

# Développement d'un paradigme d'Optimisation par *Hommilière* et application à l'Enseignement Assisté par Ordinateur sur Internet

## THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 10 Novembre 2006

pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université du Littoral Côte d'Opale  
(spécialité informatique)



par

Grégory VALIGIANI

— Directeur de thèse : Cyril FONLUPT —

— Encadrants : Pierre COLLET & Évelyne LUTTON —

### Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Patrick SIARRY	Professeur, Université de Paris 12 Val-de-Marne
	Marco TOMASSINI	Professeur, Institut d'Informatique de Lausanne
<i>Examineurs :</i>	Pierre COLLET	MCF-HDR, Université du Littoral
	Cyril FONLUPT	Professeur, Université du Littoral
	Évelyne LUTTON	CR1-HDR, INRIA Rocquencourt
	Nicolas MONMARCHÉ	MCF, Polytech'Tours
<i>Invité :</i>	Raphaël BIOJOUT	Directeur, PARASCHOOL, Paris



## Résumé

Cette thèse décrit la mise en place d'un *Intelligent Tutoring System* (ITS) dans le logiciel de soutien scolaire de la société PARASCHOOL pour aider les élèves à naviguer sur le site, parmi plusieurs milliers d'items et exercices. Le système est maintenant opérationnel et les versions successives ont été testées en ligne sur maintenant 250.000 utilisateurs accédant au site depuis Internet.

L'optimisation par *Hommilière* développée dans cette thèse découle d'un premier essai d'utilisation d'un algorithme d'Optimisation par Colonie de Fourmis (OCF) qui a montré ses limites. Contrairement aux fourmis artificielles, les utilisateurs ne sont pas contrôlables : il ne faut pas compter sur un altruisme excessif de leur part, ils ont une activité discontinue (vacances), ils nécessitent un parcours pédagogique personnalisé, ... Bref, les modifications devant être apportées à l'OCF étaient telles qu'il a fallu se rendre à l'évidence que l'utilisation collective d'élèves humains à des fins d'optimisation était un paradigme différent que nous avons appelé "Optimisation par Hommilière".

Une deuxième contribution de cette thèse est la mise en place d'un système de notation automatique permettant d'évaluer automatiquement élèves et exercices, fondé sur la notation ELO utilisée dans le monde des échecs.

Outre un puissant outil de suggestion d'exercices, le système a montré qu'il est aussi un très puissant outil de vérification du bon fonctionnement du logiciel d'*e-learning*, capable de détecter dans les exercices non seulement des erreurs syntaxiques, mais aussi sémantiques, ainsi que des erreurs pédagogiques de positionnement de l'exercice dans un niveau donné.

Pour finir, l'application à l'*e-learning* de l'Optimisation par *Hommilière* présentée dans cette thèse n'est qu'un cas particulier. Tous les sites Web fréquentés en temps réel par de nombreux utilisateurs peuvent bénéficier de cette technique pour optimiser leur contenu, leur structure, et s'assurer de leur bon fonctionnement.

**Mots-clés:** Enseignement Assisté par Ordinateur, *Intelligent Tutoring Systems*, Aide à la navigation, Détection de profil, Système de vérification, Optimisation par colonie de fourmis, Optimisation par Hommilière, Processus d'évaporation et d'érosion, Notation automatique Elo.

## Abstract

This PhD thesis describes the implementation of an Intelligent Tutoring System (ITS) within the existing e-learning software of the PARASCHOOL company, in order to help students to find their way among thousands of different items. The system is now operational, and the different versions have been tested for real on more than 250,000 users that use the site over the Internet.

The *man-hill optimization* technique described in this document stems from a first attempt to use an Ant Colony Optimisation (ACO) algorithm, which revealed unsuited for the task. To the opposite of artificial ants, human students are not controllable : it is not possible to count on innate altruism, their activity is variable (holidays), each student needs a specific treatment, . . . All in all, the modifications that needed to be applied to the ACO paradigm were so numerous that it became obvious that the collective use of human students for optimization was indeed a different paradigm that we called “man-hill optimization.”

This thesis also contains a contribution to the automatic rating of students and items (exercises) based on the Elo chess rating system.

Beyond being a powerful tool for suggesting good exercises, the system showed that it is also very powerful to make sure the e-learning software works well, as it is capable of finding exercises that contain not only syntactic, but also semantic errors. The system can also point out exercises that are not well placed in the pedagogic progression.

Finally, the e-learning application of the *man-hill optimization* paradigm is but a particular case : all web sites browsed by many users can benefit from this technique to optimize their contents, their structure and make sure that all is going well.

**Keywords:** e-learning, Intelligent Tutoring Systems, Audit system, Ant Colony Optimization, Man-hill optimization, evaporation process, erosion concept, automatic Elo notation.

## Remerciements

Ce travail a été effectué dans le Laboratoire d'Informatique du Littoral (LIL) de l'Université du Littoral Côte-d'Opale et dans l'équipe Complex de l'INRIA Rocquencourt dans le cadre d'un projet ANVAR avec financement CIFRE au sein de la société PARASCHOOL.

À l'issue de ce travail, je suis heureux d'adresser mes très sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à son aboutissement. J'aimerais qu'ils mesurent l'importance de leur contribution dans cette réalisation collective.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à mon Directeur de thèse Cyril FONLUPT, et à mes formidables encadrants Pierre COLLET et Évelyne LUTTON, sans qui cette thèse n'aurait jamais vu le jour. Qu'ils soient remerciés pour leurs précieux conseils, leur enthousiasme scientifique, leur disponibilité, leur patience, et surtout leur confiance, dispensés tout au long de ces trois années. Pour l'anecdote, ce sont eux qui m'ont donné le goût pour la recherche, et plus particulièrement le domaine de l'évolution artificielle, lors d'un cours d'"ouverture d'esprit" à l'ENSTA, mon école d'ingénieurs. À leurs côtés, j'ai appris les bases de la recherche rigoureuse. De tout cela, je leur suis extrêmement redevable.

J'exprime toute ma gratitude également envers le professeur Patrick SIARRY, directeur du LiSSi, Paris 12, et le professeur Marco TOMASSINI de l'Université de Lausanne qui ont bien voulu accepter la lourde tâche de rapporteur. Je leur suis extrêmement reconnaissant pour leurs commentaires très instructifs qui m'ont permis d'améliorer le présent manuscrit. Je suis aussi particulièrement reconnaissant envers Nicolas MONMARCHÉ, du département informatique de l'École Polytechnique de l'Université de Tours, dont la présence dans le jury témoigne de son intérêt pour le travail réalisé. Enfin je tiens à remercier XXX pour avoir présidé le jury de cette thèse avec convivialité.

Ces travaux de recherche ont pu être menés à bien grâce au soutien de la société PARASCHOOL qui a fourni sa plate-forme éducative, comme terrain de jeu pour les expériences réalisées. J'adresse mes plus sincères remerciements à M. Raphaël Biojout, directeur de PARASCHOOL pour avoir manifesté un intérêt bienveillant et permanent à ce travail, pour son encadrement sans faille et sa participation à ce jury de thèse en tant qu'invité. J'exprime aussi ma gratitude envers le personnel de PARASCHOOL qui a bien voulu m'accepter au sein de ses locaux : Yannick (pour sa rigueur exemplaire et ses conseils fort intéressants), Isabelle et Frédéric (pour leur disponibilité et leur curiosité scientifique), Benoît, Didier et Stéphane (pour leur amitié, leur patience et leurs délires) et tous ceux qui m'ont permis de m'enrichir à leur côté.

Je tiens à remercier très sincèrement Évelyne LUTTON et Jacques LÉVY VÉHEL qui m'ont accueilli chaleureusement dans leur équipe et qui ont rendu mes conditions de travail aussi agréables que possible. Ils m'ont offert une ambiance de travail privilégiée et dont je garderai un excellent souvenir. Mes remerciements vont à toutes les personnes de l'équipe COMPLEX que j'ai côtoyées : André (pour ses conseils avisés et sa gentillesse), Loïc, Emmanuel, Jean (pour sa bonne humeur et la marque de champagne de la soutenance), Jonathan (pour cette partie de squash que nous n'avons jamais pu faire), Pierre, Tristan (pour avoir apporté quelques grammes de délire lors de son stage que j'ai encadré), Yann (pour sa culture et son estomac réglé sur une horloge suisse) et tous ceux qui ont également contribué à rendre ces années fort agréables ; sans oublier Nathalie, notre super assistante qui m'a aidé dans toutes mes démarches administratives.

Je remercie également Adrien, Christian, Christophe, Céline, Emmanuel, Fabien, Guillaume, Hélène, Jérôme, Lionel, Nicolas, Pierre-Alix, Sophie pour leur amitié et leur soutien.

Merci aussi à tous ceux qui sont venus me soutenir et m'encourager le jour de la soutenance, c'était un réel plaisir de vous revoir et de vous avoir comme public.

Enfin je ne saurais oublier ma famille qui a su, par tant de sacrifices, m'encourager et me soutenir à tous les instants. Que ce travail puisse exprimer ne serait-ce qu'un moment toute la reconnaissance que je leur dois.

Et surtout merci à Sandrine pour m'avoir soutenu dans tous les moments, partageant mes joies et supportant mes doutes.

A vous tous, je ne vous remercierai jamais assez.

*Je dédie cette thèse  
à ma famille et  
à Sandrine*



# Table des matières

## Chapitre 1

### Introduction

1.1	Cadre général de la thèse . . . . .	1
1.2	<i>L’Hommilière</i> élaborée pour PARASCHOOL . . . . .	2
1.3	Contributions de la thèse . . . . .	2
1.4	Organisation de la thèse . . . . .	3

## Chapitre 2

### Introduction à l’Enseignement Assisté par Ordinateur

2.1	Notions sur l’apprentissage . . . . .	5
2.1.1	Définition de l’apprentissage . . . . .	5
2.1.2	Méthodes d’apprentissage . . . . .	6
2.2	Théories de l’apprentissage . . . . .	7
2.2.1	Présentation du Constructivisme . . . . .	7
2.2.2	Présentation du Comportementalisme ( <i>Behaviorism</i> ) . . . . .	8
2.3	Notions sur l’Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) . . . . .	9
2.3.1	Définition de l’Enseignement Assisté par Ordinateur . . . . .	9
2.3.2	Avantages et inconvénients de l’EAO . . . . .	9
2.3.3	Les théories d’apprentissage appliquées à l’EAO . . . . .	11
2.4	<i>Intelligent Tutoring Systems</i> (ITS) . . . . .	12
2.4.1	Objectif des ITS . . . . .	12
2.4.2	Fonctionnement des ITS . . . . .	13
2.5	Conclusion . . . . .	15

## Chapitre 3

### Contexte de PARASCHOOL

3.1	Présentation de la société PARASCHOOL . . . . .	17
3.2	Le logiciel de soutien scolaire . . . . .	18
3.2.1	L’offre de PARASCHOOL . . . . .	18

3.2.2	Interactivité du logiciel . . . . .	20
3.2.3	Analyse des résultats et système de remédiation . . . . .	22
3.2.4	Évaluation par bulletin . . . . .	24
3.2.5	Suivi des élèves par un tuteur . . . . .	25
3.3	Navigations possibles sur le site de soutien . . . . .	26
3.3.1	Navigation Libre . . . . .	26
3.3.2	Navigation Guidée . . . . .	27
3.4	<i>Desiderata</i> en terme de navigation . . . . .	27
3.5	Conclusion . . . . .	28

**Chapitre 4**

**Optimisation par Colonies de Fourmis appliquée à l'*e-learning***

4.1	Fourmilières et Optimisation par Colonies de Fourmis . . . . .	29
4.1.1	Contexte de l'optimisation . . . . .	29
4.1.2	Optimisation chez les insectes sociaux . . . . .	31
4.1.3	Algorithme standard d'optimisation par colonies de fourmis . . . . .	34
4.1.4	Application au problème du voyageur de commerce . . . . .	34
4.1.5	Caractéristiques d'un algorithme d'OCF . . . . .	36
4.1.6	Diverses applications . . . . .	38
4.2	Application au logiciel de PARASCHOOL . . . . .	38
4.2.1	Utilisation de Pheromones, $\varphi^+$ et $\varphi^-$ . . . . .	40
4.2.2	Ajout d'un poids professeur, $W$ . . . . .	41
4.2.3	Construction de la fonction de <i>Fitness</i> . . . . .	43
4.2.4	Application de procédures de sélection . . . . .	44
4.2.5	Affichage des suggestions trouvées . . . . .	45
4.3	Mise en place de l'algorithme sur le site de soutien . . . . .	46
4.3.1	Première phase : des petits tests . . . . .	46
4.3.2	Deuxième Phase : un cas emblématique . . . . .	47
4.3.3	Troisième Phase : Mode silencieux . . . . .	49
4.3.4	Quatrième Phase : Mise en service effective . . . . .	50
4.4	Analyse des premiers Résultats . . . . .	50
4.4.1	Analyse du taux d'évaporation . . . . .	50
4.4.2	Analyse de la fonction de <i>fitness</i> . . . . .	52
4.4.3	Outil d'aide à la création de graphe . . . . .	61
4.5	Conclusion . . . . .	63

---

**Chapitre 5****Nouveau paradigme : l'Optimisation par Hommilère**

5.1	Récapitulation des problèmes à résoudre . . . . .	65
5.1.1	Différences détectées avec l'algorithme standard d'OCF . . . . .	65
5.1.2	L'optimisation par <i>Hommilère</i> : un nouveau paradigme? . . . . .	67
5.2	Introduction au nouveau concept d'érosion . . . . .	67
5.2.1	Principe de l'érosion . . . . .	67
5.2.2	Niveau d'influence de l'érosion . . . . .	68
5.2.3	Avantages du nouveau concept . . . . .	68
5.2.4	Vérification théorique du bon comportement de l'érosion . . . . .	69
5.3	Introduction de facteurs multiplicatifs . . . . .	70
5.3.1	Principe de fonctionnement . . . . .	70
5.3.2	Utilisation de phéromones individuelles multiplicatives . . . . .	71
5.3.3	Mise en place de contraintes à satisfaire . . . . .	73
5.4	Conclusion . . . . .	76

**Chapitre 6****Évaluation automatique des étudiants et exercices**

6.1	Évaluation du niveau des élèves et des exercices . . . . .	77
6.1.1	Étude sur une notation faite par les professeurs . . . . .	77
6.1.2	Les systèmes de notation en EAO . . . . .	79
6.1.3	Le système de notation utilisé dans le monde des échecs . . . . .	79
6.2	Principe mathématique de la notation Elo . . . . .	79
6.2.1	Présentation des équations utilisées . . . . .	79
6.2.2	Avantages de la notation Elo . . . . .	81
6.2.3	Inconvénients connus . . . . .	81
6.2.4	État de l'art sur les systèmes de notations dérivés . . . . .	82
6.2.5	Choix du système de notation . . . . .	84
6.3	Mise en place dans le logiciel de PARASCHOOL . . . . .	84
6.3.1	Applications de la notation Elo sur le site de soutien . . . . .	84
6.3.2	Analyse des notes Elo obtenues . . . . .	86
6.3.3	Existence de sous-ensembles sur PARASCHOOL . . . . .	86
6.3.4	Analyse des flux de PARASCHOOL . . . . .	87
6.4	Système d'audit Elo : analyse de la difficulté . . . . .	91
6.5	Conclusion . . . . .	92

**Chapitre 7**

**Évaluation de l'application *Hommilière***

7.1	L'optimisation de chemins pédagogiques par <i>Hommilière</i> et les ITS . . . . .	94
7.1.1	Description d'une <i>Hommilière</i> du point de vue des ITS . . . . .	94
7.1.2	Comparaison avec l'existant . . . . .	94
7.1.3	Avantages de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	96
7.1.4	Inconvénients de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	96
7.2	Comparaison de l' <i>Hommilière</i> PARASCHOOL avec les systèmes de vérification . . .	97
7.2.1	Description d'une <i>Hommilière</i> du point de vue des systèmes de vérification	97
7.2.2	Comparaison avec l'existant . . . . .	97
7.2.3	Avantages de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	98
7.2.4	Inconvénients de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	98
7.3	L' <i>Hommilière</i> PARASCHOOL et les systèmes de personnalisation de parcours . . .	98
7.3.1	Description d'une <i>Hommilière</i> du point de vue des systèmes de personna- lisation de parcours . . . . .	98
7.3.2	Comparaison avec l'existant . . . . .	99
7.3.3	Avantages de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	100
7.3.4	Inconvénients de l' <i>Hommilière</i> . . . . .	101
7.4	Les <i>Hommilières</i> en dehors de l'Enseignement Assisté par Ordinateur . . . . .	101
7.5	Conclusion . . . . .	102

**Chapitre 8**

**Conclusion**

8.1	<i>Hommilière</i> comme un système de suggestions . . . . .	103
8.2	<i>Hommilière</i> comme un système de notation automatique . . . . .	104
8.3	<i>Hommilière</i> comme un système d'audit . . . . .	105
8.4	Conclusion générale . . . . .	105

**Annexes 107**

**Annexe A Technologie des Agents Pédagogiques Animés 107**

A.1	Objectif . . . . .	107
A.2	Choix de la structure des agents animés . . . . .	108
A.3	Mise en place d'un algorithme évolutionnaire interactif . . . . .	112
A.4	Conclusion . . . . .	115

---

<b>Annexe B Outil de visualisation</b>	<b>117</b>
B.1 Objectif . . . . .	117
B.2 Rangement des objets graphiques . . . . .	117
B.3 Affichage des informations sur les chemins pédagogiques . . . . .	122
B.4 Opérations de gestion de graphes pédagogiques . . . . .	122
B.5 Conclusion . . . . .	123
<b>Annexe C Les différents marchés de PARASCHOOL</b>	<b>125</b>
C.1 Positionnement sur l'accompagnement scolaire . . . . .	126
C.1.1 Marché des particuliers . . . . .	126
C.1.2 Marché des collectivités locales . . . . .	126
C.2 Formation pour adultes . . . . .	126
C.3 Réalisations pédagogiques . . . . .	127
C.4 Conclusion . . . . .	127
<b>Références bibliographiques</b>	<b>129</b>



# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Cadre général de la thèse

Le comportement grégaire et social de l'espèce humaine a conduit à l'émergence de nombreuses structures stables à différentes échelles. Le premier exemple venant à l'esprit est l'organisation des sociétés humaines : les sociétés dites primitives sont faites de tribus organisées autour d'un chef. Viennent ensuite les royaumes, les empires, les dictatures, ... À une autre échelle, il en va de même dans les entreprises qui sont organisées hiérarchiquement, de l'ouvrier au contremaître, du cadre jusqu'au Président Directeur Général, au sommet de la pyramide.

Ces structures se retrouvent à peu près dans toutes les civilisations à une époque ou à une autre, ce qui suggère qu'elles sont propres aux populations humaines, à leur mode de communication et à leur relation au pouvoir. Elles apparaissent à l'insu de l'individu, qui ne semble pas pouvoir en infléchir les caractéristiques, sauf pour ce qui est de quelques esprits supérieurs, qui réussissent à prendre du recul et décrire les mécanismes gouvernant les sociétés (*cf.* par exemple Jean-Jacques Rousseau, *Le contrat social*, 1762) permettant ainsi l'émergence de formes de sociétés plus élaborées.

En informatique, il suffit de regarder le réseau Internet et son expansion avec un peu de recul pour s'apercevoir qu'au sein de son développement, soit-disant incontrôlé et anarchique, émergent de nombreuses structures, permettant aux virus et aux pourriels de proliférer. Des réseaux pornographiques se développent, mais aussi des mondes virtuels permettant de jouer en réseau et des sites de calculs distribués (*cf.* GIMPS : *the Great Internet Mersenne Prime Search* (<http://www.mersenne.org>)).

Si des fourmis, en nombre suffisant, sont capables de faire émerger un chemin optimal entre leur nid et un point de nourriture, il émerge du comportement collectif des humains et à leur insu un certain nombre de structures optimales dépendant de leur environnement et de leur activité.

En 1983, Deneubourg *et al.* [Den83] ont mis en évidence le mécanisme des phéromones permettant aux fourmilières de trouver des chemins optimaux. Afin d'exploiter le mécanisme avec des ordinateurs, Moyson & Manderick [Moy88] ont posé les bases du premier algorithme de recherche de chemins optimaux par colonies de fourmis artificielles. Dorigo *et al.* ont ensuite repris et largement diffusé l'algorithme pour résoudre des problèmes humains (problème du voyageur de commerce, ... [Col91a, Dor92]) .

Nous cherchons à comprendre comment exploiter le comportement collectif d'un groupe d'humains évoluant dans un environnement commun (que nous appellerons *Hommilière*, par référence aux fourmilières), pour résoudre des problèmes complexes.

## 1.2 L'*Hommi*lière élaborée pour PARASCHOOL

PARASCHOOL est le leader français actuel en matière de soutien scolaire à distance, avec plus de 250 000 utilisateurs, dont 5 000 utilisateurs privés et le reste dans le cadre de contrats avec des établissements scolaires. En 2001, PARASCHOOL a voulu mettre en place un système évolutif capable de proposer des chemins pédagogiques “intelligents,” adaptés à chaque élève.

Il est rapidement apparu que la technique d’optimisation par colonie de fourmis (OCF) [DiC97, Bon99, Bon00] semblait pouvoir s’appliquer directement au problème grâce au fait que les différents items pédagogiques composant le logiciel PARASCHOOL pouvaient s’organiser sous forme d’un graphe parcouru par les 250 000 élèves inscrits chez PARASCHOOL.

Vers la fin de l’année 2002, Pierre Collet, avec Évelyne Lutton (équipe Complex, INRIA Rocquencourt) et Raphaël Biojout (directeur de PARASCHOOL S.A.) ont imaginé la structure d’un système fondé sur un algorithme à colonies de fourmis. Un court stage post-doctoral (Benoît Leblanc) a ensuite démarré dans le but d’étudier la faisabilité de la solution proposée avec Yannick Jamont, ingénieur informaticien de PARASCHOOL. Ensuite, lors de son stage de fin d’études d’ingénieur à l’Université Technologique de Compiègne, Yann Semet a implanté les premiers éléments dans le système informatique de PARASCHOOL et a fourni les premiers tests de paramétrage du système [Sem03a, Sem03b]. Cette première version de l’algorithme, et surtout les premiers tests en grandeur nature, ont montré que le paradigme d’OCF n’était pas transposable tel quel au système de PARASCHOOL, car un groupe d’humains ne présente pas les mêmes caractéristiques qu’une colonie de fourmis artificielles.

## 1.3 Contributions de la thèse

Dans un premier temps, ce travail a permis la mise au point du système imaginé par Pierre Collet. Les tests de réglages en grandeur nature ont été effectués afin d’obtenir un système stable et performant. C’est lors de ces phases que le concept d’*Hommi*lière a été formalisé. Il était sous-jacent aux premiers paramètres mis en place sur le système de PARASCHOOL, mais n’a été révélé que lors des premiers résultats pointant les différences de comportement entre les fourmis artificielles et les hommes.

Dans un deuxième temps, la notion de niveau n’était pas présente sur le site de PARASCHOOL. Un système de notation devait être mis en place afin de récupérer cette information précieuse à l’individualisation des parcours. Il s’est avéré que cette notation apportait de nouvelles fonctionnalités au système, comme, par exemple, un puissant outil d’audit sur tous les items pédagogiques.

Au final, la formalisation du concept et la comparaison avec des systèmes un peu similaires a permis de souligner les forces et les faiblesses du système mis en place sur le logiciel de PARASCHOOL. Au delà du domaine de l’*e-learning*, les bienfaits du nouveau paradigme semble adaptables à d’autres systèmes de suggestions, notamment à l’aide à la navigation sur de larges sites internet.

Ces contributions, même si elles peuvent paraître minimes au regard des différents domaines de la science, semblent intéressantes à étudier, notamment au regard de des éventuelles applications. Cette étude des phénomènes possiblement émergents de regroupements d’humains dans des milieux informatiques, permettrait de faire ressortir des données intéressantes et utiles à la personnalisation de ces milieux aux individus eux-mêmes.

## 1.4 Organisation de la thèse

Le premier chapitre de cette thèse donne un aperçu des théories d'apprentissage (*comportementalisme* et *constructivisme*) utilisées couramment dans le domaine de l'enseignement assisté par ordinateur. Ce chapitre permet ainsi de voir les notions théoriques sur lesquelles se fonde le système de soutien de PARASCHOOL. Ensuite les *Intelligent Tutoring Systems* (ITS) sont décrits comme des systèmes comportementalistes couplés à un système d'Intelligence Artificielle. Cette description sert d'introduction au nouveau paradigme décrit dans cette thèse, qui n'est donc qu'un ITS d'un nouveau genre.

Le deuxième chapitre est une description du logiciel de PARASCHOOL tel qu'il était avant la mise en service du système de suggestions par *Hommilière*. Il décrit notamment les différents types de navigation qui s'offrent à l'élève et permet ainsi de mettre en place le cahier des charges établi par l'équipe pédagogique de PARASCHOOL pour obtenir un système de navigation dynamique et adaptatif.

La première solution essayée fut un algorithme d'optimisation par colonies de fourmis (OCF). Ce type de système est introduit et décrit dans le chapitre 3. Les différentes variables sont assemblées dans une fonction de *fitness* qui permet de donner une évaluation des différentes suggestions. Les premiers tests hors-ligne et grandeur nature permettent de mettre en évidence les différences entre l'OCF classique et le comportement désiré.

Le cinquième chapitre permet de résumer ces différences et de les combiner afin de créer le nouveau paradigme : "l'optimisation par Hommilière." Les fondements de ce nouvel algorithme sont décrits, expliqués et enfin commentés afin de tirer parti de tous les avantages de cette méthode d'optimisation.

Lors de cette adaptation du système d'OCF à l'*Hommilière* de PARASCHOOL, le désir de noter les élèves s'est fait ressentir, surtout pour pouvoir proposer un chemin adapté au niveau de l'élève. La problématique de mettre automatiquement un score aux élèves a été résolue en utilisant une technique de notation testée depuis plus de 50 ans dans le monde des échecs. Le système de notation Elo a donc été greffé au système de PARASCHOOL. Les scores obtenus permettent d'avoir une évaluation du niveau de l'élève, mais aussi des exercices, et d'obtenir en prime un système de vérification des exercices présents dans le site de soutien.

Le dernier chapitre permet de donner un aperçu des avantages et des inconvénients de ce nouveau paradigme. Comme il n'existe aucun système similaire, l'optimisation par *Hommilière* sera comparé aux *Intelligent Tutoring Systems*, aux algorithmes de vérification et aussi aux systèmes de personnalisation de parcours Web.

La conclusion permet de faire un rapide résumé des points évoqués dans cette thèse et ouvre le champ à des développements futurs en matière d'optimisation par *Hommilère*, aussi bien au niveau de l'Enseignement Assisté par Ordinateur qu'au niveau, par exemple, de l'aide à la navigation dans de larges sites Web.



# Chapitre 2

## Introduction à l'Enseignement Assisté par Ordinateur

---

---

Ce chapitre donne quelques notions sur l'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO), ainsi que deux théories d'apprentissage associées, le *comportementalisme* et le *constructivisme*. Ensuite, une description est faite des *intelligent tutoring systems* (ITS), systèmes d'EAO couplés à un système d'Intelligence Artificielle (IA). Cette partie permet ainsi de présenter les bases de l'*e-learning*, afin de faciliter la compréhension du logiciel de soutien de PARASCHOOL et surtout les améliorations souhaitées par l'équipe pédagogique.

---

---

Dis-moi et j'oublie, Montre-moi et je me souviens, Implique-moi et je comprends.  
*Proverbe chinois*

### 2.1 Notions sur l'apprentissage

#### 2.1.1 Définition de l'apprentissage

L'apprentissage est l'acquisition de nouvelles connaissances théoriques ou pratiques. Un *stimulus* (événement provoqué par l'extérieur) entraîne une réaction du sujet qui :

- soit cause un changement de comportement spécifique et persistant,
- soit permet à l'individu de formuler une nouvelle construction mentale,
- soit lui permet de réviser une construction mentale vue préalablement.

L'apprentissage peut donc être résumé par le schéma linéaire classique (*cf.* fig. 2.1).



FIG. 2.1 – Schéma classique de l'apprentissage : *S* représente le *stimulus* provenant de l'environnement, *R* le comportement ou réponse de l'individu à la stimulation et *O* l'organisme ou la personne avec ses caractéristiques individuelles (personnalité, motivation, intelligence, ...).

Tout d'abord, l'apprentissage se fonde sur l'expérience acquise, mais aussi sur les changements à long terme des comportements potentiels. Ces derniers représentent, face à une situation donnée, tous les comportements possibles d'un individu, afin qu'il en atteigne le but.

Ensuite l'apprentissage individuel doit être renforcé périodiquement, par crainte de voir disparaître tout ce potentiel acquis. Parmi tous les êtres vivants, c'est l'être humain qui a poussé à l'extrême les processus d'apprentissage et de mémorisation. Les capacités de chaque individu dépendent de son hérédité et de son milieu, mais surtout ne sont pas figées dès le départ puisqu'il y a apprentissage.

Enfin l'apprentissage peut être un phénomène individuel ou collectif<sup>1</sup>. La distinction entre les deux dépend d'ailleurs de l'échelle utilisée : pour un neurobiologiste, l'apprentissage individuel chez l'homme est généralement un apprentissage collectif au niveau de sa population de neurones.

### 2.1.2 Méthodes d'apprentissage

Il existe plusieurs méthodes pour acquérir de nouvelles connaissances. Voici les principales :

**Apprentissage par association :** Un nouveau *stimulus* est associé à un mécanisme déjà appris afin de créer un nouveau savoir. Par exemple, si un individu réagit à une odeur déjà connue, la même réaction peut être assimilée à un son, en faisant systématiquement précéder l'odeur par le son.

**Apprentissage par tâtonnement :** Le sujet est mis en situation sans lui donner aucune indication, parfois même sans lui dire quelle est la condition de succès ou d'élimination. Compte tenu que l'individu ne possède pas beaucoup d'informations sur le problème, la solution doit être facile à trouver. Pour s'attaquer à des problèmes plus complexes, le sujet doit utiliser l'*apprentissage par association* pour enchaîner des situations de difficulté croissante. Mais les nombreuses répétitions rendent cet apprentissage coûteux.

Deux stratégies peuvent être distinguées :

- La recherche des facteurs de succès, en détectant les événements caractéristiques du succès.
- La suppression des causes d'échec, en détectant les événements conduisant à l'erreur. Par contre, l'individu doit être capable de supporter l'échec. Si c'est le cas, en frôlant à chaque fois la limite, le sujet peut délimiter le domaine de définition du problème et ainsi transposer l'apprentissage plus facilement à d'autres situations très légèrement différentes. Le risque est, par *association*, de faire l'apprentissage de l'échec plutôt que de la réussite ...

**Apprentissage par explication :** C'est le principe des cours magistraux. Les connaissances sont décrites oralement ou par écrit et l'élève se fonde sur cette description pour apprendre ce qu'il doit savoir.

**Apprentissage par répétition :** L'apprenant effectue ce qu'il doit apprendre, d'abord passivement, puis de plus en plus activement, jusqu'à ce qu'il puisse faire et refaire seul les opérations.

**Apprentissage combiné :** Cette méthode est très utilisée en matière d'enseignement de savoir-faire professionnel. C'est une méthode d'apprentissage des plus efficaces, car elle combine les modalités précédentes : l'individu est mis en situation, en commençant par les *scenari* les plus simples. Les bons gestes lui sont montrés et les principales actions décrites. Il se perfectionne ensuite par une répétition de moins en moins supervisée.

**Apprentissage par immersion :** C'est la meilleure méthode d'apprentissage pour une nouvelle langue. Il faut que les cours soient entièrement donnés dans la langue à apprendre. Ainsi, en parlant uniquement dans la nouvelle langue, le professeur habitue plus vite les

---

<sup>1</sup>C'est une population qui apprend.

élèves au vocabulaire, aux tournures de phrases, ... En immersion totale, l'élève se débrouille seul et apprend plus facilement la langue, les coutumes et la culture d'un pays.

## 2.2 Théories de l'apprentissage

### 2.2.1 Présentation du Constructivisme

En 1781, Kant essaya de synthétiser les points de vue rationalistes et empiriques, en percevant l'esprit comme un agent actif, qui organise et coordonne ses expériences. De ce point de vue, Piaget établit que la connaissance n'est pas simplement *acquise* par l'élève petit à petit, mais plutôt construite selon un schéma robuste et cohérent, appelé *structure de connaissance* [Pia52, Pia54]. Les étudiants ne sont pas des individus qui absorbent passivement les informations, mais des constructeurs actifs de théorie.

Papert, un mathématicien et l'un des fondateurs de l'intelligence artificielle, travailla avec Piaget à l'université de Genève de 1958 à 1963. Cette collaboration amena Papert à utiliser les mathématiques comme un outil de compréhension de l'apprentissage et du mode de pensée des élèves [Pap99].

Dans la théorie constructiviste [Bru03], l'accent est mis sur l'étudiant : les professeurs sont vus comme des entraîneurs qui aident les élèves à construire leur propre conceptualisation et leur propre solution au problème. Le travail collaboratif, en groupe, est alors un élément important du processus d'apprentissage.

L'étudiant doit avoir à sa disposition la plupart<sup>2</sup> des éléments lui permettant de résoudre le problème. À partir de là, il doit construire avec sa propre intelligence la solution au problème.

Le processus d'apprentissage passe par deux processus mentaux :

**L'assimilation :** Les élèves assimilent les nouvelles expériences grâce à des *structures* déjà existantes.

**L'accommodation :** L'élève essaye de faire correspondre sa vision mentale du monde extérieur avec les nouvelles expériences emmagasinées. C'est le mécanisme qui permet d'apprendre de ses erreurs. Lorsque l'élève agit suivant sa vision du monde et que ce dernier ne réagit pas comme attendu, cela veut dire que l'élève a échoué. En tenant compte de ses nouvelles expériences et en recadrant à chaque fois son modèle interne, l'élève apprend de la compréhension de ses échecs.

Il est important de noter que la théorie constructiviste ne suggère aucune pédagogie en particulier. En fait elle se contente de décrire comment l'apprentissage s'effectue. Quel que soit le sujet étudié, la seule suggestion est que l'apprenant doit *construire* sa connaissance.

Plusieurs approches se fondant sur le constructivisme suggèrent que le meilleur apprentissage s'accomplit de façon directe. Les étudiants apprennent par les expériences, sans qu'ils aient une idée de ce qui va se passer. Ils sont livrés à eux-mêmes, afin qu'ils conçoivent leurs propres inférences, découvertes et conclusions.

Dans cette théorie, l'apprentissage n'est pas un processus *tout ou rien*. Les élèves apprennent de nouvelles connaissances en les *assemblant* avec des connaissances déjà emmagasinées. Il est donc important que les professeurs vérifient souvent la connaissance acquise par leur élève afin de s'assurer que la perception des nouvelles connaissances acquises va bien dans la direction pédagogique souhaitée. En effet, l'élève peut tomber dans l'écueil de vouloir compléter un vide

---

<sup>2</sup>De temps en temps, l'élève doit de sa propre initiative se rendre compte des éléments manquants.

de compréhension par des pensées qui lui semblent logiques, mais qui sont en fait incorrectes. C'est ce type de pensées que le professeur doit détecter, afin de les corriger.

Le rôle du professeur ne s'arrête pas à observer et tester les progrès de l'élève. Il doit aussi amener l'élève à penser à voix haute et à se poser les bonnes questions pour promouvoir le raisonnement [DeV02]. Il doit aussi régler les conflits de compréhension qui peuvent intervenir au sein du groupe. Pour ce faire, il met en avant le conflit afin de faciliter la résolution par l'ensemble des élèves.

### 2.2.2 Présentation du Comportementalisme (*Behaviorism*)

Pavlov a étudié les réflexes dans le monde animalier et a publié en 1903 [Pav03] sa fameuse expérience où il est arrivé à conditionner un réflexe de salivation chez un chien. Ses travaux ont été poursuivis par Thronk [Thr05] qui est arrivé à la conclusion que l'apprentissage pouvait être amélioré si l'élève aboutissait à un bon résultat. Par extension, répondre faux n'apprend pas à corriger ses erreurs.

Historiquement, c'est en 1913 que John Watson fut le premier à utiliser le terme *behaviorism* (comportementalisme) dans un très court article considéré aujourd'hui comme le manifeste du comportementalisme, *Psychology as the behaviorist views it* [Wat13]. Les principaux penseurs du comportementalisme radical ont été John Watson (1878-1958), Burrhus F. Skinner (1904-1990), Clark Hull (1884-1952), Edward Tolman (1886-1959).

#### Base de la théorie comportementaliste

Dans la théorie comportementaliste, l'environnement est l'élément clé de la détermination et de l'explication des conduites humaines. Par rapport au schéma classique de l'apprentissage (cf fig. 2.1), les comportementalistes *classiques* ne s'occupent pas directement de l'organisme (O). Ils ne nient bien sûr pas la réalité que constitue l'organisme et tout ce qui s'y passe, mais ce qui les intéresse, c'est de spécifier, sans référence aux variables internes non observables et hypothétiques, les conditions et les processus par lesquels l'environnement (S) contrôle le comportement (R). Si bien que le schéma selon lequel ils travaillent met entre parenthèses l'organisme (O) qu'ils considèrent comme la *boîte noire*.

D'où le schéma linéaire classique comportementaliste :



FIG. 2.2 – Schéma linéaire classique comportementaliste : *R* est le comportement ou la réponse de l'individu à la stimulation *S* provenant de l'environnement.

#### Conditionnement opérant

Dans les années 1940 et 1950, Burrhus F. Skinner a étudié la notion de conditionnement opérant et en a défini les paradigmes opérationnels. Il en découle les notions de renforcement, de façonnement, d'apprentissage programmé et bien d'autres. La plupart des expériences qu'il a effectuées à propos de conditionnement opérant ont été faites sur des animaux, mais aussi sur sa propre fille. La boîte de Skinner (une cage munie d'un levier) est souvent utilisée comme outil.

Dans ses premières expériences, Skinner utilisait son invention pour démontrer les mécanismes du conditionnement opérant. Il a d'abord pris un rat auquel il donnait de la nourriture qu'il laissait traîner dans la cage. Lorsqu'il le mit dans la boîte de Skinner, le rat se mit à agir comme

les autres rats qui cherchent leur nourriture en courant et en reniflant. Ainsi, lorsque l'animal accrocha par inadvertance le levier, une boulette de nourriture tomba dans la cage. Ensuite, le rat continua de se comporter comme n'importe quel rat et finit par accrocher à nouveau le levier. Une nouvelle boulette tomba. Peu à peu, le rongeur commença à appuyer plus souvent sur le levier et, finalement, à le faire chaque fois qu'il avait faim. Ce système est un système de renforcement positif (la nourriture).

### Critiques du comportementalisme

Dès ses débuts, le parti pris anti-psychique, anti-constructiviste de la psychologie comportementaliste a été critiqué. Jean Piaget a démontré qu'on ne pouvait pas résumer l'intelligence à des phénomènes d'apprentissage et d'imitation sans tenir compte de la manière dont la connaissance se construit chez un individu. Le comportementalisme ne s'est pas engagé dans une réflexion sur la connaissance. D'autre part, le fait de considérer l'organisme (O) comme une *boîte noire* est vue par les psychanalystes comme un argument pour évacuer la question de l'inconscient et celle du sujet. L'adaptation est postulée comme le seul moteur de toutes les conduites humaines.

## 2.3 Notions sur l'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO)

### 2.3.1 Définition de l'Enseignement Assisté par Ordinateur

Le terme Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) est fréquemment utilisé pour faire référence à un apprentissage fondé sur un ordinateur incorporant des technologies de l'interactivité. L'EAO permet de faciliter et d'augmenter l'apprentissage en utilisant aussi bien l'ordinateur que les technologies de communication, comme Internet, les courriels, les forums de discussion, les messageries instantanées, les logiciels collaboratifs, . . .

L'EAO peut être considéré comme une forme flexible d'apprentissage où l'apprentissage en direct est possible. Les cours peuvent être supervisés pour atteindre des buts précis et l'apprentissage asynchrone est possible. Lorsque l'apprentissage se déroule principalement en ligne, il est appelé *apprentissage en ligne* ou *e-learning*. Lorsque l'apprentissage est distribué sur des éléments mobiles, tels que les téléphones portables ou PDAs, il est plutôt appelé *apprentissage mobile* ou *m-learning*.

### 2.3.2 Avantages et inconvénients de l'EAO

Certains voient l'EAO comme un apprentissage efficace et productif, grâce à la facilité d'accès aux connaissances et le fait que l'étudiant détermine lui-même sa vitesse de progression.

D'autres critiquent l'absence d'interaction directe avec un professeur, perdant ainsi toute notion pédagogique au plus haut sens philosophique. Cependant ces interactions humaines peuvent être présentes et même améliorées en passant par des systèmes de vidéo-conférences comme MACROMEDIA BREEZE.

Les avancées technologiques permettent un plus grand "champ des possibles" en matière d'expérience d'apprentissage, comme des animations pédagogiques directement disponibles en ligne. Elles ont permis en plus l'augmentation des possibilités pédagogiques collaboratives sur le web. Les activités pédagogiques asynchrones utilisent les technologies telles que les *blogs*, *wikis* et autres moyens de discussion pour permettre à chaque participant de pouvoir amener sa contribution à n'importe quel moment. Les activités synchrones ne peuvent fonctionner que

lorsque tous les participants peuvent se rejoindre, soit lors d'une discussion instantanée soit dans une classe virtuelle ...

D'un point de vue pratique, certains systèmes d'EAO se contentent d'organiser les thèmes à étudier, le tout sous forme d'un matériel multimédia comme un CD-Rom ou un site internet. L'avantage est qu'il est possible d'utiliser des liens hyper-textes et le contenu interactif pour illustrer un point de vue théorique compliqué ou un savoir-faire. La tendance est souvent de créer un environnement de gestion de l'apprentissage, MLE (*Managed Learning Environment*), qui est tout simplement un environnement virtuel d'apprentissage, VLE (*Virtual Learning Environment*), combiné avec un système de gestion de l'information, MIS (*Management Information System*). Tous les aspects sont ensuite contrôlés par une interface utilisateur soignée.

Lorsqu'une approche de type "conception" est abordée, elle implique alors la création ou la réutilisation d'objets d'apprentissage. Ce sont des petits éléments associés à des mots-clés, souvent conservés dans des fichiers XML et stockés dans une base de données. Pour créer un élément de cours, il suffit juste de construire une séquence de ces *éléments d'apprentissage*.

### Pédagogie d'apprentissage

Un point important est d'aider les professeurs à concevoir leurs objectifs pédagogiques. Quatre perspectives pédagogiques sont souvent utilisées pour élaborer un système d'apprentissage en ligne :

1. la perspective cognitive, qui permet de se focaliser sur le processus d'apprentissage pour déterminer comment le cerveau fonctionne,
2. la perspective émotionnelle, qui permet de prendre en compte les aspects tels que la motivation, l'engagement, le plaisir, ...
3. la perspective comportementaliste, qui permet de se focaliser sur les aptitudes et les résultats de l'individu, et
4. la perspective sociale, qui permet de se focaliser sur l'interaction, l'apprentissage collaboratif, le soutien et la pression des autres. D'ailleurs, des approches plus récentes se focalisent surtout sur le dialogue, l'interaction et les activités collaboratives. Les éléments de cours contiennent toujours du contenu, mais il passe au second plan. Les étudiants communiquent à travers des discussions afin d'améliorer leurs aptitudes à penser.

### Mise en application de l'EAO

La technologie HTML est souvent utilisée pour combiner les différents *media* pédagogiques sur le support Web. Les fichiers XML qui servent d'éléments d'apprentissage sont alors transformés en HTML/CSS/Javascript. Des technologies propriétaires comme MACROMEDIA FLASH peuvent être utilisées pour augmenter l'interactivité et les fonctionnalités des éléments pédagogiques.

**Remarque :** PARASCHOOL a développé un outil (*IFCreator*) pour créer des éléments de cours sous forme de fichiers XML en utilisant la technologie FLASH, et aussi une visionneuse pour transformer à la volée les fichiers XML stockés en base en films FLASH qui peuvent visionner directement sur Internet.

Pour partager et manipuler des *media* pédagogiques, des applications de type "conférence" sont plutôt utilisées.

Des standards ont été établis afin d'uniformiser les contenus pédagogiques. Leur but est de définir des spécifications pour faciliter l'échange des objets pédagogiques ou le rangement des

*meta-data*. Le plus connu de ces standards est SCORM (*Sharable Content Object Reference Model*), qui veut par cette uniformisation satisfaire à cinq exigences :

**Accessibilité** : la capacité à repérer des composants d'enseignement à partir d'un site distant, à y accéder et à les distribuer à plusieurs autres sites.

**Adaptabilité** : la capacité à personnaliser la formation en fonction des besoins des personnes et des organisations.

**Durabilité** : la capacité de résister à l'évolution de la technologie sans nécessiter une nouvelle conception, une reconfiguration ou un nouveau codage.

**Interopérabilité** : la capacité d'être utilisé dans un autre site et avec d'autres outils pédagogiques.

**Reutilisation** : la capacité d'intégrer des composants d'enseignement dans des contextes et des applications multiples.

La société PARASCHOOL ne suit pas, pour l'instant, les spécifications de SCORM, mais aimerait, d'ici les prochaines années, standardiser sa structure pédagogique, afin de profiter des avantages de SCORM.

### 2.3.3 Les théories d'apprentissage appliquées à l'EAO

#### Comportementalisme

Skinner a développé, à la suite de sa fameuse boîte, des machines d'apprentissage à partir desquelles les élèves pouvaient apprendre petit à petit, en découvrant comme *récompense* les réponses au fur et à mesure. Cette technique fut la source des *drills and practice* (une série d'exercices suivant le même principe) des années 1970/80 et ensuite des QCM (Questionnaires à Choix Multiples). L'étape suivante fut le *tutoriel* qui est apparu dans les années 70. Le principal ajout est la *remédiation*, c'est-à-dire l'information apportée à l'élève pour qu'il puisse corriger son erreur, en cas, bien sûr, de mauvaise réponse. Cette remédiation remplace l'aspect plutôt négatif du son d'un *buzzer* ou d'une image de bombe qui explose. Ce changement implique que le logiciel soit alors capable d'anticiper les réponses possibles, en offrant une remédiation adaptée à chaque erreur de l'élève.

Malheureusement, aucun pédagogue n'est capable d'anticiper toutes les mauvaises réponses possibles, ce qui signifie qu'il n'existe aucune solution permettant de résoudre ce problème crucial des tutoriels. Un autre problème est que de tels logiciels sont construits en ne tenant compte que d'une seule façon de résoudre l'exercice parmi toutes les possibilités. Cet aspect est malheureusement un peu réducteur.

Enfin, le stade le plus avancé dans le comportementalisme est les *Intelligent Tutoring Systems* [Läg00]. Cette technique combine les tutoriels avec les techniques d'intelligence artificielle pour analyser les mauvaises réponses et trouver la remédiation la plus utile à l'élève. L'intelligence artificielle doit donc être spécifiquement développée pour le domaine des tutoriels.

Ainsi, les recherches courantes sont en train de se focaliser sur la redéfinition des algorithmes d'intelligence artificielle pour les environnements d'apprentissage collaboratif, où les étudiants communiquent *via* un réseau intranet ou extranet.

#### Constructivisme

Comme cette forme d'apprentissage s'éloigne de la pratique habituelle du formateur, qui présente les connaissances à acquérir et évalue l'information que doit maîtriser l'étudiant, elle ne

semble donc pas *a priori* convenir à l'EAO. Or, certains systèmes d'apprentissage en ligne, comme MOODLE (<http://moodle.org>), ATUTOR (<http://www.atutor.ca>), ILIAS (<http://www.ilias.de>) proposent quand même un processus fondé sur une architecture constructiviste, c'est-à-dire centrée sur l'élève.

Par exemple, MOODLE est une plate-forme sous licence *open source* servant à créer des communautés d'apprenants autour de contenus et d'activités pédagogiques. Cette application permet de créer, par l'intermédiaire du réseau, des interactions entre des pédagogues, des apprenants et des ressources pédagogiques. En plus de multiples caractéristiques qui rendent le système très modulable, MOODLE propose des outils de gestion de savoirs tels que le *wiki*, les forums et les *blogs*, afin de favoriser le travail collaboratif d'une communauté centrée autour d'un projet d'apprentissage.

◊ Quelle est donc la théorie d'apprentissage la plus adaptée à l'EAO ?

La réponse à cette question est que la théorie comportementaliste semble être la plus adaptée, car la plus présente dans le monde de l'EAO. Mais il ne faut pas sous-estimer les avantages que peut apporter un système fondé sur une théorie constructiviste. L'idéal est bien sûr d'allier les deux notions, afin d'en tirer un maximum de profits pédagogiques pour l'apprenant.

## 2.4 Intelligent Tutoring Systems (ITS)

### 2.4.1 Objectif des ITS

Si chaque étudiant dans une classe avait à sa disposition un encadrant personnel, ce dernier pourrait focaliser son attention sur les besoins pédagogiques de l'élève, diagnostiquer ses problèmes de compréhension et l'aider en cas de besoin. Ainsi, l'encadrant pourrait accomplir des tâches de routine et se contenter d'alerter le professeur en cas de problème pédagogique sérieux. Comme les tâches basiques seraient résolues par l'encadrant, le professeur pourrait alors focaliser son attention sur des problèmes pédagogiques qui demandent une plus grande expertise.

Mettre à la disposition des élèves un encadrant personnel est bien sûr inimaginable d'un point de vue financier. Cependant, mettre à la disposition des élèves un assistant *virtuel* constitue une bonne idée. Depuis plus de trente ans, le concept connu sous le nom d'*Intelligent Tutoring System* (ITS) ou *Intelligent Computer-Aided Instruction* (ICAI) regroupe les domaines de l'éducation, de la psychologie et de l'intelligence artificielle. Les prototypes et les systèmes opérationnels permettent de dire que cette technologie se situe dans ses années fastes.

Le but des ITS est d'apporter les avantages d'une éducation directe de façon automatique et efficace. Un peu comme des simulateurs d'entraînement, les ITS permettent aux élèves de mettre en pratique des capacités données en effectuant des tâches ou *scenarii via* un environnement d'apprentissage interactif. En plus des simulateurs d'entraînement, les ITS répondent aux questions des utilisateurs et proposent une aide personnalisée. De plus, les ITS donnent des *scenarii* d'action à chaque étudiant à travers l'interface utilisateur et construisent, à partir des données récupérées, des modèles d'élèves regroupant leurs connaissances et leurs compétences. À partir de ces modèles d'élèves, les ITS élaborent des stratégies pédagogiques, aussi bien au niveau du contenu pédagogique que de l'affichage. Ils mettent ensuite à disposition des explications, des astuces, des exemples, des démonstrations, . . .

Les recherches dans ce domaine montrent que les élèves ayant travaillé sur des ITS apprennent généralement plus vite et mettent en pratique plus facilement leurs connaissances que les élèves ayant étudié traditionnellement en classe. À l'université de Carnegie Mellon, par exemple, des chercheurs ont développé dans les années 1980 un ITS appelé LISP TUTOR pour apprendre

à programmer à des élèves d'université. Les élèves qui utilisèrent LISP TUTOR ont réussi à faire mieux (43% de progrès) par rapport au groupe de référence ayant reçu un enseignement traditionnel. Pour des problèmes de programmation plus difficiles, le groupe de test avait besoin de 30% de temps en plus pour résoudre le problème comparativement à ceux qui avaient utilisé LISP TUTOR.

De même, au début des années 1990, un ITS nommé *Sherlock*, a été développé afin d'entraîner le personnel navigant de l'armée de l'air aux procédures de dépannage. Ceux qui avaient suivi la formation de 20 heures sur *Sherlock* se débrouillaient aussi bien que des techniciens ayant 4 ans d'expérience.

Depuis ces premières implémentations, les ITS se sont développés pour une grande variété de formations.

### 2.4.2 Fonctionnement des ITS

Beaucoup de méthodes traditionnelles de formation présentent à l'élève des faits et des concepts, qu'il doit valider ensuite par une série de questions. Ces méthodes sont efficaces car elles mettent à la disposition de l'apprenant une grande quantité d'informations et testent ensuite les informations dont il se souvient. Cependant, la connaissance apprise est souvent "inerte," car l'étudiant ne peut pas l'appliquer lorsqu'il en a besoin. Par opposition, les ITS utilisent des simulations et des environnements interactifs, afin que les étudiants puissent appliquer leurs connaissances et mettre en avant leur savoir-faire. Ces environnements permettent ainsi de mieux retenir les connaissances et aussi de les appliquer de manière plus efficace.

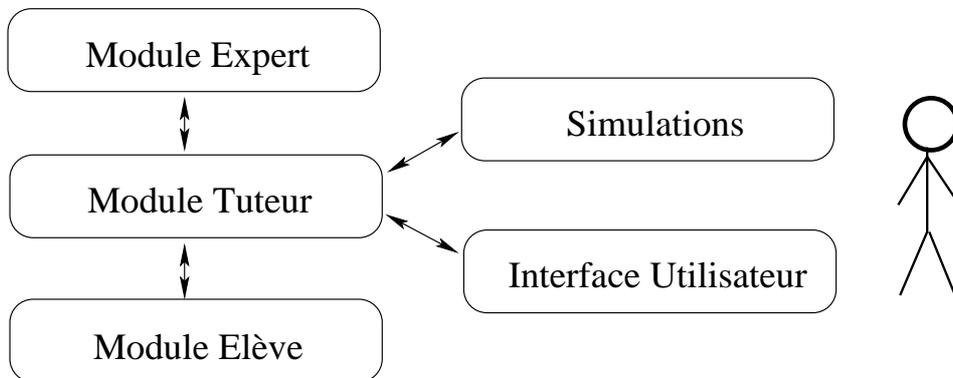


FIG. 2.3 – Les éléments de base d'un ITS.

Dans le but de fournir des informations utiles sous forme d'astuces, d'aides et de retours instructifs, les ITS se fondent sur une structure décomposée en trois types de connaissances, séparés dans le logiciel en trois modules indépendants (cf. fig.2.3) :

1. Le module *expert* représente l'expertise sur la matière enseignée. Il apporte à l'ITS la connaissance sur ce qui est enseigné.
2. Le module *élève* est constitué de ce que l'utilisateur sait et de ce qu'il doit savoir. Cette connaissance permet au système de reconnaître le type de personne qui est en train d'apprendre.
3. Le module *tuteur* permet à l'ITS de savoir comment la connaissance doit être enseignée, afin de retranscrire les différentes stratégies pédagogiques *via* l'interface utilisateur.

### Le module *expert*

Un module *expert* est une représentation informatique de la connaissance d'un expert à propos d'un sujet et d'une habileté à résoudre les problèmes d'un domaine. Dans le but d'évaluer la connaissance que possède l'utilisateur, cette information permet à l'ITS de comparer les actions de l'élève aux actions pré-établies par l'expert.

Des techniques issues de l'intelligence artificielle sont utilisées pour effectuer la résolution du problème. Par exemple, certains ITS récupèrent l'expertise du domaine sous forme de règles. Le module *tuteur* peut alors créer des problèmes à la volée, combiner les règles pour trouver une solution aux problèmes, d'évaluer la compréhension de l'élève en comparant son enchaînement de règles et celui de l'élève, et enfin montrer aux utilisateurs la démonstration de la solution trouvée par l'ordinateur. Cette approche conduit à un puissant outil de tutorat, mais le développement d'un tel système expert avec une vaste couverture du sujet traité est difficile et coûteux.

Une alternative courante est de fournir suffisamment de connaissances pour contraindre et donc simplifier les règles du système expert. Par exemple, des systèmes d'apprentissage de tâches procédurales permettent aux constructeurs d'éléments de cours de créer des squelettes qui pré-définissent la succession correcte d'actions à effectuer. Cette méthode évite ainsi le codage dans le système expert de toutes les résolutions à tous les problèmes. À la place, il demande seulement au professeur de spécifier comment l'élève doit répondre à un *scenario*. La nature du problème et la complexité des connaissances sous-jacentes permettent de dire si une telle technique est appropriée ou non.

### Le module *élève*

Le module *élève* évalue les performances de chaque étudiant afin de déterminer ses connaissances, ses perceptions et sa façon de raisonner. Sur un exemple hypothétique d'arithmétique, deux problèmes d'addition sont présentés à trois élèves :

Élève A	$\begin{array}{r} 22 \\ + 39 \\ \hline 51 \end{array}$	$\begin{array}{r} 46 \\ + 37 \\ \hline 73 \end{array}$
Élève B	$\begin{array}{r} 22 \\ + 39 \\ \hline 161 \end{array}$	$\begin{array}{r} 46 \\ + 37 \\ \hline 183 \end{array}$
Élève C	$\begin{array}{r} 22 \\ + 39 \\ \hline 62 \end{array}$	$\begin{array}{r} 46 \\ + 37 \\ \hline 85 \end{array}$

TAB. 2.1 – Exemples de résultats d'élèves.

Le tableau 2.1 montre ainsi trois modèles d'élèves ayant échoué à ces deux tests d'addition. Bien que ce soit un échec pour les trois élèves, leurs erreurs ne proviennent pas de la même cause : l'élève A oublie la retenue alors que l'élève B ajoute toujours la retenue, même quand il ne faut pas l'ajouter. Enfin le dernier a, dans un premier temps, des problèmes d'addition avec un seul chiffre.

Cet exemple permet de montrer que lorsque l'élève donne une réponse au problème, le système

peut détecter la cause de l'erreur à partir de la réponse de l'élève. Ensuite en ayant un modèle suffisamment détaillé des forces et des faiblesses de chaque utilisateur, l'ITS peut fournir un retour pédagogique spécifique très pertinent.

### **Le module *tuteur***

Le module *tuteur* met en place les méthodes en relation avec le sujet à acquérir et l'élève. Fondé sur la connaissance des forces et des faiblesses de l'individu, l'expertise du domaine et les techniques d'apprentissage, le module *tuteur* sélectionne les instructions les plus appropriées. Si, par exemple, le niveau de l'élève est assimilé à celui d'un débutant pour un sujet donné, le module *tuteur* lui montre alors une démonstration pas à pas, avant de lui demander d'effectuer des exercices par lui-même. Il lui fournit aussi des retours, des explications et essaye de le stimuler lors des mises en application. Au fur et à mesure que l'élève acquiert des connaissances, le module *tuteur* l'oriente vers des *scenarii* plus difficiles. Il se met en retrait, laisse l'élève découvrir par lui-même et n'intervient avec des conseils et des explications que sur demande.

Le module *tuteur* a pour but aussi de détecter et de choisir les thèmes et les simulations qui font le plus défaut à l'étudiant.

### **Technologies sous-jacentes**

La plupart des méthodes traditionnelles appliquées aux ITS peuvent être classifiées en trois catégories de technologies :

1. l'ordonnancement d'exercices,
2. l'analyse intelligente des solutions données par l'élève, et
3. l'aide interactive pour la résolution de problèmes.

Toutes ces technologies ont pour but de créer des exercices "intelligents." Les deux premières sont les technologies les plus anciennes et les plus étudiées dans le domaine des ITS. La plupart des ITS développés sont fondés sur au moins l'un de ces deux principes. La troisième technologie est nouvelle, mais elle est plus "intelligente," car elle apporte de l'aide à l'élève dans la phase la plus difficile du processus d'apprentissage. Son aide est donc encore plus précieuse.

Le contexte d'Internet change la donne par rapport aux techniques traditionnelles d'ITS [Bru95]. Si l'aide interactive à la résolution de problème ne semble pas être bien appropriée à la technologie Web, les deux autres technologies, en revanche, deviennent plus efficaces. Par exemple, l'analyse intelligente de solutions se fonde seulement sur un échange avec le serveur pour récupérer les informations nécessaires. Elle peut alors fournir un retour intelligent et procéder à l'affinage du modèle de l'élève. L'ordonnancement d'exercices a pris de l'importance car il permet de guider l'élève dans l'espace des informations disponibles. En plus de ces technologies traditionnelles d'ITS, d'autres technologies moins utilisées sont devenues importantes. Deux exemples sont les hypermedia adaptatifs [Bea95, Bru98] et la résolution de problèmes à partir d'exemples [Web95].

## **2.5 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'introduire la notion d'apprentissage et plus particulièrement les deux théories les plus utilisées dans le monde de l'enseignement assisté par ordinateur : le constructivisme et le comportementalisme. Bien que le constructivisme semble plus prometteur pour l'EAO, le comportementalisme semble s'adapter plus facilement à ce domaine en pleine expansion.

C'est pour cette raison que le logiciel de PARASCHOOL a été fondé sur la théorie du comportementalisme, couplé avec un système de remédiation. Le troisième chapitre décrit en détail les différentes parties du logiciel de PARASCHOOL afin de mieux cerner les changements voulus par l'équipe pédagogique. L'idée est d'insérer un module d'intelligence artificielle au système afin de proposer des chemins *intelligents* à l'élève. Le système s'aventure alors dans le domaine des ITS, prolongement logique des systèmes fondés sur le comportementalisme.

Le système décrit dans cette thèse n'a pas un schéma aussi structuré qu'un ITS conventionnel, mais il possède bien les trois modules nécessaires à la prise de décision. En fait le système n'aide pas l'élève dans la phase d'apprentissage, mais se contente d'*ordonnancer les exercices*, afin de proposer le chemin le plus adapté à chaque élève.

Ce chapitre a permis aussi de montrer que, dans le contexte d'Internet, les ITS prenaient leur essor. Ces derniers peuvent être localisés sur des serveurs HTTP, permettant ainsi à chaque apprenant de pouvoir accéder, depuis chez lui ou depuis sa classe, au contenu pédagogique ainsi qu'aux technologies ITS associées. L'analyse intelligente de solutions et la résolution de problèmes à base d'exemples permettent d'aider l'élève dans la phase d'apprentissage. Les technologies d'*hypermedia* adaptatives et d'ordonnancement d'exercices, quant à elles, permettent aux utilisateurs de naviguer à travers tout le contenu pédagogique.

## Chapitre 3

# Le contexte de PARASCHOOL

---

---

L'objectif de ce chapitre est de donner un aperçu assez rapide du logiciel de PARASCHOOL, afin de mieux cerner les différentes fonctionnalités présentes sur le site. Après la description de la société et de son logiciel, l'analyse des deux types de navigation — libre et guidée — va être faite, afin de déterminer les *desiderata* de la société en terme d'intelligence de parcours. Ce chapitre introduit ainsi le travail de cette thèse et permet aussi de soulever des questions concernant les futurs points de recherche de la société.

---

---

Toute technologie avancée est magique.

*Arthur Charles Clark*

### 3.1 Présentation de la société PARASCHOOL

PARASCHOOL est une société française qui s'est imposée en cinq ans comme le leader de l'accompagnement scolaire et pédagogique sur Internet (*cf.* la description, dans l'annexe C, des différents marchés sur lesquels se positionne la société). Son objectif est de proposer un parcours sur mesure, en fonction du rythme et des connaissances de l'élève. Depuis sa création, PARASCHOOL a fait évoluer son service et ses contenus en étroite liaison avec l'évolution d'Internet :

- personnalisation,
- travail en réseau et
- analyse des comportements des utilisateurs.

Ayant fait le pari de l'interactivité et de la qualité des contenus, PARASCHOOL a su attirer plus de 5 000 utilisateurs particuliers sur son site.

En vue de son expansion, la société a su modifier très légèrement l'usage de sa plate-forme en la proposant comme un système d'aide aux professeurs. En effet, ces derniers peuvent utiliser le logiciel au cours de travaux pratiques en salles informatiques, permettant aux élèves d'appliquer les notions de cours directement sur les exercices interactifs de la plate-forme. De cette manière, PARASCHOOL s'est créé un réseau de partenaires, parmi les collectivités locales, dont il est devenu le principal fournisseur de solutions éducatives en ligne.

## 3.2 Le logiciel de soutien scolaire

En s'abonnant, l'élève se voit attribuer un compte protégé par un mot de passe, qui lui permet d'accéder à tous les outils proposés par PARASCHOOL :

**Offre très large :** L'élève a accès à l'ensemble des matières proposées et peut donc consulter plus d'un millier de cours, méthodes et exercices. Les fiches de cours imprimables reprennent l'ensemble des connaissances. Chaque séquence de cours est accompagnée d'un test de validation.

**Analyse et remédiation :** Un diagnostic personnalisé des erreurs permet une analyse des points forts et des points faibles de l'élève. À l'issue de chaque exercice, la remédiation opère en cas d'échec de l'utilisateur et ce dernier se voit alors proposer les éléments pédagogiques qui lui font défaut.

**Bulletin :** Un tableau de bord détaillé avec un bulletin permet à l'élève de visualiser le bilan des éléments qu'il a validés ou non.

**Interactivité :** De nombreuses animations FLASH illustrent les notions et facilitent la compréhension. Par ce choix très varié d'animations interactives, PARASCHOOL permet à l'élève d'apprendre de manière plus ludique.

**Suivi des élèves :** Une permanence d'enseignants a été mise en place pour répondre aux questions des élèves. Si l'élève désire un suivi plus personnalisé, il peut bénéficier d'un tuteur personnel en ligne, pour répondre plus rapidement à ses questions et l'aider à corriger ses exercices.

**Espace Parent :** Les parents ont à leur disposition un espace personnel pour suivre les travaux et les progrès de leurs enfants.

### 3.2.1 L'offre de PARASCHOOL

Le site de soutien scolaire de PARASCHOOL propose des compléments pédagogiques, des fiches de cours et des exercices sur un ensemble de matières disponible à partir de la première page de connexion (cf. fig. 3.1).

Passé le choix de la matière à travailler, l'élève se voit alors proposer une liste de *thèmes* correspondant à son niveau. La figure 3.2 donne, par exemple, l'ensemble des chapitres de mathématiques 6<sup>ème</sup>. Grâce aux barres de progression, l'élève peut avoir une vision d'ensemble de l'état d'avancement de ses révisions pour la matière donnée.

Après avoir sélectionné son thème, l'élève choisit ensuite parmi trois types de travaux, contenant des entités pédagogiques appelées *items* (cf. fig. 3.3). Chaque type est symbolisé par un pictogramme :

- **points de cours :** Les items constituent des rappels de cours et sont validés par des tests d'application directe du cours.
- △ **savoir-faire :** Les items représentent les méthodes utiles à connaître pour une bonne utilisation des notions de cours. C'est la vision pratique du cours. Ces items constituent une passerelle entre les items de cours et les exercices.
- **exercices interactifs :** Les items comprennent plusieurs étapes et sont corrigés au fur et à mesure que l'élève avance. PARASCHOOL propose un choix très varié d'animations interactives qui permettent à l'élève de valider ses connaissances de manière ludique :
  - réponses à trous,
  - séquences à production,

PARASCHOOL Solutions éducatives

mardi, 11 juillet 2006 16:14

Bonjour Raphaël,  
Voici la liste des cours pour travailler :

- Elixir** (liste des contenus)
- Webphilo** (liste des contenus)
- AFPA** (liste des contenus)
- Entraînement à la LECTURE** (liste des contenus)
- Ressources** (liste des contenus)

**Animations 6ème** (liste des contenus)

- Bases du français (FLE)** (liste des contenus)
- Français 6ème** (liste des contenus)
  - ▶ Il y a 4 éléments dans le plan de travail.
- Français 4ème** (liste des contenus)
  - ▶ Il y a 1 élément dans le plan de travail.
- Français 3ème** (liste des contenus)
  - ▶ Il y a 1 élément dans le plan de travail.

**Histoire 6ème** (liste des contenus)

- Mathématiques 6ème** (liste des contenus) (dernière matière travaillée)
  - ▶ Il y a 6 éléments dans le plan de travail.
- Mathématiques 4ème** (liste des contenus)
  - ▶ Il y a 16 éléments dans le plan de travail.
- Mathématiques 3ème** (liste des contenus)
  - ▶ Il y a 26 éléments dans le plan de travail.

© Technologie Paraschool

FIG. 3.1 – Ensemble des matières accessibles par l'élève.

PARASCHOOL Solutions éducatives

Mathématiques 6ème

Bonjour Raphaël,  
Choisis le chapitre que tu souhaites travailler :

Progression :

Rechercher :  OK

- Travaux numériques**
  - Nombres décimaux (écriture, comparaison)
  - Addition - Soustraction - Ordres de grandeur
  - Multiplication
  - Division
  - Quotients - Ecriture fractionnaire
- Organisation et gestion de données, fonctions**
  - Proportionnalité - Pourcentages
- Travaux géométriques**
  - Cercles
  - Droites et segments
  - Droites sécantes, parallèles, perpendiculaires
  - Triangles
  - Quadrilatères (rectangle, cerf-volant, losange, carré)
  - Symétrie axiale (orthogonale)
  - Symétrie axiale et figures usuelles
  - Angles
  - Périmètres
  - Aires
  - Pavés droits (parallépipèdes rectangles)

© Technologie Paraschool

16:21:12

Raphaël biojout,  
Abonnement  
jusqu'au 30/12/2006

FIG. 3.2 – Ensemble des thèmes présents dans le cursus Mathématiques 6<sup>ème</sup>.

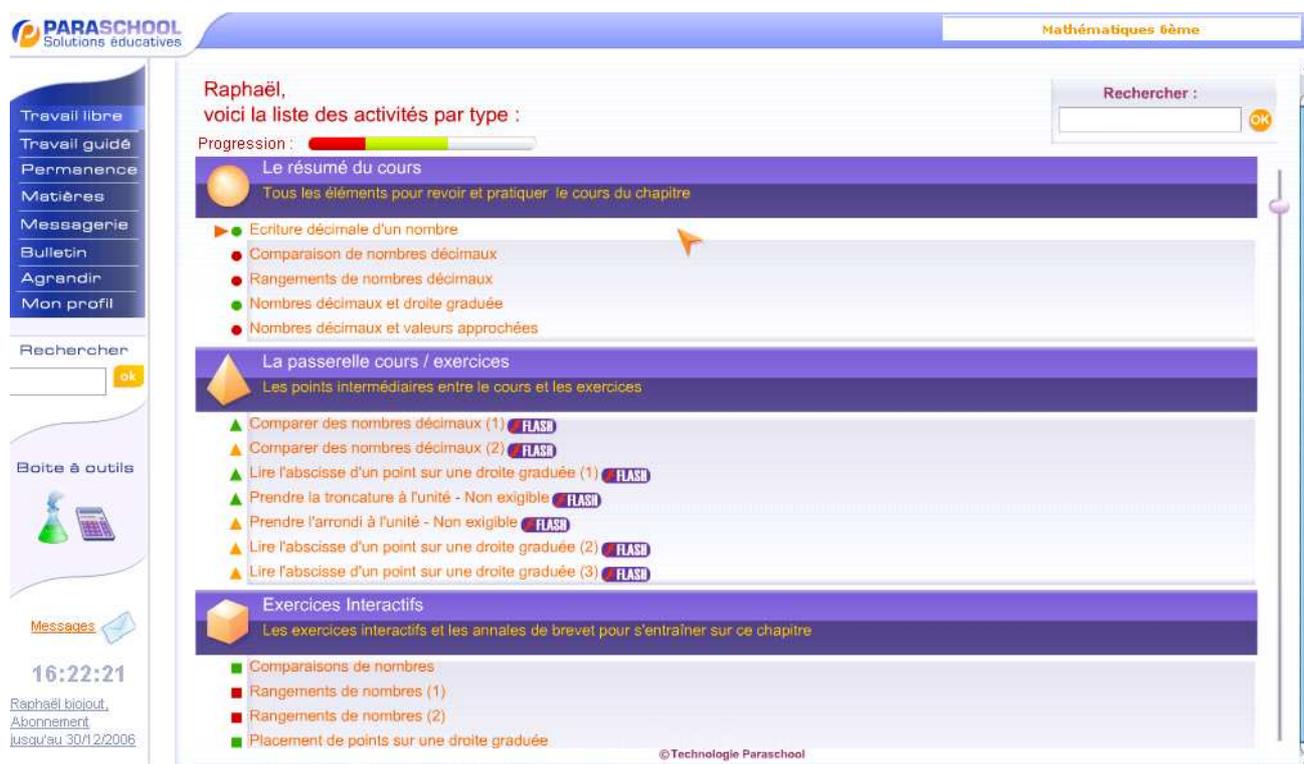


FIG. 3.3 – Ensemble des items pour le thème 377 : *Nombres décimaux (écriture, comparaison)*.

- QCM commentés,
- exercices de type glissé-déposé,
- tableaux des possibles,
- exercices à données aléatoires,
- ...

L'élève choisit donc un type de travail (par exemple *le cours*) puis un item de cours (par exemple *L'écriture décimale d'un nombre*). La figure 3.4 donne un aperçu de la leçon expliquant aussi bien la structure d'une écriture décimale que les termes associés.

Chaque item se termine sous la forme d'une validation interactive (cf. figure 3.5), la plupart du temps sous forme de questionnaire à choix multiples (QCM).

Le logiciel de PARASCHOOL se fonde sur le comportementalisme (cf. section 2.2.2) : le résultat de l'exercice traité est tout de suite affiché (cf. figure 3.5). En cas d'erreur, la remédiation opère, en affichant les points de connaissance mal assimilés. Cette philosophie d'apprentissage a été préférée, car elle est mieux adaptée à l'enseignement assisté par ordinateur, par opposition au constructivisme (cf. section 2.2.1).

### 3.2.2 Interactivité du logiciel

La société PARASCHOOL a fondé son savoir-faire sur une grande interactivité au sein de ses activités pédagogiques. Elle a utilisé la technologie propriétaire MACROMEDIA FLASH afin d'obtenir des animations très interactives. Cette interactivité permet de faire davantage contribuer l'élève, qui a l'impression de participer à des expériences en direct. L'aspect théorique est ainsi

PARASCHOOL Solutions éducatives Mathématiques 6ème

CHOIX DU CHAPITRE >> NOMBRES DÉCIMAUX (ÉCRITURE, COMPARAISON); CHOIX D'ACTIVITÉ >> LE RÉSUMÉ DU COURS

OUTILS   

**Travail libre**  
Travail guidé  
Permanence  
Matières  
Messagerie  
Bulletin  
Agrandir  
Mon profil

Rechercher

Boîte à outils  

Messages 

16:25:11  
Raphaël biojout,  
Abonnement  
jusqu'au 30/12/2006

**Écriture décimale d'un nombre**

millions	Centaines de milliers	dizaines de milliers	milliers	centaines	dizaines	unités	dixièmes	centièmes	millièmes
	9	6	8	0	0	7	6	3	5

$96\,800 = 96\,000 + 800 = (9 \times 10\,000) + (6 \times 1\,000) + (8 \times 100) + (0 \times 10) + (0 \times 1)$

$76,35 = 76 + 0,35 = (7 \times 10) + (6 \times 1) + (3 \times 0,1) + (5 \times 0,01)$

partie entière      partie décimale

**Les nombres s'écrivent avec des chiffres comme les mots s'écrivent avec des lettres.**  
(Ne confonds pas « chiffre » et « nombre »).

**Exemples**

- ♦ 96 800 se lit "Quatre-vingt seize mille huit cents".
- ♦ 76,35 se lit "Soixante-seize unités et trente-cinq centièmes" (ou "soixante-seize virgule trente-cinq").

**Remarques**

- ♦ "Vingt" et "Cent" prennent un "s" quand ils sont multipliés et non suivis d'un autre nombre. Par exemple, on écrit "Quatre cents", "Quatre cent quarante".

FIG. 3.4 – Cours sur l'écriture décimale d'un nombre.

PARASCHOOL Solutions éducatives Mathématiques 6ème

CHOIX DU CHAPITRE >> NOMBRES DÉCIMAUX (ÉCRITURE, COMPARAISON); CHOIX D'ACTIVITÉ >> LE RÉSUMÉ DU COURS

OUTILS   

**Écriture décimale d'un nombre**

**Q1:** CHIFFRE et NOMBRE sont deux mots qui veulent dire la même chose.  
Vrai ou faux ?

Faux  
 Je ne sais pas.  
 Vrai

**X Farmer**

Tu as raison, c'est faux ! Par exemple, 245 est un NOMBRE formé avec les CHIFFRES 2, 4 et 5.

**X Farmer**

Java Applet Window

Rechercher

Boîte à outils  

Messages 

16:25:48  
Raphaël biojout,  
Abonnement  
jusqu'au 30/12/2006

FIG. 3.5 – Exemple de question sur l'item *Écriture décimale d'un nombre*.

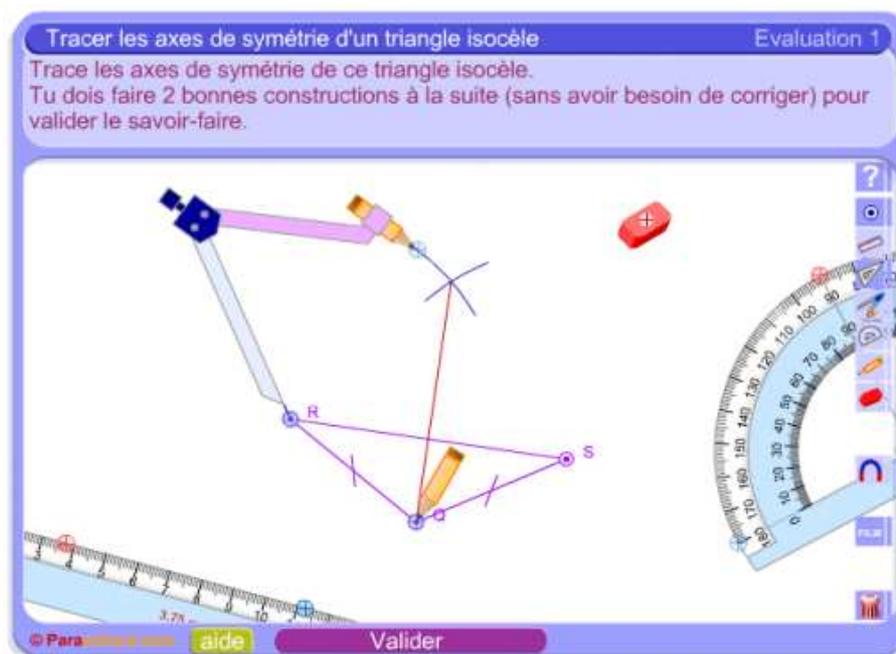


FIG. 3.6 – Exemple d’interactivité FLASH.

atténuer au profit de l’aspect pratique et ludique de l’apprentissage. Par exemple, dans la figure 3.6, l’élève doit construire l’axe de symétrie du triangle, en utilisant les outils classiques de géométrie, qui se manipulent comme leur équivalent réel.

Cette interactivité peut susciter de l’attrait de la part des étudiants. Comme de tels items sont repérés par un petit pictogramme FLASH (cf fig. 3.3), les élèves peuvent donc facilement orienter leurs choix pédagogiques vers ces éléments certes éducatifs mais surtout ludiques. La question est alors :

- ◊ Est-ce que le pictogramme FLASH influence les choix des élèves ?

Sur le site de PARASCHOOL, à peu près 30% des items sont des animations de type FLASH (1 857 items de type FLASH pour 6 787 items au total). Le plus souvent, ces animations sont du type *savoir-faire*. Au vu des statistiques, il y a, en moyenne, à peu près 189 passages sur des items de type FLASH et 249 passages sur les items classiques. Au final, les élèves ne préfèrent pas forcément les animations interactives. Les navigations ne semblent donc pas être biaisées par le pictogramme FLASH.

### 3.2.3 Analyse des résultats et système de remédiation

Le résultat est analysé et commenté (cf. fig 3.7). En cas de réussite, l’élève a la possibilité de revenir sur les différents menus pour choisir le prochain item qu’il va effectuer, sans contrainte de thème, de cursus ou de matière. En cas d’échec, la remédiation (cf. section 2.3.3) opère ...

Il faut savoir que chaque test d’*item* est conçu comme un assemblage de questions de type QCM, enchaînement, exercice à trous, exercice interactif, ... Chaque question a pour but de valider un élément de connaissance. Ainsi, un échec signifie que l’élève n’a pas bien assimilé l’élément concerné.

Un système de *remédiation* a donc été mis en place au sein du logiciel PARASCHOOL. À

**PARASCHOOL** Solutions éducatives Mathématiques 6ème

CHOIX DU CHAPITRE >> NOMBRES DÉCIMAUX (ÉCRITURE, COMPARAISON); CHOIX D'ACTIVITE >> LE RÉSUMÉ DU COURS

Raphaël, avec **16 %** de réponses justes, tu n'as pas validé le quiz d'apprentissage du cours **Ecriture décimale d'un nombre**.

C'est la 10<sup>ème</sup> fois que tu révisais **Ecriture décimale d'un nombre**.

Aie ! Réponds-tu vraiment aux questions ?

Tu as progressé depuis la dernière fois que tu as fait ce QCM (tu avais eu 0 % de réponses justes).

Tu es libre de revenir ou de passer aux [Le résumé du cours](#), [Lexique](#).

Raphaël, d'après mon analyse, je te propose de poursuivre avec :

- Comparer des nombres décimaux (2) FLASH ████████
- Comparer des nombres décimaux (1) FLASH ████████
- Nombres décimaux et droite graduée ████████
- Rangements de nombres (1) ████████

Messages 16:37:05

Raphaël bioiot,  
Abonnement  
jusqu'au 30/12/2006

© Technologie Paraschool

FIG. 3.7 – Analyse à la fin d'un test.

**PARASCHOOL** Solutions éducatives Mathématiques 6ème

CHOIX DU CHAPITRE >> NOMBRES DÉCIMAUX (ÉCRITURE, COMPARAISON); CHOIX D'ACTIVITE >> EXERCICES INTERACTIFS

Raphaël, tu n'as pas validé l'exercice **Troncatures, arrondis (1)** du chapitre **Nombres décimaux (écriture, comparaison)**.

Avec une seule partie d'exercice, ce n'était pas trop long, n'est-ce pas ?

Si nous t'avions noté, tu aurais eu 4/20.

Aie, un pépin ? Si tu as fait l'exercice honnêtement, n'hésite pas à le refaire ultérieurement.

A partir de l'analyse des erreurs que tu as commises, nous te conseillons de revoir les points suivants :

- [Prendre la troncature à l'unité - Non exigible](#)
- [Prendre l'arrondi à l'unité - Non exigible](#)

Remédiation

Tu es libre de revenir ou de passer aux [Le résumé du cours](#), [Lexique](#), [La passerelle cours / exercices](#), [Exercices Interactifs](#).

FIG. 3.8 – Remédiation.

chaque création de question, le professeur-concepteur a la possibilité de *relier* la question à un item de cours, correspondant à l'élément de connaissance que doit posséder l'élève. Ainsi, après analyse des réponses fausses, le système peut détecter les points de connaissance défectueux et les afficher à l'élève afin qu'il aille combler ses lacunes.

Sur la capture d'écran 3.8, la partie remédiation a été entourée. Elle apparaît juste après l'analyse du résultat de l'élève sur l'item en cours.

**Remarque :** Si l'élève valide l'exercice (c'est-à-dire s'il obtient plus de 60% de réussite), la remédiation ne s'affiche pas. Il faut savoir que la remédiation n'est pas systématique (cf. fig 3.7).

### 3.2.4 Évaluation par bulletin



FIG. 3.9 – Bulletin.

Sur le logiciel de PARASCHOOL, les élèves ont la possibilité de visualiser leur progrès au sein du site de soutien. La figure 3.9 donne un aperçu du *bulletin* de l'élève, c'est-à-dire le récapitulatif de tous les items effectués. L'élève peut ainsi juger de son état d'avancement dans tous les thèmes qu'il a commencé à étudier. Il visualise aussi ses *derniers* résultats sur les différents items.

**Remarque :** Aucune contrainte n'a été imposée sur le fait de refaire plusieurs fois un même *item*. D'ailleurs à peu près 30% des items ont été refaits au moins une fois (308 873 items ont été effectués au moins 2 fois sur 1 035 794 items effectués au total). Ces élèves refont les exercices jusqu'à ce qu'ils soient validés. Ce comportement autorisé par le système fait entièrement partie du processus d'apprentissage. Pour le bulletin, le système ne conserve comme résultat<sup>3</sup> que le dernier résultat obtenu. Ainsi si un élève échoue sur un item qu'il

<sup>3</sup>Le résultat de tous les élèves sur tous les items est conservé en base.

avait déjà validé auparavant, il doit le valider de nouveau pour qu'il soit considéré comme *validé*.

Il est intéressant de noter que dans le bulletin, aucune note n'est affichée, ainsi qu'aucun graphe d'évolution. Le bulletin est un simple récapitulatif des items effectués par l'élève. En fait c'est un choix *politique* de la part de l'équipe pédagogique. L'enfant ne doit pas être jugé, donc il ne doit pas être noté. En principe, les élèves qui viennent utiliser la plate-forme de soutien sont plutôt en difficulté par rapport au système éducatif. L'équipe pédagogique ne veut donc pas briser la motivation de l'élève avec des notes en dessous de la moyenne. Cette politique a des influences sur le système de notation automatique mis en place par la suite.

### 3.2.5 Suivi des élèves par un tuteur

L'élève-utilisateur, comme dans tout système d'EAO, se retrouve seul face à son ordinateur. Pour ne pas perdre des élèves motivés et essayer de conserver le lien élève-professeur, une permanence de professeurs a été mise en place, afin de répondre aux questions des élèves à propos du site de soutien et des différents tests. Ce retour des élèves permet en plus de détecter d'éventuelles erreurs sur les items.

The screenshot shows the PARASCHOOL interface for 'Mathématiques 6ème'. The sidebar on the left contains navigation links: Travail libre, Travail guidé, Permanence, Matières, Messagerie, Bulletin, Agrandir, and Mon profil. The main content area displays a list of items to be completed, with a calendar view showing the progress from 10/07/2006 to 17/07/2006. The items listed are:

- Français 6ème ► Il y a 4 éléments dans le plan de travail.
- Français 4ème ► Il y a 1 élément dans le plan de travail.
- Français 3ème ► Il y a 1 élément dans le plan de travail.
- Mathématiques 6ème ► Il y a 6 éléments dans le plan de travail.**
- Mathématiques 4ème ► Il y a 16 éléments dans le plan de travail.
- Mathématiques 3ème ► Il y a 26 éléments dans le plan de travail.

The calendar view shows the following items:

- Triangles** (red header)
  - (jusqu'au 11/01/2007) Triangles particuliers
  - (jusqu'au 11/01/2007) Reconnaissance de triangles particuliers (1)
  - (jusqu'au 11/01/2007) Construction de triangles
  - (jusqu'au 11/01/2007) Construire un triangle équilatéral
- Equations** (red header)
  - (jusqu'au 11/01/2007) Résoudre une équation du type :  $12,8 + ? = 53,1$
  - fait 1 fois (jusqu'au 11/01/2007) Equation avec addition

FIG. 3.10 – Plan de travail.

Si l'élève ne se sent pas assez soutenu, il a la possibilité de choisir une option *tutorat* qui lui permet de se faire suivre par un professeur. Ce dernier suit l'évolution de l'élève, détecte ses manques et lui fixe un *plan de travail*. Ce plan de travail (cf. fig. 3.10) est tout simplement un programme d'items que l'élève doit suivre. C'est le tuteur qui décide d'ajouter certains items au programme de l'élève et c'est à ce dernier de valider ces items pour les enlever du plan de travail.

**Remarque :** Pour l’instant, le tuteur se contente d’ajouter des items dans le plan de travail sans fixer d’échéances. Les élèves ont donc un temps infini pour valider leur exercices. En fixant une date de fin, les élèves auraient l’obligation de valider les items avant la date butoir, sauf qu’aucun système de pénalité ou de motivation n’a été développé. À partir de là, rien, à part le tuteur, ne pousse les utilisateurs à valider les exercices.

### 3.3 Navigations possibles sur le site de soutien

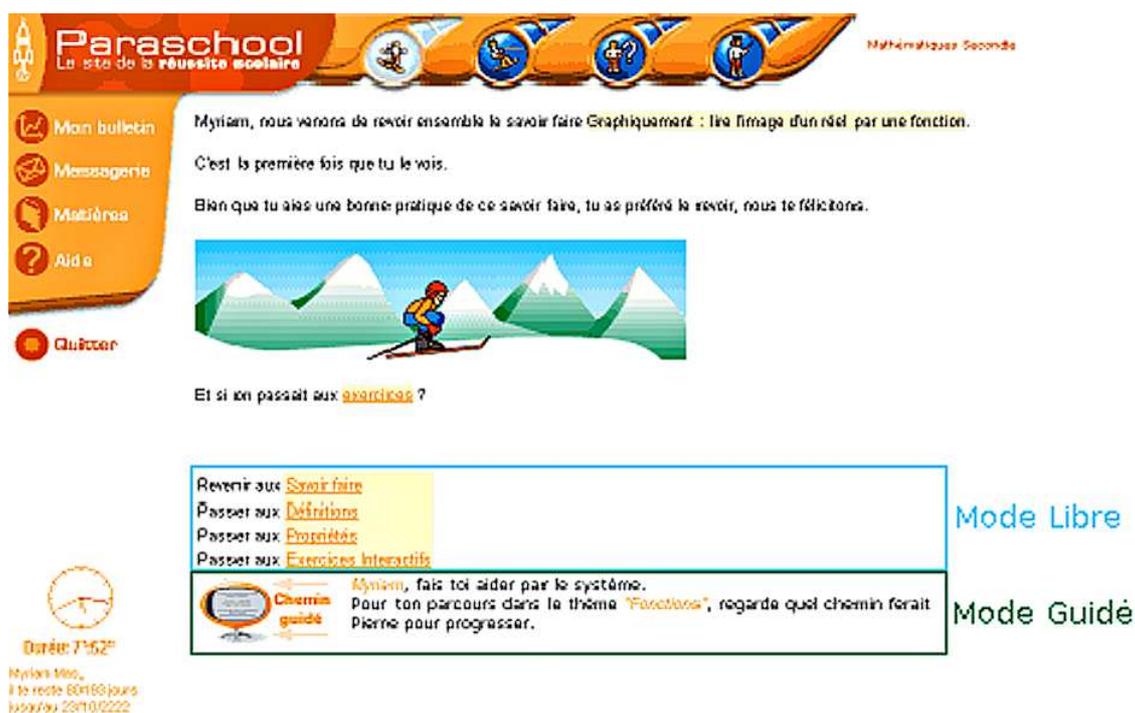


FIG. 3.11 – Ancienne interface : analyse à la fin d’un item.

La capture d’écran 3.11 permet de donner un aperçu de l’ancienne<sup>4</sup> interface et surtout des deux types de navigations accessibles à l’élève :

1. Navigation Libre : C’est l’élève qui est maître de ses choix pédagogiques.
2. Navigation Guidée : L’élève suit les conseils des professeurs.

#### 3.3.1 Navigation Libre

C’est le mode de navigation classique sur un site Internet. Aucune contrainte n’est fixée sur le parcours des élèves. Ce sont ces derniers qui décident de l’enchaînement des items à valider. Toutes les étapes de ce type de navigation ont déjà été décrites dans la section 3.2.1.

Comme l’élève est livré à lui-même et qu’il manque d’expertise au niveau pédagogique, PARASCHOOL a décidé de mettre en place un deuxième type de navigation — la navigation guidée — pour diriger les élèves vers les bons objectifs pédagogiques.

<sup>4</sup>Avant le début de cette thèse.

### 3.3.2 Navigation Guidée



FIG. 3.12 – Ancienne interface : Mode guidé.

C'était, en fait, une fonctionnalité nouvelle au début de l'année 2003, qui a laissé maintenant la place au système de suggestions par "Hommilière", décrite au chapitre 5. Elle se présentait sous la forme d'une petite télévision qui offrait à l'élève une sélection ordonnée d'items, prédéfinie par l'équipe pédagogique (cf. fig. 3.12). Elle permettait ainsi de guider interactivement les élèves le long d'un chemin (une suite d'items) déterministe.

Afin d'améliorer le caractère statique de ce système de suggestions, l'équipe pédagogique a décidé de mettre en place un programme de recherche, afin d'obtenir un système de suggestions intelligent.

## 3.4 Desiderata en terme de navigation

PARASCHOOL cherchait donc une technique pour rendre son site plus attrayant et plus efficace du point de vue pédagogique. Un module d'"intelligence artificielle" devait être mis en place, afin que la navigation sur le site devienne dynamique. L'objectif est double :

- Tout d'abord, il faut que le système sache présenter un contenu adapté à chacun en fonction de ses particularités et de ce que l'expérience collective a montré.
- Ensuite, le système doit constituer un outil de vérification du contenu pédagogique pour permettre aux professeurs de mieux comprendre les résultats des élèves. Par voie de conséquence, il doit mettre à l'épreuve le chemin pédagogique proposé par les professeurs et faire émerger de nouveaux chemins auxquels ils n'auraient pas pensé. Le système doit se contenter de mettre en lumière des informations que l'équipe pédagogique peut décider ou non d'utiliser.

### 3.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de donner un aperçu du fonctionnement du logiciel de soutien de PARASCHOOL. Avec l'interactivité et les différents types d'exercices, PARASCHOOL s'est doté d'un logiciel pédagogique efficace.

Pour combler l'absence de professeur au côté de l'élève, une permanence a été mise en place pour répondre aux questions des étudiants. En outre, un système de tutorat permet à l'élève d'obtenir une assistance plus personnalisée. Mais le plus gros défaut du système est que les élèves naviguent sur le site de soutien sans être véritablement conseillés.

Un embryon de système guidé avait été mis en place dans ce but. Mais ce dernier avait un caractère trop déterministe aux yeux de l'équipe pédagogique, d'où le projet de recherche avec le laboratoire LIL de Calais et l'équipe Complexe de l'INRIA Rocquencourt, décrit dans cette thèse. Le but est d'obtenir un ITS devant guider de manière adaptative les élèves au milieu du contenu pédagogique de PARASCHOOL.

## Chapitre 4

# L'Optimisation par Colonies de Fourmis appliquée à l'*e-learning*

---

---

Ce chapitre présente tout d'abord le contexte de l'optimisation, puis se focalise sur les heuristiques d'Optimisation par Colonie de Fourmis (OCF). Ces algorithmes s'inspirent des comportements collectifs de dépôt et de suivi de piste observés dans les colonies de fourmis. Une colonie d'agents simples (les fourmis) communiquent indirectement via des modifications dynamiques de leur environnement (les pistes de phéromone) et construisent ainsi une solution à un problème, en s'appuyant sur leur expérience collective.

Ce paradigme est appliqué au site de soutien de PARASCHOOL pour en tirer les avantages d'adaptabilité, de robustesse et d'émergence de nouvelles solutions. Après la description des différentes phases de la mise en service effective, une analyse fine des premiers résultats est faite, afin d'en tirer des conclusions sur le comportement du système dans un environnement pédagogique, et de mettre au point l'optimisation par *Fourmilière* décrite dans le chapitre suivant.

---

---

Une armée de fourmis peut triompher d'un serpent venimeux  
*Proverbe chinois*

### 4.1 Fourmilières et Optimisation par Colonies de Fourmis

#### 4.1.1 Contexte de l'optimisation

##### Problèmes d'optimisation

Un problème d'optimisation est un problème où le but est de trouver une solution  $s$  appartenant à un ensemble de solutions  $S$ . Pour évaluer chaque solution  $s$ , une fonction de coût  $f$  est utilisée. L'objectif est de maximiser ou de minimiser le coût  $f(s)$  sur un ensemble de définition généralement fini ou dénombrable. Tous les problèmes d'optimisation n'ont pas le même degré de difficulté, celui-ci étant surtout lié à la dimension de l'espace de recherche et au "paysage" de la fonction à optimiser.

En complexité algorithmique, il existe plusieurs classes de complexité, dont parmi elles se trouvent :

**La classe P :** Ce sont des problèmes qui admettent comme solution des algorithmes en temps borné par un polynôme de la taille du problème.

**La classe NP :** Ce sont des problèmes pour lesquels aucun algorithme, qui ne soit pas de complexité "exponentielle," n'a pu être trouvé, mais pour lesquels une solution donnée peut être vérifiée en temps polynomial. Il existe un sous-ensemble de la classe NP, les problèmes NP-complets, qui ont la caractéristique de pouvoir tous se transformer l'un en l'autre. Cette caractéristique implique que si quelqu'un peut trouver une solution polynomiale pour l'un d'entre eux, ils seraient tous de la classe P. Les autres n'ont pas ce statut, car aucune réduction vers un autre problème NP-complet n'a pu être trouvée.

De manière transverse à ces classes, il existe plusieurs types de problèmes d'optimisation :

- les problèmes discrets avec des solutions combinatoires.
- les problèmes de type continu avec des solutions réelles ou complexes : les problèmes dérivables, non dérivables, unimodaux (recherche de l'*optimum* global), multimodaux (recherche des meilleurs *optima* globaux/locaux), ...

**Remarque :** Une fois le domaine de définition et les contraintes éventuelles déterminées, les problèmes continus deviennent aussi discrets, car la représentation des nombres en machine est discrète (précision limitée).

### Algorithmes d'optimisation

Pour tenter d'apporter une solution à tous ces types de problèmes, de nombreux algorithmes d'optimisation ont été développés. Malheureusement, il n'existe pas de meilleur algorithme d'optimisation en terme de performances, c'est-à-dire au niveau de la qualité des résultats et du temps de calcul, indépendamment du problème considéré [Wol97]. Ainsi, pour chaque problème traité, il faut trouver l'algorithme d'optimisation le plus adapté.

Il existe plusieurs classes d'algorithmes d'optimisation :

**Les algorithmes déterministes :** Ces algorithmes se caractérisent par une convergence rapide et un coût calculatoire réduit. Mais ces algorithmes sont souvent piégés dans le premier *optimum* qu'ils rencontrent. De plus la taille de l'espace de recherche peut devenir un sérieux handicap.

**Les algorithmes d'approximation :** Ces algorithmes calculent une solution approximative d'un problème en un temps raisonnable (en général polynomial), mais ils se différencient des autres approches par le fait qu'ils garantissent une précision donnée, qui peut être démontrée.

**Les algorithmes stochastiques :** La définition classique des algorithmes en fait des processus de calcul déterministes : avec les mêmes données, un algorithme exécutera toujours la même suite d'opérations. Cependant, l'hypothèse de déterminisme est restrictive, voire contraignante. L'idée est d'utiliser des fonctions basées sur l'aléatoire pour parcourir de très grands espaces de recherche de manière non systématique.

**Les heuristiques :** Ces algorithmes appartiennent à une sous-classe des algorithmes stochastiques. Dans le cas d'un espace de recherche vaste, toutes les combinaisons ne peuvent être essayées et, dans certains cas, certains choix stratégiques peuvent être faits. Ces choix, généralement très dépendants du problème traité, constituent ce qu'on appelle une *heuristique*.

Le but d'une heuristique est donc de ne pas essayer toutes les combinaisons possibles avant de trouver celle qui répond au problème, afin de trouver une solution approchée convenable (qui peut être exacte dans certains cas) dans un temps raisonnable.

Ces méthodes approchées se caractérisent par la simplicité et la rapidité de mise en oeuvre.

Les heuristiques sont généralement :

- itératives (un même schéma de recherche est appliqué plusieurs fois au cours de l'optimisation),
- directes (elles n'utilisent pas l'information du gradient pour le calcul de la fonction d'évaluation) et
- spécialisées sur un problème particulier.

Du fait de ces caractéristiques, leur principal attrait est la capacité d'éviter les *optima* locaux, soit en acceptant une dégradation de la fonction d'évaluation au cours de leur évolution, soit en utilisant un ensemble de solutions comme méthode de recherche.

Souvent inspirées d'analogies avec la réalité (physique, biologie, éthologie, ...), elles sont généralement conçues au départ pour des problèmes discrets, mais peuvent faire l'objet d'adaptations pour des problèmes continus.

**Les métaheuristiques :** Les métaheuristiques sont des heuristiques, hybridées avec une heuristique secondaire pour servir de recherche locale. Le terme *méta* est pris au sens où les algorithmes peuvent regrouper plusieurs heuristiques. Cette définition est essentiellement présente dans la littérature concernant les algorithmes évolutionnaires, où elle est utilisée pour désigner une spécialisation.

**Remarque :** Une terminologie légèrement différente considère que les métaheuristiques sont des heuristiques génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé.

Dans notre contexte, il existe, notamment, la sous-branche des métaheuristiques concurrentes. Dans la concurrence (ou co-évolution), chaque algorithme utilise une série d'agents coopérants ensembles, pour atteindre une solution approchée au problème.

#### 4.1.2 Optimisation chez les insectes sociaux

##### Intelligence collective naturelle

L'intelligence collective s'observe principalement chez les insectes sociaux (fourmis, termites, abeilles), les animaux se déplaçant en formation (oiseaux migrateurs, bancs de poissons, troupeaux d'herbivores) et, un peu moins, chez les mammifères sociaux chassant en meute (loups, hyènes). Les points communs de ces différentes espèces permettent de définir les principales caractéristiques de l'intelligence collective :

- leur force vient du fait qu'ils vivent, se déplacent et chassent en groupe,
- ils communiquent de manière locale (grognement, phéromones, attitudes), et
- la coordination du groupe est implicite et dépend uniquement de règles comportementales très simples au niveau individuel.

Voici quelques exemples de comportements intelligents et de phénomènes d'auto-organisation au sein de colonies naturelles.

- Une fourmilière est capable de trouver dynamiquement en trois dimensions, malgré les obstacles et la nature variable de l'environnement, un chemin optimal vers un ou plusieurs points de nourriture.

- Les fourmis *Atta* coupent des feuilles d'arbres et organisent des chemins pour ramener les feuilles à la fourmilière.
- Les fourmis *oecophylla* construisent des ponts avec leur corps.
- Les fourmis *Ecyton* organisent des raids de chasse comportant parfois jusqu'à 200 000 individus.
- Les termites aboutissent à la construction de termitières de plusieurs mètres de hauteur à l'architecture quasi-optimale.
- Les abeilles conçoivent des nids aux alvéoles parfaitement hexagonales.
- Les oies sauvages, pour pouvoir parcourir de longues distances dans des conditions parfois difficiles, adoptent des formations en V qui leur permettent d'allonger leur distance de vol de près de 70%, en réduisant la résistance à l'air. Cela permet d'optimiser leur déplacement en terme d'énergie dépensée. Elles perdent un peu en vitesse, car un seul oiseau vole 24% plus vite qu'en formation.

### La force d'une colonie

Les insectes sociaux en général ont développé des mécanismes de communication très élaborés ([Mel98] pour les insectes sociaux et [Bro96] pour les animaux en général). Douze types de messages ont été différenciés [Höl90] (l'alarme, l'entretien, la reproduction, le marquage du territoire, le recrutement, ...).

Les *phéromones* sont à la base de la communication de nombreuses espèces et tout particulièrement des fourmis.

Par exemple, lorsqu'elles ramènent de la nourriture, les ouvrières déposent des traces chimiques sur leur chemin pour pouvoir retrouver le chemin de la source de nourriture, mais aussi pour pouvoir retrouver plus rapidement le chemin de la fourmilière. Mais comme l'information est relâchée dans l'environnement, elle peut être exploitée par leurs congénères pour identifier l'emplacement de la source.

Un autre exemple de communication chimique est le déclenchement des alarmes quand le nid est attaqué, afin de mobiliser un grand nombre d'individus pour la défense de la colonie.

Comme l'utilisation et l'échange des phéromones se fait, la plupart du temps, indirectement<sup>5</sup>, en modifiant l'environnement<sup>6</sup>, on parle de *stigmergie*. Ce terme a été introduit par Grassé [Gra59] à propos des mécanismes collectifs de construction du nid chez les termites.

### Un cas emblématique

Pour mieux comprendre le fonctionnement des colonies de fourmis, prenons l'exemple traditionnellement donné pour illustrer leur capacité à trouver des chemins optimaux. La figure 4.1 décrit une situation où il y a un nid où les fourmis vivent, et une source de nourriture N, que les fourmis doivent trouver et dont elles doivent ramener les provisions vers le nid.

Il existe deux chemins possibles pour atteindre la source : un long, un court. Les fourmis explorent aléatoirement les deux. Lorsqu'elles trouvent la source, elles se chargent de nourriture et retournent au nid en libérant des phéromones tout au long de leur chemin.

Le chemin le plus court étant aussi le plus rapide, sa concentration en phéromones augmente plus vite à nombre de fourmis égal. Les fourmis, qui sont attirées par les traces chimiques, sont

---

<sup>5</sup>La communication chimique n'est pas indirecte dans tous les cas, par exemple dans le cas des phéromones de proximité, qui ne nécessitent pas de support. Ce cas se retrouve pour les mécanismes d'alarme ou de recrutement à courte distance.

<sup>6</sup>Dans le cas des fourmis, grâce au support du sol.

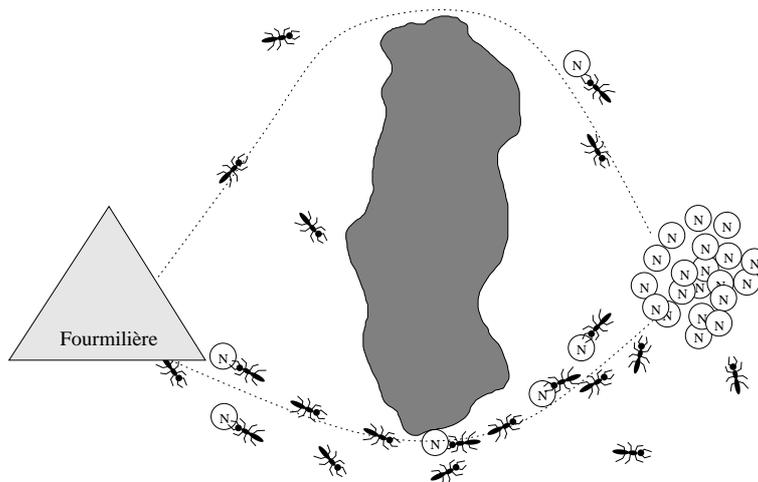


FIG. 4.1 – Un problème naturel typique : un nid, une source de nourriture  $N$  et deux chemins, un court, un long.

très vite, par un phénomène de renforcement, encouragées à suivre le chemin le plus court. Le chemin du nid à la source a ainsi été optimisé.

Ce fonctionnement est déjà efficace en soi mais il manque deux phénomènes essentiels pour qu'il soit tout à fait complet :

**Évaporation des phéromones :** Le premier phénomène est que les phéromones s'évaporent au cours temps, rendant ainsi leur trace éphémère : au bout d'un certain temps, les chemins les moins utilisés finissent par disparaître.

**Comportement aléatoire des fourmis :** Le deuxième phénomène est qu'il arrive quelquefois que des fourmis se trompent et s'écartent du chemin de phéromone. Si, par chance, une fourmi égarée trouve un chemin plus court, la trace de phéromone laissée derrière elle sera plus fraîche, indiquant aux autres fourmis qu'il existe un chemin plus court pour accéder à la nourriture. Ainsi, c'est le mécanisme d'erreur dans le suivi de trace de phéromone qui permet la découverte de raccourcis, aboutissant à terme à l'établissement d'un chemin optimal entre fourmilière et nourriture.

Ces deux mécanismes combinés permettent aux chemins établis de ne pas être statiques et de s'adapter aux modifications de l'environnement. Supposons que seul le chemin le plus long soit disponible (une brindille obstrue le chemin court). Les fourmis vont donc l'utiliser et le charger en phéromones. À un moment, le chemin court redevient disponible suite, par exemple, à un coup de vent qui aurait poussé la brindille. Comme les fourmis commettent des erreurs, le chemin plus court finit par être retrouvé et, plus il est utilisé, moins le chemin le plus long est attrayant. Comme les phéromones s'évaporent, il n'y a pas d'accumulation irréversible. Au bout d'un certain temps, le chemin le plus court est retrouvé.

Cet exemple illustre bien la façon dont les colonies de fourmis s'adaptent à un environnement changeant : le comportement aléatoire permet la découverte de nouvelles solutions, tandis que les phéromones, associées au phénomène d'évaporation, permettent l'émergence de solutions optimales au cours du temps.

Pour que le mécanisme d'optimisation puisse fonctionner, il faut un nombre suffisant de fourmis, pour pouvoir créer l'émergence de la solution et éviter la divergence de celle-ci face aux comportements aléatoires des fourmis.

### 4.1.3 Algorithme standard d'optimisation par colonies de fourmis

L'optimisation par colonies de fourmis est donc une technique d'optimisation biomimétique inspirée par un travail de biologistes [Den83], repris par des informaticiens [Moy88] et largement exploité et développé par Marco Dorigo *et al.* dans les années 90 [Col91a, Dor92].

L'idée est de faire coopérer un grand nombre d'agents simples et localisés en utilisant des *phéromones* laissées dans l'environnement à destination de leurs congénères (c'est-à-dire un mode de communication indirecte). Ces deux composantes forment la base de l'heuristique développée par Dorigo.

D'abord appliquée au problème du voyageur de commerce (voir ci-dessous), l'optimisation par colonies de fourmis a rapidement prouvé son efficacité dans le cadre de l'optimisation combinatoire en général et s'est montrée particulièrement profitable pour le problème du routage des paquets d'information dans les grands réseaux d'interconnexion. Avec sa sœur jumelle l'optimisation par essais particuliers [Ken01], elle forme aujourd'hui un domaine de recherche à part entière, l'intelligence en essaim ou "Swarm Intelligence" [Bon00, Ken01].

### 4.1.4 Application au problème du voyageur de commerce

Pour illustrer la manière dont l'observation de colonies de fourmis réelles peut inspirer un algorithme d'optimisation, nous montrons comment le problème du voyageur de commerce peut être résolu avec un algorithme à base de fourmis artificielles [Col91a, Stü97a, Stü99].

Le problème du voyageur de commerce consiste à trouver un "chemin hamiltonien" dans un graphe complètement connecté. En d'autres termes, il s'agit, pour un voyageur de commerce, de trouver le chemin le plus court lui permettant de visiter, une et une seule fois, chacune des  $n$  villes de son secteur. C'est sans doute le problème d'optimisation combinatoire NP-complet le plus utilisé comme test pour les heuristiques.

Les fourmis travaillent en parallèle pour tester les diverses solutions et au fur et à mesure, elles accumulent des phéromones sur les meilleures arêtes trouvées.

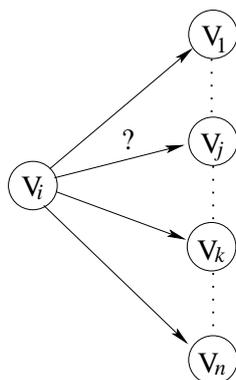


FIG. 4.2 – Arrivé à la ville  $i$ , notre voyageur de commerce (ou notre fourmi) doit choisir la ville suivante.

Chacune des fourmis de la colonie est placée au hasard sur un des nœuds du graphe. Chacune commence alors sa *tournée*. Son trajet entre une ville  $V_i$  et une ville  $V_j$  (*cf.* fig. 4.2) dépend de :

1. la liste des villes à visiter (non déjà visitées), qui définit les mouvements possibles de la fourmi  $F$  lorsqu'elle est sur la ville  $i$  :  $J_i^F$ ,
2. l'inverse de la distance entre les villes  $\frac{1}{d_{ij}}$ , appelée visibilité. Cette information *statique* est utilisée pour diriger le choix des fourmis vers des villes proches et

- la quantité de phéromone  $\tau_{ij}(t)$  déposée sur l'arête reliant les deux villes, appelée l'*intensité* de la piste. Ce paramètre définit l'attractivité d'une partie du trajet global et change à chaque tournée d'une fourmi. C'est, en quelque sorte, une mémoire globale du système, qui évolue par apprentissage.

La probabilité pour la fourmi  $F$  d'aller à la ville  $j$  en partant de la ville  $i$  prend la forme suivante [Bon99] :

$$p_{ij}^F(t) = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha \cdot (d_{ij})^{-\beta}}{\sum_{j \in J_i^F} (\tau_{ik}(t))^\alpha \cdot (d_{ik})^{-\beta}} & \text{si } j \in J_i^F \\ 0 & \text{si } j \notin J_i^F \end{cases} \quad (4.1)$$

Les paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  servent à régler l'importance relative de la *visibilité* et de l'*intensité* de la piste.

Après  $n$  itérations, lorsque toutes les fourmis ont construit un chemin complet, chacune d'elles calcule la longueur totale parcourue (somme des distances d'une ville à l'autre) et libère des phéromones tout au long du chemin, en quantité inversement proportionnelle à la longueur :

$$\Delta\tau_{ij}^F(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^F(t)} & \text{si } (i, j) \in T^F(t) \\ 0 & \text{si } (i, j) \notin T^F(t) \end{cases} \quad (4.2)$$

où  $T^F(t)$  est le trajet effectué par la fourmi  $F$  à l'itération  $t$ ,  $L^F(t)$  la longueur de la tournée et  $Q$  un paramètre fixé. Ainsi, plus le chemin est court, plus il est chargé en phéromones. La procédure est alors itérée jusqu'à ce que l'on obtienne une solution jugée acceptable.

On contrebalance l'accumulation des phéromones par une décroissance constante des valeurs des arêtes à chaque itération. La règle de mise à jour des phéromones sur les pistes est donc :

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{F=1}^m \Delta\tau_{ij}^F(t) \quad (4.3)$$

où  $m$  est le nombre de fourmis et  $\rho$  le taux d'évaporation.

Le pseudo-code de l'algorithme est donc le suivant :

---

**Algorithme 4.1.4 Algorithme de colonies de fourmis de base.**

---

```

Pour  $t = 1, \dots, t_{max}$ 
  Pour chaque fourmi  $F = 1, \dots, m$ 
    Choisir une ville au hasard
    Pour chaque ville  $i$  non encore visitée
      Choisir une ville  $j$ , dans la liste  $J_i^F$  des villes restantes, selon
        la probabilité donnée par la formule 4.1
    Fin Pour
    Déposer une piste  $\Delta\tau_{ij}^F(t)$  sur le trajet  $T^F(t)$  conformément à l'équation 4.2
  Fin Pour
  Évaporer les pistes selon la formule 4.3
Fin Pour

```

---

Cette exploration de l'espace de recherche a le mérite d'être efficace et d'offrir un compromis entre :

- l'exploitation de l'information apportée par la collectivité (les phéromones préalablement déposées là où les fourmis ont intérêt à passer),

- l'utilisation des heuristiques locales (allons au plus près!) et
- l'exploration aléatoire.

Le système mis en place sur PARASCHOOL, pour tenter d'optimiser le cheminement des élèves, s'est directement inspiré de cet algorithme.

#### 4.1.5 Caractéristiques d'un algorithme d'OCF

Dans [Dor03], les auteurs donnent une définition d'un algorithme d'OCF, que l'on peut traduire comme suit :

*Une (méta)heuristique de colonie de fourmis est un processus stochastique construisant une solution, en ajoutant des composants aux solutions partielles. Ce processus prend en compte (i) une heuristique sur l'instance du problème (ii) des pistes de phéromone changeant dynamiquement pour refléter l'expérience acquise par les agents.*

#### Formalisation du problème

Le problème est représenté par un jeu de solutions, une fonction d'évaluation affectant une valeur à chaque solution et un jeu de contraintes. Le but est de trouver l'*optimum* global de la fonction d'évaluation tout en satisfaisant les contraintes. En supposant que les solutions peuvent être construites par une séquence de composants, les fourmis peuvent alors se déplacer sur un graphe, où les nœuds sont les composants. Le chemin ainsi obtenu constitue une solution potentielle. Les règles de déplacement de la fourmi sont contrôlées par le jeu de contraintes (soit en empêchant certains déplacements, soit en les pénalisant). En dehors de ces contraintes, le processus stochastique peut intervenir dans les déplacements valides. Chaque fourmi dispose d'une mémoire pour stocker le trajet effectué, d'un état initial et de conditions d'arrêt. Les fourmis se déplacent d'après une règle de décision probabiliste en fonction des pistes de phéromone locales, de l'état de la fourmi et des contraintes du problème.

#### Utilisation d'informations stigmergiques

Les phéromones sont importantes pour le bon déroulement des algorithmes de colonies de fourmis. Il faut donc bien analyser l'espace de recherche afin d'implémenter au mieux les informations stigmergiques pour obtenir les meilleures solutions.

Les phéromones permettent de décrire en temps réel l'état de la recherche de la solution. Ces informations sont modifiées et partagées par stigmergie par toutes les fourmis. L'évaporation des phéromones permet de donner un caractère adaptatif à l'algorithme et de s'échapper de minima locaux.

En pratique, la méthode consiste à multiplier les valeurs de phéromones par un taux de décroissance. Ce taux est situé entre 0 et 1. Si le taux est trop bas, les phéromones s'évaporent trop vite, perdant par la même occasion toute l'information stigmergique. Si le taux est trop haut, les phéromones ont plutôt tendance à s'accumuler, faisant perdre au système sa capacité à s'adapter.

Ainsi en ajoutant le processus d'évaporation, l'information n'est conservée qu'un certain temps par l'environnement. Le système peut être vu alors comme une forme de mémoire adaptative [Tai98a, Tai98b], où la dynamique de l'information détermine le comportement du système.

Au final, la communication par phéromones présente les avantages et les inconvénients suivants [Bon94] :

- **Avantages :**

- L'utilisation de différents types de molécules permet de fournir des informations qualitatives.
- La stabilité du signal, pour une molécule peu volatile, permet d'assurer une certaine permanence.
- **Inconvénients :**
  - Elle n'offre que peu d'informations sur la direction.
  - Sa propagation est relativement lente et elle est peu adaptée pour la transmission de messages urgents ou pour l'intégration de deux stimulations successives sous une forme temporelle.

### Dilemme de la recherche d'une solution

Pour qu'une heuristique fonctionne bien, il faut qu'elle trouve le bon compromis entre deux phénomènes :

- **La diversification :** Elle permet l'exploration de l'espace de recherche. L'idée est de rajouter des fonctions aléatoires dans l'algorithme pour aller chercher de nouvelles solutions.
- **L'intensification :** Elle permet l'exploitation de l'information disponible. Le but est d'améliorer localement une solution donnée, afin d'obtenir l'*optimum* local.

Dans les algorithmes d'OCF, il existe, comme dans la plupart des cas, plusieurs façons de gérer le compromis. Dans le cas du problème du voyageur de commerce (*cf.* section 4.1.4), les deux paramètres  $\alpha$  et  $\beta$  permettent de régler l'influence relative des pistes de phéromone et de l'information de visibilité. Plus la valeur de  $\alpha$  sera élevée, plus l'intensification sera importante, car plus les pistes auront une influence sur le choix des fourmis. À l'inverse, plus  $\alpha$  sera faible, plus la diversification sera forte, car les fourmis ne seront pas attirés par les pistes. Le paramètre  $\beta$  agit de façon similaire.

Le réglage peut également se faire sur la gestion des pistes de phéromone. Par exemple, l'emploi de stratégies élitistes (les meilleures solutions contribuent davantage aux pistes[Dor96]) favorise l'intensification, alors qu'une réinitialisation de l'ensemble des pistes favorise l'exploration [Stü97b, Stü00].

Ce choix diversification/intensification peut s'effectuer de manière statique en utilisant une connaissance *a priori* du problème, ou de manière dynamique, en laissant le système décider du meilleur réglage à chaque pas de temps.

### Amélioration par une recherche locale

Pour améliorer l'efficacité d'une heuristique, il est courant de l'hybrider avec un algorithme de recherche locale, afin d'optimiser les solutions trouvées. Elle devient alors une métaheuristique. Dans le cas des algorithmes d'OCF, l'optimisation est faite juste avant la mise à jour des pistes de phéromone. Une autre possibilité est d'ajouter plus de connaissance dans l'heuristique locale. L'emploi de deux méthodes se traduit souvent par une augmentation du temps de calcul. Si la recherche locale optimise la solution de façon plus directe, l'utilisation d'une heuristique pertinente est sûrement plus naturelle pour utiliser les informations du problème.

### Parallélisme et Optimisation par Colonies de Fourmis

De par sa structure, l'OCF comporte un parallélisme intrinsèque, car les interactions pour obtenir une solution se font de manière indirecte. En effet, chaque fourmi n'utilise que des informations locales (les phéromones). Il est donc facile de paralléliser l'algorithme.

Plusieurs propositions ont été faites pour paralléliser l'OCF. Par exemple, dans [Rou99, Tal99], un processus est affecté à chaque fourmi et un processus maître a pour but d'initialiser, de synchroniser toutes les fourmis et de stocker les phéromones ainsi que la meilleure solution. Ainsi, le processus associé à chaque fourmi construit une solution et l'optimise suivant une recherche locale. Il faut faire attention au volume de communications qui peut nuire à l'efficacité de la parallélisation notamment dans une implémentation *synchrone* [Bul97].

### Convergence de l'algorithme

Si, dans certains cas, la convergence d'un algorithme de colonies de fourmis est assurée (cas des *Graph-Based Ant Systems* (GBAS), où la convergence a été prouvée [Gut00, Gut02]), le problème reste entier en ce qui concerne la convergence d'un algorithme d'OCF quelconque. La différence entre GBAS et l'algorithme d'OCF de base se situe au niveau de la mise à jour des pistes de phéromone, qui n'est permise que si une meilleure solution est trouvée.

#### 4.1.6 Diverses applications

Voici quelques applications des algorithmes d'OCF, pour lesquelles le paradigme s'est montré efficace :

**Le routage sur réseau :** L'idée est d'optimiser la quantité et la qualité des informations transmises sur un réseau de type internet, en utilisant des agents-fourmis pour le routage des données [DiC97, DiC98b, DiC98a].

**Le ramassage d'objets :** Goss et Deneubourg [Gos91] montrent par des simulations comment un groupe de robots simples peut naviguer dans un espace inconnu, sans carte, reconnaissance visuelle ou points de repère, pour ramasser des objets dispersés et les ramener au point central.

**L'auto-organisation spatiale des robots :** Elle a été étudiée dans [Uns] où les robots se placent les uns par rapport aux autres en formant plusieurs configurations.

**L'auto-assemblage de structure :** les capacités de construction des insectes sociaux ont été exploitées en robotique, notamment par l'auto-assemblage de structures [Bon99].

**L'affectation quadratique :** L'objectif du problème est de placer  $n$  unités de production sur  $n$  emplacements dont les distances sont connues, ainsi que les flux entre chaque unité de production, afin de minimiser le coût total des transferts entre unités de production [Stü00].

## 4.2 Application au logiciel de PARASCHOOL

L'idée était donc de voir si l'algorithme pouvait s'appliquer au cadre de PARASCHOOL et si l'émergence d'une solution *pédagogique* était possible.

### Structure de graphe

Le logiciel PARASCHOOL a été implémenté pour une utilisation *via* internet. Il emploie donc des pages et des liens hypertextes formant, en gros, une structure d'*arbre*, dont la page d'accueil était la racine.

L'idée a été de modifier très légèrement l'arbre, en une structure de graphe, où seulement<sup>7</sup> les items constituent des noeuds. Un arc du graphe est construit ou mis à jour lorsqu'un élève saute<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup>c'est-à-dire que les autres pages sont écartées.

<sup>8</sup>quels que soient les pages HTML parcourues par l'élève entre ces deux items.

d'un item à un autre. Dans un environnement de *graphe*, les fourmis ont de grandes dispositions adaptatives, en se déplaçant à la recherche du chemin optimal. Pour PARASCHOOL, cet *optimum* est l'enchaînement d'items sur lequel l'élève maximise son apprentissage.

### Un nombre suffisant d'utilisateurs

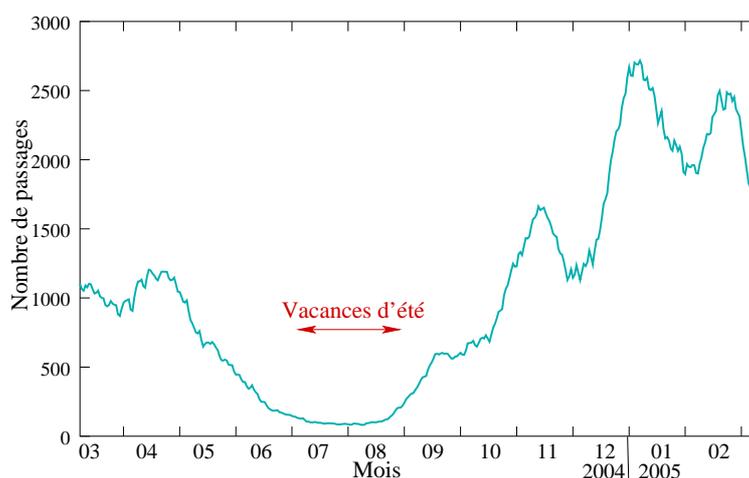


FIG. 4.3 – Nombre de passages au cours de l'année.

Un autre avantage du système PARASCHOOL est le très grand nombre d'élèves amenés à utiliser le logiciel (250 000). Cette grande quantité permet — ce qui est quasiment<sup>9</sup> un cas unique — de considérer chaque utilisateur comme une fourmi virtuelle.

Dans le cas habituel, on a recours à un grand nombre de fourmis artificielles dont il faut essayer de modéliser le comportement, ce qui pose bien sûr le problème de trouver une *bonne* modélisation du comportement.

Il est donc possible d'envisager d'associer bijectivement une fourmi à un élève, avec l'espoir de voir apparaître dans le logiciel PARASCHOOL des comportements d'*émergence* et d'*auto-organisation*.

La figure 4.3 montre la répartition annuelle du passage journalier sur le site de PARASCHOOL. Cette vérification *a posteriori* permet de voir que le site est utilisé par plusieurs centaines d'élèves par jour, ce qui permet d'assurer un nombre de passages suffisant pour espérer que des chemins intéressants émergent.

### Comportement aléatoire

Une fois que l'élève vient de terminer un item et que le résultat est affiché, il lui est proposé de revenir *librement* à la liste d'exercices du thème actuel.

Cette navigation *libre* permet à l'utilisateur de ne pas se restreindre aux propositions faites par le système et donc de pouvoir choisir son propre enchaînement d'items. Cet enchaînement crée, le cas échéant, un nouvel arc reliant deux items dans le système.

<sup>9</sup>Dans [Lab03], l'application d'orientation d'utilisateurs sur le parcours de site web associe aussi les utilisateurs à des fourmis virtuelles.

### 4.2.1 Utilisation de Pheromones, $\varphi^+$ et $\varphi^-$

#### Principe

Dans le paradigme d'OCF, les informations sont stockées sous forme de phéromones sur chaque arc. À partir des informations que le système collecte, l'algorithme calcule une valeur d'évaluation ou de *fitness* pour chaque arc, dans le but de dire si un arc est bon ou non.

Ces informations sur la valeur d'un arc sont globales pour tous les élèves. L'équipe pédagogique doit les surveiller, pour éviter toute divergence du système, en modifiant les paramètres de réglage de l'algorithme.

Les phéromones constituent l'essence même de tout système fondé sur la théorie des colonies de fourmis. L'heuristique est capable de fonctionner juste avec ces informations stigmergiques. Tout ajout d'autres paramètres n'est le fruit que d'une adaptation spécifique au système PARASCHOOL.

#### Prise en compte du succès et de l'échec

Dans la nature, les phéromones sont des informations déposées par les fourmis pour aider leurs consœurs à trouver leur route afin d'optimiser les chemins menant à la nourriture.

Chez les étudiants, les phéromones sont les informations stigmergiques qui vont aider les autres élèves à se déplacer dans l'environnement pédagogique, afin d'optimiser leur apprentissage.

◊ Comment quantifier le progrès d'un élève ?

Les phéromones symbolisent le résultat de l'élève sur l'exercice. Si ce dernier réussit, il dépose des phéromones sur le chemin (ou l'arc) parcouru pour indiquer que la réussite y est probable.

Si, par contre, l'élève a échoué, le système ne dépose pas de phéromones. Or, le fait qu'un arc ne soit pas emprunté diffère du fait qu'un arc mène vers l'échec. Pour différencier les deux cas, une deuxième phéromone a été utilisée pour représenter un échec.

Ainsi en fonction du résultat sur l'item, le système dépose une quantité  $\alpha$  d'un des deux types de phéromones :

- $\varphi^+$  pour les phéromones symbolisant le succès et
- $\varphi^-$  pour l'échec.

**Remarque :** Pour l'instant le système ne propose qu'un succès ou un échec sur un exercice (validé ou non). Un exercice est validé si le score  $s$  de l'élève est supérieur à 60%. Mais cela dépend beaucoup de la constitution de l'exercice. Il peut être fait d'une vingtaine de questions comme d'un seul test. Pour le moment, seul le résultat final (validé ou non) est conservé et le dépôt de phéromones est directement relié à la validation de l'item. Une amélioration possible est de corréliser le score de l'élève au dépôt de phéromones. Ainsi, si  $s$  est le score de l'élève en pourcentage, alors  $\alpha s/100$  phéromones de succès  $\varphi^+$  et  $\alpha(100-s)/100$  phéromones d'échec  $\varphi^-$  peuvent être déposées sur l'arc, permettant de rendre compte plus finement du résultat des élèves sur celui-ci.

Pour proposer une suite "intelligente" d'items à l'élève, le système se sert des informations stigmergiques présentes sur un arc entre deux items A et B, pour connaître une estimation à l'instant donné du taux de réussite des élèves à l'item B *en provenance* de l'item A.

#### Principe de la rétro-propagation

Comme le succès (ou l'échec) sur un item donné est conditionné notamment par ce que l'élève a vu et fait avant, il faut garder en tête que la solution cherchée n'est pas seulement un lien entre

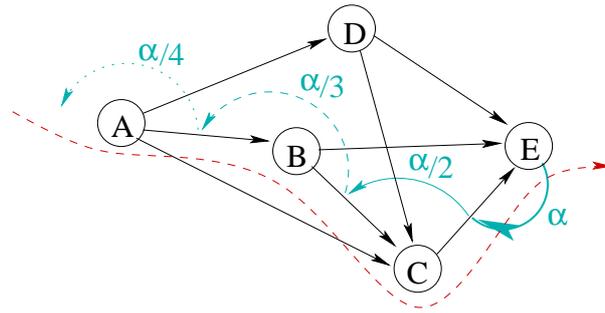


FIG. 4.4 – Dépôt effectif de phéromones après validation de l’item E, en fonction du chemin que l’élève a emprunté (en pointillé).

deux items, mais plutôt un *chemin* pédagogique, et donc une succession de liens visités.

Ainsi les phéromones, qu’il s’agisse de  $\varphi^+$  ou de  $\varphi^-$ , ne sont pas simplement libérées sur l’arc qui a mené la fourmi au nœud ou à l’exercice courant, mais sur les  $n$  derniers arcs que la fourmi a suivis, dans le but de refléter la recherche d’un chemin pédagogique.

Bien évidemment, l’influence d’un item diminue avec le temps et l’espace : plus le nœud est éloigné dans l’histoire de la fourmi, moins il subit l’influence de la position actuelle de l’élève-fourmi. En pratique, les phéromones ne sont déposées que sur les quatre derniers arcs visités, avec un taux de diminution de  $1/k$  ( $k$  représentant l’ancienneté des arcs visités).

La figure 4.4 montre comment les phéromones sont déposées sur les arcs une fois l’item terminé. Dans le cas où l’item a été validé, une quantité  $\alpha$  est déposée pour les phéromones  $\varphi^+$  et pour les phéromones  $\varphi^-$  dans le cas d’un échec.

**Remarque :** Ainsi, le système peut proposer un chemin qui, à première vue, paraît inadapté (trop dur par exemple), pour ensuite accéder à une zone où le progrès est plus important. Dans le même ordre d’idée, le système peut écarter un bon arc dans le cas où ce dernier conduit ensuite l’élève vers des items trop difficiles.

### Évaporation des phéromones

Le fait que les phéromones naturelles s’évaporent avec le temps est extrêmement important car cela permet à la colonie de fourmis de se fier à des informations constamment mises à jour. Dans un système artificiel, il est donc important d’implémenter un processus d’évaporation pour éviter que le système ne reste coincé dans un *optimum* local, et obtenir ainsi les caractéristiques attendues d’adaptativité dynamique. L’équation 4.4 donne la forme de l’évaporation pour les phéromones de succès  $\varphi^+$  et d’échec  $\varphi^-$  :

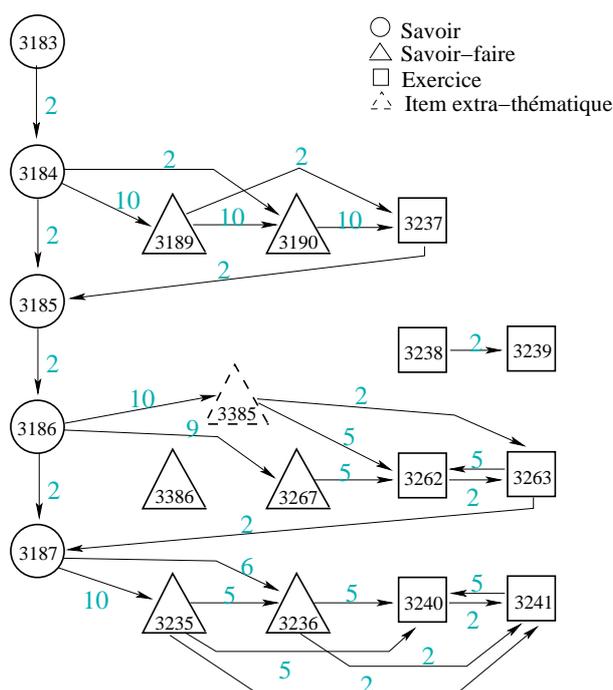
$$\varphi_{t+1}^{+/-} = \tau \cdot \varphi_t^{+/-} \quad (4.4)$$

où  $\tau$  représente le taux d’évaporation, paramètre clé du système. La période du processus d’évaporation a été fixée à 1 jour et le taux d’évaporation à 0.999 (*cf.* réglages à la section 4.3.2).

#### 4.2.2 Ajout d’un poids professeur, $W$

##### Objectif

L’OCF est très performante pour trouver une bonne solution, mais le système met du temps à s’initialiser correctement. L’idée est donc d’utiliser l’équipe pédagogique qui fabrique les exercices


 FIG. 4.5 – Thème : *Nombres décimaux* dans le cursus *Mathématiques 6ème*.

pour construire des chemins pédagogiques initiaux pour guider les élèves. Ils établissent, en fonction de leur vision du thème construit, des poids pédagogiques sur un certain nombre d'arcs. Ce poids est synonyme de *pertinence pédagogique* par rapport à ses voisins, c'est-à-dire par rapport aux arcs qui sortent du même nœud que lui. Ainsi plus le poids est important, plus l'arc concerné est avantageux pour être sélectionné.

Prenons l'exemple du thème 377 (*Nombres décimaux*, cf. fig. 4.5). Il est modélisé, comme tout thème présent sur le site de PARASCHOOL, suivant un graphe où chaque nœud représente un élément pédagogique (leçon, savoir-faire, exercice). Chaque arc, représentant une navigation possible entre deux éléments (*lien hypertexte*), porte le poids pédagogique  $W$ . Sur la figure 4.5, l'équipe pédagogique a déterminé qu'après avoir vu la leçon 3184 sur la "comparaison des nombres décimaux," il est cinq fois plus pertinent d'aller mettre en pratique les notions apprises sur le savoir-faire 3189 intitulé "comparer des nombres décimaux" que de poursuivre avec le point de cours 3185 sur le "rangement de nombres décimaux."

### Poids relatifs

Lorsque les professeurs évaluent les chemins pédagogiques, aucune contrainte ne leur a été fixée pour donner les différentes notes, car celles-ci sont transformées en poids relatifs, afin d'obtenir une même échelle de comparaison.

Ainsi, tous les poids pédagogiques  $W_i$  des arcs sortant d'un même item sont récupérés et transformés suivant la formule suivante :

$$W_i^{rel} = \frac{W_i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n W_j^2}} \quad (4.5)$$

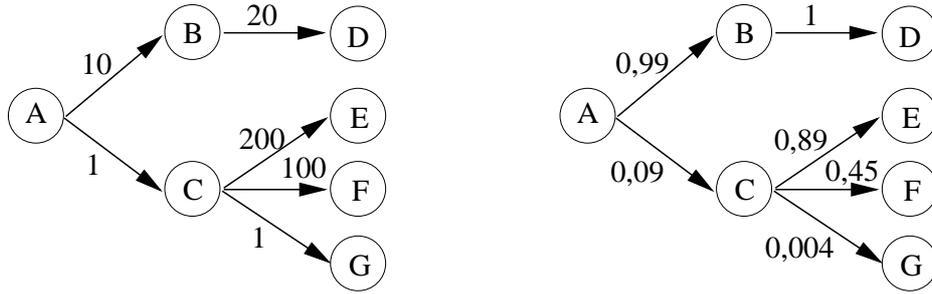


FIG. 4.6 – Transformation des poids pédagogiques absolus (gauche) en poids pédagogiques relatifs (droite).

### Création d'arc

L'élève n'est pas obligé de suivre la suggestion faite par les fourmis : s'il le souhaite, il peut se diriger vers un nœud non suggéré (navigation *libre*). Si l'arc alors emprunté n'existe pas, il est créé et son poids pédagogique  $W$  est fixé à 1, valeur pédagogique par défaut. Cette valeur par défaut permet de différencier la non-existence d'un arc et le fait qu'un élève a fait l'*effort* d'aller vers un item alors que l'arc n'existait pas. Un tel arc est appelé un arc *élève* ( $W = 1$ ) par opposition aux arcs *professeurs* ( $W > 1$ ).

**Remarque :** Sur les 5 411 items présents sur PARASCHOOL au moment de l'écriture de ce mémoire, le nombre moyen d'arcs sortants est légèrement supérieur à 25. Seulement 40% des items existants possèdent des arcs sortants de type "professeur". Pour ces items, le nombre moyen d'arcs professeurs est à peu près deux. Ces arcs professeurs doivent donc combattre face à une vingtaine d'arcs élève. Pour conserver la récompense faite à la création d'un arc (poids pédagogique de 1) et pour ne pas trop pénaliser un arc professeur face aux arcs élèves, l'équation 4.5 de normalisation a été un peu modifiée, en n'élevant pas au carré le numérateur. Le but est ainsi de favoriser les plus gros poids pédagogiques.

### 4.2.3 Construction de la fonction de *Fitness*

Une fois la mise en place de tous les paramètres effectuée, ces derniers sont utilisés dans la fonction d'évaluation qui permet de noter tous les arcs sortants. La note obtenue (*cf.* équation 4.6), qui représente la "désirabilité" d'un item, permet aux procédures de sélection de choisir quelques arcs parmi l'ensemble des possibilités. L'évaluation est importante, car c'est elle qui détermine le type de chemins que l'on souhaite voir émerger.

**Remarque :** le terme de *fitness*, tiré des algorithmes évolutionnaires, a été choisi pour représenter la note des arcs. En effet, tous les arcs sortants sont en compétition, pour être sélectionnés afin d'être présentés à l'utilisateur, d'où l'équation :

$$fitness = \omega_1.W + \omega_2.\varphi^+ + \omega_3.\varphi^- \quad (4.6)$$

où  $W$  représente le poids pédagogique,  $\varphi^+$  la concentration en phéromone de succès et  $\varphi^-$  la concentration en phéromone d'échec.

Ainsi, un arc est désirable lorsque :

- il est encouragé par les professeurs ( $W$  élevé) ;

- il mène au succès ( $\varphi^+$  élevé) ;
- peu d'échecs ont eu lieu autour de lui ( $\varphi^-$  bas).

Le système a été conçu pour que l'importance relative des différents facteurs est configurable par le biais des  $\omega_i$ . Les poids  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  et  $\omega_3$  ont été respectivement fixés à 1, 1, et  $-3$ . L'idée est de *fuir* à tout prix l'échec, pour encourager le succès et les conseils des professeurs.

#### 4.2.4 Application de procédures de sélection

Une fois que la fonction d'évaluation a donné une note à chaque arc, il suffit de classer tous les arcs sortants pour pouvoir présenter les meilleurs à l'élève.

Mais si l'élève pioche toujours le meilleur arc, cette sélection ne reflète pas le comportement classique d'une fourmi artificielle, qui pourrait aller piocher, certes avec une probabilité plus faible, des arcs voisins, en fonction des phéromones présentes sur les arcs.

Ainsi une procédure de sélection a été mise en place pour, en fonction de la *fitness* de chaque arc, piocher une sélection d'arcs. En priorité, l'arc principal est pioché, mais il se peut aussi que les autres arcs puissent être piochés, permettant ainsi aux élèves d'aller visiter des arcs prometteurs, mais pas forcément les meilleurs.

#### Principe

Une procédure de sélection choisit un arc aléatoirement, mais d'autant plus probablement que la *fitness* de l'arc est élevée. Ainsi les arcs *efficaces* deviennent prédominants, mais pas de manière exclusive, il y a de la place pour le hasard et l'exploration. Cette part de hasard est une caractéristique cruciale de la procédure de sélection. Plus la pression sélective  $s$  est grande, plus le tirage se laisse guider par la fonction de *fitness* et plus les arcs forts ont tendance à dominer les arcs faibles.

#### Différents types de sélection

Il existe différentes façons d'écrire l'algorithme de sélection. Cinq méthodes classiques ont été implémentées :

**La sélection par roulette :** la probabilité de sélectionner chaque arc est strictement proportionnelle à sa *fitness*. Dans une implémentation directe, il n'existe aucun moyen de régler la pression sélective. L'avantage est que cette méthode est sensible aux variations subtiles dans les mesures de *fitness*, mais il y a un revers à cette médaille de sensibilité : si la *fitness* d'un arc devient trop importante au point d'en écraser les autres, ces derniers n'ont pratiquement plus aucune chance d'être suivis et la diversification disparaît au profit d'une intensification élevée. De plus, il faut classer tous les individus, ce qui coûte cher d'un point de vue algorithmique.

**La sélection par le rang, seuils automatiques :** pour éviter qu'un arc n'écrase les autres, une sélection par le rang peut être utilisée : la probabilité d'être choisi est directement proportionnelle au rang (et pas à la valeur de la *fitness*). S'il y a trois arcs par exemple, le meilleur d'entre eux a une probabilité  $3/(1+2+3) = 3/6 = 1/2$  d'être choisi, le second une probabilité de  $2/6 = 1/3$  et le dernier une probabilité de  $1/6$ . Ainsi le problème de monopole est évité, mais au détriment de la sensibilité. Le contrôle sur la pression sélective est toujours absent et il faut aussi classer les arcs.

**La sélection par le rang, seuils manuels :** plutôt que de calculer automatiquement les probabilités de choix en fonction du rang, une probabilité est attribuée manuellement à chaque

rang. Il peut être décidé, par exemple, que le premier a une probabilité 0.77 d'être choisi, le second 0.13, le troisième 0.05 et le quatrième également. Il s'agit bien d'une sélection par le rang, avec ses avantages et ses inconvénients, mais elle est complètement paramétrable, au prix d'un réglage sans doute fastidieux des différents seuils, vu qu'il existe des milliers d'arcs dans le graphe. De plus, il faut toujours classer les individus.

**La sélection par tournoi :** cette procédure très classique consiste à tirer  $s$  individus au hasard et à choisir le meilleur. Il est évident que  $s$  conditionne la pression sélective : plus  $s$  est grand, plus il est probable que les arcs forts l'emportent. Outre son efficacité algorithmique, cette méthode a l'avantage d'être très simplement paramétrable. Elle ne nécessite pas de classer la population d'arcs, mais elle a le désavantage que les  $s - 1$  plus mauvais individus ne peuvent jamais être choisis.

**La sélection par tournoi stochastique :** deux individus sont tirés au hasard et le meilleur est sélectionné avec une probabilité  $p$ , avec  $p$  entre 0.5 (aucune pression de sélection) et 1 (équivalent à un tournoi binaire).

### Analyse

Si beaucoup de travaux ont été conduits pour étudier les procédures de sélection dans le cadre des algorithmes génétiques, peu d'études portent sur leur impact dans le cadre des algorithmes à colonie de fourmis. C'est un problème ouvert. Le choix a donc été fait de réutiliser l'expérience obtenue dans les algorithmes évolutionnaires. Si la plupart des arguments restent validés, il est important de comprendre que le contexte est différent. Trois intérêts antagonistes doivent guider le choix de la procédure de sélection :

**La réactivité** conditionne la vitesse à laquelle un arc considéré comme excellent atteint le stade où il est systématiquement proposé aux étudiants. Plus grande est la pression de sélection, plus vite un chemin pédagogique efficace prend le dessus sur ses concurrents. Contrôler la vélocité d'un tel système est très important : trop rapide, le système risque de passer à côté d'un meilleur chemin et de ne pas refléter la dynamique de l'information apportée par les étudiants. Trop lent, il risque de ne pas converger vers un bon chemin.

**Le contrôle** conditionne la façon dont le comportement de la procédure peut être influencé. Les procédures implémentées vont de "entièrement automatique" à "complètement paramétrable" en passant par "assujettie à 1 ou 2 paramètres". Plus il y a de paramètres, plus la liberté est grande, mais plus le calibrage est pénible.

**Le signal** qu'envoient les arcs à travers leur mesure de *fitness* doit être analysé avec attention. Dans cet algorithme, la recherche d'une solution de qualité procède par la modification graduelle des valeurs de *fitness*. Le choix des méthodes de sélection à base de rang peut entraîner la perte d'une information précieuse, à moins que de grandes disproportions soient rapidement observées.

Il faut donc choisir une procédure et ses paramètres de manière compétente, en cherchant à obtenir un compromis raisonnable entre ces trois intérêts. La plupart des expériences ont été conduites avec un tournoi de pression de sélection  $s = 2$ .

#### 4.2.5 Affichage des suggestions trouvées

Une fois que la sélection a été faite, il faut ensuite proposer les arcs sélectionnés pour que l'utilisateur décide ou non de les suivre.

Dans le système PARASCHOOL, quatre choix sont proposés à l'élève (*cf* fig. 4.7).

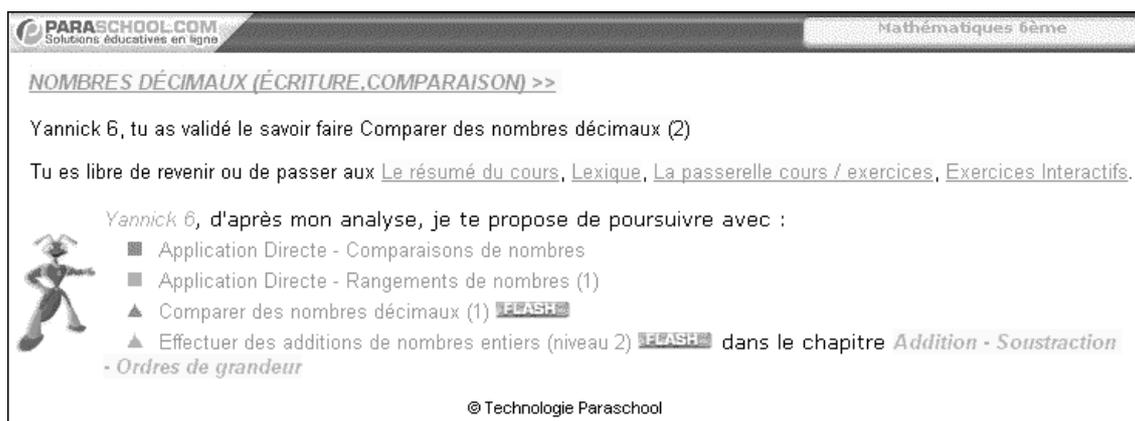


FIG. 4.7 – Propositions faites à l'élève.

En fait, les quatre choix ne sont pas tous issus de la méthode de sélection. Seul le premier choix est le résultat de la méthode de sélection. Les trois autres choix sont les trois meilleures solutions (meilleures *fitness*) en dehors de l'arc déjà sélectionné. Normalement, c'est le hasard qui guide la méthode de sélection. Donc il existe une chance minimale, mais non nulle, de voir sortir les quatre plus mauvaises solutions. Comme le système est de type *commercial*, l'équipe pédagogique a jugé plus *sûr* de n'afficher qu'un choix issu de la méthode de sélection et les trois autres de manière déterministe. En contrepartie de cette *sécurité*, l'arc issu de la méthode de sélection est quand même placé en première position. Cela permet ainsi d'accroître sa chance d'être sélectionné, car inconsciemment, un utilisateur a tendance à cliquer sur la première solution.

**Remarque :** Il est important de noter que le résultat de l'item en cours n'est pas pris en compte dans le calcul de la *fitness*. Il semblerait logique de proposer un ensemble différent d'items en fonction de la réussite ou non de l'élève. En fait, il existe déjà un système de remédiation implanté dans le site de PARASCHOOL. Ce système détecte, après analyse de chaque réponse, les items liés aux erreurs du candidat. Ce dernier se voit alors proposer, dans le cas où il ne valide pas l'exercice, un ensemble d'exercices à revoir pour valider ses connaissances déficientes. Ainsi, le paradigme d'OCF proposé initialement n'avait pas pour but d'effectuer de remédiation. Son but était seulement de proposer une suite logique à l'item en cours, quel que soit le résultat de l'élève.

### 4.3 Mise en place de l'algorithme sur le site de soutien

La mise en place effective du système sur le site de PARASCHOOL s'est effectuée en 4 phases.

#### 4.3.1 Première phase : des petits tests

Pour cette première phase, les expériences de simulation sont conduites sur trois graphes types, dans l'ordre suivant :

1. Des graphes conçus à la main, aléatoirement, avec une connectivité raisonnable et une allure voulue typique, pour vérifier le comportement général du système.
2. Des graphes conçus à la main présentant des cas dégénérés (graphes linéaires, cycles, voies sans issue, etc.) pour s'assurer de la robustesse de l'algorithme aux conditions limites.

- Un graphe exemple réel conçu par l'équipe pédagogique de PARASCHOOL. Il s'agit du chapitre portant sur le calcul vectoriel, un cours donné en classe de mathématiques au niveau seconde. Il s'agit d'un graphe de taille moyenne (20 nœuds, 47 arcs) ayant une réelle signification pédagogique.

Pour simuler les succès et échecs des élèves, chaque item des différents graphes se voit attribuer un niveau de difficulté, aléatoirement entre 0 et 1. De même, les étudiants sont simulés par des entités virtuelles qui parcourent le graphe en suivant le guidage du système. Chacune de ces *fourmis* se voit attribuer une valeur comprise entre 0 et 1 représentant sa force. Par exemple, si une fourmi ayant une force de 0.86 arrive sur un nœud de difficulté 0.74, elle réussit alors le nœud ( $0.86 > 0.74$ ) et libère en conséquence sur le chemin emprunté des phéromones de succès ( $\alpha, \alpha/2, \dots$ ).

Lors de cette première phase, le comportement du système fut en adéquation avec les caractéristiques souhaitées, c'est-à-dire stabilité et robustesse.

### 4.3.2 Deuxième Phase : un cas emblématique

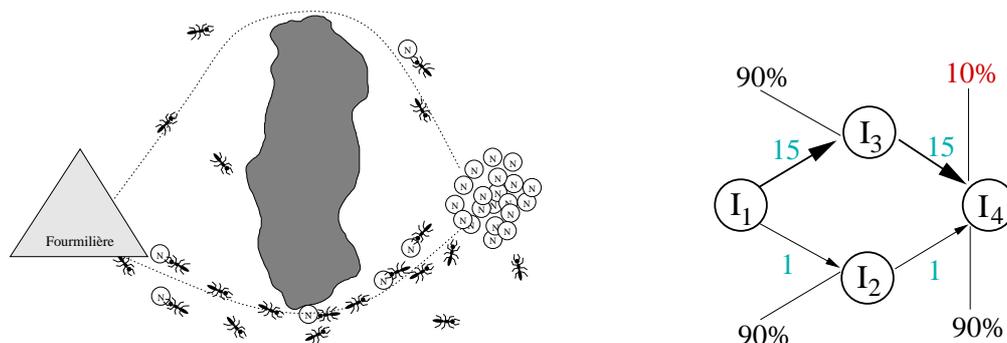


FIG. 4.8 – Transposition du modèle naturel (figure de gauche) vers le modèle pédagogique (figure de droite). Ce dernier représente un graphe constitué de quatre items ( $I_1, I_2, I_3$  et  $I_4$ ) et de deux chemins pédagogiques (l'arc  $I_1 \rightarrow I_3$  suivi de  $I_3 \rightarrow I_4$  et l'arc  $I_1 \rightarrow I_2$  suivi de  $I_2 \rightarrow I_4$ ). Le nombre sur chaque arc représente le poids pédagogique  $W$  et le pourcentage représente le taux de réussite des élèves s'ils empruntent l'arc concerné.

Durant cette deuxième phase, il est nécessaire de vérifier une des caractéristiques attendues de l'heuristique choisie, celle des colonies d'insectes sociaux, c'est-à-dire la capacité à corriger les incohérences lorsqu'elles surviennent (adaptativité), ou les erreurs de conception (mauvais poids pédagogique). Le système doit savoir être autonome et intelligent vis-à-vis d'un environnement peut-être piégé ou ayant des choix passés rendus obsolètes.

Pour illustrer cette capacité et vérifier que le système proposé la possède bien, l'exemple traditionnellement pris chez les fourmis (*cf.* figure 4.8 gauche) est transposé en termes pédagogiques et illustré par la figure 4.8 droite. Partant de l'exercice  $S$  et pour aller à l'exercice  $E$ , les fourmis-élèves ont deux possibilités : passer par l'exercice  $I_b$  ou par l'exercice  $I_g$ . L'équipe pédagogique a cru bon d'encourager le passage par l'exercice  $I_b$  en lui attribuant un poids pédagogique  $W$  supérieur (15 contre 1). Les élèves ont donc une probabilité 15 fois supérieure de se voir proposer l'arc  $S \rightarrow I_b$  que l'arc  $S \rightarrow I_g$ . Or, le taux d'échec à l'exercice  $E$  est largement supérieur (90 %) lorsque les élèves viennent de l'exercice  $I_g$  que lorsqu'ils viennent de l'exercice  $I_b$  (10 %). Il revient donc à la colonie de s'apercevoir de cette anomalie et d'y remédier progressivement par l'action conjuguée de la libération et de l'évaporation des phéromones d'échec et de succès. Si le

système fonctionne correctement, les probabilités d'arcs initiaux  $S \rightarrow I_b$  et  $S \rightarrow I_g$  doivent donc s'inverser pour maximiser les succès futurs.

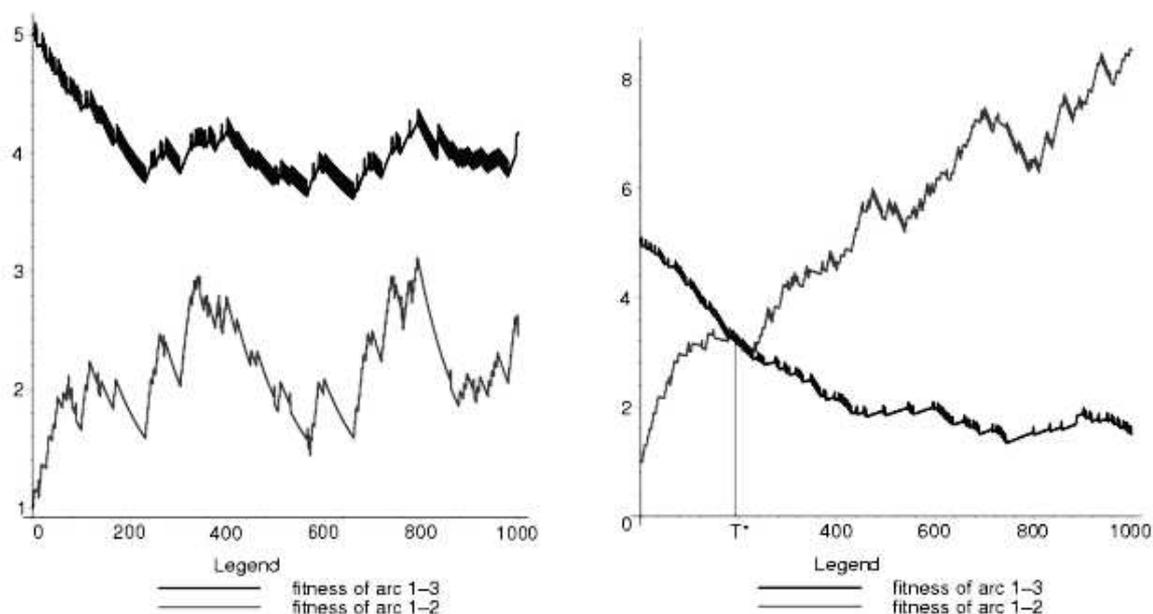


FIG. 4.9 – [Graphes extraits de [Sem03a]] Pour les deux expériences, la valeur de *fitness* des deux arcs ( $I_1 \rightarrow I_2$  et  $I_1 \rightarrow I_3$ ) est affichée en fonction des itérations de l'expérience. Pour la courbe de droite, un taux d'évaporation de 0.999 a été appliqué, alors que le taux d'évaporation a été fixé à 0.99 pour l'expérience de gauche. ( $\alpha = 0.1$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 1$ ,  $\omega_3 = -3$ )

L'expérience (cf. figure 4.9) montre que le comportement souhaité (une inversion stable dans le temps des mesures de *fitness* des deux arcs) n'apparaît pas systématiquement et qu'il est important de se situer dans une bonne zone de paramétrage. Si, par exemple, le taux d'évaporation est trop élevé ( $\tau = 0.99$ ), le dépôt de phéromones n'a pas le temps de faire effet et les mesures de *fitness* ne cessent d'osciller, sans jamais ni s'inverser ni se stabiliser (cf. fig. 4.9 gauche). Lorsque  $\tau$  passe de 0.99 à 0.999 (soit une évaporation plus lente) les mesures des deux arcs s'inversent et cette inversion perdure (cf. fig. 4.9 droite). Le mauvais choix pédagogique est donc corrigé par les échecs successifs des élèves qui passent par le chemin conseillé, en comparaison de ceux qui prennent l'autre chemin et qui réussissent.

Une deuxième expérience de calibration est conduite. S'il est important de montrer cette possibilité d'inversion des mesures incohérentes, il est plus intéressant encore d'avoir un minimum de contrôle sur les caractéristiques de cette inversion, en particulier sur sa vitesse. Cette inertie à réagir aux informations apportées par l'interaction est caractérisée par une valeur nommée  $t^*$  et qui représente l'itération à laquelle l'inversion des deux mesures de *fitness* s'est produite.

**Remarque :** Le nom de cette valeur  $t^*$  est choisi par analogie avec le *takeover time* de la littérature des algorithmes génétiques, qui mesure le temps qu'il faut au meilleur individu pour remplir la population sous l'effet du seul opérateur de sélection. Il s'agit d'un moyen de mesurer la pression sélective, autrement dit la réactivité de la population génétique à la distribution de la *fitness* parmi ses membres, dans des conditions réduites au minimum pour faciliter la compréhension d'un phénomène précis, mais fondamental pour le succès de l'algorithme.

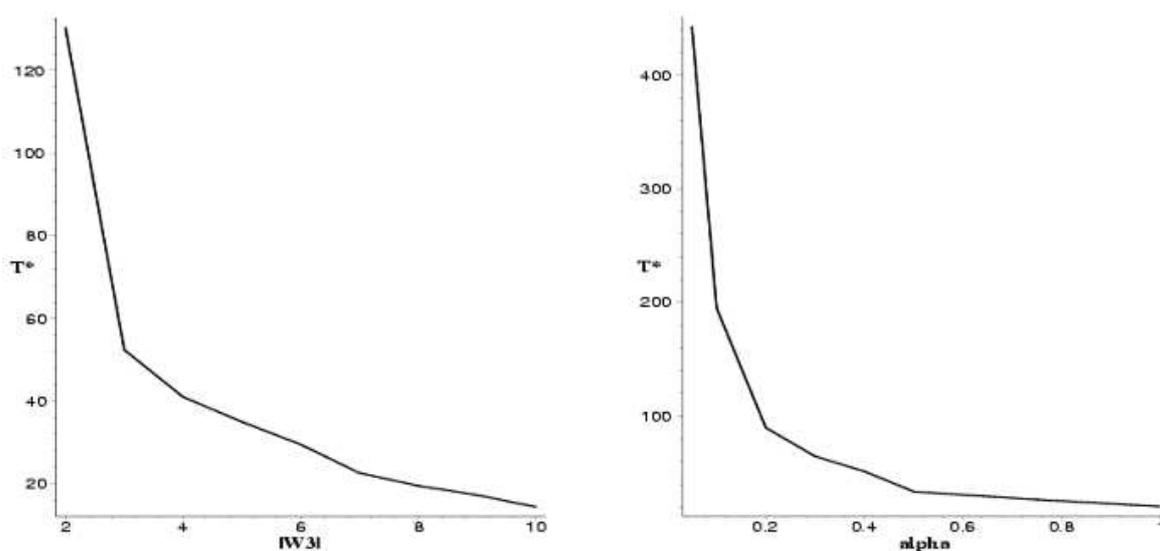


FIG. 4.10 – [Graphes extraits de [Sem03a]] Pour la courbe de gauche, le temps d'inversion  $t^*$  est affiché en fonction de la valeur absolue du poids des phéromones négatives  $\omega_3$  ( $\alpha = 0.1$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 1$ ,  $\tau = 0.999$ ). La courbe de droite montre le temps d'inversion  $t^*$  en fonction de la quantité de phéromones déposée sur les arcs  $\alpha$  ( $\omega_1 = \omega_2 = 1$ ,  $\omega_3 = -3$ ,  $\tau = 0.999$ )

Les courbes 4.10 permettent de choisir, en fonction d'indicateurs pédagogiques, un jeu de paramètres initiaux, dans le but d'obtenir la vélocité souhaitée. Cette inertie est un paramètre clé. Un système dynamique trop lent ne peut pas réagir aux variations de l'environnement pédagogique et présente une adaptativité retardée et non pertinente. Inversement, un système trop rapide peut devenir chaotique, trop sensible au bruit et s'avérer tout aussi peu pertinent.

**Remarque :** Les valeurs numériques trouvées ( $\alpha = 0.1$ ,  $\omega_1 = \omega_2 = 1$ ,  $\omega_3 = -3$ ,  $\tau = 0.999$ ) ne peuvent que constituer des valeurs initiales aux différents paramètres, puisque les expériences sont conduites sur un graphe réduit et sorti de son contexte réel et pédagogique.

### 4.3.3 Troisième Phase : Mode silencieux

Sur les bons résultats aux tests de simulation, le système a été intégré à l'architecture du site web de PARASCHOOL. Passée la phase d'intégration, forcément délicate dans le cadre d'une architecture objet distribuée, le système a été mis en application en mode *silencieux*. Cela signifie que le système ne fait qu'observer les parcours des élèves sans leur faire de suggestions d'items. Chaque étudiant est bien associé à une fourmi qui libère des phéromones, mais les arcs, issus des procédures de sélection, ne sont pas proposés aux étudiants, qui continuent à utiliser le logiciel PARASCHOOL comme si de rien n'était. Un tel mode de fonctionnement permet de se faire une idée de son bon fonctionnement en conditions réelles :

- Le système complet fonctionne sans provoquer le moindre ralentissement, ni d'un point de vue temps de calcul, ni d'un point de vue système, notamment en termes d'échanges avec la base de données.
- Le graphe se structure de manière autonome, sans que les élèves soient influencés. Il est intéressant d'observer la topologie émergente seule et de la comparer à celle dictée par les professeurs.

- L'utilité du système comme outil d'audit du contenu pédagogique apparaît. Une observation rudimentaire de la base et de ses tables de phéromones permet déjà d'observer l'émergence de nœuds singuliers<sup>10</sup>.

#### 4.3.4 Quatrième Phase : Mise en service effective

Une fois que la fourmilière a montré ses propriétés de stabilité en mode *silencieux*, l'équipe pédagogique a décidé de mettre en route le système en activant l'affichage des suggestions trouvées par le système par OCF (*cf.* fig. 4.7).

Le système a conservé sa stabilité. Les élèves ont commencé à suivre les suggestions faites par OCF. Il s'avère que plus de 25% des élèves suivent ces suggestions. Il reste un peu moins de 25% des élèves qui continuent à suivre une démarche issue des professeurs (mode "agenda"<sup>11</sup>, par exemple). Le reste (c'est-à-dire à peu près 50% des élèves) continue à suivre une navigation *libre* sur le site de PARASCHOOL. C'est cette partie des élèves qu'il faut convaincre d'utiliser le système de suggestions (en le rendant plus ludique, par exemple).

Après plusieurs mois de fonctionnement, les premières analyses ont pu être faites, mettant ainsi en évidence certains résultats qui seront développés dans la section suivante.

### 4.4 Analyse des premiers Résultats

#### 4.4.1 Analyse du taux d'évaporation

Cette analyse reprend le petit cas test 4.8 droite qui a permis de régler les paramètres initiaux de l'algorithme. Les données de passage ont été collectées sur un période d'un an et elles sont réutilisées via la moyenne mensuelle des passages. Ainsi, en gris, le nombre de passages journalier est affiché et les deux courbes noires représentent la valeur de *fitness* du mauvais arc conseillé par le professeur (en gras) et du bon arc créé par l'élève. L'idéal est que le système puisse inverser la *fitness* de ces deux courbes.

L'idée des deux graphes 4.11 haut et 4.11 bas est donc de voir l'influence globale du taux d'évaporation sur la fonction de *fitness*, en fonction du passage réel des élèves, tout en conservant cette propriété d'inversion.

**Remarque :** Grâce à sa structure, la fonction de *fitness* permet de bien appréhender la quantité de phéromones stockée sur les arcs (seule partie variable au cours du temps).

Pour la figure 4.11 haut, l'inversion se passe assez rapidement, mais l'évaporation semble très lente : L'inversion est stable au cours du temps, mais les phéromones ont tendance à beaucoup s'accumuler durant les mois de septembre et octobre.

La figure 4.11 bas montre une simulation avec un taux d'évaporation plus important (0.974). Les phéromones n'ont pas tendance à s'accumuler aussi vite qu'avec un taux 0.999, même si la valeur de *fitness* reste assez grande pour le mois d'octobre. Ce résultat incite à utiliser un taux d'évaporation plus important, mais sur le graphe 4.11 bas, durant les grandes vacances scolaires, les phéromones ont par contre tendance à s'évaporer très vite, ce qui signifie que le mauvais chemin choisi par le professeur reprend le dessus à la fin des vacances. Augmenter le taux d'évaporation est donc équivalent à une perte d'informations stigmergiques si le thème n'est pas assez utilisé.

---

<sup>10</sup>Des exercices triviaux ou trop difficiles affichent très vite une disproportion importante entre  $\varphi^+$  et  $\varphi^-$ .

<sup>11</sup>Un tuteur suit un élève et lui assigne des tâches à faire dans son agenda.

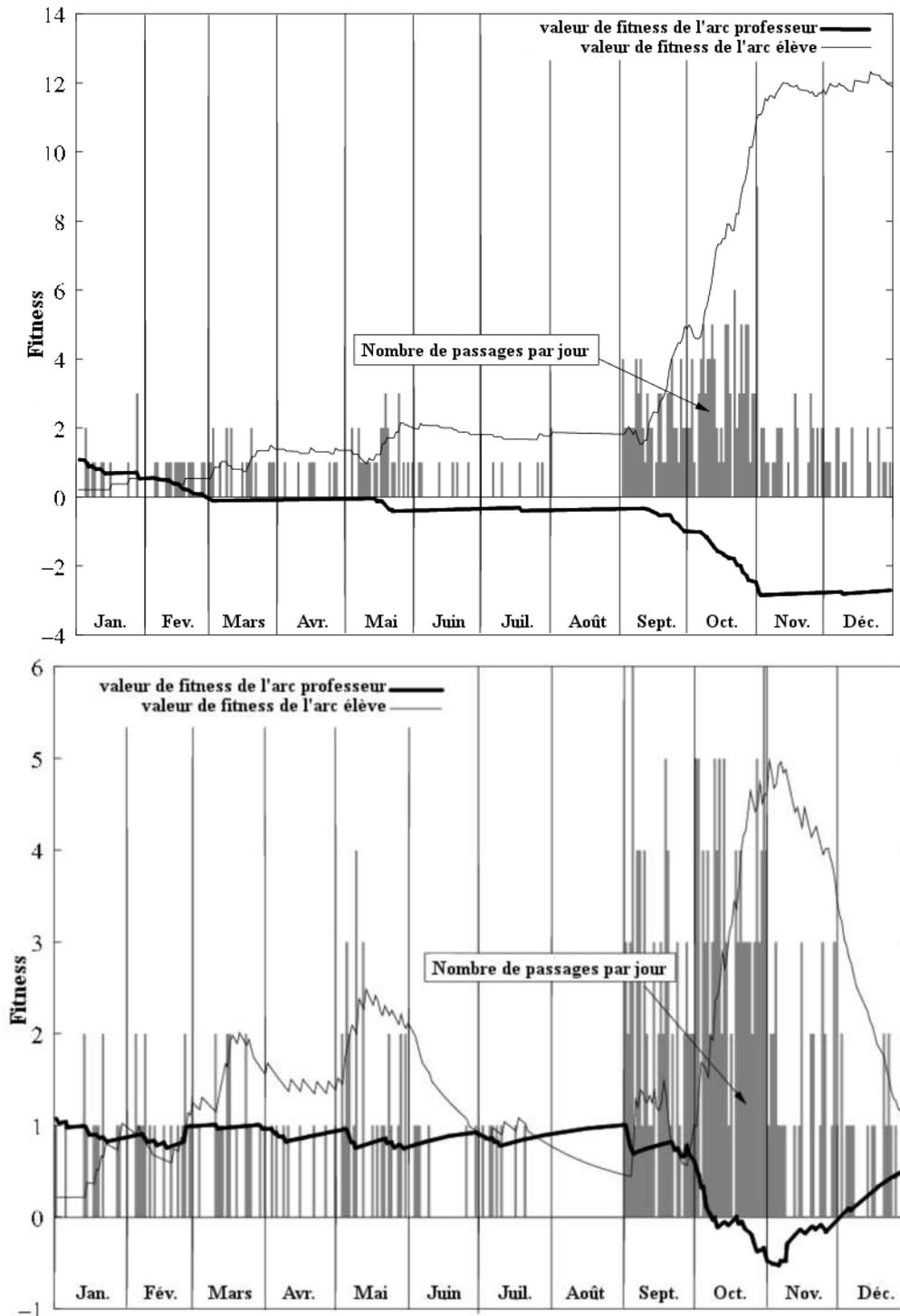


FIG. 4.11 – En se fondant sur le passage mensuel des élèves au cours d'une année, la figure montre l'évolution de la *fitness* des deux arcs du petit cas test (cf. fig. 4.8 droite), avec un taux d'évaporation de 0.999 (haut) et de 0.974 (bas). La courbe en gras représente l'arc *professeur* mal suggéré et l'autre courbe représente l'arc *élève* qui maximise le succès. Dans le premier cas, le système reste inversé durant les vacances alors que, dans le deuxième cas, l'évaporation plus importante rétablit la prépondérance de l'arc *professeur* (courbe en gras) durant les vacances.

Un tel souci n'est pas rencontré avec des fourmis artificielles qui sont continuellement actives, à l'inverse des élèves qui ont des périodes de travail discontinues :

- Durant les vacances scolaires, les élèves peuvent soit travailler à fond sur le site, soit ne plus venir jusqu'à la prochaine rentrée. En été, c'est plutôt le deuxième cas qui se vérifie.
- Le phénomène est identique mais atténué pour les fins de semaines.
- Enfin les professeurs suivent les programmes de l'Éducation Nationale. Ainsi, au cours de l'année scolaire, des vagues d'élèves étudient certains thèmes au profit d'autres thèmes. Cette dynamique des thèmes change ainsi au cours des mois. Mais surtout un thème précis n'est abordé qu'une fois par an.

Ces discontinuités temporelles rendent le réglage du taux d'évaporation ardu, voire impossible, car les phéromones stockées sur les arcs s'évaporent durant les périodes d'inactivité. Cette perte d'information problématique soulève alors la question :

◇ Le processus d'évaporation est-il bien adapté à un système où les fourmis artificielles sont en fait des utilisateurs humains ?

#### 4.4.2 Analyse de la fonction de *fitness*

##### Thème 377 : Nombre Décimaux

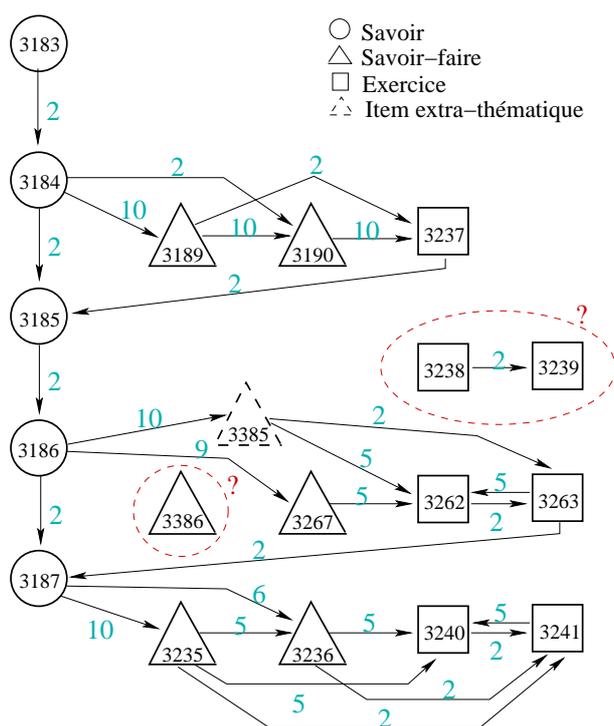


FIG. 4.12 – Thème 377 : Structure et poids pédagogiques.

L'analyse de ce thème (cf. fig. 4.12) va permettre de mieux comprendre le fonctionnement local de la fonction de *fitness*. Il traite des nombres décimaux (écriture, comparaison) dans le cursus Mathématiques sixième. Il possède 18 items dont 5 savoirs, 6 savoir-faire et 7 exercices. Il présente 5 blocs identifiés chacun par un item de cours (en gras) suivi (ou non) par une série de savoir-faire et d'exercices :

1. (3183) : Écriture décimale d'un nombre.
2. (3184-3189-3190-3237) : Comparaison de nombres décimaux + 2 savoir-faire + 1 exercice.
3. (3185-3238-3239) : Rangements de nombres décimaux + 2 exercices.
4. (3186-3386-3267-3262-3263) : Nombres décimaux et droite graduée + 2 savoir-faire (dont un savoir-faire qui ne fait pas directement partie du thème 377 (en tirets)) + 2 exercices.
5. (3187-3235-3236-3240-3241) : Nombres décimaux et valeurs approchées (troncature, arrondi) + 2 savoir-faire + 2 exercices.

Ce thème semble ainsi bien structuré en blocs. Après chaque cours, il y a un ou deux savoir-faire, puis un ou deux exercices. Chaque bloc semble constituer un ensemble bien formé et il est donc intéressant de se demander si l'optimisation par colonie de fourmis va réorganiser ce thème. L'idéal est un réagencement des blocs plutôt que des items eux-mêmes. Mais il est impossible pour l'algorithme de détecter ces structures de blocs sans connaissance *a priori*.

En revanche, quelques anomalies (cerclées en tirets sur la figure 4.12) semblent s'être glissées dans ce thème :

1. Le bloc "Rangement de nombres décimaux" (item cours 3185) n'est relié à aucun exercice ou savoir-faire. En effet, les deux exercices associés (3238 et 3239) ne sont pas reliés au graphe pédagogique par des arcs professeurs ( $W > 1$ ).
2. L'item de savoir-faire 3386 est lui aussi isolé. À la place, l'item 3186 est connecté par un arc de poids 10 à l'item de savoir-faire 3385 (ce dernier est en tirets, car il n'appartient pas directement au thème 377, mais à un thème connexe<sup>12</sup>).
3. De plus certains arcs professeurs (3183-3184, 3237-3185, ...) ne semblent pas être assez mis en valeur par leur poids pédagogique.

Au final, les fourmis semblent les bienvenues pour corriger ces petites irrégularités.

**Le thème en chiffres** Pendant la durée de la première analyse en 2003 (9 mois), il y a eu 339 utilisateurs qui sont passés sur le thème pour atteindre en moyenne 90% de réussite sur les 1 900 items effectués. La répartition des élèves en fonction du taux de réussite se fait ainsi : 63% des utilisateurs ont eu plus de 90% de réussite, alors que 30% ont eu entre 50 et 90% de réussite et seulement 7% sont en dessous des 50%. Par item, le taux de réussite se situe entre 80% et 100% avec seulement deux items qui frôlent les 70%. Donc, sur ce thème, les items ont tendance à être un peu faciles.

Type d'arc	Arcs <i>professeurs</i>	Arcs <i>élèves</i>	Total	Intra-cursus
Entrants	2	108	110	106
Sortants	1	168	169	152
Intérieurs	30	186	216	216

TAB. 4.1 – Répartition des arcs dans le thème 377.

Le tableau 4.1 décrit la répartition des arcs pour le thème 377. Le graphe professeur reste confiné, avec 30 arcs, dans le thème lui-même. Par contre, un grand nombre d'arcs élèves ont été créés aussi bien à l'intérieur du thème qu'en connexion avec un autre thème. Les élèves ont

<sup>12</sup>Un item appartient par essence à un thème, mais peut figurer dans plusieurs thèmes connexes. Ainsi le thème d'origine de l'item 3385 (Placer un point d'abscisse donnée sur une droite graduée) n'est pas le thème 377 (Nombres décimaux), mais le thème 382 (Nombres relatifs – repérage).

tendance à rester à l'intérieur d'un cursus<sup>13</sup>. Il faut espérer que les arcs professeurs ne soient pas submergés par tous les arcs élèves créés . . .

Dans ce thème, certaines journées présentent à certains moments plus d'une cinquantaine d'items visités. C'est le résultat d'un professeur qui a utilisé le site de PARASCHOOL pour effectuer avec sa classe une séance de Travaux Pratiques en salle informatique. De plus ces "grosses" journées sont souvent séparées de six jours. Souvent les classes suivent un parcours imposé par le professeur. Ainsi sur le thème 377, les participants à la séance de TP ne sont pas entrés par l'item de cours initial 3183. Ils sont directement allés sur les premiers savoir-faire (3189 et 3190) puis sur les exercices (3237, 3238, 3239, 3262, 3263, 3240 et 3241). Ce type de navigation soulève la question :

◊ Est-ce que les groupes de TP affectent le graphe ?

À la vue des quantités de phéromones déposées, le graphe semble être affecté. L'idée est de savoir si les élèves *individuels*<sup>14</sup> ne sont pas pénalisés par le passage de ces classes. En fait, le dépôt de phéromones est bien effectif. Il est facile d'admettre que, pour les items visités, un grand dépôt de phéromones est effectué, présentant ainsi beaucoup d'informations pour le chemin emprunté par la classe. Les autres chemins doivent attendre le passage d'élèves *individuels* pour mettre à jour leurs informations stigmergiques. Mais on peut aussi se dire que les élèves individuels, dont les items proposés ont été influencés par le passage d'un groupe de TP, ont bénéficié des suggestions du professeur sur le sujet exploré . . .

Une autre question est de savoir s'il y a suffisamment d'utilisateurs pour que l'algorithme des fourmis puisse tourner correctement. Sur les 288 jours de l'analyse, seulement 132 jours sont effectifs (au moins 1 item fait dans la journée), ce qui représente environ 46% des journées. Là dessus, 28% des journées ont vu passer plus de 5 utilisateurs. Il reste donc 72% des journées *effectives* où le passage était inférieur à 5. Ce nombre de passages paraît faible, mais l'échelle de temps (1 année, avec une évaporation journalière) est très grande. Du coup la question soulevée est :

◊ Est-ce que l'échelle de temps et le nombre de passages sont en adéquation avec le paradigme d'OCF ?

**Analyse de la navigation** La figure 4.13 représente la navigation actuelle d'un élève qui débute sur l'item 3183 (premier item de cours) et qui suit à chaque fois l'arc possédant la meilleure *fitness*. La navigation de l'élève se visualise ainsi par les chiffres entre parenthèses au dessus de chaque item. Pour chaque item parcouru, les trois arcs possédant les meilleures *fitness* ont été mis en valeur (flèche pleine pour le premier, flèche en tirets pour le deuxième et flèche en pointillés pour le troisième). Si l'arc concerné n'existe pas sur le graphe *professeur*, il a été dessiné par une flèche en pointillés. Ces flèches représentent ainsi les arcs *élèves*.

Exemple : Depuis le premier item 3183, le système suggère d'aller en premier vers l'item 3235, en deuxième vers l'item 3141 et en troisième vers l'item 3185.

Ainsi du premier item 3183 (*définition des nombres décimaux*), le système fait *sauter* l'élève directement à l'item 3235 (*savoir-faire sur la troncature des nombres décimaux*).

◊ Pourquoi les fourmis ont convergé vers cette solution ?

Cette solution n'est forcément pas *mauvaise* en soi, car toute succession d'items peut se révéler bonne. Néanmoins, il peut paraître un peu regrettable d'aller directement à la fin du

---

<sup>13</sup>Un cursus est une association entre une matière et un niveau (par exemple, mathématiques 6ème).

<sup>14</sup>Par opposition aux élèves qui naviguent dans le flot d'une classe.

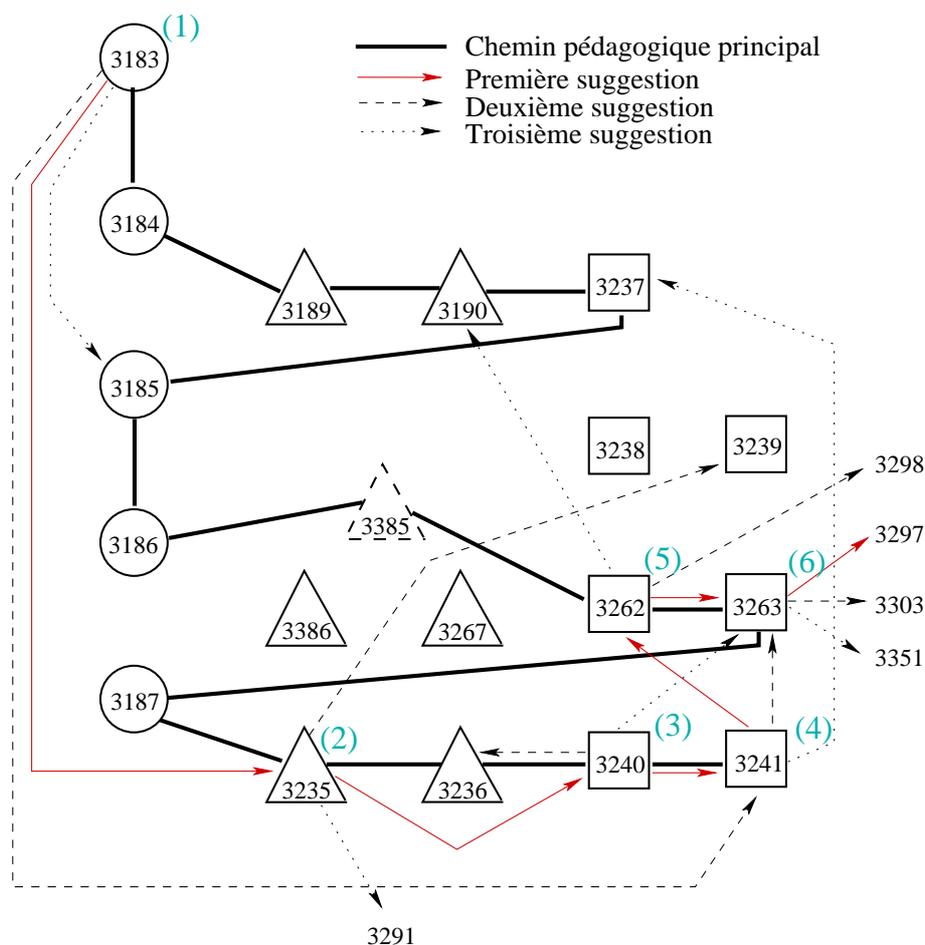


FIG. 4.13 – Thème 377 : Exemple de navigation d'un élève qui a la possibilité à chaque fois de choisir l'arc possédant la meilleure *fitness*. Pour chaque item parcouru, les trois meilleurs arcs sont affichés (flèche pleine pour le premier, flèche en tirets pour le deuxième et flèche en pointillés pour le troisième). Les chiffres entre parenthèses rappellent le chemin emprunté par l'élève. Pour la comparaison, le chemin pédagogique principal (c'est-à-dire possédant les poids pédagogiques  $W$  les plus forts) est marqué en gras. Attention ! la *fitness* tient compte de l'historique de navigation de l'élève (cf. différences avec fig. 4.14).

thème, en évitant de cette manière une partie des items. Une analyse est donc utile afin de cerner les raisons de ce raccourci vers la fin du thème, et de savoir si un nouveau paramétrage du système est nécessaire.

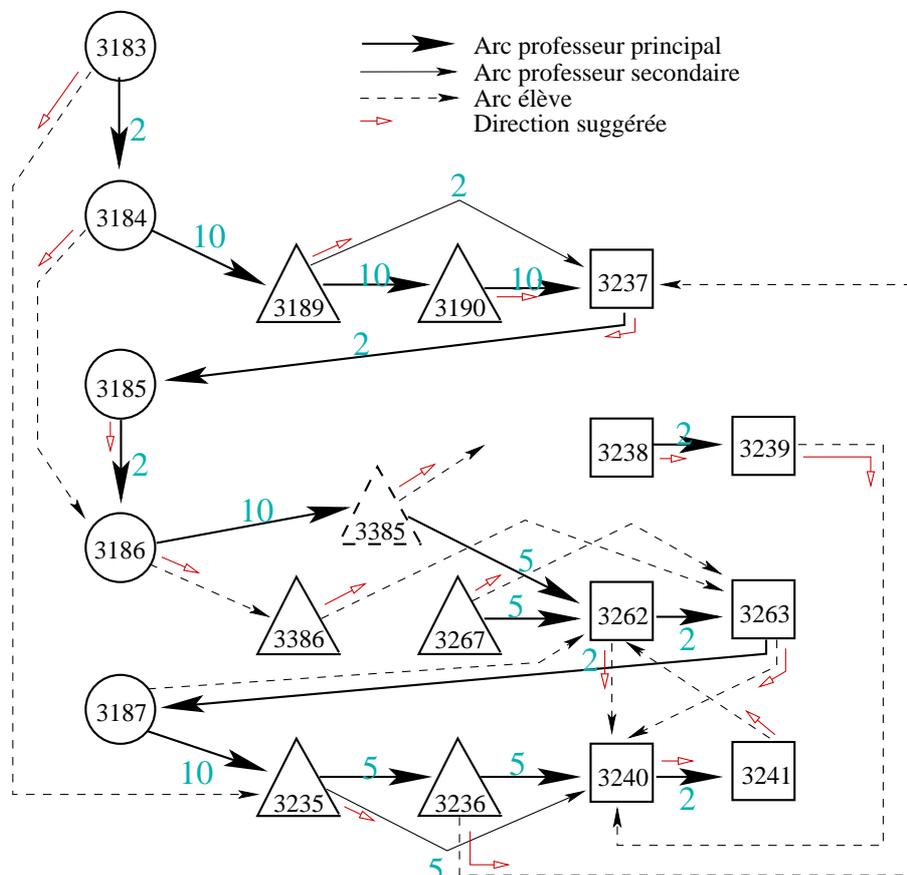


FIG. 4.14 – Thème 377 : Direction principale suggérée par le système à chaque item, c'est-à-dire l'arc possédant la meilleure *fitness*. Pour la comparaison, l'arc professeur dominant (s'il existe) a été marqué en gras.

1. L'item 3235 contient une animation FLASH, repérée par un pictogramme. Les élèves ont pu donc être intéressés par l'aspect ludique d'une telle animation. En regardant la figure 4.14 qui présente les directions principales<sup>15</sup>, aucun comportement émergent ne semble choisir les items contenant une animation FLASH.
2. L'item *troncature* peut susciter un intérêt particulier pour les élèves (par exemple une notion communément mal vue en cours ou pas très bien étudiée). Mais est-ce le cas pour tous les élèves en même temps ?
3. Une raison plus plausible peut être que l'item 3235 est plus *facile* que les autres items proposés. En effet le dépôt de phéromones d'échec  $\varphi^-$  est quasiment nul sur cet arc. Pour en arriver à un tel état, l'item pointé doit être nécessairement *facile*. Mais, du fait de la *retropropagation*, il faut aussi que les items qui suivent ne soient pas trop compliqués. En regardant les items du même bloc "troncature, arrondi"<sup>16</sup> [3187-3235-3236-3240-3141], il est

<sup>15</sup>La première suggestion faite par le système à partir de chaque item.

<sup>16</sup>Ce sont ces items qui ont le plus de chances d'être parcourus après l'item 3235.

flagrant que les taux de réussite sur ces items sont assez élevés. De plus, le parcours proposé par les fourmis a vraiment tendance à maximiser ce taux de réussite (9 succès/0 échec pour le premier arc 3183-3235, 10 succès/0 échec pour le deuxième arc 3235-3240, 42 succès/4 échecs pour le troisième 3240-3241, ...). Les fourmis recherchent donc la *facilité*, ce qui n'est pas extraordinaire en soi, car l'optimisation par colonie de fourmis est utilisée avec succès pour trouver des chemins optimaux, pouvant être caractérisés dans cette application, comme les chemins les plus courts composés des items les plus faciles permettant de valider une leçon.

◊ Faut-il poursuivre avec le système mis en place ?

Le système a mis en évidence le fait que le bloc "troncature, arrondi" [3187-3235-3236-3240-3141] possède les items les plus simples. En analysant aussi le premier bloc "comparaison" [3184-3189-3190-3237], il s'est avéré que celui-ci possède des items plus compliqués<sup>17</sup> en moyenne, ce qui, par rétropropagation, a pénalisé le premier arc professeur (3183→3184) et a donc obligé le système à trouver une autre solution pour les élèves. Cette analyse a permis à l'équipe pédagogique de restructurer le thème en mettant le bloc "troncature, arrondi" en premier, afin de mettre les élèves en confiance. Cette restructuration permet de montrer la grande utilité d'un système de suggestions fondé sur un algorithme d'OCF pour l'analyse fine du comportement des élèves (et l'amélioration de l'enchaînement des exercices).

◊ D'un point de vue pédagogique, est-ce que les suggestions faites ont un sens ? En d'autres termes, est-ce que le but est de permettre aux élèves de valider une leçon en maximisant la facilité (chemin optimal au sens "le plus facile") ?

En analysant un autre thème (*Vecteurs*) en Mathématiques seconde, le choix des fourmis semble suivre les items de cours, tout en court-circuitant tous les exercices où le taux d'échec est plus important. Du coup, les élèves ne se confrontent nullement aux difficultés et ne mettent pas en pratique les notions vues en cours.

Or toute pédagogie utilise l'apprentissage par l'erreur : il faut que les élèves se confrontent à un minimum de difficulté afin de progresser. Il est donc nécessaire de modifier le but pédagogique, en adaptant la fonction de *fitness*.

L'équipe pédagogique a donc déterminé un taux de réussite pour que les élèves soient confrontés à des items difficiles, mais pas trop tout de même, pour ne pas les décourager. Le taux de réussite a été fixé à 60%. Ainsi, le système doit suggérer une succession d'exercices afin que les élèves aient 60% de chances de réussir, et 40% de chances d'échouer à un item.

◊ Faut-il contrôler les sorties de thèmes ?

En regardant les navigations suggérées par le système, il est facile remarquer que la fourmi sort assez rapidement du thème (au bout de 7 items, alors que le thème en contient une vingtaine). Le problème vient du fait que l'utilisateur arrive assez rapidement sur les items de fin de thème (3241, 3263, ...) qui possèdent très peu d'arcs revenant sur l'intérieur du thème. C'est pour cette raison que les utilisateurs ont tendance à sortir prématurément du thème. Faut-il contrôler ce comportement ? Si l'on s'en tient à l'idée pédagogique, la réponse est non. En effet, si l'élève échoue, il se voit proposer automatiquement l'item qui répond à sa question. Par contre, s'il réussit et qu'il arrive à un de ces exercices de fin de thème, cela signifie, en règle générale, qu'il vient de terminer un jeu d'exercices. Du coup, il est anormal de proposer à l'élève de reboucler sur le thème. Par contre, il faut essayer au maximum d'empêcher un élève de quitter prématurément

<sup>17</sup>Après analyse, certains exercices demandent d'enchaîner huit bonnes réponses pour être validés.

le thème, au risque qu'il enchaîne une succession de notions sans lien pédagogique apparent.

### Triple stratégie

La fonction de *fitness* est notamment modifiée afin de corriger la problématique rencontrée ci-dessus. Le cœur de cette nouvelle fonction est en fait fondé sur trois points :

**Adéquation à un taux de réussite :** Sur les suggestions de l'équipe pédagogique de PARASCHOOL, le nouvel objectif pédagogique a été fixé pour favoriser des chemins où l'élève moyen possède un taux de réussite de 60 / 40, le but étant que les élèves soient confrontés à des exercices difficiles leur permettant de progresser, tout en leur laissant une impression de succès pour les motiver. L'inadéquation  $\mathcal{I}$  à ce taux de réussite de 60% peut être alors définie par l'équation suivante :

$$\mathcal{I} = \begin{cases} w_2 \cdot \left( \frac{60}{100} - \frac{\varphi^+}{\varphi^+ + \varphi^-} \right) & \text{si } \frac{60}{100} \geq \frac{\varphi^+}{\varphi^+ + \varphi^-} \\ w_3 \cdot \left( \frac{\varphi^+}{\varphi^+ + \varphi^-} - \frac{60}{100} \right) & \text{si } \frac{60}{100} < \frac{\varphi^+}{\varphi^+ + \varphi^-} \end{cases} \quad (4.7)$$

où les poids  $w_2$  et  $w_3$  permettent d'avoir des pentes différentes au dessus et en dessous du taux de succès de 60%, afin qu'il soit préférable de se trouver au dessus des 60% qu'en dessous.

Le calcul de l'inadéquation maximum ( $\mathcal{I}_{max} = \max(w_2 \cdot 0.6, w_3 \cdot 0.4)$ ) permet alors d'obtenir le terme d'adéquation  $\mathcal{A}$  au taux de réussite de 60% :

$$\mathcal{A} = \frac{\mathcal{I}_{max} - \mathcal{I}}{\mathcal{I}_{max}} \in [0, 1] \quad (4.8)$$

**Valorisation du passage :** Comme le terme d'adéquation au taux de réussite  $\mathcal{A}$  ne rend pas compte du passage des élèves, un nouveau point a donc été ajouté afin de guider les utilisateurs vers des chemins présentant une certaine activité et donc d'écarter des arcs trop peu utilisés. Cette valorisation  $\mathcal{P}$  du passage, aussi comprise entre 0 et 1, prend la forme suivante :

$$\mathcal{P} = \begin{cases} w_1 \cdot (\varphi^+ + \varphi^-) & \text{si } w_1 \cdot (\varphi^+ + \varphi^-) < 1 \\ 1 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.9)$$

où  $\varphi^+$  et  $\varphi^-$  représentent les phéromones de succès et d'échec et où le poids  $w_1$  permet d'ajuster la quantité de phéromones au dessus de laquelle le passage est jugé suffisant.

**Confrontation entre pédagogie et phéromones :** Un autre point également testé consiste à réduire le poids pédagogique lorsqu'il y a suffisamment de passages de fourmis. Ainsi, le poids pédagogique est diminué proportionnellement au passage. Ce procédé permet de confronter la pédagogie à l'ensemble des élèves, l'idée étant de trouver le délicat équilibre entre les deux parties, afin de ne pas donner trop d'avantage à une partie (le système n'est plus dynamique sinon).

Au-delà d'un certain nombre de passages, le poids pédagogique n'a plus d'effet et les deux points précédents restent les seuls objectifs à atteindre. Si, par contre, le passage des fourmis se réduit, le poids pédagogique reprend de l'importance. Cet effet peut être vu comme une *force de rappel*, qui a tendance à revaloriser l'arc si la fréquentation diminue. Plus le poids pédagogique est important, plus la force de rappel sera importante. Le terme de confrontation  $\mathcal{C}$  prend alors la forme suivante :

$$\mathcal{C} = W.(1 - \mathcal{P}) \quad (4.10)$$

où  $W$  est le poids pédagogique et  $\mathcal{P}$  le terme symbolisant le passage des élèves, calculé à partir de l'équation 4.9.

La nouvelle expression de la fonction de *fitness* prend alors la forme suivante :

$$fitness = \mathcal{C} + w_4.\mathcal{A} + (1 - w_4).\mathcal{P} \quad (4.11)$$

où le poids  $w_4$  permet de régler l'importance relative des deux objectifs principaux, c'est-à-dire l'adéquation au taux de réussite de 60% ( $\mathcal{A}$ ) et la valorisation du passage ( $\mathcal{P}$ ). Le terme de confrontation entre la pédagogie et la collectivité ( $\mathcal{C}$ ) est plutôt vu comme un *bonus* accordé aux arcs jugés intéressants par les professeurs.

## Comportements

Pour les nouveaux résultats sur la nouvelle fonction de *fitness*, les deux petits cas test de la fig. 4.15 ont été modifiés pour être en adéquation avec les nouveaux objectifs pédagogiques. Principalement les taux de réussite virtuels qui étaient avant à 90% ont été modifiés à 60%.

Les deux graphes 4.16 présentent les résultats sur une moyenne de 200 essais. L'inversion s'effectue bien dans le cas où le professeur conseille le mauvais arc (*cf.* fig. 4.16 gauche) et perdure au cours du temps. Dans le cas contraire où le professeur conseille le bon arc (*cf.* fig. 4.16 droite), le système se stabilise bien et l'arc professeur n'est pas dérangé par le mauvais arc élève. Le système a donc le comportement attendu.

En analysant le comportement sur un seul essai, il est intéressant de noter que, dans le cas où le professeur a conseillé le mauvais arc (*cf.* fig. 4.17 gauche), la *fitness* de celui-ci se trouve plus près de la *fitness* du bon arc que dans l'autre cas (*cf.* fig. 4.17 droite). Comme le mauvais arc a un poids pédagogique important, le système fait passer principalement les élèves sur celui-ci, où ils déposent beaucoup de phéromones d'échec. La valeur de la *fitness* diminue par le fait que le dépôt de phéromones fait décroître l'importance du poids pédagogique et que les phéromones négatives engendrent un décalage par rapport au taux de réussite objectif. La *fitness* de l'arc élève devient prépondérante et le système propose alors aux élèves de passer plutôt par l'arc élève. L'activité sur l'arc professeur diminue donc, entraînant une évaporation des phéromones. Du coup, le poids pédagogique reprend de l'importance, entraînant une augmentation de la valeur de la *fitness* de l'arc professeur. Voilà en action la *force de rappel*. L'expérience montre que, dans les cas où l'arc professeur est mauvais, l'arc est maintenu, par le nouveau passage des élèves, dans des valeurs de *fitness* basses. Ainsi quand le professeur donne un poids pédagogique à un arc, il lui donne l'avantage d'être plus souvent sélectionné au début, mais aussi une *force de rappel* qui permet à l'arc de revenir se faire évaluer périodiquement s'il a été jugé mauvais.

Si par contre un arc ne possède pas de poids pédagogique et qu'il est jugé mauvais, il a tendance à rester avec des valeurs de *fitness* basses et donc à ne pas être trop visité (*cf.* les décroissances de la *fitness* de l'arc élève dans la fig. 4.17 droite, à cause de la diminution du passage des élèves).

## Comportements sur le site

La nouvelle fonction de *fitness* a été mise en place sur le site de soutien, permettant l'analyse des arcs en mode réel, et notamment ceux du thème 377. Pour tous les items de ce thème, les arcs professeurs sont souvent bien placés en terme de *fitness*, impliquant que les conseils donnés



FIG. 4.15 – Conseil pédagogique incorrect à gauche et correct à droite.

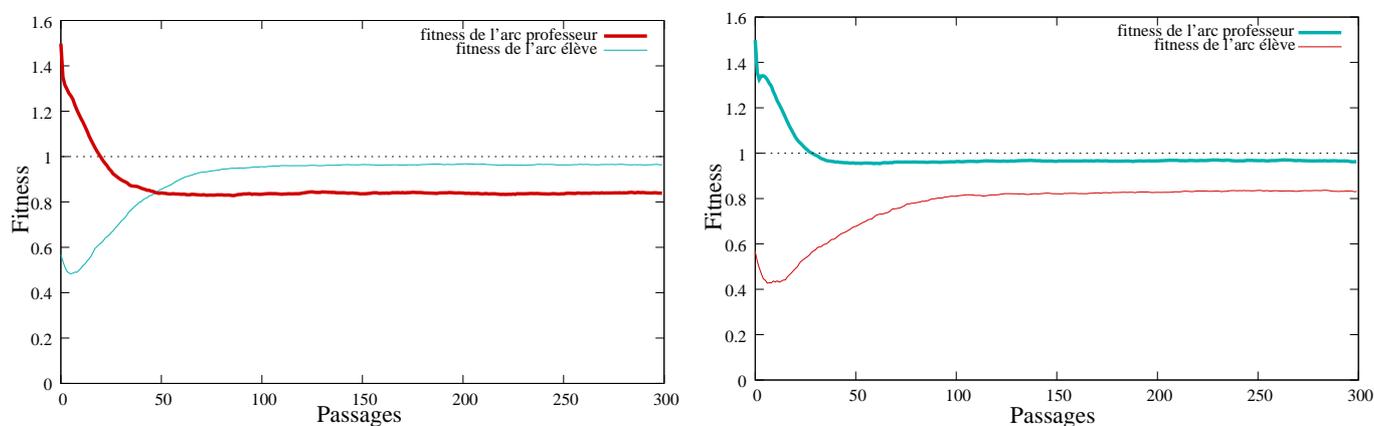


FIG. 4.16 – Comportement de la nouvelle fonction de *fitness* moyennée sur 200 essais : il y a une inversion après 45 passages si le mauvais arc a été conseillé et pas d'inversion sinon. L'échelle des abscisses indique le nombre de passages des élèves sur le premier item  $I_1$ . La raison en est que l'hypothèse du passage d'un utilisateur par jour a été prise lors de la phase de test. Cette hypothèse est en fait en adéquation avec le nouveau mode d'évaporation introduit dans le chapitre suivant.

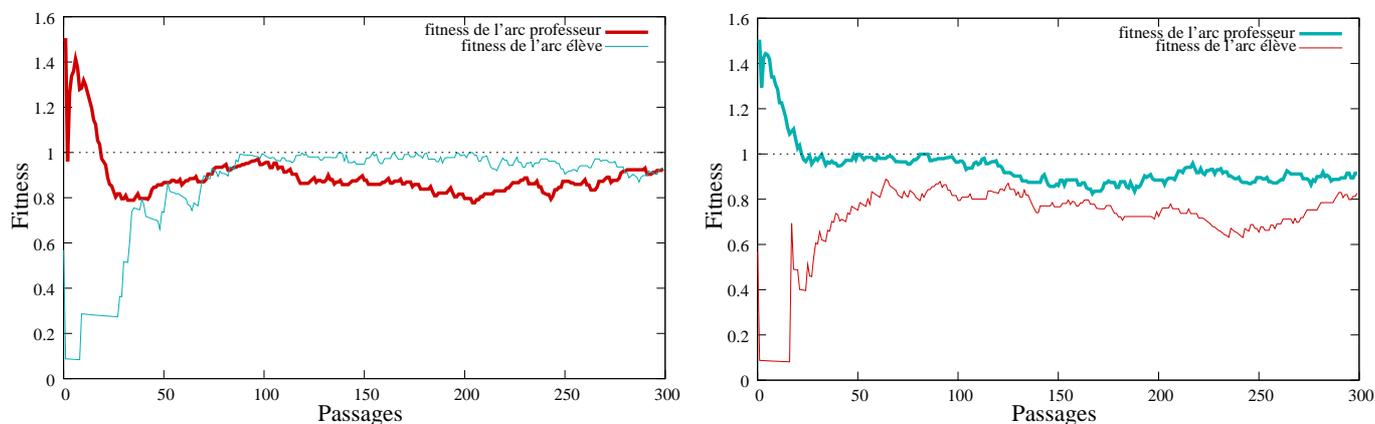


FIG. 4.17 – Comportement de la nouvelle fonction de *fitness* sur 1 essai de 300 passages.

par les professeurs sont pour l'instant validés par le passage des élèves. Le système conserve ainsi une certaine cohérence pédagogique fondée sur la vision des professeurs.

Lors de l'analyse du thème, il était apparu quelques vides pédagogiques. Par exemple, les items 3238 et 3239 étaient isolés à cause du manque de lien pédagogique entre le point de cours 3185 et l'exercice 3238. Il est donc intéressant de regarder ce que suggère le système à la suite de l'item 3185.

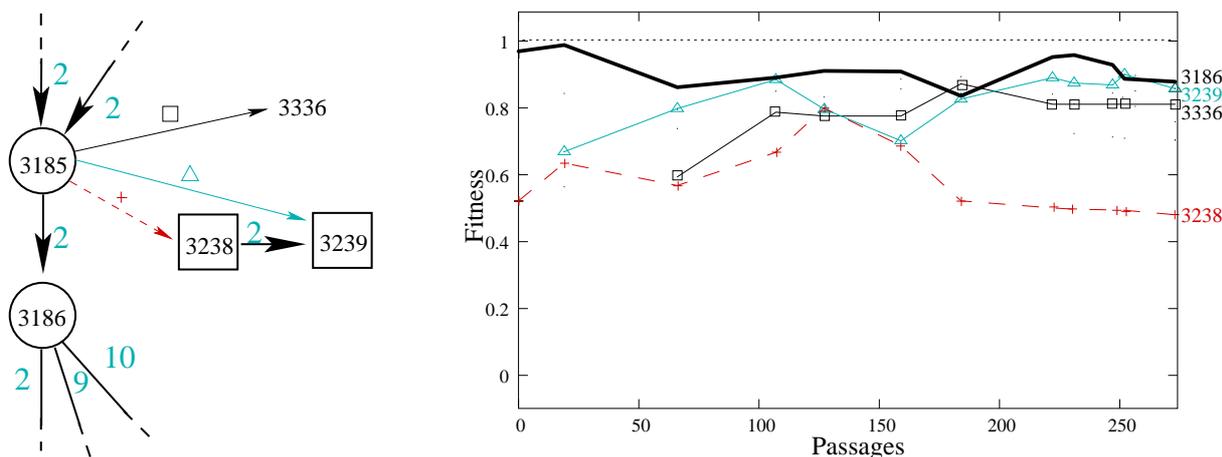


FIG. 4.18 – (gauche) État des liens pédagogiques autour de l'item 3185 (droite) Valeur de la fitness de l'arc 3185 → 3238 et des trois meilleurs arcs sortants de l'item 3185 du thème 377 en fonction du passage des élèves.

La figure 4.18 gauche rappelle l'état du graphe pédagogique (arcs en gras) autour de l'item 3185 ainsi que les arcs dont l'évolution de la fitness est affichée sur la figure 4.18 droite. Pour gagner en clarté, seulement les fitness des trois meilleurs arcs 3185 → 3186 (gras), 3185 → 3239 (triangle) et 3185 → 3336 (carré) ont été affichées ainsi que la fitness de l'arc 3185 → 3238.

Tout d'abord, grâce au passage des élèves, au taux de réussite de 81% et au petit bonus dû à la confrontation, l'arc professeur 3185 → 3186 prend très légèrement le dessus sur les autres arcs.

Ensuite, l'arc 3185 → 3238 était attendu afin de raccorder les deux exercices isolés. Mais le passage des élèves et surtout le taux de réussite des élèves (23%) ont fait défaut à la fitness de l'arc 3185 → 3238 (courbe en tirets). Le système a plutôt mis en avant l'arc 3185 → 3239 dont le taux de réussite est de 69%. À partir de l'item 3239, l'arc pointant l'exercice 3238 se place en deuxième position, avec un taux de réussite de 75%. Ainsi, le système de suggestion a valorisé la succession d'arcs 3185 → 3239 → 3238 en alternative au vide pédagogique créé par l'absence du lien 3185 → 3238.

#### 4.4.3 Outil d'aide à la création de graphe

Cette section est une remarque complémentaire à propos des poids pédagogiques  $W$ . Ces derniers ont été construits comme un bonus donné par le créateur d'un thème à certains arcs afin de mettre en valeur un chemin pédagogique qui sert notamment d'initialisation au système.

Il est apparu que la mise en place de ce chemin initial demandait un travail supplémentaire au professeur lors de la création d'un nouveau thème. Normalement, lorsque le thème est encore dans l'esprit du professeur, il est normalement plus facile de créer le graphe pédagogique dans la foulée. Or il est dommage de constater que peu de professeurs font l'effort de créer ces liens

pédagogiques. Malheureusement, il est maintenant plus difficile, pour les thèmes non traités, de se remettre dans le bain plusieurs semaines, voire plusieurs mois après, pour créer le graphe pédagogique.

L'optimisation par colonie de fourmis ne nécessite pas nécessairement ces poids pédagogiques, car le paradigme est censé tirer du passage des élèves toute la connaissance nécessaire pour proposer une suite intelligente à l'utilisateur. Mais ces *conseils* pédagogiques peuvent vraiment constituer un plus pour le système de suggestions. Il est donc intéressant de proposer des outils pour simplifier la création de graphe pédagogique.

Lors de la création d'un thème, les professeurs donnent une information minimale, mais qui s'avère être très utile : le squelette du thème, c'est-à-dire l'enchaînement logique des items dans le thème.

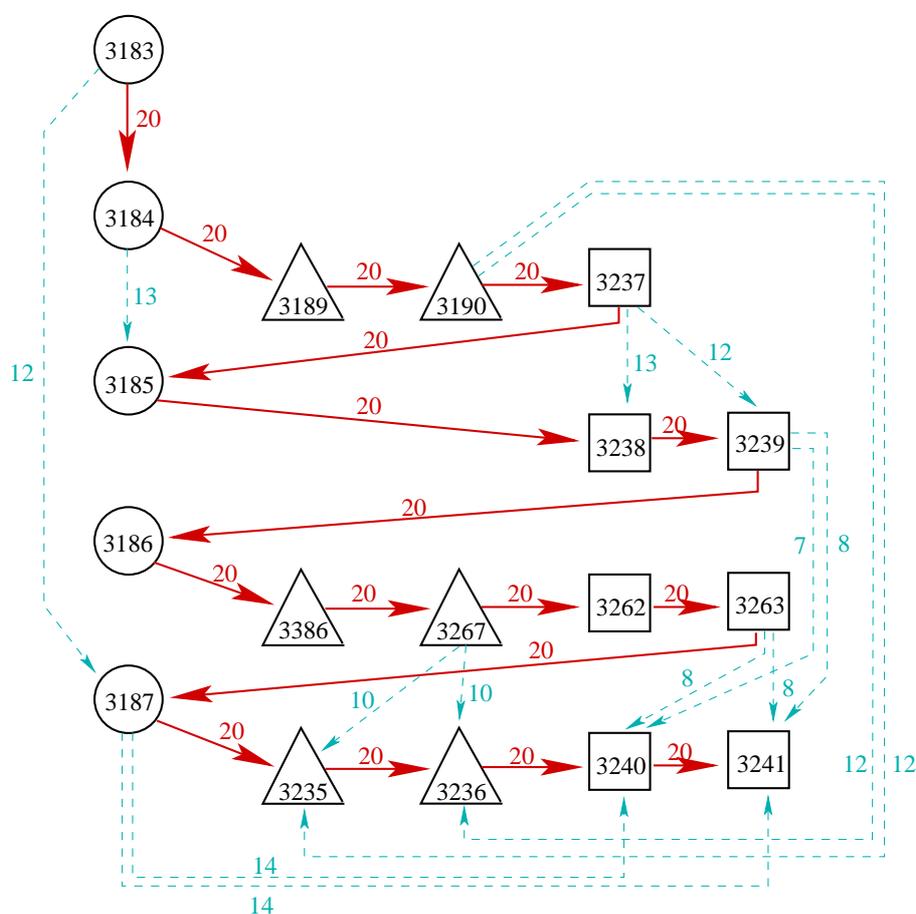


FIG. 4.19 – Graphe pédagogique obtenu pour le thème 377 à partir du squelette pédagogique (flèches en gras) donné par le professeur et une étude de similitude entre items.

Sur la figure 4.19, le squelette est symbolisé par la succession des flèches en gras. Ce dernier permet d'obtenir un graphe pédagogique simple car linéaire. L'idée est maintenant d'étoffer ce simple graphe d'arcs supplémentaires, pour avoir des suggestions de navigation plus variées.

Chaque item est stocké en base et son contenu pédagogique est conservé sous forme d'XML dans la base de données de PARASCHOOL. Le flux XML est traité par le serveur pour le transformer en flux HTML qui est affiché à l'élève. L'idée est donc de récupérer le contenu pédagogique

en prétraitant le flux XML et de calculer ensuite la similitude<sup>18</sup> avec les contenus des autres items. Le prétraitement consiste à enlever les balises XML et à récupérer ensuite les racines<sup>19</sup> des mots. Chaque contenu pédagogique est alors représenté dans l'espace de toutes les racines possibles par un vecteur du nombre d'occurrences de chaque racine. Il est ensuite facile de calculer une similitude fondée sur le *cosinus* des deux vecteurs. Le cosinus d'une valeur de 0 veut dire qu'il n'existe aucune similitude entre les deux items. Un cosinus de 1 implique la similitude maximale (sans forcément vouloir dire l'égalité des contenus pédagogiques).

Par contre, la similitude calculée est symétrique. Pour obtenir un sens, l'information du squelette pédagogique a été utilisée. Ainsi, tout arc trouvé par similitude va dans le même sens que le squelette pédagogique. La figure 4.19 présente le squelette pédagogique (flèches en gras) mais aussi les principaux arcs trouvés par similitude (flèches en tirets). Par construction, les poids pédagogiques ont été fixés à 20 sur le squelette pédagogique. Les arcs auxiliaires trouvés par similitude ont alors été représentés sur une échelle de 0 à 20 avec un seuillage pour n'extraire que les arcs significatifs.

Ce prototype permet de donner un aperçu de ce que peut extraire un tel outil. Mais ce sont bien sûr les professeurs qui doivent donner l'avis final pour toutes les structures pédagogiques extraites. L'objectif est donc maintenant de communiquer autour de cette nouvelle technologie, afin de mieux intégrer les professeurs dans la boucle en leur facilitant notamment la création du graphe pédagogique, via une interface agréable et efficace.

## 4.5 Conclusion

À la vue de ces premiers résultats, l'adaptabilité et la robustesse du système semble au rendez-vous. Le paradigme d'OCF développé sur le site PARASCHOOL amène aussi des propriétés intéressantes, comme un outil d'audit pédagogique. Il convient de rappeler l'importance qu'accorde PARASCHOOL à ce point. L'outil tel qu'il est apparaît satisfaisant de ce point de vue et a permis de donner jour à quelques discussions pédagogiques qui n'avaient pas eu lieu auparavant. Par exemple le système a pu mettre en évidence des nœuds singuliers. Cette information est bien sûr disponible dans les informations stockées au cours des navigations des élèves, mais aucune présentation n'en est faite de manière concise et efficace. Un algorithme d'OCF n'est sans doute pas un outil d'audit pédagogique très raffiné, mais il a le mérite d'apporter cet audit gratuitement et de présenter quelques informations avec simplicité en termes directs et localisés. Pour PARASCHOOL, il semblerait que cette information satisfasse les besoins d'une première démarche de questionnement du contenu.

Ensuite, les premiers résultats ont montré que le système cherchait systématiquement à éluder les difficultés en amenant les élèves vers les items les plus *faciles* d'un thème, montrant ainsi qu'il fonctionnait correctement, car l'objectif était de maximiser la réussite. Or la pédagogie est un art subtil qui passe parfois par une forme de coercition que l'élève peut ressentir comme dénuée de sens, mais dont il va récolter les fruits plus tard. En effet, le système doit guider les élèves pour qu'ils suivent un chemin un peu plus difficile et semé d'embûches, afin qu'ils puissent apprendre de la compréhension de ses erreurs. La fonction de *fitness* a ainsi été modifiée, afin de suivre les nouveaux objectifs pédagogiques (atteindre un taux de réussite global de 60/40, tout en valorisant le passage). Un changement supplémentaire à cette fonction a été intégré pour donner en priorité l'avantage au poids pédagogique, puis, lorsque le nombre de passages est suffisant,

<sup>18</sup>L'idée a été insufflée par le papier [Hon05].

<sup>19</sup>Le prototype a été construit sur une méthode d'extraction de "racines" développé par Paice & Husk [Pai90] à l'université de Lancaster à la fin des années 80.

basculer vers l'information stigmergique collective. Il faut bien garder en tête que l'objectif du système n'est pas de prendre un parti plutôt que l'autre (élèves ou professeurs), mais de trouver un compromis naturel : supprimer les absurdités, détecter les particularités du groupe, tout en gardant en vue le cap pédagogique fixé.

Les analyses détaillées (reflétées par ce long chapitre) du premier système mis en place ont permis d'en exposer les imperfections : un profond changement semble nécessaire pour adapter le système à l'activité discontinue des élèves. Ensuite, il convient, maintenant que l'algorithme se comporte bien, de proposer une individualisation du chemin. Mais cet objectif semble en contradiction avec le paradigme de l'Optimisation par Colonies de Fourmis, dont le but est de trouver le plus court chemin pour l'ensemble de la fourmilière, et pas du tout un chemin adapté à chaque fourmi (élève).

Le chapitre suivant présente donc de nouvelles notions qui ont été introduites pour adapter l'OCF aux particularités de l'être humain (principalement une activité discontinue, et le besoin d'individualisation du parcours), amenant un nouveau paradigme (et un néologisme) : l'optimisation par "Hommilière."

## Chapitre 5

# Le nouveau paradigme : L'Optimisation par Hommilière

---

---

Ce chapitre traite de trois points. Le premier point rappelle les différences entre l'utilisation des fourmis artificielles et l'utilisation des élèves. Ces différences amènent à penser que le système de PARASCHOOL est fondé sur un paradigme différent de l'OCF. Le deuxième point introduit la première modification apportée au paradigme d'OCF : le concept d'*érosion* pour résoudre le problème de l'évaporation des phéromones lors des périodes d'inactivité. Le dernier point amène, grâce aux *facteurs multiplicatifs*, à résoudre le problème d'*individualisation*. La conclusion définit alors les premières bases d'un nouveau paradigme que nous avons appelé "optimisation par Hommilière", car ce sont des êtres humains (et plus des fourmis) qui conduisent l'optimisation à leur insu.

---

---

La créativité individuelle peut-elle séduire l'intelligence du groupe ?

*Carl de Soria*

### 5.1 Récapitulation des problèmes à résoudre

Dans le paradigme d'OCF de base, le système utilise un grand nombre de fourmis artificielles dont il faut modéliser le comportement, ce qui pose bien sûr le problème de trouver une *bonne* modélisation. Dans le cas de PARASCHOOL, il a été possible d'associer bijectivement une fourmi à un élève, avec l'espoir de voir apparaître les comportements souhaités d'émergence et d'auto-organisation fondés sur le comportement de l'ensemble des élèves.

#### 5.1.1 Différences détectées avec l'algorithme standard d'OCF

Les premiers mois de tests ont montré que cette bijection amène des différences par rapport au paradigme standard de l'Optimisation par Colonies de Fourmis :

#### Comportement

Habituellement, les fourmis artificielles sont programmées pour résoudre un problème donné. Dans notre cas, les élèves humains ne suivent pas un algorithme en particulier. Du coup, la

question est :

◊ Comment contrôler un système dont les éléments constitutifs suivent une loi qui leur est propre ?

En fait, toute l'interaction se fait par le système de suggestions. Il faut donc bien gérer cette interaction pour espérer garder le contrôle de l'algorithme. Dans le site de PARASCHOOL, les élèves peuvent se classer suivant deux catégories :

1. Les premiers se contentent de naviguer sur le système sans suivre les suggestions de l'algorithme. L'interaction avec ces étudiants est donc absente, mais ils permettent néanmoins d'enregistrer une grande quantité d'informations pour le système, aussi bien par la création des arcs que par le dépôt de phéromones. Cette absence d'interaction participe à la partie exploration de l'algorithme. Mais, parmi ces élèves, il existe encore deux sous-catégories :
  - Les 50% d'étudiants du site de PARASCHOOL qui font de la navigation libre sur le site de soutien, ce qui correspond plus ou moins au comportement possiblement erratique des vraies fourmis. Ces derniers participent activement à la partie exploration du système.
  - Les 25% d'élèves qui suivent les suggestions d'un professeur, c'est-à-dire par exemple le plan de travail. Ces derniers participent à une intensification de solutions, construites par les professeurs.
2. Les seconds naviguent sur le site et suivent les suggestions du système. Ils apportent donc de l'information au système, tout en validant les suggestions proposées. Ces 25% d'élèves participent plutôt à l'exploitation de solutions.

Ainsi la partie exploration (75%) est bien présente dans le système . . . peut-être un peu trop par rapport à la partie exploitation (25%). Il faut soigner le système de suggestions afin d'exploiter au mieux les solutions trouvées. Pour les 75% restant, il serait judicieux de trouver un moyen de convaincre plus d'élèves de suivre les suggestions du système, afin d'équilibrer plus la balance entre exploration et exploitation. L'idée serait peut-être de rendre plus ludique le système de suggestions.

En conclusion, contrairement aux fourmis artificielles dont il faut programmer le comportement, les élèves de PARASCHOOL ont une volonté propre et ne peuvent (ni ne doivent) être facilement canalisés.

## Activité

Lors de l'analyse pour trouver un taux d'évaporation efficace, il est apparu que le processus d'évaporation des phéromones n'était pas bien adapté aux périodes d'inactivité des élèves.

Dans leur environnement, les fourmis artificielles sont constamment actives, à la différence des élèves qui ont des périodes de repos (vacances, . . .) et qui étudient les thèmes à des moments précis de l'année. Les deux écueils à éviter sont l'accumulation exagérée de phéromones à certains moments de l'année et la perte d'information stigmergique, en cas d'utilisation minimale d'une région du graphe à d'autres moments.

L'idéal serait de placer le système juste entre ces deux extrêmes. Or il semble que cette zone n'existe pas. Ainsi l'activité non constante des élèves par rapport au temps empêche d'avoir un processus efficace de mise à jour de l'information stigmergique. Il faut donc repenser le processus d'évaporation.

## Altruisme

Les colonies de fourmis naturelles et autres insectes sociaux se comportent de manière altruiste envers la colonie, jusqu'à se battre pour elle jusqu'à la mort. L'avenir de la colonie entière est plus important que celui d'un seul individu et, de ce fait, certaines fourmis n'hésitent pas à aller explorer des zones lointaines pour le seul bien de la communauté. Ces comportements, implémentables avec des fourmis artificielles, sont malheureusement (ou heureusement) rarement observés chez les humains : il y a peu de chances qu'un élève aille explorer une partie obscure du graphe PARASCHOOL pour le bien de ses copains de classe.

En fait le comportement est plutôt inverse : l'élève humain a besoin de sentir qu'il existe comme une entité à part entière. Cela rappelle la célèbre exclamation de Patrick Mc Goohan dans la série culte *Le Prisonnier* :

“*Je ne suis pas un Numéro, je suis un homme libre!!!*”

Pour rendre le parcours attrayant, il faut qu'il soit spécifique à chaque élève, et qu'il tienne compte de sa personnalité, de son passé. Un exemple simple : une fourmi artificielle (ou réelle) accepte de passer cinq fois de suite au même endroit. Un élève trouve cela inacceptable. Il faut prévoir des mesures permettant d'individualiser le parcours, ce qui va à l'encontre d'une approche d'OCF fondée sur des individus identiques et non individuellement intelligents.

### 5.1.2 L'optimisation par *Hommière* : un nouveau paradigme ?

Du fait de ces différences, il est nécessaire d'apporter plusieurs changements au paradigme d'origine pour qu'il s'applique à la colonies d'élèves présente sur le site de soutien, notamment car l'objectif à atteindre est différent. En effet, dans le paradigme de l'OCF, le but est de trouver un seul et unique chemin (le plus court) pour optimiser le temps de parcours de toutes les fourmis. Dans cette application pédagogique, chaque élève se voit attribuer un chemin adapté aux paramètres globaux de PARASCHOOL. Mais il faut aussi que le système s'adapte aux paramètres personnels, afin de proposer un chemin *personnalisé* pour chaque élève. Le cadre est toujours celui de l'optimisation, mais les buts à atteindre sont différents. Dans un cas, le but est un *optimum* global pour toutes les entités. Dans l'autre, c'est un *optimum* individuel, mais où chaque entité aide son prochain à atteindre son but. En effet, chaque individu apporte de l'information au système afin qu'il puisse, à chaque venue d'un nouvel élève, suggérer la suite la plus adaptée.

Avant la formalisation complète d'un tel nouveau paradigme, il faut d'abord résoudre les problèmes qui ont été soulevés par les premiers tests sur le site de soutien.

## 5.2 Introduction au nouveau concept d'érosion

### 5.2.1 Principe de l'érosion

Le processus d'évaporation des phéromones est l'application d'un facteur indexé sur le temps qui s'écoule. Comme cette corrélation temporelle pose problème dans le cas d'agents non actifs en permanence, l'idée est d'associer le processus d'évaporation non plus au temps mais au passage des élèves. Le terme d'*évaporation* est ainsi changé par le terme d'*érosion* qui décrit mieux le phénomène. Ce sont ainsi les élèves qui vont symboliser le temps qui passe. Les phéromones sont érodées seulement après le passage d'un élève. Ainsi, si aucun élève ne passe, il ne se passe rien et donc aucune information stigmergique n'est modifiée.

Ainsi l'érosion permet d'éviter la perte d'informations stigmergiques sur le graphe pédagogique. Il suffit ensuite de bien régler le taux d'érosion afin d'éviter toute accumulation de phéromones, synonyme d'immobilité du système.

### 5.2.2 Niveau d'influence de l'érosion

La question est maintenant de savoir à quel niveau hiérarchique il faut appliquer l'érosion. Cela peut aller du niveau le plus bas (l'arc) au niveau le plus haut (le site de PARASCHOOL).

#### Application au niveau du site global ? au niveau d'un cursus ?

Cette synchronisation entre le processus d'érosion et l'activité sur le site de PARASCHOOL peut être faite au niveau du site global. Lorsqu'un élève effectuerait un item, cela déclencherait un quantum de temps pour le processus d'érosion pour *tous* les arcs du site. Cela ne permettrait pas de résoudre le problème des thèmes visités à différentes périodes de l'année. De plus, une telle manipulation serait très lourde à mettre en place aussi bien au niveau de l'effort de calcul qu'au niveau de la charge de traitement pour le serveur.

Bien que le cursus présente un plus petit nombre d'arcs, les problèmes sont similaires, et donc non résolus.

#### Application au niveau d'un thème ?

Le processus d'érosion pourrait être corrélé à l'activité thématique (érosion de tous les arcs d'un même thème lors de la sélection d'un item suivant). Mais la structure même du site de PARASCHOOL engendre une interconnexion entre certains thèmes, rendant difficile une partition du graphe PARASCHOOL en thèmes déconnectés. La conséquence immédiate est qu'il semble difficile de corréler l'érosion au niveau thématique sans perte de sens pédagogique.

#### Application au niveau d'un arc ?

Une autre approche serait d'implanter le processus d'érosion au niveau d'un arc : lorsqu'un élève suit un arc, il entraîne l'érosion des phéromones stockées sur l'arc seul. L'avantage est que ce phénomène ne se passe que sur les arcs utilisés. Mais si un arc voit passer un élève très mauvais, ce dernier va déposer de *mauvaises* phéromones sur l'arc, ce qui pénalise l'arc dans les sélections futures. Comme l'arc a peu de chances d'être sélectionné, aucun élève ne risque de parcourir cet arc et les mauvaises phéromones ne peuvent pas alors s'évaporer. L'arc reste pénalisé jusqu'à ce qu'un nouvel élève veuille bien l'emprunter.

#### Application au niveau d'un item ?

Pour éviter cet écueil et rester néanmoins en dessous du niveau thématique, il reste le niveau de l'item. Le processus d'érosion pourrait être appliqué sur tous les arcs sortants de l'item concerné. Cette érosion des phéromones sur les arcs non suivis par un élève représente un peu le prix à payer pour ne pas avoir été sélectionné par l'élève. L'arc choisi n'est pas pénalisé car, en plus de l'érosion, il reçoit ensuite des phéromones découlant du résultat de l'item suivant.

### 5.2.3 Avantages du nouveau concept

C'est donc au niveau de l'item que le processus d'érosion a été placé. Cette méthode présente les avantages souhaités :

- En cas de longues périodes d'inactivité, il n'y a pas de perte d'informations stigmergiques, car le processus n'est pas corrélé au temps.
- Si un arc n'est pas utilisé par rapport à l'arc voisin, ses phéromones vont tout de même s'évaporer. Ainsi, le fait de ne pas être sélectionné est pénalisant, ce qui reflète bien la réalité. Le but de chaque arc est d'être sélectionné, si celui-ci ne veut pas voir ses informations stigmergiques disparaître. Le processus acquiert ainsi un sens pédagogique.
- L'érosion n'est appliquée que localement. La charge de traitement n'est pas énorme et ainsi le système ne risque pas d'être ralenti.

#### 5.2.4 Vérification théorique du bon comportement de l'érosion

Il est intéressant de noter que l'évaporation des phéromones se déroule au même moment que le dépôt de phéromones. Ainsi il est facile d'obtenir l'équation d'évolution de l'ensemble des phéromones présentes sur les arcs sortants d'un item, en confondant les phéromones de succès ( $\varphi^+$ ) et d'échec ( $\varphi^-$ ) :

$$\sum_{a \in A_s} \varphi_{t+1}^a = \tau \cdot \sum_{a \in A_s} \varphi_t^a + \beta \quad (5.1)$$

où  $a$  est un arc appartenant à l'ensemble des arcs sortants de l'item concerné  $A_s$ ,  $\varphi_t^a$  est la quantité de phéromones présente sur l'arc  $a$  à l'itération  $t$ ,  $\tau$  est le taux d'évaporation et  $\beta$  est la quantité de phéromones déposée à la suite du passage d'un élève :

$$\beta = \alpha + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha}{4} \quad (5.2)$$

où  $\alpha$  (identique pour les phéromones de succès  $\varphi^+$  et d'échec  $\varphi^-$ ) est la quantité élémentaire de phéromones déposée à la suite de la validation d'un item et  $\frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha}{4}$  représente la partie issue de la rétropropagation des phéromones. L'hypothèse a été faite que l'élève poursuit, dans tous les cas, au moins quatre items après. Si ce n'est pas le cas,  $\beta$  oscille entre  $\alpha$  et  $\alpha + \frac{\alpha}{2} + \frac{\alpha}{3} + \frac{\alpha}{4}$ .

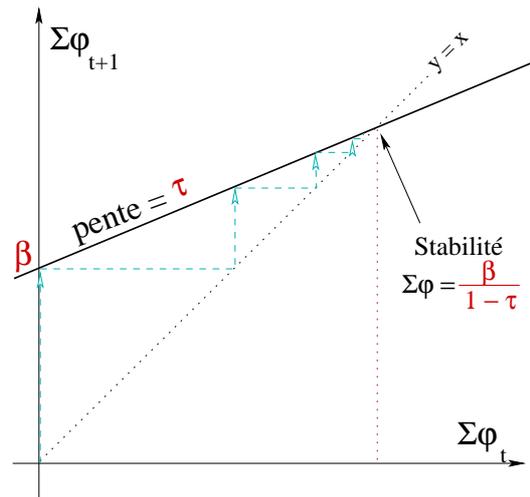


FIG. 5.1 – Évolution des phéromones sur les arcs sortants d'un item. Le point de stabilité est atteint à la valeur de  $\frac{\beta}{1-\tau}$

La figure 5.1 permet de visualiser l'évolution de la quantité de phéromones présente sur tous les arcs sortants. C'est une suite de la forme  $x_{n+1} = f(x_n)$  avec un point de stabilité.

Avec  $\tau = 0.977$  et  $\alpha = 0.05$ , ce point est atteint en la valeur de 4.54. Ainsi cette analyse permet d'écartier tout phénomène d'inflation ou de déflation au niveau des phéromones. Avec cette quantité de phéromones stabilisée, les arcs vont devoir combattre pour récupérer des phéromones aux arcs voisins.

## 5.3 Introduction de facteurs multiplicatifs

### 5.3.1 Principe de fonctionnement

#### *Desiderata*

L'objectif est d'adapter la fonction de *fitness*, qui donne normalement un même chemin pour tous les élèves, pour qu'elle suggère un chemin qui non seulement donne une direction pédagogique, mais qui présente aussi l'avantage d'offrir des variantes, afin de s'adapter à un individu particulier.

Le but de la fonction d'évaluation est alors de créer un compromis entre les deux notions de communauté et d'individualité. Si le système donne trop d'importance aux informations globales, chaque utilisateur ne sera perçu que comme un "numéro" et n'appréciera pas le parcours, car il ne sera pas traité de façon personnalisée. Si par contre le système donne trop d'importance aux informations locales, chaque entité individuelle pourra s'exprimer librement, mais aucune cohésion globale et pédagogique ne sera respectée.

Si ce subtil équilibre est trouvé, le système peut espérer guider chaque élève vers un but commun, tout en teintant le parcours pour s'adapter aux petites différences qui font toute la richesse de l'humanité.

#### **Principe**

Le principe est d'utiliser des facteurs *multiplicatifs* ( $Fm_i$ ) à placer avant la fonction de *fitness* globale ( $fitness_G$ ) trouvée précédemment :

$$fitness = Fm_1 \times \dots \times Fm_n \times fitness_G$$

Les facteurs multiplicatifs peuvent être implantés sous forme de phéromones individuelles, modifiant la valeur des phéromones globales portées par les arcs. Le fait d'utiliser ces Phéromones Individuelles Multiplicatives (PIM) entraîne deux conséquences :

1. La valeur par défaut d'une telle phéromone est l'élément neutre de la multiplication, c'est-à-dire la valeur 1. Ainsi, lorsqu'un processus d'évaporation est associé à une PIM, le facteur multiplicatif est ramené à sa valeur par défaut, c'est-à-dire 1.
2. Comme la *fitness* globale prend des valeurs négatives, les facteurs multiplicatifs auraient un comportement différent suivant le signe de la valeur de la *fitness* globale. Comme les valeurs maximales et minimales de la *fitness* globale sont connues (respectivement 1 et  $-0.6$ ), la valeur de la *fitness* globale est normalisée à une valeur entre 0 et 1. Ainsi cette valeur est toujours positive et les facteurs multiplicatifs ont le même effet quelle que soit la valeur de la fonction de *fitness* globale.

Pour chaque facteur multiplicatif, une zone de *normalité* peut être définie. Elle caractérise le fonctionnement normal de l'algorithme qui est appliqué à la majorité des utilisateurs. Par complémentarité, la zone de *spécialisation* permet de décrire le cas où l'algorithme doit adapter ses suggestions à chaque individu. Dans cette zone, il y a deux façons d'utiliser les facteurs multiplicatifs :

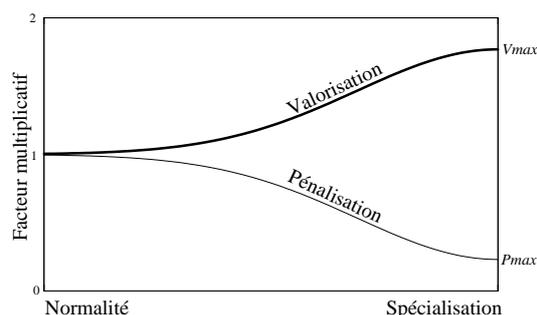


FIG. 5.2 – Les deux allures de courbes utilisées pour les facteurs multiplicatifs dans le cas d’une valorisation (courbe en gras) et d’une pénalisation (courbe en trait fin)

**Valorisation :** L’idée est de mettre en valeur un certain nombre d’arcs qui apparaissent tout particulièrement adaptés à l’utilisateur. Néanmoins, pour être correctement mis en avant, l’arc ne doit pas être trop pénalisé par la fonction de *fitness* globale. Ainsi, si plusieurs arcs sont en compétition pour les premiers rangs, la valorisation peut permettre à l’un de ces arcs de sortir du lot. La courbe en gras sur la figure 5.3.1 montre une allure générale utilisée pour valoriser la fonction de *fitness* globale.

**Pénalisation :** Par analogie, cette méthode permet d’exclure des arcs qui entreraient en contradiction avec les besoins pédagogiques de l’élève. L’allure générale d’un tel facteur multiplicatif est décrite par la courbe en trait fin sur la figure 5.3.1.

### 5.3.2 Utilisation de phéromones individuelles multiplicatives

Dans les algorithmes d’OCF, les phéromones sont des informations déposées dans l’environnement, destinées à être récupérées par la communauté afin de trouver l’*optimum* global. Les phéromones individuelles multiplicatives sont une extension de cette forme de communication, car elles sont déposées dans l’environnement, mais ne servent qu’à l’individu qui les a déposées, pour qu’il trouve son propre *optimum*. Un processus d’évaporation (ou d’érosion) peut être associé à ces phéromones, mais pas forcément. Si c’est le cas et comme ce sont des facteurs multiplicatifs, l’érosion ou l’évaporation ramènent la phéromone à la valeur 1.

Les PIMs qui peuvent être prises en compte sont actuellement de deux types : phéromone historique  $\varphi_{h_t}$  et phéromone agenda  $\varphi_a$ . En prenant en compte ces phéromones propres à chaque étudiant, il est possible de réaliser le compromis que l’on cherche entre l’individu, la collectivité et l’environnement.

#### Phéromone Individuelle Multiplicative historique, $\varphi_{h_t}$

La PIM  $\varphi_{h_t}$  porte l’information des nœuds précédemment visités par l’étudiant. C’est une phéromone individuelle. Il existe donc une valeur  $\varphi_{h_t}$  par étudiant et par nœud. Lorsqu’un nœud est visité par un étudiant, la valeur  $\varphi_{h_t}$  correspondante est multipliée par :

- $\varphi_1$  s’il s’agit d’un succès et
- $\varphi_2$  s’il s’agit d’un échec.

Dans le site de PARASCHOOL, les paramètres  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  ont été fixés respectivement à 0.5 et 0.75. Le rôle de  $\varphi_{h_t}$  est de diminuer la probabilité que le nœud déjà visité soit à nouveau proposé. Bien sûr, si le nœud a été le siège d’un échec (cas  $\varphi_2$ ), il sera plus vite proposé à nouveau que

si il y a eu succès (cas  $\varphi_1$ ), ce qui explique que  $\varphi_2 > \varphi_1$ . Cette PIM est une phéromone de *pénalisation*, car  $\varphi_1$  et  $\varphi_2$  sont inférieurs à 1.

Ainsi si l'élève réussit un item, et que, par la suite, il a à nouveau la possibilité de revenir sur l'item en question, la valeur des arcs y menant est alors divisée par 2 (cas  $\varphi_1$ ), ce qui signifie que ces arcs ont deux fois moins de chances d'être sélectionnés par le système pour être proposés à l'élève.

À mesure que le temps passe, bien sûr, les élèves oublient ce qu'ils ont vu et  $\varphi_{h_t}$  tend à revenir naturellement vers 1 (valeur par défaut) par évaporation.

**Remarque :** La volatilité de la mémoire d'un étudiant étant bien sûr liée au temps comme le processus d'évaporation classique, ce n'est donc pas un mécanisme d'érosion qui est utilisé.

Le processus est décrit par l'équation suivante :

$$\Delta\varphi_{h_t} = \varphi_{h_{t+1}} - \varphi_{h_t} = (1 - \varphi_{h_t}) \cdot g(t) \quad (5.3)$$

où  $t$  représente le temps écoulé depuis la dernière visite et avec :

$$g(x) = \frac{1 - e^{-\gamma x}}{1 + e^{-\gamma x}} \quad (5.4)$$

où  $\gamma$  est une constante de temps qui règle la vitesse de l'évaporation. Idéalement, elle doit être réglée pour correspondre à la volatilité de la mémoire de l'élève.

Pour calibrer la volatilité  $\gamma$ , les deux équations suivantes sont utilisées :

$$\gamma = \frac{1}{t} \ln \left( \frac{1 + \alpha}{1 - \alpha} \right) \quad (5.5)$$

en posant :

$$\alpha = \frac{\varphi_{h_t} - \varphi_{h_{t-1}}}{1 - \varphi_{h_{t-1}}} \quad (5.6)$$

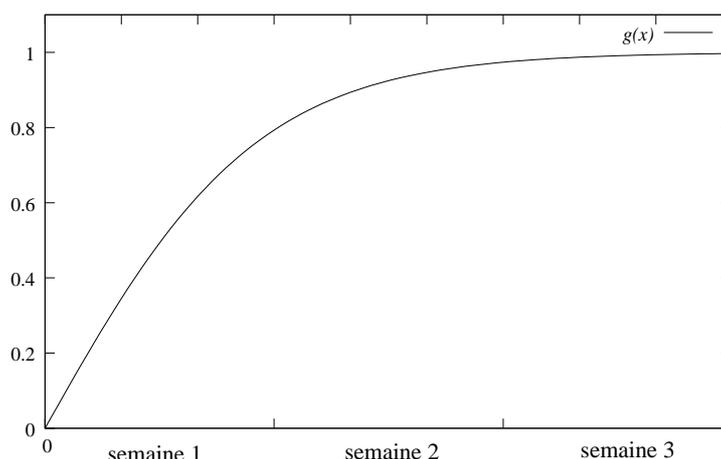


FIG. 5.3 – Forme de la fonction d'évaporation  $g(x)$  avec  $\gamma = 3.6 \times 10^6$ .

Ensuite :

1. il faut définir ce qu'"oublier un exercice" signifie. On peut prendre pour objectif qu'un exercice ait été oublié lorsque la PIM retrouve une valeur de 0.9, c'est-à-dire qu'avec l'équation 5.6,  $\alpha$  prend la valeur 2.2.

2. L'équipe pédagogique n'a plus qu'à dire le temps moyen qu'il faut à un élève pour *oublier un exercice*. En prenant une semaine, c'est-à-dire 604 800 secondes,  $\gamma$  prend la valeur  $3.6 \times 10^{-6}$  grâce à l'équation 5.5.

La figure 5.3 montre l'allure de la fonction  $g$  en fonction du temps.

### Phéromone Individuelle Multiplicative agenda, $\varphi_a$

À l'inverse de la PIM historique, la PIM agenda est un facteur multiplicatif poussant l'utilisateur à aller vers certains items, soit qu'ils aient été conseillés par un professeur, soit que le système juge nécessaire d'y passer (remédiation automatique).

Lors de la construction d'un item, le professeur établit des pré-requis pour résoudre l'exercice, ainsi qu'une analyse des erreurs commises pour proposer une remédiation aux erreurs de raisonnement détectées. Ainsi, lorsqu'un item n'est pas validé, le système de remédiation affiche les items qui devraient être revisités par l'élève. Ce dernier peut alors suivre le conseil pour consolider les points faibles qui ont été détectés. Mais s'il décide de passer à autre chose, l'information est perdue, car la page a disparu. Or il serait intéressant de conserver cette information de remédiation pour pouvoir diriger l'élève vers ces items en particulier.

La PIM  $\varphi_a$  peut jouer ce rôle : c'est toujours un facteur multiplicatif, dont le principe est fondé sur la *valorisation*. Ainsi, à chaque fois qu'un item est désigné par le système de remédiation en tant qu'item intéressant pour un élève particulier, la PIM  $\varphi_a$  associée à l'élève et à l'item est incrémentée d'une certaine valeur qui a été fixée à 0.4 dans le cas de PARASCHOOL. Lorsque la phéromone dépasse un certain seuil (dans le cas de PARASCHOOL, ce seuil est de 2), l'item est jugé *critique*. Cela peut se produire si l'élève bute plusieurs fois sur un problème identique. Par exemple, en physique, l'élève peut échouer plusieurs fois à cause de faiblesses en trigonométrie. Les PIM agenda liées à la trigonométrie sont alors augmentées de 0.4 à chaque échec sur un exercice de physique demandant des notions de trigonométrie.

**Remarque :** Si  $\varphi_a$  est différent de 1, l'élève ne voit l'influence de sa phéromone agenda que s'il passe dans les environs de l'item concerné. En effet la valeur de *fitness* des arcs pointant vers l'item à approfondir est augmentée. La fitness est biaisée, et le lien proposé par l'Hommière a plus de chances de pointer vers l'item problématique pour cet élève en particulier.

Si un item est jugé *critique* ( $\varphi_a > 2$ ), l'item est alors automatiquement placé dans son plan de travail. L'élève peut ainsi voir les items qui lui font le plus défaut. La PIM agenda de ces items est alors automatiquement fixée à 2. En pratique, la phéromone  $\varphi_a$  passe de 1 à 1.4, puis 1.8, avant de dépasser le seuil et atteindre la valeur maximale 2.

De plus, un professeur qui suit un élève a la possibilité de mettre un item dans son plan de travail. Par extension de la phéromone agenda, un tel item se voit alors directement attribué une valeur  $\varphi_a$  de 2, ce qui le fait apparaître dans son agenda de travail.

Enfin ce type de phéromones ne s'évapore pas avec le temps. En effet ce facteur ne peut revenir à 1 qu'une fois l'item concerné validé, sans quoi cela reviendrait à valider les items d'un agenda à l'ancienneté . . . Le retour à 1 n'est donc ni de l'évaporation, ni de l'érosion (retour à 1 par validation de l'item).

#### 5.3.3 Mise en place de contraintes à satisfaire

Dans le système de PARASCHOOL, il existe d'autres facteurs multiplicatifs qui ont été implantés : les *contraintes*. Ce ne sont pas vraiment des phéromones, c'est-à-dire des informations déposées dans l'environnement, mais plutôt des contraintes à satisfaire lors de la sélection des

arcs pour obtenir un système de suggestion plus efficace. Elles sont souvent le fruit d'une volonté d'éviter que le système ne propose des arcs farfelus, par exemple.

### Contrainte intra-thématique $C_{it}$ et intra-matière $C_{im}$

Dans le système PARASCHOOL, aucune contrainte n'a été fixée sur la création d'arc. Ainsi un élève fatigué de faire du français peut sauter à un item de mathématiques, ce qui va créer un arc entre les deux matières. Or toute création d'arc implique que celui-ci puisse être utilisé dans le système de suggestion afin de calculer sa valeur de *fitness*. Il peut ainsi être suggéré si sa *fitness* n'est pas trop mauvaise.

Or, il n'est pas raisonnable de proposer un exercice de mathématiques à la suite d'un exercice de français. C'est un peu la même problématique rencontrée dans la section 4.2.5. En effet, le hasard est présent dans le système et celui-ci est un peu en opposition avec la notion de raison. Il faut alors mettre des bornes afin de ne pas proposer des liens trop excentriques en écartant les propositions bizarres issues de l'*Hommilière*. Un moyen de vérification est de regarder les thèmes associés aux deux items ainsi que les matières.

Deux contraintes *valorisantes* ont été mises en place :

1. La première est la contrainte intra-thématique  $C_{it}$ . Elle permet de *valoriser* les arcs reliant des couples d'items appartenant au même thème. Dans le système, cette contrainte prend la forme suivante, pour un arc reliant deux items  $a$  et  $b$  :

$$C_{it} = \begin{cases} 1 & \text{si } T_a \neq T_b \\ 2 & \text{si } T_a = T_b \end{cases} \quad (5.7)$$

où  $T_i$  représente le thème de l'item  $i$ . Cette contrainte permet ainsi de doubler la valeur de *fitness* des arcs intra-thématiques.

2. Par extension, une contrainte intra-matière  $C_{im}$  a aussi été implantée :

$$C_{im} = \begin{cases} 1 & \text{si } M_a \neq M_b \\ 2 & \text{si } M_a = M_b \end{cases} \quad (5.8)$$

où  $M_i$  représente la matière de l'item  $i$ .

Du fait de ces contraintes, trois zones d'arcs se forment :

1. La première est celle des arcs pointant vers des items appartenant au même thème. Leur valeur de *fitness* est quadruplée.
2. La deuxième est celle des arcs pointant vers des items appartenant aux mêmes matières, mais pas au même thème. Leur valeur de *fitness* est doublée.
3. La dernière est tous les autres arcs pointant vers d'autres matières. Leur valeur de *fitness* reste inchangée.

Les contraintes permettent de focaliser l'élève sur un même thème.

Une contrainte intra-thématique aurait pu juste suffire. Mais, dans certains thèmes, il existe des items appartenant à des thèmes interconnexes. En effet il est proposé de temps en temps aux élèves d'aller faire des exercices de révision<sup>20</sup> afin de consolider des connaissances jugées un peu trop lointaines. Si la contrainte intra-thématique était trop forte, alors ces items connexes seraient trop injustement pénalisés et la structure pédagogique de PARASCHOOL perdrait en

---

<sup>20</sup>Ces items appartiennent souvent à la même matière, mais sont d'un niveau inférieur.

cohérence. Comme les thèmes interconnexes ont en commun la matière étudiée, c'est pour cette raison que la contrainte intra-matière a été implantée pour en atténuer l'écart.

Ces contraintes vont un peu à l'encontre de l'émergence de solutions issues de la navigation libre des élèves. En effet de telles solutions extra-thématiques ont du mal à se faire une place au milieu des autres solutions intra-thématiques trop valorisées. C'est un choix pédagogique qui a été pris et qu'il faut assumer.

**Remarque :** Une fois que ces contraintes faibles ont été implantées dans le système, l'équipe pédagogique de la société a quand même eu des retours négatifs d'utilisateurs qui ne comprenaient pas pourquoi le système pouvait leur proposer de faire un exercice de mathématiques après un exercice de français. En moyenne, les élèves ont tendance à enchaîner plus d'items de mathématiques que d'items de français. Du coup il existe beaucoup plus d'arcs extra-matière en français qu'en mathématiques. Comme le système a tendance à *exploiter* les nouvelles solutions trouvées par les élèves, il est donc normal, même avec les contraintes intra-thématique  $C_{it}$  et intra-matière  $C_{im}$ , de voir de temps en temps sortir des arcs extra-matière. L'équipe pédagogique a du coup exigé d'ajouter une protection supplémentaire, afin d'éliminer toute suggestion extra-matière, transformant cette contrainte faible en contrainte forte.

Mais un exemple imaginé permet de voir qu'un arc extra-matière n'est pas forcément si indésirable que ça. En effet, si, à la suite d'un exercice de physique qui utilise des outils trigonométriques, il apparaît qu'un grand nombre d'utilisateurs se dirigent vers des exercices de trigonométrie, cela peut signifier que ces élèves ont ciblé leur lacune et ont décidé d'eux-mêmes d'aller la corriger. Il serait alors judicieux au système de traiter l'information d'un tel arc extra-matière et de proposer aux élèves suivants de se diriger vers cet item de mathématiques, plutôt que de rester en physique. Mais alors, une fois qu'ils seraient arrivés en mathématiques, les chances auraient été grandes pour qu'ils restent dans cette matière, et ne fassent plus de physique.

L'équipe pédagogique a donc préféré assurer une cohérence *thématique* plutôt que de voir émerger de telles solutions extra-matière jugées trop occasionnelles pour permettre de tirer un plus grand profit.

### Contrainte de niveau, $C_n$

L'objectif de cette contrainte est d'aider le système à guider l'élève vers des exercices d'une difficulté correspondant à son niveau.

**Remarque :** La fonction de *fitness* globale possède déjà un terme d'adéquation à un taux de réussite global de 60/40. Mais elle n'utilise pas le niveau réel des étudiants. Elle se contente de guider globalement les élèves vers un chemin où le taux de réussite est de 60%. Cette contrainte de niveau  $C_n$  a été mise en place plus pour aider les élèves extrêmes, c'est-à-dire soit très forts soit très faibles. Pour eux, il est nécessaire de trouver une variante du chemin global pour s'adapter à leur niveau disparate.

Mais le système de notation doit être choisi afin de donner un score aux élèves et aux items, le tout sur une même base de notation. En plus de pouvoir se comparer à l'item, l'élève peut aussi se comparer aux autres élèves du système.

Le système de notation choisi (Elo) est décrit dans le chapitre suivant. Une fois que cette notation est mise en place, les scores sont utilisés pour calculer la contrainte de niveau  $C_n$ . Cette contrainte se place dans le cadre de la *valorisation*. En effet, en se plaçant dans le cadre de la *pénalisation*, il peut arriver que tous les items d'un même thème possèdent à peu près le même

niveau. Si ce niveau ne correspond pas à celui de l'élève, tous les items de ce thème sont alors pénalisés. Il vaut donc mieux *valoriser* un item si celui-ci se trouve en adéquation avec celui de l'élève.

La fonction de *valorisation* est une forme simplifiée de la fonction décrite dans la figure 5.3.1 avec un écart moyen de 200 (*cf.* le chapitre suivant : le système de notation choisi possède par construction une variance de 200) :

$$C_n = \begin{cases} 1 & si \ S_i < S_e - 400 \\ 2 - \frac{S_e - S_i}{400} & si \ S_e - 400 < S_i < S_e \\ 2 + \frac{S_e - S_i}{400} & si \ S_e < S_i < S_e + 400 \\ 1 & si \ S_i > S_e + 400 \end{cases} \quad (5.9)$$

où  $S_e$  représente le score Elo de l'élève et  $S_i$  représente le score Elo de l'item. La simplification de la courbe de valorisation a été choisie afin de simplifier les calculs en utilisant, par exemple, des fonctions exponentielles.

Ainsi, en utilisant cette contrainte  $C_n$ , le parcours de l'élève peut être biaisé, afin de lui proposer des exercices adaptés à son niveau. Dans le cas où les deux niveaux coïncident, la valeur de *fitness* de l'arc est doublée.

La mise à jour de la contrainte se fait au rafraîchissement du score de l'item ou de l'élève. Plus les élèves font d'exercices, plus les niveaux respectifs sont actualisés et se rapprochent des scores réels de l'élève et de l'item, plus la contrainte  $C_n$  possède une valeur pédagogique forte.

## 5.4 Conclusion

Dans ce chapitre, il est fait un état des lieux des différences entre l'utilisation des fourmis artificielles et des élèves.

Ces différences ont impliqué dans un premier temps l'introduction d'un nouveau concept d'évaporation, appelé *érosion*, car ce dernier n'est plus lié à l'écoulement du temps mais au passage des élèves sur le site. Ce processus d'érosion a été implanté au niveau d'un item afin de conserver l'effet pénalisant pour un arc de ne pas être sélectionné, tout en gardant une cohérence pédagogique et une simplicité de mise en place.

Ensuite des phéromones multiplicatives ont été introduites afin d'individualiser le parcours des étudiants. Ainsi le système de suggestions propose une direction pédagogique globale avec des variantes adaptées à chaque élève. Enfin, des contraintes faibles et fortes ont été introduites pour rendre ce système stochastique un peu plus raisonnable. En pratique, la nouvelle fonction de *fitness* prend alors la forme suivante :

$$fitness = \varphi_{ht} \cdot \varphi_a \cdot C_{it} \cdot C_{im} \cdot C_n \cdot fitness_G \quad (5.10)$$

Au vu de ces différences, le paradigme d'*Optimisation par Hommière* est introduit, car le but n'est plus de trouver un chemin *optimum* pour la collectivité, mais d'optimiser l'ensemble du graphe à l'insu des utilisateurs pour en améliorer l'utilisation. D'un côté, la *fitness* globale permet de regrouper les éléments pédagogiques communs à tous les élèves que la collectivité essaye d'optimiser. De l'autre, la *fitness* s'adapte à chaque individu par le biais des facteurs multiplicatifs.

Ce nouveau paradigme, *l'Optimisation par Hommière*, se situerait entre l'orientation d'utilisateurs sur le parcours de site web [Lab03] et l'optimisation par colonie de fourmis.

## Chapitre 6

# L'évaluation automatique des étudiants et des exercices

---

---

Ce chapitre décrit le système de notation automatique mis en place sur le site de soutien de PARASCHOOL. L'idée a été prise dans le monde des échecs avec la notation inventée par le mathématicien Elo. Une fois les formules mathématiques décrites, les principaux défauts du système (phénomènes de sous-ensembles et d'inflation/déflation) sont exposés. Malgré ces défauts, une première version classique du système a été greffée sur le logiciel de PARASCHOOL. Les premières analyses ont montré qu'un phénomène de *déflation* avait bien lieu sur le site de soutien. Deux méthodes (*Freeze* et *IPER*) sont alors décrites pour en venir à bout. Enfin l'utilisation de la notation Elo a permis d'améliorer le système d'audit du logiciel PARASCHOOL.

---

---

L'histoire de toute société (*Hommilière*) jusqu'à nos jours  
n'a été que l'histoire de luttes de classe(*ment*)s.  
*Karl Marx (un peu revisité)*

### 6.1 Évaluation du niveau des élèves et des exercices

#### 6.1.1 Étude sur une notation faite par les professeurs

Plusieurs méthodes peuvent être mises en place pour évaluer le niveau d'un élève ou d'un exercice. En ce qui concerne les exercices, la première idée qui vient à l'esprit est de demander au professeur qui l'a conçu de le noter dans la foulée sur une échelle allant de facile à difficile.

Une expérience sur trois thèmes (deux en français et un en mathématiques) comportant en tout 45 items a été faite avec l'aide de deux professeurs compétents chacun dans leur domaine. Il leur a été demandé d'évaluer ces 45 exercices sur une échelle de 1 à 6.

La figure 6.1 montre, comme exemple, l'évaluation faite par un professeur sur le thème 377. Les items sont rangés suivant le chemin pédagogique (la succession d'arcs ayant les poids pédagogiques les plus forts) établi par le professeur qui a créé initialement le thème. Le pourcentage d'échecs constaté sur chaque item est affiché en ordonnée. La note choisie, sur une échelle de 1 (plus facile) à 6 (plus difficile), devrait correspondre au pourcentage d'échecs. Ainsi plus la note est élevée, plus elle devrait correspondre à un point haut sur l'échelle des ordonnées.

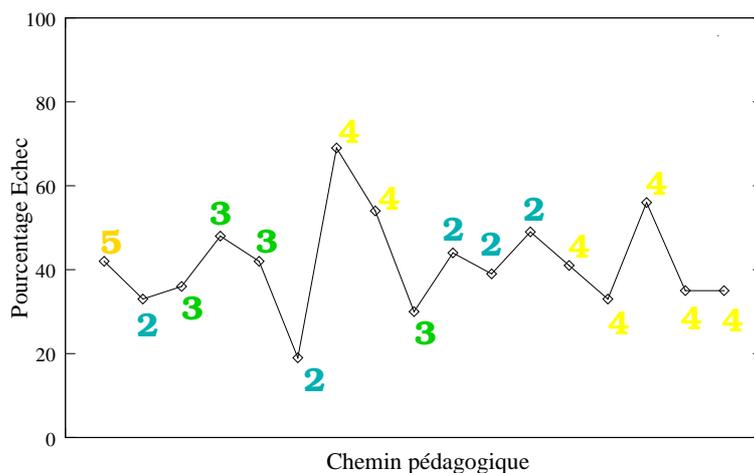


FIG. 6.1 – Le thème 377 noté par un professeur de mathématiques.

Il était attendu de voir une correspondance entre les notes proposées par le professeur et le pourcentage de réussites ou d'échecs. Or il semblerait que cela ne soit pas trop le cas. Par exemple, la note 5 a été attribuée à un item n'ayant qu'un pourcentage d'échecs moyen. De la même façon, trois items ayant été notés à la valeur 2 se trouvent aussi au niveau de la moyenne.

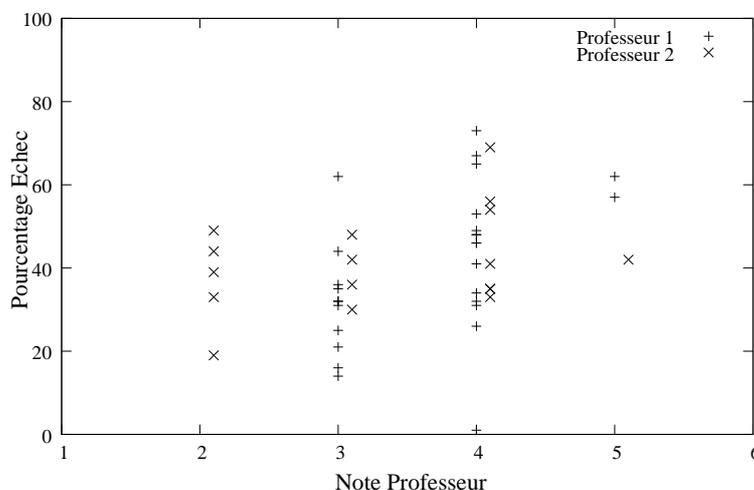


FIG. 6.2 – Adéquation entre les notes données par les deux professeurs et le taux d'échecs effectif sur chaque item.

La figure 6.2 permet d'avoir une meilleure vision de l'adéquation entre les notes établies par les professeurs et le pourcentage d'échecs constaté. La notation des deux professeurs a été séparée pour juger si leur notation était équivalente ou non. Pour le premier professeur (les "+"), la répartition se fait entre les notes 3 et 5. Pour le second (les "x"), la répartition se fait entre les notes 2 et 5. Globalement la segmentation suivant le pourcentage d'échecs semble un peu trop emmêlée. Au final, 8 notations ne correspondent pas du tout au taux de réussite réel des élèves sur ces exercices alors que 16 s'en écartent notablement.

Après réflexion, cette façon de procéder semble être source d'erreurs :

1. Chaque professeur possède sa propre opinion. Il faut donc harmoniser toutes les notations (un peu comme la transformation en poids relatifs des poids pédagogiques).
2. D'après l'expérience conduite, l'adéquation entre le jugement du professeur et le taux de réussites effectif des élèves ne semble pas être optimale.

### 6.1.2 Les systèmes de notation en EAO

Dans les systèmes d'*e-learning*, après la création d'un exercice, l'usage est de faire tester l'exercice par un certain nombre d'étudiants afin d'évaluer sa difficulté. Par exemple, Hong *et al.* [Hon05] ont utilisé à peu près 500 étudiants pour évaluer statistiquement la difficulté des exercices qu'ils allaient utiliser lors du test de leur système de suggestion pédagogique fondé sur un algorithme génétique.

Une fois la force de l'exercice calculée, l'élève peut alors se comparer à celui-ci et obtenir une estimation de son niveau. Cette façon de procéder est malheureusement trop statique. Lorsqu'un nouvel item est créé, il faut relancer la procédure. De plus, lors de l'évaluation de l'exercice, le niveau de l'étudiant n'est pas pris en compte. Ce genre de méthode est possible pour des phases de tests, mais semble irréalisable pour des sites contenant des milliers d'exercices et qui n'arrêtent pas de modifier leur contenu.

### 6.1.3 Le système de notation utilisé dans le monde des échecs

Un solution idéale serait d'avoir un système de notation automatique aussi bien pour les élèves que pour les items. Une solution existe dans le monde des échecs : la notation Elo [Elo78]. C'est une solution éprouvée qui a été utilisée pendant les cinquante dernières années, où tous les joueurs se rencontrent régulièrement.

À la fin des années cinquante, le mathématicien A. E. Elo [Elo78], développa un système de notation pour les échecs, fondé sur le modèle du cas V de Thurstone décrit dans [Bra52]. Ce système fut adopté par les fédérations mondiales d'échec. Son système de notation ne fut pas le premier à être testé. La première liste de notation fut publiée par Hösslinger, d'après le système Ingo [Hös48]. L'intérêt du système Elo vient du fait que la différence de notation entre deux joueurs ( $s_i - s_j$ ) et leur chance mutuelle de gagner était plus clairement corrélées que dans les autres systèmes. De plus, Elo fut le premier à utiliser des ordinateurs pour effectuer ses calculs, ce qui a permis d'évaluer rapidement un grand nombre de joueurs.

## 6.2 Principe mathématique de la notation Elo

### 6.2.1 Présentation des équations utilisées

Le principe est dérivé des statistiques et de la théorie des probabilités :

$$S_i(t+1) = S_i(t) + K(R_{i/j} - R_{i/j}^a) \quad (6.1)$$

L'équation 6.1 décrit comment un score  $S_i(t)$  du joueur  $i$  est mis à jour en utilisant la fonction du résultat attendu  $R_{i/j}^a$  sur le match contre le joueur  $j$ . Si  $i$  et  $j$  sont deux joueurs évalués, il est normal de penser que le plus fort vaincra. Le résultat attendu est noté  $R_{i/j}^a$ . Cependant le résultat réel noté  $R_{i/j}$  peut être différent :

1. Si  $R_{i/j} = R_{i/j}^a$ , cela veut dire que le niveau des joueurs est correct.

2. Si par contre  $R_{i/j} \neq R_{i/j}^a$ , les scores  $S_i(t)$  et  $S_j(t)$  doivent être mis à jour afin de mieux rendre compte de l'issue de la partie.

En pratique, le résultat attendu  $R_{i/j}^a$  représente une probabilité de réussite du joueur  $i$  sur le joueur  $j$ , donc un nombre compris entre 0 et 1. Le résultat réel,  $R_{i/j}$ , peut prendre trois valeurs possibles :

1. 1, en cas de victoire du joueur  $i$  sur le joueur  $j$ .
2. 0.5, en cas de match nul.
3. 0, en cas de défaite pour le joueur  $i$ .

L'impact de la différence  $R_{i/j} - R_{i/j}^a$  est modulé grâce au paramètre  $K$ , qui représente le nombre maximum de points qui peut être gagné ou perdu au cours d'une partie. Un facteur  $K$  important donne plus de poids aux résultats récents tandis qu'un poids  $K$  faible permet de mieux tenir compte des performances antérieures. Le facteur  $K$  varie entre 16 pour les grands joueurs ( $Score_{Elo} > 2400$ ) et 32 pour les plus faibles ( $Score_{Elo} < 2100$ ).

En se fondant sur le modèle de Bradley-Terry [Bra52], si la différence de niveau ( $S_i(t) - S_j(t)$ ) est connue entre deux joueurs  $i$  et  $j$ , la probabilité de réussite du joueur  $i$  sur le joueur  $j$  peut être écrite par l'équation 6.2 :

$$R_{i/j}^a = \frac{1}{1 + 10^{\frac{S_i(t) - S_j(t)}{400}}} \quad (6.2)$$

Cette équation de base est celle qui est utilisée dans le système de notation par la Fédération Internationale Des Échecs (FIDE). Dans le système de PARASCHOOL, il est facile de considérer que les élèves et les exercices *combattent* les uns contre les autres. L'avantage immédiat est que les scores respectifs Elo de chacun peuvent être calculés sans aucun biais. Les performances individuelles se distribuent suivant une distribution normale et la variance de ces performances est établie à 200 points Elo.

**Remarque :** Par construction, les probabilités de réussite vérifient l'équation suivante :

$$R_{i/j}^a + R_{j/i}^a = 1 \quad (6.3)$$

Ainsi, ces probabilités sont symétriques comme les résultats réels. L'implication directe est que le nombre de points perdus par le joueur qui a perdu est *exactement égal* au nombre de points récupérés par le vainqueur.

### Cas provisoire

Lorsqu'un nouveau joueur entre dans le système de notation, il se voit attribuer le score de départ de 1000 et le statut de *provisoire* pendant les  $n_p$  premières parties qu'il va disputer<sup>21</sup>. Le but de cette phase provisoire est de déterminer une évaluation approximative du score du joueur.

Pour ce faire, la moyenne  $\bar{S}_{ad}$  des  $n$  adversaires rencontrés sert de point de repère au calcul du score *provisoire* :

$$S_i(t) = \bar{S}_{ad} + 400 \frac{1}{n} \sum_{ad=1}^n (2 * R_{i/ad} - 1) \quad (6.4)$$

où  $n$  représente le nombre de parties jouées par le joueur  $i$  et  $R_{i/ad}$  le résultat réel de la partie contre l'adversaire  $ad$ . Par exemple, si un nouveau joueur rencontre au cours de sa première

---

<sup>21</sup>Aux échecs,  $n_p$  a été fixé à 20, pour avoir une bonne évaluation du score du joueur.

partie un joueur classé 1343 et qu'il gagne contre lui, il se voit attribuer le score de 1743. En cas d'échec, son score provisoire sera de 943. Au fur et à mesure que le joueur provisoire joue, son score provisoire s'affine pour essayer de s'approcher du niveau réel du joueur.

**Remarque :** En fait, d'après l'équation 6.4, le score provisoire du joueur se trouve dans un intervalle de plus ou moins 400 autour de la moyenne  $\bar{S}_{ad}$  des adversaires rencontrés. La valeur 400 a été choisie car elle représente le double de la variance.

Afin de ne pas pénaliser les joueurs qui ont accepté de jouer contre des joueurs *provisoires*, l'équation 6.1 est modifiée pour atténuer l'échange de points  $K$  en fonction du degré d'affinage du score provisoire ( $\frac{n}{n_p}$ ). Donc l'équation 6.1 devient l'équation 6.5 :

$$S_i(t+1) = S_i(t) + K \frac{n}{n_p} (R_{i/j} - R_{i/j}^a) \quad (6.5)$$

### 6.2.2 Avantages de la notation Elo

Ce système de notation tient compte de difficultés spécifiques qui mettent souvent les autres systèmes de notation à défaut :

1. Les performances des humains varient au cours du temps à cause de leur âge et de leur expérience.
2. Elles peuvent aussi varier ponctuellement (maladie, déconcentration, ...).
3. Le système doit être capable de gérer un grand flux de joueurs (certains joueurs ne restent dans le système qu'un court moment).

### 6.2.3 Inconvénients connus

Depuis l'introduction du système Elo dans le monde des échecs, les bornes des scores n'ont pas cessé d'augmenter. La raison principale est la popularité croissante des tournois d'échecs, entraînant une utilisation des scores Elo de plus en plus répandue. Par le passé, les scores n'étaient calculés que pour ceux qui participaient aux tournois internationaux. De nos jours, tous les joueurs ont un score Elo. Comme le nombre de joueurs ne cesse d'augmenter, la probabilité d'avoir un score très faible ou très fort augmente aussi. L'expansion des bornes Elo est un phénomène normal et ne pose aucun souci au système.

Cependant, deux phénomènes viennent perturber le système de notation :

1. le flux entrant et sortant des joueurs.
2. les sous-ensembles de joueurs.

Ces deux cas remettent en question l'*intégrité* du système Elo, car ils peuvent engendrer une *déflation* ou *inflation* globale des scores Elo. L'intégrité d'un système indique jusqu'à quel point un score donné ( $s_i$ ) reflète un même niveau au cours du temps et parmi les différents sous-ensembles de joueurs.

#### Sous-ensembles

L'inflation et la déflation des scores ne se passe pas seulement sur l'ensemble des joueurs, mais peut aussi se dérouler à l'intérieur de sous-ensembles. Un sous-ensemble est un groupe de joueurs qui ne jouent qu'entre eux sur une longue période de temps, sans aucun match avec des joueurs extérieurs au groupe.

Si une inflation ou une déflation se produit au sein du sous-ensemble, les scores y deviennent artificiellement hauts ou bas. À l'intérieur du groupe, la valeur prédictive du score est respectée, mais dès qu'un joueur de ce sous-ensemble jouera contre un joueur d'un autre sous-ensemble, il va commencer à perdre ou à gagner un grand nombre de points, jusqu'à ce que son score se réajuste à la moyenne du plus grand groupe.

Ainsi, le phénomène des *sous-ensembles* met en valeur le fait qu'il est important pour un joueur d'effectuer des matchs périodiquement contre des joueurs extérieurs à son groupe habituel, car les scores sont relatifs au sous-ensemble dans lequel le joueur évolue.

## Flux de joueurs

Si aucun joueur n'entre ni ne sort de l'ensemble des joueurs notés, alors, d'après l'équation 6.3 de symétrie, tout gain de points pour un joueur représente la perte du même nombre de points par un autre joueur. Ainsi il y a conservation du nombre total de points Elo dans le sous-ensemble et la moyenne des scores reste constante.

Mais si de nombreux joueurs entrent dans le sous-ensemble, leur niveau sera typiquement plus faible que la moyenne des joueurs. Inversement, les joueurs qui sortent se sont améliorés pendant leur passage dans le sous-ensemble. Le flux de joueurs entrants et sortants entraîne alors une baisse générale des scores Elo.

La Fédération Internationale Des Échecs (FIDE) a une fois essayé en fin d'année de récompenser les joueurs les plus prometteurs par un nombre de points Elo. En rajoutant ces points, la fédération espérait réduire la *déflation* des scores. Mais les *boni* ont été mal évalués, et ils ont transformé la déflation en une inflation. La FIDE rejeta cette idée et en resta au système classique.

### 6.2.4 État de l'art sur les systèmes de notations dérivés

#### Système Sonas

Le statisticien Sonas a analysé les données de plusieurs milliers de parties d'échecs entre 1994 et 2001, en essayant de voir si le système Elo se comportait bien. Après analyse des données, il en est arrivé aux propositions suivantes, expériences à l'appui [Son02] :

1. Le paramètre  $K$  de la FIDE qui possède la valeur un peu conservatrice de 10 doit passer à la valeur 24 afin de rendre le système de notation plus dynamique.
2. Les parties rapides et de *blitz*, jusque là ignorées du système de notation, peuvent être incluses avec des taux spécifiques pour atténuer leur importance par rapport aux parties *normales*. Par cette inclusion, Sonas affirme que ces parties apportent de l'information utile pour l'évaluation des scores. Ces derniers sont alors une meilleure estimation du niveau réel du joueur. Sonas propose même une généralisation sous forme d'un graphe pour déterminer le pourcentage d'importance d'une partie en fonction du temps moyen par coup.
3. Les fréquences de mise à jour des scores doivent être augmentées. En effet les scores sont mis à jour tous les 4 mois en prenant bien sûr compte de toutes les parties jouées durant ces 4 mois. En réduisant la période à 1 mois, les joueurs peuvent avoir une meilleure vision instantanée de leur score. Le système de notation n'en est que plus dynamique.
4. Enfin et surtout, Sonas propose de transformer le modèle de prédiction Elo par un modèle linéaire. En regardant les résultats réels, il s'est aperçu que le modèle de prédiction pouvait être simplifié en une droite. Cela permet ainsi de simplifier les calculs.

Les propositions faites par Sonas permettent d'affiner le modèle de prédiction, mais ne corrigent pas les problèmes de déflation et d'inflation qui peuvent être constatés dans le système Elo. L'implication principale pour le système PARASCHOOL est peut-être de simplifier le modèle de prédiction, en cas d'écart avec le modèle proposé par Elo.

### Système Glicko

Glickman a passé beaucoup de temps à analyser le système Elo et à fournir des rapports à ce sujet [Gli99]. Il a mis en évidence certains problèmes, notamment sur le niveau de confiance d'un score Elo. Après de multiples analyses, il a élaboré son propre système de notation, le système Glicko, qui est une généralisation de la notation Elo.

Si, par exemple, deux joueurs notés 1700 se rencontrent lors d'un tournoi, alors le gagnant est censé, d'après le système Elo, recevoir 16 points Elo du perdant. Maintenant si le gagnant est un joueur qui n'a pas joué depuis plusieurs années alors que le perdant joue toutes les semaines, alors le niveau Elo de 1700 du gagnant ne correspond pas exactement au score réel du joueur, surtout en comparaison avec le score du perdant.

Glickman a eu l'intuition que :

1. le gagnant devrait recevoir une quantité de points plus grande que 16 points, car son score a de fortes chances d'être supérieur à 1700, et
2. le perdant, par contre, (comme son score doit être une bonne estimation de son niveau réel) doit perdre une quantité de points inférieure à 16.

Pour résoudre le problème, Glickman a ajouté dans le système Elo une représentation de l'écart de notation,  $RD$  (*Rating Deviation*). Ainsi, chaque joueur est associé à un couple  $\{S, RD\}$  où  $S$  est le score et  $RD$  l'écart de notation. Plus  $RD$  est petit, plus l'estimation du score  $S$  est bonne. En pratique, Glickman dit que si un joueur possède un score  $S$  et un écart de notation  $RD$ , cela veut dire qu'il y a 95% de chances que son score réel se situe dans l'intervalle  $[S - 2 * RD, S + 2 * RD]$

L'actualisation des scores passe alors par deux étapes :

1. La première étape consiste à mettre à jour l'écart de notation  $RD$  en fonction du temps écoulé depuis la dernière partie jouée :
  - Si le joueur est nouveau, son score est automatiquement mis à 1500 avec un écart de notation de 350 (valeur initiale et maximale).
  - Sinon, l'écart de notation est mis à jour par la formule suivante :

$$RD = \min\left(\sqrt{RD_{old}^2 + c^2 \cdot t}, 350\right) \quad (6.6)$$

où  $t$  représente le nombre de périodes de temps<sup>22</sup> et  $c$  une constante à déterminer pour régler la vitesse de croissance de la variable  $RD$  en fonction de  $t$ .

2. Ensuite il faut mettre à jour le score  $S$  et l'écart de notation  $RD$  en fonction des parties jouées. Grossièrement, la probabilité de réussite est transformée en :

$$R_{i/j}^a = \frac{1}{1 + 10^{\frac{g(RD_j)(S_i(t) - S_j(t))}{400}}} \quad (6.7)$$

où

---

<sup>22</sup>Pour appliquer ce système de notation, il faut découper le temps en *périodes* et traiter toutes les parties d'une même période en même temps.

$$g(RD) = \frac{1}{\sqrt{1 + 3\left(\frac{\ln(10) \cdot RD}{400 \cdot \pi}\right)^2}} \quad (6.8)$$

Deux problèmes subsistent avec ce système de notation :

1. Le premier est le calibrage de la variable  $c$  qui règle la vitesse de croissance de l'écart de notation  $RD$  en fonction du temps  $t$ . Glickman, pour la fixer, établit qu'un écart typique de notation est 50 et pour que cet écart de notation retrouve sa valeur initiale de 350 au bout de 5 ans, il faut que  $c$  soit égal à 63.2.
2. Le deuxième problème est que si un joueur joue très souvent, son écart de notation devient quasiment nul. La conséquence principale est que son score va rester inchangé, même si le joueur acquiert de l'expérience. Glickman pense qu'il ne faut pas que l'écart de notation tombe en dessous de la valeur 30, pour continuer à observer une évolution dans la notation.

## Système Glicko2

Glickman a poursuivi avec ses analyses et a ainsi ajouté dans son système de notation une nouvelle notion, la *volatilité* de la notation. Elle permet de mesurer le degré de fluctuation du score d'un joueur. Si la volatilité est forte, cela signifie que le joueur a des performances erratiques (par exemple lorsqu'un joueur a de très bons résultats après une période de stabilité). Si la volatilité est faible, cela signifie que le joueur se trouve dans une période de stabilité. Grâce à cette nouvelle notion, Glickman affine son modèle de prédiction, rendant ainsi la mise à jour des scores plus pertinente. Mais la volatilité ne permet pas de résoudre les problèmes vus précédemment.

### 6.2.5 Choix du système de notation

Cette section a fait la description de quelques variantes du système Elo. Les améliorations semblent très bénéfiques au système, bien que souvent spécifiques au monde des échecs. Néanmoins certains problèmes subsistent aussi bien pour le système Elo que pour ses variantes. La FIDE a pour l'instant décidé de conserver comme système de notation le système Elo, en attendant peut-être un système de notation bien meilleur. La question est donc :

◇ Est-ce qu'un système de notation parfait existe ?

En attendant une réponse à cette question, le choix pédagogique dans le cadre de PARASCHOOL a donc plutôt été d'élaborer un premier prototype à partir du choix *conservatif* de la FIDE, c'est-à-dire le système Elo. L'argument principal a été que l'algorithme tourne depuis plus de cinquante ans dans le monde des échecs et a donc fait ses preuves.

## 6.3 Mise en place dans le logiciel de PARASCHOOL

### 6.3.1 Applications de la notation Elo sur le site de soutien

Ainsi, d'après le choix pédagogique, les équations et paramètres du système Elo ont été injectés dans le système PARASCHOOL. Dès que le score de l'élève est stabilisé, les applications sont nombreuses :

1. Les élèves peuvent connaître leur niveau global et visualiser leur évolution.
2. L'équipe pédagogique de PARASCHOOL n'a plus besoin de mettre une note artificielle et subjective sur chaque item.

3. Un avantage inattendu est que la notation Elo permet de détecter des erreurs syntaxiques, sémantiques et pédagogiques (quelque chose de vraiment compliqué à détecter sur plusieurs milliers d'exercices) :

- Si un exercice possède un score Elo très important, cela peut vouloir dire qu'il existe une erreur dans l'exercice, rendant celui-ci impossible à résoudre pour l'élève (erreur syntaxique ou sémantique) ou que l'exercice est trop compliqué à résoudre (erreur pédagogique de positionnement de l'exercice).
- Il en va de même avec les items possédant un score trop bas. Ils peuvent être trop simples à résoudre ou ils peuvent être résolus par un raccourci auquel le professeur n'a pas pensé.

La notation Elo se révèle, en tant que système d'audit, être une très bonne aide pour l'équipe pédagogique de PARASCHOOL.

4. Enfin et c'est le but premier de cette implémentation, l'Hommière peut proposer des exercices d'une difficulté adaptée à celle de l'élève.

**Remarque :** Lors des phases de réflexion sur l'intégration de la notation Elo dans le système de PARASCHOOL, une réflexion sur la couverture a été faite. Actuellement, le système tourne avec une note Elo par étudiant. L'étudiant en est donc réduit à être bon ou mauvais. Mais la question s'est posée sur une possible segmentation par matière, car l'étudiant peut très bien avoir un bon niveau en physique, être un peu moins bon en histoire et très mauvais en français.

La segmentation par matière semble bénéfique à l'élève. Mais comme le système est dans sa première phase d'intégration. Le choix a été, dans un premier temps, de ne pas trop apporter d'informations au système et de faire tourner une première version simplifiée. Si le système se comporte bien, la mise en place d'un score Elo par matière se fera.

Il faut savoir que le système de PARASCHOOL conserve dans ses bases les informations concernant toutes les *parties* jouées entre les items et les élèves. Le calcul des scores suivant un autre algorithme de notation peut être effectué à la demande de l'équipe pédagogique.

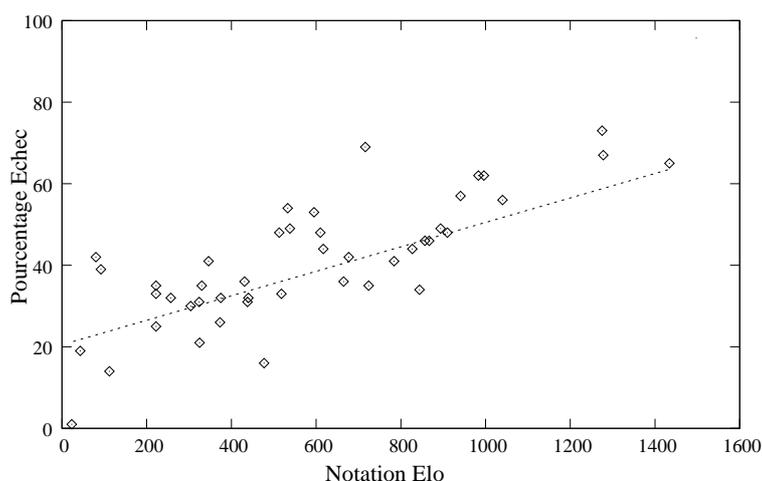


FIG. 6.3 – Corrélation entre Notation Elo et Pourcentage d'échec constaté sur chaque item.

### 6.3.2 Analyse des notes Elo obtenues

Une fois la notation Elo mise en place, il est intéressant de se demander si cette notation correspond bien aux exigences attendues. En effet, pour évaluer la force d'évaluation des professeurs, leur notes ont été comparées au taux d'échecs effectifs des élèves.

◊ Qu'en est-il pour la notation Elo ?

La figure 6.3 permet de voir cette comparaison entre la notation Elo et le taux d'échec effectif des élèves. Il est intéressant de voir que globalement il existe une relation de croissance entre le taux d'échec et la note Elo calculée. Par contre les points ne sont pas très concentrés autour de la droite de régression. Cela implique que la relation entre les deux variables n'est pas intuitive. Si elle l'avait été, la notation Elo aurait été inutile, car il aurait suffit d'utiliser le taux d'échec des élèves comme une estimation de la force d'un exercice.

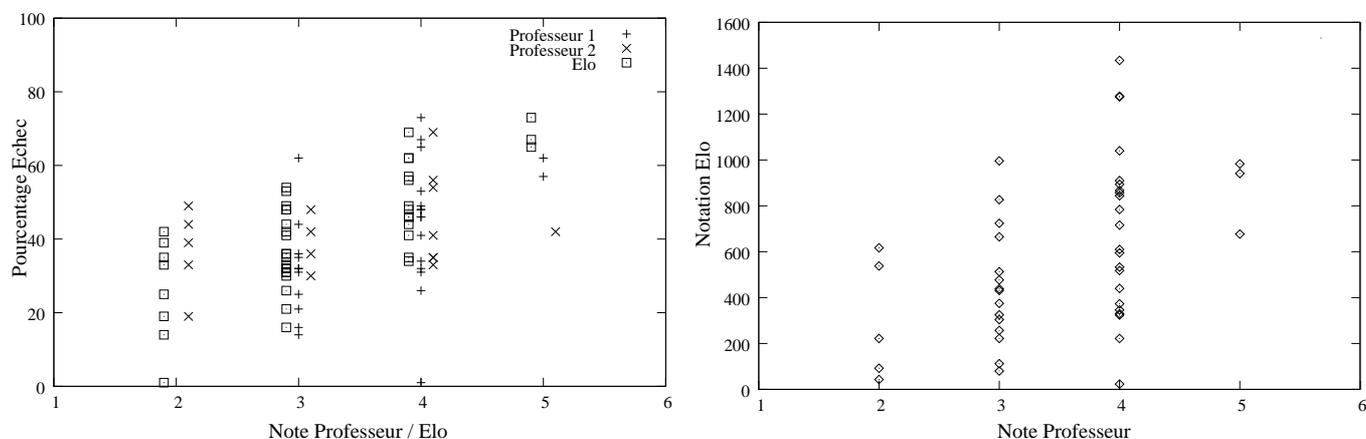


FIG. 6.4 – (gauche) **Corrélation entre le taux d'échecs et la notation Elo ramenée sur une échelle de 2 à 5 ( $\square$ ) comparée à la corrélation issue de la notation faite par les professeurs ( $+$  $\times$ ) (droite) **Corrélation entre les notes données par les professeurs et la notation Elo.****

La figure 6.4 gauche permet de regarder la corrélation entre notation et échec aux exercices. Comme les professeurs avaient noté effectivement les items entre 2 et 5, la note Elo a alors été transposée sur une échelle de 2 à 5. Il est intéressant de remarquer que la segmentation par tranche de notes ainsi obtenue est un peu moins floue que celle issue de la notation professeur. Par contre, en regardant de plus près, la segmentation n'est certes pas aussi nette qu'espérée, mais la corrélation (*cf.* fig. 6.4 droite) entre les notes données par les professeurs et par le système de notation automatique n'est pas forte non plus. Ce sont bien deux systèmes de notations différents, mais le système de notation Elo est fondé sur l'observation des résultats obtenus, et pas sur les idées préconçues des professeurs.

### 6.3.3 Existence de sous-ensembles sur PARASCHOOL

Dans l'environnement des échecs, tout joueur peut en principe rencontrer n'importe quel autre joueur, même si la plupart des tournois se déroulent par pays.

Dans le système de PARASCHOOL, c'est différent pour plusieurs raisons :

1. Un item ne peut pas rencontrer un autre item, de même pour les élèves. Ceci crée en

conséquence deux sous-ensembles, mais d'un genre différent, où les joueurs ne peuvent rencontrer que les joueurs de l'autre groupe. La dynamique qui en résulte diffère de celle du monde des échecs. Sans savoir si c'est mieux ou moins bien pour le système, cette dynamique est utilisée pour venir à bout du problème de déflation (*cf.* ci-dessous).

2. Ensuite des sous-ensembles se créent aussi dans le système de PARASCHOOL, pas par région comme aux échecs, mais par classe (seconde, première, terminale par exemple). Entre 2004 et 2005, 494.540 items ont été visités par des élèves de la *bonne* classe sur 520.846 visites. Cela veut dire qu'à peu près 95% des élèves d'une classe se sont confrontés à des exercices de leur niveau. En dehors de son sous-ensemble, le score Elo de l'élève risque de ne pas être pertinent (un élève de terminale visitant un item de seconde, lors d'une remédiation, par exemple) Pour ne pas pénaliser les élèves qui sortent de leur niveau, ni les items qu'ils affrontent, la décision pédagogique fut simplement de ne pas tenir compte d'une rencontre à mauvaise valeur prédictive, c'est-à-dire un match entre un élève et un item de classes différentes. Ainsi seulement 5% des matchs ne sont pas traités par le système de notation, qui n'est alors pas trop pénalisé par l'information perdue.

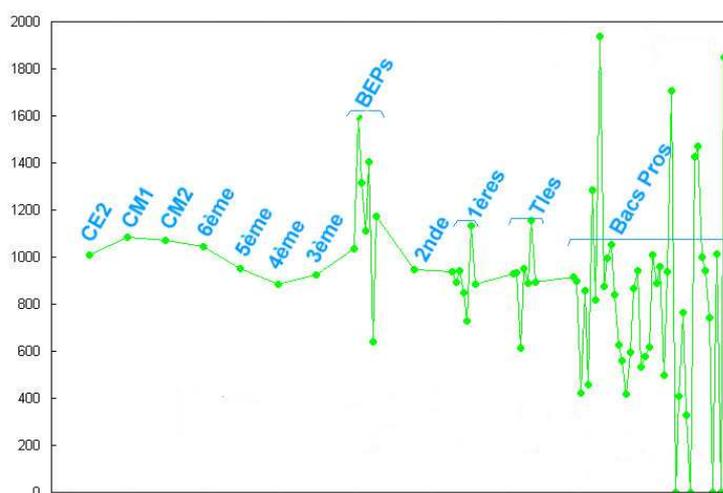


FIG. 6.5 – Moyenne des scores Elo des élèves regroupés par classe

De plus, au cours des analyses du système, la figure 6.5 a permis de revalider cette constatation. En effet, si le mélange des élèves par rapport aux niveaux était plus grand, les scores Elo des élèves auraient alors une bonne valeur prédictive. En supposant que les élèves progressent au cours de leur éducation, la moyenne par niveau scolaire devrait être croissante.

Or la figure 6.5 montre que cette moyenne répartie par classe d'élèves n'est pas croissante avec le niveau. La comparaison entre deux élèves de deux niveaux différents ne semble alors pas possible, confirmant la quasi-inexistence des échanges entre les niveaux sur le site de soutien.

#### 6.3.4 Analyse des flux de PARASCHOOL

Comme dans le monde des échecs, les flux représentent les élèves entrants et sortants du système Elo. Dans le contexte éducatif, ces événements arrivent plus souvent en début et en

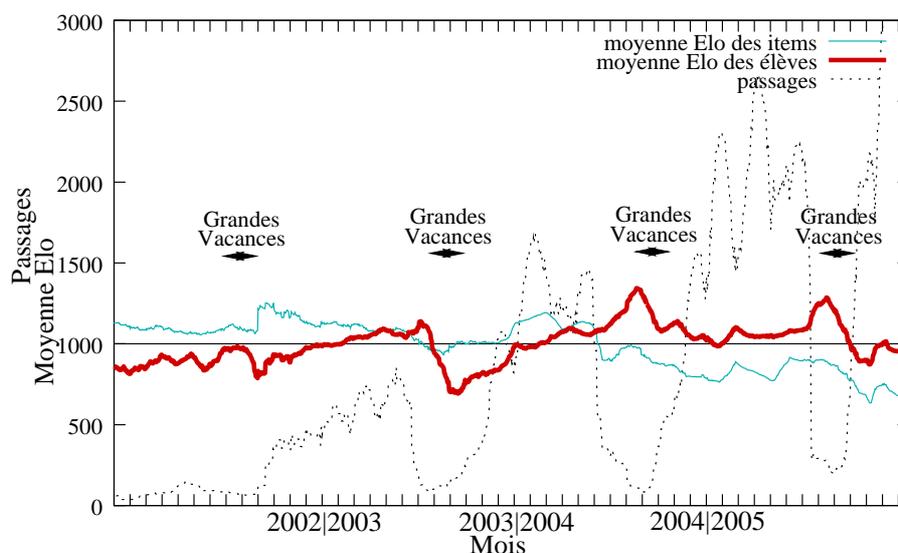


FIG. 6.6 – Moyenne glissante sur 30 jours des scores Elo et des passages sur une période de 4 ans.

fin d'année scolaire. Normalement un élève peut conserver son compte année après année. En pratique, les établissements scolaires en partenariat avec PARASCHOOL préfèrent mettre à jour les comptes chaque année à partir de leur liste d'élèves, entraînant ainsi des flux plus importants d'entrées et de sorties.

De plus, PARASCHOOL ne cesse d'accroître son nombre d'élèves sur le site, en passant de 50.000 à 250.000 sur une période de 4 ans, ce qui peut être observé sur le graphe 6.6 par l'augmentation du nombre de passages. Le flux des entrées n'en est alors qu'augmenté.

Sur la figure 6.6, le nombre de passages montre clairement les périodes d'inactivité au cours des grandes vacances scolaires. Pendant l'année scolaire, la moyenne Elo des élèves (courbe en gras) tend à augmenter, ce qui représente un résultat positif : les étudiants progressent au cours de l'année. La chute de cette moyenne durant les vacances scolaires est le résultat des variations de flux des élèves.

La figure 6.6 montre aussi qu'en parallèle, la moyenne des exercices (courbe en trait fin) tend à baisser année après année. Contrairement aux établissements qui remettent à jour les comptes des élèves, PARASCHOOL ne réactualise pas le score des items chaque année. Comme les élèves progressent au cours de l'année, ils volent des points Elo aux items, entraînant ainsi une déflation de leur score. À partir de l'année 2004/2005, le score moyen des élèves se retrouve au dessus de celui des items, qui doivent être sous-évalués, à cause de la déflation. Les élèves ont alors plus de chance de perdre des points en moyenne ; En effet, à cause du calcul du résultat attendu, en gagnant, les items prennent plus de points aux élèves qu'en cas de réussite de ces derniers. Ainsi la déflation des scores des items entraîne aussi une déflation des scores pour les élèves.

Comme il a été vu précédemment, la dynamique sur le site de PARASCHOOL est différente : le système gère deux populations d'individus (les élèves et les items) qui jouent exclusivement l'une contre l'autre. Le fait qu'un groupe possède des notes Elo stabilisées peut entraîner la stabilisation des scores de l'autre groupe. L'idée est donc d'appliquer à une population un système de notation modifié, pour obtenir une plus grande stabilité et combattre la déflation naturelle des scores.

La population des items peut être perçue comme une population de niveau stable, qui est

visitée par une population de niveau variable, c'est-à-dire celle des élèves. Les bienfaits du système classique Elo sont alors conservés pour la population de *variables*, alors que, pour la population de *stables*, deux systèmes de notation ont été étudiés :

**Méthode *Freeze*** : Normalement lors de l'évolution du score Elo (cf. fig 6.7), ce dernier devrait passer par trois phases :

1. La phase provisoire, pendant laquelle le système de notation essaye de trouver une estimation assez grossière du niveau du joueur.
2. La phase de maturité, pendant laquelle le joueur possède son score qui s'affine au cours des différentes parties. Son score devrait à un moment avoisiner l'*optimum*, qui devrait refléter au mieux le niveau réel du joueur.
3. La phase de déflation, pendant laquelle globalement le score du joueur se dévalue, du fait de la sortie de bons joueurs et de l'entrée de mauvais joueurs.

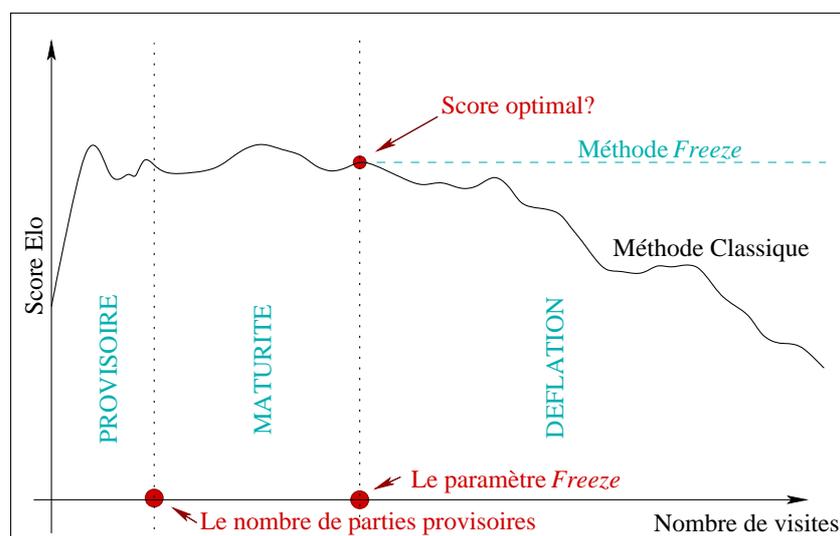


FIG. 6.7 – Représentation d'un score Elo fictif avec la méthode classique et la méthode Freeze.

L'objectif est donc de *geler* le score des items juste avant que la phase de *déflation* ne commence. En gardant indéfiniment leur score *optimal*, les items (dont le niveau est stable) devraient par la même occasion stabiliser le score des élèves.

◇ Est-ce que le fait de *geler* le score des items a un sens ?

La réponse pencherait pour le *oui*. Normalement, dans le système de notation des échecs, il est important de donner la possibilité à chaque joueur de faire varier son score du fait de ses progrès, son état actuel, ... Dans le monde pédagogique, la possibilité de faire varier son score est capitale pour la population de *variables* (les élèves), mais elle semble inutile, voire contradictoire pour la population de *stables* (les items). En effet, les items possèdent un contenu fixe, impliquant un niveau stable au cours du temps. Ce niveau optimal doit donc juste être trouvé avant d'être conservé.

La méthode *Freeze* nécessite le paramétrage de deux variables :

Le paramètre *Freeze*, qui permet de déterminer la zone de gel de la notation, c'est-à-dire à partir de laquelle le score de l'item ne varie plus (courbe en pointillé de la fig. 6.7).

Le nombre de rencontres provisoires, qui permet de délimiter la zone provisoire et la zone de maturité. Dans le système de notation Elo, la phase provisoire est très importante, car c'est elle qui permet l'estimation initiale du score des joueurs. Si, par exemple, la période provisoire est trop courte, l'estimation du score de l'item sera mauvaise et il faudra donc que la période de maturité soit plus importante, afin de retrouver petit à petit le score optimal.

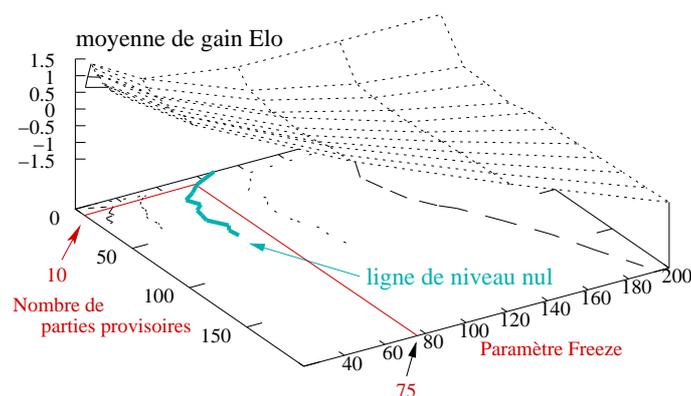


FIG. 6.8 – Gain moyen en Elo sur 4 ans.

Sur la figure 6.8, le gain moyen en Elo des joueurs (élèves et items) est affiché en fonction des deux paramètres. Pour éviter toute inflation ou déflation, il faut que ce gain soit au moins nul sur les 4 ans de données collectées. Il faut donc se placer sur la ligne de niveau de gain nul marquée en gras.

La deuxième condition est dépendante du système de PARASCHOOL : elle dépend du passage sur le site de soutien. Tout d'abord, il faut se rappeler que le nombre de parties provisoires est un paramètre qui est utilisé aussi bien pour les items que pour les élèves. Comme le nombre moyen de visites par étudiant est aux alentours de 26 (pour information : le nombre moyen de visites pour les items est de 236), il a été décidé que la maturité ne devrait pas être trop longue à arriver : le nombre de parties provisoires a donc été fixé à 10 (un peu moins de la moitié de la moyenne sur tout PARASCHOOL). En fixant ce paramètre, il suffit juste de lire graphiquement la valeur du paramètre *Freeze* à partir de la ligne de niveau nul, c'est-à-dire 75.

**Méthode IPER (Item Probability-based Elo Rating) :** Si la notation Elo classique peut être vue comme trop adaptative, car elle entraîne la déflation, la méthode *Freeze* est quant à elle trop statique, pour le score des items.

Le système Elo est fondé sur le fait qu'il est possible de calculer la probabilité de succès à partir des scores Elo des deux joueurs (*cf.* eq. 6.2). Cela signifie que si l'on connaît la probabilité de succès entre deux joueurs et que le niveau Elo d'un joueur est connu, le niveau Elo de l'autre joueur peut être déduit par l'équation inverse de 6.2 :

$$\Delta S = 400 \cdot \log_{10} \left( \frac{1-p}{p} \right) \quad (6.9)$$

où  $p$  représente le taux de succès et  $\Delta S$  la différence de score entre les deux joueurs. Ainsi, en fixant un score de référence  $S_{\text{ref}}$  et en récupérant le pourcentage de réussite des élèves observé sur les items  $\%_{\text{succès}}$ , le score de l'item  $S_{\text{item}}$  peut se calculer par l'équation :

$$S_{\text{item}} = S_{\text{ref}} + 400 \cdot \log_{10} \left( \frac{1 - \%_{\text{succès}}}{\%_{\text{succès}}} \right) \quad (6.10)$$

L'idée de la méthode IPER est que le score calculé gagne en stabilité, car le taux de réussite des élèves  $\%_{\text{succès}}$  fluctue très peu et s'affine en même temps grâce au passage des élèves. De plus, cette méthode ne nécessite pas de réglage en particulier. Ainsi le score IPER ne devrait pas être sujet à la déflation, car il est calculé sur des résultats observés et dans le même temps, il reste adaptatif.

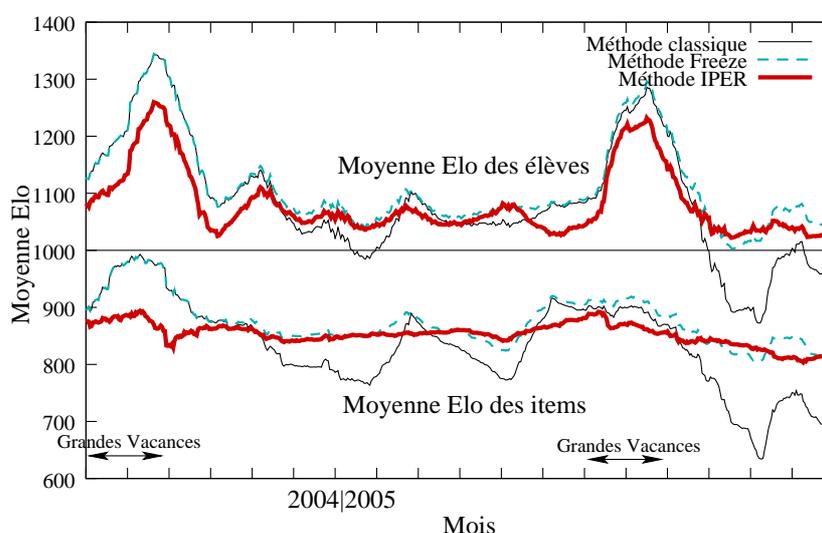


FIG. 6.9 – Moyenne des scores Elo pour les trois méthodes au cours de la dernière année.

La figure 6.9 montre le score Elo des items et des élèves durant l'année scolaire 2004/2005 où l'Hommière devrait avoir trouvé sa stabilité. La courbe fine représente le score Elo oscillant de la méthode classique. La courbe en pointillés montre le résultat de la méthode *Freeze*, alors que la courbe en gras représente le résultat de la méthode IPER. Il semble que la méthode IPER soit plus stable au cours de l'année (avec la méthode *Freeze* en second et la méthode classique en dernier). Il apparaît aussi que le score des élèves (les trois courbes du haut) oscille avec les trois méthodes, mais l'amplitude est plus petite avec la méthode IPER.

## 6.4 Système d'audit Elo : analyse de la difficulté

L'introduction de la notation Elo dans le site de soutien a permis d'ajouter de l'information dans le système. L'analyse de cette information permet un audit indirect du système pédagogique.

L'objectif du système PARASCHOOL est de proposer à l'élève des chemins d'exercices dont le taux de réussite avoisine les 60%. Bien sûr, ce taux de 60/40 ne peut être atteint que si les élèves suivent les suggestions faites par l'Hommière. Les élèves qui ne suivent pas ces conseils se voient proposer des exercices avec des degrés de difficulté variables.

La figure 6.10 représente la moyenne de la différence observée entre le score Elo de l'élève et celui de l'exercice. La première phase est celle de stabilisation, où l'Hommière tente de se

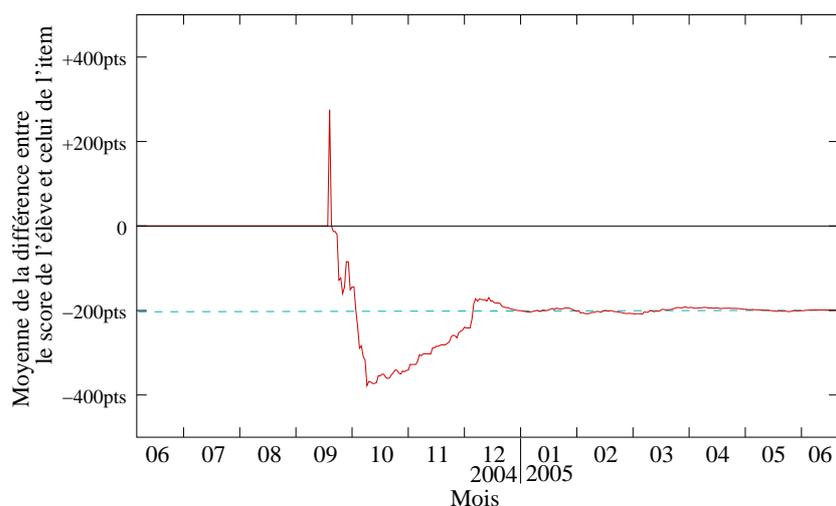


FIG. 6.10 – Moyenne de la différence observée entre le score Elo de l'élève et celui de l'item pour le paradigme *Hommilère*.

stabiliser autour de l'objectif qu'on lui a fixé. Ensuite l'*Hommilère* se stabilise autour de la valeur  $-200$  Elo, ce qui signifie qu'en moyenne, les élèves se confrontent à des items ayant un score Elo de 200 points inférieurs à leur propre score. Or, ces 200 points représentent exactement, d'après l'équation 6.2, une probabilité de réussite pour l'élève de 60%. Ce résultat est une belle confirmation que l'*Hommilère* réussit à globalement fabriquer des chemins sur lesquels les élèves ont une chance de réussite de 60% (taux fixé par l'équipe pédagogique de PARASCHOOL).

## 6.5 Conclusion

Grâce à la notation Elo, le logiciel de PARASCHOOL s'est doté d'un système de notation automatique qui a fait ses preuves pendant plus de 50 ans dans le monde des échecs. Même si ce dernier possède des concurrents (Sonas, Glicko, Glicko2, ...), aucun autre système de notation n'a réussi à séduire la FIDE. Partant de ce constat, le système de notation mis en place sur le site de PARASCHOOL s'est donc directement inspiré des équations de la notation Elo.

Après analyse des premiers résultats, il s'est avéré qu'un phénomène de déflation avait lieu dans le logiciel de PARASCHOOL (tout comme dans le monde des échecs). Cependant, les caractéristiques du problème PARASCHOOL (items de difficulté fixe, élèves de niveau variable) ont permis de corriger le problème en adaptant le système Elo à la double dynamique entre les deux types de population — variables (élèves) et stables (items).

L'idée est de garder, pour la population des *variables* (élèves), le bon système prédictif de la notation Elo et d'appliquer un système de notation moins variable pour la population des *stables* (items), afin de stabiliser les scores sur tout le site de soutien. Parmi les deux méthodes proposées — *Freeze* et *IPER* —, il semble que ce soit la méthode *IPER*, qui crée une simple règle de correspondance entre les taux de réussite constatés sur les items et un score Elo, qui obtienne les meilleurs résultats de stabilité.

Enfin, la comparaison du niveau Elo des élèves et du niveau des exercices montre qu'il y a, en moyenne, une différence de 200 Elo, ce qui, injecté dans l'équation 6.2, donne un taux de succès de 60/40 pour les élèves, ce qui était l'objectif de l'*Hommilère*. Les niveaux Elo semblent donc montrer que l'*Hommilère* fonctionne correctement.

## Chapitre 7

# Évaluation de l'application *Hommilière*

---

---

L'objectif de ce chapitre est d'analyser le paradigme *Hommilière* et de le comparer avec des systèmes existants, afin d'en montrer les avantages, mais aussi d'en souligner les inconvénients dans le cadre des :

1. ITS : les notions de stigmergie sont mises en avant et le paradigme est comparé aux travaux assez similaires conduits par Jon Dron avec son logiciel CoFIND.
2. Systèmes de vérification : l'introduction des nombreuses variables dans le système de PARASCHOOL a permis de mettre en place des systèmes d'alarmes pour aider les professeurs à avoir un retour sur les items construits.
3. Systèmes de détection de profil : le module *élève* du paradigme permet la personnalisation des parcours. C'est le même objectif que les systèmes de personnalisation de parcours Web qui essayent de trouver un profil utilisateur pour suggérer une suite à l'utilisateur.

Enfin, le paradigme *Hommilière* sera examiné avec un peu de recul pour une utilisation hors du contexte de l'Enseignement Assisté par Ordinateur.

---

---

La vraie nouveauté naît toujours dans le retour aux sources  
*Edgar Morin*

La démarche suivie durant cette thèse est partie de la théorie des algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis, pour au final effectuer quelques changements sur l'algorithme de base et ainsi aboutir à un nouveau paradigme, qui a été nommé l'algorithme d'optimisation par *Hommilière*. Cet algorithme se trouve en fait à la croisée de plusieurs techniques déjà existantes :

1. les ITS (*Intelligent Tutoring System*).
2. les systèmes de vérification.
3. les systèmes de détection de profil.

Chaque système voisin sera comparé au système créé sur PARASCHOOL, afin d'en obtenir une meilleure analyse, avant de regarder les caractéristiques des Hommilières pour des applications autres que l'EAO.

## 7.1 L'optimisation de chemins pédagogiques par *Hommilière* et les ITS

### 7.1.1 Description d'une *Hommilière* du point de vue des ITS

Le logiciel de PARASCHOOL est fondé sur la théorie comportementaliste de l'enseignement assisté par ordinateur. Comme cette thèse a permis d'y introduire une technique issue de l'intelligence artificielle, le système ainsi obtenu appartient donc au domaine des *Intelligent Tutoring Systems*. D'après la description dans le premier chapitre, les ITS sont constitués de trois modules, qui se retrouvent dans l'*Hommilière* de PARASCHOOL :

**Module Expert :** Ce module est constitué des données déterministes et comportementales du système (*cf.* fig. 7.1). Les informations permettent d'apporter toute l'expertise à propos de la connaissance stockée sur le site de soutien. Transposées dans l'*Hommilière* PARASCHOOL, les données déterministes (c'est-à-dire les poids pédagogiques) permettent de donner une vision statique des liens pédagogiques entre les différents items. Les données comportementales (c'est-à-dire les phéromones) apportent la vision dynamique des liens pédagogiques résultant du passage des élèves.

**Module Élève :** Ce module (principale différence avec un algorithme d'OCF) est l'ensemble des données individuelles (*cf.* fig. 7.1) à partir desquelles le système construit le profil de l'élève qui est utilisé par le module tuteur.

**Module Tuteur :** Ce module a pour but de récupérer les deux modèles issus des deux précédents modules et de les combiner afin de prendre les bonnes décisions. Dans le paradigme *Hommilière*, c'est la fonction de *fitness* ou d'évaluation qui permet de résumer toute la philosophie des propositions faites par le système.

La première implantation (c'est-à-dire un algorithme purement d'OCF appliqué à un système d'*e-learning*) ne comportait pas de module élève. Une implantation purement d'OCF ne pouvait donc pas espérer s'adapter aux besoins spécifiques de chaque utilisateur et n'aurait donc pas pu revendiquer l'appellation d'ITS.

### 7.1.2 Comparaison avec l'existant

Dans le domaine des ITS, le système de suggestion par *Hommilière* se place dans la sous-catégorie de l'ordonnancement d'items, dont le but est de proposer la suite d'items la plus adaptée à l'élève. Dans le même ordre d'idée, il existe une branche de recherche qui s'appelle le filtrage collaboratif. Ce type d'algorithme permet d'obtenir automatiquement des prédictions (filtrage) à propos des centres d'intérêt d'un utilisateur, en collectant des informations de goût à partir de plusieurs utilisateurs (collaboratif). Au cours de ses travaux de recherche, Jon Dron [Dro99, Dro00, Dro02] a analysé ces systèmes et a conclu à l'existence de stigmergie résultant de la collaboration entre les utilisateurs. Il a ensuite développé un système nommé CoFIND pour *Collaborative Filtering In N-Dimension*. L'objectif est de fournir un moyen de regrouper et organiser des ressources pédagogiques au moyen d'actions combinées de ses utilisateurs. La stigmergie employée par Dron est l'utilisation de *qualités*, c'est-à-dire des termes permettant d'identifier des besoins pédagogiques (idéal pour débutants, flou, ...).

Une fois identifié sur le système, l'utilisateur obtient — soit en sélectionnant une qualité, via une liste des plus populaires, soit en effectuant une recherche — une liste de ressources et un récapitulatif des votes, c'est-à-dire l'ensemble des qualités associées à chaque ressource. Les utilisateurs ont la possibilité de renforcer une qualité en votant sur un bouton "Je suis d'accord"

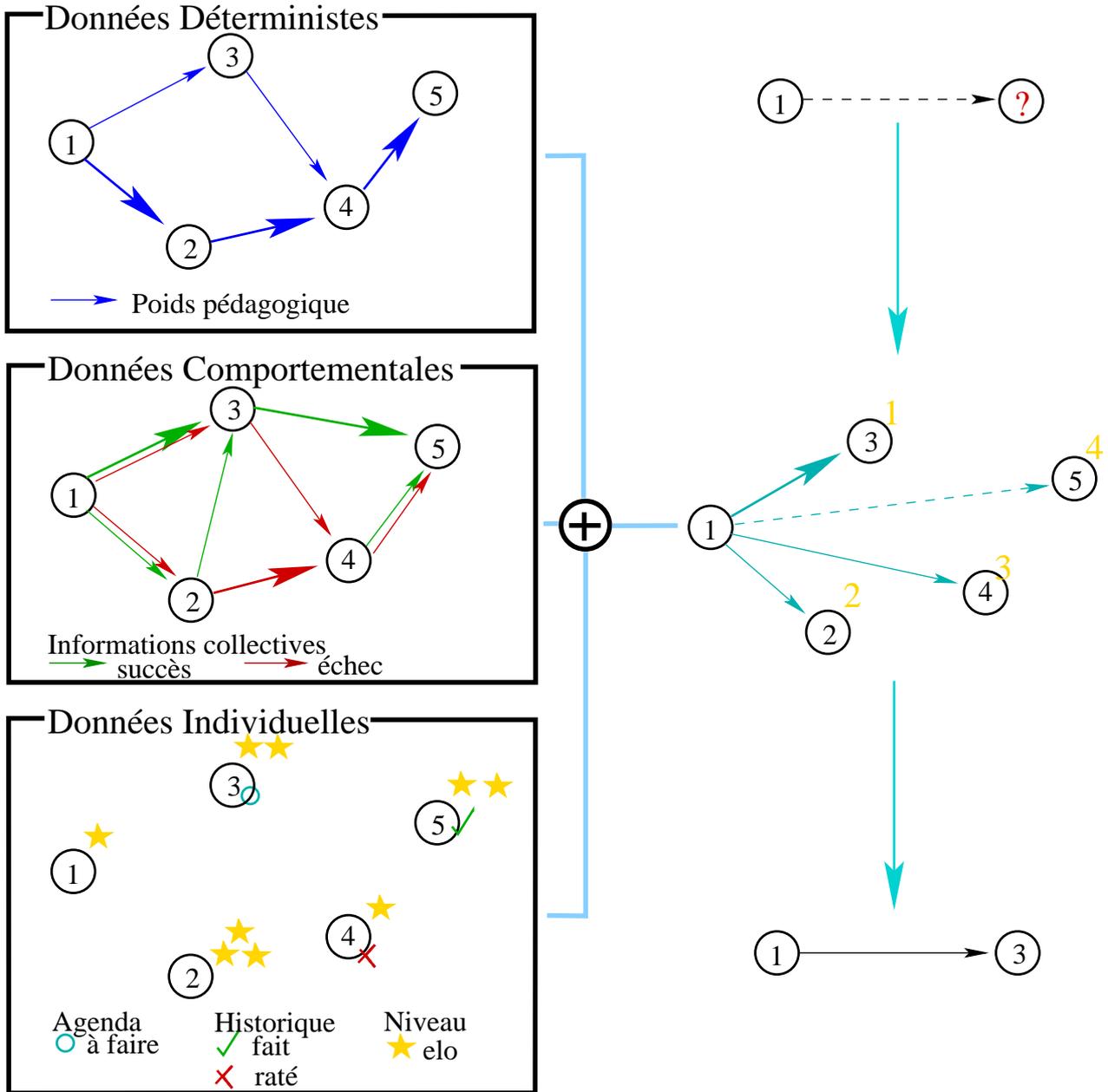


FIG. 7.1 – Graphe récapitulatif du paradigme *Hommilère*.

ou de la diminuer avec le bouton “Je ne suis pas d'accord.” Bien que l'utilisateur puisse aussi ajouter une qualité à la ressource courante, il est plutôt tenté de voter pour des ressources qui ont déjà été associées à des qualités. Le système est donc stigmergique.

L'objectif de Dron était à la base de faire un système de marque-pages collaboratif avec une capacité d'évolution : les qualités les moins utilisées mouraient (une qualité non utilisée pendant une semaine est enlevée), alors que les plus populaires se plaçaient au dessus de la liste. La *fitness* attribuée à chaque qualité est simplement la moyenne des notes attribuées par chaque utilisateur. Les qualités combattent donc les unes par rapport aux autres et ce sont les utilisateurs qui les créent, mais aussi qui fournissent leur principale source d'information (nourriture), c'est-à-dire les votes et l'utilisation. La reproduction dans ce cas peut être vue comme le nombre de votes récoltés par chaque ressource. La mutation est tout simplement la redéfinition<sup>23</sup> de la qualité. Les ressources sont aussi en compétition. La réussite d'une ressource peut être mesurée par la description des qualités entrées dans le système.

Les techniques de filtrage collaboratif sont connues comme de puissants mécanismes pour une collaboration auto-organisée. Mais, dans un contexte pédagogique, ils ne sont pas les meilleurs alliés des apprenants. L'objectif de CoFIND a donc été d'étendre le concept pour fournir des suggestions pédagogiques utiles, en se fondant sur l'identification de similarités abstraites entre les ressources. L'utilisation des *qualités* permet de déterminer pour chaque ressource son utilité, le meilleur contexte pédagogique et les meilleurs apprenants.

Dans le but d'amplifier les mécanismes d'auto-organisation, Dron a facilité les interactions avec les utilisateurs, en leur permettant de personnaliser le système (création de nouvelles qualités ou ressources, possibilité de téléchargement de ressources, ...) et de communiquer (forum, messagerie instantanée, ...).

### 7.1.3 Avantages de l'*Hommilière*

Le principal avantage du paradigme *Hommilière* (tout comme le logiciel CoFIND) est l'utilisation des données stigmergiques pour guider les élèves dans les bonnes directions pédagogiques. Le paradigme *Hommilière* présente, en plus de CoFIND, une phase d'individualisation, qui permet d'offrir un parcours particulier à chaque utilisateur.

Comme CoFIND, le logiciel de PARASCHOOL possède la notion de thèmes. Ces thèmes représentent, dans un contexte évolutionnaire, des niches écologiques permettant des évolutions locales. En effet, tous les thèmes ne sont connectés que par quelques ressources communes. Par exemple, le logiciel PARASCHOOL ne présente que 5% d'interconnexions effectives.

### 7.1.4 Inconvénients de l'*Hommilière*

Un des atouts de CoFIND est la communication entre les différents utilisateurs, car elle joue un rôle important dans le processus d'apprentissage. D'après une théorie de Moore [Moo96], la structure et le dialogue doivent être les briques élémentaires de tout système pédagogique. PARASCHOOL possède déjà un logiciel très structuré, mais le dialogue lui fait défaut. L'équipe pédagogique a souvent freiné sur ce point, car elle juge que les outils de dialogue sont plutôt les vecteurs de papotage que de discussions sérieuses.

Lorsque le paradigme *Hommilière* suggère les prochains items, la présentation est statique. Un des objectifs futurs est de proposer de manière interactive les résultats en utilisant un avatar, c'est-à-dire une représentation virtuelle d'un agent dans le logiciel PARASCHOOL (*cf.* annexe A). En poursuivant l'idée, chaque élève posséderait son avatar personnel sur le site et pourrait

---

<sup>23</sup>Lorsqu'un utilisateur pense que le terme n'est pas approprié, il peut le redéfinir.

l'utiliser pour communiquer avec d'autres élèves. Lorsque l'élève est déconnecté, l'avatar pourrait même continuer à être actif et à interagir avec les autres avatars. L'objectif est de créer une collaboration entre les différents élèves pour *construire* leur schéma de résolution des items. De cette manière, le logiciel de soutien ainsi développé associerait la théorie comportementaliste par les items et la théorie *constructiviste* par les modes de dialogues. Le bénéfice pour l'élève ne serait que positif et la communication augmenterait l'attrait des utilisateurs.

## 7.2 Comparaison de l'Hommière PARASCHOOL avec les systèmes de vérification

### 7.2.1 Description d'une Hommière du point de vue des systèmes de vérification

Le nouveau paradigme apporte pour le site de soutien de PARASCHOOL de nouvelles variables associées aux différentes parties du système. Chacune de ces variables amène de la connaissance au système. En effet, s'il est possible pour chaque variable de définir un domaine de *normalité*, il est alors facile pour le système de détecter si la variable en sort et de tirer alors une sonnette d'alarme. Grâce aux différentes variables utilisées dans le système, le paradigme *Hommière* permet d'ajouter plusieurs couches de vérification pour les items :

**Le poids pédagogique :** C'est une donnée statique donnée par le professeur créateur d'un thème. Cette information permet d'avoir un aperçu de ce que désire le professeur par rapport à un thème. Par comparaison, il est plus évident de détecter tout écart avec le schéma pédagogique souhaité.

**Les phéromones :** Elles permettent de donner une vision dynamique des chemins pédagogiques. Des taux de phéromones abondants permettent de signaler des sur-activités sur des parties du graphe pédagogique. Des divergences de taux entre les phéromones de réussite  $\varphi^+$  et d'échec  $\varphi^-$  permettent de détecter des erreurs syntaxiques (présence d'une coquille rendant l'exercice impossible à résoudre ou trop facile), sémantiques (l'exercice ne peut être résolu du fait de données insuffisantes, par exemple) ou pédagogiques (inhomogénéité avec les items avoisinants).

**Remarque :** De tels signaux d'alarme auraient pu être remplacés par les informations du nombre de succès et d'échecs pour chaque item. Mais les valeurs de phéromones représentent déjà ces grandeurs.

**Le niveau Elo :** Cette donnée permet de noter aussi bien les élèves que les items. Ainsi des informations sur le comportement du logiciel PARASCHOOL peuvent être tirées des niveaux globaux. De plus, tout écart avec la moyenne globale peut être détecté et signalé à l'équipe pédagogique, qui peut prendre la mesure appropriée, si nécessaire.

### 7.2.2 Comparaison avec l'existant

Le domaine de recherche qui se rapproche le plus de ce type de système est celui des outils de vérification de sites Web. Le principe est de construire un modèle abstrait du site afin d'appliquer par la suite une large variété d'analyses. Stotts & Furuta [Sto98] ont proposé des automates pour décrire la structure de liens hypertextes et pour ensuite définir une logique HTL (*HyperText Logic*) afin d'en vérifier la structure. Plusieurs types de modèles de structures ont été avancés, comme par exemple un modèle fondé sur le langage UML [Ric00]. Di Sciascio *et al.* [DiS02, DiS05] ont

ajouté plusieurs fonctionnalités, afin d'améliorer les performances, comme notamment la gestion de pages dynamiques. Ce domaine de recherche est proche du paradigme *Hommilière*, mais ces outils, bien que très performants, se contentent de vérifier la structure du graphe du site Web, mais pas le contenu sémantique.

### 7.2.3 Avantages de l'*Hommilière*

Comme le système de soutien de PARASCHOOL contient des milliers d'items, il est difficile (voire impossible) de faire une vérification systématique de chaque item. À sa création, chaque item suit plusieurs phases de vérification et de test, permettant d'enlever la majeure partie des coquilles. Mais il est difficile pour les professeurs de tester tous les cas et tous les enchaînements possibles.

De plus, l'équipe pédagogique doit assurer une certaine homogénéité des items à l'intérieur d'un thème. Mais elle ne possède aucun moyen de vérifier cette homogénéité à moins de tout tester à la main.

Ainsi, involontairement et par construction, le système de suggestions par *Hommilière* peut se convertir en système d'audit puissant, en détectant des incohérences dans les items proposés, mais aussi dans l'enchaînement de ces items. Même si les vérifications sont loin d'être parfaites, le gain pour PARASCHOOL est très important.

### 7.2.4 Inconvénients de l'*Hommilière*

Le principal inconvénient est que, pour analyser ces variables, il faut au moins posséder un peu de connaissances sur elles. L'équipe pédagogique doit donc être formée à ces nouvelles variables, afin qu'elle puisse mieux analyser, et donc mieux cerner, les éventuelles erreurs à corriger.

Les petits outils développés doivent donc signaler ces écarts de façon lisible. Un inconvénient est le réglage du degré de sensibilité. Il ne faut pas que le système d'alarme soit trop sensible, au point de se discréditer lui-même. Le taux de *faux-négatifs* ne doit donc pas être trop important.

Ensuite ces outils d'audit interviennent après le passage d'un certain nombre d'élèves. Le signalement des irrégularités ne peut donc survenir qu'après un certain temps d'utilisation.

Mais, au final, comme il a été précisé précédemment, le gain pour le logiciel de soutien ne peut qu'être positif, car l'équipe pédagogique possède en plus un outil de vérification du bon fonctionnement du système, sans gros effort de développement.

## 7.3 L'*Hommilière* PARASCHOOL et les systèmes de personnalisation de parcours

### 7.3.1 Description d'une *Hommilière* du point de vue des systèmes de personnalisation de parcours

Dans le site PARASCHOOL, la personnalisation de parcours pédagogique se fonde sur le module *élève* du paradigme *Hommilière*. Ce nouveau paradigme se situe entre les algorithmes d'OCF (Optimisation d'un chemin global) et les algorithmes de détection de profil (Optimisation de parcours pour chaque utilisateur).

Le modèle d'un élève de PARASCHOOL est fondé pour l'instant sur quatre notions :

**Le niveau :** Grâce au score Elo, le niveau de l'élève peut être connu. Ainsi les items proposés par l'*Hommilière* peuvent être filtrés pour écarter les items trop *extrêmes* (trop faciles ou trop difficiles) par rapport à son niveau.

**L'agenda :** L'élève peut être guidé vers des notions pédagogiques qui lui font défaut, grâce au plan de travail établi par le tuteur, mais aussi de manière automatique, grâce aux défaillances repérées par le système, créant en cela un système de remédiation à long terme.

**L'historique :** Cette notion permet d'éviter tout simplement à l'élève de revoir des notions qu'il a vues récemment, tout en conservant la possibilité de revenir dessus après un certain temps.

**La combattivité :** la dernière notion n'est pas encore implantée dans le système. Après la validation d'un item, le paradigme *Hommière* suggère 4 items à l'élève et affiche, pour chaque item, le taux de réussite espéré de l'élève. Si l'information était exploitée, le système pourrait, en fonction des choix de l'élève, déterminer sa combattivité (l'élève se dirige-t-il vers les exercices les plus difficiles ou les plus faciles ?). Le système pourrait ensuite proposer des choix adaptés à la psychologie de l'élève.

### 7.3.2 Comparaison avec l'existant

L'utilisation grandissante du Web a soulevé le besoin d'outils automatiques d'extraction de connaissances dédiés au Web, capables d'extraire de façon précise, de filtrer et de sélectionner l'information intéressante, parmi une large quantité d'informations disponibles. En particulier, les outils WUM (*Web Usage Mining*) sont capables d'extraire de la connaissance en analysant les données enregistrées durant la navigation d'un utilisateur, et peuvent être utilisées pour développer des systèmes de personnalisation ou de suggestion, dont le but est d'améliorer la fonctionnabilité d'un site. Notamment, dans le domaine du e-commerce, les sociétés ont développé des techniques afin d'adapter le site à chaque client.

L'avantage est que cette technique peut s'appliquer à n'importe quel type de navigation. L'objectif est de personnaliser automatiquement l'interface au gré de chaque utilisateur, d'anticiper ses besoins, de lui proposer la bonne information au bon moment et même de lui préparer automatiquement un système de marque-pages.

Certaines approches se fondent sur du filtrage collaboratif de profil utilisateur (GroupLens [Kon97, Her99], Firefly [Sha95], SUGGEST [Bar04]). Les principaux inconvénients sont les suivants :

1. Les données d'entrée sont souvent des données subjectives, car issues des utilisateurs eux-mêmes et donc elles entraînent ainsi un biais.
2. Le profil ainsi construit est statique, entraînant une dégradation des performances avec le temps.

Pour les éviter, un certain nombre d'approches ont été développées, en utilisant des techniques de fouille de données Web, afin de découvrir automatiquement les profils utilisateurs. Par exemple, Perkowitz et Etzioni [Per98] ont proposé l'idée d'optimiser la structure des sites Web à partir de la cooccurrence des schémas de pages issus des données d'utilisation du site. Schechter *et al.* [Sch98] ont développé des techniques pour prédire les futures requêtes de l'utilisateur en analysant les requêtes antérieures, afin d'optimiser les mises en cache. Landrin-Schweitzer *et al.* [Lan03] ont utilisé la programmation génétique pour réécrire les requêtes de l'utilisateur, à partir d'un profil évolué par approche parisienne [Col00]. Des techniques de fouilles de données [Spi99, Co09, Buc99] ont été appliquées pour extraire, à partir des fichiers logs du serveur, des schémas d'usage, qui sont ensuite utilisés par un système intelligent de marketing. Des méthodes de regroupement de sessions utilisateurs [Sha97, Yan96, Nas99, Bar04] ont été utilisées, afin de prédire les futurs comportements des utilisateurs. Des colonies de fourmis artificielles [Lab03] ont été utilisées pour orienter les utilisateurs sur le parcours d'un site Web.

Typiquement, le processus de personnalisation fondé sur un WUM est structuré en trois étapes :

1. La première étape est la préparation de données. Les données sont nettoyées et filtrées. L'idée est d'identifier l'ensemble des sessions d'utilisateurs à partir des données brutes récoltées et d'obtenir aussi la liste des pages visitées.
2. La deuxième est la fouille de données, dans laquelle les schémas d'usage doivent être trouvés en utilisant des méthodes d'association et de regroupement. L'idée est de trouver les groupes d'items qui reviennent fréquemment ensemble. Ces règles d'association représentent les relations qui existent entre les différentes URLs, en se fondant sur les différents schémas de navigation des utilisateurs.

Traditionnellement, chaque transaction d'utilisateur est associée à un vecteur multidimensionnel qui est utilisé par les algorithmes de regroupement. La similitude entre deux vecteurs est définie à l'aide d'une mesure de distance et permet ainsi de former des groupes de transactions.

3. Pour élaborer les propositions, la session de l'utilisateur actuel est classée en trouvant le groupement de transactions qui inclut le plus grand nombre de pages de l'historique. Les propositions sont composées à partir des pages le plus significatives du groupement. L'ensemble trouvé représente essentiellement une vue à court terme des liens potentiellement utiles pour l'utilisateur. Plusieurs facteurs peuvent ensuite influencer les suggestions faites à l'utilisateur :
  - (a) la longueur de l'historique à prendre en compte pour faire le recoupement,
  - (b) le critère de similitude entre les pages de l'historique et les différents groupements pré-construits,
  - (c) le fait que l'utilisateur a déjà ou non visité certains liens,
  - (d) la distance sur le site entre la page courante et les liens à suggérer, c'est-à-dire le nombre de pages minimum qu'il faut symboliquement traverser.

Internet fournit un moyen de communication direct entre les vendeurs et leurs clients. Compte tenu de l'habileté de récupérer des données détaillées et de la précision d'un clic de souris d'un utilisateur, il y a des possibilités de personnalisation très poussées. La plupart des approches de personnalisation incluent l'être humain dans la boucle, insérant de cette manière un biais dans le système et une obsolescence des données recueillies. À partir des données de navigation, le profil de l'utilisateur peut être extrait à l'aide de techniques de fouilles de données . . .

### 7.3.3 Avantages de l'*Hommilère*

Dans les algorithmes de détection de profil et donc de personnalisation de parcours, la notion d'ordre n'est souvent pas prise en compte, ce qui implique la perte de toute notion de chemin. Cependant, les schémas de navigation séquentiels [Spi99] permettent d'améliorer l'optimisation de site, surtout en ce qui concerne la personnalisation du site ou la gestion des flux sur le site. Le paradigme *Hommilère* possède par essence cette notion de chemin, ce qui permet ainsi d'espérer une meilleure optimisation des parcours.

L'avantage pour le paradigme *Hommilère* est que l'algorithme peut être facilement adaptable à la personnalisation de parcours sur des sites Web très larges. Un seul type de phéromones serait utilisé et la fonction de *fitness* aurait pour but de maximiser les taux de phéromones (phéromones = passage = attrait).

### 7.3.4 Inconvénients de l'*Hommilière*

Dans un processus de personnalisation, un des inconvénients majeurs du paradigme est qu'il est difficile de juger de la satisfaction de l'utilisateur. En effet, il est facile, après analyse des données, de repérer des comportements globaux d'une Hommilière. Mais est-ce que l'entité individuelle est satisfaite par le type de navigation proposée ? L'utilisateur aurait du mal à juger, car il ne possède pas de points de comparaison, mais il pourrait au moins dire si l'élément proposé est en adéquation avec ses souhaits. Il faudrait donc mettre en place un système de vote, qui permettrait d'évaluer cette adéquation (comme le système CoFIND). Le vote pourrait de plus influencer le dépôt de phéromones, ce qui orienterait les utilisateurs vers les éléments qui ont le plus satisfait les utilisateurs passés. Plusieurs types de vote peuvent même être mis en place, avec chacun son système de phéromones, permettant des personnalisations à plusieurs objectifs ... mais ces votes nuiraient à la transparence du système.

## 7.4 Les *Hommilières* en dehors de l'Enseignement Assisté par Ordinateur

L'utilisation des Hommilières ne semble pas être limitée au domaine de l'enseignement assisté par ordinateur. En effet, avec de petites adaptations (en définissant les bonnes variables stigmergiques et aussi la fonction de *fitness* adéquate), le paradigme Hommilière peut amener robustesse, stabilité et adaptabilité, en améliorant la navigation sur des systèmes informatiques qui possèdent de forts passages :

1. Le paradigme *Hommilière* peut, par exemple, aider les utilisateurs à naviguer parmi les items d'un forum de discussion. Ces items sont regroupés par catégories, mais, à l'intérieur d'une catégorie, ils sont souvent rangés anarchiquement par ordre de création. Les chemins empruntés par les utilisateurs peuvent indiquer des fortes corrélations entre points de discussion. Ainsi, en implantant les informations stigmergiques adéquates, les dépôts de phéromones peuvent synthétiser ces informations de passage, et donc aider les utilisateurs à naviguer au sein du forum. Si l'utilisateur participe à une discussion, il peut déposer une plus grande quantité de phéromones, pour symboliser un plus grand intérêt au sujet. Enfin l'absence de phéromones peut permettre aux modérateurs de détecter les points de discussions inintéressants.
2. Les sites de recherche, comme par exemple une bibliothèque virtuelle, rassemblent souvent plusieurs milliers de documents. L'optimisation par Hommilière peut apporter une recherche plus efficace, et aussi plus personnalisée. Les informations de passage permettent de souligner les documents les plus visités. Le modèle utilisateur (en correspondance avec le modèle élève des ITS) permet, s'il schématise bien les souhaits de l'utilisateur, de personnaliser la recherche.

Pour améliorer le processus, il faudrait développer un petit outil, afin de récupérer l'avis de l'utilisateur sur les documents consultés. Si le document correspond aux aspirations de l'utilisateur, des phéromones de succès peuvent être déposées sur le chemin emprunté par l'utilisateur. Sinon, ce sont des phéromones d'échec.

L'adéquation du document aux souhaits de l'utilisateur peut aussi, comme dans l'hommilière de PARASCHOOL, être symbolisée par un match entre le document et l'utilisateur. Ce dernier "gagne le match" lorsqu'il trouve dans le document consulté les informations recherchées. Ainsi, un utilisateur qui possède un haut score Elo représente un individu qui arrive, à partir du titre du document, voire du résumé, à bien cibler les informations qu'il

recherche. Le système peut alors essayer de récupérer plus d'informations spécifiques de cet utilisateur que de ceux à faible potentiel. Un document qui possède un score Elo faible, c'est-à-dire qui est souvent en adéquation avec les recherches souhaitées, représente plutôt un document général. À l'inverse, un document possédant un score Elo fort symbolise un document très spécialisé et à l'extrême peu pertinent, lorsqu'aucun utilisateur ne trouve dans son contenu les informations recherchées.

Comme pour les forums de discussions, une absence d'information stigmergique permet de mettre en valeur les documents peu utilisés. La notation Elo permet de classer suivant la généralité des documents et de détecter ainsi les documents peu pertinents.

3. Internet, de manière générale, représente un graphe possédant un très grand nombre de pages, où les utilisateurs recherchent quelques pages d'intérêt. Mais l'extension du paradigme *Hommilère* (tel qu'il a été décrit dans cette thèse) à tout le réseau Internet est impensable. En effet, le nombre d'arcs créés ferait exploser tout système qui stockerait les données stigmergiques. Une navigation *par échelle* permettrait peut-être de réduire cette combinatoire. Dans PARASCHOOL, un arc est, par définition, un lien entre deux items. Si un élève saute d'un item de maths  $I_M$  vers un item de français  $I_F$ , il crée un arc  $I_M \rightarrow I_F$  entre ces deux items. Mais si maintenant le système ne crée pas d'arc entre les deux items, mais entre les deux thèmes<sup>24</sup>  $T_M \rightarrow T_F$ , ce serait un super-arc qui regrouperait tous les élèves qui sauteraient du thème  $T_M$  au thème  $T_F$ . Par analogie, en créant une hiérarchie dans le site Web souhaité et, par extension, dans tout le réseau d'Internet, le paradigme *Hommilère* pourrait alors être appliqué à grande échelle.

L'optimisation par *Hommilère* peut donc apporter un outil de suggestion efficace, un outil de personnalisation de parcours et un outil de vérification de plusieurs milliers d'éléments, à des systèmes informatiques complexes, hors du contexte de l'enseignement assisté par ordinateur.

## 7.5 Conclusion

Cette comparaison entre le paradigme *Hommilère* et différents systèmes voisins permet d'avancer que le système de suggestion développé sur PARASCHOOL est assez complet : la force de l'algorithme est de combiner élégamment des données communes à tous les utilisateurs (poids pédagogiques et phéromones) et des données individuelles. Pour l'améliorer, il faudrait insérer des modes de communication pour ajouter une composante collaborative et aussi un retour client, qui permettrait de juger localement de l'adéquation entre la suggestion faite et les souhaits de l'utilisateur. Un développement futur, fondé sur une structure hiérarchique, permettrait de plus facilement envisager, à grande échelle, l'application du paradigme *Hommilère* à la personnalisation de parcours Web.

Un autre avantage est qu'involontairement le paradigme *Hommilère* se transforme, sans trop d'effort, en un système d'audit sémantique pour vérifier un large contenu d'items. Pour obtenir un tel système, il faut bien soigner les informations présentées et s'assurer que les utilisateurs potentiels de ces systèmes d'alarme possèdent quelques connaissances sur les données à analyser.

---

<sup>24</sup>Pour être exact, ce serait même un arc entre les deux cursus.

# Chapitre 8

## Conclusion

### 8.1 *Hommilière* comme un système de suggestions

#### Ce qu'il faut retenir

L'objectif de cette thèse était de mettre en place un système d'aide à la navigation au sein du logiciel PARASCHOOL. Le site de soutien possède de nombreux atouts pour être compétitif au sein du marché, mais il lui manquait une "intelligence" pour guider les élèves susceptibles de se perdre au milieu des milliers d'exercices présents sur le site.

Le système mis en place se fonde sur la théorie des algorithmes d'optimisation par colonies de fourmis. Mais plutôt que d'utiliser des fourmis artificielles, dont il faut programmer le comportement, il a été possible (grâce au grand nombre d'élèves inscrits) d'associer chaque utilisateur à une fourmi qui libère des phéromones sur le chemin emprunté. À partir de ces informations stigmergiques, une fonction de *fitness* a été élaborée, afin de guider les élèves vers les objectifs établis par l'équipe pédagogique.

Les premiers tests ont permis de recadrer les objectifs pédagogiques (nouvelle fonction de *fitness*), mais surtout de mettre en évidence le fait que les "Hommilières" ne se comportent pas de la même manière que les fourmilières artificielles. La première contribution de cette thèse est donc la mise en place d'un nouveau paradigme, *l'Optimisation par Hommilière*, qui se situe entre l'orientation d'utilisateurs sur un parcours et l'optimisation par colonie de fourmis.

L'algorithme mis en place a prouvé qu'il possède les caractéristiques souhaitées, c'est-à-dire stabilité (en fonction du passage des élèves), robustesse (capacité à combler certains vides pédagogiques) et surtout adaptabilité (possibilité d'inversion en cas de mauvais conseil). Pour arriver à un tel résultat, les principales adaptations apportées à l'algorithme standard d'OCF sont :

**l'érosion :** En comparaison avec le processus d'évaporation standard, l'érosion permet d'éviter toute perte d'informations stigmergiques en cas d'inactivité sur le site, mais aussi toute accumulation de phéromones, en cas de sur-activité comme, par exemple, lors de cours de Travaux Pratiques, où une quarantaine d'élèves parcourent le même chemin sur une petite période de temps.

**l'individualisation :** Des facteurs multiplicatifs (Les Phéromones Individuelles Multiplicatives (PIM) et les Contraintes) ont été ajoutés à la fonction de *fitness* pour atteindre les objectifs pédagogiques spécifiques à chaque utilisateur. Par exemple, grâce à ces facteurs multiplicatifs, les élèves sont guidés vers les points de cours qui leur font défaut, tout en les détournant d'exercices qu'ils ont déjà faits. Le système de suggestions gagne ainsi en "intelligence," en proposant un chemin personnalisé pour chaque élève.

Outre les caractéristiques souhaitées (stabilité, robustesse et adaptabilité), le paradigme *Hommilière* a su attirer plus de 25% des élèves. Par ailleurs, moins de 25% utilisent des chemins conseillés par des professeurs (plan de travail, ...). Il reste donc à peu près 50% d'élèves qui naviguent librement sur le site de PARASCHOOL et qu'il faut maintenant convaincre de suivre les suggestions de l'Hommilière.

## Perspectives

Une perspective est d'améliorer l'affichage des résultats, afin de le rendre plus attrayant et plus interactif. Une étude a été faite afin de vérifier la faisabilité (*cf.* annexe A) de l'utilisation d'*Animated Pedagogical Agents* (APA) adaptatifs. Le principe est de proposer à chaque utilisateur un *avatar* (une représentation virtuelle de l'élève sur le site de soutien) sous forme d'une fourmi (choix de l'équipe pédagogique). Cet avatar informerait l'utilisateur des suggestions trouvées par le paradigme Hommilière, un peu comme le ferait le trombone *ClipIt* de *Windows*, mais, si possible, en plus adaptatif et intelligent. En effet, l'idée serait de faire évoluer par évolution artificielle le comportement de l'avatar afin que celui-ci s'adapte à chaque élève. Par exemple, l'avatar aurait un comportement moins agressif s'il se trouve en face d'un élève qui a besoin d'être épaulé. Le logiciel PARASCHOOL gagnerait ainsi en convivialité.

## 8.2 *Hommilière* comme un système de notation automatique

### Ce qu'il faut retenir

La deuxième contribution est la mise en place d'un système de notation automatique, fondé sur la notation Elo du monde des échecs. Ce système de notation a prouvé, malgré quelques imperfections, son efficacité durant les 50 dernières années dans le contexte des tournois d'échecs. Fondée sur une estimation statistique du résultat attendu (*cf.* eq. 6.2), la notation Elo permet d'obtenir une bonne estimation de la force des joueurs.

En greffant cette notation automatique au site de soutien, PARASCHOOL espère obtenir une bonne vision des niveaux des élèves et des items, sans avoir à demander aux professeurs de les évaluer. Chaque élève, si l'équipe pédagogique le veut bien, peut aussi être informé de son niveau, et suivre ainsi sa progression.

Pour éviter la déflation (une des imperfections de la notation Elo), il a été possible d'utiliser la méthode de notation IPER sur l'ensemble des joueurs *stables*, c'est-à-dire les items, afin de stabiliser les notes des joueurs *variables*, c'est-à-dire les élèves.

## Perspectives

Lors des suggestions faites par l'*Hommilière*, le niveau de chaque item proposé est affiché à l'élève. Ainsi, le système peut observer le comportement de chaque étudiant face à la difficulté, en choisissant soit un exercice facile soit un exercice difficile. Si, par exemple, un élève décide plusieurs fois de se confronter à des exercices ayant un niveau supérieur au sien, il peut être alors classé comme *combattif*. Ces informations viennent compléter le modèle élève dans l'ITS de PARASCHOOL. Le comportement de l'utilisateur est alors modélisé plus finement, permettant une navigation encore plus personnalisée.

Cette récupération de profil utilisateur ouvre la porte à des applications prometteuses fondées sur Internet, autres que l'enseignement assisté par ordinateur ...

## 8.3 Hommilère comme un système d'audit

### Ce qu'il faut retenir

La troisième contribution est une conséquence directe de l'ajout des informations (phéromones, notes Elo) dans le système. En effet, ces informations permettent un audit sur les milliers d'items présents sur le site, en détectant d'éventuelles erreurs sémantiques et même pédagogiques. Par exemple, la présence de taux de phéromones anormalement élevés sur certains arcs a permis de mettre en évidence des problèmes pédagogiques jusqu'à présent passés inaperçus (exercices mal posés, problèmes d'évaluation, ...).

Une fois qu'une erreur est détectée, le professeur est averti. Pendant ce temps, l'*Hommilère*, grâce à son adaptabilité, propose un autre chemin à l'élève. Après analyse, le professeur peut intervenir en corrigeant l'erreur, ou en valorisant le chemin pédagogique proposé par l'*Hommilère*. Le système ne remplace en rien les professeurs, car ce sont eux qui ont le dernier mot. Le système permet juste d'apporter une aide aux professeurs pour gérer plusieurs milliers de nœuds interconnectés entre eux.

### Perspective

La perspective est d'essayer d'établir de nouvelles analyses des informations stockées sur le site afin de faire ressortir des données pertinentes sur la santé de l'*Hommilère* PARASCHOOL. Dans ce sens, un thésard espagnol, Sergio Gutierrez Santos, va commencer en septembre 2006 une étude de l'*Hommilère* de PARASCHOOL. À partir des analyses obtenues, l'objectif serait d'essayer d'impliquer un peu plus l'ensemble des professeurs sur cet outil, afin qu'ils trouvent un retour d'information pertinent sur les thèmes qu'ils ont créés.

Le concept d'*Hommilère* peut ainsi servir d'outil d'audit puissant, capable de vérifier naturellement le bon comportement d'un graphe comprenant des milliers d'items, tâche quasiment impossible autrement. Comme dans le cadre du développement des réseaux et des STIC, des milliers d'utilisateurs potentiels peuvent être mis en relation via un logiciel particulier ou un service informatique. Il semble que le développement conscient et planifié d'*Hommilères* pour des besoins d'audit, pour la remontée d'information ou pour l'amélioration de systèmes complexes soit une voie très prometteuse, voire inéluctable ...

## 8.4 Conclusion générale

Le système de notation Elo mis en place montre qu'en moyenne, il y a une différence de 200 Elo entre élèves et items, correspondant au but fixé par l'équipe pédagogique de PARASCHOOL, que les élèves réussissent les exercices avec un taux de 60%. L'Optimisation par Hommilère décrite dans cette thèse semble donc fonctionner correctement.

De plus, le système a été testé et utilisé quotidiennement en vraie grandeur par plus de 250.000 élèves inscrits pendant de nombreux mois, ce qui semble montrer qu'il est robuste et stable, et qu'il reste raisonnable dans les ressources informatiques qu'il utilise.

Il reste maintenant à voir si ce nouveau paradigme d'optimisation trouvera preneur dans d'autres environnements informatiques fréquentés par de nombreux utilisateurs.



# Annexe A

## Technologie des Agents Pédagogiques Animés

### A.1 Objectif

Cette étude a pour but de développer un Agent Pédagogique Animé (APA) [Les97, Pie98, Joh98, Joh01], pour créer une réelle interactivité entre l'utilisateur et la plate-forme.

Les agents pédagogiques sont des agents autonomes qui facilitent l'apprentissage humain en interagissant avec les élèves dans des environnements d'apprentissage. Les APAs apparaissent à l'élève sous forme de personnages animés. Ils sont capables d'engager une discussion continue avec l'élève et de simuler les aspects d'un dialogue entre un professeur et son élève. Ils doivent donner à l'utilisateur une impression de vraisemblance et de réalisme. Leur comportement vis à vis de l'élève doit donc être naturel et approprié à son rôle d'instructeur virtuel.

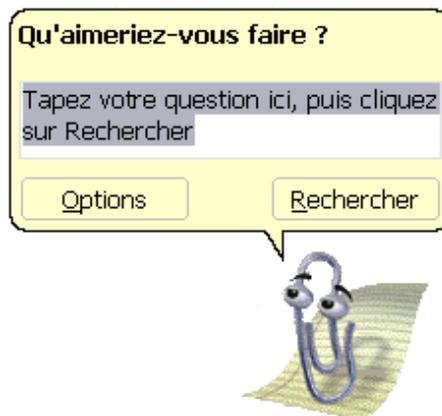


FIG. A.1 – L'agent *ClipIt* du logiciel EXCEL.

Dans le monde des agents animés, le trombone de WINDOWS, *clipIt*, est sûrement le plus connu. Malheureusement, cet agent n'a pas forcément gagné la sympathie des utilisateurs de WORD, d'EXCEL, ... En effet, il se contente de jouer un *scenario* donné (ou une série de *scenarii*) en fonction des actions de l'utilisateur. Son implantation statique implique une certaine répétitivité, ce qui provoque l'agacement de nombreux utilisateurs.

Lorsqu'un humain se confronte à un agent animé, il s'attend à ce que celui-ci fasse preuve d'au moins un peu d'"intelligence". Si, par exemple, ce dernier ne se souvient pas des choix antérieurs de son interlocuteur, l'humain considère que l'agent animé n'est pas "digne" d'interagir avec lui.

L'objectif est d'essayer d'apporter un peu de "vie", d'"intelligence" à un APA, dans le but d'obtenir un système interactivement agréable à utiliser.

Il faut savoir qu'à l'origine, l'agent MICROSOFT devait être dynamique et s'adapter à l'utilisateur au moyen de réseaux de neurones. Pour l'APA de PARASCHOOL, la première idée fut plutôt de s'orienter vers la technique de l'évolution artificielle : le but est de mettre en place un algorithme évolutionnaire interactif qui manipule les APAs afin d'obtenir l'individu le plus agréable à utiliser.

**Remarque :** Le terme *avatar* est un terme hindou pour désigner "l'incarnation de la Divinité Suprême sur Terre." Dans le monde informatique, il désigne l'apparence que prend un internaute dans un monde virtuel, voire dans des forums de discussion. L'avatar apparaît à chaque fois que l'utilisateur se connecte à un univers virtuel ou qu'il écrit un message dans un forum, afin que les autres internautes puissent l'identifier visuellement.

Sur le site de la société PARASCHOOL, il désigne la représentation d'un APA sur le site de soutien. L'objectif est d'associer chaque utilisateur à un avatar, ce qui à terme peut devenir sa représentation virtuelle dans le monde pédagogique de PARASCHOOL. L'élève peut interagir directement avec son avatar, c'est-à-dire sa représentation virtuelle.

## A.2 Choix de la structure des agents animés

Pour commencer, il faut déterminer quel type d'avatar peut être utilisé comme individu dans l'algorithme d'évolution artificielle. Lors de l'étude, il est apparu que la société PARASCHOOL avait à sa disposition trois possibilités :

1. Les agents MICROSOFT (dont le trombone *ClipIt* fait partie) [Mic] : Ce sont des agents 3D auxquels ont été associés un langage pour effectuer un ensemble d'actions assez basiques en réponse aux actions de l'utilisateur.

L'avantage est qu'une communauté sur Internet s'est créée autour de ces agents, principalement pour fournir différentes apparences aux agents.

Le principal inconvénient est que la technologie n'est disponible que sur WINDOWS. Il est donc difficilement envisageable d'opter pour un tel choix technique lorsque la société vise tout utilisateur d'Internet.

2. Les avatars commerciaux : Il existe de nombreuses sociétés (Artificial Life [Art], Extempo Systems [Ext], ...) qui proposent des avatars, souvent en 3D, avec un langage de programmation associé. Comme les agents MICROSOFT, le langage associé est assez basique et surtout peu paramétrable.

Donc, si la société PARASCHOOL décide de se lancer dans cette direction, elle doit alors demander de nombreuses spécifications particulières à la société qui développera l'application.

3. Les avatars FLASH [Fla] : La société PARASCHOOL possède une excellente équipe de graphistes, qui, lors d'un projet, a développé, grâce à la technologie MACROMEDIA FLASH, un avatar avec un petit moteur d'actions.

L'idée est de partir de cette base et d'améliorer l'avatar et son langage de programmation.

L'objectif de cette amélioration est de trouver un langage de description du comportement qui soit suffisamment paramétrable pour obtenir un nombre important de comportements possibles et trouver, parmi tous ces comportements, celui qui s'adapte le mieux à l'utilisateur.

## Langages existants

Le but est donc de créer un agent avec lequel l'utilisateur peut interagir aussi naturellement qu'avec de vrais humains. La réussite d'un tel agent passe beaucoup par le langage non-verbal : la richesse des gestes utilisés, la précision et l'adéquation du geste à la situation donnée [Gra02].

De plus, il est évident que la réaction de l'utilisateur à un agent animé dépend aussi de caractéristiques subtiles comme la personnalité, l'appartenance à un groupe [Nas00, Wal94], ...

Notamment, lors d'une présentation, la synthèse des gestes de la main [Cas98, Chi00, Har02, Kop00] joue un rôle important pour beaucoup de domaines d'application [Cas99, Les99]. De nombreux langages XML ont été développés pour mettre à plat le comportement non-verbal des avatars, comme MPML [Tsu00], VHML [VHM], APML [DeC02], RRL [Piw02], CML et AML [Ara02], MURML [Kra02]. Chacun de ces langages de représentation agit soit au niveau du discours et de la communication (APML, RRL, CML, MURML) en utilisant des balises comme "relation de confiance", "mise en valeur", soit au niveau du signal (AML, VHML), avec des balises comme "sourire", "tourner la tête à gauche".

## GEStyle

L'équipe de Zsófia RUTTKAY a développé un langage XML, GEStyle [Noo04, Rut05], qui définit un ensemble de *styles*, permettant de donner des instructions à l'APA pour exprimer, de manière non verbale, des messages.

Pour l'avatar, un style renferme l'ensemble des gestes et leurs utilisations respectives. GEStyle utilise des balises de signification de haut niveau, qui sont traduites, suivant le style associé à l'avatar, par des balises gestuelles de bas niveau.

GEStyle est organisé de façon hiérarchique :

- Au niveau atomique, se trouvent les gestes de base (par exemple agiter la main droite, acquiescer, regarder à gauche ...). Ces gestes simples ne renferment aucune signification particulière.
- Ces éléments sont ensuite combinés pour former des gestes composés (par exemple, agiter les deux bras, faire signe avec la main droite et acquiescer, ...) classés par expressions gestuelles. Par exemple, l'expression gestuelle de "souhaiter la bienvenue" peut être définie par l'exécution séquentielle d'un sourire, puis d'un acquiescement de tête ou par l'action de lever le bras droit tout en ouvrant la main droite.

De nombreux paramètres, comme la durée, la manière d'exécuter le geste, sont définis pour obtenir une plus grande variété de gestes.

- Au niveau suivant, se trouvent les sens, qui représentent les actions de communications (par exemple, montrer de la joie, prendre part à la conversation) et qui peuvent s'exprimer par un ensemble d'expressions gestuelles. Un sens est donc associé à un ou plusieurs gestes composés, chacun spécifiant une façon différente d'exprimer le même sens.
- L'association entre les sens et les différents gestes est donnée par la définition d'un style. Un style contient un ensemble de sens en adéquation avec la représentation donnée (par exemple un style pour "professeur", "français", ...).

En dehors de cette hiérarchie, GEStyle permet de spécifier les caractéristiques des mouvements au moyen de la *manière* (par exemple, mouvements doux, anguleux, ...) et de déterminer

les gestes que l'avatar préfère utiliser par le concept des *modalités* (par exemple, utiliser plus ou moins les gestes manuels ...).

Toute la communication non verbale d'un avatar est donc régie par la combinaison de plusieurs styles, en plus de la définition d'une manière et des modalités.

Voilà, par exemple, un extrait de style "introverti" qui permet de définir le sens "accentuation" :

```
<style nom='introverti'>
  <sens nom='accentuation'>
    <gestSpec>
      <geste nom='soulever_les_sourcils'/>
    </gestSpec>
  </sens>
  <sens ...
  </sens>
</style>
```

Ce code XML dit de manière simple qu'un agent animé "introverti" devra soulever les sourcils pour accentuer un point.

Ainsi, lorsqu'un avatar exprimera la phrase stylisée :

```
Vous êtes <sens nom='accentuation'>très</sens> jolie, mademoiselle.
```

il soulèvera les sourcils au moment de dire le mot "très".

Des styles plus complexes peuvent être définis :

```
<style nom='extraverti'>
  <sens nom='accentuation'>
    <gestSpec prob='0.7'>
      <manière intensité='forte'/>
      <geste nom='acquiescer_et_gesticuler'/>
      <geste nom='fixer_du_regard'/>
    </gestSpec>
    <gestSpec prob='0.3'>
      <manière type_mouvement='soudain'/>
      <geste nom='soulever_les_sourcils'/>
    </gestSpec>
  </sens>
</style>
```

Cet exemple décrit le sens "accentuation," qui est associé à plusieurs gestes composés (un geste avec une probabilité de 0.7 et un autre avec une probabilité de 0.3). Ainsi, à chaque compilation de la phrase stylisée, le rendu gestuel obtenu est différent. Cela permet de refléter le fait que les humains ne répètent pas à chaque fois une phrase ou un geste de la même manière.

L'avantage de GESTyle est que, pour une même phrase stylisée, il suffit de changer le style de l'agent (introverti → extraverti) pour obtenir un rendu gestuel différent, en adéquation avec le nouveau style de l'agent.

## Le style mis en place

GEStyle présente un langage de description des gestes très précis et suffisamment paramétrable pour permettre d'obtenir une grande variété de communications non-verbales. Après analyse, il est apparu que plusieurs éléments entrent dans la composition du style d'un avatar.

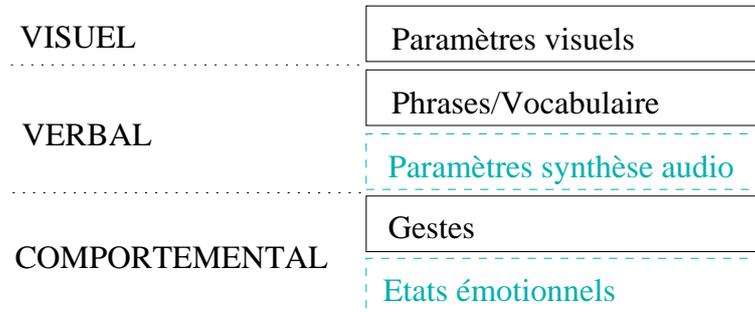


FIG. A.2 – Les différentes couches mises en place pour le style de l'avatar.

La figure A.2 décrit les différents éléments trouvés lors de cette analyse (les éléments en tirets représentent des parties non traitées dans cette étude préliminaire). Ces éléments se présentent sous forme de trois couches :

**La couche visuelle :** Cette couche regroupe tous les paramètres visuels qui permettent de définir l'apparence visuelle de l'avatar : des caractéristiques physiologiques (trapu, petite tête, longues jambes, ...) jusqu'aux éléments vestimentaires (chapeau, pantalon bleu, baskets, ...). Cette couche peut être contrôlée par l'algorithme d'évolution artificielle, mais il est apparu plus intéressant de donner la possibilité à l'élève de construire à son goût l'avatar avec lequel il aimerait dialoguer. L'avantage est que l'élève a l'impression de contrôler son avatar, c'est-à-dire sa représentation virtuelle, mais en plus, au moment de juger son avatar, il se focalise bien sur son style de communication et pas juste sur la couleur de son pantalon par exemple ...

**La couche verbale :** Cette couche permet de définir tous les éléments qui entrent dans le contexte du dialogue de l'agent animé :

1. Le premier point rassemble l'ensemble des phrases que l'avatar peut utiliser dans une situation donnée. Ces phrases, qui sont agrémentées de toute la communication non verbale issue de GEStyle, permettent de définir le style verbal de l'avatar (par exemple, un style plus familier ou plus soutenu ...).
2. Le deuxième point fait encore partie de la communication non verbale, même s'il concerne directement la partie dialogue de l'avatar. Cet élément regroupe toutes les intonations de voix, qui sont vecteurs de messages non verbaux. Par exemple, une intonation de voix forte peut permettre d'avoir plus de force de persuasion auprès de l'élève. C'est en fait le système TTS (*Text To Speech*) qui doit rendre toutes ces subtilités de la voix. Comme pour l'instant PARASCHOOL souhaite ne pas utiliser de système TTS pour l'avatar, ces paramètres n'ont pas été pris en compte dans un premier temps.

**La couche comportementale :** Cette couche comprend deux éléments :

1. Le premier élément représente les gestes, c'est-à-dire toute la communication non-verbale définie par le langage GEStyle.

2. Le deuxième élément est constitué par les états émotionnels. Ces derniers sont aussi décrits dans le langage GESTyle. Ces états émotionnels permettent de faire varier le comportement de l'avatar en fonction de certains événements. Par exemple, un avatar, qui possède un style introverti, a plutôt tendance à s'exprimer avec peu de gestes amples. Mais, par exemple, suite à un mauvais résultat de l'élève, il peut se mettre dans l'état de colère, ce qui a pour conséquence d'augmenter l'amplitude de ses gestes de 20%. Ces états émotionnels n'ont pas été étudiés dans un premier temps, car ils apparaissaient plus comme des points secondaires. Le but est de se focaliser, dans un premier temps, sur le cœur du système, avant de passer à la suite.

### A.3 Mise en place d'un algorithme évolutionnaire interactif

Le style, ainsi construit à partir de GESTyle, permet d'obtenir une grande variété de comportements.

On peut alors chercher le comportement d'un avatar correspondant au mieux à l'attente d'un utilisateur.

#### Boucle évolutionnaire

C'est pour cette raison que la technique d'évolution artificielle a été choisie. L'algorithme part d'une population initiale d'individus, c'est-à-dire un ensemble de styles, dont il laisse les utilisateurs évaluer l'interactivité. À partir des styles les mieux notés, de nouveaux individus sont créés grâce aux opérateurs génétiques, évalués par les utilisateurs et ajoutés dans la population à la place des plus mauvais individus. Cette boucle évolutionnaire permet d'obtenir un individu, c'est-à-dire un style, qui aboutit à une grande interactivité avec les utilisateurs.

#### 2.500.000 avatars

La première idée est d'utiliser une seule population d'individus pour tous les utilisateurs. Mais, dans ce cas, l'optimum trouvé tend plutôt à être un avatar dont le style s'adapte à tous les utilisateurs, c'est-à-dire un agent animé stéréotypé.

Cependant l'objectif de cette étude est plutôt d'offrir un avatar qui s'adapte à chaque utilisateur. Comme il y a plus de 250.000 utilisateurs sur le site, cela implique qu'il faille utiliser plus de 250.000 populations différentes : une population par utilisateur.

Ainsi, chaque utilisateur fait évoluer sa population d'avatars pour en trouver un qui lui soit spécifique. Comme l'utilisateur doit évaluer chaque avatar de sa population, il faut donc que cette dernière ne soit pas trop importante.

La taille de la population a été choisie arbitrairement à 10. Pour ne pas saturer la base de données avec 2.500.000 styles, l'idée a donc été de réduire au maximum la définition du style afin qu'il contienne le minimum d'informations, mais suffisamment pour garder une grande variété de styles possibles.

Normalement, le style doit contenir tous les gestes composés associés aux différents sens, toutes les phrases stylisées ... Comme tous ces éléments sont communs à la majorité des utilisateurs, leurs définitions peuvent être conservées en base et leurs appels juste faits au moyen d'un identifiant. Mais, à ce stade, la définition des styles prend encore trop de place.

L'idée est de coder chaque couche du style sur un demi octet, c'est-à-dire 4 bits. En laissant 4 bits pour une future couche ou d'autres paramètres extérieurs, un style est alors codé sur 2 octets. Toutes les populations des styles prennent alors 5Mo en mémoire dans la base de données.



questions directes demandant à l'utilisateur s'il est satisfait de l'APA proposé.

Une autre solution peut consister à mettre sous l'avatar deux boutons, qui déclenchent chacun une action directe sur l'avatar. Le premier bouton peut le récompenser, alors que le second peut, par exemple, lui donner un coup de pied.

2. La deuxième méthode consiste à récupérer de façon automatique le niveau d'interactivité que l'utilisateur entretient avec l'avatar. Le système peut, par exemple, récupérer la distance de la souris à l'avatar ou même le nombre de clics de souris effectués sur l'avatar.

Il faut faire attention à prendre ces retours de satisfaction avec précaution, car, pour la première méthode, certains élèves seraient tentés d'en abuser et, pour la deuxième, certains utilisateurs pourraient avoir des comportements (de souris) particuliers à cause d'événements extérieurs à l'avatar. L'idée est de combiner ces deux types d'informations, afin d'obtenir une évaluation satisfaisante de l'avatar.

## Co-évolution

L'étude prévoit la mise en place d'une bibliothèque de phrases, de gestes et de paramètres visuels. L'interaction de l'avatar, qui est évalué par l'utilisateur, n'est que le fruit de la juxtaposition de toutes les briques élémentaires (gestes, paroles, ...). L'idée est donc d'utiliser l'approche parisienne [Col00], c'est à dire qu'en plus de noter chaque style, chaque brique élémentaire est aussi notée individuellement. Ces notes individuelles permettent de déterminer les éléments les plus influents positivement dans un style.

Ainsi, lorsque le professeur a besoin de construire de nouveaux gestes ou de nouvelles phrases, pour alimenter la bibliothèque, il peut s'aider des notes individuelles pour sélectionner les briques élémentaires.



FIG. A.4 – Utilisation de l'avatar FLASH de manière statique dans le projet pour *l'administration en ligne*.

## A.4 Conclusion

Cette étude permet de décrire un système fondé sur un algorithme évolutionnaire interactif, dont l'objectif est d'obtenir un style qui s'adapte à chaque utilisateur. La définition du style est réduite à deux octets afin de fournir à chaque utilisateur sa population d'avatars, sans surcharge au niveau de la base de données.

Le langage GEstyle a permis d'offrir une grande variété au niveau des comportements non verbaux et surtout de donner un schéma de structure pour les styles qui sont utilisés dans la boucle évolutionnaire.

La transposition entre l'échelle des styles et l'échelle des degrés permet de conserver cette grande variété de comportements, afin de trouver le style qui s'adapte au mieux à l'utilisateur.

L'étude a abouti à l'intégration de l'avatar FLASH au sein d'un projet (*cf.* fig A.4) avec l'administration en ligne (<http://www.adele.gouv.fr/>). Cette intégration n'est que statique pour l'instant, c'est-à-dire que les *scenarii* donnés à l'avatar sont pré-établis et fixes, mais dès que la machine évolutionnaire sera mise en place, PARASCHOOL peut espérer obtenir un avatar interactif ...



# Annexe B

## Outil de visualisation

### B.1 Objectif

Il est apparu qu'il fallait mettre en place un système de visualisation afin de contrôler le bon fonctionnement de l'*Hommilière*. L'objectif de cet outil est de résumer toutes les informations collectées sur le site de soutien (phéromones, passages, *fitness*, ...) sous forme de graphe.

Il faut que l'outil de visualisation soit facile d'utilisation, agréable pour la lecture des données, mais aussi pas trop lourd pour la récupération des informations.

### B.2 Rangement des objets graphiques

Le rangement des éléments graphiques au sein de l'outil de visualisation passe par deux étapes. Tout d'abord, les éléments sont rangés dans une structure hiérarchique pour améliorer la navigation. Ensuite, dans chaque zone d'intérêt, des méthodes de placement automatique ont été utilisées pour faciliter localement la visualisation des éléments.

#### Classement hiérarchique

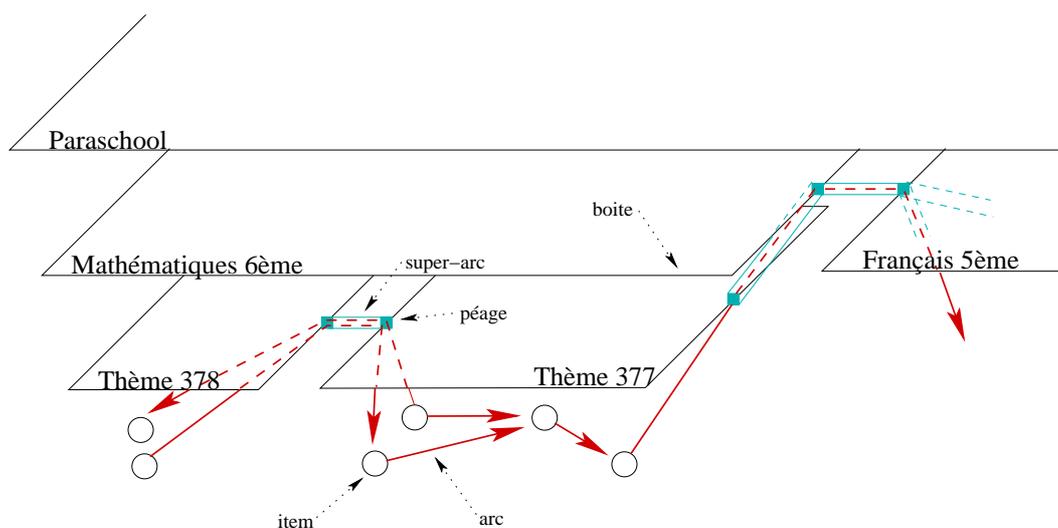


FIG. B.1 – Rangement hiérarchique des items.

Le logiciel PARASCHOOL comporte plusieurs milliers d'items. Un outil de visualisation ne peut en aucun cas visualiser tous les arcs entrants et sortants de tous ces items. Le rangement des items s'est donc effectué, de manière hiérarchique, suivant l'organisation établie au sein de PARASCHOOL. Les éléments pédagogiques sont placés dans des boîtes incluses les unes dans les autres. La figure B.1 résume l'inclusion des différents éléments graphiques : les items sont rangés dans des boîtes symbolisant les thèmes, qui eux-mêmes sont placés dans les cursus, le tout contenu dans la boîte principale représentant PARASCHOOL.

À l'intérieur d'un thème, les items sont disposés suivant différentes méthodes de placement (*cf.* section suivante) et un arc entre deux items y est représenté par une ligne fléchée. Si un arc doit rejoindre une autre boîte (par exemple un arc reliant un item du thème 377 à un item du thème 378), il doit passer par deux *péages* (symbolisés par les deux carrés pleins sur la frontière des deux thèmes concernés) et un *super arc* (symbolisé par le tuyau entre les deux péages) qui canalise les arcs circulant entre les deux boîtes. Cette visualisation permet de se focaliser principalement sur les arcs intérieurs, tout en ayant un aperçu des flux entrants et sortants du thème.

Par extension, un item peut être relié à un item d'un autre cursus (par exemple, français 5ème). Ainsi l'arc est donc canalisé par plusieurs péages et super-arcs pour atteindre l'item cible.

Grâce à la notion de super-arc et de péage, chaque boîte possède la même structure interne, c'est-à-dire des éléments graphiques reliés par des arcs. Pour les thèmes, ce sont les items reliés par de simples arcs. Pour les cursus, ce sont les boîtes de thèmes reliées par des super-arcs. Ainsi les méthodes mises en place pour la visualisation, pour l'organisation, ... sont les mêmes quel que soit le niveau hiérarchique visualisé.

**Remarque :** Il n'est pas raisonnable de penser pouvoir charger les informations de tous les items et de tous les arcs de PARASCHOOL dans l'outil de visualisation. Au fur et à mesure de la navigation de l'utilisateur, les données sont chargées dynamiquement. En fait, chaque boîte possède deux états (ouvert et fermé). Par défaut, une boîte est fermée, c'est-à-dire qu'elle ne possède pas les informations au sujet de ses éléments contenus. Si l'utilisateur décide d'entrer dans une boîte, celle-ci passe à l'état ouvert, mais avant, elle récupère les informations à propos de ses éléments enfants, afin de les afficher à l'utilisateur. Ainsi, en entrant dans le cursus Mathématiques 6ème, le système questionne le serveur pour récupérer les informations à propos de tous les thèmes de ce cursus. Inversement, la fermeture d'une boîte peut, si la mémoire est saturée, engendrer le déchargement des informations concernant les éléments contenus dans la boîte.

## Méthodes de placement

Afin de bien disposer les éléments graphiques dans une boîte donnée, de nombreuses méthodes de placement ont été testées :

**Disposition en spirale :** Lorsqu'un professeur construit un thème, il établit un chemin pédagogique principal (enchaînement d'arcs possédant le poids pédagogique le plus important). L'idée est donc de ranger les items suivant ce chemin. Si tous les items étaient alignés, l'encombrement horizontal serait très important, mais surtout tous les arcs se retrouveraient confondus sur la même droite. Le chemin principal a donc été placé sur une spirale. La visualisation est ainsi plus compacte et cette disposition présente l'avantage de minimiser le nombre d'arcs qui se confondent. Mais la lecture des chemins pédagogiques n'est pas aisée. En effet, si l'utilisateur appréhende facilement les arcs qui ne "sautent" pas trop loin (*cf.* l'arc  $2 \rightarrow 4$  sur la figure B.2), car ces "sauts" sont associés à des petits raccourcis, il

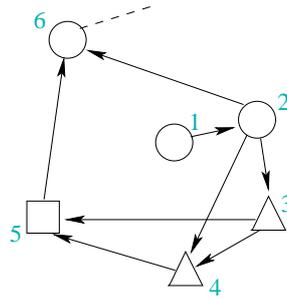


FIG. B.2 – Aperçu du résultat de la disposition en spirale sur les 6 premiers items du thème 377.

lui est plus difficile de le faire pour les plus grands raccourcis (*cf.* l’arc  $2 \rightarrow 6$  sur la figure B.2), où il peut se poser des questions pédagogiques : pourquoi l’élève est “autorisé” à ne pas faire une série d’items ? Ne manque-t-il pas un élément pédagogique important ?

Bien que cette disposition soit compacte, elle manque d’information à propos de la structure du graphe pédagogique.

**Disposition verticale :**

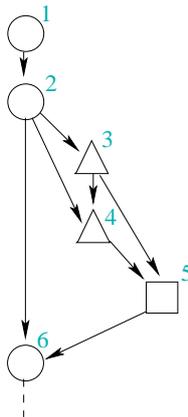


FIG. B.3 – Aperçu du résultat de la disposition verticale sur les 6 premiers items du thème 377.

Comme pour la méthode précédente, le système récupère le chemin pédagogique principal défini par l’équipe pédagogique. Chaque élément est ensuite disposé suivant cet ordre de manière verticale, tout en se décalant sur une colonne différente en fonction de son type : cours ( $\circ$ ), savoir-faire ( $\triangle$ ) et exercice ( $\square$ ) (*cf.* figure B.3).

L’avantage de cette technique est d’avoir une lecture simplifiée du chemin pédagogique principal, notamment par type d’items. En particulier, la compréhension de l’arc  $2 \rightarrow 6$  est plus facile : cet arc permet de “court-circuiter” les savoir-faire et les exercices associés au point de cours (2), et donc de passer directement au point de cours suivant.

Mais, comme les items sont placés sur une grille, les arcs ont tendance à se confondre. Par exemple, un éventuel arc  $1 \rightarrow 6$  se mélangerait avec l’arc  $2 \rightarrow 6$ . De plus, l’encombrement vertical est assez important, ce qui ne facilite pas la vision globale du thème.

**Disposition hiérarchique :** Les deux méthodes précédentes se contentent de placer les items sans tenir compte de la structure des arcs.

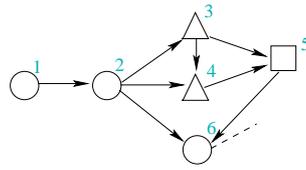


FIG. B.4 – Aperçu du résultat de la disposition hiérarchique sur les 6 premiers items du thème 377.

La méthode hiérarchique sélectionne le premier item du thème, c'est-à-dire le premier du chemin pédagogique principal, et à partir des arcs *professeurs*, tous les items enfants, c'est-à-dire les items qui sont reliés avec au moins un arc professeur sortant du premier item. La procédure est répétée à partir des enfants trouvés (2), pour obtenir les petits-enfants (3, 4, 6) et ainsi de suite . . .

La disposition (*cf.* figure B.4) est plutôt horizontale : chaque “génération” est placée sur une couche verticale, décalée au fur et à mesure que le système s'enfonce dans la “généalogie”.

Ce mode de visualisation permet d'obtenir un aperçu des navigations possibles à partir du premier item. La lecture peut être, par contre, un peu faussée avec certains arcs qui reviennent en arrière (5 → 6).

#### Disposition élastique :

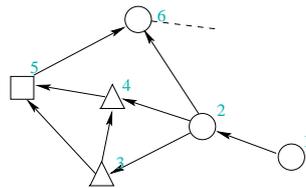


FIG. B.5 – Aperçu du résultat de la disposition élastique sur les 6 premiers items du thème 377.

L'objectif de cette méthode est de disposer les items en fonction de leur voisinage. Les relations de voisinage sont matérialisées par les arcs : un item est voisin d'un autre, s'il existe un arc entre ces deux items.

Le principe de base est que les items sont placés aléatoirement sur l'espace et que les arcs sont associés à une force entre les deux éléments qui sont rattachés. Plusieurs systèmes élastiques ont été implantés :

1. Le premier est fondé sur une force qui change de signe au cours du temps : lors du premier pas de temps, toutes les forces sont associées à une attraction et, lors du deuxième, à une répulsion. Ainsi à tout moment, les items essaient de se rapprocher de leurs voisins et ensuite de s'éloigner. Les items s'organisent ainsi par voisinage respectif.
2. Le deuxième est fondé sur le fait que les arcs symbolisent des élastiques associés à une force d'attraction et qu'en même temps chaque item exerce une force de répulsion sur tous ses congénères, afin de respecter un éloignement minimum entre items.

Ce type de méthode ne possède pas intrinsèquement de connaissance sur la structure du graphe. Elle se contente d'organiser au mieux les items en minimisant les enchevêtrements d'arcs (*cf.* figure B.5). Un résultat satisfaisant n'est pas garanti, surtout à cause du dosage

délicat entre les différentes forces mises en œuvre. De plus, du fait du tirage aléatoire au début de la méthode, le résultat final n'est pas forcément identique d'une itération à l'autre. Ce n'est pas idéal pour le professeur qui revient étudier un thème, car il doit s'appropriier la nouvelle structure visuelle du thème concerné. Cette méthode peut néanmoins servir de bonne initialisation pour obtenir une structure de graphe pas trop emmêlée.

Enfin, les résultats ne sont pas très satisfaisants à cause du nombre très important d'arcs qui entrent en jeu dans l'algorithme de placement. Cette méthode obtient de meilleurs résultats avec seulement les arcs significatifs, c'est-à-dire les arcs professeurs et les meilleurs arcs élèves.

### Disposition interactive :

Cette méthode, inspirée du papier [Col91b], permet d'obtenir une meilleure présentation et d'enlever le côté aléatoire de la méthode précédente, en apportant, grâce à l'utilisateur, de la connaissance sur la structure du graphe.

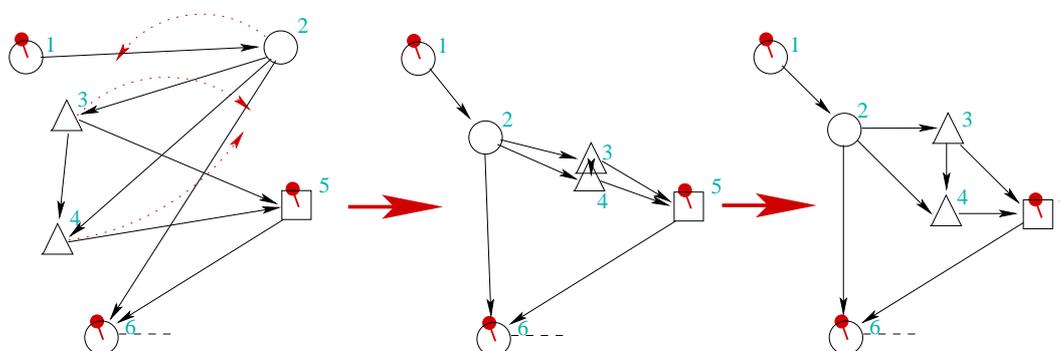


FIG. B.6 – Aperçu du résultat de la disposition interactive sur les 6 premiers items du thème 377.

L'algorithme se fonde toujours sur les forces d'attraction entre les items. Dans un premier temps, chaque item se place progressivement, après plusieurs itérations de l'algorithme, à l'isobarycentre de ses voisins. Pour éviter la convergence des items en un seul point, certains items sont épinglés (1,5,6).

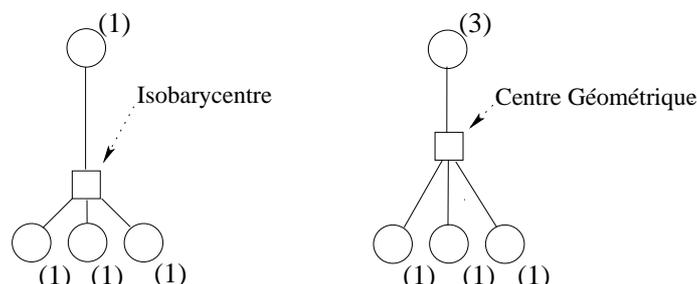


FIG. B.7 – Exemple d'un placement isobarycentrique et d'un placement géométrique.

Enfin, pour parfaire la présentation, les items sont placés au centre géométrique<sup>25</sup>. Ils sont ensuite calés sur une grille, afin d'obtenir des alignements plus propres (cf. figure B.6).

<sup>25</sup>C'est aussi un placement barycentrique, mais qui donne plus de poids à certains éléments, pour que l'élément concerné aille se placer, horizontalement et verticalement, plus au centre (cf. figure B.7).

L'avantage est que, pour un même épingleage, mais pour deux itérations de l'algorithme, le placement final est identique. Il suffit donc de conserver la position des épingles pour obtenir la même disposition. Par contre, le résultat obtenu dépend beaucoup de la structure de graphe et de la connaissance qu'en a l'utilisateur.

Au final, aucune méthode n'a été jugée satisfaisante pour la majorité des cas. Mais chacune présente une certaine vision qui peut aider l'utilisateur à trouver les informations qu'il cherche.

**Remarque :** De temps en temps, le graphe pédagogique présente des vides pédagogiques (comme, par exemple, ceux détectés sur le thème 377, avec les items 3238 et 3239 qui n'étaient pas reliés au graphe pédagogique général). Il faut savoir que les méthodes fondées sur les arcs (méthodes interactive, élastique et hiérarchique) ne fonctionnent pas bien. Dans ce cas, il faut plutôt utiliser les méthodes de placement statiques (vertical et spirale).

### Repères de visualisation

Une fois que les éléments ont été disposés grâce aux méthodes vues précédemment, leurs coordonnées restent fixes dans le repère de base.

Pour modifier la vision des éléments graphiques, l'outil de visualisation met à la disposition de l'utilisateur des *lentilles*, c'est-à-dire approximativement des changements de repères. Les lentilles permettent, pour le moment, :

- de faire un agrandissement sur une zone particulière,
- de faire une rotation ou une translation des éléments graphiques et
- d'obtenir une vision *fisheye*, c'est-à-dire avec un fort agrandissement au centre et sans agrandissement à la périphérie.

### B.3 Affichage des informations sur les chemins pédagogiques

L'objectif de l'outil est d'offrir à l'utilisateur un aperçu du graphe pédagogique, afin qu'il puisse détecter d'un coup d'oeil les zones à problèmes. Ainsi les arcs sont teintés suivant une échelle de couleur en fonction de l'information demandée par l'utilisateur :

1. le passage des élèves ( $nb_{succès} + nb_{échec}$ ), le nombre de succès ( $nb_{succès}$ ) et le nombre d'échecs ( $nb_{échec}$ ).
2. le passage instantané ( $\varphi^+ + \varphi^-$ ), les taux de phéromones positives ( $\varphi^+$ ) et négatives ( $\varphi^-$ ).
3. le poids pédagogique ( $W$ ) et le poids pédagogique relatif ( $W_{rel}$ ).
4. l'adéquation au taux de réussite de 60% ( $\mathcal{A}$ ), la partie confrontation ( $\mathcal{C}$ ), la partie passage ( $\mathcal{P}$ ) et la *fitness* globale ( $fitness_G$ ).

### B.4 Opérations de gestion de graphes pédagogiques

Une fois les zones à problèmes détectées, les professeurs ont la possibilité d'agir sur la structure du graphe, afin de l'améliorer ou de corriger une éventuelle erreur.

1. Ils ont ainsi la possibilité de créer et d'effacer certains arcs, afin obtenir le graphe pédagogique souhaité.

**Remarque :** Il a été à un moment question de créer des "anti-arcs." En effet, si après le passage des élèves, un arc *élève* commence à être prédominant sur les autres arcs

en terme de *fitness* et si le professeur détecte que cet arc débouche vers une erreur pédagogique flagrante, le professeur peut mettre en place un “anti-arc” dans le but d’annuler l’arc prédominant. Par cette opération, le professeur s’assure que les élèves ne passeront plus jamais par un tel arc. Pour l’instant, cette notion d’anti-arc n’a pas été mise en place, car aucune aberration pédagogique n’a été détectée.

2. Ils peuvent aussi mettre à jour le poids pédagogique d’un arc. C’est ce type d’action qui risque d’être le plus courant en terme de maintenance du graphe pédagogique.
3. S’ils le souhaitent, les professeurs peuvent remettre à zéro les phéromones et les nombres de passages sur certains arc, notamment après une modification importante du graphe pédagogique. Une telle action n’est pas nécessaire, car l’algorithme est censé s’adapter dynamiquement au cours du temps. Mais elle permet d’aider le système à se remettre en route plus rapidement . . .

## B.5 Conclusion

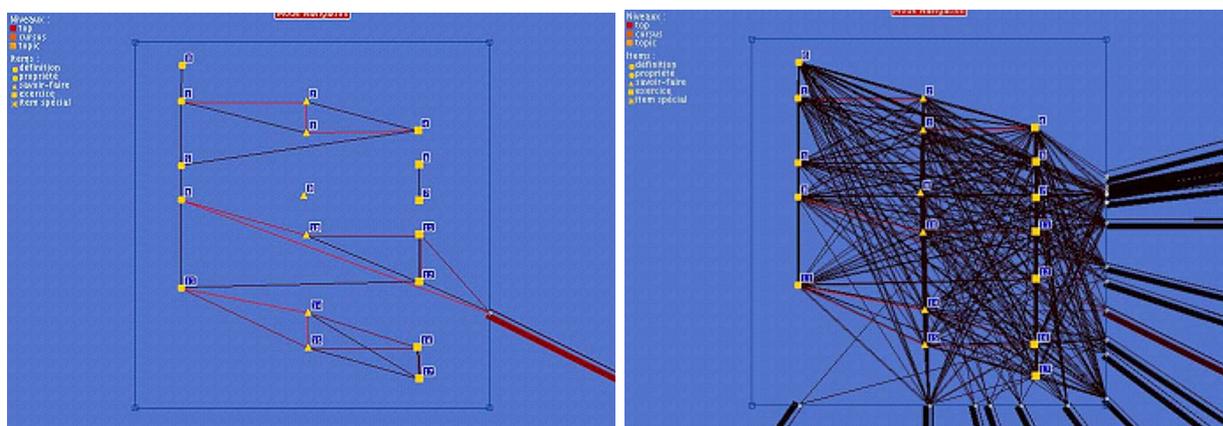


FIG. B.8 – Exemple d’affichage obtenu pour le thème 377. Les items sont disposés suivant la méthode de placement “vertical”. L’information affichée sur les arcs est le poids pédagogique relatif, représenté, dans le logiciel, sur une échelle de couleur. Sur la figure de gauche, seuls les arcs professeurs sont affichés, alors que sur la figure de droite, tous les arcs du thème sont dessinés.

L’outil développé semble montrer de bonnes dispositions pour offrir une lecture aisée des graphes pédagogiques (*cf.* figure B.8 gauche). L’ensemble des méthodes de placement développées permet d’offrir plusieurs possibilités à l’utilisateur pour mettre en valeur les informations concernant le graphe pédagogique.

Malheureusement, la complexité du graphe est telle que, même avec cet outil, la visualisation du graphe reste difficile et peu pratique (*cf.* le nombre d’arcs à visualiser sur la figure B.8 droite). Du coup, cet outil n’est pas utilisé.



## Annexe C

# Les différents marchés de PARASCHOOL



FIG. C.1 – Page d'accueil de PARASCHOOL.

Cette annexe apporte quelques précisions sur la société PARASCHOOL, notamment sur les différents marchés sur lesquels s'est positionnée la société (*cf.* les offres proposées à partir la page d'accueil sur la fig. C.1). :

- l'accompagnement scolaire,
- la formation pour adultes et
- les réalisations multimedia.

## C.1 Positionnement sur l'accompagnement scolaire

### C.1.1 Marché des particuliers

Ayant fait le pari d'Internet, de l'interactivité et de la qualité des contenus, PARASCHOOL a attiré de nombreux utilisateurs particuliers sur son site. Le tout premier *cursus* à avoir été ouvert est celui de mathématiques en classe de seconde. Depuis, l'expansion s'est faite dans les autres classes en mathématiques et dans les autres matières, toujours en commençant par les classes de lycée. Aujourd'hui, le site de soutien scolaire de PARASCHOOL propose des compléments pédagogiques, des fiches de cours et des exercices sur un ensemble de matières récapitulé dans le tableau C.1.

	Primaire	Collège	Lycée	Bac Pro
Mathématiques	x	x	x	x
Français	x	x	x	x
Physique Chimie			x	
Économie			x	
Histoire			x	

TAB. C.1 – Offre de PARASCHOOL.

L'offre s'est aussi diversifiée avec l'anglais, via le partenaire 7SPEAKING. La société PARASCHOOL a développé la plate-forme éducative au partenaire, qui a intégré un contenu spécifique à l'apprentissage de l'anglais.

### C.1.2 Marché des collectivités locales

En vue de son expansion, la société a modifié très légèrement l'usage de sa plate-forme en la proposant comme un système d'aide aux professeurs. En effet, ces derniers peuvent utiliser le logiciel au cours de travaux pratiques en salles informatiques, permettant aux élèves d'appliquer les notions de cours directement sur les exercices interactifs de la plate-forme. De cette manière, PARASCHOOL s'est créé un réseau de partenaires, parmi les collectivités locales (8 conseils régionaux et 18 conseils généraux), dont il est devenu le principal fournisseur de solutions éducatives en ligne.

Au final, avec 800 établissements utilisateurs (15 000 enseignants et 200 000 élèves utilisent quotidiennement ses services), PARASCHOOL s'est imposé comme leader français des plates-formes éducatives, en facilitant, grâce à Internet, la construction des démarches d'accès au savoir. La société s'est ainsi assurée un avenir, dans le secteur des nouvelles technologies, qui n'est pas forcément au meilleur de sa forme.

**Remarque :** Bien que la plate-forme éducative ne soit qu'en français (une internationalisation de celle-ci est prévue dans les développements futurs), les commerciaux de la société ont signé un contrat en Suisse avec le Canton de Neuchâtel.

## C.2 Formation pour adultes

En plus de tous ces marchés, PARASCHOOL s'est aussi, depuis peu, lancé dans la formation pour adultes. Même si l'architecture reste la même, le contenu développé doit être moins ludique. PARASCHOOL vient notamment de décrocher un contrat avec Renault pour former des techniciens.

### C.3 Réalisations pédagogiques

La société PARASCHOOL s'est, enfin, diversifiée en proposant des animations pédagogiques à de grandes institutions comme :

le Ministère de la Défense	<a href="http://www.mission-defense.defense.gouv.fr">http://www.mission-defense.defense.gouv.fr</a>
le Ministère des Finances	<a href="http://www.cyberbudget.com">http://www.cyberbudget.com</a>
l'Administration en ligne	<a href="http://www.adele.gouv.fr/">http://www.adele.gouv.fr/</a>
Météo France	<a href="http://www.paraschool.com/demo/meteofrance/home/">http://www.paraschool.com/demo/meteofrance/home/</a>
Gaz de France	<a href="http://www.paraschool.com/demo/gdf/">http://www.paraschool.com/demo/gdf/</a>
EDF	<a href="http://www.paraschool.com/demo/edf/">http://www.paraschool.com/demo/edf/</a> [en cours]

### C.4 Conclusion

PARASCHOOL a su, en se diversifiant, créer, au sein de la société, une dynamique de croissance dans un domaine à l'avenir incertain. Le nouveau paradigme d'*Hommilère* ne s'applique pas directement sur les différents marchés de la société. Mais avec quelques petites modifications, il peut se généraliser assez facilement. PARASCHOOL possède, ainsi, un argument de poids dans le monde des systèmes pédagogiques ...



# Références bibliographiques

- [Ara02] Arafa Y., Kamyab K., Kshirsagar S., Guye-Vuilleme A., Thalmam N. (2002), “Two Approaches to Scripting Character Animation”, in *Proceedings of the AAMAS Workshop on “Embodied Conversational Agents - Let’s specify and evaluate them !”*, Bologna, 2002.
- [Art] Société ARTIFICIAL LIFE, <http://www.artificial-life.com>.
- [Bar04] Baraglia R., Silvestri F. (2004), “An Online Recommender System for Large Web Sites”, *IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence*, Beijing, China, September 20-24 2004.
- [Bea95] Beaumont I., Brusilovsky P. (1995), “Educational applications of adaptive hypermedia”, in Nordby K., Helmersen P., Gilmore D. J., Arnesen S. A. eds., *Human-Computer Interaction. Chapman & Hall*, pp. 410-414, London, 1995.
- [Bon94] Bonabeau E., Theraulaz G. (1994), “Intelligence Collective”, *Hermes*, 1994.
- [Bon99] Bonabeau E., Dorigo M., Theraulaz G. (1999), “Swarm Intelligence : From Natural to Artificial Systems”, *Oxford University Press. ISBN 0-19-513159-2*, 1999.
- [Bon00] Bonabeau E. , Dorigo M., Theraulaz G. (2000), “Inspiration for optimization from social insect behaviour”, *Nature*, vol. 406, 6 July 2000.
- [Bra52] Bradley R. A., Terry M. E. (1952), “The Rank Analysis of Incomplete Block Designs”, *The Method of Paired Comparisons, Biometrika*, 39, pp. 324-345, 1952.
- [Bro96] Brossut R. (1996), “Pheromones, la communication chimique chez les animaux”, *CNRS editions*, Berlin, 1996.
- [Bru95] Brusilovsky P. (1995), “Intelligent tutoring systems for World-Wide Web”, in *Proceedings of Third International WWW Conference*, pp. 42-45, Darmstadt, 1995.
- [Bru98] Brusilovsky P. (1998), “Methods and Techniques of Adaptive Hypermedia”, in Brusilovsky P., Kobsa A., Vassileva J. editors, *Adaptive Hypertext and Hypermedia*, chap. 1, pp. 1-44, *Kluwer Academic Publisher*, The Netherlands, 1998.
- [Bru03] Bruner J. (2003), “Constructivist Theory”, <http://tip.psychology.org/bruner.html>, Dernière mise à jour Février 2003.
- [Buc99] Buchner A., Mulvenna M. D. (1999), “Discovering internet marketing intelligence through online analytical Web usage mining”, *SIGMOD Record (4) 27*, 1999.
- [Bul97] Bullnheimern B., Kotsis G., Strauss C. (1997), “Parallelization Strategies for the Ant System”, *De Leone R., Murli A., Pardalos P. Toraldo D., editors, High Performance Algorithms and Software in NonLinear Optimization*, volume 24 of *Applied Optimization*, pp. 87-100, *Kluwer, Dordrecht*, 1997.

- [Cas98] Cassell J. (1998), "A framework for gesture generation and interpretation", in : *Cipolla, R., Pentland, A. (eds.) Computer Vision for Human-machine Interaction, Cambridge University Press, 1998.*
- [Cas99] Cassell J., Bickmore T., Billingham M., Campbell L., Chang K., Vilhjálmsson H., Yan H. (1999), "Embodiment in Conversational Interfaces : Rea", in *ACM CHI 99 Conference Proceedings, pp. 520-527, Pittsburgh, PA, 1999.*
- [Chi00] Chi D., Costa M., Zhao L., Badler N. (2000), "The EMOTE Model for Effort and Shape", in *Proceedings of Siggraph, pp. 173-182, 2000.*
- [Col91a] Colorni A., Dorigo M. et Maniezzo V. (1991), "Distributed Optimization by Ant Colonies", In *Varela, F. and Bourgine, P., editors, Proceedings of ECAL'91 - First European Conference on Artificial Life, Elsevier Publishing, pp. 134-142, Paris, 1991.*
- [Col91b] Collet P. (1991), "Placement automatique de noeuds dans un graphe", in *AFUU, Convention Unix 1991, pp 91-103, Paris, Mai 1991.*
- [Col00] Collet P., Lutton E., Raynal F., Schoenauer M. (2000), "Polar IFS + Parisian Genetic Programming = Efficient IFS Inverse Problem Solving", in *Genetic Programming and Evolvable Machines Journal, vol. 1, issue 4, pp. 339-361, October 2000.*
- [Coo99] Cooley R., Mobasher B., Srivastava J. (1999), "Data preparation for mining World Wide Web browsing patterns", *Journal of Knowledge and Information Systems, (1) 1, 1999.*
- [DeC02] De Carolis C., Bilvi M., Pelachaud C. (2002), "APML, a Mark-up Language for Believable Behavior Generation", in *Proceedings of the AAMAS Workshop on "Embodied Conversational Agents - Let's specify and evaluate them !", Bologna, 2002.*
- [Den83] Deneubourg J.-L., Pasteels J.-M., Verhaeghe J.-C. (1983), "Probabilistic Behaviour in Ants : a Strategy of Errors?", *Journal of Theoretical Biology, 105, 1983.*
- [DeV02] De Vries R., Zan B., Hildebrandt C., Edmiaston R., Sales C. (2002), "Developping constructivist early childhood curriculum : Practical principles and activities", *Teachers College Press, ISBN 0807741213, ISBN 0807741205, New York, 2002.*
- [DiC97] Di Caro G., Dorigo M. (1997), "AntNet : A Mobile Agents Approach to Adaptive Routing", *Technical Report 97-12, IRIDIA, Université Libre de Bruxelles, Belgium, 1997.*
- [DiC98a] Di Caro G., Dorigo M. (1998), "Mobile Agents for Adaptive Routing", *31st Hawaii International Conference on System, Big Island of Hawaii, January 6-9 1998.*
- [DiC98b] Di Caro G., Dorigo M. (1998), "AntNet : Distributed Stigmergetic Control for Communications Networks", *Journal of Artificial Intelligence Research, 9 pp. 317-365, 1998.*
- [DiS02] Di Sciascio E., Donini F. M., Mongiello M., Piscitelli G. (2002), "AnWeb : a System for Automatic Support to Web Application Verification", in *proceedings of SEKE'02, pp. 609-617, Ischia, Italie, 15-19 juillet 2002.*
- [DiS05] Di Sciascio E., Donini F. M., Mongiello M., Totaro R., Castellucia D. (2005), "Design Verification of Web Applications Using Symbolic Model Checking", in *the proceedings of the 5th International Conference of Web Engineering (ICWE'05), Sydney, Australia, july 27-29 2005.*
- [Dor92] Dorigo M. (1992), "Optimization, Learning and Natural Algorithms", *PhD thesis, Dipartimento di Electronica, Politecnico di Milano, IT, 1992.*

- 
- [Dor96] Dorigo M., Maniezzo V., Colorni A. (1996), "The Ant System : Optimization by a Colony of Cooperating Agents", *IEEE Trans. Syst. Man Cybern*, B(26) pp. 29-41, 1996.
- [Dor03] Dorigo M., Stützle T. (2003), "The Ant Colony Optimization Metaheuristics : Algorithms, Applications and Advances", *chapter of Handbook of Metaheuristics, volume 57 of International series in operations research and management science*, Kluwer Academic Publishers, Boston Hardbound, 2003.
- [Dro99] Dron J., Mitchell R., Siviter P., Boyne C. (1999), "CoFIND - an experiment in n-dimensional collaborative filtering", in *WebNet'99*, ed. de Bra P. & Legget J., AAACE, pp. 301-306, Honolulu, Hawaii, 1999.
- [Dro00] Dron J., Mitchell R., Boyne C., Siviter P. (2000), "Website Evaluation System : Collaboratively Discovering what makes a web site good", in *WebNet 2000*, ed. Davies G. & Owen C., AAACE, pp. 685-686, San Antonio, Texas, 2000.
- [Dro02] Dron J. (2002), "Achieving self-organisation in network-based learning environments", *PhD Thesis*, Brighton University, january 2002.
- [Ebe01] Eberhart R., Kennedy J., Shi Y. (2001), "Swarm Intelligence", *Evolutionary Computation*, Morgan Kaufmann, 2001.
- [Elo78] Elo A. E. (1978), "The rating of chess players past and present", *New York : Arco Publishing*, 1978.
- [Ext] Société EXTEMPO SYSTEMS, <http://www.extempo.com>.
- [Fla] Technologie MACROMEDIA FLASH, <http://www.adobe.com/fr/products/flash>.
- [Gli99] Glickman M. (1999), "Parameter Estimation in large dynamic paired comparison experiments", *Journal of the Royal Statistical Society : series C (applied statistics)* 48(3), pp 377-394, 1999.
- [Gos91] Goss S., Deneubourg J.-L. (1991), "Harvesting by a group of robots", *Varela and Bourgine*, pp. 195-204, 1991.
- [Gra59] Grassé P. (1959), "La reconstruction du nid et les coordinations inter-individuelles chez *Bellicositermes Natalensis* et *Cubitermes* sp. La théorie de la stigmergie : essai d'interprétation du comportement des termites constructeurs", *Insectes Sociaux*, 6 pp. 41-80, 1959.
- [Gra02] Gratch J., Rickel J., Andre J., Badler N., Cassell J., Petajan E. (2002), "Creating Interactive Virtual Humans : Some Assembly Required", *IEEE Intelligent Systems*, pp. 54-63, July/August 2002.
- [Gut00] Gutjahr W. J. (2000), "A graph-based Ant System and its convergence", *Future Generation Computer Systems*, 16(8) pp. 873-888, 2000.
- [Gut02] Gutjahr W. J. (2002), "ACO algorithms with guaranteed convergence to the optimal solution", *Information Processing Letters*, 82(3) pp. 873-888, 2002.
- [Har02] Hartmann B., Mancini M., Pelachaud C. (2002), "Formational parameters and adaptive prototype instantiation for MPEG-4 compliant gesture synthesis", in *Proceedings of Computer Animation 2002*, IEEE Computer Society Press, pp. 111-119, 2002.
- [Her99] Herlocker J., Konstan J., Borchers A., Riedl J. (1999), "An algorithmic framework for performing collaborative filtering", in *Proceedings of the 1999 Conference on Research and Development in Information Retrieval*, August 1999.

- [Höl90] Hölldolber B., Wilson E (1990), "The ants", *Springer Verlag*, Berlin, Germany, 1990.
- [Hon05] Hong C.-H., Chen C.-H., Chang M.-H. (2005), "Personalized Learning Path Generation Approach for Web-based Learning", in *Proceedings of the 4th WSEAS Int. Conference on E-Activities*, pp 62–68, Miami, Florida, USA, November 17-19, 2005.
- [Hös48] Hösslinger A. (1948), "Ingo System", *Bayerischen Schachnachrichten*, (from [Elo78]), 1948.
- [Joh98] Johnson W. L., Shaw E., Ganeshan R. (1998), "Pedagogical Agents on the Web", in *Workshop on WWW-based Tutoring, ITS'98*, San Antonio, Texas, 1998.
- [Joh01] Johnson L., Rickel S., Lester J. (2001), "Animated Pedagogical Agents : Face-to-Face interaction", in *International Journal of Artificial Intelligence*, pp. 47–78, November 2001.
- [Ken01] Kennedy J., Eberhart R. C. (2001), "Swarm Intelligence", *Morgan Kaufmann Publishers*, San Francisco, California, 2001.
- [Kon97] Konstan J., Miller B., Maltz D., Herlocker J., Gordon L., Riedl J. (1997), "GroupLens : applying collaborative filtering to usenet news", *Communications of the ACM (40) 3*, 1997.
- [Kop00] Kopp S., Wachsmuth I. (2000), "Planning and motion control in lifelike gesture : a refined approach", in *Postproceedings of Computer Animation 2000. IEEE Computer Society Press*, pp. 92–97, 2000.
- [Kra02] Krandsted A., Kopp S., Wachsmuth I. (2002), "MURML : A Multimodal Utterance Representation Markup Language for Conversational Agents", in *Proceedings of the AAMAS Workshop on "Embodied Conversational Agents - Let's specify and evaluate them !"*, Bologna, 2002.
- [Lab03] Labroche N., Monmarché N., Venturini G. (2003), "AntClust : Ant Clustering and Web Usage Mining", *Genetic and Evolutionary Computation Conference, Cantu-Paz E. (Eds), Lecture Notes in computer science 2723, Springer Verlag Telos*, pp. 25-36, Chicago, july 12-16 2003.
- [Läg00] Läge D., Daub S. (2000), "The resurrection of Intelligent Tutoring Systems : a new way of factual knowledge diagnosis", in *International Journal of Psychology, 35 Issue 3/4, 136*, 2000.
- [Lan03] Landrin-Schweitzer Y., Collet P., Lutton E. (2003), "Interactive GP for data retrieval in medical databases", in *proceedings of EuroGP 2003, Springer Verlag*, 2003.
- [Les97] Lester J., Stone B. (1997), "Increasing Believability in Animated Pedagogical Agents", in *Proceedings of the First International Conference on Autonomous Agents*, pp. 16–21, California, February 1997.
- [Les99] Lester J., Voerman J., Towns S., Callaway C. (1999), "Deictic believability : Coordinated gesture, locomotion and speech in lifelike pedagogical agents", *Applied AI, Vol. 13. No. 4/5*, pp. 383–414, 1999.
- [Mel98] Melhuish C., Holland O., S.E.J. H. (1998), "Collective sorting and segregation in robots with minimal sensing", *Pfeifer et al.*, 1998.
- [Mic] Agents MICROSOFT, <http://www.microsoft.com/Msagent>.
- [Moo96] Moore M. G., Kearsley G. (1996), "Distance Education : a Systems View", *Wadsworth Publishing*, Belmont, Californie, 1996.

- 
- [Moy88] Moyson F., Manderick B. (1988), "The Collective Behaviour of Ants : an Example of Self-Organisation in Massive Parallelism", *Proceedings of the AAAI Spring Symposium on Parallel Models of Intelligence*, Stanford, California, 1988.
- [Nas99] Nasraoui O., Frigui H., Joshi A., Krishnapuram R. (1999), "Mining Web access logs using relational competitive fuzzy clustering", *in the Proceedings of the Eight International Fuzzy Systems Association World Congress*, August 1999.
- [Nas00] Nass C., Isbister K., Lee E.-J. (2000), "Truth is beauty : Researching embodied conversational agents", *In : Cassell et al. pp. 374-402*, 2000.
- [Noo04] Noot H., Ruttkay Z. (2004), "Style in Gesture", *in Camurri A., Volpe G. (Eds.), Gesture-based Communication in Human-Computer Interaction, LNCS 2915, Springer-Verlag*, 2004.
- [Pai90] Paice C. (1990), "Another stemmer", *in proceedings of SIGIR forum, vol 24(3), pp 56-61*, 1990.
- [Pap99] Papert S. (1999), "Papert on Piaget", *in Time magazine's special issue on "The century's greatest minds" pp. 105*, march 29 1999.
- [Pav03] Pavlov I. P. (1903), "Lectures on conditioned reflexes", ? ? ?, 1903.
- [Per98] Perkowitcz M., Etzioni O. (1998), "Adaptive Web sites : automatically synthesizing Web pages", *in Proceedings of Fifteenth National Conference on Artificial Intelligence*, Madison, WI, 1998.
- [Pia52] Piaget J. (1952), "The origins of intelligence in childhood", *New York : International Universities Press*, 1952.
- [Pia54] Piaget J. (1954), "The construction of reality in the child", *New York : Basic Book*, 1954.
- [Pie98] Piesk J., Trogemann G. (1998), "Presenting Educational Contents in Nonlinear Narrative Structures by Conventional Virtual Actors", *in proceedings of ED-MEDIA '98, pp. 1885-1888*, 1998.
- [Piw02] Piwek P., Krenn B., Schröder M., Grice M., Baumann S., Pirker H. (2002), "RRL : A Rich Representation Language for the Description of Agent Behaviour in NECA", *in Proceedings of the AAMAS workshop on "Embodied conversational agents - let's specify and evaluate them!"*, Bologna, Italy, 2002.
- [Ric00] Ricca F., Tonella P. (2000), "Web site analysis : structure and evolution", *in proceedings of the IEEE International Conference on Software Maintenance (ICSM'00), pp. 76-86*, California, 2000.
- [Rou99] Roux O., Fonlupt C., Talbi E.-G., Robillard D. (1999), "ANTabu enhanced version", *Technical report LIL-99-1, Laboratoire d'Informatique du Littoral*, Calais, 1999.
- [Rut05] Ruttkay Z., Noot H. (2005), "Variations in gesturing and speech by GEStyle", *in International Journal of Human-Computer Studies, Special Issue on 'Subtle Expressivity for Characters and Robots', 62(2), pp. 211-229*, 2005.
- [Sch98] Schechter S., Krishnan M., Smith M. D. (1998), "Using path profiles to predict HTTP requests", *in Proceedings of 7th International World Wide Web Conference*, Brisbane, Australia, 1998.
- [Sha95] Shardanand U., Maes P. (1995), "Social information filtering : algorithms for automating "word of mouth".", *In Proceedings of the ACM CHI Conference*, 1995.

- [Sha97] Shahabi C., Zarkesh A. M., Adibi J., Shah V. (1997), "Knowledge discovery from users Webpage navigation", in *Proceedings of Workshop on Research Issues in Data Engineering*, Birmingham, England, 1997.
- [Sem03a] Semet Y., Lutton E., Collet P. (2003), "Ant Colony Optimisation for E-Learning : Observing the Emergence of Pedagogic Suggestions", *IEEE Swarm Intelligence Symposium*, Indianapolis, USA, 24-26 avril 2003.
- [Sem03b] Semet Y., Jamont Y., Biojout R., Lutton E., Collet P. (2003), "Artificial Ant Colonies and E-Learning : An Optimisation of Pedagogical Paths", *Proceedings of HCII'03 - Human Computer Interaction International*, Crète, Grèce, 22-27 juin 2003.
- [Son02] Sonas F. (2002), "The Sonas Rating Formula - Better than Elo?", in *chessbase news* (<http://www.chessbase.com/newsdetail.asp?newsid=562>), 2002.
- [Spi99] Spiliopoulou M., Faulstich, L. C. (1999), "WUM : A Web Utilization Miner", in *Proceedings of EDBT Workshop WebDB98, LNCS 1590, Springer Verlag*, Valencia, Spain, 1999.
- [Sto98] Stotts P., Furuta J. (1998), "Hyperdocuments as automata : verification of traced-based browsing properties by model checking", in *ACM Transactions on Information Systems*, 16(1), pp. 1-30, 1998.
- [Stü97a] Stützle T., Hoos H. (1997), "The Max-Min ant system and local search for the Traveling Salesman Problem", T. Baeck, Z. Mickalewicz and X. Yao, editors, *Proceedings of IEEE-ICEC-EPS'97 International Conference on Evolutionary Computation and Evolutionary Programming*, IEEE Press, pp. 309-314, 1997.
- [Stü97b] Stützle T., Hoos H. (1997), "Improvements on the Ant System : Introducing MAX-MIN Ant System", *Proceedings International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms*, Springer-Verlag, Vienna, 1997.
- [Stü99] Stützle T., Dorigo M. (1999), "ACO Algorithms for the Travelling Salesman Problem", in M Makela, K Miettinen, P Neittaanmaki, J Periaux (Eds), *Proceedings of the EUROGEN conference*, John Wiley & Sons, ISBN : 0471999024, 1999.
- [Stü00] Stützle T., Hoos H. (2000), "MAX-MIN Ant System", *Future Generation Computer System*, 16 pp. 889-914, 2000.
- [Tai98a] Taillard E. D. (1998), "Programmation à mémoire adaptative et algorithmes pseudogloutons : nouvelles perspectives pour les méta-heuristiques", *Thèse d'habilitation à diriger les recherches*, Université de Versailles Saint Quentin en Yvelines, France, 1998.
- [Tai98b] Taillard E. D., Gambardella L. M., Gendreau M., Potvin J.-Y. (1998), "Adaptive Memory Programming : A Unified View of Meta-Heuristics", *European Journal of Operational Research*, 135(1) pp. 1-16, 1998.
- [Tal99] Talbi E.-G., Roux O., Fonlupt C., Robilliard D. (1999), "Parallel Ant Colony for Combinatorial Optimization Problems", Rolim J. editor, *Workshop on Biologically Inspired Solutions to Parallel Processing Systems*, Springer-Verlag, 1999.
- [Thr05] Thronike E. (1905), "The elements of psychology", *New York : Seiler*, 1905.
- [Tsu00] Tsutsui T., Saeyor S., Ishizuka M. (2000), "MPML : A Multimodal Presentation Markup Language with Character Agent Control Functions", in *Proceedings (CD-ROM) WebNet 2000 World Conf. on the WWW and Internet*, San Antonio, Texas, 2000.
- [Uns] Ünsal C., Bay J., "Spacial self-organization in large population of mobile robots", <http://www.cs.cmu.edu/unsal/publications/spacial.html>.

- 
- [VHM] Virtual Human Markup Language (VHML), <http://www.vhml.org>.
- [Wal94] Walker J., Sproull L., Subramani R. (1994), "Using a human face in an interface", in *Proceedings of CHI'94*, pp. 85-91, 1994.
- [Wat13] Watson J. B. (1913), "Psychology as the behaviorist views it", *Psychological review*, vol. 20, pp. 158-177, 1913.
- [Web95] Weber G. (1995), "Examples and reminders in a case-based help system", in *Haton J.-P., Keane M., Manago M. (eds.), Topics in case-based reasoning. Selected Papers of the Second European Workshop, EWCBR-94, Springer-Verlag, pp. 165-177, Chantilly, France, 1995.*
- [Wol97] Wolpert D. H., Macready W. G. (1997), "No Free Lunch Theorem for Optimization", in *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), pp. 67-82, 1997.
- [Yan96] Yan T., Jacobsen M., GarciaMolina H., Dayal U. (1996), "From user access patterns to dynamic hypertext linking", in *Proceedings of the 5 th International World Wide Web Conference*, Paris, France, 1996.