nous avons menées auprès d'enseignants, il nous est apparu que si certains souhaitent disposer de tests prêts à l'emploi, d'autres (par exemple des formateurs IUFM) souhaitent concevoir eux-mêmes leurs tests. Pour ces derniers, une des utilisations du système sera la conception de tests qui seront mis dans une base de données à la disposition des enseignants.

Nous nous orientons vers la conception d'une nouveau système, que nous appelons SUPERPEPITE, pour le diagnostic de compétences en algèbre élémentaire. Nous décrivons d'abord les utilisateurs de Super-Pépite et nous posons quelques définitions. Puis nous définissons l'architecture de SuperPépite en précisant des scénarios d'utilisation que nous envisageons pour chacun des modules.

3.2.1 Les différents utilisateurs

Cette plate-forme vise quatre grandes catégories d'utilisateurs : les élèves, les enseignants, les concepteurs, les chercheurs.

- *Les élèves* passent un test en résolvant les exercices, après quoi ils obtiennent un bilan sur leurs compétences algébriques de la part du système et/ou de leur enseignant.
- *Les enseignants* choisissent, en fonction de leurs objectifs, un test qu'ils font passer à leurs élèves. Le logiciel les aide à produire un bilan de compétences algébriques pour leurs élèves.
- *Les concepteurs* construisent, en fonction de leurs objectifs, un test à partir d'une part de modèles d'exercices et de la procédure de diagnostic associé à ces modèles.

- *Les chercheurs* étudient les différentes productions des utilisateurs avec le système ou du système pour les traitements automatiques (réponses d'élèves, bilans de compétences, tests).

L'utilisation de ce système par différents types d'utilisateurs impose un certain nombre de contraintes techniques.

1. La plate-forme est destinée en particulier à servir de support à des recherches en EIAH, ce qui impose une architecture client-serveur pour pouvoir disposer sur le serveur des traces d'utilisation et des productions.
2. Pour les élèves et les enseignants disposant de matériel et de systèmes divers et parfois obsolètes, nous devons adopter un développement indépendant de la plate-forme utilisateur.
3. Le résultat du diagnostic doit être réifié non seulement à l'interface mais aussi mémorisé dans un fichier pour pouvoir donner lieu à un traitement automatique et être présenté différemment à plusieurs catégories d'utilisateurs.

Pour commencer, nous avons centré notre travail sur le module qui permet à un concepteur de construire un test pour alimenter la banque de tests.
La conception d'un tel système pose des questions de recherche en EIAH que nous rappelons :
Côté didactique :

- Est-il possible de définir un modèle des compétences pour chaque niveau scolaire ?
- Comment permettre à des enseignants d'adapter le test à leur pratique de classe ? Comment déterminer les paramètres ?
- Comment assurer la complétude et la cohérence d'un test pour un bilan de compétence à un niveau donnée ?

Côté informatique :

- Comment définir des modèles d'exercices à partir desquels les enseignants pourraient construire leurs propres tests ?
- Comment définir les modèles diagnostiques liés aux modèles d'exercices pour produire automatiquement un diagnostic quand un enseignant a spécifié un test?
- Quels outils de modélisation sont pertinents ?

3.2.2 Définitions

Un *test* est un ensemble bien déterminé d'exercices, liés au niveau de la classe, qui permet à l'enseignant et/ou au logiciel d'établir un bilan des compétences algébriques d'un élève, d'un groupe d'élèves ou d'une classe.

Le *diagnostic* est la procédure qui permet d'établir un tel bilan.

- Deux types de diagnostic
  - diagnostic local à un exercice
    Il porte sur un seul exercice. La procédure utilisée est ce qu'on appelle le codage. Il consiste à coder les réponses de l'élève en appliquant la grille d'analyse prévue dans l'analyse didactique a priori de l'exercice. Le résultat obtenu est un sextuplet qui situe la réponse de l'élève à l'exercice en référence au modèle de compétences algébriques à un niveau donné de classe.
  - diagnostic global au test
    Il porte sur un ensemble d'exercices. La procédure utilisée consiste à une analyse transversale des codages des réponses aux différents exercices du test. Le résultat obtenu est un bilan des compétences algébriques mises en jeu dans les exercices du test ; le résultat peut être le profil cognitif de l'élève ou un stéréotype si le test couvre l'ensemble des compétences attendues à un niveau scolaire donné.

- Deux stratégies de diagnostic5 :

5 Un autre type de diagnostic que nous pouvons qualifier de dynamique consiste à faire un bilan de compétences lors d'activités d'apprentissage et non lors d'activités spécifiques d'évaluation. Nous ne traitons pas ce cas ici.

  - diagnostic prédéfini
    Il consiste à faire passer à tous les élèves d'une même classe le même ensemble prédéfini d'exercices.
  - diagnostic adaptatif
    Il consiste à poser des exercices qui sont choisis en fonction des réponses de l'élève aux exercices précédents.
- trois types de tests
  - test prédéfini
    Il correspond à un diagnostic prédéfini ; il comporte un nombre fixe d'exercices déterminés et permet de tester un certain nombre de compétences.
  - test adaptable[6] par l'enseignant
    Il correspond à un diagnostic prédéfini ; l'enseignant choisit le nombre et le type d'exercices proposés, le logiciel lui indiquant l'ensemble des compétences testées ou bien l'enseignant choisit un niveau, un ensemble de compétences à tester et une durée de test et le logiciel lui propose un test.
  - test adaptatif (« adaptative testing »)
    Il correspond à un diagnostic adaptatif ; l'enseignant choisit un ensemble initial d'exercices (ou de compétences), au moment du passage du test le système détermine les exercices à poser en fonction des réponses de l'élève.

Nous proposons de mettre en place un système qui permette à des enseignants :

- de choisir un des trois types de tests,
- de le faire passer aux élèves,
- de recueillir et analyser les résultats
- de faire un retour aux élèves sous forme de bilan de compétence et de conseils pour faire évoluer ce bilan.

3.2.3 Description de l'architecture de SuperPépite

Dans cette plate-forme, nous distinguons ainsi 7 modules, que nous présentons ci-dessous.

PEPIGENEXO

Ce module permet à un concepteur de créer des exercices de diagnostic à partir de modèles d'exercices de diagnostic paramétrables.

PEPIGENTEST

A partir des exercices de la base d'exercices, un concepteur pourra créer un test diagnostic. Un enseignant ou un élève pourront choisir un test déjà conçu dans la base de tests.

PEPIDIAGADAPTATIF et PEPIDIAGSYSTEMATIQUE

A partir des réponses des élèves à un test, ces deux modules élaborent un diagnostic adaptatif ou systématique.

PEPIPROF

Ce module assiste l'enseignant pour établir un bilan de compétences de ses élèves en algèbre et pour élaborer une stratégie d'enseignement pour faire évoluer ces bilans.

PEPIELEVE

Ce module propose à un élève le bilan de ses compétences en algèbre et une stratégie d'enseignement pour progresser.

PEPICHERCHEUR

Ce module permet au chercheur de travailler sur les productions des élèves ou des enseignants et sur les différents diagnostics produits.

[6] Cette terminologie reprend celle qui est utilisée en IHM pour définir les paramétrages choisis par l'usager (logiciels adaptables) ou calculés par le système (logiciels adaptatifs)

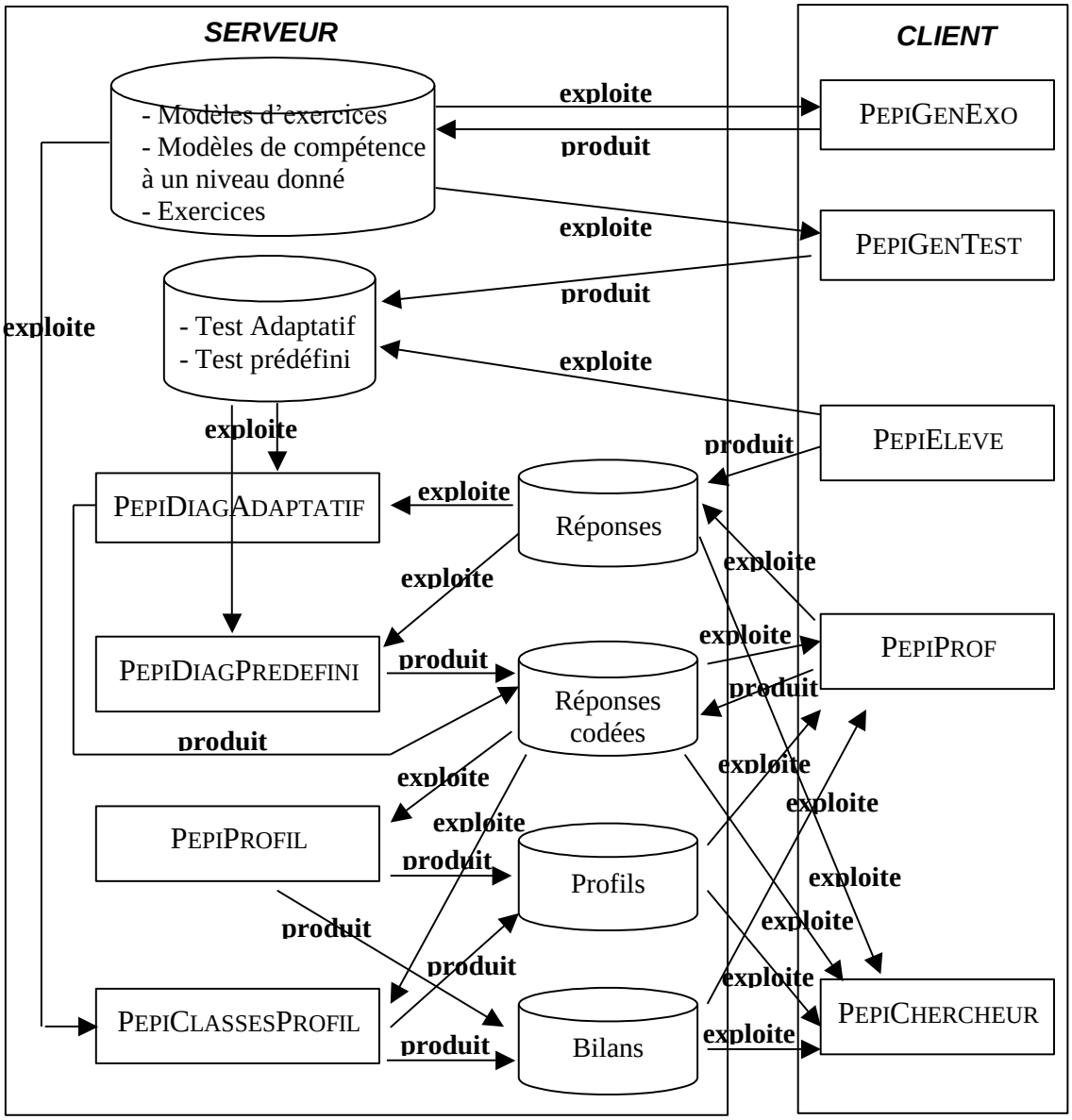


Figure 3 : Architecture de SuperPépite

3.3. Conception du module PepiGenExo

Dans le cadre du projet Cognitique nous avons travaillé à la conception du module PEPIGENEXO. L'objectif est de construire un système permettant à un concepteur de fabriquer des exercices de diagnostic à partir de modèles d'exercices et d'enrichir ainsi la base d'exercices.
Il s'agit de concevoir un système qui

- propose des modèles d'exercices et une procédure de diagnostic adaptée à chaque modèle,
- génère l'exercice et le diagnostic local à l'exercice à partir des paramètres entrés par l'enseignant et des modèles d'exercices,
- demande à l'enseignant de valider les exercices générés.

Avant de construire de tels modèles, nous avons défini les notions de *classe d'exercices* et d'*exercices équivalents*. Une *classe d'exercices* est un ensemble d'*exercices équivalents* du point de vue de l'interaction élève-logiciel. Deux exercices sont *équivalents* si l'analyse didactique de la tâche est la même pour les deux exercices.

Après avoir présenté la méthodologie, nous présenterons dans cette section le modèle d'une classe d'exercices puis nous appliquerons ce modèle à une classe particulière : « le prestidigitateur ».

3.3.1 Méthodologie

Pour construire de tels modèles nous partons des exercices de PEPITEST et nous étudions comment caractériser des exercices équivalents du point de vue de l'interaction élève-logiciel et du point de vue du diagnostic des réponses de l'élève.
Les étapes sont les suivantes :

- caractérisation des exercices par rapport au type d'interaction élève-logiciel,
- pour chaque catégorie, étude systématique des paramètres qui peuvent varier sans modifier la tâche,
- proposition d'un modèle,
- évaluation des modèles lors des séances de travail au sein de l'équipe du projet Lingot,
- affinement du modèle
- modélisation et mise en œuvre informatique.

3.3.2 Modèle d'une classe d'exercices

Nous avons établi une classification des exercices de PépiTest par rapport au type d'interaction et aux procédures de diagnostic sous-jacentes. Nous distinguons le niveau 1 prenant en compte les types d'interaction et les procédures de diagnostic et le niveau 2 les types de tâches pour les élèves.

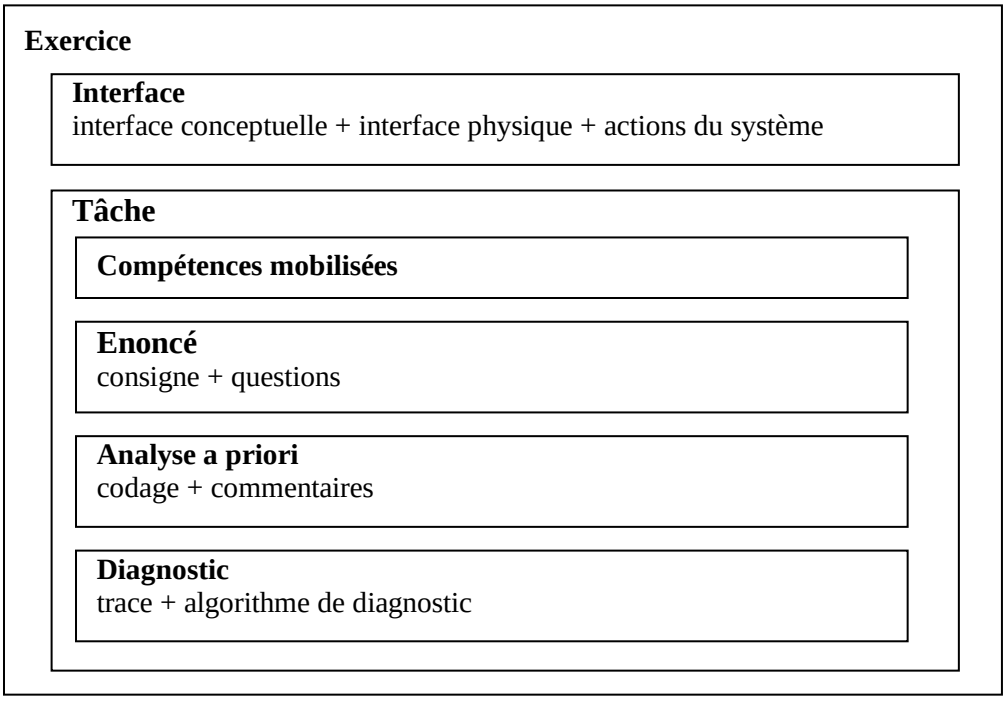


Figure 4 : Modèle d'une classe d'exercice

Ainsi nous avons défini pour le niveau 1 les types d'exercices suivants :

- exercices de mathématisation
- exercices de preuve
- QCM ou exercices apparentés
- exercice de résolutions d'équations
- exercice de résolutions de systèmes d'équation

Au niveau 2, pour les QCM ou exercices apparentés nous avons pu caractériser les tâches suivantes :

- repérer les égalités correctes
- différencier l'écriture d'un somme de l'écriture d'un produit
- associer une expression algébrique à l'aire d'une figure
- associer une expression algébrique à un énoncé écrit en langage naturel

Pour proposer un modèle d'exercice correspondant à chaque classe d'exercice ainsi repérée, nous avons repris l'outil de diagnostic papier-crayon de B. Grugeon à l'origine du logiciel PépiTest. Pour chaque

exercice proposé, B.Grugeon précise les compétence algébriques mises en jeu, une analyse a priori et a posteriori des solutions envisageables ainsi que le diagnostic associé à chacune de ces solutions. La figure 4 présente ce modèle.

3.3.3 Une classe particulière : « le prestidigitateur »

Nous illustrons notre démarche par un exemple « le prestidigitateur » car il nous semble à la fois complexe et intéressant du point de vue du diagnostic. Pour cet exercice de mathématisation, il s'agit de traduire par une équation une situation concrète et de prouver qu'une affirmation est vraie. Voici deux énoncés d'exercices équivalents :

- Un prestidigitateur est sûr de lui en réalisant le tour suivant. Il dit au joueur : « Tu penses un nombre, tu ajoutes 8, tu multiplies par 3, tu retranches 4, tu ajoutes ton nombre, tu divises par 4, tu ajoutes 2, tu soustrais ton nombre : tu as trouvé 7. »Indiquez si cette affirmation est vraie ou fausse. Justifiez votre réponse.
- Harry Potter est sûr de lui en réalisant le tour suivant. Il dit au fantôme :« Tu penses un nombre, tu ajoutes 5, tu multiplies le résultat par 2, tu retranches deux fois ton nombre, tu retranches 9 : tu as trouvé 1 » Indiquez si cette affirmation est vraie ou fausse. Justifiez votre réponse.

3.3.4 Modèle de l'interface

Nous devons donc décrire l'interface conceptuelle et l'interface physique.

- L'interface conceptuelle

Du point de vue élève, l'interface conceptuelle est constituée d'un énoncé, d'une consigne, d'une zone de saisie pour les justifications, du choix d'une réponse. Les possibilités d'actions de l'élève sont la lecture de l'énoncé, la saisi des justifications et le fait de cocher ou non une option.

- L'interface physique

Il est constitué d'une zone de texte avec contenu variable, d'une zone de texte avec un contenu constant, d'une zone de saisie et d'un composant de type panel comportant un label et deux boutons radio avec label.

- Les actions du système

Trois actions peuvent être répertoriées : le déclenchement d'un chronomètre, le comptage des clics sur chaque choix et les rétroactions usuelles.

3.3.5 Modèle de la tâche

Il s'agit ici de préciser les compétences mobilisées, l'énoncé, l'analyse a priori et le diagnostic établis par B. Grugeon dans son outil de diagnostic papier-crayon.

- Compétences mobilisées

L'élève doit lire et interpréter un énoncé, conjecturer la vérité d'une propriété numérique et utiliser l'outil algébrique pour traduire puis prouver qu'une affirmation est vraie.

- Énoncé

Pour cet exercice, l'énoncé est constitué

- d'un contexte : « Un prestidigitateur (ou autre personnage) est sûr de lui en réalisant le tour suivant. Il dit au joueur »
- de la description d'un processus de calcul : « Tu penses un nombre, tu ajoutes 8, tu multiplies par 3 … »
- du résultat du calcul : « tu as trouvé 7. »
- d'une consigne : « Indiquez si cette affirmation est vraie ou fausse. Justifiez votre réponse. »

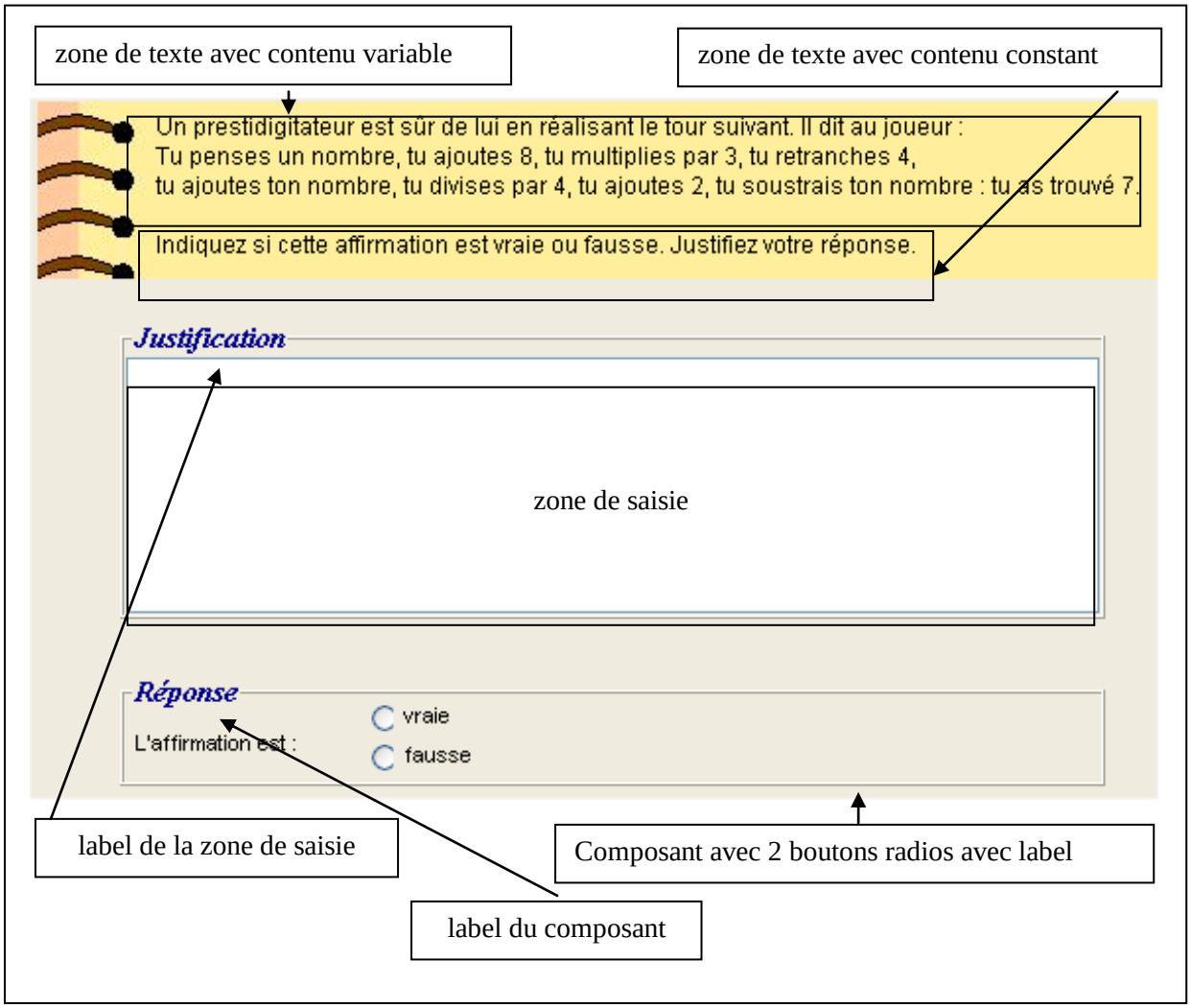


Figure 5 : Modèle de l'interface

Exemple: la formule est [(x+8)×3-4+x]/4+2-x le résultat est 7	
Evaluation : solution correcte **Commentaire** : preuve algébrique avec expression globale parenthèsée traduisant le résultat de l'enchaînement opératoire ; le développement et la réduction de l'expression sont corrects, x a le statut de nombre généralisé. **Codage** : T1, L1, C1, R1,M1 **Enchaînement opératoire** : [(x+8)×3-4+x]/4+2-x (3x+24-4+x)/4+2-x (4x+20)/4 +2-x x+5 +2-x 7	**Evaluation** : solution incorrecte **Commentaire** : preuve algébrique avec expression globale parenthèsée traduisant le résultat de l'enchaînement opératoire ; le développement et la réduction de l'expression ne sont pas corrects car il y a une erreur du type (a+b)×x →a+b×x avec (x+8)×3 →x+24 x a le statut de nombre généralisé. **Codage** : T3, L1, C1, R1, M31 **Enchaînement opératoire** : [(x+8)×3-4+x]/4+2-x (x+24- …….

Tableau 12 : extrait d'analyse a priori générée

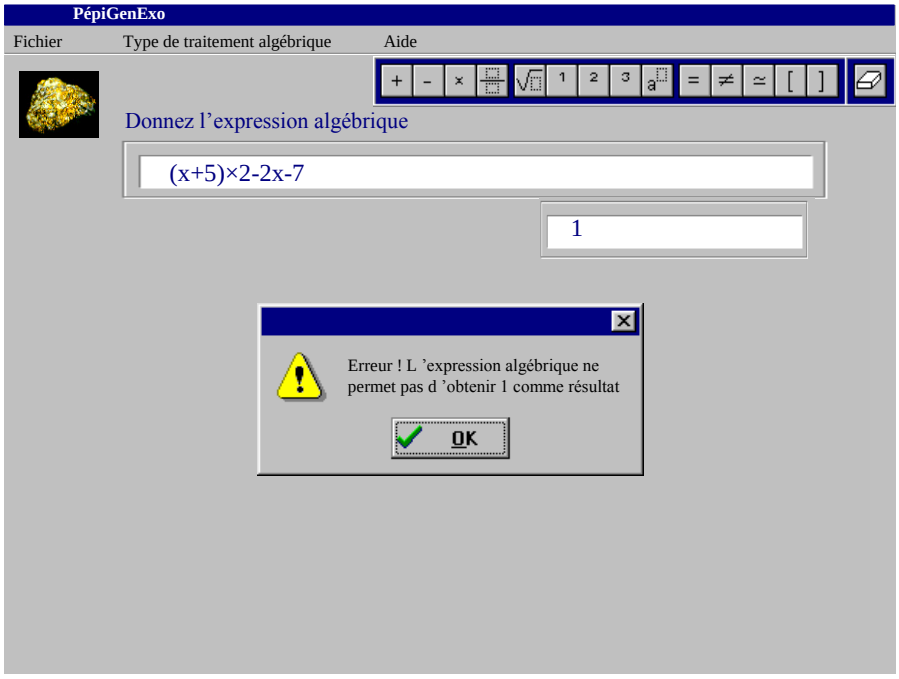


Figure 6 : Création d'un énoncé de type prestidigitateur (maquette 1)

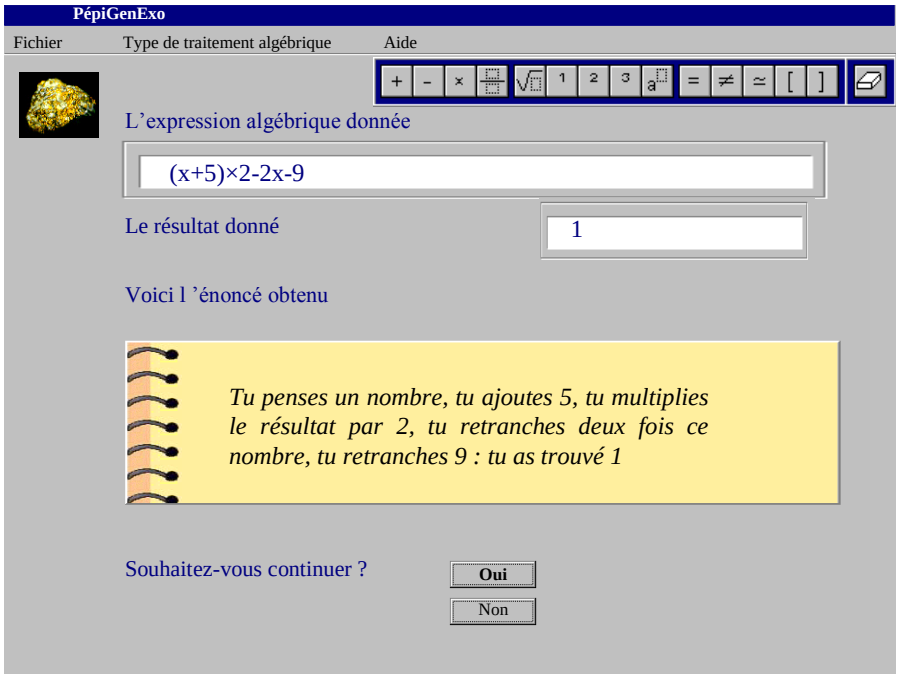


Figure 7 : Création d'un énoncé de type prestidigitateur (maquette 2)

- Analyse a priori

Il s'agit de concevoir à partir de l'exemple d'analyse a priori établi par Grugeon sur l'exercice du prestidigitateur, une analyse a priori s'appliquant à tout exercice de cette classe. L'objectif est que les instances de ce modèle présentent les différentes réponses correctes ou incorrectes attendues et les expressions algébriques ou numériques associées. Ce modèle permet aussi de définir une procédure de diagnostic local à l'exercice.

Nous travaillons sur un algorithme d'analyse de la formule algébrique pour proposer une analyse a priori et le codage associé. Selon l'analyse didactique [Grugeon 1995] l'élève peut utiliser deux types de preuves : une preuve algébrique et une preuve pragmatique en utilisant une démarche arithmétique et une justification par l'exemple, ce qui correspond à deux codages différents. Il peut utiliser deux types d'écritures : expression

globale ou expression algébrique partielle. De plus des dysfonctionnements peuvent apparaître dans l'application des règles de calcul algébriques. Citons par exemple des erreurs de manipulation formelles telles que : $(a+b)\times x \rightarrow a+b\times x$. Le tableau 12 présente un extrait du résultat de cet algorithme.

- Diagnostic

Il s'agit de repérer le comportement de l'élève : trace de la réponse, les hésitations en comptant le nombre de clics sur les boutons radio. Ensuite nous devons associer à l'exercice un algorithme de diagnostic qui permette d'analyser les productions des élèves pour établir la matrice de codage associée.
Le tableau 13 présente cet algorithme

Lecture de la première ligne
Tant que que la ligne n'est pas vide (exercice non terminé)
tant que la ligne est une phrase (3 lettres consécutives) lire la ligne suivante
- si l'expression est numérique ou algébrique (existence d'une lettre dans l'expression)
  - alors démarche= numérique (ou algébrique)
- si l'expression est globale ou partielle (pas à pas)
  - alors exp = globale (ou partielle)
- construire un arbre représentant chaque expression algébrique ou numérique écrite sur la ligne
- comparer avec les arbres représentant les expressions prévues par l'analyse a priori
  - attribuer le codage correspondant
  - mettre à jour la liste des règles fausses identifiées éventuellement

Tableau 13 : algorithme de diagnostic

3.3.6 Analyse de la tâche de l'enseignant concepteur

L'enseignant concepteur construit l'énoncé d'un exercice à partir d'un modèle d'exercice. Pour cela le concepteur saisit une formule, un résultat et un personnage, le logiciel génère l'analyse a priori et l'affiche, le concepteur corrige ou non cette analyse et le logiciel génère l'algorithme de diagnostic.

3.3.7 Conception des situations d'interaction enseignant/logiciel

Nous avons construit une maquette pour concrétiser cette analyse. Les figures 6 et 7 présentent deux maquettes d'écran à discuter.

3.4. Conclusion, résultats et perspectives

Le travail sur les scénarios d'utilisation par les enseignants nous a conduit à
- mieux intégrer des enseignants dans l'équipe,
- préciser les spécifications d'une nouvelle plate-forme de diagnostic SuperPépite.

De plus dans le cadre du projet Cognitique nous avons :

- défini l'architecture logicielle d'un système qui permet à un concepteur de créer des batteries de tests en instanciant des modèles d'exercices et à un enseignant de choisir un test à partir de paramètres
- défini des modèles d'exercices de diagnostic paramétrés par les compétences pour chaque classe d'exercices de Pépite
- spécifié les algorithmes pour la génération automatique de la procédure de diagnostic sur pour une partie de ces classes d'exercices et en particulier sur une classe d'exercice complexe (du type de l'exercice du prestidigitateur).

Un prototype permettant de générer automatiquement un exercice de ce type à partir de l'expression à trouver est en cours de réalisation.

4. VERS UN ASSISTANT A L'EXPLOITATION DU DIAGNOSTIC : DES PROFILS AUX STÉRÉOTYPES

Rédigé par B. Grugeon, C. Vincent, J.-M. Gélis, E. Delozanne

Le projet Lingot vise à concevoir et à mettre en œuvre des situations d'apprentissage en algèbre adaptées aux profils d'élèves et organisées dans un environnement informatique. Qu'entend-on par profils d'élèves en algèbre ? Nous disposons d'un système informatique d'assistance au diagnostic PEPITE [Jean 2000] fondé sur un modèle multidimensionnel de la compétence algébrique dans l'enseignement secondaire [Grugeon 1995, 1997] qui permet d'identifier l'existence de cohérences de fonctionnement relatives aux différents aspects de la compétence algébrique. Dans ces travaux le profil de l'élève en algèbre élémentaire est une description fine des principaux traits de son comportement en algèbre élémentaire, « modèle intelligible de son rapport personnel à l'algèbre ». Le tableau 14 synthétise la méthode de construction du profil.

Logiciels	Modèle individuel de l'élève	Modèles des tâches et compétence algébrique
PépiTest	Réponses de l'élève	Type d'exercice : technique, reconnaissance et mathématisation
PépiDiag	Codage des réponses de l'élève à chaque exercice Matrice de diagnostic	Pour chaque exercice, une grille d'analyse multidimensionnelle : justesse, utilisation des lettres, calcul algébrique, traduction d'une représentation à une autre, type de justification
PépiProf	Profil global : • taux de réussite (global, questions traitées, type d'exercices, type de traitements privilégié) • description qualitative (cohérences de fonctionnement) • articulation entre représentations	Analyse transversale des réponses à l'ensemble du test Types de traitements Seuils paramétrables de réussite Modalités de fonctionnement

Tableau 14. *Niveaux de modélisation [Grugeon 95] mis en œuvre par Pépite.*

Comment exploiter ce diagnostic ? Le logiciel Pépite a permis de recueillir environ trois cents protocoles de réponses d'élèves aux exercices proposés par PépiTest. En utilisant Pépite et le diagnostic très fin qu'il établit pour chaque élève, les chercheurs ont pu pointer les fragilités que ces élèves doivent travailler et identifier les leviers sur lesquels s'appuyer pour les faire évoluer [Delozanne et al 02, Grugeon et al. 2003]. Pour exploiter les résultats de ce diagnostic, l'étape de recherche suivante consiste donc à définir des situations d'apprentissage adaptées aux profils des élèves en définissant, dans un premier temps des objectifs d'apprentissage à privilégier [Grugeon et al 03]. En effet, il est nécessaire d'établir des priorités parmi les compétences non acquises ou à travailler c'est-à-dire de définir des objectifs d'apprentissage à privilégier, avant d'affiner les contenus et de fixer de façon précise les paramètres des tâches à proposer. Par exemple, on spécifiera dans un premier temps que la compétence à privilégier est la dimension outil de l'algèbre à travers la résolution de problèmes de généralisation et de preuve. On précisera dans un second temps les caractéristiques et variables didactiques. Or, étant donné la complexité du modèle, la variété des profils d'élèves obtenus et pour organiser le choix des objectifs d'apprentissage, il nous est apparu pertinent d'effectuer des regroupements de profils « voisins », des classes de profils que nous appelons des stéréotypes. En effet, dans le domaine de l'EIAH, des chercheurs [Kay 2000], [Dimitrova 1999] ont développé des systèmes informatiques qui personnalisent les interactions en s'appuyant sur des techniques de

modélisation de l'utilisateur fondées sur la définition de stéréotypes. Cette modélisation consiste à identifier le comportement d'un utilisateur en le classifiant dans un ensemble de sous-groupes prédéfinis [Rich 1979]. Ce concept de stéréotype nous semblait adapté à notre problème. Dans le contexte du projet Lingot, nous avons commencé par adopter une définition très générale :

- Un stéréotype est une classe de profils « équivalents » c'est-à-dire un ensemble de profils pour lesquels les compétences algébriques des élèves peuvent être jugées suffisamment proches pour bénéficier d'un diagnostic similaire pour proposer des situations d'apprentissages ayant les mêmes objectifs prioritaires d'apprentissage.

De plus les différentes expérimentations de PEPITE auprès d'enseignants de mathématiques ont montré que l'affichage par le système de toutes les cohérences de fonctionnement ne pouvait facilement être exploité comme bilan des compétences de l'élève. Les enseignants ressentent le besoin d'un bilan plus synthétique qui leur permettrait de plus de constituer des groupes dans la classe.

- Un stéréotype caractérise un certain niveau de développement de la compétence algébrique qui permet à un enseignant d'obtenir une "géographie cognitive" de sa classe, un "profil cognitif de sa classe".

Nous avons donc été amenés à définir les classes de profils d'une part pour organiser le choix des situations d'apprentissage adéquates et, d'autre part, pour structurer l'expression d'un diagnostic et faciliter son appropriation et son exploitation en classe par les enseignants. Dans les sections qui suivent nous présentons le travail que nous avons mené pour compléter et restructurer le diagnostic établi automatiquement par le logiciel Pépite afin de faciliter son exploitation en classe. Nous rappelons d'abord dans la section 4.1 les hypothèses et les questions de recherche qui ont guidé notre travail. Dans la section 4.2, nous commençons par expliciter la méthodologie utilisée pour identifier les stéréotypes puis nous donnons une caractérisation des différents stéréotypes que nous avons mis en évidence. Nous spécifions la méthode adoptée pour la classification des profils cognitifs et enfin nous indiquons des pistes pour définir des stratégies afin d'associer des situations d'apprentissage adaptées à des stéréotypes et à des profils particuliers d'élèves. Ce travail sera décrit de façon plus approfondie dans le chapitre 3 portant sur l'axe apprentissage du projet. Dans la section 4.3 nous montrons comment nous avons mis en œuvre ces travaux pour la conception du logiciel PépiStéréo en nous appuyant sur l'étude ergonomique présentée dans le chapitre 4 de ce rapport et sur des ateliers organisés avec des enseignants. La section 4.4 présente la réalisation informatique du logiciel PépiStéréo et la section 4.5 situe notre approche par rapport à des travaux de modélisation à base de stéréotypes en EIAH. Enfin, la section 4.6 résume les résultats de cette recherche, aborde la question de la validation de notre démarche et présente les premières mises à l'épreuve de nos hypothèses de recherche.

4.1. Hypothèses et questions de recherche

Nous rappelons ici les hypothèses de recherche qui ont été énoncées dans l'introduction de ce chapitre et nous précisons les questions de recherche sur lesquelles nous nous sommes penchés en relation avec l'articulation entre personnalisation de l'enseignement et régulation de l'enseignement dans l'ensemble de la classe.

Hypothèses

Notre objectif est de concevoir un *assistant à l'exploitation du diagnostic* en classe par les enseignants. Les études menées autour du projet Pépite entre 2000 et 2002 (retour d'expérimentations, analyse de l'activité de l'enseignant [Delozanne et al. 2002]) révèlent qu'il est nécessaire d'articuler personnalisation de l'enseignement et gestion de l'ensemble de la classe, de groupes d'élèves. Les enseignants réclament des statistiques sur la classe, la liste des erreurs fréquentes et des élèves qui les commettent. C'est ce qui avait été mis en œuvre dans un logiciel qui s'appelait PépiClasse [Provost 1999, Jean 2000]. Il nous est rapidement apparu que cumuler des taux de réussite et des taux d'échec était insuffisant, et ce sur les deux aspects que nous venons de décrire : pour prendre des décisions didactiques sur les objectifs d'apprentissage à privilégier et pour faciliter l'appropriation du diagnostic par les enseignants. Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction, nous avons alors formulé deux hypothèses de travail :

- H1 : Pour prendre des décisions didactiques sur les activités d'apprentissage adaptées au profil cognitif d'un élève il est nécessaire de disposer d'un modèle à niveau d'abstraction plus élevé à côté du modèle cognitif

très fin proposé par Pépite. Nous avons appelé ce niveau des "*profils types*", puis "des *classes de profils*" et enfin des "*stéréotypes*" pour adopter une terminologie en cours dans la communauté de recherche s'intéressant à la modélisation des utilisateurs de systèmes interactifs (« user modelling ») et plus particulièrement à la modélisation des apprenants (« student modelling »).

- H2 : Les stéréotypes constituent un outil conceptuel pour favoriser l'appropriation par les enseignants d'un artefact complexe comme l'est le logiciel Pépite car il permet d'articuler diagnostic individuel et "géographie de la classe" pour organiser la régulation des apprentissages en classe c'est-à-dire de faire progresser la classe en respectant les différences individuelles.

Questions de recherche

Ces hypothèses étant posées, nous les avons mises à l'épreuve par l'étude des questions suivantes : Quelles sont les pratiques habituelles de diagnostic des enseignants et comment s'appuyer sur ces pratiques pour les faire évoluer et bénéficier des résultats de recherche en EIAH ?
Sur quelles modélisations s'appuyer pour supporter ces pratiques nouvelles ? Quel logiciel concevoir pour instrumenter ces pratiques ?

4.2. Identification des stéréotypes : le fondement didactique

Nous explicitons d'abord la méthodologie utilisée puis explicitons le modèle de stéréotype en algèbre que nous avons défini. Nous illustrons en quoi cet outil conceptuel permet d'organiser le choix des situations d'apprentissage adaptées à des compétences en algèbre.

4.2.1 Méthodologie

La méthodologie de définition d'un modèle de stéréotype en algèbre élémentaire s'appuie sur trois hypothèses de travail que nous développons ci-dessous.

Prise en compte du modèle multidimensionnel de la compétence en algèbre

Logiciels	Modèle individuel de l'élève	Modèles des tâches et compétence algébrique
PépiTest	Réponses de l'élève	Type d'exercice : technique, reconnaissance et mathématisation
PépiDiag	Codage des réponses de l'élève à chaque exercice Matrice de diagnostic	Pour chaque exercice, une grille d'analyse multidimensionnelle : justesse, utilisation des lettres, calcul algébrique, traduction d'une représentation à une autre, type de justification
PépiProf	Profil global : • taux de réussite (global, questions traitées, type d'exercices, type de traitements privilégié) • description qualitative (cohérences de fonctionnement) • articulation entre représentations	Analyse transversale des réponses à l'ensemble du test Types de traitements Seuils paramétrables de réussite Modalités de fonctionnement

Tableau 15. *Niveaux de modélisation [Grugeon 95] mis en œuvre par Pépite.*

Le modèle multidimensionnel de la compétence en algèbre [Grugeon 1995] est le fondement didactique des projets Pépite et Lingot. Dans un premier temps, ce modèle a permis de caractériser et de catégoriser les exercices proposés pour établir le diagnostic, du point de vue des compétences algébriques en jeu. Nous regroupons ainsi ces exercices en fonction du type de tâche (technique, de mathématisation, de reconnaissance), du type de traitement algébrique qu'ils requièrent (par exemple effectuer des calculs numériques, interpréter des expressions algébriques, etc.), des articulations entre cadres et registres qu'ils

mettent en jeu (graphique, numérique, géométrique, langage naturel, etc.). Nous leur associons une grille descriptive relative aux composantes et critères d'analyse (Cf. annexe A1) qui précise les compétences précises que leur résolution mobilise. Dans un second temps, ce modèle multidimensionnel a permis d'exprimer le diagnostic d'un élève sous la forme d'un profil décrivant les principaux traits de son comportement en algèbre élémentaire. Cette description comprend trois niveaux : une description quantitative en terme de taux de réussite/ échec (relatifs à chaque item de connaissance, aux questions traitées, aux exercices réussis, à la réussite par type d'exercice, par type de traitement, ce dernier étant affiché selon trois modes possibles selon leur valeur), une description qualitative en termes de cohérences de fonctionnement composante par composante. Un diagramme de changement de cadres complète la description du profil en précisant la flexibilité de l'élève à articuler les registres de représentation des objets dans deux cadres. Le tableau 15 résume ces différents niveaux de modélisation.

Nous avons fait l'hypothèse que le modèle multidimensionnel de la compétence en algèbre était approprié pour fonder la définition d'un modèle de classes de profils pour regrouper des élèves ayant des profils en algèbre qui révèlent des traits caractéristiques « voisins ». Nous disposons en effet d'un ensemble d'indicateurs qui permettent d'appréhender finement la compétence algébrique et ses différentes composantes. Nous avons donc caractérisé les stéréotypes à partir d'une structuration de ces composantes pour pointer les traits caractéristiques « voisins ».

Utilisation d'un ensemble de protocoles disponibles

L'environnement PEPITE a été utilisé auprès d'une population d'environ 200 élèves de seconde durant les années 1996, 1997, 1999 et 2002. En particulier, en 2002 nous avons recueilli les protocoles des élèves de certains enseignants de lycée et de collège qui ont suivi un stage de formation continue relatif à l'enseignement de l'algèbre (organisé dans l'académie de Créteil). Ces élèves ont passé PépiTest et un diagnostic a été établi de façon automatique par le logiciel Pépite. Rappelons que le diagnostic automatique est incomplet puisque les réponses des élèves à certains exercices ne sont pas ou peu analysées (par exemple lorsque les élèves répondent en français). Il concerne néanmoins 80 % de réponses des élèves.

Nous avons émis l'hypothèse que l'analyse de ce corpus de réponses et des profils établis par Pépite nous permettrait de dégager des classes de profils. Dans cette étude empirique, l'objectif était en effet, à partir de l'analyse de ce corpus d'organiser des regroupements d'élèves dont les compétences algébriques puissent être jugées suffisamment proches pour bénéficier d'un diagnostic similaire et de situations de remédiation voisines. Il s'agit de mettre leur spécification à l'épreuve d'un corpus.

Trois analyses indépendantes

Il nous est apparu indispensable de disposer de points de vue différents sur le corpus afin de permettre au groupe de recherche de débattre de différents choix dans la définition d'un modèle de classes de profils. La discussion autour d'un modèle unique risquait de limiter les options possibles et d'enfermer la discussion dans des orientations appauvries. Nous avons fait l'hypothèse que la spécification indépendante de trois stratégies de classement proposées indépendamment par trois membres du groupe était de nature à ouvrir les débats et à permettre de prendre la mesure de différents choix possibles. Nous notons par la suite modèle1, modèle2 et modèle3 ces trois propositions de modèle pour lesquelles nous donnons quelques éléments. La démarche générale a consisté à demander à chacun des trois chercheurs de spécifier les classes de profils qui lui semblaient pertinentes et de définir l'ensemble des élèves associés à chacune d'elles (des codes ont été attribués aux élèves pour des facilités de comparaison). Puis les trois catégorisations ont été comparées, discutées ce qui a permis de mettre en évidence l'intérêt, la pertinence et les enjeux des spécifications des classes de profils proposées. L'ensemble des groupements obtenus pour chacune des trois classes de profils est présenté à l'annexe A5.

Le modèle1 de classes de profils a été établi à partir du seul diagramme de changement de cadres (le niveau trois de description du profil dans PépiProf). L'examen de cet élément du diagnostic nous a semblé, en effet, riche d'enseignement pour ce qui concerne le bilan des compétences algébriques d'un élève. Nous voulions explorer ce que la définition de classes sur la base de ces seules indications pouvait produire comme groupement d'élèves. Les classes d'élèves ont été tantôt déterminées à partir des caractéristiques de fonctionnement relatives à un unique cadre étudié (par exemple, les classes C1, C2 et C3 sont respectivement spécifiées à partir des seuls cadres numérique, géométrique et langage naturel), tantôt définies par croisement

de deux d'entre eux (telles les classes B12, B1 et B22, définies respectivement à l'aide des cadres numérique/géométrique, numérique/langage naturel et géométrique/langage naturel).

Le modèle2 a été défini en cherchant à identifier des traits communs de fonctionnement et à pointer les fragilités et les points forts communs à un ensemble d'élèves. La démarche a consisté à privilégier tout d'abord l'étude de la compétence algébrique dans sa dimension outil (traduire algébriquement des situations via des équations ou via des relations fonctions, généraliser, prouver, justifier) en incluant les différents niveaux de rationalité algébrique. Cette dimension outil a ensuite été croisée avec la dimension objet de la compétence algébrique. Plus précisément, trois composantes7 d'analyse ont été ainsi définies : dimension outil, dimension objet en liaison avec la dimension outil (i.e. articulations entre différents cadres et registres de représentation), dimension objet avec le calcul algébrique. En résumé, les questions posées ont été les suivantes : l'élève utilise-t-il une démarche algébrique (traduction algébrique et preuve) et la justification par l'algèbre de façon dominante ? L'élève sait-il articuler le registre des écritures algébriques aux autres registres et si oui comment ? L'élève maîtrise-t-il le calcul algébrique ? Pour déterminer la classe d'appartenance d'un élève, on évalue alors son fonctionnement selon les trois axes précédents en articulant une analyse quantitative et qualitative et en leur attribuant un niveau : niveau 1 (bonne maîtrise et modalités de fonctionnement adéquates), niveau 2 (maîtrise fragile et modalités de fonctionnement incorrectes), niveau 3 (maîtrise insuffisante et modalités de fonctionnement inadéquates et significatives d'un fonctionnement vide de sens). Dans cette construction, un stéréotype est défini par la donnée du triplet qui qualifie chacune des composantes (ainsi, 323 indique : une maîtrise insuffisante et incorrecte de la dimension outil, peu de traduction algébrique ou des erreurs fréquentes de traduction, une maîtrise technique insuffisante avec la présence de règles de calcul non opératoires (identification incorrecte de + et x). Le modèle3 de classes de Profil a été construit à partir d'un ensemble de questions successives relatives à différents aspects des compétences algébriques des élèves : la justification par l'algèbre est-elle dominante ? L'élève sait-il lier le registre des écritures algébriques aux autres registres ? L'élève maîtrise-t-il les règles de transformation ? Les techniques algébriques ? Les exercices de mathématisation ? Ces questions ont été affinées jusqu'à obtenir des populations d'élèves de taille raisonnable. La première question est relative au type de justification utilisée par les élèves et cherche en particulier à établir si la justification par l'algèbre est dominante (les 3 réponses prévues sont notées JA1, JA2, JA3). Selon les réponses, la deuxième question cherche tantôt à définir le niveau de maîtrise de changements de cadres (les réponses prévues sont dénotées C1, C2 et C3 et obtenues à partir des items de Traduction), tantôt à établir le degré de compétences relatives au calcul algébrique. Une troisième question traite de la maîtrise des techniques de calcul, en évaluant l'élève sur le plan des techniques manipulatoires (réponses possibles CA1, CA2, CA3) et des règles de transformations (réponses possibles RT1, RT2, RT3).

Synthèse de l'étude des trois propositions de modèle de classe de profils

Les trois modèles de classes de profils ont été étudiés, tant sur le plan des critères retenus pour leur réalisation que sur le plan des groupements d'élèves engendrés. Une étude croisée impliquant à chaque fois deux modèles de classes de profils a permis d'identifier les répartitions relatives des groupes d'élèves (voir annexe A5). La permanence de ces groupes d'une classe à l'autre ou leur éparpillement a permis d'émettre des hypothèses sur la pertinence des critères retenus pour leur constitution (par exemple, justification par l'algèbre dominante) et de statuer sur leur robustesse. En effet, il apparaît que, dans certains cas, des critères se réfèrent à un ensemble trop étroit d'exercices et rendent ainsi hasardeuses les assertions qui en sont issues. Par exemple, dans la définition des classes de Profil 3, la réponse à la première question relative au type de justification utilisée par les élèves ne concerne en fait que deux exercices seulement. De plus, pour l'un d'entre eux – celui dit du prestidigitateur –, l'analyse automatique n'était pas encore terminée au moment de l'analyse du corpus. Pour palier à ces incertitudes, des seuils d'acceptabilité ont été instaurés, qui permettent d'assurer une fiabilité acceptable des critères pris en compte pour établir les classes de profils.
Nous nommons les classes de profils ainsi définies des stéréotypes. Un stéréotype est une classe de profils « équivalents » c'est-à-dire un ensemble de profils pour lesquels les compétences algébriques des élèves

7 Nous avons regroupé les composantes de la structure d'analyse définie en 1995 pour privilégier une structuration des aspects de la compétence algébrique autour des deux principales dimensions outil et objet non indépendantes et non hiérarchisées. Aussi, pour chacune des dimensions, nous regroupons les analyses d'ordre quantitatif et qualitatif.

peuvent être jugées suffisamment proches pour bénéficier d'un diagnostic similaire pour proposer des situations d'apprentissages ayant les mêmes objectifs prioritaires d'apprentissage.

4.2.2 Modèle de stéréotype retenu

Nous avons privilégié trois composantes pour spécifier le modèle de stéréotype en algèbre élémentaire :

- la composante « Utilisation de l'algèbre » (notée UA) vise à étudier les aspects de la compétence algébrique dans sa dimension *outil*, c'est-à-dire la capacité de l'élève à mobiliser l'algèbre pour traduire algébriquement une situation *via* les équations ou *via* des relations fonctionnelles, pour généraliser, prouver ou démontrer,
- la composante « Traduction » (notée T) vise à étudier la capacité de l'élève à traduire algébriquement ou à interpréter des expressions algébriques en relations avec d'autres registres de représentation,
- la composante « Calcul algébrique » (notée CA) vise à étudier la maîtrise du calcul algébrique.

Un stéréotype se trouve ainsi caractérisé par des niveaux de compétence qui sont attribués sur ces trois composantes. La détermination de ces niveaux s'appuie sur les éléments du modèle multidimensionnel de l'algèbre. Ces définitions prennent en compte des seuils (pour s'assurer que le vivier d'exercices mobilisant une compétence donnée est significatif) et s'appuient sur des éléments d'ordre quantitatif (taux de réussite ou d'exercices traités) et qualitatif (relatifs à certaines modalités identifiées). Pour chacune de ces composantes, nous codons trois ou quatre niveaux, (de 1 et 4 par ordre décroissant de niveau de compétences).
Dans les paragraphes suivants, nous présentons synthétiquement, pour chacune des composantes UA, T et CA, la signification des niveaux de compétences attribués à chacune d'elles. Ils permettent de définir un algorithme de classification d'un profil dans un stéréotype. Pour chaque composante, nous avons prouvé que tous les cas possibles étaient bien recensés et traités. Nous avons également inventorié les configurations qui nous semblent les plus courantes et les plus représentatives des trois niveaux possibles.

Code	**Libellé**	**Rapport à l'algèbre comme *outil* de résolution et de preuve**
UA4	Outil algébrique peu mobilisé et non maîtrisé laissant vivre des démarches numériques	l'élève ne mobilise que faiblement ou pas du tout l'outil algébrique pour résoudre des problèmes, ses justifications peuvent être encore numériques (par exemple, une propriété est prouvée à l'aide d'exemples numériques)
UA3	Outil algébrique mobilisé mais faiblement maîtrisé laissant place à l'usage de justifications variées	l'élève ne résout pas assez d'exercices avec la démarche algébrique, ses justifications sont mal assurées : soit il justifie convenablement peu d'exercices soit il les justifie par des arguments en français (du type : « il faut… », « dans ce cas, on doit.. »)
UA2	Outil algébrique mobilisé et en cours de maîtrise permettant majoritairement des justifications algébriques	l'élève mobilise l'outil algébrique mais connaît quelques défaillances : soit il résout algébriquement des exercices et justifie insuffisamment sa démarche soit il justifie convenablement mais il ne résout algébriquement pas assez souvent des exercices
UA1	Outil algébrique bien maîtrisé pour la modélisation et la preuve	l'élève résout les problèmes algébriquement il justifie convenablement sa démarche et utilise l'algèbre comme outil de preuve

Tableau 16 : Valeurs possibles de la première composante « Usage de l'algèbre » (UA) des classes de profil.

La première composante, notée UA, concerne la dimension *outil* de l'algèbre, c'est-à-dire l'ensemble des compétences liées aux fonctionnalités de l'outil algébrique et aux modes de justification. Le tableau 16 propose une présentation synthétique des niveaux de compétences possibles de cette composante. La question est de déterminer si l'élève évalué mobilise de façon dominante ou non la démarche algébrique (*via* la mise en équation ou la recherche de relation fonctionnelle ou la recherche de généralisation et de preuve) et si oui

comment. Il s'agit aussi d'analyser les types de justification et le statut de l'égalité mis en jeu dans la résolution. Nous pensons que cette composante permet d'évaluer l'entrée de l'élève dans la pensée algébrique, son éventuelle compréhension du rôle de l'algèbre comme outil de résolution et de preuve en rupture avec les démarches arithmétiques. Il s'agit là d'un point crucial, qui doit être pris en compte tant dans l'expression d'un diagnostic des compétences algébriques de l'élève que dans le choix de situations d'apprentissage adaptées.

Code	Libellé	Commentaires
T3	Articulation insuffisante entre le cadre algébrique et les autres cadres *via* le registre des écritures algébriques et les autres registres Peu ou pas de re formulation pour associer deux représentations	l'élève a des difficultés à exprimer algébriquement les relations entre variables ou à associer une expression algébrique à une autre représentation (ou vis versa) dans au moins un cas, l'écriture symbolique est utilisée pour « sténographier » la situation, c'est à dire la dénoter sans retrouver les relations entre les différentes variables en jeu
T2	Articulation partielle entre le cadre algébrique et les autres cadres *via* le registre des écritures algébriques et les autres registres	dans plus de la moitié des exercices traités, l'élève commet des erreurs pour exprimer algébriquement des relations entre les variables en jeu ou bien ses réussites sont inférieures aux erreurs de traduction et à ses absences de réponse
T1	Articulation entre le cadre algébrique et les autres cadres bien maîtrisés	l'élève maîtrise les changements de registres sur la majorité des exercices traités

Tableau 17 : Valeurs possibles de la deuxième composante « Traduction » (T) des classes de profil.

La deuxième composante lie à la fois les dimensions *outil* et *objet* en étudiant l'articulation entre les cadres et registres. Les valeurs possibles sont présentées dans le tableau 17. Elle est notée T, puisqu'elle porte en particulier sur les traductions entre registres de représentation. En d'autres termes, il s'agit de savoir si l'élève parvient ou non à articuler le cadre algébrique et les autres cadres en particulier à partir de l'étude de l'articulation entre le les écritures algébriques et les autres modes de représentation (langage naturel, graphique, figure géométrique). Il s'agit aussi d'analyser comment les élèves interprètent des expressions algébriques en articulation avec les autres registres. L'évaluation de cette composante est essentielle pour déterminer l'efficacité avec laquelle l'élève va utiliser l'outil algébrique, efficacité fortement corrélée à sa flexibilité de passage d'un cadre à un autre.
La troisième et dernière composante de la classe de profil traite de la dimension objet de l'algèbre, c'est-à-dire du calcul algébrique. Les valeurs possibles de cette composante sont explicitées dans le tableau 18. Nous notons CA cette composante qui cherche à évaluer le degré de maîtrise et les modalités de calcul mis en jeu par l'élève sur le plan des techniques manipulatoires. Les traitements mis en jeu sont relatifs à la conduite de calculs numériques, la manipulation d'expressions, l'interprétation d'expressions numériques et algébriques.
Toutes les combinaisons ne constituent pas des stéréotypes possibles. Ainsi, les profils d'élèves comportant la composante UA1 (outil algébrique bien maîtrisé pour la modélisation et la preuve) sont peu susceptibles de comprendre T3 (articulation insuffisante entre le registre des écritures algébriques et les autres registres) et CA3 (maîtrise insuffisante des règles de formation ou de transformation des expressions). En effet, un élève qui fait preuve d'une bonne utilisation de l'algèbre en tant qu'outil (composante UA1) maîtrise vraisemblablement de façon acceptable les techniques algébriques et les changements de registres (les composantes T3 et CA3 ne figureront pas dans le profil). De même, une insuffisance de l'appropriation de l'algèbre comme outil (composante UA3 ou UA4) est peu compatible avec une bonne maîtrise des changements de registres (pas de composante T1, voire T2) ou des techniques opératoires (pas de composante CA1). L'annexe A7 met en évidence les stéréotypes à prendre en compte.

Code	Libellé	Commentaires
CA3	Calculs insuffisamment réalisés, Usage de règles non opératoires de formation et de	l'élève ne maîtrise pas le rôle des opérateurs ou les règles dégagées par l'élève ne lui permettent pas un calcul à dénotation fixe

	transformation des expressions	
CA2	Calculs insuffisamment réalisés, Usage de règles incorrectes de transformation des expressions	l'élève ne parvient pas à traiter convenablement un ensemble suffisant d'exercices il commet des erreurs dans les calculs algébriques avec un appui insuffisant sur l'interprétation des expressions
CA1	Bonne maîtrise des calculs algébriques	l'élève traite un nombre suffisant d'exercices il propose des interprétations appropriées des expressions

Tableau 18 : Valeurs possibles de la troisième composante « Technique Manipulatoire » (CA) des classes de profil.

L'un des objectifs que nous poursuivons en spécifiant ces stéréotypes est de permettre de communiquer à l'élève, l'enseignant ou le chercheur, le diagnostic de l'élève sous une forme synthétique pour faciliter l'exploitation du diagnostic pour, dans un premier temps, justifier le choix des situations de remédiation ou d'apprentissage proposées à l'élève. Un travail important de formulation a été mené au sein de l'équipe et avec des enseignants pour caractériser les stéréotypes en utilisant le vocabulaire métier des enseignants de préférence au vocabulaire métier des didacticiens qui a présidé à la mise en évidence des stéréotypes. Ce travail est présenté dans la section suivante (4.3).

Principaux traits liés à la stéréotype		**Caractéristiques personnelles de l'élève**	
UA3	Outil algébrique mobilisé mais faiblement maîtrisé laissant place à l'usage de justifications variées		Taux de réussite (Exercices de mathématisation) : 7 % Justifications variées : algébrique, argumentation en français, par l'exemple)
T3	Articulation insuffisante entre le cadre algébrique et les autres cadres *via* le registre des écritures algébriques et les autres registres Peu ou pas de re formulation pour associer deux représentations		Taux de réussite (Exercices de reconnaissance) : 25% **Obstacle** L'écriture symbolique peut être perçue, comme moyen de « sténographier » : « Il y a 6 fois plus d'élèves (E) que de professeurs (P) » traduit par 6 E = P » **Levier** : appuis possibles sur l'articulation (géométrique ⟷ algébrique) et (algébrique → langage naturel)
CA3	Calculs insuffisamment réalisés, Usage de règles de formation ou de transformation des expressions non opératoires		Taux de réussite (exercices techniques) : 24% **Obstacle** *Règle de formation non opératoire :* assemblage : $3 + a \rightarrow 3a$; parenthésage : $-3^2 = 9$; $3a^2 = (3a)^2$; *Règles de transformation incorrectes* : $3a^5 + 2a^3 = 5a^7$ (assemblage) $a^2a^3 = a^6$ (linéarité) **Levier** : interprétation des expressions algébriques

Tableau 19 : Libellés décrivant la classe de profil UA3 T3 CA3.

Prenons l'exemple de l'élève codé 5 dans les protocoles étudiés. Cet élève relève du stéréotype UA3 T3 CA3 en algèbre. Le tableau 19 présente l'ensemble des libellés qui permettent d'exprimer le profil en langage naturel.

Ce travail nous a ainsi conduit à restructurer le diagnostic de Pépite.

- Nous définissons le profil de l'élève en algèbre comme la donnée d'un stéréotype, de caractéristiques personnelles (leviers, fragilités, erreurs récurrentes), les leviers sont les compétences déjà construites

sur les quelles s'appuyer (les pépites) et les fragilités : les compétences non construites ou à consolider.

4.2.3 Stéréotypes et choix des situations d'apprentissage

Dans cette section nous montrons comment les stéréotypes constituent le fondement d'une articulation entre diagnostic et situations d'apprentissage i.e. comment nous proposons de nous appuyer sur le stéréotype d'un élève pour choisir les situations adaptées à son profil cognitif et susceptibles de faire progresser l'élève. Pour ceci, il est nécessaire d'établir des priorités parmi les fragilités en tenant compte, composante par composante, des cohérences de fonctionnement mises en évidence par le diagnostic, qu'il s'agisse de modalités correctes ou non. De plus, des leviers doivent être identifiés pour s'appuyer sur les compétences déjà construites.

La détermination des situations d'apprentissage susceptibles de faire évoluer les compétences de l'élève s'organise autour de deux étapes :

- le stéréotype permet de déterminer la compétence à travailler avec un fort niveau de priorité, c'est-à-dire l'objectif d'apprentissage à privilégier (aspect stratégique),
- pour un objectif d'apprentissage donné, les caractéristiques propres du profil de l'élève (c'est-à-dire, les cohérences de fonctionnement mises en évidence par le diagnostic fin, les leviers sur lesquels il est possible de s'appuyer) permettent de déterminer parmi toutes les situations d'interaction de la famille, celles à travailler, en précisant les valeurs pertinentes des variables didactiques en jeu.

La spécification des situations d'apprentissage est l'objet du chapitre suivant. Nous présentons ici quelques premiers axes de travail qui vont permettre de corréler stéréotype et situations d'apprentissage.

La composante UA, qui qualifie la compétence de l'élève sur le plan de l'utilisation de l'outil algébrique, nous paraît être déterminante. Le niveau de cette composante témoigne en effet de l'entrée de l'élève dans la pensée algébrique et il est légitime d'en faire étroitement dépendre les situations d'apprentissage qui seront proposées à l'élève. Un élève qui ne maîtrise pas l'algèbre en tant qu'outil se verra proposer des situations qui visent prioritairement cette compétence essentielle ou bien une situation relative à l'articulation entre les registres et cadres nécessaire à la fonctionnalité de l'outil algébrique. Dans le cas contraire, cette compétence servira de levier pour renforcer d'autres aspects de la compétence algébrique. La présentation qui suit est donc organisée *via* la composante UA (outil algébrique) du stéréotype.

Un élève de stéréotype mettant en jeu la composante UA4 mobilise encore des démarches et des justifications numériques. Il s'agit donc de déstabiliser cette conception de la preuve par l'exemple en lui proposant des situations qui montrent l'insuffisance du numérique et l'amènent à penser la nécessité de généralisation dans le cadre algébrique. S'il a une maîtrise acceptable des techniques opératoires (présence de CA2 dans son stéréotype), les situations d'apprentissage proposées mettront en jeu des tâches relatives aux preuves et généralisations (telles que l'exercice dit du « prestidigitateur » dans une version simplifiée). S'il ne maîtrise pas les techniques opératoires (CA3 dans sa classe de profil), des tâches proposées peuvent être des tâches d'interprétation d'expressions algébriques, éventuellement exprimées dans différents cadres. Par exemple, la détermination, dans une liste d'égalités d'expressions, de celles qui sont fausses, est une activité susceptible de faire travailler l'élève sur la notion de contre-exemple. Une seconde activité peut proposer d'identifier les égalités vraies et conduire l'élève à prouver en s'appuyant sur le calcul algébrique. Dans les 2 cas, des tâches de calcul algébrique lui seront également proposées. Les situations données tiendront compte des caractéristiques propres de l'élève et permettront de déstabiliser voire de reconstruire les règles de formation (par exemple règle de concaténation) et de transformations incorrectes qui auront été repérées.

Etudions à présent le cas d'un élève qui mobilise l'outil algébrique (pour résoudre un problème voire pour prouver) mais avec une maîtrise insuffisante, en commettant de nombreuses erreurs dans la traduction des relations à exprimer entre variables (le stéréotype met en jeu la composante UA3). Les situations d'apprentissage que nous jugeons adaptées dépendent de la maîtrise de l'élève à changer de cadres, compétence repérée *via* la composante T (notons que le code 1 est peu probable pour un élève ayant UA3 pour compétence liée à l'outil algébrique). Un élève dont le stéréotype comprend T2 possède une certaine flexibilité à changer de registres, ce qui constitue un levier sur lequel on peut s'appuyer. Des mises en équation, des activités portant sur des modélisations fonctionnelles nous paraissent adaptées. Si l'élève mobilise des règles « abréviatives » pour traduire des énoncés en français (présence de T3 dans son stéréotype), il s'agira de déstabiliser fortement les connaissances erronées, telle que la traduction mot à mot d'un énoncé en langage naturel pour exprimer une relation entre variables (la relation « *il y a 6 fois plus d'élèves que de professeurs* » ne se traduit pas par $6 \times e = p$). Une situation « Bouchons les trous » avec une

structure de problème adaptée aux cohérences de fonctionnement de l'élève sera pertinente. (Cf. chapitre suivant sur l'axe apprentissage du projet)
Examinons maintenant le cas où l'élève a une bonne maîtrise de l'outil algébrique ou mobilise une justification algébrique **(**stéréotype mettant en jeu UA2). Au-delà des connaissances construites quant à l'utilisation de l'algèbre comme outil, il s'agit de discriminer les activités à lui proposer en liaison avec la maîtrise relative au calcul algébrique. Si l'élève mobilise des règles non opératoires pour ce qui est du calcul algébrique (CA3 dans sa classe de profil), il s'agit de proposer des tâches d'interprétation d'expressions algébriques en liaison ou non avec d'autres cadres pour déstabiliser les règles de formation incorrectes *via* le travail dans le cadre numérique ou dans d'autres cadres.
Le dernier cas proposé est celui d'un élève ayant une compétence UA1 dans sa classe de profil. Cet élève maîtrise parfaitement l'algèbre en tant qu'outil. Des situations d'apprentissage plus complexes peuvent lui être proposées, mobilisant par exemple des modélisations fonctionnelles (telles qu'on les propose en classe de seconde), des preuves dans des domaines variés (par exemple pour prouver des propriétés arithmétiques) ou des calculs algébriques plus techniques (impliquant par exemple des stratégies de manipulation basées sur le sens des expressions, comme dans certaines factorisations où plusieurs voies concurrentes sont possibles).

L'articulation entre diagnostic et remédiation est un sujet complexe et nous ne prétendons pas y apporter une réponse complète et définitive. Cependant, nous estimons avoir prouvé la pertinence des stéréotypes que nous proposons pour aborder cette articulation. Un travail à la fois empirique et théorique reste indispensable pour approfondir ces premières propositions.
Après la mise en évidence des différents stéréotypes, la mise au point d'un algorithme de classification d'un profil dans un stéréotype et l'association à chaque stéréotype d'un objectif d'apprentissage prioritaire à travailler nous nous sommes attelés à la conception d'un logiciel pour opérationnaliser ces résultats de recherche.

4.3. Articuler diagnostic individuel et gestion de classe : le logiciel PépiStéréo

PépiStéréo est le logiciel que nous avons développé. Il s'appuie sur les stéréotypes pour d'une part présenter le résultat du diagnostic automatique aux enseignants pour chacun de leurs élèves et, d'autre part, leur proposer des éléments de stratégies d'enseignement appropriées aux différents stéréotypes. La métaphore est de permettre à l'enseignant d'orchestrer les apprentissages dans sa classe en laissant s'épanouir les talents individuels de ses élèves. Dans un premier temps nous résumons les éléments importants de l'analyse de l'activité de diagnostic des enseignants qui est présentée en détail dans le chapitre 4 sur l'axe instrumentation de l'activité enseignante du projet Lingot. Dans un deuxième temps, nous présentons les scénarios de travail qui ont guidé la conception de notre logiciel. Dans un troisième temps nous présentons la restructuration des profils cognitifs et l'interface que nous avons conçue pour en faciliter l'utilisation par les enseignants. Puis nous décrivons l'interface conçue pour que l'enseignant visualise "la géographie cognitive de sa classe" et les propositions de travail pour chacun des groupes ainsi constitués. Enfin nous donnons quelques indications sur la mise en œuvre informatique de ce logiciel

4.3.1 Les enseignants de mathématique et le diagnostic

Les retours d'expérimentations du logiciel Pépite [Delozanne et al 02b] et des études ergonomiques (Cf. Chapitre 4 de ce rapport) nous ont montré un intérêt certain pour l'approche par compétences et pour un "correcteur de copies automatique et intelligent". Néanmoins, un certain nombre d'obstacles à l'utilisation du logiciel sont apparus.
Selon [Rogalski 03] l'activité de diagnostic de l'enseignant est déterminée par un compromis entre les attendus (plus ou moins explicites) de l'institution : « faire le programme », ce qui nécessite de « faire avancer la classe » dans sa globalité, et « d'assurer l'apprentissage de tous les élèves », et appelle des diagnostics différenciés. Le diagnostic vise la classe ou les élèves. Dans le premier cas, il s'agit pour l'enseignant de mettre en adéquation le contenu prévu pour la séquence d'enseignement et la compréhension de celui-ci par la classe. Sa visée majeure est la régulation de l'activité de la classe quant au savoir à enseigner en jeu. Le second type de diagnostic articule une évaluation globale de la classe et une évaluation individuelle des élèves.
Le diagnostic des enseignants s'appuie sur les erreurs récurrentes des élèves et est déterminé essentiellement par des objets algébriques (équations, identités remarquables etc.) alors que celui de Pépite est orienté sur les compétences et s'appuie sur les dimensions outil et objet de l'algèbre. Or cette entrée n'est pas habituelle pour les enseignants tant pour le diagnostic que pour la remédiation. Par ailleurs, le diagnostic prend

essentiellement la forme d'une catégorisation des élèves en sous-classes, par exemple « les bons », « les moyens rapides », « les moyens faibles », « les faibles ». Il apparaît aussi que plus les enseignants sont expérimentés, plus ils réalisent un « diagnostic dynamique », lié à un répertoire d'actions, autrement dit à ce que l'enseignant peut mettre en œuvre dans la classe suite aux constats établis.
En conséquence, alors que l'usage de PépiTest montre que cet outil est souvent aussi « transparent » que des copies classiques d'élèves, l'usage du diagnostic de Pépite pose divers problèmes, en particulier : celui de l'articulation entre le diagnostic individuel de Pépite et la nécessité de disposer d'une « géographie cognitive » de la classe, celui de l'articulation entre le diagnostic et les actions à entreprendre pour exploiter le diagnostic dans la classe, enfin celui de l'expression du diagnostic pour permettre une entrée par les erreurs récurrentes et une classification plus proche des catégories usuelles des enseignants.
En nous fondant sur ces études, nous avons émis l'hypothèse de travail selon laquelle les stéréotypes constituent un outil conceptuel pour favoriser l'appropriation par les enseignants d'un artefact complexe comme l'est Pépite car ils permettent d'articuler diagnostic individuel et « géographie de la classe » pour faire progresser la classe en respectant les différences individuelles. Ceci nous a amenés à concevoir et réaliser le logiciel PépiStéréo que nous présentons maintenant.

4.3.2 Des scénarios d'utilisation du logiciel

Comme nous l'avons indiqué dans la section 2 de ce chapitre, les méthodes actuelles de conception centrée utilisateurs recommandent l'utilisation de scénarios pour guider l'équipe de conception, pour spécifier les fonctionnalités sans les abstraire des contextes d'utilisation et pour faciliter la participation des utilisateurs au sein de l'équipe de conception. Dans l'absolu les utilisateurs du diagnostic pourraient être les élèves, leurs parents, des chercheurs. Nous nous sommes centrés dans ce projet sur un seul public cible : les enseignants que l'on peut scinder en deux catégories les professeurs de collège et les professeur de lycée. Avec la participation des enseignants membres de l'équipe du projet Lingot nous avons retenu douze scénarios qui mettent en scène ces deux catégories dans différentes activités.
Scénario n°1 :
Marie-France est professeure de troisième et prépare le conseil de classe du troisième trimestre. Le cas d'Alexandre lui pose problème. Il a été absent pour raison médicale, et sa moyenne est insuffisante pour un passage en seconde. Elle a le sentiment qu'il a progressé et qu'il a le potentiel pour réussir en dépit de ses résultats. Comme elle a fait passer PépiTest à ses élèves pour les aider à préparer un Brevet blanc, elle utilise PépiStéréo pour fonder son jugement et disposer d'arguments en conseil de classe. Elle constate qu'Alexandre est classé en UA3 (L'élève ne résout pas assez d'exercices avec la démarche algébrique. Ses justifications sont mal assurées : soit elles sont trop rarement correctes, soit elles comportent des arguments non algébriques ou incomplets) T2 (Les compétences de l'élève pour passer d'une représentation à une autre sont encore fragiles : soit ses erreurs pour exprimer algébriquement des relations entre les variables en jeu concernent plus de la moitié des exercices traités, soit ses réussites dans les traductions sont inférieures aux erreurs et absences de réponse) CA3 (L'élève ne réussit pas à mener des calculs : soit il ne maîtrise pas le rôle des opérateurs, soit il s'est construit des règles de calcul fausses). Elle imprime le profil personnel détaillé d'Alexandre pour l'emmener au conseil de classe.
Scénario n°2 :
Christian est professeur de seconde. En début d'année, avant d'entamer le chapitre sur les fonctions, il veut homogénéiser sa classe et s'assurer des bases de ses élèves en algèbre. Il fait passer le test à ses élèves, et recueille leurs réponses. PépiStéréo lui montre qu'un groupe de douze élèves est en UA3 T3 CA3 (Cf. Figure 8). Il décide de prendre ces élèves en aide individualisée sur deux semaines. La première semaine, il prend ceux qui ont le type d'erreur « Identification incorrecte de x et + : Linéarisation des expressions » et leur propose des exercices où il s'agira de déstabiliser fortement les connaissances erronées, telle que la traduction mot à mot d'un énoncé en langage naturel pour concevoir une contrainte algébrique (la contrainte " il y a 6 fois plus d'élèves que de professeurs " ne se traduit pas par 6 x E=P).
Scénario n°3 :
Danièle 47 ans est professeur de mathématiques en seconde. Chaque année lui est affectée des classes de seconde. Les programmes de collège changent, les élèves aussi, ils viennent de différents collèges. Afin de mieux cibler son enseignement, elle voudrait faire un bilan des connaissances de ses élèves en algèbre, ce qui est fondamental pour pouvoir aborder par la suite sereinement l'analyse. Dés la rentrée elle fait passer le test au élève. Une des salles est réservée auparavant pour deux séquences exceptionnelles de deux heures consécutives (plus de trente élèves pour une salle composée de 18 postes). Le responsable du réseau a installé le logiciel sur les 18 postes et lui donne ensuite les réponses des élèves sur disquette. Ensuite elle utilise le

logiciel de diagnostic. Elle peut le faire au lycée mais préfère travailler chez elle. Pour certains élèves, elle vérifie la comment les exercices ont été évalués en se référant aux textes des exercices. Ce bilan lui est adressé mais elle voudrait pouvoir l'imprimer pour que les documents puissent lui servir durant l'année, chez elle comme au lycée.

Scénario n°4 :
Jean-Louis, professeur de mathématiques en seconde, reçoit ce soir à l'occasion d'une réunion parents – professeurs, quelques parents d'élèves (6 au total) en difficultés. Cette réunion a lieu chaque année en octobre. Toutes les élèves de seconde du lycée ont passé le test début septembre. Les résultats de chaque classe sont déjà dans le répertoire personnel des professeurs sur le réseau. Il voudrait rapidement pouvoir présenter un bilan détaillé des ces élèves à leurs parents. Il se rend sur un ordinateur en réseau, se connecte, accède au logiciel de diagnostic, demande directement les résultats détaillés des 6 élèves et les imprime. Il pourra ainsi asseoir son discours sur une évaluation rigoureuse face aux parents.

Scénario n°5 :
L'aide individualisée en seconde est l'occasion d'avoir un contact différent avec ses élèves. Dominique veut pouvoir prendre séparément chacun de ses élèves et discuter avec eux, en entretien particulier, de leur niveau après le test passé en début d'année. D'un ordinateur il imprime chacun des profils des élèves et pour pouvoir expliquer aux élèves le contenu de ces profils, imprime de même le document explicatif, la page d'aide contenu dans le logiciel.

Scénario n°6 :
Alain est professeur en collège. Il a beaucoup d'expérience et utilise depuis longtemps les TICE dans sa pédagogie. L'installation de Pépite ne lui pose pas de problème, de plus il gère le réseau de son établissement et occupe fréquemment la salle informatique. Le matériel à sa disposition n'est pas toujours de récente facture. Nous sommes fin mai et les conseils de classe et d'orientation vont avoir lieu en juin. Pour assurer ses décisions au conseil de classe sur l'orientation des élèves dans sa discipline, il utilise le logiciel de diagnostic pour établir un panorama de la classe par groupe de niveau. Il vérifie les résultats détaillés de certains de ses élèves pour s'assurer de leur compétence. Cela conforte ses décisions pour les cas les plus litigieux.

Scénario n°7 :
Anne est professeur en collège et pratique depuis plusieurs années la pédagogie par groupe de niveau avec deux autres collègues. Ses connaissances en « informatique » sont faibles. Nous sommes vers Pâques et pour le programme dans une partie algébrique. Néanmoins, avec l'aide du responsable informatique du collège qui lui prépare l'installation de Pépite sur les postes et un emploi jeune présent avec elle et qui connaît « les ordinateurs », elle décide d'utiliser Pépite puis le logiciel de diagnostic pour répartir les élèves des trois classes (à tour de rôle) en groupe de niveau, plutôt que de passer par une évaluation type test commun qu'elle utilise avec ses collègues. Le responsable lui prépare ensuite un ordinateur pour le traitement. Elle demande une répartition par groupe de compétence en algèbre pour les trois classes, simultanément. Elle imprime le résultat.

Scénario n°8 :
Nathalie a deux « seconde » chaque année. Une avec option SI (sciences de l'ingénieur) et l'autre avec option (Sciences économiques et sociales). Chaque année, elle note des disparités entre ces deux types de classe. A la fin du premier trimestre et avant les conseils de classe, elle décide d'effectuer une comparaison des deux classes pour obtenir une « géographie » de celles-ci. Elle profite des heures d'aide individualisée et de module pour faire passer le test à tous. Son niveau en « informatique » est débrouillée, aussi elle demande au responsable du réseau pédagogique de lui préparer le traitement pour le logiciel de diagnostic. Sur son répertoire personnel sur le réseau, elle a maintenant deux répertoires, un par classe. Elle consulte tour à tour l'évaluation des deux classes, imprime les groupements d'élèves, et voudrait rendre aux élèves leurs profils.

Scénario n°9 :
La classe de seconde d'Odile a passé le PépiTest en début d'année. Elle a déjà profité du logiciel de diagnostic pour savoir quels élèves elle allait prendre en aide individualisée. Elle décide d'utiliser désormais le logiciel de diagnostic afin d'homogénéiser sa classe avant d'aborder une nouvelle notion. Son niveau en informatique est correct. Elle accède aux résultats de sa classe, et regarde pour les élèves qu'elle juge en plus

grande difficulté, l'ensemble des erreurs qui ont été faites, surtout l'utilisation de règles fausses qu'ils ont malheureusement assimilés. Finalement, elle relève pour certaines règles fausses, l'ensemble des élèves qui présentent celles-ci.

Scénario n°10 :
Ce scénario reprend le précédent dans son contexte, mais le but est alors d'organiser plusieurs séquences différenciées par groupe de compétence à partir du diagnostic donné.

Scénario n°11 :
Martine est professeur en classe de troisième. Elle a fait passé PépiTest à ses élèves après les vacances de Pâques. Elle a donné à chaque élève ses résultats propres, avec le plus de détails possible, en version papier. Ayant fini le programme de l'année, elle désire mettre en concurrence les notions d'algèbre du programme officiel avec celles mise en évidence dans Pépite par curiosité pour elle-même et pour que ses élèves n'aient rien omis dans ce domaine avant l'entrée au lycée. Elle recherche alors les notions que l'élève doit acquérir fournies par les programmes, qu'elle met en correspondance avec les compétences révélées par le diagnostic.

Scénario n°12 :
Jean-Claude, professeur en collège, connaît bien ses élèves et voudrait faire le parallèle entre son évaluation propre basée sur sa connaissance des élèves, son expérience professionnelle et les profils donnés par le logiciel de diagnostic. Il voudrait savoir comment ces profils sont établis et quels degrés de confiance il peut leur attribuer. Il connaît le maniement d'un ordinateur. Pour compléter son « expertise », il va chercher d'autres renseignements sur Internet afin de préciser sa compréhension des éléments qui constituent ces profils.

4.3.3 Présentation du diagnostic dans PépiStéréo

A partir des différentes analyses nous avons d'abord restructuré la description du profil cognitif d'un élève, puis travaillé sur la présentation d'une vision globale des compétences de la classe. Enfin nous avons spécifié un certain nombre de fonctionnalités indispensables.

Restructuration des profils de Pépite

En ce qui concerne le diagnostic individuel, les contraintes suivantes nous sont apparues incontournables pour les utilisateurs :

- mettre en évidence les points faibles et les points forts de l'élève
- faire figurer une liste classée des erreurs commises par l'élève et ses taux de réussite
- minimiser le nombre de composantes
- permettre de situer l'élève par rapport à ces camarades et aux attendus de l'institution
- fournir des pistes pour organiser des apprentissages

Après de nombreuses discussions, nous avons décidé que :

- le profil cognitif d'un élève dans PépiStéréo est constitué de deux parties : le stéréotype auquel il appartient et des caractéristiques personnelles de l'élèves exprimées sur les trois dimensions du stéréotype en termes de taux de réussite, de leviers, fragilités et liste des erreurs.

La figure 8 montre une copie du profil de Mickael.
Les stéréotypes sont calculés à partir des modes de fonctionnement selon le procédé présenté au paragraphe 4.2.2. Les leviers et fragilités sont prédéfinis et associés aux stéréotypes par l'analyse didactique a priori. Un commentaire lui aussi prédéfini est associé au stéréotype pour en présenter les principales caractéristiques. Les taux de réussite et la liste des erreurs sont propres à l'élève. PépiStéréo calcule les taux de réussite à partir du codage par PépiDiag des traitements (corrects et partiels). La liste des erreurs est obtenue en croisant le codage des réponses et l'analyse a priori des exercices. Par exemple pour le type d'erreur « utilisation inadaptée des parenthèses qui conduit à un résultat incorrect » (codé m31), pour chaque exercice où le codage de la réponse de l'élève comporte « m31 », le programme affiche l'erreur correspondante de la grille d'analyse de l'exercice.
Cette présentation du diagnostic, qui fournit une entrée par des catégories générales et les taux de réussite et liste d'erreurs d'élèves, est apparue compréhensible et significative aux enseignants auprès desquels nous l'avons testée (dix enseignants).

Géographie cognitive de la classe

La nécessité de définir des groupes d'élèves que l'enseignant fait travailler de façon différenciée est une fonctionnalité importante pour de nombreux enseignants. PépiStéréo classe un ensemble d'élèves par stéréotype. L'enseignant dispose ainsi de groupes d'élèves ayant des compétences voisines en algèbre. PépiStéréo permet dans chacun de ces groupes de consulter le profil détaillé de chacun des élèves Il propose des objectifs prioritaires d'apprentissage adaptés à chacun de ces groupements par stéréotype. La Figure 9 montre la géographie cognitive de deux classes de seconde en début d'année. Le professeur de mathématiques qualifie la première de bonne classe mais hétérogène. PépiStéréo confirme l'opinion du professeur mais en la précisant par rapport aux contenus enseignés : Les élèves sont regroupés sur dix stéréotypes différents et la moitié de la classe se situe aux niveaux 1 et 2 pour la dimension usage de l'algèbre (UA1, UA2). Le professeur de la seconde classe l'estime homogène mais faible ce qui est confirmé par PépiStéréo qui a trouvé cinq stéréotypes et les deux tiers de la classe en UA3 T3 CA3.
Si en théorie on dispose de trente six stéréotypes, certains sont improbables (Cf. 4.2.2). Dans le corpus de trois cent quarante élèves de troisième et seconde dont nous disposons à l'heure actuelle, nous avons relevé *treize stéréotypes* et *souvent moins de six stéréotypes différents* dans une classe ce qui nous rapproche du nombre de catégories spontanément identifiées par les enseignants.

21	Date du test : 29/09/2004	Classe : 2nd 10
Mickael	Questions traitées : **61 %** Taux de réussite aux questions traitées : **61 %**	Imprimer ce profil

Stéréotype et commentaires		Caractéristiques personnelles
UA3	**Usage de l'algèbre Niveau 3** L'élève ne résout pas assez d'exercices avec la démarche algébrique. Ses justifications sont mal assurées : - soit elles sont trop rarement correctes - soit elles comportent des arguments non algébriques ou incomplets	Exercices de mathématisation : Taux de réussite : 18 % ● Leviers Début d'utilisation de l'algèbre pour prouver ● Fragilités L'outil algébrique n'est pas bien maîtrisé et justification par l'algèbre dominante dans un contexte trop faible ● En particulier… Justification de type scolaire reposant sur l'application de règles incorrectes Exercice 4c Justification en langage naturel Preuve avec utilisation de propriétés énoncées en langage naturel à l'exercice 4a
T3	**Traduction Niveau 3** L'élève a des difficultés : - soit à exprimer algébriquement les relations entre variables - soit à associer une expression algébrique à une autre représentation (ou vice versa). Dans au moins un cas, l'écriture symbolique est utilisée pour « sténographier » ou abréger la situation, c'est à dire sans retrouver les relations entre les différentes variables en jeu.	Exercices de reconnaissance :Taux de réussite : 48 % ● Fragilités Traduction abréviative ● En particulier… Traduction incorrecte Expression non parenthésée ou confusion aire – périmètre à l'exercice 3 Confusion produit – somme à l'exercice 5a Traduction incorrecte pour : retrancher du résultat, à l'exercice 11p1b Traduction abréviative Mauvais calcul avec les coordonnées des points d'intersection avec les axes dans l'exercice 7 6xE=P traduit terme à terme par la relation : il y a 6 fois plus d'élèves que de professeurs à l'exercice 10
CA3	**Calcul algébrique Niveau 3** L'élève ne réussit pas à mener des calculs : - soit il ne maîtrise pas le rôle des opérateurs - soit il s'est construit des règles de calcul fausses	Exercices techniques : Taux de réussite : 14 % ● Fragilités Rôle des opérateurs non maîtrisé ● En particulier… Utilisation inadaptée des parenthèses mais qui conduit toutefois à un résultat correct Expression non parenthésée. a+3(a+b) pour (a+3)(a+b) à l'exercice 3p2 Utilisation inadaptée des parenthèses et qui conduit à un résultat incorrect 3+5a=8a à l'exercice 2 Utilisation de règles de transformation fausses identifiées Erreur dans l'identité remarquable $a^2-b^2=(a-b)^2$ à l'exercice 9a Règle incorrecte ax=b donne x=-b/a à l'exercice 9c Identification incorrecte de x et + : Linéarisation des expressions Confusion dans le rôle de x et + à l'exercice 9d Identification incorrecte de x et + : Assemblage des termes Mauvais regroupement $(x+2)^2-5(x+2)=(x+2)(2-5)$ à l'exercice 9b

Figure 8. *Profil de Mickael construit par PépiStéréo*

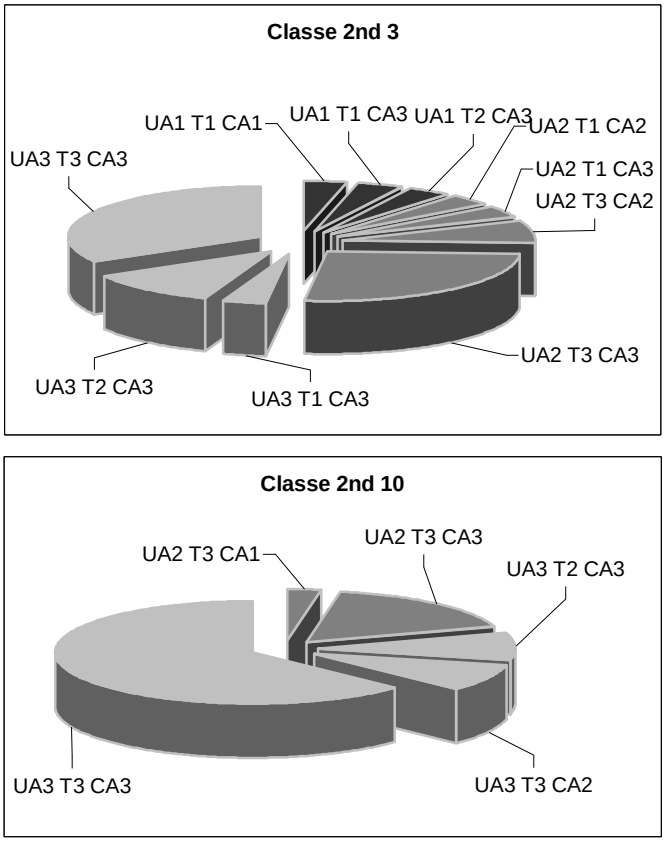


Figure 9 : *Géographie cognitive de deux classes de seconde*

L'interface pour l'enseignant

Elle est organisée autour des quatre objectifs prioritaires qui président à l'utilisation de PépiStéréo par les enseignants :

- Communiquer un résultat aux élèves
- Constituer des groupes
- Associer stéréotype et remédiation
- Imprimer

La figure 10 présente l'écran d'accueil de PépiStéréo et montre que l'on peut directement accéder à ces fonctionnalités à partir de la page d'accueil. La figure 8 montrait les résultats détaillés pour Michael.
Plusieurs types de navigation sont disponibles dans ce logiciel. Une navigation « verticale » dans la page pour se rendre directement à un élève voulu par exemple et retour. Une navigation « horizontale » pour se rendre aux diverses exploitations fournies par le diagnostic. La barre de navigation à gauche de l'écran permet à l'utilisateur de se situer en permanence. Enfin, une navigation « transversale »plus ciblée est possible, c'est-à-dire par référence à un élève. Par exemple, il est possible d'afficher les regroupements proposés par le système, et en cliquant sur le nom d'un élève, de se rendre sur son profils puis accéder à ses résultats détaillés par exemple. De même, en partant du profil d'un élève, on peut afficher le groupe d'appartenance de cet élève. Une navigation de l'élève à la classe et de la classe à l'élève est donc disponible.

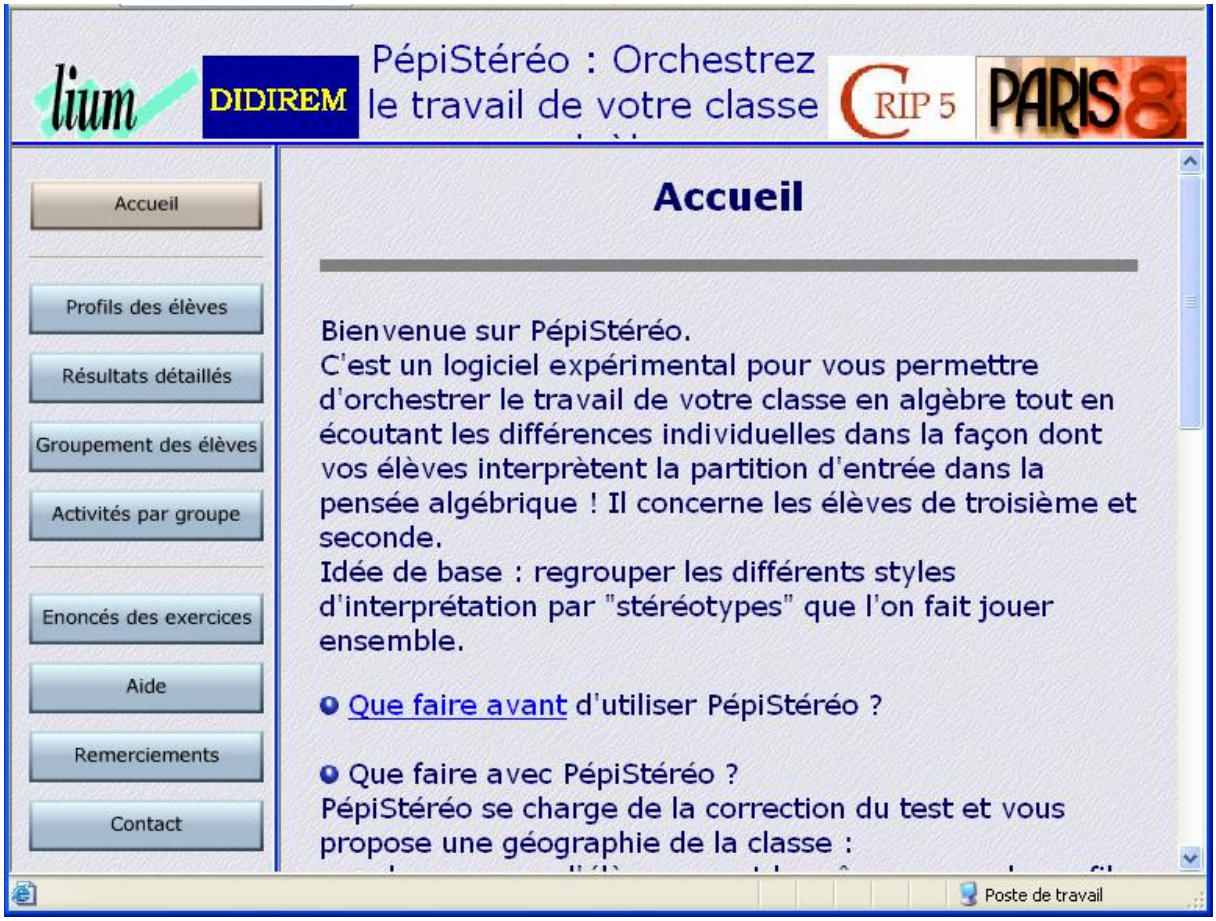


Figure 10 : L'écran d'accueil de PépiStéréo

4.4. Mise en œuvre informatique du logiciel PépiStéréo

Les fichiers crées par PépiTest qui mémorisent les réponses des élèves (fichier .pep) et les fichiers créés par PépiDiag qui mémorisent la matrice de diagnostic (fichiers . gri) étaient structurés selon un format propriétaire qui rendait leur traitement difficile. Nous avons écrit un programme Java qui les transforme en fichier XML ce qui les rend d'une part plus facile à traiter mais aussi à vérifier et à échanger. Ce dernier point est très important puisqu'il permet ainsi à des chercheurs extérieurs au projet de travailler aussi à partir des corpus recueillis avec Pépite.
Dans le premier prototype de PépiStéréo mis au point par C. Vincent, la présentation des données, des calculs résultants de l'élaboration des stéréotypes, la mise en page s'effectue par l'écriture d'un fichier XSL selon le schéma présenté à la Figure 11.
La réalisation de cette transformation est confiée à un programme écrit en Java pour permettre son intégration future dans la réécriture de projet Pépite. De plus il crée un fichier nommé classe.xml qui contient les résultats de l'ensemble des élèves d'une classe par exemple. Ce fichier est important car à partir de celui-ci qu'un traitement XSLT et XPath permet le calcul des stéréotypes des élèves et les regroupements par stéréotype.

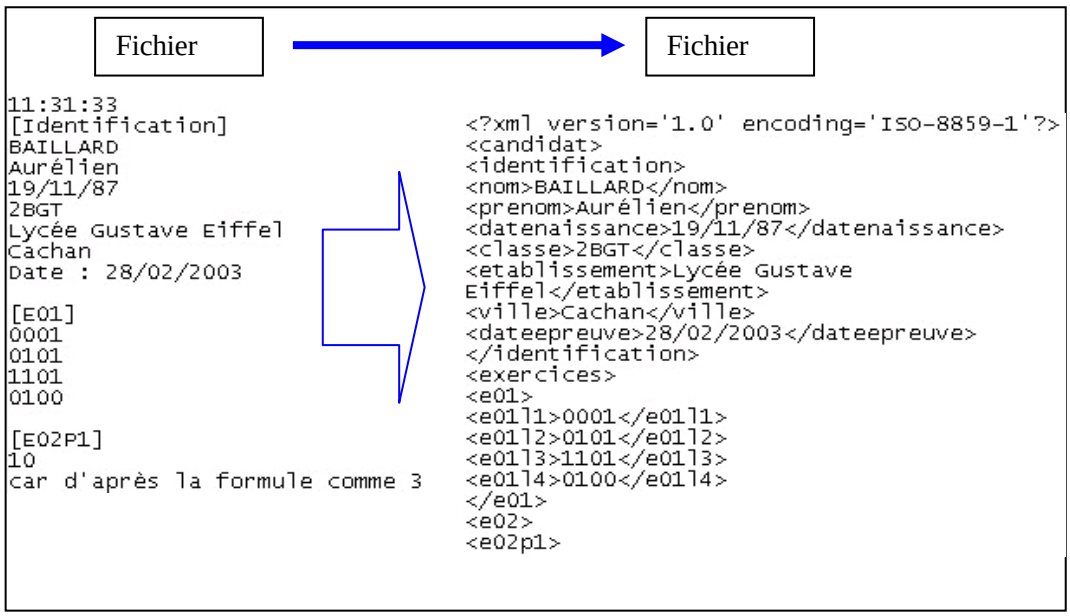


Figure 11 : Modèle des fichiers de réponses des élèves

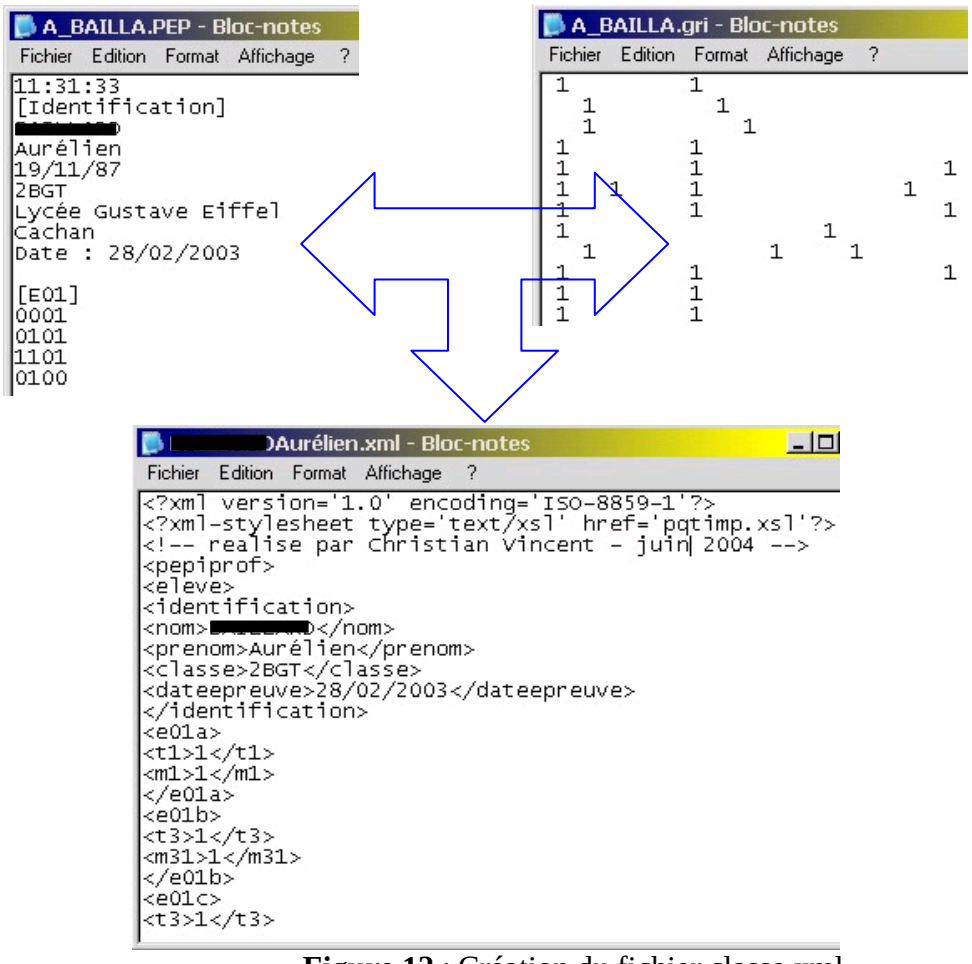


Figure 12 : Création du fichier classe.xml

4.5. Mise en perspective avec des travaux en EIAH

Comme nous l'avons indiqué dans l'introduction dans l'introduction de la section 4, la modélisation de l'utilisateur avec des stéréotypes consiste à identifier le comportement d'un utilisateur en le classifiant dans un ensemble de sous-groupes prédéfinis. Cette méthode a été introduite par [Rich 1979] pour découvrir le type de livres qui pourrait intéresser un utilisateur à partir de description que les gens font d'eux-mêmes.
Dans le domaine de la modélisation de l'utilisateur, le stéréotype est principalement utilisé par le système informatique pour personnaliser l'interaction. Dans le domaine des EIAH c'est aussi le cas pour de nombreux systèmes (par exemple [Tsiriga 2003]). [Kay 2000], [Dimitrova 1999] estiment que les stéréotypes qui consistent en une simplification peuvent aider à créer des modèles d'élèves ouverts c'est-à-dire plus faciles à comprendre, à inspecter et à modifier par les élèves eux-mêmes. Nos modèles sont aussi destinés à des utilisateurs humains mais nous nous focalisons pour l'instant sur l'enseignant. Nous pensons que les modèles que nous proposons sont dans l'état actuel trop complexes pour être présentés tels quels aux élèves. Cependant, les profils de PépiStéréo qui permettent une entrée par les taux de réussite et les erreurs pour justifier le stéréotype apparaissent à certains enseignants être une base de discussion intéressante entre eux et l'élève.
[Kay 2000] distingue plusieurs types d'approches pour la définition des stéréotypes. Les stéréotypes artisanaux sont construits à partir de l'expérience de professeurs expérimentés. Ce sont des approches ad hoc mais dont les résultats peuvent être très efficaces. Les stéréotypes expérimentaux sont établis à partir de l'analyse de données sur une quantité importante d'utilisateurs soit par des méthodes d'apprentissage automatique soit par des études de psychologie et de didactique. Notre approche s'appuie sur une étude didactique approfondie et une analyse de données recueillies avec le premier prototype logiciel.
Pour [Kay 2000] les stéréotypes sont une source d'information par défaut quand le système ne dispose d'aucune autre information. Un stéréotype est composé d'un ensemble de conditions d'activation, d'un ensemble de conditions de rétraction et d'un ensemble d'inférences qui permettent quand un stéréotype est activé de supposer un certain nombre de traits sur l'élève. Une des caractéristiques de ces inférences est d'être supposée valide d'un point de vue statistique. Ceci constitue la différence la plus importante avec notre approche. Une de nos hypothèses pédagogiques est que c'est une compréhension fine des compétences des élèves qui permet d'adapter efficacement l'enseignement à l'élève. Dans PépiStéréo, c'est donc un test très poussé des compétences des élèves qui permet d'affecter un stéréotype à un élève. Nous ne considérons pas les stéréotypes comme des valeurs par défaut mais comme des abstractions qui facilitent la représentation des compétences d'un ensemble d'individus et la prise de décisions stratégiques. Cependant nous envisageons de disposer de tests plus rapides qui s'appuient sur des inférences pour mettre en place des tests qui s'adaptent aux premières réponses de l'élève. Ces tests adaptatifs pourraient reposer sur les stéréotypes.

4.6. Résultats, validation de notre approche par stéréotypes et perspectives

Nous avons proposé des stéréotypes pour effectuer des groupements d'élèves ayant des fragilités et des leviers d'apprentissage voisins. Ces stéréotypes sont fondés sur une analyse didactique fine du domaine et leur calcul est instrumenté par un logiciel que nous avons mis au point. Nous avons mis en évidence que différents types de modélisations sont nécessaires pour différents usages et différents utilisateurs. Le tableau 20 résume les niveaux de modélisation mis en œuvre dans le logiciel PépiStéréo.
Nous avons émis l'hypothèse que les stéréotypes pouvaient constituer un outil pour permettre aux enseignants d'orienter le choix des activités à proposer à leurs élèves en fonction d'un positionnement de leurs élèves par rapport aux contenus à enseigner. Nous n'avons pas le recul nécessaire pour apporter dans cet article une réponse définitive au problème complexe de l'articulation de la gestion de la classe et de la nécessaire personnalisation de l'enseignement. Les retours sur les usages de PépiProf et de PépiStéréo sur plusieurs années (2000-04), nous montrent qu'un temps de maturation, souvent une année scolaire, est nécessaire entre la rencontre avec la démarche pédagogique sous-tendue par ces logiciels et leur réinvestissement dans la pratique de l'enseignant.
Cependant nous avons mis à l'épreuve notre hypothèse dans cinq classes de seconde. Ces premiers tests n'invalident pas notre hypothèse de travail. Ceux-ci ne constituent pas une validation externe mais en constituent les prémices. Nous envisageons de suivre l'année prochaine les enseignants qui ont testé PépiStéréo cette année pour voir s'ils exploitent le logiciel et comment. Cette validation externe est cependant difficile à mettre en place car de nombreux facteurs extérieurs à l'approche proposée et au logiciel proposé interviennent dans l'utilisation ou la non-utilisation d'un logiciel. Par exemple, la mise en place de nouveaux

programmes pour l'algèbre au collège qui proposent une approche de l'algèbre proche de celle qui sous-tend nos travaux pourrait cependant favoriser l'adoption du logiciel.

Modèles	Niveaux	Concerne…	Utilisations	Expression
Stéréotypes	Épistémique	Le groupe	Décisions stratégiques	Levier, fragilités, objectifs de travail prioritaires
Caractéristiques personnelles	Épistémique	L'individu	Décisions tactiques	Taux de réussite, listes des erreurs types
Codage des réponses	Comportemental	L'individu	Compréhension	Critères multidimensionnels
Réponses de l'élève	Les observables	L'individu	Compréhension	Choix multiples, série d'expressions algébriques, langage naturel

Tableau 20 Différents niveaux de modélisation de l'élève dans PépiStéréo.

En ce qui concerne la validation interne, tout d'abord, les profils tels qu'ils sont présentés dans PépiStéréo ont été construits, comme ceux de PépiProfil, à partir d'une analyse didactique validée. Puis ils ont été restructurés à partir d'une analyse ergonomique et ils ont été reformulés après un travail important avec des enseignants pour adopter leur terminologie métier. Les premiers tests n'ont pas mis en évidence les réactions négatives suscitées par la complexité des écrans de PépiProfil. De plus les stéréotypes nous ont permis, au sein de l'équipe de recherche, de définir les objectifs stratégiques d'apprentissage associés aux profils et de mettre en place quelques situations où les décisions tactiques s'appuient sur les caractéristiques individuelles des profils [Grugeon 03].
Plus généralement, les premières modélisations mises en œuvre dans ce projet ont été définies d'abord pour décrire et comprendre le fonctionnement cognitif des élèves en algèbre élémentaire à partir d'indicateurs prélevés dans des situations prévues à cet effet. Ces premières modélisations ont servi de base pour pouvoir, dans un deuxième temps, construire d'autres représentations qui d'une part, facilitent l'action et les prises de décisions et, d'autre part, permettent de passer d'un niveau plus générique (le stéréotype avec ses leviers et ses fragilités) à un niveau spécifique (la liste des erreurs et les taux de réussite d'un élève) et réciproquement.

5. DIFFICULTES, BILAN ET PERSPECTIVES

Les objectifs du projet sur l'axe diagnostic que nous nous étions fixés consistaient à :

1. définir des profils types (classes de profils ou stéréotypes)
2. construire des modèles d'exercices de diagnostic paramétrables pour pouvoir générer une base d'exercices afin de pouvoir adapter les tests à différents contextes de classe
3. définir plusieurs types de présentations du diagnostic pour différents utilisateurs (chercheurs, enseignants, élèves).

5.1. Classes de profils et stéréotypes

Comme nous venons de le décrire, nous avons défini des classes de profils que nous appelons des stéréotypes, termes que nous préférons à celui de profils types. Sur cet aspect, l'avancée du projet est la plus significative puisque nous avons identifié d'abord identifié des classes de profils et spécifié un algorithme pour classifier un élève dans un stéréotypes suite à l'analyse automatique des ses réponses par le logiciel Pépite. Puis nous avons conçu et réalisé un logiciel PépiStéréo qui met en œuvre ces différentes modélisations. Nous avons testé ce logiciel auprès d'une dizaine d'enseignants. Ce travail a donné lieu à une publication qui vient d'être acceptée à la conférence EIAH2005 (Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain). Une autre publication a été soumise à la conférence AIED2005 (Artificial Intelligence in Education).

5.2. Génération d'exercices de diagnostic

En ce qui concerne, le deuxième objectif concernant la génération d'exercices de diagnostic, avant de l'aborder, nous avons du travailler à étendre et fiabiliser le prototype logiciel existant afin de mener les observations (axe trois) dans des conditions satisfaisantes. Ce travail minutieux de révision et de reconception du diagnostic a été mené à bien (logiciel téléchargeable sur le site de Pépite et utilisé pour les observations menées pour l'axe trois du projet) mais il a duré plus longtemps que ce qui était prévu. Rappelons que la personne qui est en charge de cet aspect n'y consacre qu'une partie de son temps. Nous nous sommes rendu compte que les modifications plus importantes que réclamaient les retours d'utilisation nécessitaient de revoir l'architecture du prototype et de le réécrire complètement. Nous avons donc engagé deux étudiants pour porter en Java PépiTest et la partie de PépiProf qui permet aux enseignants de vérifier le codage automatique. Ces travaux que nous n'avions pas prévus dans le calendrier prévisionnel nous ont permis d'aborder la deuxième phase du projet avec des prototypes plus fiables. Dans la section 3 de ce chapitre nous avons exposé les premiers travaux sur la modélisation des exercices de diagnostic que nous avons menés en particulier sur l'exercice du prestidigitateur. La spécification des modèles d'exercices est terminée et nous avons abordé la phase d'implémentation sur une classe d'exercices.

5.3. La mise au point de différents modèles pour différents utilisateurs.

PépiProf s'est avéré un logiciel extrêmement utile pour les chercheurs en didactique puisqu'à partir des profils cognitifs qu'il établit trois chercheurs ont pu mené une analyse d'un corpus de 200 réponses pour spécifier les stéréotypes. De plus, la présentation du profil et du codage des réponses qu'il présente se sont avérées très utiles dans des contextes de formations d'enseignants.
Pour une utilisation en classe par les enseignants nous avons mis au point une nouvelle structuration du profil présentée par le logiciel PépiStéréo.
En ce qui concerne la présentation du profil aux élèves nous n'avons pas eu le temps d'approfondir la question. Notons qu'un retour minimal demandé par les enseignants est maintenant possible puisque l'élève (ou l'enseignant) a la possibilité d'imprimer le test avec les réponses et de l'annoter dans la nouvelle version Java de PépiTest..
Sur le troisième point du calendrier, comme nous l'avons signalé dans l'introduction de ce chapitre, le groupe 3 qui avait comme objectif de travailler avec des enseignements de mathématiques et des formateurs IUFM de Créteil pour étudier les retours que les enseignants donnent à leurs élèves après le passage du test a nécessité plus de temps que prévu pour se mettre en place. La principale raison est le manque de disponibilité des participants et la difficulté à faire coïncider les agendas. Une raison plus profonde tient à la complexité du projet. Notre objectif étant d'intégrer des praticiens dans l'équipe, il fallait leur laisser le temps d'entrer dans le projet et d'exprimer leurs idées. Il a été décidé de travailler sur deux aspects pour utiliser au mieux les compétences et les aspirations des participants :

1. Une étude exploratoire pour étudier comment PépiTest peut être utilisé pour interroger les élèves sur leur rapport à l'algèbre et leur mode de fonctionnement en algèbre.
2. Une étude linguistique des réponses d'élèves obtenues avec PépiTest et exprimées en langue naturelle en réponse à des exercices de justifications d'équivalence d'expressions (S. Normand, linguiste et L. Coulange didactique des mathématiques).

Concernant le premier aspect, nous avons mis en place fin juin 2003 des observations d'utilisation de Pépite par trois enseignants et huit élèves dans le temps scolaire et quatre élèves hors contexte scolaire. Nous avons soumis à un entretien les élèves avant qu'ils passent le test, puis enregistré la façon dont deux enseignantes de l'équipe, en compagnie d'une des conceptrices du logiciel étudiaient le profil de l'élève avec Pépite et le retour qu'elles faisaient aux élèves. Les cassettes audio sont presque toutes décryptées et nous allons maintenant les étudier en lien avec le travail sur l'axe trois.

5.4. Analyse linguistique pour fiabiliser le diagnostic automatique

Le second aspect se situe dans l'optique de fiabiliser le diagnostic automatique. Comme nous l'avons exposé dans la section 2, la version 1 de Pépite n'analysait pas les justifications données par les élèves. D. Prévit a travaillé à l'analyse des justifications exprimées à l'aide d'expressions algébriques. Le travail de S. Normand et L. Coulange a eu pour objectif d'étudier si des marqueurs linguistiques peuvent être corrélés avec les critères de diagnostic définis dans l'analyse didactique a priori. Pour confirmer et étendre ces premières

observations, des exercices permettant de moduler les variables de la tâche pour recouvrir les différents cas de figure vont être proposés à une population d'élèves de troisième. Ces travaux exploratoires ont donné lieu à une publication en français à la conférence TICE2004 (Technologie pour l'information et la communication pour l'éducation) et en anglais à la conférence ITS2004 (Intelligent Tutoring Systems) et à des communications orales.

5.5. En conclusion

Par rapport aux objectifs du projet concernant l'axe diagnostic, nous avons :

- Construit les classes de profils et implémenté un logiciel qui les met en oeuvre
- Spécifier la modélisation des exercices de diagnostic pour les générer
- Avancé sur la présentation des bilans de compétence aux chercheurs et aux enseignants et engagé un travail exploratoire pour la présentation aux élèves.

Sur ce dernier point, il nous apparaît clairement maintenant que le problème n'est pas tant de présenter des bilans de compétences que d'envisager comment ces différentes catégories d'utilisateurs les exploitent.
De plus nous avons fiabilisé et étendu le diagnostic automatique de la première version de Pépite (en particulier en progressant sur le difficile problème des réponses aux questions ouvertes) et commencé à implémenter une seconde version plus robuste que la première et incluant les modifications suggérées suite aux retours d'utilisation et aux premières conclusions de l'axe trois sur l'instrumentation de l'activité des enseignants.

RÉFÉRENCES

[Aleven et al. 2002] V. Aleven, O. Popescu, K. Koedinger, 2002 Pilot-Testing a Tutorial Dialog System That Supports Self-Explanation, Proceedings of ITS'2002, Biarritz (France), 5-8 juin 2002. Cerri S., Gouardéres G., Paraguaçu F. (eds.), Springer-Verlag, p. 344-354

[Artigue et al 2001] M. Artigue, T. Assude, B. Grugeon, A. Lenfant, Teaching and Learning Algebra : approaching complexity trough complementary perspectives, In H. Chick, K. Stacey, J. Vincent, J. Vincent (Eds), The future of the Teaching and Learning of Algebra, Proceedings of 12 th ICMI Study Conference, The University of Melbourne, Australia, December 9-14, 2001, 21-32.

[Austin 1962] J. L. Austin, 1962, How to do the things with words. Cambridge, Cambridge University Press.

[Caroll 1997] J. M. Caroll, Scenario-Based Design, M. Helander, T.K. Landauer, P. Probhu (eds.), Handbook of Human_Computer Interaction, 2nd edition,1997, Elsevier Science, 383-406.

[Carroll et al. 2001] J. M. Carroll, G. Chin, M. B. Rosson, D. C. Neale, The Development of Cooperation: Five Years of Participatory Design in the Virtual School,, in John M. Carroll (ed.), Human-Computer Interaction in the New Millenium, Addison Wesley, 2001, 373-418.

[Chevallard 1985 et 89] Chevallard Y. (1985). Le passage de l'arithmétique à l'algébrique dans l'enseignement des mathématiques au collège – Petit x n°5, 51-94. et Petit x n°19, 43-72.

[Delozanne et al. 2002a], E. Delozanne, B.Grugeon , M. Artigue, J. Rogalski, Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT, Réponse à l'appel à Projet Cognitique 2002, École et sciences cognitives: Les apprentissages et leurs dysfonctionnements.

[Delozanne et al 2002 b], É. Delozanne, B. Grugeon, P. Jacoboni, " Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation ", In Proceedings of IHM'2002, International Conference Proceedings Series, ACM, 2002, Poitiers, France 25-32

[Delozanne et al. 2003] E. Delozanne, D. Prévit, B. Grugeon, P. Jacoboni (2003), Scénarios d'utilisation et conception d'un EIAH, le cas du diagnostic dans Pépite, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, ITEM 2003, Reims, 20-23 juin 2003

[Delozanne et al. 2005] E. Delozanne, C. Vincent, B. Grugeon, J.-M. Gélis, J. Rogalski, L. Coulange (2005), From errors to stereotypes: Different levels of cognitive models in algebra , article soumis à la conférence AIED2005.

[Dimitrova et al. 1999] Dimitrova M, Self J., The interactive maintenance of open learner models, In S. Lajoie, M. Vivet (Eds.), Artificial Intelligence in Education (1999), 405-412.

[Douady 1985] Douady R. (1985), The Interplay between Different Settings: Tool-Object Dialectic in the Extension of Mathematical Ability: Examples from Elementary School Teaching, in Streefland ed,

[Ducrot 1984] O. Ducrot, 1984, Le dire et le dit, Paris, Minuit

[Duval 1993] Duval R. (1993). Registres de représentation sémiotique et fonctionnement cognitif de la pensée. Annales de Didactique et de Sciences Cognitives, 5, 37-65.

[Gould 1997] Gould, J. D., Boies, S. J., & Ukelson, J. (1997). How to design usable systems. In Helander, M. G., Landauer, T. K., & Prabhu, P. V. (Eds.), Handbook of human-computer interaction, 2d ed., 231-254. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland

[Grugeon 1995] B.Grugeon, étude des rapports institutionnels et des rapports personnels des élèves à l'algèbre élémentaire dans la transition entre deux cycles d'enseignement : BEP et Première G, thèse de doctorat, Université Paris 7, 1995.

[Grugeon 1997] Brigitte GRUGEON, *Conception et exploitation d'une structure d'analyse multidimensionnelle en algèbre élémentaire*, Revue de Didactique des Mathématiques, Vol. 17, n°2, pp.167-210, 1997.

[Grugeon et al. 03] B. Grugeon, L. Coulange, V. Larue (2003), Familles de situations d'interactions en algèbre élémentaire : deux exemples, Colloque Intégration des Technologies à l'Enseignement des Mathématiques, ITEM 2003, Reims, 20-23 juin 2003.

[Jean et al. 1999] Stéphanie JEAN, Élisabeth DELOZANNE, Pierre JACOBONI et Brigitte GRUGEON, A Diagnosis Based on a Qualitative Model of Competence in Elementary Algebra, S. Lajoie & M. Vivet eds, Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Le Mans July 99, IOS Press, Amsterdam, p. 491-498, 1999.

[Jean 2000] S. Jean, PEPITE : un système d'assistance au diagnostic de compétences, thèse de doctorat, Université du Maine, 2000.

[Kay 2000] Kay J, Stereotypes, Student Models and Scrutability, in G. Gauthier, C. Frasson, K. VanLehn (Eds.), Intelligent Tutoring Systems, Springer, 2000

[Kieran 1992] Kieran C. (1992) : The learning and teaching of school algebra. in Handbook of Research on Mathematics Teaching and Learning.

[Kolski 2001] Christophe KOLSKI (Ed.) Analyse et conception de l'IHM, Interaction homme-machine pour les systèmes d'information Vol 1, Hermès, 2001, 250 p [Mackay et al. 1997] W. Mackay, A-L. Fayard, Radicalement nouveau et néanmoins familier : les strips papiers revus par la réalité augmentée, Actes des journées IHM 97, Poitiers.

[Mackay et al. 1997] W. Mackay, A-L. Fayard, 1997, Radicalement nouveau et néanmoins familier : les strips papiers revus par la réalité augmentée, Actes des journées IHM 97, Poitiers.

[Norman 1986] Donald Norman, S. W. Draper, User-Centred Design, Hillsdale, NJ : Erlbaum, 1986

[Normand et al. 2004 a] S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2004), Linguistic Markers to Improve Students' Assessment in Mathematics: an Exploratory Study, Proceedings of ITS'2004, août 2004, Lectures Notes in Computer Sciences 3220, Springer, 380-389.

[Normand et al. 2004 b] S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2004), Marqueurs linguistiques et compétences mathématiques, Conférence Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement Supérieur, Compiègne, 20-22 octobre 2004, 183-190.

[Normand et al. 2005] S. Normand-Assadi, L. Coulange, E. Delozanne et B. Grugeon (2005), "Extraction de pépites de connaissances dans des réponses d'élèves en langage naturel", Atelier "Extraction et Gestion de Connaissances dans les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain", 5ème journées Extraction et Gestion de Connaissances 2005, Paris, janvier 2005, 23-25.

[Péna 2003] Jean-Claude Péna, Conception et réalisation d'une interface d'assistance au diagnostic : PepiProf-Java, Mémoire de DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 2003.

[Pepite 2003] http://pepite.univ-lemans.fr

[Prévit 2002] Prévit D., Vers un diagnostic de compétences en algèbre, inspectable par différents types d'utilisateurs, Mémoire de DEA Communication Homme Machine et Ingénierie Educative, Université du Maine.

[Prévit 2003] Prévit D., Différentes modélisations pour prendre en compte les usages dans la conception d'un EIAH, Actes des journées jeunes chercheurs EIAH 2003, Strasbourg

[Prévit et al. 2004] D. Prévit, É. Delozanne, B. Grugeon (2004), Modélisation cognitive en algèbre élémentaire : une conception itérative, Conférence Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement Supérieur, Compiègne, 20-22 octobre 2004, 138-145.

[Provost 1999] Provost Jérémy, PépiProfil, un outil utilisable par les enseignants pour la gestion de classe, Mémoire de DEA DEA Communication Homme / Machine et Ingénierie Éducative, Université du Maine, septembre 1999

[Rasseneur et al. 2002] D. Rasseneur, E. Delozanne, P. Jacoboni et B. Grugeon (2002), Learning with virtual agents: Competition and Cooperation in AMICO, Proceedings of ITS'2002, juin 2002, Lectures Notes in Computer Sciences 2363, Springer, 61-70..

[Rich 1979] Rich E.User Modelling via Stereotype. Cognitive Science, 3, 329-354

[Rogalski 2003] Rogalski J., Instrumentation de l'activité enseignante, in DelozanneÉ, Grugeon B, Artigue M, Rogalski J (2003), Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT, Projet Cognitique 2002, École et sciences cognitives: Les apprentissages et leurs dysfonctionnements, rapport mi-parcours, décembre 2003, 45-61

[Rosé et al. 2003] C. P. Rosé, A. Roque, D. Bhembe, K. VanLehn, 2003, Overcoming the Knowledge Engineering Bottleneck for Understanding Student Language Input, in Ulrich Hoppe, Felisa Verdejo, Judy Kay (eds.) Proceedings of Artificial Intelligence in Education, Sydney, IOS Press, Amsterdam, 315-322.

[Schneiderman 1992] Ben SHNEIDERMAN, Designing the User Interface, Addison Wesley, 1998 (nouvelle édition), 600 p.

[Searle 1969] J. R. Searle, 1969, Speech Acts, An essay in the Philosophy of Language, Cambridge, CUP.

[SFARD 94] Sfard Aet Linchevski L(1994) : The gains and the pitfalls of reification -- The case of algebra, Educational Studies in Mathematics, Vol. 26, pp. 191-228.

[site Pépite] http://pepite.univ-lemans.fr

[TSIRIGA Virvou 03] Tsiriga V, Virvou M. Modelling the student to individualise tutoring in a web-based ICALL

[Vaseux 2003] Michael Vaseux, Réalisation d'une application client-serveur, multiplateforme et multilingue : PepiTest-Java, Mémoire d'Ingénieur-Maître, Université du Maine, Juin 2003

[Vincent et al. 2005] C. Vincent, E. Delozanne, B. Grugeon, J.-M. Gélis, J. Rogalski, L. Coulange (2005), Des erreurs aux stéréotypes : Des modèles cognitifs de différents niveaux dans le projet Pépite, Actes de la conférence EIAH2005, Environnements Informatiques pour l'apprentissage humain, Montpellier, 25-27 mai 2005 (à paraître).

CHAPITRE 3

RAPPORT D'ACTIVITE SUR L'AXE APPRENTISSAGE

Rapport coordonné par B. Grugeon-Allys

1. INTRODUCTION

1.1. Objectifs

Sur cet axe, l'équipe a centré sa recherche sur les objectifs définis dans le projet :

- élaborer des situations d'apprentissage s'appuyant sur les spécificités des EIAH ;
- associer à chaque profil type des situations d'apprentissage susceptibles de les faire évoluer.

1.2. Organisation du travail

Deux sous-groupes de DIDIREM (Université Paris 7) ont travaillé sur cet axe : B. Grugeon-Allys et L. Coulange d'une part, C. Bardini, F. Chenevotot et J.-M. Gélis d'autre part.

Dans ce chapitre, nous rappelons la problématique de notre recherche puis présentons les appuis théoriques en Didactique des Mathématiques et en EIAH que nous avons utilisés pour la conception de familles de situations d'apprentissage. Nous définissons ensuite la notion de situation d'interaction et nous l'illustrons par des exemples de situations recouvrant des entrées envisageables dans l'algèbre, et par les prototypes associés développés. Pour terminer, nous rendons compte de l'expérimentation et/ou de l'analyse en cours relative au prototype CIME. Deux axes de travail sont concernés :

1. une utilisation de CIME associée à l'usage des logiciels d'aide au diagnostic Pépite, PépiStéréro[1] ; plus particulièrement, nous explicitons la démarche utilisée pour associer au profil d'un élève des situations d'apprentissage adaptées, en vue de faire évoluer ce profil ; cette étude de cas nous permettra d'illustrer le travail à venir sur l'articulation diagnostic-apprentissage.

2. une utilisation de cet environnement informatique indépendamment d'une évaluation diagnostique.

[1] Les prototypes ont été conçus à l'origine dans ce contexte

2. CONCEPTION DE SITUATIONS D'APPRENTISSAGE

2.1. Problématique

Suite aux expérimentations du logiciel PEPITE en formation continue ou dans des classes, les enseignants ont exprimé le besoin de pouvoir disposer des situations d'apprentissage adaptées aux stéréotypes en algèbre élémentaire révélés par le diagnostic (Delozanne et al. 2002a, Vincent 2005). Il leur semblait souvent difficile de caractériser de telles situations afin de répondre aux difficultés spécifiques liées à certains profils d'élèves. Nous avons donc développé les questions suivantes, au centre du troisième axe du projet, à partir de cette demande des professeurs expérimentateurs : Comment déterminer des familles de situations d'apprentissage informatisées, visant à faire évoluer des stéréotypes en algèbre et adaptées aux profils d'élèves identifiés par PÉPITE puis reformulés par PÉPISTÉRÉO ? Comment générer automatiquement de telles situations, afin d'envisager des parcours différenciés d'apprentissage en algèbre ?

2.2. Point de vue en didactique des mathématiques : situations d'apprentissage en algèbre élémentaire

2.2.1. Objectifs d'apprentissage en algèbre

Tout comme l'axe diagnostic, l'axe apprentissage du projet s'appuie sur le modèle multidimensionnel de la compétence en algèbre, conçu par Grugeon [Grugeon 1995] à partir de travaux de didactique réalisés dans le domaine algébrique. Cette fondation commune nous permettra d'ailleurs d'envisager aisément l'articulation entre ces deux axes.

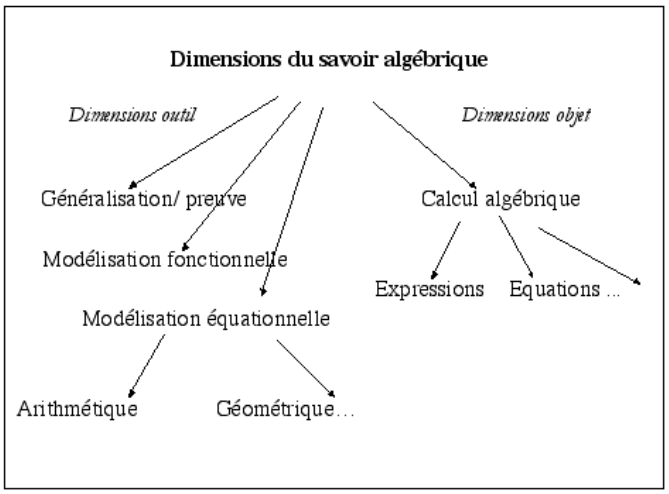


Figure 1 : Découpage multidimensionnel du savoir algébrique [Grugeon et al 2003 extrait]

Ce modèle nous sert ici de référence sur le savoir algébrique à enseigner : il nous permet de distinguer et de caractériser les objectifs d'apprentissage, auxquels se rattacheront les situations d'apprentissage envisagées. Ainsi chacune de ces situations sera associée à une ou plusieurs feuilles de la représentation arborescente schématisée ci-dessus.

Dans la suite, nous étudierons plus particulièrement deux objets de savoir algébrique : la mise en équation de problèmes arithmétiques au sein de la dimension outil, et l'interprétation d'expressions algébriques au sein de la dimension objet.

2.2.2. Situations d'apprentissage en algèbre élémentaire

Dans la théorie des situations didactiques [Brousseau 1986], interroger la capacité d'une situation d'enseignement à provoquer des apprentissages, et caractériser les objets de ces apprentissages, renvoie d'une part à la notion de situation fondamentale et d'autre part à celle de milieu a didactique.

a) La notion de situation fondamentale

Cette notion est plus spécifiquement liée aux questions relatives à l'acquisition d'un savoir donné. Une situation fondamentale est définie comme une situation a-didactique générale et génératrice, caractéristique de ce savoir. Les différentes valeurs des variables d'une telle situation permettent d'engendrer des situations qui représentent les diverses occasions d'emploi du savoir concerné, et qui font apparaître le savoir visé comme le moyen d'obtenir une procédure optimale [Brousseau 1982]. Relativement aux objets de savoir algébrique considérés, il est possible d'utiliser un point de vue théorique en lien avec la notion de situation fondamentale pour analyser des classes de problèmes ou de tâches qui font intervenir ces objets. Il s'agit de considérer des problèmes comme dégagés de toute intentionnalité didactique, ainsi que comme des représentants particuliers d'un problème plus général, en envisageant certains de leurs éléments constitutifs comme des instanciations particulières de variables. S'agissant de l'étude d'une classe de problèmes ou de tâches (et non de situations), nous parlerons de problème fondamental. Cette notion n'est bien sûr pas étrangère à celle de situation fondamentale puisqu'il s'agit d'opérer un découpage didactique du savoir : « La problématique des situations fondamentales, c'est de se demander s'il existe un problème, ou plutôt un réseau de problèmes ayant pour solution le savoir visé » [Bloch 2001].

Pour construire des prototypes de problèmes générateurs et déterminer des variables pertinentes par rapport aux objets de savoir algébrique en jeu dans ces problèmes, nous utilisons des résultats d'ordre épistémologique établis par des chercheurs de l'équipe DIDIREM : Bardini et Coulange, dans le domaine de l'algèbre élémentaire.

Concernant l'interprétation d'expressions algébriques dans la dimension objet, nous nous appuyons sur les travaux de Bardini [Bardini 2003b].[2] Dans le dernier chapitre de sa thèse, C. Bardini définit un modèle didactique pour le paramétrage de situations qui font intervenir des écritures algébriques. Une expression algébrique est représentée comme un arbre structuré par des assembleurs qui sont des opérateurs unaires ou binaires (+, -, x, /, √…). Chaque assembleur dans l'expression algébrique se voit ainsi attribuer un niveau. La complexité d'une expression algébrique peut être alors définie en fonction des variables didactiques suivantes : les constantes, les variables désignées par des lettres a, b, …,z ; les opérateurs unaires (racine carrée, carré, opposé, etc.) et binaires (addition, différence, multiplication, quotient...), le niveau de l'arborescence (donné par l'assembleur de plus haut niveau) et sa structure interne.

Relativement à la mise en équation de problèmes arithmétiques dans la dimension outil, nous exploitons la recherche de Coulange [Coulange 2001]. S'inspirant de travaux en didactique de l'algèbre, Coulange définit un modèle de problème fondamental du premier degré et décrit des variables pertinentes relativement à la mise en équation de cette classe d'énoncés : des variables liées à la structure des problèmes [Bednarz, Janvier 1993], et des variables attenantes à l'état du processus de modélisation : désignations plus ou moins explicites des grandeurs inconnues, des relations entre grandeurs connues et inconnues dans l'énoncé écrit [Duval et al. 1992], [Coulange 1997], nombre et nature des équations auxquelles peut se ramener l'énoncé, domaine numérique des grandeurs inconnues, etc.

[2] C. Bardini a soutenu sa thèse le 10 décembre 2003, co-encadrée par Artigue en didactique des mathématiques et Serfati en épistémologie.

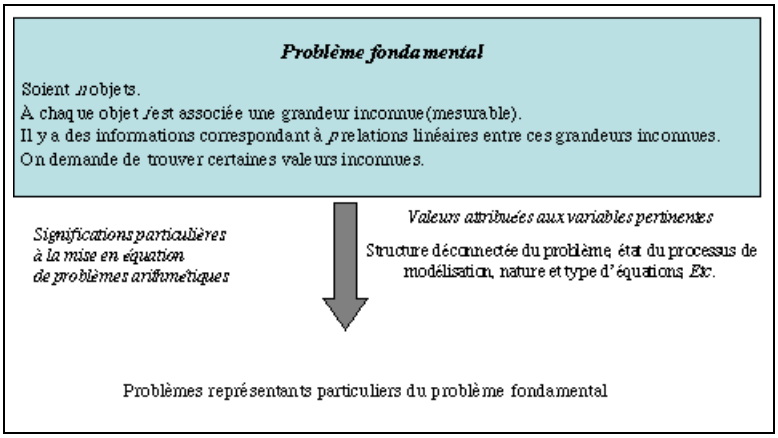


Figure 2 : Problème fondamental du premier degré [Coulange 2001]

b) La notion de milieu a-didactique

La définition désormais classique de Brousseau (1986) du milieu a-didactique est celle d'un « système antagoniste » qui apparaît comme non finalisé ou dénué d'intentions didactiques à l'élève. La capacité d'une situation d'enseignement à provoquer des apprentissages dépend en partie de la capacité de cette situation (vue comme un système) à permettre un feed-back pertinent par rapport aux connaissances visées. Ceci nous conduit donc nécessairement, dans le cadre de l'analyse a priori de situations d'apprentissage en algèbre élémentaire, à prêter une attention toute particulière à la présence d'un milieu pour la validation des actions des élèves. De plus, dans les tâches problématiques envisagées, nous sommes amenés à déterminer les «réponses» (a didactiques) du système aux choix défavorables de l'élève pour qu'elles soient pertinentes pour la construction des connaissances visées en algèbre.

2.3. Point de vue EIAH : de la situation d'interaction à la famille de situations d'interaction

La problématique de l'axe apprentissage du projet nous paraît également relever du point de vue EIAH, relatif aux situations d'interaction [Delozanne 1994], [Dubourg 1995], que nous présentons brièvement ci-dessous.
Les travaux de Delozanne et Dubourg (1995) ont permis de définir un instrument de spécifications d'un logiciel d'apprentissage : la situation d'interaction. Celle-ci est définie à partir des descripteurs suivants :

- un objectif d'apprentissage,
- une tâche,
- une interaction système-élève décrite par :
    - des actions du système (mise à disposition d'outils de résolution et de contrôle) et les stratégies associées,
    - des actions de l'élève (usage des outils de résolution et de contrôle disponibles) et les stratégies associées.

Dubourg [Dubourg 1995] envisageait de paramétrer les tâches et les interactions décrivant une situation, parlant à ce propos de familles de situations d'interaction. Il s'agit en fait de déterminer des paramètres spécifiques de la tâche et de l'interaction système-élève, permettant de faire varier ces situations d'interaction relativement à un objectif d'apprentissage défini a priori.

Dans le contexte présent, l'ambition de générer automatiquement des successions de situations s'adaptant à différents fonctionnements cognitifs d'élèves nous conduit ainsi à envisager l'élaboration de familles de situations d'interaction.

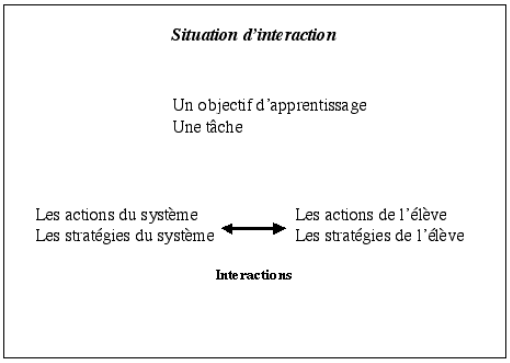


Figure 3 : Situation d'interaction, [Grugeon et al 2003 extrait]

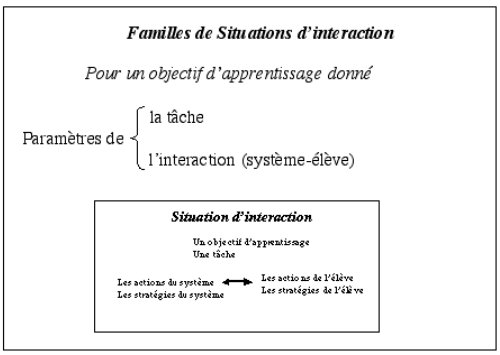


Figure 4 : Familles de situations d'interaction, [Grugeon et al 2003 extrait]

L'articulation entre les différents points de vue exposés ci-dessus et l'utilisation des résultats des recherches en didactique de l'algèbre des chercheurs de l'équipe DIDIREM nourrissent précisément nos premières avancées dans la conception de logiciels d'apprentissage, répondant à la problématique de l'axe apprentissage du projet. En effet, relativement à chaque objectif d'apprentissage en algèbre, il s'agit de délimiter et de caractériser des situations d'interaction adéquates. Ici, ce sont les notions de problèmes fondamentaux et de milieu a-didactique qui nous permettent d'associer la définition de tâches, d'interactions et de paramètres aux objets de savoir algébrique en jeu. La notion de variable didactique modélise les paramètres pertinents sur lesquels jouer, relativement à ces objets de savoir. Nous allons maintenant illustrer la façon dont ces cadres théoriques ont été exploités et montrer l'avancée du travail en considérant deux grandes familles de situations d'interaction relatives à la mise en équation de problèmes arithmétiques d'une part et à l'interprétation d'expressions algébriques d'autre part.

2.4. Conception de familles de situations d'interaction

2.4.1. Familles de Situations d'interaction autour de l'interprétation d'expressions algébriques

Nous nous sommes appuyés sur la recherche de Bardini [Bardini 2003a], pour penser la conception de familles de situations d'interaction autour de la traduction d'expressions algébriques en langage naturel. Bardini définit « les variables des expressions algébriques sur lesquelles il est possible de jouer de façon à garder une certaine pertinence à la tâche proposée » et étudie « dans quelle mesure les variations apportées sur certains éléments d'une expression algébrique influent sur la complexité de celle-ci». Elle caractérise ainsi une liste de conditions sur les variables de son modèle d'expressions algébriques pour permettre leur traduction en langage naturel et rendre son automatisation possible. La première condition correspond au niveau de l'expression considérée : l'assembleur le plus haut ne doit pas dépasser le niveau trois afin de ne pas rendre la description en

langage naturel trop complexe et artificielle. Nous avons envisagé plusieurs familles de situations d'interactions s'appuyant sur cette paramétrisation.

La première d'entre elles s'appuie sur la transposition du « jeu du portrait » qui consiste à découvrir un objet par un jeu de questions.

a) Découvrir une expression algébrique par un jeu du portrait : PORTRAIT-ROBOT

Le principe général de Portrait Robot est le suivant : l'élève doit, dans une première phase, identifier une expression algébrique au sein d'une liste donnée en posant le minimum de questions possibles (questions du type : l'expression ou la sous-expression sélectionnée, est-elle un carré ?). Après chaque question, le système interprète la réponse de l'élève, y répond par OUI ou NON. L'élève élimine alors les expressions inadéquates. Le système affiche une aide visuelle en conservant la trace des questions auxquelles le système a répondu OUI (dans l'exemple ci-dessous, sous forme d'un arbre actualisé à chaque réponse positive). Dans une deuxième phase, l'élève doit traduire l'expression identifiée en français.

Nous présentons ci-dessous des maquettes correspondant à une situation d'interaction envisageable dans Portrait Robot.

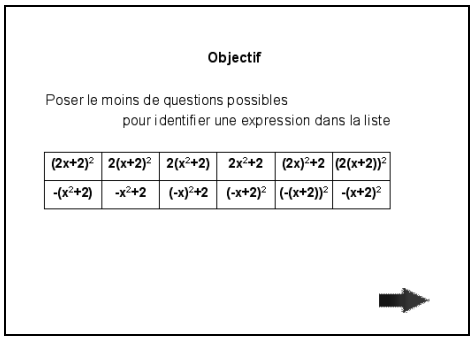


Figure 5a : Consigne de PORTRAIT-ROBOT

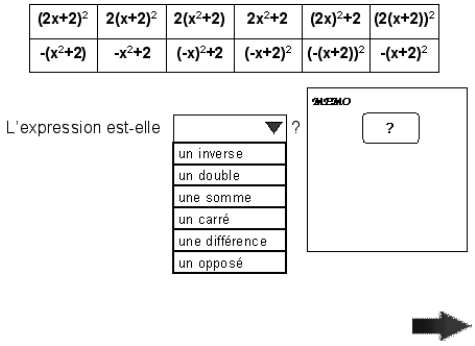


Figure 5b : L'élève pose une question sur l'expression initiale

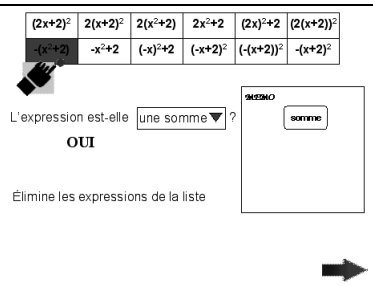


Figure 5c : Rétroaction du système : réponse et élimination des expressions

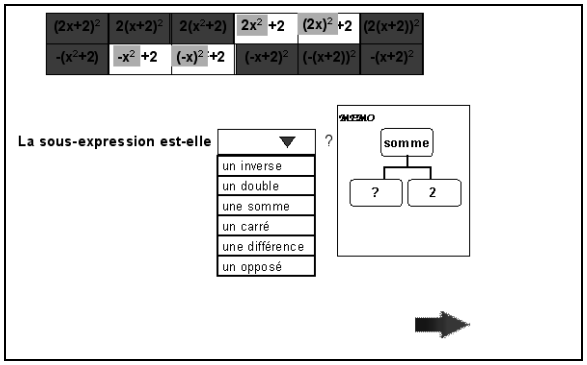


Figure 5d : L'élève pose une question sur une sous-expression

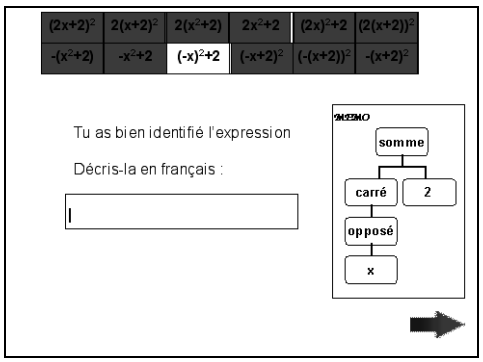


Figure 5e : Le système confirme la réussite et demande d'écrire en français l'expression algébrique. Une aide visuelle est fournie sous la forme d'un arbre résumant les caractérisations trouvées par l'élève

Figure 5 : Exemple de situation d'interaction « Portrait Robot » [Grugeon et al. 2003]

Portrait Robot recouvre une multitude de situations d'interactions possibles, dont on ne rend pas compte dans l'exemple développé ci-dessus. Le prototype Portrait Robot réalisé par V. Larue dans le cadre de son travail de thèse[3] n'a pas été achevé suite à l'abandon de la thèse.

Nous avons aussi élaboré une autre famille de situations d'interaction, plus directement inspirée d'une expérimentation papier-crayon, menée par Bardini dans son travail de thèse [Bardini 2003 b].

b) Associer interactivement Langage et Expression : AILE

Le principe général d'AILE consiste à associer une liste d'expressions algébriques à une liste correspondante de traductions en langage naturel. La figure 6 ci-dessous illustre la maquette d'interface envisagée pour AILE :

Sur la base des analyses didactiques de Bardini [Bardini 2003b], un cahier des charges a été rédigé par Gélis et Chenevotot en vue de réaliser un prototype du logiciel AILE, correspondant à la famille de situations ainsi envisagée. Le lecteur pourra s'y reporter (cf. annexe B_1) pour prendre connaissance de façon détaillée des réflexions qui ont nourri la conception du prototype AILE.
Dans le cadre de la conception du prototype AILE, le travail de Bardini permet d'identifier des variables didactiques liées à la complexité de l'expression algébrique en jeu (niveau d'imbrication de sous expressions, type d'opérateurs, etc.), à la liste d'expressions (nombre d'expressions, complexité des expressions une à une ou corrélées, etc.), et par suite, à la complexité des problèmes envisageables dans ces deux contextes. Des variables relatives aux interactions élève-système sont également mises en avant.

[3] Thèse financée par la région Picardie

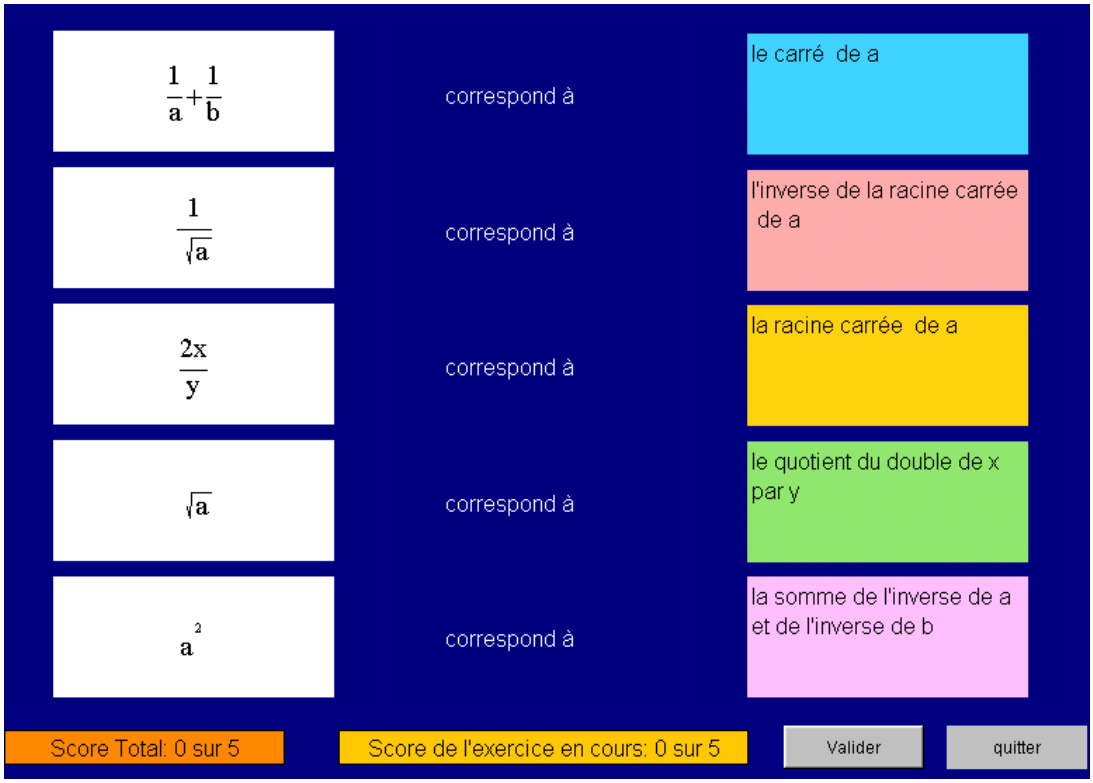


Figure 6 : Consigne d'AILE

L'analyse didactique nourrit ainsi tant la génération automatique de ces deux familles de situations que l'évaluation de leurs représentantes particulières qui permettra d'en adapter le choix, relativement aux profils cognitifs des élèves concernés.

c) Éléments de développement du prototype AILE

Comme pour le diagnostic, le langage JAVA a été choisi pour le développement du prototype. Le programme, en cours de test, peut être décomposé en deux grandes parties : le noyau du logiciel et son interface graphique. Le langage JAVA présente de nombreux avantages : il permet de programmer des applications internet, le fonctionnement (entièrement transparent pour l'utilisateur) est pris en charge par les navigateurs internet, ce processus ainsi que le code JAVA développé sont entièrement indépendants de la plate-forme qui les utilise. Mais ce langage compte aussi un inconvénient majeur : l'interface graphique est très lourde à gérer, héritage de la diversité des plate-formes supportées.

Le noyau du logiciel

Le logiciel assure la correspondance entre expressions algébriques et énoncés en langage naturel, via leur représentation sous forme d'arbres. La représentation arborescente doit permettre d'une part cette correspondance et d'autre part la génération automatique d'un des arbres lorsque l'autre est donné. Le noyau du logiciel comporte en fait deux parties : la première est dédiée aux arbres et à leurs associations, la deuxième a en charge l'enregistrement des données utilisateurs : actions de l'élève, préférences du professeur, où même calculs préexistants du logiciel. Une des difficultés à résoudre provient de ce que chaque type d'ordinateur utilise des types de fichiers différents, et donc nécessite une implémentation logicielle différente. Bien que Java soit portable d'une plate-forme à l'autre, cela n'est nullement transparent pour le programmateur.

L'interface graphique

Outre le temps nécessaire pour implémenter toutes les fonctionnalités, les fenêtres et les composants nécessaires à l'utilisateur, le développement a posé ici une difficulté toute particulière, spécifique à cette catégorie d'application : l'affichage des formules mathématiques.

Le développement de l'application est actuellement terminé. Il a été effectué par un intervenant extérieur, Emmanuel Artigue et entre dans sa phase d'expérimentations auprès des élèves. Il a été facilité par la qualité des spécifications établies par l'équipe de didacticiens.

Un exercice est constitué d'un ensemble de 5 expressions algébriques dont 2 formes seront proposées à l'élève, pour association, à savoir d'une part les écritures usuelles bidimensionnelles (exemple : $x^2 - 1$), d'autre part les libellés en langage naturel (exemple : *la différence entre le carré de x et 1*). La figure 7 présente l'interface qui sera proposée à l'élève pour un jeu donné d'expressions.

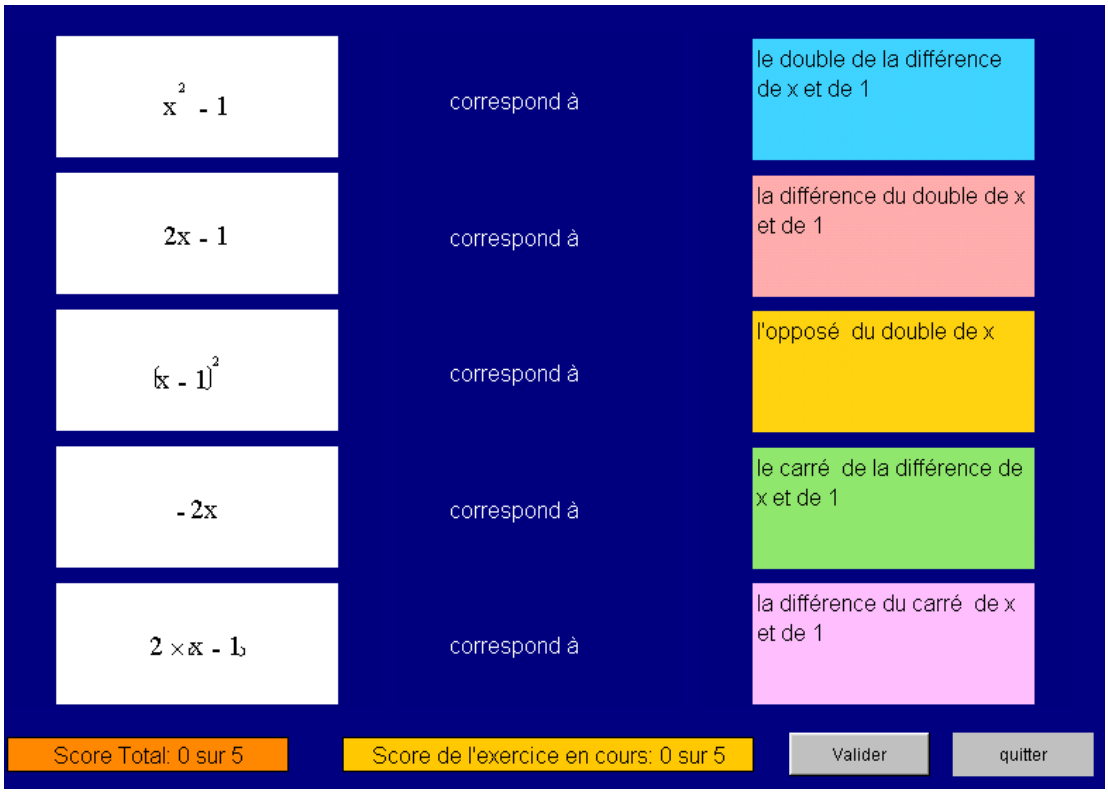


Figure 7 : Exemple d'un exercice proposé à l'élève dans le logiciel AILE.

Pour tout exercice qu'il conçoit, l'enseignant a la possibilité de proposer, outre la liste d'expressions, un ensemble de variations destinées à inférer, à partir du jeu initial, un nouveau jeu d'expressions qui en reprend la pertinence didactique. La figure 8 propose un second jeu d'expressions, déduit de celui de la figure 7, en transposant au plan des racines carrées, l'exercice 1 qui impliquait les carrés. La pertinence didactique de ces deux exercices est similaire, il s'agit de faire travailler l'élève sur des confusions possibles entre élévation à la puissance et multiplication par un nombre dans des contextes de différences.

Nous avons déjà présenté à la figure 6 l'interface de travail que propose le module élève. Pour résoudre l'exercice, l'élève doit inverser (échanger) des étiquettes comportant les phrases afin d'établir les correspondances correctes selon lui entre les expressions algébriques et leurs libellés en

langage naturel. La figure 9 propose une évolution de l'exercice initial présenté à la figure 7. L'écran présenté est obtenu après inversion par l'élève de quelques étiquettes en langage naturel.

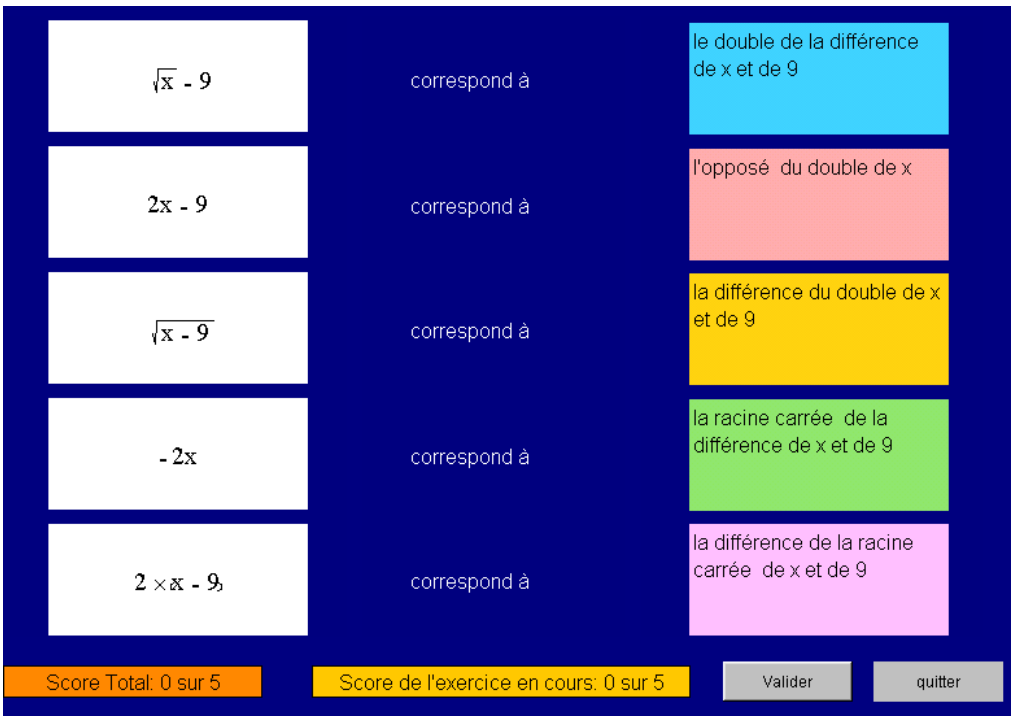


Figure 8 : Exercice obtenu à partir du précédent par variation.
Les carrés ont été remplacés par des racines carrées et le nombre 1 par 9.

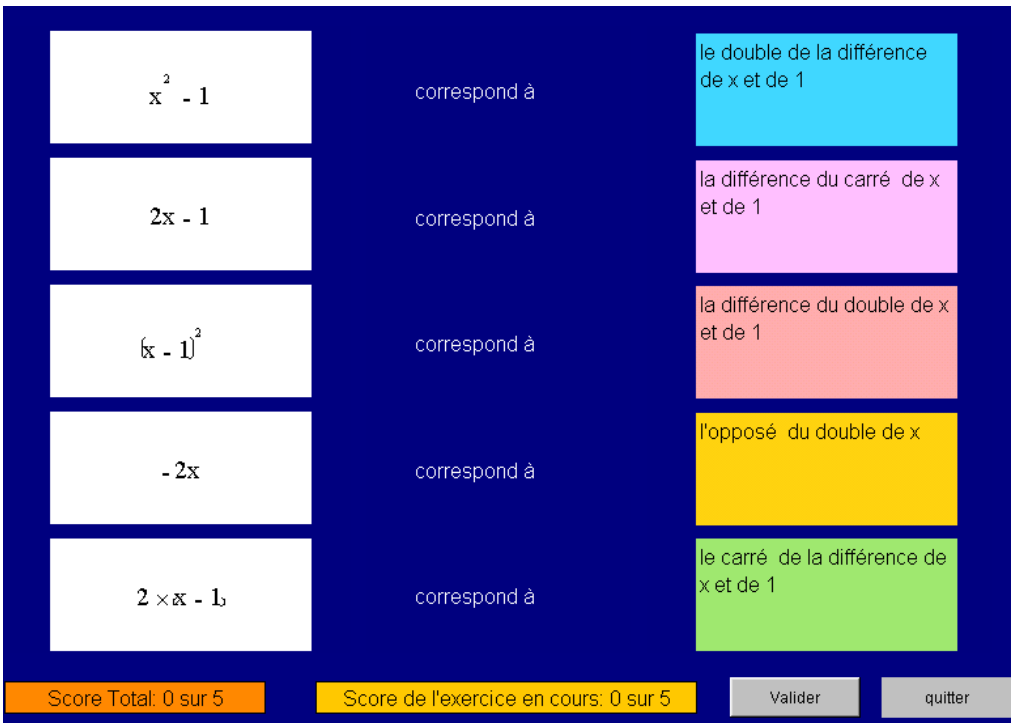


Figure 9 : Modification possible de l'interface par l'élève qui intervertit les phrases avant validation.

Après validation de sa réponse, l'élève se voit proposer une correction présentée à la figure 10. La correction est dispensée progressivement, afin que l'élève prenne le temps d'en évaluer les différents composants constitués du jeu initial d'expressions, de ses propres associations avec les phrases données, des erreurs qu'il a commises et de la donnée de l'ensemble de la solution. La présentation du score local à l'exercice et du score global précède l'exercice suivant.

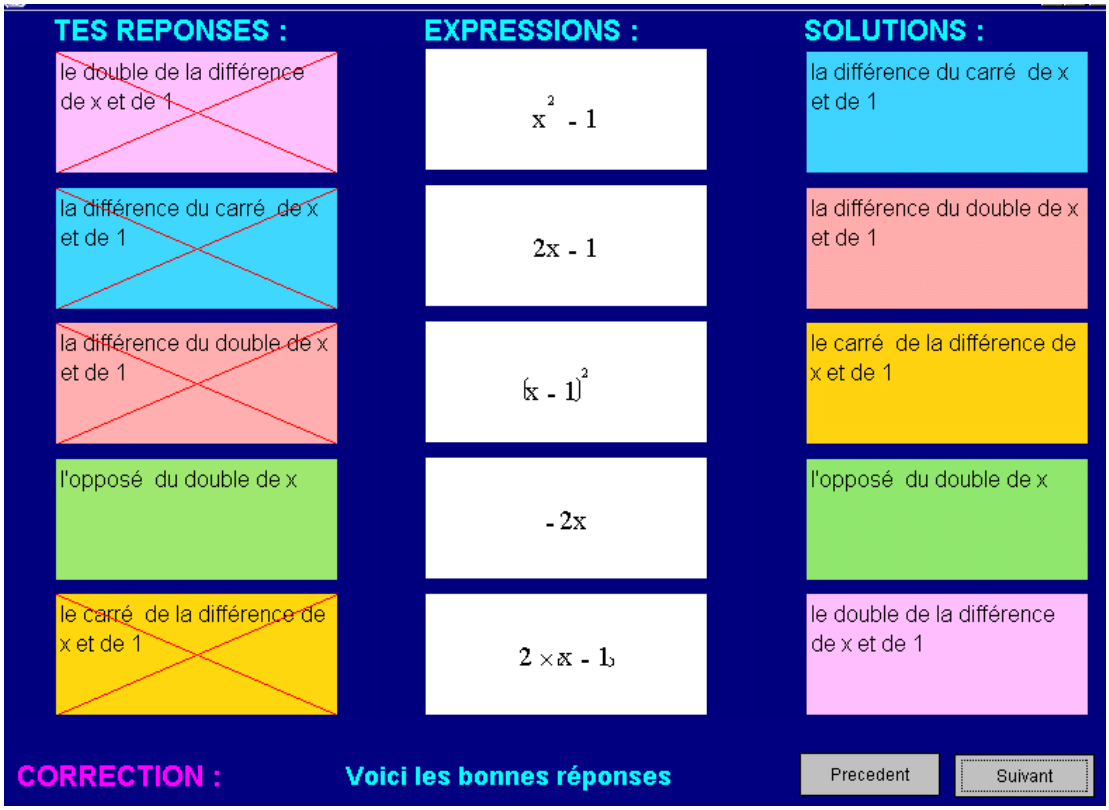


Figure 10 : Ecran correction proposé à l'élève. Les différents composants de cet écran (expressions, réponses de l'élève, corrections et scores) sont affichés successivement à l'aide de la souris.

2.4.2. Familles de Situations d'interactions autour de la mise en équation de problèmes

Nous nous sommes appuyés sur la recherche de Coulange (2001), pour penser la conception de familles de situations d'interaction autour de la mise en équation de problèmes arithmétiques.

La première d'entre elles s'appuie sur un environnement informatique déjà existant, nommé « Bouchons les trous », conçu à partir d'une idée originale de René de Cotret [Lemoyne et al. 2002]. Il s'agit de compléter une mise en équation de problèmes (avec des équations ou des énoncés écrits lacunaires). Les tâches « Bouchons les trous » y sont construites par les utilisateurs enseignants ou chercheurs, suivant un canevas prédéfini, et aucune interaction « système – élève » spécifique n'y est envisagée (au-delà de la mise à disposition éventuelle d'indices et d'un corrigé commenté, rédigés par l'utilisateur enseignant). Avec l'accord de René de Cotret, Grugeon et Coulange ont dès lors envisagé une famille de situations d'interaction, s'inspirant de « Bouchons les trous » : « Compléter Interactivement une Mise en Equation ».

a) Compléter interactivement une mise en équation : CIME

Nous présentons ci-dessous des maquettes correspondant à une situation d'interaction envisageable dans CIME

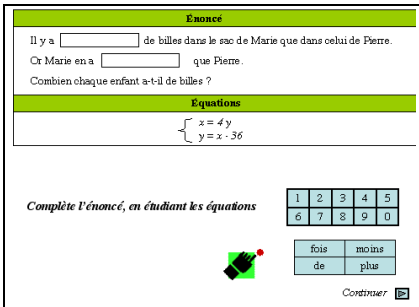


Figure 11a : Consigne initiale dans CIME

Le système met à disposition une palette de mots et de chiffres

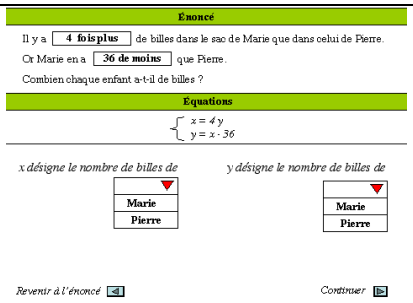


Figure 11b : Identification des inconnues

Suite à une erreur, le système demande d'identifier les inconnues

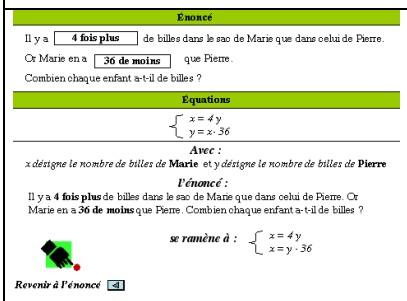


Figure 11c : Mise en contradiction de la réponse de l'élève

Le système renvoie les équations obtenues à partir de l'énoncé, tel qu'il a été complété par l'élève

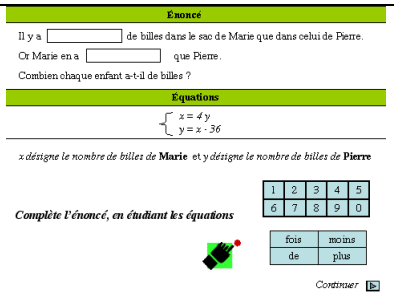


Figure 11d : Retour à l'énoncé

Le système met à disposition une palette de mots et de chiffres pour compléter l'énoncé, et les inconnues désignées

Figure 11 : Exemple de situation d'interaction CIME [Grugeon et al 2003]

Sur la base de son modèle de problème fondamental du premier degré, Coulange [Coulange et René de Cotret 2002] définit une liste de variables pertinentes, relativement aux tâches CIME, ainsi que les conditions sur ces variables, rendant leur automatisation possible : la structure du problème donné (ici problème du premier degré de type rapport et différence), les conditions numériques liées aux relations en jeu, la forme écrite de l'énoncé (plus ou moins congruente avec les équations), le nombre d'équations et d'inconnues, les équations de forme plus ou moins congruente avec l'énoncé, le nombre et la place des trous, le contenu des trous à compléter (opérateurs, données numériques, etc.). De plus, nous avons mis en évidence des variables liées aux outils mis à disposition par le système (palettes de mots ou de chiffres, présence ou non d'une feuille de brouillon de calculs, etc.) et au type de rétroactions du système. La trame de stratégies du système, apparente dans l'exemple développé (suite à une erreur de l'élève, identification des inconnues et mise en contradiction puis retour à la tâche initiale) est facilement généralisable à cet ensemble de tâches. Du côté des outils du système, ceux mis à disposition dans les maquettes présentées, peuvent également être mis à profit sur l'ensemble des tâches générées.

Ce travail nourrit la génération automatique de la famille de situations CIME et l'analyse des situations particulières d'interaction qui en découlent, ce qui permettra d'en adapter le choix, relativement aux profils cognitifs des élèves concernés.

b) Mettre en équation un problème arithmétique

Nous envisageons également de définir une famille de situations, plus proche de situations scolaires de l'enseignement classique de l'algèbre. Il s'agirait de produire la mise en équation d'un problème donné, voire de le résoudre par l'algèbre. Cette famille de situations sera également élaborée sur la base du modèle fondamental de Coulange [Coulange 2001]. Notons que l'effort de transposition

informatique de classes de problèmes du premier degré, nécessaire à l'élaboration du prototype CIME que nous évoquons ci-dessous, est déjà un premier pas déjà effectué dans ce sens.
Ce travail est actuellement en cours : courant 2005, sera développé un nouveau prototype d'environnement informatique nommé GEME (Générer des Exercices de Mise en Equation), basé sur des structures de problèmes à mettre en équation type : problèmes de « en deux parties inégales connaissant leur somme et différence, et connaissant leur rapport et différence ».

c) Eléments de développement du prototype CIME

Les analyses didactiques et EIAH, évoquées ci dessus, nous ont conduit à la rédaction d'un cahier des charges permettant la réalisation d'un prototype CIME relativement à un type de problème arithmétique donné (avec une structure « partage en deux parties inégales connaissant leur rapport et différence »). Ce cahier des charges (joint en annexe) a pu être exploité par un intervenant extérieur (Cyrille Lefranc) : le prototype en question est maintenant réalisé et en phase de test dans les classes.[4]

C. Lefranc a commencé par développer un programme (JAVA), permettant de générer automatiquement des ensembles d'énoncés (type « rapport-différence ») écrits en langage naturel (avec des habillages concrets divers, dans des contextes dits de mesure et de collection) et les équations associables à ces énoncés. Les deux copies d'écran ci-dessous illustrent le travail réalisé qui a servi de support à la suite du développement de CIME.

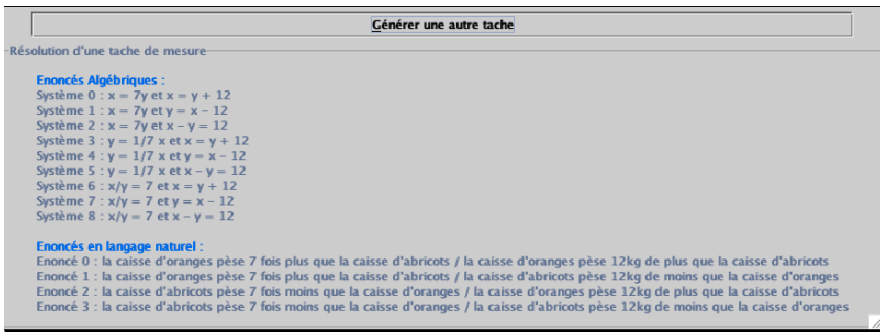


Figure 12a : Copie d'écran CIME – ensemble de tâches dans un contexte mesure



Figure 12b : Copie d'écran CIME – ensemble de tâches dans un contexte collection

[4] Nous détaillerons dans la partie 4 l'expérimentation prévue autour de la mise à l'essai des deux prototypes CIME par des enseignants dans leurs classes.

Ce programme (qui pourra également nourrir l'implémentation de familles de situations plus classiques autour de la mise en équation) a servi de base pour générer automatiquement des tâches type CIME (avec des énoncés en langage naturel et des énoncés algébriques « à trous »), et l'interaction système-élève associée. Les copies d'écran ci-dessous illustrent l'avancée réalisée dans ce sens.

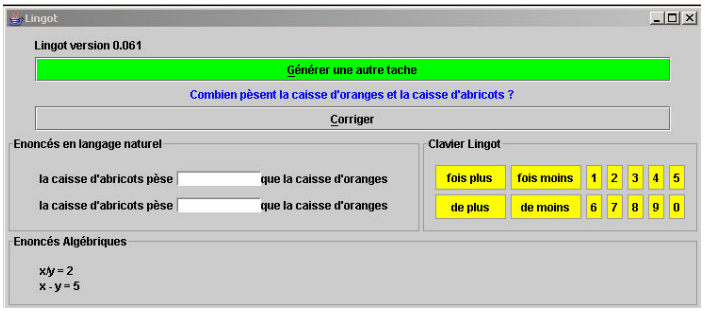


Figure 12c : Copie d'écran CIME – Tâche dans un contexte mesure

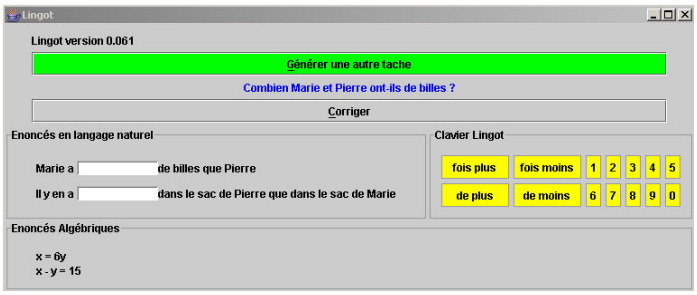


Figure 12d : Copie d'écran CIME – Tâche dans un contexte collection

Par ailleurs signalons que CIME enregistre les traces des actions des élèves : un fichier de log est créé et sauvegardé au format XML à chaque lancement du logiciel. Nous en présentons ci-dessous un exemple associé aux interactions relatives aux copies d'écran ci-dessus :

Ces traces des interactions « élèves – CIME » permettront une analyse des actions des élèves lors des mises à l'essai du logiciel, voire au cours d'expérimentations dans une perspective plus didactique. Ces fichiers de log pourraient d'ailleurs fournir un support intéressant pour une analyse plus systématique d'un recueil important de données « élèves ».

3. DES SITUATIONS D'APPRENTISSAGE ADAPTEES AUX PROFILS D'ELEVES

3.1. Une démarche de sélection des situations d'apprentissage adaptées à un profil d'élève

Un des enjeux de ce projet est de déterminer des situations d'apprentissage adaptées au profil de l'élève. Nous rappelons qu'à partir du Test Diagnostic de PEPITE, il est possible de caractériser des cohérences significatives du fonctionnement de l'élève en algèbre, son profil. Dans l'axe diagnostic de ce rapport, Grugeon-Allys et Gélis ont proposé un modèle pour définir des classes de profils d'élèves en algèbre élémentaire. Ils ont également proposé des pistes pour sélectionner des situations adaptées afin de faire évoluer les compétences de l'élève en algèbre :

- l'appartenance à une classe de profils permet de déterminer la compétence à travailler avec un fort niveau de priorité (c'est-à-dire l'objectif d'apprentissage à privilégier),
- pour un objectif d'apprentissage donné, les caractéristiques propres du profil de l'élève, c'est-à-dire, d'une part les cohérences de fonctionnement mises en évidence par le diagnostic et d'autre part les leviers sur lesquels il est possible de s'appuyer, permettent de déterminer parmi toutes les situations d'interaction de la famille, celles à travailler (en précisant des valeurs pertinentes pour les variables didactiques en jeu).

3.2. Une étude de cas

Au-delà des perspectives d'exploitation des classes de profil, déjà évoquées dans l'axe diagnostic, nous nous proposons ici d'aller plus loin en envisageant l'articulation diagnostic-apprentissage, qui peut être pensée sur la base des familles de situations d'interaction décrites ci-dessus. Nous ne sommes pas encore en mesure d'envisager concrètement l'automatisation d'une telle articulation, mais nous explicitons ci-dessous la démarche qui la rend possible à nos yeux, à partir d'une étude de cas, basée sur l'utilisation de CIME.

3.2.1. Le choix d'une famille de situations

- Le test diagnostic a permis d'identifier les principaux traits de fonctionnement significatifs dans le profil d'une élève surnommée *Blandine*. Les compétences en algèbre de Blandine relèvent du stéréotype UA3 T2 CA3. En effet, les réponses de *Blandine* révèlent d'abord une faible maîtrise globale des outils algébriques. Mais, Blandine possède quelques facilités à changer de représentations, ce qui constitue un levier sur lequel on peut s'appuyer. En conséquence, des mises en équation, des activités portant sur des modélisations fonctionnelles nous paraissent adaptées. Nous privilégierons donc des activités dans la dimension *outil* de l'algèbre.

- De par ses fragilités dans la dimension *objet,* nous faisons l'hypothèse qu'une situation d'interaction type CIME peut s'avérer pertinente. En effet, il s'agit de proposer à cette élève, de compléter interactivement une mise en équation lui permettant de progresser dans l'acquisition de cette compétence. De plus, de par sa position que l'on pourrait qualifier de fausse débutante en mise en équation de problèmes, ce travail de mise en équation inhabituelle par rapport à celles qu'elle semble déjà avoir rencontrées peut renouveler pour elle l'intérêt de l'étude.

3.2.2. Le choix des situations

- Si l'on se penche plus avant sur le profil de *Blandine,* on repère des cohérences de fonctionnement qui peuvent être autant de points de force que de fragilités.

Points de force :

- *Blandine* semble avoir une plus grande capacité à traduire algébriquement un énoncé écrit en français, que d'interpréter en français une expression algébrique donnée.
- Elle paraît également donner du sens aux expressions algébriques qu'elle produit.

Points de fragilités :

Blandine éprouve des difficultés apparentes à interpréter certains opérateurs (par exemple : réponse $a^2 = a + a$).

La donnée des caractéristiques propres du profil de Blandine nous conduit ainsi à attribuer des valeurs aux variables de la famille CIME, et à caractériser les situations d'interaction que l'on pourrait lui proposer dans ce contexte.

- Pour la tâche concernée de CIME, il s'agit d'abord de choisir la position des « trous » soit dans l'équation soit dans le système d'équations. Ici, pour exploiter dans un premier temps une des forces

repérées de *Blandine* sur le sens privilégié de traduction (langage naturel vers algèbre), nous situons les « trous », côté équation et non côté énoncé du problème.

- En ce qui concerne la structure des problèmes, nous retenons pour la première situation d'interaction, des problèmes du premier degré, de structure simple (type « somme et rapport »[5]) et une forme écrite de l'énoncé congruente aux équations données. Par exemple :

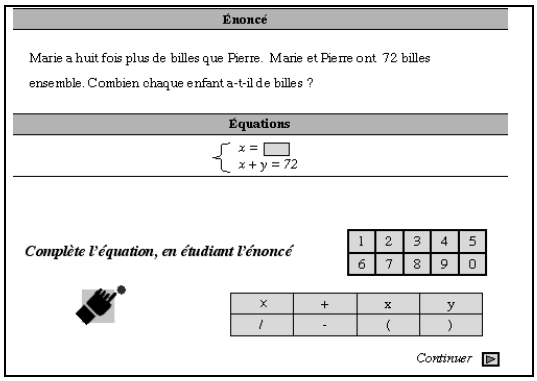


Figure 13a : Exemple d'une première consigne CIME

Profil type *Blandine*

Dans le cas d'une réponse positive de l'élève, nous envisageons une deuxième situation d'interaction d'une complexité plus grande qui pourrait être basée sur la consigne suivante :

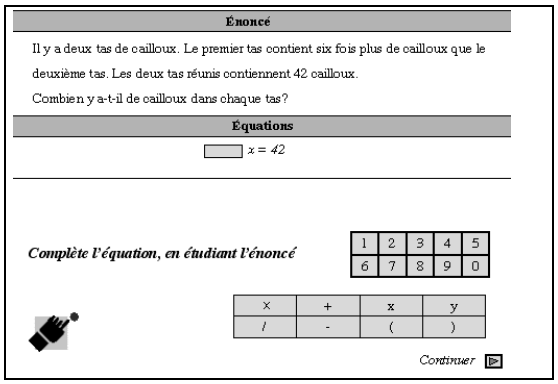


Figure 13b : Exemple d'une deuxième consigne CIME

Profil type *Blandine*

Ce problème a une structure identique au précédent (somme et différence). Mais, en le ramenant à une équation à une inconnue et en situant le trou dans l'équation comme ci-dessus, d'une part cela complexifie la mise en équation à compléter et d'autre part cela donne l'occasion de travailler au sein même de l'équation à écrire (soit en regroupant les x : réponse 7, soit en conservant l'écriture initiale de l'équation : « 6x + » ou « x + 6… »). Ce qui dans le cas de Blandine, peut représenter un levier pour poursuivre un travail dans la dimension objet.

- En ce qui concerne le guidage, nous prévoyons différentes possibilités d'interactions :

1. l'élève teste sa réponse avec les outils disponibles et le système analyse sa réponse, sans fournir de rétroaction immédiate.

[5] Dans l'énoncé, sont donnés : le rapport entre deux grandeurs inconnues, ainsi que leur somme (tout comme plus haut, étaient donnés le rapport et la différence).

2. le système propose un « guidage » prédéfini en fonction des variables du problème et de la réponse de l'élève. Dans le cas d'une réponse incorrecte, des rétroactions, telles que l'identification de l'inconnue, la mise en contradiction de l'erreur par l'affichage de l'énoncé correspondant à l'équation donnée, le retour à la tâche initiale**,** sont envisageables.

Nous n'irons pas plus loin dans la description d'un parcours possible pour Blandine (avec d'autres situations d'interaction type CIME, s'appuyant par exemple sur des énoncés plus complexes, puis des situations plus classiques de mise en équation, etc.). Celui-ci prendrait en compte à la fois le profil initial de l'élève et les réponses données au fil des situations qui lui sont proposées.

Cette présentation rapide d'une étude de cas, illustre les potentialités d'une telle approche. Cependant de nombreuses questions autour des modélisations didactique et informatique, qui permettraient de la systématiser, restent ouvertes.

4. UTILISATION D'UNE FAMILLE DE SITUATIONS D'APPRENTISSAGE (CIME) POUR ENSEIGNER LA MISE EN ÉQUATION

Au-delà d'usages directement reliés à la dimension diagnostique et l'utilisation de Pépite, on peut envisager une utilisation plus autonome et « ordinaire » des prototypes développés au sein de l'axe apprentissage, comme situation d'apprentissage pour les élèves. Dès lors, il nous paraît intéressant de voir en quoi ces prototypes peuvent ou non instrumenter le professeur de collège ou début lycée dans son enseignement de l'algèbre. Nous pensons amorcer une étude autour de l'intégration de CIME dans les pratiques des enseignants.

Les questions que nous nous posons dans ce cadre sont les suivantes :

Comment les professeurs projettent-ils d'employer CIME pour enseigner la mise en équation ? Quelles connaissances algébriques et didactiques sous-tendent leurs projets, la réalisation d'activités impliquant CIME ? Comment les gèrent-ils dans leurs classes ? Quelles contraintes inhérentes au dispositif informatisé ou autres influencent leur enseignement ? Afin d'apporter des éléments de réponse à ces questions, nous avons élaboré le protocole d'expérimentation suivant qui se décompose selon plusieurs phases :

Phase 1 : Présentation de l'environnement informatique au(x) professeur(s). Nous pensons réunir les professeurs concernés par l'expérimentation et leur faire découvrir CIME (interface professeur, interface élèves, etc.).
Phase 2 : Création par le professeur d'une leçon d'algèbre exploitant CIME
Phase 3 : Entrevue avec le professeur avant le déroulement de la leçon pour connaître ses choix relatifs au projet et au scénario d'enseignement avec CIME.
Phase 4 : Réalisation de la leçon en classe par le professeur et observation des séances concernées par l'exploitation de CIME (Retour en classe des élèves, y compris « hors classe informatique »).
Phase 5 : Entrevues « à chaud » après l'observation afin de recueillir les commentaires du professeur sur le déroulement de la leçon.

Les premières expérimentations de CIME auprès de professeurs commenceront courant avril 2005.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Par rapport aux objectifs définis dans le projet, nous avons donc au cours de cette première phase :

- élaboré des situations d'apprentissage informatisées, s'appuyant sur les spécificités des EIAH, définies comme familles de situations d'interaction, relatives à divers aspects de la compétence algébrique (dans la dimension *outil* avec la mise en équation de problèmes du premier degré, dans la dimension *objet* avec l'association entre une expression algébrique et sa traduction en français). Nos analyses didactiques ont permis la rédaction de cahiers des charges directement exploitables pour le développement des prototypes CIME, AILE et PORTRAIT-ROBOT,
- conçu une démarche pour associer aux profils d'élève diagnostiqués dans PEPITE, des situations d'apprentissage adaptées, susceptibles de les faire évoluer.

Au-delà de ce qui était envisagé dans le projet nous avons aussi engagé une analyse instrumentale et didactique relative à l'utilisation de ces environnements informatiques indépendamment d'une évaluation diagnostique. En revanche, suite à l'abandon de sa thèse par V. Larue travaillée au sein du laboratoire SASO, nous n'avons pas produit de maquette d'un système auteur.

Il s'agit maintenant de poursuivre la définition de familles de situations d'interaction relatives à la mise en équation de problèmes du premier degré et d'en construire d'autres relatives à l'apprentissage d'autres aspects de la compétence algébrique. Nous envisageons des situations de généralisation et de preuve pour travailler l'entrée dans la rationalité algébrique, pour prendre en compte des types de problèmes correspondant à différents niveaux d'entrée dans la rationalité algébrique [Grugeon 1995]. Nous envisageons aussi des situations de type « jeu de cibles » pour travailler sur les écritures polynomiales.

Par ailleurs, il nous faut poursuivre notre réflexion autour de l'articulation entre les stéréotypes et les situations d'apprentissage, en vue de penser une systématisation et une transposition informatique de la démarche présentée.

Enfin, il s'agit de réaliser des expérimentations afin de tester les prototypes logiciels élaborés au sein de cet axe en laboratoire auprès d'enseignants et d'élèves pour valider de façon externe les choix réalisés.

6. REFERENCES

[Bardini 2003a] C. Bardini (2003), The construction of meaning of algebraic symbolism at different school levels. An epistemological and didactical approach, CERME 3: Third Conference of the European Society for Research in Mathematics Education (28 février au 3 mars 2003, à Bellaria, Italie).

[Bardini 2003b] C. Bardini (2003), Le rapport au symbolisme algébrique : une approche didactique et épistémologique, Thèse de doctorat, Université Paris 7.

[Bloch 2001] B. Bloch (2001), Différents niveaux de modèles de milieu dans la théorie des situations in Actes de la 11e école d'été de Didactique des Mathématiques, Dorier J.-L., Artaud M., Artigue M., Berthelot R., Floris R., La Pensée Sauvage, Corps – 21-30 Août 2001, pp. 125-139.

[Brousseau 1982] G. Brouseau (1982) Les objets de la didactique des maths – Ingénierie didactique, Actes de la deuxième École d'Été de didactique des mathématiques, Orléans : IREM d'Orléans, 10-60.

[Brousseau 1986] G. Brousseau (1986), Fondements et méthodes de la didactique des mathématiques. Recherches en Didactique des Mathématiques, Vol. 7.2, La Pensée Sauvage, Grenoble, 33-116.

[Bruillard et al. 2000] E. Bruillard, E. Delozanne, P. Leroux, P. Delannoy, X. Dubourg, P. Jacoboni, J. Lehuen, D. Luzzati, P. Teutsch (2000). Quinze ans de recherche sur les sciences et techniques éducatives au LIUM. Education et informatique. Hommage à Martial Vivet. Sciences et Techniques éducatives, vol. 7, n° 1, Hermès Science, 87-145.

[Coulange 2001] L. Coulange (2001), Enseigner les systèmes d'équations en Troisième, Une étude économique et écologique, Recherches en Didactique des Mathématiques, Vol. 21.3, La Pensée Sauvage, Grenoble, 305-353.

[Coulange et René de Cotret 2002] L. Coulange, S. René de Cotret (2002), Un environnement informatique d'apprentissage pour l'élève, d'enseignement pour le professeur, de recherche pour le chercheur... autour de la mise en équation, Intervention au séminaire DIDATECH au laboratoire LEIBNIZ à Grenoble.

[Delozanne 1994] E. Delozanne (1994), Un projet pluridisciplinaire : ELISE, un logiciel pour donner des leçons de méthodes, Recherches en Didactique des Mathématiques, Vol 14.1.2, La Pensée Sauvage, Grenoble, 211-250

[Delozanne et al. 2002a], E. Delozanne, B. Grugeon, M. Artigue, J. Rogalski, Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet LINGOT, Réponse à l'appel à Projet Cognitique 2002, École et sciences cognitives: Les apprentissages et leurs dysfonctionnements.

[Delozanne et al. 2002b], É. Delozanne, B. Grugeon, P. Jacoboni, Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation, In Proceedings of IHM'2002, International Conference Proceedings Series, ACM, 2002, Poitiers, France 25-32

[Douady 1986], R. Douady (1986), Jeux de cadres et dialectique outil-objet, Recherches en didactique des mathématiques, Vol. 7.2, La Pensée Sauvage, Grenoble, 5-31.

[Dubourg et al. 1995] X. Dubourg, E. Delozanne et B. Grugeon (1995), Situations d'interaction en EIAO : le système repères, in D. Guin, J.-F. Nicaud et D. Py, EIAO, Tome 2, 233-244, Eyrolles, Paris, 1995

[Dubourg 1995] X. Dubourg (1995), Modélisation de l'interaction en EIAO, une approche événementielle pour la réalisation du système repères, Thèse de l'Université de Caen, 242 p., Caen, Octobre 1995.

[Duval 1988] R. Duval, Graphiques et équations. Annales de didactique et sciences cognitives, vol.1, IREM de Strasbourg, 235-253.

[Grugeon, 1995] B.Grugeon, Etude des rapports institutionnels et des rapports personnels des élèves à l'algèbre élémentaire dans la transition entre deux cycles d'enseignement : BEP et Première G, Thèse de doctorat, Université Paris 7, 1995.

[Grugeon et al, 2003] B. Grugeon, L. Coulange, V. Larue, Familles de situations d'interactions en algèbre élémentaire : deux exemples, in actes ITEM, Reims, juin 2003.

[Jean et al. 1999] S.Jean, E. Delozanne, P. Jacoboni, B.Grugeon, A diagnostic based on a qualitative model of competence in elemantary algebra, in S. Lajoie, M. Vivet, AI&ED'99, IOS Press, Amsterdam, Le Mans (1999) 491-498

[Jean 2000] S. Jean, PEPITE : un système d'assistance au diagnostic de compétences, Thèse de doctorat, Université du Maine, 2000.

[Lemoyne et al. 2002] G. Lemoyne, S. René De Cotret, L. Coulange (2002), Des environnements informatisés dédiés à l'étude des conditions d'enseignement et d'apprentissage des mathématiques et à la formation des enseignants, Actes du Colloque CIRTA, Acfas 2002.

CHAPITRE 4

RAPPORT D'ACTIVITE SUR L'AXE INSTRUMENTATION DE L'ACTIVITE DES ENSEIGNANTS

Rapport coordonné par J. Rogalski

1. INTRODUCTION

Les travaux d'évaluation de Pépite ont montré des différences entre les visées de la conception de Pépite comme aide au diagnostic et les usages par les enseignants. Cette observation n'est en rien spécifique à Pépite, ni aux systèmes informatiques pour l'apprentissage : les études sur les relations utilisateurs et systèmes montrent l'existence de décalages entre les fonctions pour lesquelles les systèmes sont conçus et la manière dont les utilisateurs usent de ces systèmes. Une étude de l'utilisation du logiciel par Delozanne, Grugeon et Jacoboni [Delozanne, Grugeon & Jacoboni 2002, pp. 29-30] montre qu'autant l'utilisation du logiciel de test est peu problématique, et donne lieu à des usages supplémentaires à ceux prévus lors de la conception, autant l'utilisation des profils cognitifs pose des problèmes multiples. Le logiciel de test donne des idées d'exercices, aide à comprendre l'esprit des nouveaux programmes, et révèle chez leurs élèves des compétences et des lacunes non remarquées par les enseignants. Mais l'appel à l'intervention de l'enseignant pour compléter ou corriger un diagnostic incomplet ou erroné conduit à un travail lourd, qui suppose l'appropriation de l'analyse didactique des logiciels de test et de diagnostic. La compréhension des profils est problématique pour beaucoup d'enseignants, qui ont des difficultés en entrer dans le diagnostic par le profil cognitif de l'élève, tel qu'il est présenté, et à comprendre la description des profils. Par ailleurs, les enseignants questionnés dans l'étude auraient souhaité qu'un feed-back soit donné à l'élève (correction ou profil accessible) et souhaitent des propositions de remédiation adaptées au profil diagnostiqué.

Les problèmes relevés sont tous directement liés à l'activité de diagnostic de l'enseignant avec ses élèves. En effet, l'utilisation d'un système quel qu'il soit pose la question de la manière dont il peut ou va s'intégrer dans l'activité que développe le sujet avant qu'il ne dispose du système. Dépendant de la relation entre l'outil proposé (ici Pépite, et particulièrement PépiProfil) et l'activité antérieure de l'enseignant, on va observer des interactions qui vont — à un pôle — du rejet pur et simple (outil non utilisé), à l'intégration comme instrument "transparent" dans l'activité. On peut aussi observer des transformations de l'activité elle-même, dans ses objets et dans ses buts.

Les observations faites conduisent à se poser la question : comment les logiciels PépiTest, PépiDiag et PépiProfil peuvent-ils s'intégrer dans l'activité de l'enseignant de mathématiques ? Une brève présentation de l'approche théorique retenue permet de relier l'activité de diagnostic de l'enseignant à celle d'autres professionnels [Rogalski 2003], et de faire des inférences sur les interrogations et les propriétés attendues de cette activité dans le cas spécifique de l'enseignant de mathématiques, avec des élèves de la fin de l'enseignement obligatoire. La prise en compte des travaux de didactique des

mathématiques et de psychologie de l'enseignement des mathématiques, et les analyses d'activité en classe, conduisent par ailleurs à se poser une question particulière à l'enseignement : le diagnostic fait par l'enseignant concerne-t-il les élèves comme individus, les élèves comme groupes plus ou moins homogènes, ou la classe comme entité ? En fonction de ces analyses, que peut-on anticiper de l'intégration des outils d'aide au diagnostic dans Pépite ? Et quelles conséquences en tirer du point de vue de la conception de ces outils, et du point de vue de la formation des enseignants ?

2. CADRE THEORIQUE : UNE THEORIE DE L'ACTIVITE ET DE SON ORGANISATION

La littérature sur l'activité de l'enseignant a été développée essentiellement selon trois approches : des approches de sciences de l'éducation, qui cherchent le plus souvent des processus ou des déterminations globales, des approches de psychologie de l'enseignement des mathématiques, et des approches de didactique des mathématiques, les deux dernières mettant au centre des analyses la nature du contenu d'enseignement en jeu. La présentation de la double approche qui articule un point de vue didactique et un point de vue de psychologie ergonomique montre les apports propres de cette approche, que Bressoux et Dessus [Bressoux & Dessus 2003] considèrent comme prometteuse dans leur synthèse des interactions des enseignants en classe. Robert et Rogalski [Robert & Rogalski 2002b] montrent comment la mettre effectivement en oeuvre pour une étude d'activité de l'enseignant en classe. Pour autant, l'approche théorique que nous proposons ne se limite pas à la considération de l'activité de l'enseignant face aux élèves, même si notre hypothèse est que des questions cruciales pour l'apprentissage y sont en jeu.
Le cadre théorique retenu est celui de la théorie de l'activité [Leontiev 1975], de sa double régulation [Hacker 1985], [Leplat 1997], et de son organisation emboîtée en termes d'objets, de buts et de temporalité [Haenen 2001]. Il est mis en oeuvre en considérant l'enseignement comme un cas de gestion d'environnement dynamique.

2.1 L'enseignement comme gestion d'un environnement dynamique ouvert

L'approche retenue pour traiter la question de la place de Pépite dans l'activité de l'enseignant considère l'activité de l'enseignant comme la gestion d'un environnement dynamique particulier, où l'objet d'action est le rapport de l'élève avec l'objet à enseigner [Rogalski 2001, 2003] ; [Robert & Rogalski 2002]. La validité d'une telle approche est développée dans Rogalski ; nous n'en détaillons ici que ce qui concerne directement, d'une part, l'activité de diagnostic, et d'autre part, l'instrumentalisation de cette activité [Rabardel 1995, 1999] ; [Artigue 1998] ; [Lagrange, Artigue, Laborde & Trouche 2003].
Une typologie des environnements dynamiques a été présentée dans le cas de la gestion des processus matériels et exemplifiée dans Hoc [Hoc 1996]. La typologie prend en compte en particulier la nature des processus supervisés ou gérés, la temporalité, la distance entre le processus et les indicateurs. Nous y avons ajouté une dimension de fermeture / ouverture de l'environnement géré, selon le développement de la modélisation et l'intégration au processus lui-même de la prise d'information et des moyens d'action. L'enseignement gère comme objet le rapport entre les élèves et un contenu de savoir enseigné : ce rapport évolue à la fois selon des processus développementaux liés à l'activité autonome de l'élève en classe et hors de la classe (en cela il est dynamique) et selon les actions de l'enseignant, qui interagissent avec cette dynamique : c'est une propriété caractéristique de la gestion des environnements dynamiques.
Malgré l'ampleur des travaux dans ce champ, la modélisation de la dynamique des apprentissages des élèves et de leur interaction avec l'action enseignante est développée de manière inégale, le plus souvent partielle, même dans des domaines relativement limités comme l'algèbre élémentaire. Plus précisément, c'est pour l'interaction enseignement / apprentissage que l'on dispose de peu de modèles, et de connaissances fragmentaires sur les phénomènes en jeu. Une raison en est la tension entre le caractère individuel de l'apprentissage (dans un domaine de savoir mathématique, dans l'enseignement obligatoire général), et le caractère de l'enseignement qui s'adresse à une classe. De

plus, les informations sur les rapports des élèves et des contenus mathématiques ne sont pas directes, et doivent être construites soit par des dispositifs ad hoc (c'est d'ailleurs un des objectifs du logiciel Pépite), et en fait, inférées à partir des performances produites par les élèves. L'action elle-même est médiatisée par l'enseignant lui-même, via les dispositifs d'évaluation qu'il utilise (devoirs, exercices, etc.).
L'enseignement est ainsi la gestion d'un environnement dynamique ouvert, à longs délais de réponse et à tempo d'action multiple (du temps d'un exercice en classe à celui d'un cycle d'enseignement), avec un accès indirect au processus géré, et une diversité des dynamiques particulières des apprentissages individuels dans une même classe.

2.2. Le diagnostic dans l'ensemble de l'activité de l'enseignant

L'articulation des différentes temporalités, de l'orientation générale de la conduite de la classe sur l'année à la gestion d'un épisode de classe particulier, en passant par la conception et la préparation (anticipation) d'une séquence sur un thème ou d'une séance de classe, concerne la plupart des activités cognitives impliquées dans la gestion d'un environnement dynamique [Hoc 1996]. Les "modèles à étapes" les présentent dans une séquentialité qui est seulement celle du modèle, pas celle de l'activité réelle, mais qui permet de questionner l'organisation réelle observée. Ils comprennent :

- **l'identification d'un état à atteindre** (un "état-cible", fixé par les programmes dans le cas de l'enseignement, et spécifié par l'enseignant, dans une certaine mesure), qu'on peut schématiser comme l'ensemble de connaissances et de compétences mathématiques que les élèves doivent avoir acquises, ou ce qu'ils doivent avoir compris de la séance ou de la séquence consacrée à un contenu (un champ conceptuel) ;
- **l'évaluation de l'état des élèves** (de la classe) par rapport aux attentes : où en sont les élèves (la classe) par rapport au système de savoir visé ; les points de vue initiaux sur le **diagnostic**, issus de l'étude du diagnostic médical, ont été centrés sur la forme particulière de résolution de problème posée par cette évaluation : il s'agissait — selon ce point de vue — de classer un état observé dans des catégories connues (des symptômes à la maladie, pour faire vite). Les études ultérieures sur des environnements dynamiques variés ont conduit à deux changements : d'une part, intégrer dans l'activité de diagnostic non seulement les opérations d'identification de l'état actuel, voire des causes de cet état (pour le faire cesser, dans le cas du diagnostic de défaillances), mais aussi l'anticipation des évolutions possibles : le **pronostic** ; d'autre part, ne plus voir le diagnostic comme une forme de catégorisation, ou d'identification de structure [Hoc 1996], mais comme l'évaluation d'un état de la situation ("situation assessment", [Endsley 1995], cet état pouvant d'ailleurs être considéré dans sa dynamicité ;
- **la recherche des voies et moyens pour atteindre l'objectif**, étant donné l'évaluation de l'état (dynamique) de la situation : élaboration d'une action ou d'un ensemble d'actions entre lesquelles choisir,
- la décision d'action (au sens strict de détermination de l'action qui sera engagée),
- l'exécution de l'action retenue,
- le contrôle de cette action, c'est-à-dire l'évaluation de ses effets.

De tels modèles à étapes de l'activité de l'enseignant peuvent être proposés pour les diverses temporalités de celle-ci. Le terme de diagnostic apparaît ainsi multiple.
De plus, les études de la prise de décision en situation naturelle ont montré que l'activité de gestion d'un environnement dynamique était moins décomposable que ne le proposaient les modèles à étapes centrés sur la rationalisation de l'activité, et en tout cas que les étapes étaient plus profondément imbriquées que dans ces modèles. En particulier, Gervais a montré dans le cas du diagnostic médical le lien étroit entre diagnostic et répertoire d'action [Gervais 1991]. Par ailleurs, l'approche proposée initialement par Klein du "*naturalistic decision making*" [Klein 1989] a mis en avant l'existence d'un processus qu'il a appelé "*recognition-primed decision making*" (prise de décision basée sur la reconnaissance de la situation). Dans un tel processus, l'expérience conduit le sujet à identifier que la situation appelle telle action, celle-ci sera ensuite mentalement exécutée et

évaluée, éventuellement révisée. En tout cas, le processus de diagnostic n'existe par pour lui-même, et n'est pas nécessairement identifiable au préalable d'une décision d'action.

2.3. L'instrumentation de l'activité de diagnostic

L'activité de l'enseignant implique un certain nombre d'instruments, articulant artefact et schème d'utilisation [Rabardel 1995, 1999]. L'approche instrumentale de l'activité développée par Rabardel a été mise en oeuvre dans l'analyse de l'impact des logiciels dans l'enseignement [Trouche 1996] ; [Lagrange 1998] ; [Artigue 1998] du point de vue des élèves. Nous ne bénéficions pas d'un tel travail antérieur pour l'enseignant. Dans une revue analytique de l'évolution de la recherche et de l'innovation dans le champ de l'usage des technologies dans l'éducation, Lagrange et al. relèvent la faible part des publications sur la dimension de l'enseignant : "(qui) apparaît rarement traitée en tant que telle par la recherche et l'innovation, et ne sera donc pas considérée seule" (dans l'analyse des exemples paradigmatiques) [Lagrande, Artigue, Laborde & Trouche 2003, p. 247, notre traduction].
La figure 1 présente le schéma d'action instrumentée d'après Rabardel (op. cit. — pour l'activité d'un sujet individuel) et Engeström (1999 — pour un système d'activité) dans lequel le but visé sur l'objet est explicitement représenté.

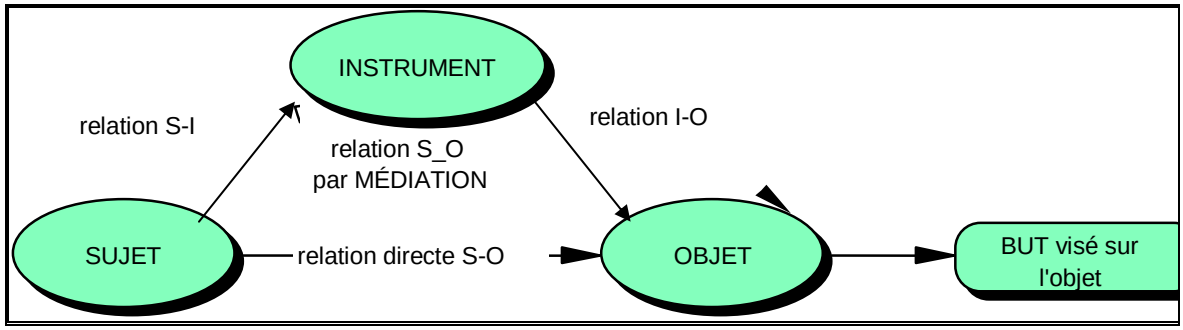


Figure 1 : Schéma des relations impliquées dans une activité d'un sujet sur un objet, médiée par un instrument.

Pour analyser l'instrumentation de l'activité de diagnostic de l'enseignant de mathématiques, et la possibilité qu'un logiciel issu de Pépite soit placé en situation d'instrument, il faut répondre au préalable — ou en parallèle — à plusieurs questions.

- Quel est l'objet de l'action ? On a vu plus haut la diversité d'objets possibles : la classe, des groupes d'élèves, des élèves individuels ; selon l'objet et le but visé, un outil peut plus ou moins aisément être situé en position d'instrument ;
- Quel est le but du diagnostic ? L'évaluation formative de l'élève dans la correction d'un devoir, la catégorisation dans un sous-groupe, le diagnostic pour une prise de décision (adaptation de l'enseignement, remédiation, type d'orientation), la connaissance des difficultés des élèves en algèbre, le repérage de la place de ses élèves dans un ensemble plus vaste, correspondent à des buts différents, et une instrumentation différente.

Par ailleurs, deux points de vue peuvent être considérés :

- l'activité de l'enseignant est nécessairement instrumentée (comme toute activité), et on veut identifier les instruments de l'activité de diagnostic, leur organisation en système et leurs visées pour l'enseignement (il peut s'agir d'exercices particuliers, de contrôles conçus par l'enseignant, d'épreuves nationales, d'une épreuve commune à l'établissement pour un niveau de classe, d'un logiciel particulier, de l'interrogation orale par l'enseignant, des productions de l'élève en classe, etc) ;
- il existe des outils, c'est à dire des artefacts conçus pour servir d'instruments (par exemple les épreuves nationales, celle de l'évaluation internationale PISA, un logiciel tel que Pépite, ...) et la question est de savoir a) comment de tels outils peuvent s'insérer dans l'activité de diagnostic de l'enseignant ? — en termes Piagétiens, comment l'enseignant assimile ces

outils —; b) comment son activité est-elle / va-t-elle, doit-elle se modifier à partir de l'utilisation d'un tel outil ? — comment l'enseignant accommode ses schèmes de diagnostic.

Du point de vue de la conception d'outils, l'analyse de l'activité de l'enseignant avec ou sans ces outils (ou prototypes d'outils) conduit à des retours d'évaluation de l'outil, de préconisation de modifications (éventuelles) de l'artefact, et à la définition des situations de formation des enseignants au diagnostic avec ces outils, visant une modification de ses schèmes de diagnostic (et sans doute aussi de ses représentations).

La recherche en cours est développée du second point de vue : on ne cherche pas actuellement à identifier les instruments utilisés par les enseignants mais à repérer comment l'outil Pépite peut s'insérer dans l'activité de diagnostic.

3. L'ACTIVITÉ DE DIAGNOSTIC DE L'ENSEIGNANT DE MATHEMATIQUES

Les spécificités de l'activité de l'enseignant marquent évidemment un processus comme celui du diagnostic, et aux questions et hypothèses générales de la place du diagnostic dans l'activité de gestion d'un environnement dynamiques s'ajoutent des questions spécifiques.

3.1. Les déterminants de l'activité de diagnostic de l'enseignant

Il faut d'abord souligner que l'activité de diagnostic de l'enseignant (de mathématiques) va être marquée par plusieurs déterminants. A) L'activité enseignante relève d'une classe d'activités fortement étudiées en psychologie ergonomique : la gestion d'environnement dynamique, et plus particulièrement d'environnement dynamique ouvert [Rogalski 2003]. B) l'objet de l'action est spécifique puisqu'il s'agit d'acteurs humains, individuels ou collectifs (les élèves, la classe), marqués par la diversité. C) L'activité enseignante se développe dans des temporalités multiples : du temps long d'un cycle scolaire, au temps de l'interaction en classe sur une question particulière. D) Les champs conceptuels en jeu, pour les mêmes acteurs, sont multiples, et il y aune variabilité des acteurs visés par rapport à ces contenus. E) Les moyens potentiels d'action sont divers (de l'ostension des mathématiques en jeu par l'enseignant, en cours, aux situations qui contiennent pour les élèves les moyens de validation). F) Les conditions organisationnelles sont celles d'une action de l'enseignant le plus souvent individuelle au cours de l'interaction en classe, avec une diversité des relations interindividuelles et organisationnelles entre collègues, dans l'établissement ou plus largement dans l'organisation scolaire (participation à une communauté de réflexion et de recherche : IREM, APMEP, Didactique des mathématiques, etc.). G) Le niveau de l'enseignement est également une variable a priori importante dans la détermination de l'activité enseignante. Ce déterminant a probablement un impact sur les différents composants de cette activité, et en particulier celle de diagnostic.

Ce que nous allons développer ci-dessous sera centré sur l'activité de diagnostic dans l'enseignement secondaire général, à la fin de l'enseignement obligatoire (à l'articulation 3ème / seconde) : c'est à la fois le niveau qui est visé par la version actuelle de Pépite, et celui des recherches développées par ailleurs sur l'activité de l'enseignant avec A. Robert.

3.2. Questions et hypothèses

Ces questions sont liées à l'hypothèse générale que l'activité de l'enseignant est déterminée par un **compromis** entre les attendus (plus ou moins explicites) de l'institution : "faire" le programme", ce qui nécessite de "faire avancer la classe", et "d'assurer l'apprentissage de tous les élèves", ce qui appelle des diagnostics différenciés.

- Une première catégorie d'hypothèses touche à l'objet de l'activité de diagnostic : il existe **deux types de diagnostic**, l'un — dominant — orienté vers la classe, et l'autre, différentiel, orienté vers les élèves. Le premier se manifeste essentiellement dans deux temporalités : la temporalité courte de la séance de classe (ce que nous appellerons le diagnostic dynamique (on-line), et la temporalité des sessions dédiées à un contenu donné. Sa visée majeure est la régulation de l'activité enseignante quant au savoir à enseigner qui est en jeu. Le second type

de diagnostic se place à différents moments du temps long de l'année scolaire, et articule une évaluation globale de la classe et une évaluation différentielle des élèves. Ce diagnostic différentiel prend essentiellement la forme d'une catégorisation des élèves, soit en sous-classes : "les bons", "les lents", "les moyens", "les faibles", soit selon l'indicateur numérique constitué par les notes. Le statut de l'évaluation qualitative, individuelle, du carnet scolaire est une forme qui renvoie à des dimensions qui dépassent celle des acquis en termes de savoir mathématique, qui peuvent relever du rapport au savoir ("peu motivé"), mais référer aussi, plus généralement, à l'enrôlement de l'élève ("ne travaille pas", "attentif").

- La seconde catégorie d'hypothèses concerne l'activité de l'enseignant et des élèves en situation dynamique de classe.

Notre première hypothèse est qu'il existe une **"enveloppe" de l'activité des élèves dans la classe** que l'enseignant se sait capable de gérer et son activité est contrainte par l'existence d'un "gradient" qui tend à y ramener les élèves. *L'itinéraire cognitif* prévu par l'enseignant [Robert & Rogalski 2002b] est au centre de cette enveloppe de l'activité des élèves, mais d'autres éléments en font partie, dont ceux concernant l'enrôlement des élèves et les modes de travail retenus (dimensions cognitives et médiatives de l'activité de l'enseignant, [Robert & Rogalski 2002]. Le diagnostic serait alors développé au cours de la séance dans la mesure où il permet de déterminer si on est toujours dans cette enveloppe ou si on s'approche des limites, et dans la mesure où ce diagnostic est pertinent étant donné le répertoire d'actions dont l'enseignant se sait (ou se pense) disposer pour rester dans cette enveloppe, ou y ramener en cas d'incident.

La seconde hypothèse est que l'enseignant dans sa classe poursuit **deux buts liés**. Un premier but est l'enrôlement des élèves comme condition pour les faire entrer et les maintenir dans un certain "procédé didactique" (leur faire suivre une série de leçons sur l'algèbre, avec un certain type de travail en classe et à la maison, etc.). Le second but est celui de l'intervention didactique proprement dite sur le rapport des élèves à l'algèbre élémentaire. Le diagnostic peut donc être orienté vers l'un et/ou l'autre de ces buts : l'instrumentation est alors éventuellement différenciée (un outil de diagnostic peut être utile pour évaluer la motivation des élèves, par la manière dont ils utilisent l'outil, le temps qu'ils lui consacrent, les réponses qu'ils cherchent à apporter, l'intérêt manifesté pour

Une troisième hypothèse est que le logiciel **Pépite s'insère seulement dans certaines temporalités** et buts du diagnostic : par exemple, il ne relève pas du diagnostic dynamique en classe par l'enseignant (qui en saura ce qu'ont fait les élèves à l'issue de la session avec Pépite, et non en cours).

Enfin, une dernière hypothèse est issue à la fois des connaissances générales sur le diagnostic en environnement dynamique, et des connaissances de didactique des mathématiques sur la place que prend la classe et les groupes d'élèves dans l'activité de l'enseignant : pour que **Pépite s'insère comme instrument de diagnostic**, il sera(it) besoin d'ouvrir sur des "sorties" orientées vers l'enseignant en termes de résultats d'ensemble et de catégories d'élèves, et sur des "sorties" orientées vers l'élève, en termes d'évaluation de son travail et en termes de situations de remédiation.

4. METHODES

Nous présentons ici les méthodes utilisées dans l'étude empirique conduite en 2003 dans l'équipe. Par étude empirique, nous entendons comme nos collègues allemands, une étude basée sur des faits observés, qui s'appuie sur une analyse a priori : analyse de type épistémologique (analyse cognitive de la tâche, "à dire d'expert" et utilisant les compétences des mathématiciens et didacticiens) et synthèse de la littérature.

La méthodologie utilisée dans cette étude articule des outils généraux de psychologie ergonomique : entretiens avec les enseignants, observation et analyse de leur activité lors de séances de classe dans le domaine de l'algèbre élémentaire, observations de l'interaction avec Pépite en situation de formation continue sur l'algèbre, questionnement spécifique des enseignants sur l'évaluation de Pépite dans ce dernier contexte, et enfin analyse des "incidents" [Rogalski 2001; 2003] ; [Roditi 2003], lors de séances de classe en algèbre. Comme la visée à la fois épistémique et pragmatique concerne la manière dont un logiciel tel que Pépite peut devenir un instrument dans l'activité de l'enseignant, le choix des enseignants fait intervenir le logiciel : la méthode au coeur de l'étude

consiste à interviewer des enseignants, avant qu'ils suivent une formation continue sur l'algèbre intégrant l'outil Pépite, à observer ces enseignants lors de la formation, en centrant l'analyse sur les rapports identifiables avec le logiciel Pépite, et à revoir des enseignants après qu'ils aient suivis une telle formation.
La recherche conduite au cours de cette année a intégré trois étudiantes en psychologie (dominante psychologie ergonomique) qui ont contribué au recueil des entretiens et à l'observation de la formation. Leurs mémoires de recherche porteront plus spécifiquement : sur l'activité "courante" de diagnostic de l'enseignant avant rencontre avec le logiciel Pépite (Myriam El Jaafari, sur l'interaction avec Pépite des enseignants en stage (Leslie Simonneau), et enfin sur l'activité de diagnostic d'enseignant après la formation continue (Géraldine Cahors). Le recueil des données relatives à cette dernière étude aura lieu dans la seconde phase du contrat. L'ensemble de ces données permettra une première représentation dynamique de la place potentielle et effective de Pépite comme outil dans l'activité de l'enseignant (et sa constitution possible en instrument, une question subsidiaire étant : instrument pour quelle fonction ?).
Par ailleurs, une méthode d'analyse de l'intervention de l'enseignant en classe est en développement avec Aline Robert. Une première mise en oeuvre est présentée dans [Robert & Rogalski 2002], avec une centration plus particulière sur l'activité d'enrôlement des élèves (pour qu'ils se placent dans une position d'élèves de mathématique, premier élément de leur entrée dans les procédés didactiques retenus par l'enseignant). Un développement de cette méthode pour l'analyse particulière de l'activité de diagnostic dans le temps réel des interactions de classe est présenté ci-dessous, avec l'analyse de la séance qui a été utilisée pour illustrer la mise en oeuvre des deux perspectives didactiques et psychologiques.

4.1. Les situations d'investigation de l'activité de diagnostic

L'activité de diagnostic, quelle que soit sa forme et son amplitude, se déroule comme toute l'activité enseignante sur la temporalité longue. La considération de l'année scolaire, au moins, est sans doute particulièrement sensible dans les deux classes de troisième et seconde : en troisième, le brevet est le premier examen subi par les élèves, et toutes les recherches ont montré le rôle que joue un examen final sur l'ensemble de l'activité scolaire ; en seconde, il s'agit d'une année d'orientation, et la dernière commune à tous les élèves du second cycle.
Par conséquent, dans ce premier temps largement exploratoire, une investigation sur l'activité de diagnostic doit porter sur le temps long. Tant que des hypothèses plus précises ne sont pas élaborées, une analyse de l'activité à un grain fin est difficilement praticable, et a priori risque d'être peu productive. D'autant que les hypothèses générales que nous avons faites conduisent à penser que le diagnostic est "plongé", "latent" sous des décisions prises à différentes temporalités. Un des buts de la recherche est donc de repérer et/ou de construire des indicateurs d'une activité de diagnostic, dans le domaine particulier de l'algèbre élémentaire.
Les questions auxquelles on cherche à répondre peuvent être listées en quatre grandes catégories : 1) cadre général de l'action particulière de "diagnostic", à savoir l'activité d'ensemble de l'enseignant, 2) place du diagnostic dans l'activité de l'enseignant, 3) voies et moyens de l'activité de diagnostic, et enfin, 4) place de Pépite comme outil d'aide au diagnostic en situation scolaire.
1) Cadre général de l'activité de l'enseignant de mathématiques, en algèbre

- Que font les enseignants en classe, et/ou en dehors de la classe ?
- Comment organisent-ils leurs enseignements ?
- Comment pilotent-ils la classe ?
- Quelles sont leurs difficultés ?
- Qu'est-ce qu'enseigner l'algèbre ?

2) Place du diagnostic dans l'activité

- Quelles activités de diagnostic manifestent-ils ? Est-ce une activité fréquente ?
- Quel est le lien entre le diagnostic qu'ils établissent et la gestion de leur classe ? Leurs décisions ?

3) Visées, opérations, difficultés et stratégies ; instruments du diagnostic

- Qu'est ce que faire du diagnostic pour eux ?

- Quels sont les critères et les référents qui leur permettent de faire du diagnostic ? De prendre leurs décisions ?
- Quels sont les problèmes liés au diagnostic ?
- Quelles stratégies développent-ils pour effectuer des diagnostics ?
- Quels sont les outils d'évaluation qu'ils utilisent ?

4) Les aides logicielles au diagnostic, intégration de Pépite dans l'activité diagnostique

- Comment utiliser un logiciel pour le diagnostic ?
- Quel usage est fait des composants de Pépite comme outil d'aide au diagnostic ?
- Quelle utilisation en classe de l'interaction avec Pépite ?

Les méthodes dépendent évidemment des questions posées. Deux points de vue existent classiquement en psychologie ergonomique [Bisseret, Sebillotte & Falzon 1999] : 1) le point de vue des représentations des acteurs sur leur activité (ou celles des autres), de leurs connaissances et de leurs attentes, et 2) le point de vue de la dynamique de l'activité développée par l'acteur concerné (activité nécessairement contextualisée). L'objet des représentations étudiées et de l'observation faite peut être variable. L'accessibilité de ces méthodes dépend de plusieurs variables : connaissances antérieures acquises par la recherche, exigences temporelles, contraintes de la tâche, existence d'outils de recueil et d'analyse de données, position du chercheur (par rapport à l'enseignant concerné, par rapport à l'objet du diagnostic).

Le premier type de méthode disponible pour étudier les trois premières questions est celle des entretiens, où on demande à l'enseignant d'exprimer des représentations sur son activité d'ensemble (dans la première perspective). Le second type de questions et certaines des questions de type 3 appellent aussi de l'observation de l'activité effective (dans la seconde perspective). Enfin les questions de type 4 appellent à la fois une analyse a priori de l'instrumentation de l'activité analysée préalablement et une analyse de l'activité d'interaction et d'utilisation d'un logiciel conçu comme outil d'aide au diagnostic.

4.2. Les entretiens semi-structurés

Les entretiens semi-structurés (où un ensemble de questions est prévu à l'avance) sont la méthode qui a été retenue pour cette première approche de l'activité de diagnostic par l'enseignant en algèbre élémentaire. Un exemple du déroulement du début d'un entretien est donné en annexe. Le choix tient à la possibilité de faire exprimer des représentations sur l'ensemble de l'activité (dans ses dimensions temporelles), de laisser ouverte la question du niveau auquel l'enseignant se situe (général, sur l'année ou dans la classe, sur un contenu précis ou pas, sur les élèves en général ou sur des typologies d'élèves, sur le la nature et l'impact du diagnostic dans son activité).

Le codage d'un premier protocole verbal (M. El Jaafari) a permis de dégager une première palette de catégories :

Une première gamme de catégories concerne les représentations générales : contenu, élèves, stratégies:

- Les représentations de l'algèbre ;
- Les stratégies d'enseignement ;
- Les représentations des élèves (difficultés et capacités) ;
- Les stratégies de remédiation.

Une seconde gamme concerne plus spécifiquement l'évaluation (utilisée ici plutôt que diagnostic, absent des verbalisations des enseignants) :

- L'évaluation diagnostique ;
- L'évaluation sommative ;
- L'évaluation formative ;
- L'évaluation individuelle et collective ;
- Les outils et moyens d'évaluation.

À cette première catégorisation des verbalisations des enseignants, s'articulent deux autres approches d'analyse des expressions elles-mêmes, comme nous l'illustrons sur l'exemple de l'entretien donné en annexe :

sur les élèves / sur la classe

- "bons", "rapides", "meilleurs", "lents", "tête de classe", "bonne classe", "classe hétérogène",
- "a bien/ pas bien compris" , "a acquis toutes les notions", "en cours d'acquisition", (individuel), "autonome"

sur les élèves "en général"

- des problèmes : "à travailler chez eux" , "à mémoriser la technique", sur "comment on arrive à retenir"

sur les buts de l'évaluation des élèves

- dans les contrôles, une notation différenciée, tout compte dans la note : autonomie, et ils ont droit à des questions, même à des formules, à la figure (évaluation orientée élèves)
- épreuves communes dans le collège pour voir les bons élèves (diagnostic orienté collectif d'enseignants)
- contrôles obligés pour évaluer les élèves, quel est l'élève qui a acquis toutes les notions ?
- petite interrogation en 5' voir si l'élève a bien compris ou pas (la notion en cours)

sur les liens entre le diagnostic (évaluation), les actions et les ressources

- les moyens-lents ont des logiciels, leur boîte à outil (ressource)
- les élèves en difficulté, je les envoie à un autre collègue (action + ressource), prend en effectif réduit, plus d'heures, exercices à leur portée (actions + ressources) ;
- exercices adaptés au niveau (ressources),
- les élèves avec des problèmes de mémorisation : la faire travailler en classe ; (action)
- le travail à faire à la maison est différencié : les rapides, travail de recherche ; les moyens lents, des applications directes un quart d'heure de travail
- logiciel d'exercices avec grille d'évaluation , on retravaille sur des exercices (ressources)

4.3. L'observation et l'analyse de séances de classe

Certains des enseignants interviewés sont également observés en situation de classe, les verbalisations enregistrées et transcrites (et si possible des enregistrements vidéo de l'enseignant) et des notes prises pour le déroulement de la séance. Les protocoles issus de ces observations sont analysés du point de vue de l'activité de diagnostic, telle qu'on peut l'inférer des communications échangées entre l'enseignant et les élèves, et des décisions prises par l'enseignant dans la conduite de la séance. Les verbalisations de l'enseignant relèvent de la communication opérative, c'est à dire de communications liées à la réalisation d'une tâche (par exemple, d'éventuelles interactions sur des éléments extérieurs au cours de maths, comme le temps, ou autre, sont signalés mais ne sont pas analysés avec les outils d'analyse développés pour étudier la communication opérative. Ces méthodes articulent la perspective d'analyse cognitive de la tâche du point de vue de la didactique des mathématiques (dans quel procédé didactique l'enseignant fait-il entrer ses élèves, quel est l'itinéraire cognitif qu'il propose pour eux), du point de vue de la psychologie ergonomique (quelle est la nature de l'action dans laquelle il est engagé), et du point de vue d'indicateurs verbaux (tels que les marqueurs du discours et la modalisation). Un exemple d'analyse croisée est proposé dans [Robert & Rogalski, 2002b] sur le protocole d'une séance en classe sur la valeur absolue en seconde. Une étude spécifique des événements critiques que sont les incidents est présentée à partir de cet exemple (cf 4.5).

4.4. L'observation de l'introduction à l'usage de Pépite en stage de formation didactique à l'algèbre

Lors de la formation sur l'algèbre, utilisant le logiciel Pépite, les stagiaires ont à deux reprises utiliser Pépite : Pépitest est d'abord présenté et étudié à travers les réponses effectivement données par un élève. Pépidiag et Pépiprofil sont présentés après un travail propre de diagnostic de la part des stagiaires sur des réponses d'élèves.

Les observations relèvent particulièrement les échanges verbaux entre stagiaires d'un binôme, qui sont une forme de communication opérative, c'est à dire réalisée pour répondre à la tâche (analyser le logiciel et/ou les réponses d'élèves et/ou les diagnostics proposés). Le chercheur n'est que le destinataire marginal de ces échanges.
On relève aussi des éléments de l'interaction avec le logiciel, en particulier ceux qui semblent indiquer que le logiciel cesse d'être "transparent" dans la relation stagiaire / réponse de l'élève. Enfin, des observations "ouvertes" du déroulement du stage complètent la méthode. En particulier on observe - quand faire se peut - les diagnostics spontanément effectués par les stagiaires sur des réponses d'élèves données sur des supports papier-crayon par des élèves de leur classe ou de celles d'un(e) collègue. Ces observables de nature essentiellement qualitative (et même clinique) sont indicateurs de l'existence de processus pertinents pour l'analyse de la potentialité du logiciel comme outil pour le diagnostic.
A cette étape de la recherche on ne cherche pas à répondre à des questions de représentativité des faits et processus observés.
On analyse trois moments particuliers du stage liés à l'usage de Pépite pour le diagnostic:

- première interaction avec Pépitest (cf ci-dessus)
- analyse des résultats de quelques élèves à une série d'exercices conçus par un ou des stagiaire(s) en fonction de la première journée du stage
- analyse de Pépidiag et Pépiprofil (sur les réponses d'un élève choisi).

On cherche particulièrement à vérifier que :

1) l'usage de Pépitest ne pose pas de problème particulier (peu d'échanges à ce sujet),
2) les modes spontanés d'évaluation (diagnostic) des réponses à des exercices sont déterminés par les représentations "courantes" de ce qu'est l'algèbre élémentaire de collège.

On présente ci-dessous la première phase d'analyse des protocoles verbaux dans l'analyse de l'interaction avec Pépitest : il s'agit d'une catégorisation des échanges selon l'objet visé : logiciel, exercices, élèves, ou stagiaires eux-mêmes (leur tâche, sa réalisation) (ou situation de stage).

Catégorisation des échanges entre stagiaires (et avec les formatrices)

Suite à la première analyse de l'interaction Pépitest entre 2 stagiaires débutants, L. Simonneau a relevé 6 catégories générales, (qui seront reconsidérées et améliorées une fois les codifications de toutes les interactions achevées.)

- Les échanges traitant du fonctionnement du logiciel ; englobant les caractéristiques informatiques : interface, présentation des données, récupération des données, accès aux différents écrans de Pépite_)
- Les échanges traitant des exercices de Pépitest ; en ce qui concerne le contenu des exercices : thème de l'exercice, pertinence des énoncés et des réponses proposées aux élèves, ainsi que la lecture des énoncés.
- Les échanges traitant du diagnostic des stagiaires : diagnostic des réponses données par l'élève, diagnostic de l'exercice (répondant à la question des formatrices : que permet-il de repérer ?)
- Les échanges traitant de la tâche à effectuer par les stagiaires : cette catégorie comprend les rappels des consignes données par la formatrice, les commentaires des stagiaires concernant la réalisation de la tâche.
- Les échanges traitant des commentaires personnels et de l'expérience personnelle des stagiaires.

La place des échanges concernant le fonctionnement du logiciel informe sur la facilité d'usage de celui-ci, et sa "transparence" par rapport aux visées des stagiaires. La place des échanges concernant les exercices de Pépite (que cherchent-ils à montrer) situe l'importance de la tâche pour l'enseignant concerné. Les échanges traitant du diagnostic des réponses de l'élève informent le plus directement

de l'utilisation de Pépite pour connaître l'élève dont l'enseignant (ou le binôme) étudie les réponses. Ces catégories générales vont ensuite faire l'objet d'une analyse plus fine.
On donne en annexe des exemples de codage. Les échanges sur le fonctionnement du logiciel sont marginaux, après l'introduction par la formatrice. La dominante apparaît être l'identification du but de l'exercice, la problématique de diagnostic sur l'élève apparaît plus tard (elle est logiquement conditionnée par l'analyse de la visée de l'exercice : qu'est ce qu'il permet de voir). La tâche des enseignants en tant que stagiaires a une place importante au début de l'interaction avec le logiciel.
La typologie des échanges et le découpage par items (temporalisé) permettent d'analyser la dynamique de l'interaction (et de constater dans l'exemple présenté un désinvestissement vers la moitié des items de Pépitest). Le synoptique (exemple donné en annexe pour les premières minutes) est un produit intermédiaire de l'analyse : il permet de voir que la tâche d'identification des visées des exercices demande un certain temps pour être intériorisée (présence des pauses). L'affinement des échanges sur le diagnostic de l'élève dont les stagiaires regardent les réponses permettra de comparer des diagnostics "spontanés" sur les copies papier-crayon réponsés à des items choisis par les enseignants (et non avec les visées didactiques des auteurs de Pépite).

4.5. Le questionnaire sur Pépite (après le stage)

Dans la mesure où très peu des stagiaires l'ont rempli, nous ne développerons pas ici cette méthode indépendamment des résultats qu'elle produit.

4.6. L'analyse des incidents comme outil d'étude du diagnostic dynamique 'online'

Les incidents sont des événements critiques au sens où la suite du déroulement du processus observé pourrait en être modifiée. Dans les séances de classe, il s'agit le plus souvent d'événements déclenchés par des réponses d'élèves. On peut distinguer des incidents de plusieurs espèces. Les incidents de première espèce correspondent à des réponses erronées d'élèves auxquelles l'enseignant s'attend plus ou moins - il les a anticipées ou les a déjà rencontrées avec d'autres élèves ; les incidents de seconde espèce correspondent à des réponses non nécessairement erronées, mais qui ne sont pas dans la logique de la classe, et qui, cependant, peuvent être traitées - au moins partiellement - dans la dynamique de la séance prévue par l'enseignant ; enfin les incidents de troisième espèce sont déclenchés par des interventions d'élèves (en réponse à une question ou autonomes) qui appellent une activité de compréhension de l'enseignant, et peuvent ou non être traitées dans la logique de la séance prévue par l'enseignant.
Les exemples d'incidents analysés ci-dessous se situent le cadre d'une séance de cours-exercices sur les équations et inéquations avec valeur absolue. L'enseignant corrige, avec un élève au tableau, des exercices donnés à la maison.
Exemple 1 : Incident de **première espèce** avec correction immédiate d'une réponse en décalage avec l'attendu, par renvoi à un modèle (une formule à appliquer) et non prise en compte d'un problème potentiel "ancien"
Il va s'agir de l'existence d'une question sous-jacente à ce qu'est résoudre une (in)équation. La tâche en cours est la résolution de $|X-C|<R$. Parmi les équivalences données dans le cours précédent, il y a celle de $|X-C|<R$ et $C-R<X<C+R$, qui est la forme attendue par l'enseignant.
Or l'élève au tableau propose : "X-R ... "
E, intervenant avant que l'élève ne termine (<C) : "pas X-R c'est C-R"
L'enseignant anticipe (correctement au vu de la réaction ultérieure de l'élève et de la classe) l'écriture de l'élève, qui est erronée du point de vue du but du traitement de l'inéquation avec valeur absolue, mais pas du point de vue des équivalences formelles. Or X et C jouent des rôles identiques, formellement dans $|X-C|<R$, la différence tient au but de celui qui traite l'inégalité et au rôle assigné implicitement à X et à C du fait des lettres choisies.
Cette question de l'orientation de l'action de résolution fait partie de l'ancien : les élèves l'ont déjà rencontrée en algèbre dans la résolution des équations (4ème, 3ème). Il est probable que l'enseignant n'ait pas explicité cela, dans la mesure où il s'agit non d'un objet mathématique, mais de l'activité mathématique elle-même [Cortès 2003] ; [Pham 2003]. Discutant de ce qui "est des maths" à propos

des écritures de polynômes, Pham note que pour l'enseignant de mathématiques la réflexion sur ce qu'on fait "n'est pas des maths" (2003, p. 9), et précise plus loin (note p. 10) : *"les mots "équation", "inconnue", "paramètres" sont d'autres exemples de mots servant au mathématicien à dire ce qu'il fait. A la différence du mot "polynôme", les mathématiciens n'ont pas tenté de les faire rentrer dans le rang"*. [à travers une modélisation mathématiques]. L'enseignant ne traite pas cette question qui est sous-jacente à la réponse de l'élève, et il est probable qu'il ne l'identifie pas.

D'autres incidents apparaissent dans les exercices nouveaux destinés à introduire d'autres modèles pour la résolution d'équations et inéquations avec valeur absolue.

Exemple 2 : Incident de **troisième espèce** au cours du traitement de l'exercice de résolution de l'inéquation : $|6-X| <1$.

e propose : au lieu de faire - on fait +
E : tu m'expliques pourquoi ?
e: ben la nouvelle inconnue
E : l'inconnue est toujours X
e : c'est l'inverse
E : l'inverse serait 1/X, or là c'est ..
es : l'opposé
E : or en fait 6-X c'est l'opposé de X-6

L'enseignant ne traite pas la proposition de changer d'inconnue (qui appellerait le traitement des fameux mots "non mathématiques" : "équation", "inconnue") mais il "lit" la forme "6-X" comme l'opposé de X-6, ce qui ramène à la forme du modèle $|X-C|<R$. Il n'explicite pas pourquoi lire ainsi 6-X, opération qui est orientée par le but : se ramener à la forme connue, on est encore dans du "non-mathématique", et dont la seule trace est "en fait".

L'enseignant poursuit dans cette ligne, et on va voir apparaître un autre incident (emboîté dans le précédent) concernant de l'ancien :

Exemple 3 : Incident de **seconde espèce**, lié à l'ancien : qu'est A dans la forme -A ?

E poursuit son traitement de la réponse de l'élève : mais la valeur absolue de l'opposé c'est ?...[silence de l'élève au tableau et des élèves dans la classe]
E : alors la valeur absolue de l'opposé de A c'est ? ..[toujours silence] je mets -A, valeur absolue de -A, c'est égal à quoi ?
les élèves : A
E : non! |A|

Il n'y a pas ici non plus de traitement d'un problème "ancien" en algèbre : le signe d'un nombre sous forme littérale est comme le signe d'un nombre "numérique", A est donc implicitement "naturel", donc |-A| = A ...).

Exemple 4 : Incident de **troisième espèce**, lié à de l'ancien, mais inséré dans la situation présente

Dans la suite du traitement du même exercice, une élève pose une question qui engage l'enseignant dans une activité de diagnostic, jusqu'à ce qu'il ait donné un sens à cette question : avant-dernière ligne de l'interaction "ah! ta question c'est .." ; il embrayera ensuite sur la logique de la séance en cours.

e : ce - il est à 6 ou à X

(référence possible au modèle X-C, on identifie les positions par le fait que l'une "a" le signe -, cf plus haut la question de A et -A)

E : le moins il est à 6 ou à X ? qu'est ce que tu veux dire ?
e: c'est -6 ?
E qu'est ce que vous en dites, qu'est ce qui est écrit, c'est qui -6 et 6, vous entendez 6 pourquoi ?
e : ben, pour calculer
E : pour calculer quoi ?
e : ben C-R
E : pourquoi -R ? alors R, ah! ta question c'est : que représentent C et R ? Alors les autres, c'est qui C et R ici ? ..
E: C est égal à 6 et R, 1.

Dès qu'une représentation suffisante de la question de l'élève est disponible pour l'enseignant ("*Ah! ta question c'est ...*"), il la traite dans la ligne générale de son cours.
On retrouve ici un processus analysé par M. Plat (2001) dans un autre domaine de gestion d'environnement dynamique, l'aviation : elle montre d'une part que, même lorsqu'il y a des procédures prescrites d'action, les pilotes ont besoin de se construire une représentation de la situation, au-delà de l'identification qu'on est dans le cas d'application de la procédure, et que d'autre part cette représentation doit être seulement "suffisante" et qu'elle n'est pas approfondie au-delà de ce qui permet aux pilotes de décider l'action.
Dans la séance analysée, on a relevé une quinzaine d'incidents, des différents types. Nombre d'entre eux sont des indicateurs potentiels de problèmes conceptuels d'élèves, antérieurs à la question particulière de la valeur absolue : en particulier le sens des signes et des lettres dans la représentation (désignation) des nombres relatifs, et le sens des rapports entre l'activité mathématique de résolution et les termes (et les concepts non définis comme mathématiques) d'inconnue, d'équation, de transposition d'un membre à un autre d'une équation (ou inéquation). Or l'enseignant n'y fait aucune référence explicite, ne serait-ce que par un commentaire tel que : "dans -A on ne sait rien sur A, c'est comme pour x, il peut être négatif". Cela contraste avec le fait qu'il relève systématiquement quand elles apparaissent des erreurs d'élèves qui ne sont pas spécifiques à cette séance, comme la correction : "ou" et non pas "et" pour exprimer l'union de sous-ensembles, la distinction entre "opposé" et "inverse".
Nous avons plus haut fait l'hypothèse qu'en fait ces problèmes conceptuels liés à l'ancien ne sont pas identifiés par l'enseignant (ce que nous avons argumenté en fonction d'études de nature épistémologique "à dire d'expert" sur les "objets mathématiques" [Pham 2003], ou de bilans de travaux de recherches sur les invariants en jeu dans la résolution d'équations et inéquations [Cortès 2003]. Il se pourrait aussi que l'enseignant identifie ces problèmes, mais choisisse de ne pas introduire une dérivation dans l'itinéraire cognitif prévu, pour diverses raisons (l'enrôlement des élèves, le temps dévolu au contenu, la difficulté pour les élèves, la difficulté de trouver en temps réel une intervention pertinente, l'existence d'une conceptualisation qu'il ne maîtrise peut-être pas complètement, etc.). Il se pourrait également que parce qu'il a en tête un certain itinéraire cognitif et une orientation de l'apprentissage des élèves (par exemple, leur apprendre à se servir de modèles de résolution à appliquer), l'enseignant soit dans l'action, aveugle ou sourd au sens des incidents considérés, mais qu'il puisse effectuer le "bon" diagnostic en temps différé.
On voit alors la nécessité, pour une analyse de l'activité de diagnostic en classe, de compléter les observables par des entretiens d'auto-confrontation (verbalisation consécutive à l'action assistée par des traces : [Leplat & Hoc 1981] : l'enseignant pourrait avoir identifié ce problème (ancien) sous-jacent à la réponse de l'élève, mais décidé de ne pas le traiter, car introduisant une dérivation par rapport à l'itinéraire cognitif prévu pour la classe (avec le risque que la classe "décroche"), et le risque de ne pas terminer les tâches attendues au cours de la séance.

5. RESULTATS

Le traitement des protocoles recueillis est en cours d'analyse systématique. Les résultats qualitatifs déjà obtenus portent sur un certain nombre de cas, avec des enseignants pour certains "atypiques", et d'autres plus représentatifs d'une catégorie majoritaire d'enseignants. Nous n'avons toutefois pas les moyens d'étayer directement cette évaluation sur la "centralité" des enseignants interviewés ou observés, un travail comme celui de la thèse de N. Sayac donne cependant des éléments pour confirmer le caractère "atypique" [Sayac 2003].
Un premier champ de résultats est d'ordre conceptuel et méthodologique, permettant des analyses ultérieures systématiques sur le diagnostic enseignant en algèbre. Ils apparaissent plus haut dans l'analyse dans la section 4.
Ensuite, les entretiens comme les observations, en classe et en stage, font apparaître une diversité parmi les enseignants, dont on continuera à chercher quelle catégorie dominante serait la cible "normale" de Pépite (reconçu en fonction des différentes recherches effectuées et en cours). On a

retenu pour une première étude de cas des enseignants de l'une et l'autre catégorie (autant que possible).
Du point de vue des représentations exprimées lors des entretiens par les enseignants sur leur activité d'enseignement de l'algèbre et d'évaluation en particulier, la méthodologie d'analyse a été élaborée à partir d'un cas riche en données, correspondant à un enseignant atypique, sur au moins deux dimensions : utilisation importante d'outils logiciels qu'il a lui-même conçus, travail collectif dans l'établissement, y compris pour des activités de remédiation à des élèves particulièrement en difficulté.
Une première analyse du protocole fait apparaître l'importance des catégorisations, de la classe, de groupes d'élèves (les "moyens faibles", les "moyens rapides"), et d'élèves (qui savent ou non travailler, qui ne savent pas ce qu'il faut faire pour retenir, ..). Elle indique aussi l'existence d'un lien fort du diagnostic soit avec les buts visés, soit avec les ressources et les actions possibles, et peu de diagnostic en termes spécifiés sur les acquis particuliers dans le domaine de l'algèbre. Il est possible que la situation d'entretien avec son caractère de généralité de la référence accentue ces éléments. On relève toutefois que le diagnostic conduit sur des points particuliers (avec des exercices tests courts, aisés à mettre en oeuvre en classe, avec ou sans soutien des logiciels), conduit à surestimer les acquisitions des élèves (du point de vue de l'enseignant interviewé). Deux types de diagnostic apparaissent : un diagnostic "local" sur des éléments du thème en cours d'enseignement, et un diagnostic plus "global" sur des acquisitions en algèbre élémentaire qui nécessite un autre type d'outil que des exercices brefs.
Du point de vue des analyses de sessions de classe, la méthode des incidents a été développée à partir de l'enregistrement d'une session de classe d'un enseignant dont nous pensons qu'il est assez "typique" (en ce qui concerne l'algèbre), si on le situe par rapport aux études de Roditi (bien que conduites à un autre niveau scolaire). Les données (rapportées dans la présentation de la méthode d'analyse) vont dans le sens d'une confirmation de nos hypothèses quant au diagnostic en classe. Il reste une question ouverte sur le fait que l'enseignant identifie ou non les problèmes conceptuels de certains élèves (voire beaucoup) ; notre hypothèse - non testable sur les données existantes - est que la dynamique de la conduite de la classe occulte effectivement cette identification par l'enseignant. Une conséquence méthodologique est la nécessité de pouvoir effectuer des entretiens confrontant l'enseignant à certains au moins des points de son activité qui demandent confirmation (ou infirmation) de l'interprétation.
Du point de vue des observations de stage, les données de deux "duos" de jeunes enseignant(e)s confirment et précisent des observations précédentes sur l'usage de Pépite, et on peut les considérer comme assez typiques. L'orientation du diagnostic de réponses d'élèves (ni "trop bons", ni "trop en échec") est déterminée essentiellement par des objets algébriques alors que le diagnostic proposé dans pépite (Pépidiag et Pépiprofil) est centré sur un diagnostic liant des dimensions épistémologiques d'analyse du domaine de l'algèbre élémentaire et des types de situations proposées à l'élève. En conséquence, alors que l'usage de Pépitest montre que cet outil est aussi "transparent" que des copies classiques d'élèves (papier), l'usage du diagnostic pose divers problèmes. Les problèmes "techniques" de récupération des données élèves, etc. sont plus ou moins aisément traitables, mais n'appellent pas de changement dans les représentations des enseignants et leur activité ultérieure en algèbre, il n'en est pas de même d'autres questions.
On relève ainsi des problèmes de terminologie, plus ou moins directement liés à l'analyse épistémologique sous-tendant la conception de Pépite. On relève aussi des problèmes de représentation de ce qui est produit comme diagnostic. En particulier, les enseignants observés ont de grandes difficultés à donner du sens aux diagrammes qui représentent les relations entre le cadre algébrique et les autres cadres en jeu dans l'algèbre élémentaire. De manière générale, la considération des deux composants dans l'acquisition de l'algèbre : algèbre "objet" et algèbre "outil" n'est pas une entrée dans la problématique d'évaluation (et ultérieurement de remédiation) qui aille de soi.

6. DISCUSSION & CONCLUSION

La poursuite de la recherche concerne trois dimensions : l'analyse de l'activité de diagnostic, les méthodologies à mettre en oeuvre, la conception logicielle.

Du point de vue de l'analyse de l'activité de diagnostic

La suite du travail est l'analyse systématique des données déjà recueillies pour dégager les invariants et les éléments de différenciation ; mettre en perspective, pour les mêmes enseignants, l'activité "spontanée" de diagnostic (en amont de toute rencontre avec Pépite), l'approche du logiciel en stage de formation à l'algèbre, et l'activité de diagnostic après usage de Pépite, soit en stage, soit par initiative propre via le web.

Du point de vue des développements méthodologiques

Une première analyse de protocoles recueillis fait apparaître des besoins sur l'organisation du questionnement dans les entretiens (avec la nécessité de faire expliciter par l'enseignant : "à quoi vous voyez que ...", et "comment vous faites pour ...", c'est à dire les deux dimensions d'interaction avec le réel des élèves et de la classe : percevoir et agir).
L'analyse de sessions de classe montre la nécessité d'une phase ultérieure de confrontation des observables et des interprétations de l'enseignant, ainsi qu'une mise en relation avec des régularités de l'action de diagnostic ou au contraire l'identification de points singuliers lors de certains incidents.
Les observations lors des stages se sont avérées relativement difficiles à conduire au-delà d'études de cas ; la suite des analyses faites devrait permettre de construire des questionnaires plus ciblés à la fois quant à l'objet considéré (l'algèbre élémentaire), les façons d'évaluer des réponses d'élèves, et les interactions avec le logiciel.
La question de la représentativité des enseignants a juste été évoquée, elle est évidemment permanente dans les études centrées sur l'activité de l'enseignant. L'analyse des entretiens pourrait déboucher sur l'élaboration de questionnaires permettant des passations en (relativement) grand nombre, pour évaluer la généralité d'au moins certains des points observés dans les études d'entretiens.

Du point de vue de la conception logicielle

Ces premiers résultats de la recherche sur le diagnostic par l'enseignant et son instrument par Pépite confortent le travail conduit dans les autres axes du projet sur la (re)conception de Pépite : passage du diagnostic individuel à la catégorisation d'élèves pour orienter l'action de remédiation ou le caractère différencié de l'enseignement ; implémentation de catégories de tâches à la fois pour le diagnostic et la remédiation adaptée à différents groupes d'élèves ; organisation informatique d'un diagnostic plus adaptatif (axe 1), avec des parcours dépendants de la série des tâches pour diminuer le nombre d'exercices sans réponse ; identification plus directe des (types d') exercices dont les réponses appellent une lecture de l'enseignant pour affiner le diagnostic (argumentation, réponses qualitatives,) ; retour vers l'élève - plus difficile que celui vers l'enseignant mais correspondant à une attente de l'enseignant quant au fonctionnement des situations de diagnostic.
Du point de vue de la formation des enseignants
Ces résultats qualitatifs indiquent aussi l'importance de la représentation de l'objet même de l'enseignement dans les processus de diagnostic, et les besoins en formation (sur l'algèbre) pour l'utilisation du logiciel Pépite — même reconçu. Ils laissent ouverte largement la question de la place du logiciel dans l'ensemble de l'activité d'évaluation (de diagnostic) de l'enseignant. En première instance, le logiciel semble plus apte à s'insérer comme instrument d'une évaluation sommative (en fin d'année pour une orientation, en début d'année pour orienter le démarrage de l'enseignement) que d'une évaluation formative, liée au diagnostic "d'étape" (sur quelques sessions ou sur une thématique). Il semble plus difficile de le voir utilisé dans une visée de diagnostic dynamique pour une adaptation fine de l'enseignement aux réactions des élèves, mais l'intégration de situations de remédiation dans l'outil pourrait modifier la place potentielle de Pépite.

7. REFERENCES

[Artigue 1998] M. Artigue, Teacher training as a key issue for the integration of computer technologies, In Tinsley and Johnston (Eds.), Information and communication technologies in school mathematics (pp. 121-129), IFIP Chapman & Hall.

[Bressoux & Dessus 2003] P. Bressous, P. Dessus, Stratégies de l'enseignant en situation d'interaction, In M. Kail & M. Fayol (Eds.), Les Sciences cognitives et l'école, . Paris: PUF.

[Delozanne, Grugeon & Jacoboni 2002] E. Delozanne, B. Grugeon, P. Jacoboni, Analyses de l'activité et IHM pour l'éducation, *IHM 02* (pp. 25-32), Poitiers. ACM International Conference Proceedings series.

[Endsley 1995] M.-R. Endsley, Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. Human Factors, *37* (1), 32-64.

[Engeström, Miettinen & Punamäki 1999] Y. Engeström, E. Miettinen, R.-L. Punamäki (Eds.), Perspectives on activity theory Cambridge : Cambridge University Press.

[Gervais 1991] T. Gervais, Rôle des répertoires d'action et du niveau d'expertise dans le déroulement du diagnostic médical, Mémoire de DEA, Université Paris8.

[Haenen 2001], J. Haenen, Outlining the teaching-learning process : Piotr Gal'perin's contribution, Learning and Instruction, 11, 157-170.

[Hacker 1985], W. Hacker, On some fundamentals of action regulation, In Discovry strategies in the psychology of action (pp. 63-84), London : Academic Press.

[Hoc 1996], J.-M. Hoc, Supervision et contrôle de processus, La cognition en situation dynamique, Grenoble : PUG.

[Klein 1989], G.-A. Klein, Recognition-primed decisions, Advances in Man-Machine Systems Research, 5, 47-92.

[Lagrange 2000], J.-B. Lagrange, L'intégration d'instruments informatiques dans l'enseignement : une approche par les techniques, Educational Studies in Mathematics, 43, 1-30.

[Lagrange, Artigue, Laborde & Trouche 2003] J.-B. Lagrange, M. Artigue, C. Laborde, L. Trouche, Technology and mathematics education: a multidimensional overview of recent research and innovation, In A. J. Bishop, M. A. Clements & C. Keitel (Eds.), Second International Handbook of Mathematics Education, (pp. 237-269). Dordrecht: Kluwer Academic Press.

[Leplat 1997], J. Leplat, Regards sur l'activité en situation de travail, Paris : PUF.

[Leplat & Hoc 1981], J.Leplat, J.-M. Hoc, Subsequent verbalisation in the study of cognitive processes, Ergonomics, 24, 743-755.

[Plat 2001] M. Plat, Choisir de comprendre ou décider d'agir, Thèse de Psychologie, Université Paris8.

[Rabardel 1995] P. Rabardel, Les hommes et les technologies, Une approche cognitive des instruments contemporains, Paris : Colin.

[Rabardel 1999] P. Rabardel, Éléments pour une approche instrumentale en didactique des mathématiques, In M. Bailleul (Ed.), Actes de la Xème École d'Été de Didactique des Mathématiques, (pp. 203-213), Caen, IUFM.

[Robert & Rogalski 2002] A. Robert, J. Rogalski, Le système complexe et cohérent des pratiques des enseignants de mathématiques : une double approche, La Revue Canadienne de l'enseignement des sciences, des mathématiques et des technologies (RCESMT / CJSMTE), 2(4), 505-528.

[Robert & Rogalski 2002b] A. Robert, J. Rogalski, Un exemple d'analyse croisée de pratiques d'un enseignant de mathématiques en classe de seconde, Rapport de recherche Laboratoire Cognition & Usages, Saint-Denis, Université Paris 8. (Version anglaise modifiée, soumise à Educational Studies in Mathematics numéro spécial sur l'analyse de l'activité enseignante).

[Rogalski 2001] J. Rogalski, Y a-t-il un pilote dans la classe? Apport des concepts et méthodes de psychologie ergonomique pour l'analyse de l'activité de l'enseignant, In T. Assude & B. Grugeon (Éds.), Actes du séminaire national de didactique des mathématiques 2000 (pp. 143-164), Paris : IREM Université Paris7 (texte revu dans RDM, 2003).

[Rogalski 2003] J. Rogalski, Y a-t-il un pilote dans la classe ? Une analyse de l'activité de l'enseignant comme gestion d'un environnement dynamique ouvert, Recherches en Didactique des Mathématiques, 23(3/4).

[Sayac 2003] N. Sayac, Les pratiques des professeurs de mathématiques de lycée : une approche croisée des influences du sexe, de l'âge et du cursus, Thèse de didactique des mathématiques, Université Paris 7.

[Trouche 1996] L. Trouche, Étude des rapports entre processus de conceptualisation et processus d'instrumentation, Thèse de Didactique des Mathématiques, Montpellier : Université de Montpellier II.

[Trouche 2003] L. Trouche, Construction et conduite des instruments des apprentissages mathématiques : nécessité des orchestrations, Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paris 7.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

M. Artigue

Le projet LINGOT vise, comme cela a été rappelé au début de ce rapport, le développement d'outils de diagnostic et d'apprentissage de l'algèbre élémentaire ainsi que l'étude de la contribution possible de tels outils à l'instrumentation de l'activité de l'enseignant. Il se développe suivant trois axes complémentaires : l'axe diagnostic, l'axe apprentissage et l'axe instrumentation des pratiques enseignantes, en s'appuyant sur les acquis de trois domaines de recherche : acquis de la didactique des mathématiques sur l'enseignement et l'apprentissage du domaine mathématique visé ici : l'algèbre, mais aussi sur la conception et l'analyse de situation d'enseignement en mathématiques et sur l'étude des pratiques enseignantes, acquis de la recherche sur les EIAH quant à la conception et à l'évaluation d'environnements informatiques d'apprentissage humain, acquis enfin de l'ergonomie cognitive pour approcher le métier d'enseignant et les conditions de son instrumentation par des outils tels que ceux visés ici. Quelles leçons tirer du travail mené, des avancées qu'il a produites, des difficultés qu'il a rencontrées ? Comment penser à la lumière de celle-ci les prolongements possibles, souhaitables de cette recherche ? Ce sont les questions que nous souhaiterions aborder dans cette conclusion, en nous appuyant sur les éléments qui figurent dans ce rapport.

Le premier point que nous voudrions souligner est l'importance du travail co-disciplinaire dans un tel projet. On perçoit bien, à vivre au jour le jour son développement comme à la lecture du rapport, que la recherche, non seulement s'appuie sur les acquis de différents champs disciplinaires mais qu'elle ne saurait progresser sans une interaction profonde de ces derniers. C'est le modèle de la compétence algébrique développé en didactique par B. Grugeon qui l'a fondé épistémologiquement sur le plan mathématique mais l'exploitation de ce modèle dans des EIAH, qu'il s'agisse d'environnements de diagnostic ou d'apprentissage, ou encore de l'articulation entre ces derniers, n'est pas un simple problème d'application du didactique. L'implémentation informatique renvoie au didacticien des questions théoriques, lui faisant prendre conscience des contours flous de ses catégorisations par exemple, ou de la forte part d'implicite en jeu dans ses interprétations didactiques. Passer d'une situation d'apprentissage telle qu'elle est ordinairement spécifiée par le didacticien, avec des niveaux de description parfaitement adaptés au travail didactique, en classe ou en laboratoire, à une spécification exploitable par un chercheur en EIAH, requiert un travail commun et complexe, conjuguant les rationalités et exigences méthodologiques de deux disciplines. Cette recherche montre bien ce jeu nécessaire entre les disciplines et sa fécondité lorsqu'il devient fonctionnel. Dans l'axe diagnostic, l'exemple de la conception de classes de profils, en réponse à un besoin d'origine didactique, sa reformulation en termes de stéréotypes, la négociation d'une définition computationnelle de ces derniers en s'appuyant sur les acquis de la recherche EIAH et, enfin, leur implémentation informatique dans le logiciel PépiStéréo, le montre de façon exemplaire. Dans l'axe apprentissage, la rencontre de deux logiques : d'une part celle, didactique, issue de la théorie des situations amenant à rechercher des situations a-didactiques fondamentales et à analyser leur potentiel à travers celui des interactions du sujet avec un milieu perçu comme antagoniste, d'autre part, celle en termes de situations d'interaction portée par la recherche en EIAH, s'est révélée elle aussi particulièrement féconde. Le prototype CIME l'illustre nous semble-t-il très clairement. L'approche EIAH conduit à situer l'interaction dans une perspective de médiation plus large que celle classiquement offerte par la théorie des situations didactiques ; la théorie des situations didactiques permet de spécifier les variables didactiques qui vont générer une famille a priori infinie de situations et d'aller bien au-delà de la génération aléatoire que réalisent la plupart des logiciels éducatifs actuels

en mathématiques. La génération aléatoire est ici encadrée par une analyse rigoureuse qui permet de déterminer quelles plages de variation pour les variables permettent de générer des situations cognitivement équivalentes, sur quelles plages on peut donc jouer pour exploiter un levier cognitif supposé et quels changements il faut opérer pour produire des avancées cognitives significatives. De même l'interaction entre les approches didactiques, ergonomiques et EIAH a permis de combiner efficacement les potentialités offertes par la recherche en ingénierie didactique, la conception centrée utilisateur en EIAH et les outils d'analyse de l'activité au travail développés par l'ergonomie cognitive. Ceci se voit particulièrement bien dans la partie du projet concernant l'instrumentation de l'activité des enseignants et dans son interaction avec la conception du logiciel PépiStéréo. Nous tenons cependant à souligner que si ce travail co-disciplinaire a pu exister et se développer de façon efficace dans ce projet, sur une période de seulement deux ans, c'est nous semble-t-il parce que la plupart des équipes engagées dans sa réalisation partageaient déjà un embryon de culture commune, parce que, dans presque toutes les équipes, certains des chercheurs se situaient déjà en quelque sorte à l'interface d'au moins deux des champs scientifiques concernés : interface didactique et EIAH, interface didactique et ergonomie cognitive. Les difficultés rencontrées à intégrer l'équipe SASO qui n'avait pas une histoire comparable le montrent bien.

Mais, même si les équipes concernées étaient, pour la quasi-totalité d'entre elles, particulièrement bien placées pour développer le travail co-disciplinaire requis par ce projet, il nous semble important aussi de souligner les difficultés qu'elles ont cependant rencontrées car ces dernières ont sans doute une portée plus générale. La plus importante est, nous semble-t-il, celle liée aux implicites de nos différentes cultures scientifiques et à l'ensemble des connaissances qui, dans chaque champ, sont comme naturalisées. Ces implicites, ces connaissances naturalisées, qu'il n'est en général pas besoin de faire émerger quand la communication entre disciplines s'effectue à un simple niveau d'échanges culturels, deviennent un véritable obstacle lorsque la communication se veut opérationnelle et qu'il s'agit d'aboutir, comme c'était le cas dans ce projet, à des réalisations logicielles effectives. Les manières d'approcher les problèmes, les méthodologies que l'on privilégie ou même que l'on considère comme acceptables, la conception que l'on a de la rigueur scientifique, ce que l'on considère comme un résultat et les moyens de validation que l'on utilise, et même ce que l'on attend d'un outil au service de l'apprentissage ou de l'enseignement, tout ceci devient, à juste titre, objet de débat, d'analyse critique. Malgré les collaborations passées, nous avons rencontré à nouveau ces difficultés et elles ont ralenti le travail. Avoir réussi à les surmonter, au moins suffisamment pour parvenir à des réalisations effectives, est sans doute aussi un des résultats à mettre à l'actif de ce projet.

Venons-en maintenant aux résultats obtenus selon chacun des axes du projet et aux perspectives qui se dessinent pour des recherches futures.

Axe diagnostic

Dans cet axe, ce qui était visé, c'était d'une part le passage de profils individuels à des profils types en s'appuyant sur l'analyse des protocoles d'interaction obtenus avec le logiciel Pépite1, la construction de modèles paramétrables d'exercices permettant de transformer un outil rigide en un outil flexible paramétrable par chercheurs et enseignants, et enfin la mise au point de présentations des résultats du diagnostic adaptées à différents types d'utilisateurs.

Comme cela a été expliqué dans la partie du rapport concernant cet axe, le travail sur les profils s'est heurté à deux difficultés : la fiabilité insuffisante du diagnostic élaboré par le logiciel Pépite1 qui est apparue lorsque trois chercheurs, indépendamment, ont analysé le corpus disponible. L'analyse du problème a mis en évidence plusieurs sources : des erreurs dues à une automatisation inadéquate de certains codages didactiques, les limitations dues à des réponses partielles au test diagnostic, les limitations dues au caractère partiel de l'automatisation du diagnostic réalisée dans Pépite1. Corriger les erreurs dues à une automatisation inadéquate nécessitait du temps mais ne posait pas de problème majeur ; ce n'était pas le cas pour les deux autres limitations. L'ambition du test est de donner accès au rapport de l'élève avec l'algèbre élémentaire en prenant en compte la multiplicité des facettes de ce rapport, en permettant aussi de mettre en évidence des cohérences de fonctionnement et des leviers possibles pour une évolution cognitive dans ce domaine. Ceci suppose une diversité de tâches ; ceci

suppose des recoupements entre tâches et critères pour assurer des régularités. Il en résulte un test relativement long : une vingtaine de tâches, et des questions donnant à l'élève l'occasion d'exprimer son rapport à l'algèbre sous des formes variées, en particulier des réponses ouvertes dans un langage dit « mathurel » combinant langue symbolique et langue naturelle. Dans le cadre de ce projet, il était impossible de surmonter complètement ces limitations. Elles ont été prises en compte de deux façons. D'une part, le passage souhaité par les enseignants à des classes de profils a limité certains effets dus au caractère partiel des réponses par le regroupement en pôles et niveaux élaboré, et les codages ont été modifiés pour prendre en compte l'incertitude éventuelle provenant de réponses trop partielles. D'autre part, une partie du travail de recherche s'est orientée vers l'automatisation de l'analyse des réponses ouvertes sous forme d'expressions algébriques ou en langage mathurel. Ceci s'est effectué sur plusieurs tâches incluant des justifications et des preuves, en particulier sur une tâche importante par le nombre de caractéristiques du rapport à l'algèbre de l'élève qu'elle permet de renseigner et particulièrement problématique, vue la diversité des résolutions possibles et de leurs modes d'expression. Il s'agit de la tâche du prestidigitateur où l'algèbre sert à modéliser une situation numérique et prouver une conjecture. Le travail a été mené en partie en collaboration avec une linguiste et il a produit des résultats, publiés, encourageants en ce qui concerne la possibilité d'une automatisation de l'analyse de réponses ouvertes. Il doit maintenant être étendu à d'autres exercices du test.

Si ces difficultés ont retardé l'avancée du projet et conduit à une réorientation partielle de la recherche, elles n'ont pas empêché son développement suivant les axes prévus. Le passage des profils à des classes de profils a conduit à la notion de stéréotype et le logiciel PépiStéréo, qui implémente cette élaboration, a été réalisé. Ce logiciel a de plus été conçu, comme expliqué dans la partie correspondante du rapport, en identifiant une quinzaine de scénarios d'usage possibles, et en mettant en place une ergonomie adaptée à cette diversité d'usages supposée. On voit ici, en comparant aux projets initiaux, particulièrement bien ce qu'a apporté à cette réalisation la recherche menée suivant l'axe « instrumentation du travail de l'enseignant ». D'une part, à travers l'appui sur cette notion de scénario qui établit un pont entre un diagnostic s'appuyant sur les acquis les plus récents de la recherche didactique et les pratiques enseignants, d'autre part à travers l'attention qui a été portée aux expressions des stéréotypes proposées à l'interface et à la nécessité d'illustrer des catégories générales souvent peu familières aux enseignants par des exemples précis aidant à leur donner sens.

La partie de la recherche concernant des modèles paramétrables d'exercices a, elle aussi, progressé, encore une fois à partir de l'exemple emblématique de l'exercice du prestidigitateur. La paramétrisation, pour ce type de tâche, pose un problème particulièrement délicat car, ce qui est en jeu, ce n'est pas seulement l'organisation de la variabilité des données de la tâche considérées comme des variables didactiques de cette dernière, c'est aussi l'adaptation automatisée du diagnostic, dont on sait qu'il est déjà lui-même difficile à automatiser. On ne pouvait espérer voir ce problème complètement résolu au bout de deux ans de recherche mais des avancées substantielles ont été produites : paramétrisation locale de tâches comme mentionné ci-dessus mais aussi conception d'une nouvelle architecture pour le test de diagnostic.

Enfin, pour le troisième volet du travail sur cet axe diagnostic : la mise au point de présentation des résultats adaptées à différents types d'utilisateurs, la recherche a d'abord concerné les enseignants, aboutissant à la présentation donnée dans le logiciel PépiStéréo, en cours d'expérimentation. Pour ce qui est des élèves, la recherche en est encore à une phase exploratoire sur la base d'entretiens.

Ajoutons à cela, l'implémentation en Java de PépiTest qui le rend téléchargeable sur le site du projet et devrait favoriser son usage.

Axe apprentissage :

L'ambition du projet sur cet axe était d'une part de construire des situations d'apprentissage s'appuyant sur les spécificités des EIAH, d'autre part d'associer des situations d'apprentissage à chaque profil type. La recherche s'est effectivement développée suivant ces deux directions. En ce qui concerne l'élaboration de situations, elle a abouti à la réalisation de deux prototypes : AILE et CIME, chacun de ces prototypes renvoyant à une famille de situations paramétrable par des variables didactiques appropriées. Le prototype AILE vise à faire travailler la flexibilité entre registres de

représentations sémiotiques inhérente au travail algébrique, en jouant sur l'articulation entre écritures symboliques algébriques et langage naturel. On sait que cette articulation reste problématique pour un nombre non négligeable d'élèves à la fin de la scolarité obligatoire. La conception d'AILE s'appuie sur une étude didactique préalable qui a permis d'identifier les variables qui organisent la complexité cognitive du type de tâche proposé ici : associer expressions symboliques et phrases en langage naturel. Il faut souligner que les formulations linguistiques proposées sont des formulations mettant l'accent sur la structure des expressions et non sur leur interprétation en terme de processus, ce qui, on le sait, rend l'association plus difficile. Le prototype CIME concerne, lui, une tâche emblématique de l'algèbre : la mise en équation de problèmes. Il joue lui aussi sur l'articulation entre langue naturelle et expression symbolique mais cette articulation est mise ici au service de la fonction outil de l'algèbre qu'est la modélisation et non travaillée en tant qu'objet en soi. La conception, là encore, s'appuie sur des recherches didactiques préalables qui ont permis d'identifier les variables didactiques de cette famille de tâche et de construire des hiérarchies de complexité. Visant à la fois une aide à l'apprentissage des élèves et une instrumentation de l'activité de l'enseignant, ces deux prototypes comportent, comme cela a été précisé dans le rapport, à la fois un module élève et un module enseignant qui permet à ce dernier soit d'utiliser des séries pre-construites de tâches, soit de les adapter à ses besoins spécifiques. Ils comportent également un enregistrement de traces qui permet d'analyser a posteriori les actions de l'élève et devrait permettre à terme de proposer des guidages dans la famille de tâches, optimisés suivant certains critères.

Deux prototypes, ceci peut sembler très limité si l'on pense à ce que recouvre le champ conceptuel de l'algèbre, même limité à l'algèbre élémentaire, mais le travail qui a été mené à leur propos a, nous semble-t-il, valeur paradigmatique. Il a permis de mettre en place une articulation des modélisations didactiques et informatiques qui dépasse leur seul contexte et dont témoigne l'objet transactionnel qu'est le cahier des charges. De plus, il ne s'agit pas là de situations uniques mais de familles de situations paramétrables par diverses variables tant relatives à la tâche mathématique proposée qu'à l'interaction élève-tâche que le milieu informatique va organiser. Comme cela a été précisé dans la partie correspondante du rapport, à partir de ce qui a été réalisé, d'autres familles de tâches deviennent maintenant accessibles.

Comme cela a été précisé plus haut, ces deux réalisations bénéficient de l'intégration de perspectives relevant de la didactique des mathématiques, de l'EIAH et de l'ergonomie cognitive. Mais cette intégration n'a pas été de soi et, même lorsqu'elle a réussi à se concrétiser dans des cahiers de charge précis, tous les problèmes ne se sont pas trouvés d'autant résolus. Une difficulté importante a été posée par la représentation informatique interne et spatiale, à l'interface, des expressions algébriques. Nous sommes arrivés à surmonter cette difficulté dans le cas des deux prototypes AILE et CIME qui sont basés sur des tâches d'association mais il est clair que l'extension des familles de situations à des tâches exigeant une manipulation symbolique effective à l'interface nécessitera un éditeur d'expressions algébriques et un noyau de calcul formel.

Le deuxième volet de la recherche concernant cet axe visait l'association profils-tâches. L'avancée sur ce volet était tributaire de celle sur les classes de profils ainsi que sur les tâches, ce qui explique que le travail dans cette direction ne s'est développé que dans un second temps. C'est autour des fragilités et des leviers qui sont associés aux stéréotypes qu'a commencé à s'organiser l'articulation profils-tâches comme le montre la partie correspondante du rapport. Pour l'instant nous sommes encore assez loin d'une automatisation possible de cette articulation et il n'est pas même évident que ce soit dans cette direction de l'automatisation que la recherche doive aujourd'hui se poursuivre. Dans l'état actuel du développement des ressources informatisées pour l'enseignement de l'algèbre, si l'on veut instrumenter efficacement l'activité des enseignants à partir des connaissances apportées par le diagnostic, il est sans doute plus raisonnable de penser une articulation qui combine des tâches en environnement informatique mobilisant plusieurs types d'environnements et non les seuls développés dans le cadre du projet LINGOT, et également des tâches en environnement papier-crayon dont les recherches didactiques ont montré la pertinence. L'articulation se ferait alors sur la base de scénarios potentiels en fonction de stéréotypes, les ressources nécessaires à l'implémentation de ces scénarios par les enseignants étant regroupées sur un espace numérique de travail.

L'axe instrumentation du travail de l'enseignant

Nous avons déjà évoqué à diverses reprises l'importance qu'a eue dans la réalisation de ce projet de recherche le travail mené sur cet axe. Jusqu'alors, même si des enseignants avaient été associés au développement de Pépite, si leurs avis avaient été recueillis, leurs demandes prises en considération, il n'y avait pas eu un travail systématique visant à élucider leurs pratiques de diagnostic en algèbre et la façon dont ces pratiques étaient utilisées pour réguler les apprentissages. Il n'y avait pas eu de recherche visant à mesurer la distance entre la logique sous-jacente à ces pratiques et celle sous-jacente au diagnostic effectué par Pépite. C'est ce qu'a permis d'abord la collaboration avec les chercheurs en ergonomie cognitive. L'étude menée a mis en évidence des caractéristiques importantes des pratiques de diagnostic des enseignants : ces pratiques sont d'abord orientées vers la classe ou, tout au moins, vers des groupes d'élèves. Elles sont guidées par les actions de régulation pensées a priori possibles, dans une logique d'économie évidente. Leurs critères sont très grossiers si on les compare à ceux mis en jeu dans Pépite et surtout l'accent est mis avant tout sur les erreurs, les écarts à la norme, non sur les connaissances qui pourraient constituer des leviers de progression. Ceci tend à réduire la conscience chez les enseignants de la marge de manœuvre dont ils disposent réellement pour faire progresser leurs élèves. Cette étude a ainsi permis de mieux comprendre le décalage constaté dans les réactions des enseignants aux logiciels PépiTest d'une part, PépiDiag et PépiProfil d'autre part. Elle a aussi confirmé l'intérêt que pouvaient présenter de tels logiciels pour la formation initiale et continue des enseignants en algèbre. Enfin elle a guidé, comme nous l'avons rappelé plus haut, la conception de PépiStéréo et la façon dont les stéréotypes y sont présentés aux enseignants. Il ne s'agit pas bien sûr d'adapter le produit aux modes d'évaluation usuels de l'enseignant mais de penser comment ce produit peut complémenter ces modes d'évaluation et à terme les faire évoluer, en rendant les enseignants plus sensibles à la multidimensionnalité de la connaissance algébrique et à la diversité de ses processus d'évolution possibles.

Bilan et perspectives

Après avoir rappelé les principaux résultats de cette recherche suivant ses différents axes, souligné ce que lui a apporté sa dimension co-disciplinaire, après avoir pointé un certain nombre de difficultés auxquelles elles s'est heurtée, nous voudrions conclure par un bilan plus global et quelques perspectives.

Nous avons, à l'issue de ces deux années de collaboration, l'impression d'avoir mené un travail qui nous a obligés à questionner nos perspectives, à penser leur articulation avec d'autres, à mesurer ce que l'intégration dans un projet d'approches complémentaires pouvait apporter, à mesurer aussi la difficulté de cette intégration quand on veut qu'elle se traduise au-delà du discours par des réalisations éducatives communes. Ceci nous a très certainement enrichis mais cette dimension, qui nous semble essentielle, n'est pas la plus facile à rendre visible.

Sur le plan des réalisations pratiques, notre recherche se traduit par trois logiciels maintenant en phase d'expérimentation, par des outils pour la conception de tâches, pour l'articulation entre diagnostic et apprentissage, par des avancées évidentes dans l'analyse de réponses ouvertes, par des scénarios d'usage et de formation.

Ces avancées permettent sans aucun doute aujourd'hui de mieux envisager ce que nous attendons d'un diagnostic en algèbre élémentaire qui puisse efficacement instrumenter l'activité des enseignants et les aider à réguler les apprentissages. Elles confirment l'intérêt des principaux choix effectués, l'importance en particulier de penser le rapport à l'algèbre dans la multidimensionnalité de ses facettes et de rendre visibles à travers le diagnostic des possibilités d'évolution cognitive des élèves insoupçonnées des enseignants. Elles nous montrent dans quelles directions il est impératif de progresser par rapport à l'état atteint actuellement pour faire de l'outil de diagnostic dont nous disposons aujourd'hui un outil flexible et facilement utilisable. De ce point de vue, la clef réside sans aucun doute dans le développement d'un diagnostic adaptatif dans lequel un modèle embryonnaire de l'élève soit élaboré sur la base d'un petit nombre de tâches clefs puis testé et raffiné sur d'autres tâches et mis en liaison avec la famille de stéréotypes. Ceci permettrait d'une part d'alléger le diagnostic et donc de surmonter les problèmes de fiabilité résultant de la lourdeur actuelle du test, d'autre part de rapprocher, comme cela a été montré, les modes de diagnostic de Pépite des modes de

diagnostic des experts. Il semble nécessaire également qu'à côté de ce diagnostic global du rapport à l'algèbre des élèves, on conçoive des outils de diagnostic plus ciblés en termes de compétences, cette fois en limitant les types de tâches mais en jouant sur le paramétrage de celles-ci pour préciser le profil. Les avancées qui ont été réalisées dans le cadre de ce projet tant dans la partie diagnostic que dans la partie apprentissage rendent ces ambitions aujourd'hui accessibles. Enfin, pour aider l'enseignant, au-delà du diagnostic, à réguler les apprentissages, il faut poursuivre le travail sur l'articulation profils-tâches en tirant parti des multiples ressources qui existent déjà et de celles qui se développent pour l'apprentissage de l'algèbre, et en trouvant les moyens de mutualiser ces ressources et de les inclure dans des scénarios. C'est l'objet de la plateforme SuperPépite en cours d'étude.