



*Faculté des Mathématiques et Informatique*

*Département d'Informatique*

**THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES**

*Spécialité : Informatique*

*Option : Informatique*

**Présentée par**

**Mr CHADLI Abdelhafid**

**Thème**

Micro jeux et simulation multi-agents participative:  
apprentissage des procédures de lutte contre les rongeurs  
arvicoles

Devant le jury :

<b>Qualité</b>	<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Etablissement d'origine</b>
Président	BENYETTOU Abdelkader	Professeur	USTO-MB
Rapporteur	BENDELLA Fatima	MCA	USTO-MB
Co-rapporteur	TRANVOUEZ Erwan	MC	Université Aix Marseille
Examineur	KAZAR Okba	Professeur	Université de Biskra
Examineur	SENOUCI Mohamed	Professeur	Université d'Oran
Examineur	RAHAL Sid Ahmed	MCA	USTO-MB

**Année universitaire : 2014-2015**

# Résumé

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un environnement pour l'aide à la formation par simulation participative des agents phytosanitaires et des acteurs communaux impliqués dans une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de culture.

Cet environnement obéira à la composition classique des systèmes tuteurs intelligents et des environnements Informatiques pour l'apprentissage humain. Cependant, notre intérêt porte sur l'évaluation des apprenants dans de tels environnements. Nous nous intéressons aussi à un autre aspect de recherche sur la simulation des agroécosystèmes et les dynamiques de leurs différents composants.

Une grande partie du travail de cette thèse concerne la modélisation d'un système d'évaluation des actions entreprises par les apprenants durant la simulation de la campagne de lutte. L'approche multi-agents a été choisie pour surmonter les difficultés rencontrées dans les systèmes d'évaluation classiques. Cette évaluation est basée sur la logique floue et la négociation.

Le deuxième volet de notre recherche concerne la modélisation d'un agroécosystème composé d'un sous système végétal, d'un sous système animal (les rongeurs) et d'un sous système humain. Encore une fois nous adoptons la modélisation multi-agents sociale pour modéliser les comportements de la population des rongeurs. Cette modélisation sera utilisée pour implémenter un simulateur de la dynamique des rongeurs dans un contexte de dégradation de cultures.

## Mots-clés

Evaluation négociée, Evaluation à base de logique floue, Evaluation à base d'agents, modélisation multi-agents sociale, simulation sociale, ...

# Remerciements

Tout d'abord je remercie ALLAH pour cet aboutissement.

La première personne qui me vient à l'esprit et que je tiens à remercier profondément est le docteur Mme BENDELLA Fatima, enseignante à l'USTO et directrice de cette thèse, pour l'énorme soutien scientifique et moral qu'elle a su m'adresser pendant ces années de thèse. Je la remercie aussi pour ses qualités humaines et scientifiques et de m'avoir toujours encouragé à aller de l'avant.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude au docteur Erwan TRANVOUEZ, enseignant et membre de l'équipe DIMAG du laboratoire LSIS à l'université saint Jérôme de Marseille, et co-directeur de cette thèse, pour sa rigueur scientifique et son aide précieuse et pour m'avoir accueillie au sein de l'équipe DIMAG du LSIS. Il aura su se rendre disponible et apporter un regard synthétique et critique particulièrement constructif.

Je remercie Mr. BENYETTOU Abdelkader, Professeur à l'université USTO et directeur du laboratoire SIMPA pour avoir accepté de présider mon jury ainsi que Mr KAZAR Okba, Professeur à l'université de Biskra, Mr. SENOUCI Mohamed, Professeur à l'université d'Oran et Mr. RAHAL Sid Ahmed, Maître de conférence à l'université USTO pour m'avoir fait l'honneur d'accepter d'être examinateurs de ma thèse.

Finalement, je ne peux qu'être infiniment reconnaissant envers mes parents pour leur soutien indescriptible, leur patience, leur confiance et leurs nombreux sacrifices. Je leur dédie avec plaisir ce travail ainsi qu'à ma femme et mes enfants Batoul, Ayoub et Yasmine, mes frères et sœurs ainsi que ma belle mère et toute ma famille. Qu'ils sachent que je suis conscient de ce que je leurs dois et j'espère être un jour en mesure de leur prouver mon affection.

# Sommaire

<b>Introduction Générale</b> .....	1
<b>1. Problématique Générale et Démarche Retenue</b> .....	4
1.1 Problématique .....	4
1.1.1 Le risque rongeur .....	4
1.1.2 Les besoins .....	6
1.1.3 Les solutions existantes .....	8
1.1.3.1 La formation .....	8
1.1.3.2 Les technologies de l'information et de la communication .....	10
1.1.4 Approche retenue .....	12
1.2 Démarche Suivie.....	13
1.2.1 objectifs généraux .....	13
1.2.1.1 Les systèmes d'enseignement assisté par ordinateur .....	14
1.2.1.2 Modélisation et simulation multi-agents .....	14
1.2.2 Conclusion et démarche retenue.....	15
1.2.3 Organisation du manuscrit.....	18
<b>Partie I : Etat de l'art</b>	
<b>2. Les Systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur</b> .....	20
2.1 Les didacticiels .....	20
2.2 Les systèmes tutoriels intelligents .....	21
2.3 Les environnements interactifs pour l'apprentissage humain .....	23
2.4 Les jeux sérieux .....	26
2.4.1 Champs d'application des jeux sérieux .....	28
2.4.2 Les avantages des jeux et des jeux sérieux .....	29
2.5 Bilan sur les Systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur .....	31
<b>3. L'Evaluation dans les Systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur</b> ....	32
3.1 Les Pratiques d'Evaluation .....	33
3.1.1 L'évaluation pronostique .....	33
3.1.2 L'évaluation formative .....	33
3.1.3 L'évaluation formatrice .....	34
3.1.4 L'évaluation diagnostique .....	34
3.1.5 L'évaluation sommative .....	34
3.1.6 Synthèse .....	35
3.2 Pratiques d'Evaluation dans les EIAH .....	35
3.2.1 L'évaluation sommative et pronostique .....	36
3.2.2 L'évaluation diagnostique des compétences .....	37
3.2.3 L'évaluation sommative et diagnostique .....	39

3.2.4	L'auto-évaluation .....	40
3.2.5	L'évaluation par pairs .....	41
3.3	Pratiques d'Evaluation dans les Jeux Sérieux .....	42
3.3.1	Le jeu Electra .....	43
3.3.2	Jeu de simulation des approvisionnements .....	45
3.3.3	L'évaluation dissimulée dans les jeux sérieux : cas du jeu Oblivion .....	48
3.4	Bilan sur les Pratiques d'Evaluation .....	52
<b>4.</b>	<b>Simulation Participative &amp; Systèmes Multi-agents .....</b>	<b>54</b>
4.1	La Simulation Participative .....	55
4.1.1	Jeux de rôles pour l'entraînement .....	55
4.1.2	Jeux de rôles pour l'apprentissage interactif .....	56
4.1.3	Jeux de rôles pour l'aide à la discussion .....	56
4.1.4	Jeux de rôles informatiques .....	57
4.2	Les Agents et les Systèmes Multi-agents .....	59
4.2.1	Qu'est ce qu'un agent .....	59
4.2.2	Qu'est ce qu'un système multi-agents .....	62
4.3	Simulation Multi-agents .....	64
4.3.1	Simulation sociale multi-agents .....	65
4.3.2	Les simulations multi-agents participatives .....	67
4.4	La Négociation dans les Systèmes Multi-agents .....	68
4.4.1	Les types de négociation .....	68
4.4.2	Des agents capables de négocier .....	69
4.4.3	Langages et protocoles de communication pour des agents en négociation .....	69
4.4.3.1	Langages de communication pour la négociation .....	69
4.4.3.2	Description des protocoles de négociation .....	70
4.4.4	Mécanismes de décision des agents en négociation .....	71
4.4.4.1	Le système Persuader .....	72
4.4.4.2	Approches orientés marché .....	72
4.4.4.3	Travaux de Farantin .....	72
4.5	Bilan sur la Simulation Multi-agents Participative et la Négociation ..	73
	Conclusion sur l'Etat de l'Art .....	75

## Partie II : Propositions

<b>5.</b>	<b>Description du Problème Etudié .....</b>	<b>77</b>
5.1	Présentation de la Campagne de Lutte .....	77
5.2	Description du Problème Rencontré .....	80
5.2.1	Les rongeurs .....	81
5.2.2	Les acteurs .....	82
5.3	Vers un Environnement de Formation des Acteurs .....	84
5.3.1	Métamodel .....	85
5.3.2	Scénario de jeu .....	86
5.3.3	Micro jeu .....	89

5.4	Conclusion .....	91
<b>6.</b>	<b>Proposition d'un Système d'Evaluation des Apprenants à Base d'Agents Négociateurs</b> .....	<b>92</b>
6.1	L'Evaluation, les Agents et la Négociation .....	93
6.2	Identification des Compétences .....	97
6.3	Organisation Multi-agents .....	100
6.3.1	Identification des rôles des agents .....	101
6.3.2	Architecture interne des agents .....	103
6.4	Modélisation de l'Evaluation .....	104
6.4.1	Evaluation de la compétence .....	107
6.4.1.1	Approche d'évaluation .....	107
6.4.1.2	Le modèle flou .....	108
6.4.2	Evaluation globale .....	113
6.4.2.1	Processus de négociation .....	115
6.4.2.2	Attribution des bonus .....	116
6.4.2.3	Protocole de négociation .....	117
6.4.2.4	Primitives de négociation .....	119
6.5	Conclusion .....	120
<b>7.</b>	<b>Modélisation Environnementale et Sociale : Agents et Objets en Interaction</b> .....	<b>122</b>
7.1	Modélisation de l'Agroécosystème .....	122
7.1.1	Modélisation individu-centrée .....	123
7.1.2	Modélisation de l'environnement .....	124
7.1.3	Modélisation du système humain .....	129
7.1.4	Modélisation de la dynamique de population des rongeurs .....	130
7.1.5	Les agents : attributs et comportements .....	132
7.2	Conclusion .....	137
<b>8.</b>	<b>Implémentation et Résultats</b> .....	<b>139</b>
8.1	Architecture de l'Environnement de Formation .....	140
8.2	Expériences & Résultats du Système d'Evaluation des Joueurs .....	141
8.2.1	L'environnement Jade .....	141
8.2.2	Exemple illustratif d'évaluation .....	144
8.2.3	Première expérimentation .....	146
8.2.4	Deuxième expérimentation .....	147
8.2.5	Troisième expérimentation .....	149
8.3	Simulation et Illustration de l'Agroécosystème .....	151
8.3.1	Dynamique des agents rongeurs .....	151
8.3.2	L'architecture logicielle des agents rongeurs .....	156
8.3.3	Simulations .....	159
8.3.4	Conclusion .....	165

<b>9. Conclusion Générale et Perspectives .....</b>	<b>166</b>
9.1 Bilan .....	166
9.2 Premier Volet de Recherche .....	166
9.2.1 Contribution méthodique .....	167
9.2.2 Contribution par la proposition d'un modèle de négociation .....	168
9.3 Deuxième Volet de Recherche .....	169
9.3.1 Contribution par la proposition des micros jeux .....	170
9.3.2 Contribution par la proposition d'agentification d'un modèle mathématique d'évolution de population .....	171
9.4 Perspectives .....	172
9.4.1 Perspectives sur le modèle d'évaluation proposé .....	172
9.4.2 Perspectives sur la modélisation individu-centrée adoptée .....	172
<b>Bibliographie .....</b>	<b>174</b>
 <b>Annexe</b>	
Article publié au journal : Educational Technology and Society .....	187

# Tables des figures

Figure 1	Présentation de la démarche suivie .....	17
Figure 2	Architecture d'un STI .....	22
Figure 3	Champ d'application des Jeux sérieux selon M. Zyda .....	28
Figure 4	Schéma représentant le lien entre le jeu vidéo et la composante pédagogique en vue d'élaborer un jeu vidéo .....	29
Figure 5	CAT : principe .....	37
Figure 6	Pépité : de gauche à droite, les interfaces de PepiTest, PepiDiag et PepiProf .....	38
Figure 7	TDmaths : parcours de l'apprenant .....	40
Figure 8	GenEval : phase d'auto-évaluation de l'apprenant .....	41
Figure 9	OASYS : exemple de question fermée .....	42
Figure 10	Les modèles de la conception d'évaluation à base de preuves .....	49
Figure 11	Les modèles ECD appliqués aux jeux .....	52
Figure 12	Simulation participative .....	55
Figure 13	Jeux de rôles informatiques (simulation participative médiée par ordinateur .....	57
Figure 14	Représentation d'un agent selon Russel et Norvig .....	59
Figure 15	Un système multi-agents utilisé comme un modèle formel, selon Edmonds .....	64
Figure 16	Trois composantes pour la simulation sociale basée sur des agents artificiels, selon Davidsson. ....	65
Figure 17	Principaux composants d'un message ACL .....	70
Figure 18	Taux d'infestation de la région de Tiaret par la mérieone Shawi (2004 – 2008) .....	82
Figure 19	Métamodèle de l'environnement de formation .....	86
Figure 20	Interface de Micro-jeu (Mise en situation : prospection) .....	90
Figure 21	Synthèse des types de connaissance .....	98
Figure 22	Organisation multi-agents pour l'évaluation du comportement d'un joueur .....	102
Figure 23	Architecture interne d'un agent évaluateur .....	103
Figure 24.a	Modèle d'évaluation .....	106
Figure 24.b	Vue général du système d'évaluation adopté pour plusieurs compétences .....	106
Figure 25	Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE1 .....	110
Figure 26	Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE2 .....	110
Figure 27	Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE3 .....	111
Figure 28	Fonction d'appartenance du sous ensemble flou 'Nombre d'actions insuffisant' de l'entrée VE1 .....	111
Figure 29	Fonction d'appartenance pour la variable de sortie VS .....	113
Figure 30	Décision de l'agent agrégat .....	114
Figure 31	Calcul de la moyenne de validation .....	115
Figure 32	Processus de négociation entre l'agent Agrégat et un agent évaluateur .....	118
Figure 33	Le métamodèle animal : Concepts et relations .....	126
Figure 34	Le métamodèle Végétal : Concepts et relations .....	128
Figure 35	Le métamodèle social : Concepts et relations .....	129
Figure 36	Métamodèle de la dynamique de population .....	133
Figure 37	Cycle de vie d'un agent rongeur .....	133
Figure 38	Digramme du comportement « Reproduction » .....	134
Figure 39	Digramme du comportement « Maturation » .....	135

Figure 40	Digramme du comportement « Mise bas » .....	135
Figure 41	Digramme du comportement « Creuser Terrier » .....	136
Figure 42	Architecture de l'environnement de formation .....	141
Figure 43	Plate-forme et conteneurs .....	142
Figure 44	Paradigme d'envoi de message asynchrone Jade .....	143
Figure 45	Processus d'exécution d'un thread d'agent Jade .....	144
Figure 46	Capture d'écran des évaluations individuelles des agents assesseurs ...	145
Figure 47	Capture d'écran de l'évaluation finale par la négociation entre les agents .....	146
Figure 48	Dynamique des agents rongeurs .....	151
Figure 49	Architecture d'un agent rongeur .....	156
Figure 50	Paramétrage de la simulation .....	161
Figure 51	Création des agents représentant la population initiale de rongeurs ....	162
Figure 52	Déplacement sur la grille des agents rongeurs subadulte .....	163
Figure 53	Développement de la population des rongeurs .....	163
Figure 54	Infestation des hectares par les rongeurs .....	164
Figure 55	Données de la pluviométrie utilisées dans le scénario de la simulation ..	164

## Liste des Tableaux

Tableau 1	Synthèse sur les pratiques d'évaluation .....	35
Tableau 2	campagne anti-rongeur (2004-2005) .....	80
Tableau 3	Bilan campagne anti-rongeur (2005-2006) .....	80
Tableau 4	Liste des actions incompetentes par acteur .....	83
Tableau 5	Scénario de jeu .....	87
Tableau 6	Exemple illustratif des trois catégories d'action .....	99
Tableau 7	Types d'agent et rôles affectés .....	102
Tableau 8	Échelle d'évaluation .....	113
Tableau 9	Exemples de construction de table de satisfaction .....	116
Tableau 10	Les primitives de l'agent agrégat .....	119
Tableau 11	Les primitives de l'agent évaluateur .....	120
Tableau 12	Les valeurs mensuelles des paramètres démographiques du modèle de dynamique de la population des rongeurs .....	131
Tableau 13	Scénario d'évaluation .....	144
Tableau 14	Analyse des corrélations entre l'évaluation du système et celle de l'expert .....	147
Tableau 15	Analyse des performances .....	148
Tableau 16	Taux de participation et d'abandon .....	150
Tableau 17	Les réponses des étudiants ayant abandonné le jeu .....	150

## Introduction générale

L'accès à l'information et la connaissance est depuis longtemps considéré comme élément clé du développement de l'agriculture. Bien qu'une quantité considérable et en progression permanente d'information concernant le domaine de l'agriculture est disponible sur Internet, on constate encore un manque de formation en ligne (Abdon *et al*, 2008). L'enjeu, cependant, est de définir les moyens de formation à utiliser pour fournir la connaissance aux communautés rurales et aux agriculteurs.

En dépit de tous les systèmes de communication de l'information utilisés actuellement, le service de formation par la pratique fournit par les professionnels qualifiés reste de loin la méthode la plus efficace pour aider les agriculteurs à adopter de nouveaux systèmes de gestion afin d'exploiter les nouvelles informations. Aujourd'hui, plus que jamais, les agriculteurs ont besoin de conseil professionnel pour développer et mettre en application des plans, économiquement réalisables et respectant l'environnement, qui correspondent à leurs propres besoins et soient praticables sur le terrain.

Bien que les TICs soient considérées comme le futur meilleur support de l'information. Cependant, elles ne peuvent faire face aux challenges de l'agriculture si les acteurs impliqués dans les agroécosystèmes ne sont pas en mesure d'appliquer la connaissance fournie par ces technologies (Leary et Berge, 2006). Dans l'agriculture, les technologies orientées information (y compris les TICs) nécessitent, pour être bien exploitées, un cadre de travail permettant de collecter, synthétiser, analyser, interpréter et appliquer l'information (Price et Balasubramanian, 1996). En effet, les mauvaises gestions dans les systèmes de culture sont dues à la non appropriation de la connaissance par les agriculteurs.

En mettant le point sur le besoin et l'utilité de la formation des acteurs impliqués dans les systèmes agroécologiques en général, notre réflexion porte, cependant, sur la gestion de la lutte contre les rongeurs ravageurs de culture qui présente un enjeu économique et environnemental fort. Notre objectif est d'apporter un support à la définition de politiques de gestion et l'efficacité de leur mise en œuvre (simulation, calibration,...)

Pour assurer la mise en œuvre de ces politiques de gestion, les acteurs ont besoin d'une sensibilisation à travers des scénarios de simulation inspirés de cas réels. Etant donné toutes ces informations disparates sur le problème émanant de domaines distincts, nous concluons par la nécessité d'un environnement de formation pour concentrer toutes les compétences aussi pluridisciplinaires soient elles.

Parmi les axes de recherche concernés par la mise en place d'un environnement de formation nous nous focalisons sur l'évaluation des apprenants dans un contexte de simulation participative.

L'évaluation est indissociable des activités d'apprentissage conduites par les enseignants ou menées par les élèves. Elle fait l'objet, dans différentes disciplines (didactique, sciences de l'Education, etc.) depuis longtemps de travaux et de réflexions qui contribuent à en délimiter le champ et à préciser la nature des activités support qui permettent de la mettre en œuvre. D'une manière générale, l'évaluation permet la régulation et la vérification des apprentissages. Mais c'est aussi une activité sociale qui joue un rôle primordial dans l'insertion des élèves par la mise en place d'examens et de concours.

Historiquement, les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) utilisés dans le cadre scolaire ou dans celui de la formation ont toujours intégré sous des formes variées des moyens d'évaluer les activités qui s'y déroulent. Les EIAH sont alors des outils spécialisés, disposant de leurs propres méthodes et pratiques d'évaluation classique.

L'intégration des outils de l'intelligence artificielle tels que les agents et la logique floue dans la procédure d'évaluation remet cette situation en cause pour deux raisons :

- les évaluations produites peuvent créer une motivation pour l'apprentissage chez les apprenants ;
- elles peuvent mimer les comportements des évaluateurs humains tels que l'attribution des bonus et la flexibilité par la négociation des cas proches de la moyenne de validation du test.

Dans cette nouvelle configuration, une des questions importantes que soulève l'intégration des outils de l'IA au sein des procédures d'évaluation est donc celle de leur mise en œuvre dans de tels environnements.

Cette question se traduit généralement par l'usage des systèmes multi-agents, issus de l'intelligence artificielle distribuée qui constituent un outil de modélisation et de simulation déjà largement utilisé avec succès dans divers domaines d'application. Ces systèmes permettent de modéliser le comportement d'un ensemble d'entités autonomes, plus ou moins expertes et plus ou moins organisées appelées « agents », capables d'agir et de se coordonner dans un environnement au prix d'éventuels conflits. La modélisation et la simulation de mécanismes de décision, de coordination et de négociation, pouvant se développer entre ces agents, constituent des thèmes majeurs de recherche pour les SMA.

Aussi, ce travail tente de répondre à un autre problème : la modélisation d'agroécosystèmes afin de bien simuler leur fonctionnement et l'interaction des entités qui les composent.

La modélisation d'écosystèmes s'est à l'origine intéressée à la dynamique des populations, proposant des modèles mathématiques pour prédire l'évolution d'une population donnée.

Ces modèles, qui s'intéressent à des échelles temporelles longues, ne peuvent prendre en compte les interactions entre les individus et/ou entre individus et leur environnement. Face à ce constat, se sont développés les modèles individus-centrés qui reproduisent le comportement d'une population à partir de la description du comportement des individus qui la composent.

L'approche de modélisation dite « multi-agents » que les SMA introduisent est très voisine de l'approche « individus-centrée » en agroécologie. Comme les modèles individus-centrés, les SMA proposent de représenter les individus et leurs comportements. Outre l'homogénéité de concepts mis en œuvre de la modélisation à la simulation, l'intérêt des SMA repose sur leur capacité à considérer aussi bien des paramètres quantitatifs que qualitatifs (des comportements individuels faisant éventuellement appel à des raisonnements stratégiques).

Les SMA permettent ainsi la réalisation et la mise en œuvre de modèles individus-centrés d'agroécosystèmes. Les simulations informatiques de tels modèles rendues possibles par ces systèmes s'apparentent à un « laboratoire virtuel » où certains intervenants du monde réel et différentes abstractions liées à l'étude de ce monde sont modélisées comme étant des agents permettant ainsi l'étude de leur dynamique qu'il s'agit ensuite de confronter avec celle du système réel étudié (Cambier, 1994).

Dans le cadre de cette recherche, nous nous proposons de mettre en œuvre cette approche pour modéliser et simuler le fonctionnement d'un agroécosystème en nous intéressant plus particulièrement à la gestion d'une campagne de lutte contre les rongeurs arvicoles.

# CHAPITRE I

## Problématique Générale et Démarche Retenue

---

### 1.1. Problématique

#### 1.1.1. Le risque rongeur

Protéger les cultures et conserver les récoltes furent sans doute une des préoccupations majeures de l'homme sitôt que, devenu agriculteur, il posséda le savoir lui permettant de détourner à son profit les chaînes trophiques de la biosphère... L'évolution consécutive des communautés au sein de la biocénose de plus en plus anthropisées amplifia le phénomène naturel de compétition entre consommateurs, au premier rang desquels s'affrontent depuis des siècles l'homme, l'insecte et le rongeur.

Aussi loin que l'on remonte dans l'histoire, les documents écrits et l'iconographie montrent que l'homme a été confronté aux dégâts causés par les rongeurs et préoccupé par la mise en œuvre d'une parade. Les moyens utilisés allaient de sacrifices (au dieu Apollon dans son temple de Ténédos lors de grandes pullulations), aux incantations, conjurations, formules magiques (jusqu'à la fin du Moyen-Âge, les paysans récitaient des formules magiques dans les champs dévastés), aux piégeages (le pot enterré rempli d'eau) et jusqu'aux poisons (petits morceaux d'éponge frits, appâts à base d'arsenic). Sans oublier le chat dont la domestication par les Egyptiens fut motivée par le souci de protéger les réserves des céréales contre les dégâts commis par les rats.

La lutte est restée longtemps très empirique. Au début du siècle dernier est énoncé le principe de la lutte préventive et sont lancées les premières études sur l'utilisation des cultures microbiennes (cultures de salmonella) (Le louarn *et al.*, 2003). Cinquante ans après, les premières expérimentations se mettent en place, avec l'analyse du comportement des rats devant les pièges et des essais de raticides. Parmi les initiateurs il faut citer particulièrement R.E. Doty (Doty, 1945) et D. Chitty (Chitty, 1942). Le mouvement lancé, les travaux se multiplient dans trois directions principales : l'établissement des bases écologiques de la lutte, la connaissance des comportements des rongeurs devant les moyens employés et la recherche de nouvelles molécules toxiques.

Les rongeurs appartiennent à l'ordre des Rodentia qui compte 35 familles avec 389 genres différents à peu près 1700 espèces. Ils constituent 40 % des espèces de mammifères connues dans le monde. Ils occupent tous les milieux terrestres. A l'exception d'un certain nombre de

rongeurs qui sont bénéfiques pour l'homme, les rongeurs nuisibles sont très nombreux et quelques espèces qui sont partout considérées utiles tel que les lapins (Leporidae) peuvent se transformer en nuisance dans d'autres pays tel que l'Australie. Les rats et souris par leurs habitudes alimentaires, comportement et capacité de reproduction sont considérés parmi les plus grands ennemis de l'homme. En effet, ils menacent sa santé et la santé des animaux domestiques. Ils endommagent également, les champs cultivés et les stocks alimentaires ce qui engendre un impact important sur l'économie nationale. Il a été démontré, à l'échelle mondiale que les rongeurs endommagent jusqu'à 25% des produits alimentaires cultivés par l'homme chaque année et 40% des stocks de riz et autres céréales.

Ces micromammifères ont toujours suscité beaucoup d'intérêt, en raison de leur commensalisme avec l'espèce humaine. En effet, ils sont les vecteurs de nombreux parasites (*Leptospira* spp., *Trichinella* spp.....) et virus (virus de Lassa, virus de Hantaan,...) et leur taux de reproduction élevé peut nuire aux activités anthropiques (Meerburg *et al.*, 2004). De nombreuses espèces peuvent présenter des dynamiques de population cycliques, caractérisées par des fluctuations de densité saisonnières et pluriannuelles (Krebs et Myers, 1974). Ces fluctuations se décomposent généralement en quatre phases successives : basse densité, croissance, haute densité et déclin, avec une périodicité variable entre 2 pics de pullulation (Krebs & Myers, 1974). Ces dynamiques de population peuvent provoquer des dégâts considérables dans les zones agricoles (Singleton *et al.*, 2001) et sylvicoles et peuvent favoriser la transmission de pathogènes, entraînant des maladies plus ou moins graves chez l'homme. Les pullulations de la Mérione de Shaw (espèce de rongeur arvicole la plus répandue en Algérie) engendrent des problèmes agronomiques mais aussi sanitaires et environnementaux. En effet, elle s'attaque aux fruits, mais ses mets de prédilection sont les céréales qu'elle consomme depuis la période des semis jusqu'à la récolte.

Ses pullulations diminuent ainsi la qualité et la quantité des récoltes, entraînant de fortes pertes économiques pour les agriculteurs. Par exemple, en 2004, une année de pic de pullulation, les pertes ont été chiffrées à plus de 5000 ha pour 548 exploitations au sud de la wilaya de Constantine. D'autre part, les rongeurs étant des hôtes intermédiaires d'un grand nombre de parasites (Rausch, 1995), leurs pullulations peuvent faciliter la transmission à l'homme et la propagation de plusieurs maladies comme la leishmaniose (l'Algérie a enregistré plus de 30 000 cas de leishmaniose cutanée durant l'année 2005, selon les services de la santé publique), l'échinococcose alvéolaire, maladie mortelle. En Franche-Comté (France), 70% des personnes atteintes habitent le département du Doubs et la majorité se situe dans les communes de pullulation (Raoul, 2001).

Trop souvent considérés comme anecdotiques et parfois totalement négligés, les dégâts causés aux cultures par les rongeurs peuvent au contraire s'avérer très importants. Dans des pays en voie de développement et dont l'agriculture est tributaire de phénomènes chaotiques et incontrôlables tels que le régime des pluies, leur impact peut devenir

catastrophique (ex. pertes céréalières dues à la Mérione de Shaw estimées de 10 à 100% en Egypte (Buckle et Smith, 1994)).

L'importance des dégâts est fonction des effectifs des populations de ces rongeurs. Les dégâts les plus spectaculaires sont ceux engendrés à la céréaliculture, la culture de l'arachide, les cultures maraîchères et les arbres fruitiers en année de pullulation de ces micromammifères. Les attaques commencent à partir des semis et peuvent s'étendre jusqu'à la récolte.

Il est évident qu'une lutte efficace contre les rongeurs nuisibles ne peut s'appuyer que sur de bonnes connaissances de la dynamique des populations et l'écologie fine de ces animaux. Et ce par exemple afin de tenter de « prévoir » les cycles d'abondance des populations, d'en connaître les mécanismes, et ainsi d'« ajuster » les stratégies de lutte. En particulier, il est fondamental de pouvoir endiguer avant qu'elles ne se produisent les périodes de crise extrême, c'est à dire les périodes de pullulations de rongeurs, où les densités peuvent devenir effrayantes (ex. 638 individus/ha chez *Arvicanthis niloticus*, Sahel sénégalais, en 1975, (Poulet 1982)).

### **1.1.2. Les besoins**

Dans le passé, la lutte se limitait à empoisonner les appâts présentés aux rongeurs sans savoir sur la dynamique des populations ni anticipation des facteurs provoquant leur pullulation. Les campagnes de lutte se soldaient souvent par un échec faute de moyens scientifiques et de connaissance.

Actuellement, malgré la disponibilité des moyens technologiques, le mode de lutte anti-rongeur adopté jusque là consiste à réagir à une situation de pullulation des rongeurs sans tenir compte des données de type biologique, climatique ou spatial, sans aucun recours aux nouvelles technologies. L'implication des agriculteurs se fait souvent à une étape critique de la lutte. Cette situation s'explique avant tout par l'absence d'approche intégrée et de techniques de contrôle systématique des populations de rongeurs, ainsi que par des techniques inadaptées d'appâtage. Contrairement, la lutte anti-acridienne en Algérie, quoique ne faisant pas intervenir les agriculteurs, utilise les images satellites pour repérer les zones de reproduction des criquets et des ordinateurs de poche de type "Elocust1" permettant aux équipes sur le terrain de collecter et de transmettre des informations vers les centres de décisions (INPV-Agriculture et nouvelles technologies).

Dans le même contexte, la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations – Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'Agriculture) a annoncé le 28 septembre 2007 le lancement sur Internet d'une plateforme interactive axée sur le rôle que peuvent jouer les technologies de l'information et de la communication (TIC) dans l'agriculture et le développement rural.

La plateforme en ligne, [www.e-agriculture.org](http://www.e-agriculture.org), est conçue pour permettre aux utilisateurs d'échanger des opinions, des expériences, de bonnes pratiques et des ressources liées à l'e-agriculture, et de garantir le partage et l'utilisation efficaces des connaissances engendrées dans le monde entier.

Mise au point par des parties prenantes du monde entier en collaboration avec la FAO et ses partenaires, la plateforme fait partie d'une Communauté d'expertise sur l'e-Agriculture, une initiative mondiale visant à renforcer le développement agricole durable et la sécurité alimentaire en améliorant l'utilisation des TIC dans le secteur.

La communauté est composée de décideurs, de pourvoyeurs de services ruraux, de praticiens du développement, d'agriculteurs, de chercheurs et de spécialistes de l'information et de la communication s'occupant d'agriculture et de développement rural.

Nous constatons ici l'utilisation d'un nouveau terme, "l'e-Agriculture", traduisant l'utilisation des technologies de l'information et de la communication dans le domaine de l'agriculture au même titre que le e-learning pour l'apprentissage et la formation, le e-commerce pour le commerce, le e-marketing, etc.

La FAO propose la définition suivante :

*La « e-Agriculture » est un champ émergent de l'intersection de plusieurs domaines, l'informatique agricole, le développement agricole et l'entreprise. C'est un nouveau domaine d'application des Technologies de l'information et de la communication (TIC) destiné à améliorer le développement de l'agriculture durable et la sécurité alimentaire grâce à une meilleure utilisation des technologies d'information, de communication et autres technologies apparentées, liées au secteur.*

Ce constat ne peut qu'affirmer le besoin d'impliquer les nouvelles technologies dans le domaine agricole pour garantir une bonne production, éviter les pertes causées par les ravageurs de cultures et assurer une meilleure prise de décision.

En dépit de tous les systèmes de communication de l'information utilisés actuellement, le service de formation par la pratique fourni par les professionnels qualifiés reste de loin la méthode la plus efficace pour aider les agriculteurs à adopter de nouveaux systèmes de gestion afin d'exploiter les nouvelles informations. Aujourd'hui, plus que jamais, les agriculteurs ont besoin de conseil professionnel pour développer et mettre en application des plans, économiquement réalisables et respectant l'environnement, qui correspondent à leurs propres besoins et soient praticables sur le terrain (Jones, 2000).

Bien que les TICs soient considérées comme le futur meilleur support de l'information. Cependant, elles ne peuvent faire face aux challenges de l'agriculture si les acteurs impliqués dans les agroécosystèmes ne sont pas en mesure d'appliquer la connaissance fournie par ces technologies (Leary et Berge, 2006). Dans l'agriculture, les technologies

orientées information (y compris les TICs) nécessitent, pour être bien exploitées, un cadre de travail permettant de collecter, synthétiser, analyser, interpréter et appliquer l'information (Price et Balasubramanian, 1996). En effet, les mauvaises gestions dans les systèmes de culture sont dues à la non appropriation de la connaissance par les agriculteurs, à titre d'exemple le "blanket recommendation approach" fournit aux agriculteurs de l'information sans développer les connaissances liées à cette information (Price et Balasubramanian, 1996). Dans le même ordre d'idée, Woods, Abdon et Raab recommandent l'adoption des stratégies de gestion des connaissances (knowledge-intensive management) tel que l'IPM (Integrated Pest Management – Gestion de la lutte Intégrée) qui dans un cadre de travail propose des informations de types distincts accompagnées de la connaissance nécessaire sur les ravageurs de culture, la lutte contre ces ravageurs, les dégâts causés par ceux-ci, etc. (Woods *et al*, 2002).

Tous ces propos convergent vers un point commun : la nécessité de former tous les acteurs concernés dans les processus de gestion des agroécosystèmes anthropisés en utilisant comme moyen les techniques de l'information et de la communication et en s'appuyant sur un cadre de travail pour présenter l'information et gérer la transmission de la connaissance aux acteurs impliqués dans la formation.

### **1.1.3. Les solutions existantes**

#### **1.1.3.1. La formation**

L'accès à l'information et la connaissance est depuis longtemps considéré comme élément clé du développement de l'agriculture. Bien qu'une quantité considérable et en progression permanente d'information concernant le domaine de l'agriculture est disponible sur Internet, on constate encore un manque de formation en ligne (Abdon *et al*, 2008). L'enjeu, cependant, est de définir les moyens de formation à utiliser pour fournir la connaissance aux communautés rurales et aux agriculteurs.

Dans un rapport de la FAO (FAO, 2003) suite à l'élaboration d'un cours de formation, sur les nouvelles techniques de lutte contre les rongeurs dans la province du Sichuan, Chengdu, République populaire de Chine, auquel ont participé des instructeurs et agents de vulgarisation qui ont ensuite transmis leurs connaissances à plusieurs agriculteurs-formateurs qui, par la suite, ont diffusé les nouvelles techniques de gestion à plus de 36000 agriculteurs, par le biais de stages pratiques. Les résultats indiquent que les agriculteurs ont rapidement adopté ces nouvelles techniques et ont fait état non seulement d'une baisse pouvant atteindre 93% du nombre de rongeurs, mais également d'un fléchissement des maladies humaines transmises par les rats, ainsi que d'une diminution des risques d'empoisonnement accidentel d'animaux non ciblés. Une étude menée sur un échantillon de villages sélectionnés au hasard à l'issue du projet a révélé que les dommages infligés aux cultures

étaient sept fois moins importants dans les villages où ont eu lieu les stages pratiques que dans les autres.

Un autre exemple de projet de lutte intégrée contre les ravageurs au Nicaragua, financé par la Norvège et mené par le *Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza* (CATIE) afin de mettre au point une approche visant à former les agriculteurs à la gestion agroécologique des cultures et des ravageurs. Cette approche est connue sous le nom d'apprentissage et d'expérimentation participatifs en groupe et par stade de culture (Staver, 2004). Dans le processus d'apprentissage et d'expérimentation participatifs en groupe et par stade de culture, un vulgarisateur rencontre un groupe d'agriculteurs avant la plantation pour discuter des problèmes de ravageurs de culture et de leur expérience de différentes pratiques, pour établir les priorités en matière de problèmes à étudier et d'alternatives à tester et pour identifier des indicateurs pour évaluer les progrès du groupe.

Les objectifs pour les participants sont de :

- Acquérir des connaissances sur l'écologie des principaux ravageurs et sur la façon de les identifier ;
- Renforcer leurs compétences d'observation liées aux décisions concernant la gestion des ravageurs et des cultures ;
- Renforcer leur capacité de raisonnement agroécologique (réseaux trophiques, cycles vitaux, cycles nutritifs, rôle des facteurs biotiques et abiotiques dans la dynamique des populations, et les facteurs influençant la variabilité observée entre les fermes, les saisons et les champs) ;
- Améliorer leur connaissance des pratiques culturales sans pesticides ;
- Utiliser des expériences pour tester et adapter des pratiques culturales ;
- Promouvoir des réseaux informels d'agriculteurs;
- Rechercher et évaluer l'information issue de nombreuses sources.

Tous les projets et les expériences cités ci-dessus montrent que la formation des vulgarisateurs, des agriculteurs et des communautés rurales en général devient de plus en plus nécessaire et vitale pour assurer une production maximale et éviter des pertes dues aux ravageurs de culture en général et aux rongeurs en particulier. Fournir juste l'information aux agriculteurs est une méthode qui a montré ses limites, nous devons définir des moyens pédagogiques qui exploitent cette information tout en intégrant les technologies de l'information et de la communication afin de fournir à la communauté chargée de la lutte contre les rongeurs nuisibles un support de formation et d'aide à la décision adéquat.

### 1.1.3.2. Les Technologies de l'information et de la communication

Dans un monde de plus en plus enclin à l'intégration des Nouvelles Technologies de l'Information et de la Communication, le secteur agricole apparaît comme un terrain très sollicité en ce sens. De nombreux outils sont produits, mis en place et utilisés par les exploitants dans le but de faciliter leur travail quotidien et d'améliorer leur productivité. Le principal défi pour les agriculteurs au niveau du développement durable est donc de répondre aux nouvelles demandes du marché (être en adéquation avec les attentes du consommateur) en termes de qualité et de débouchés, tout en maîtrisant les coûts de l'énergie et en assurant une certaine compétitivité.

Les principaux objectifs de l'intégration et de l'adoption des TIC dans l'agriculture sont de trois sortes :

- Une culture des sols, un élevage toujours plus précis. L'agriculture de précision est le principal leitmotiv de l'innovation technologique pour le monde agricole.
- Une augmentation de la réactivité dans la vente des récoltes (vitrines Internet, sites de commerce en ligne, sites d'échange, consultation simplifiée des cours et marchés du jour...)
- Une meilleure gestion de l'exploitation avec une meilleure maîtrise des exigences environnementales.

Concernant l'usage d'Internet, ce média est surtout utilisé par les agriculteurs pour atteindre les trois objectifs suivants :

- Obtenir une aide à la commercialisation de leurs produits. Ceci est surtout vrai pour les agriculteurs qui sont en contact direct avec le marché comme les viticulteurs ou encore les céréaliers sans coopérative...
- Permettre une gestion de leur culture en temps réel : par exemple, utilisation de la connexion à Internet pour les mises à jour des capteurs embarqués directement reliés à un satellite.
- Permettre une gestion à moyen terme de leurs exploitations : cartographies satellitaires des parcelles directement accessibles en ligne...

Afin de se rendre compte de la quantité mais aussi de la qualité des innovations en terme d'outillage numérique, spécifiquement développé pour le secteur agricole ou non, il paraît essentiel de réaliser un focus sur certaines technologies. Nous allons dans cette section, les présenter et mettre en avant les avantages qu'elles peuvent apporter au travail quotidien de l'exploitant.

**Les plateformes collaboratives sur Internet :** Les sites Internet, à destination des exploitants, proposant une véritable plateforme de collaboration entre professionnels du secteur se développent à grande vitesse. D'ailleurs, ce genre d'outil interactif, réservé à l'agriculture, est aujourd'hui communément appelé « e-agriculture ». Comme nous avons pu le voir précédemment, en 2006 la FAO (Food and Agriculture Organization) a engagé un processus

afin de former un « groupe de travail e-agriculture » soit « the EAWG » (E-Agriculture Working Group) qui sera engagé dans l'élaboration d'une enquête sur cette thématique. Finalement, cette enquête mondiale a eu pour finalité la mise en place d'une plateforme en ligne permettant aux utilisateurs d'échanger opinions, expériences, bonnes pratiques, ressources et de partager leurs connaissances. Vous trouverez cette interface à l'adresse suivante : [www.e-agriculture.org](http://www.e-agriculture.org) (il existe également un article en ligne résumant l'organisation et les objectifs de ce projet mondial<sup>1</sup>, et un second présentant les différentes missions de la plateforme<sup>2</sup>). L'avantage est que les informations que l'on y trouve sont mondiales ce qui nous permet d'appréhender la situation de notre pays, ou de notre région, en rapport à la situation internationale.

**Les logiciels de simulation** : Un logiciel de simulation permet deux approches :

- Un état des lieux d'une région ou d'une zone géographique. Ces données sont généralement difficilement mesurables.
- La prévision, la projection et l'amélioration.

L'intérêt des logiciels de simulation est d'anticiper des modifications, de prévoir les effets d'une pratique sur le terrain ou d'anticiper le changement naturel d'un paramètre. Une simulation permet de définir une situation pour y réfléchir et pouvoir ensuite infléchir sur plusieurs paramètres. Comme exemple, nous citons le logiciel SWAT qui permet d'évaluer l'effet des pratiques et du climat sur l'eau des bassins alimentant l'eau publique.

**La télédétection** : Est basée sur une image satellitaire de la parcelle, il en découle un diagnostic du terrain de la culture suivi par des conseils donnés par des spécialistes expérimentés ayant à leur disposition des modèles agronomiques avec des données concernant les plantes, le terrain l'environnement géologique et le climat. Le service FARMSTAR est un exemple de conduite des cultures par télédétection ; il a été développé par EADS-Astrium et ARVALIS-Institut du végétal et mis en service dès l'année 2002.

Nous constatons qu'une panoplie d'outils logiciels et matériels a été développée dans le but d'améliorer les pratiques agricoles et de maximiser les rendements. Cependant peu ou rares sont les outils développés pour lutter contre les rongeurs ravageurs de culture.

Le système MOUSER développé par Brown et al. (Brown et al., 2001) se limite à l'aspect économique suivant les actions entreprises par les agriculteurs dans un certain contexte et n'implique pas tous les acteurs afin d'étudier et par conséquent d'améliorer leurs comportements.

---

<sup>1</sup> Source : <http://www.fao.org/newsroom/fr/news/2007/1000668/index.html>.

<sup>2</sup> Source : **Problèmes émergents relatifs à l'e-Agriculture – Notes d'orientation**, mars 2008.

#### 1.1.4. Approche retenue

En mettant le point sur le besoin et l'utilité de la formation des acteurs impliqués dans les systèmes agroécologiques en général, notre réflexion porte, cependant, sur la gestion de la lutte contre les rongeurs ravageurs de culture qui présente un enjeu économique et environnemental fort. Notre objectif est d'apporter un support à la définition de politiques de gestion et l'efficacité de leur mise en œuvre (simulation, calibration,...)

Le problème est assez complexe. Cette complexité est due à plusieurs facteurs parmi lesquels nous citons la diversité des paramètres écologiques, biologiques, climatiques etc. En effet le milieu naturel nécessite une compréhension de tous les facteurs écologiques et biologiques mis en jeu tel que la croissance des végétaux, la reproduction des rongeurs, leur distribution spatiale, les prédateurs de ces rongeurs, etc. Le déséquilibre causé par la diminution sensible des rapaces, qui sont les prédateurs des rongeurs par excellence, a accentué le cycle de pullulation (les écologistes affirment que les pesticides, trop souvent employés à tort et à travers, sans les précautions d'usage, présentent de graves dangers pour notre faune sauvage et seraient l'une des causes directes de l'alarmante diminution de nos rapaces qui périssent ou deviennent infertiles pour avoir mangé des rongeurs ayant absorbé des graines empoisonnées). L'interaction entre les différents éléments de l'agroécosystème ajoute une autre dimension à sa complexité. Ainsi, la pluviométrie influe indirectement par le biais de la végétation sur la reproduction des rongeurs, par conséquent le nombre d'individu par hectare augmente et les dommages causés aux cultures s'amplifient. Les actions entreprises par les acteurs influent directement sur la population des rongeurs (détection des zones infestées, recensement de la population des rongeurs, stratégie de lutte, etc.). Par conséquent, cette forte interaction des différents éléments augmente la complexité du problème et impose une analyse granulaire de toutes les actions réalisées par les acteurs sur le système agroécologique.

Au problème initial s'ajoute le problème de son contrôle. Ce qui consiste en la définition, la mise en œuvre, et le transfert des politiques de gestion des agroécosystèmes sur le terrain. Par rapport à notre problématique, spécifique de la lutte contre les rongeurs nuisibles, nous nous situons dans le cadre du transfert de ces politiques sur le terrain, c'est à dire comment former les futurs responsables qui auront en charge la mise en œuvre de ces politiques ainsi que l'acculturation des acteurs de ces agroécosystèmes (stakeholders) afin qu'ils s'approprient ces politiques de gestion et qu'ils ne les voient plus seulement comme des directives abstraites.

Pour assurer la mise en œuvre de ces politiques de gestion, les acteurs ont besoin d'une sensibilisation à travers des scénarios de simulation inspirés de cas réels. Etant donné toutes ces informations disparates sur le problème émanant de domaines distincts, nous concluons

par la nécessité d'un environnement de formation pour concentrer toutes les compétences aussi pluridisciplinaires soient elles.

## **1.2. Démarche suivie**

### **1.2.1. Objectifs généraux**

La lutte contre les rongeurs est une composante importante de la lutte contre les vecteurs<sup>3</sup>. En effet, elle nécessite en plus d'une formation assez spécialisée, l'intervention de plusieurs acteurs, à savoir, les agents phytosanitaires<sup>4</sup>, les prospecteurs<sup>5</sup> et les agricultures rendant la tâche difficile d'autant qu'elle ne bénéficie d'aucune assistance informatique.

Sachant que l'environnement agroécologique concerné est fortement anthropisé, l'influence des facteurs environnementaux rend la surveillance et la lutte extrêmement difficiles avec les outils de surveillance classiques. Afin de bien rendre efficace la lutte, surtout dans les régions rurales, il s'avère nécessaire de former le personnel responsable de la lutte contre les rongeurs aussi bien au niveau central que provincial afin d'acquérir les connaissances concernant la biologie, l'écologie et les moyens et stratégies appropriés pour lutter contre ces mammifères.

Face à cette situation de disfonctionnement dû au manque de formation des acteurs concernés dans le processus de lutte, à la gestion des différentes phases de lutte et à la non exploitation efficace des données recueillies, nous proposons de mettre en place un environnement pour l'aide à la formation par simulation participative des agents phytosanitaires et des acteurs communaux. Cet environnement obéira à la composition classique des systèmes tuteurs intelligents et des environnements Informatiques pour l'apprentissage humain. Cependant, notre intérêt porte sur l'évaluation des apprenants dans de tels environnements. Nous nous intéressons aussi à un autre aspect de recherche sur la simulation des agroécosystèmes et les dynamiques de leurs différents composants.

Notre travail de recherche s'inscrit dans cette problématique et consiste à développer un environnement de formation et d'aide à la décision par simulation participative des agents phytosanitaires et des acteurs communaux. Les domaines de recherche que nous aborderons dans cette étude sont les systèmes d'enseignement assisté par ordinateur, particulièrement le processus d'évaluation des apprenants par ces systèmes et le domaine de la simulation des agroécosystèmes.

---

<sup>3</sup> Insectes transportant les parasites sources d'épidémie

<sup>4</sup> Experts responsables de la protection des végétaux

<sup>5</sup> Agents assurant la prospection de parcelles de terres à la recherche de foyers de rongeurs

### **1.2.1.1. Les systèmes d'enseignement assisté par ordinateur**

L'environnement que nous proposons de développer aura une double visée. D'une part, assister les agents phytosanitaires à la compréhension et l'expérimentation de plans d'action spécifique de lutte en collaboration avec les prospecteurs et les agriculteurs à l'aide d'une série de jeux de rôles (nombre d'explorateurs, définition d'une stratégie d'exploration, définition de comportements standard, ...). Et d'autre part, servir de support de formation aux différents acteurs et aux futurs responsables experts dans la protection des végétaux. Notamment en vue d'une vulgarisation des enjeux et des pratiques. Dans cette perspective, notre intérêt portera sur une dimension assez importante des systèmes d'enseignement qu'est l'évaluation des apprenants. Notre objectif est de proposer un mécanisme d'évaluation qui soit adapté aux décisions et actions entreprises par les acteurs dans un jeu de rôles participatif. Sachant que l'évaluation joue un rôle particulier en EIAH<sup>6</sup>, l'intérêt d'un tel système d'évaluation est :

- d'être motivant pour l'apprenant ;
- d'encourager une activité d'apprentissage soutenue ;
- de contribuer à la progression de l'apprenant ;
- d'être faible en coût humain et facilement maintenable.

Notre point de vue est que l'évaluation joue un rôle primordial dans l'activité d'apprentissage, non seulement comme le moyen de vérifier les acquisitions mais aussi comme le moyen de motiver ces apprentissages et d'inciter les joueurs à progresser.

### **1.2.1.2. Modélisation et simulation multi-agent**

Le développement de notre environnement de formation nous amène dans un premier temps à modéliser deux systèmes différents. Le système agroécologique composé des rongeurs et des végétaux où il sera nécessaire de modéliser la croissance des végétaux en présence (ou non) des rongeurs, et de modéliser la reproduction des rongeurs et leur distribution spatiale et temporelle dans l'agroécosystème. La modélisation du système des acteurs consiste à modéliser les comportements de ces acteurs. À savoir, définir les stratégies de prospection, définir les stratégies de dératisation, évaluer le risque d'infestation des parcelles avoisinantes par les rongeurs et évaluer l'application de ces stratégies sur l'état de l'agroécosystème. Ces modèles s'appuieront sur le paradigme multi agent.

Dans un second temps, nous utiliserons ces différents modèles dans un jeu de rôle participatif. L'environnement de formation mettra les joueurs/acteurs face aux modèles ainsi produits en se basant dans la mesure du possible sur des scénarios réels. Afin de suivre l'évolution des acteurs au cours des simulations notamment en vu d'analyser la performance de leurs

---

<sup>6</sup> Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain

actions, il sera fait recours à des approches de modélisation de l'apprenant telle que employée dans les environnements de formation assisté par ordinateur.

L'intérêt de cette modélisation n'est pas de développer un modèle sur les connaissances de l'acteur, mais il s'agit plutôt d'une modélisation de comportement (les actions réalisées par l'acteur- le joueur- dans un certain contexte). Par la suite, on simule l'impact de ces actions sur le système et le résultat sera présenté au joueur. Le modèle comportemental de l'acteur sera créé sur la base des actions réalisées dans un certain état du système. À travers ces résultats, le joueur pourra, dans un prochain tour de jeu, calibrer ou améliorer ses actions vers une efficacité du système.

### **1.2.2. Conclusion et démarche retenue**

L'histoire de la protection des cultures est riche d'erreurs qui démontrent les risques d'interventions simplistes, où les contextes de production sont ignorés. Par ailleurs, la protection des cultures n'est, pour l'essentiel, pas le fait de spécialistes, mais de producteurs pour qui elle n'est nécessairement qu'une facette parmi d'autres préoccupations. A contrario, ignorer les connaissances accumulées sur la biologie et les effets des bio-agresseurs sur les cultures représenterait une régression grave.

Dans une perspective de recherche en informatique agricole, il serait donc maladroit de confiner la réflexion à, par exemple, la dynamique des populations, leur "écologie", leur génétique et les interactions entre les différentes composantes du système étudié. Certainement, ces éléments sont nécessaires à une compréhension du fonctionnement des systèmes ; mais ils ne sont pas suffisants pour gérer des agroécosystèmes de manière durable, notamment quant à leurs agresseurs (les humains).

Il est connu que les productions agricoles subissent chaque année des dégradations estimées à 30% de la production, dues aux maladies et aux ravageurs des cultures. Mais, ce sont surtout les fléaux des cultures qui causent les dégâts les plus spectaculaires. Les rongeurs champêtres dénommés encore rongeurs arvicoles. Parmi les nombreuses espèces qui se nourrissent en Algérie de produits végétaux, c'est la mérione qui constitue pour l'agriculteur une contrainte sérieuse à la productivité et aux rendements agricoles.

Ce fléau vit en permanence dans les champs et se nourrit de végétaux divers cultivés ou spontanés. La part ainsi prélevée est économiquement tolérable et ne constitue pas un obstacle sérieux pour la productivité. Mais, lorsque les conditions sont favorables à la production agricole, il y a en même temps une augmentation de l'effectif de rongeurs. Et en absence de mesures préventives sérieuses, l'effectif augmente de façon exponentielle et met l'agriculture en danger.

Il faut préciser que la mérione ainsi que les rongeurs de façon générale se caractérisent par un taux d'expansion élevé dû à la prolificité des naissances et au nombre de portées. De sorte que la pullulation peut gagner de nombreux espaces et devient une contrainte économique régionale, voire nationale. Des situations tragiques ont été vécues dans le passé, notamment en 1992 où la pullulation a atteint plus de 200.000 ha, touchant plus de 20 wilayas, notamment celles des hauts plateaux, connues pour leur vocation céréalière et où la mérione aime s'y développer. C'est aussi le cas de l'année 2004 qui a connu une pullulation sur plus de 500.000 ha touchant 29 wilayas, situation qui a obligé la mise en œuvre d'un dispositif spécifique d'intervention s'appuyant en premier lieu sur la contribution des agriculteurs, encadrés par les services agricoles dont ceux de la protection des végétaux.

Il n'en reste pas moins que la gestion des agroécosystèmes est primordiale et que les solutions envisagées pour la protection des cultures en Algérie préconisent une implication sérieuse des TIC en proposant par exemple une plate forme nationale facilitant le dialogue entre professionnels et agriculteurs et fournissant des support de formation vulgarisés dans le but de bénéficier des nouvelles techniques et d'une agriculture durable.

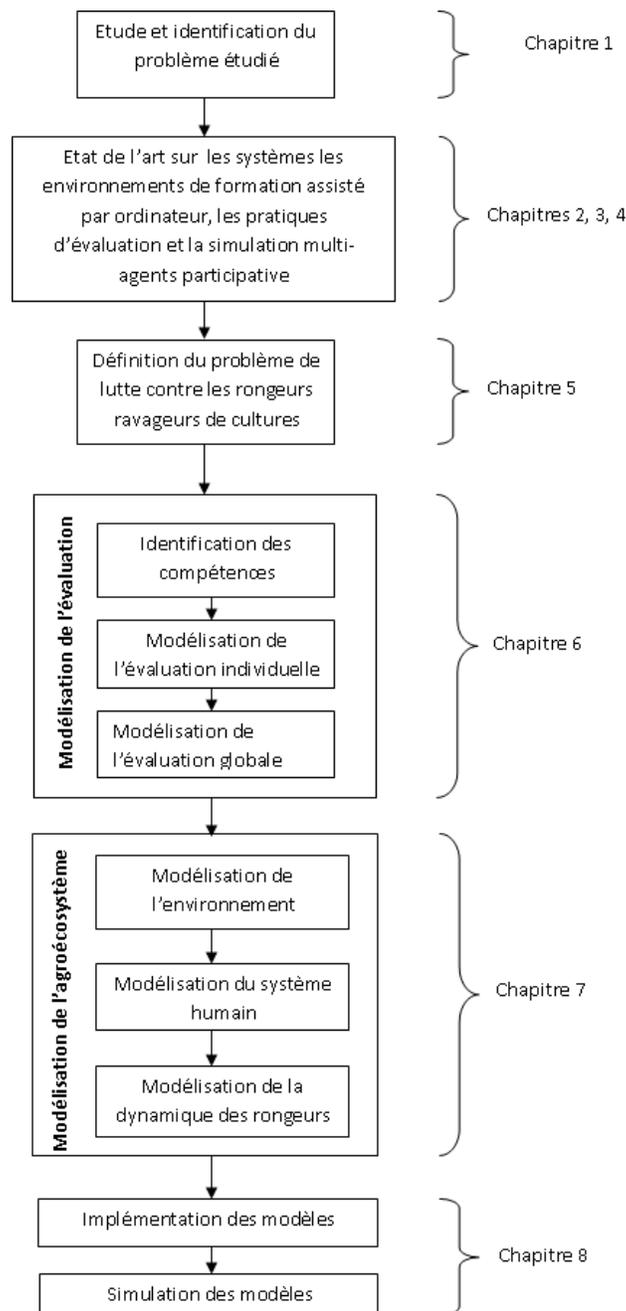
Notre contribution s'étale sur deux volets scientifiques. Le premier volet concerne le domaine de l'évaluation des apprenants dans un environnement de formation assisté par ordinateur. A cet effet, dans cette première partie, nous proposons d'abord un système d'évaluation des joueurs durant le jeu (simulant une campagne de lutte) basé sur l'évaluation des compétences, cette évaluation sera prise en charge par des agents évaluateurs. Le comportement global du joueur sera évalué à la base de ses compétences et, éventuellement, suite à un processus de négociation entre les agents évaluateurs et un agent global.

Le deuxième volet concerne la mise en œuvre d'une simulation de la dynamique de la population des rongeurs. Dans ce deuxième volet, nous proposons en premier une démarche de modélisation basée sur l'utilisation des systèmes multi-agents (SMA) comme outil de modélisation et de simulation, pour aborder ce système complexe et aider à la compréhension de l'interaction des différents sous systèmes, ensuite nous utiliserons ces modèles dans un jeu de rôle participatif afin d'inculquer, à tous les acteurs, les politiques de gestion d'une campagne de lutte contre les rongeurs arvicoles. Notre recherche s'inscrit ainsi dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée.

Cette démarche consiste à caractériser les composantes pertinentes de cet agroécosystème qu'elles soient biologiques, physiques ou humaines et à décrire leur dynamique et leur interactions. En conséquence, notre modélisation va s'attacher à décrire les interactions entre les actions et les décisions durant la campagne de lutte et le

comportement de l'agroécosystème dont la variable déterminante est le peuplement de rongeurs. Elle repose sur l'hypothèse qu'en zone agricole, le rongeur est le principal ennemi des céréales et que le nombre de rongeurs par hectare est déterminant du rendement des cultures. Nous focalisons notre modélisation sur la reproduction des rongeurs et leur dispersion spatiale pour évaluer leur impact sur l'agroécosystème et les dégâts causés aux cultures.

La figure 1 décrit la démarche suivie dans notre travail de recherche pour proposer un environnement de formation basée sur la simulation d'une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de cultures.



**Figure 1.** Présentation de la démarche suivie

L'approche multi-agents pour simuler le comportement d'un agroécosystème fait partie des approches individus-centrées utilisées en écologie pour des simulations d'écosystème, notamment celles qui prennent en compte l'espace et les interactions entre individus. Les SMA proposent également des formalisations de processus décisionnels pour la coordination d'agents. Ces formalisations, notamment celles qui concernent la négociation, peuvent être utilisées pour l'évaluation des compétences des acteurs durant la campagne de lutte.

En conséquence la revue de littérature qui est proposée dans la partie suivante s'est orientée sur les aspects de notre recherche, qui sont les environnements d'apprentissage assisté par ordinateur, les processus d'évaluation utilisés dans ces systèmes et la simulation multi-agents participative.

### **1.2.3. Organisation du manuscrit**

Ce travail est organisé de la manière suivante :

– Ce premier chapitre présente le cadre d'étude et la problématique générale de la lutte contre les rongeurs arvicoles, il détaille ensuite la démarche suivie à travers la présentation des domaines scientifiques concernés par la contribution. Ce chapitre est clos par la présentation de l'organisation du mémoire.

– Une première partie propose ensuite un état de l'art sur deux domaines différents, les liens entre ces deux domaines seront mis en application dans la partie contribution. Les chapitres 2 et 3 présentent un état de l'art de l'évolution des systèmes d'enseignement assisté par ordinateur et de l'évaluation dans le contexte des environnements informatiques. Dans cette partie sont tout d'abord introduits les différents types d'environnement de formation assisté par ordinateur ainsi que les formes et les pratiques d'évaluation existantes. Ce premier état de l'art est suivi d'une synthèse sur l'existant en matière d'évaluation dans les EIAH. Le chapitre 4 présente une revue de la littérature sur le domaine de la simulation participative, des systèmes multi-agents ainsi que l'usage de la négociation par les agents dans le but d'une coopération ou de résolution de conflit.

– Une deuxième partie présente notre traitement du problème et nos différentes contributions. Le chapitre 5 introduit l'identification du problème et les bases de notre environnement de formation. Le chapitre 6 présente dans un premier temps, la modélisation de l'évaluation d'une seule compétence de l'apprenant, ceci nous conduit dans un deuxième temps à proposer une organisation multi-agents pour une évaluation globale des compétences. Dans le chapitre 7, nous présentons la modélisation de l'agroécosystème où nous focalisons sur la dynamique des rongeurs. Le chapitre 8 présente d'abord l'architecture

de notre environnement de formation ensuite illustre l'implémentation de notre modélisation en simulant les modèles développés. Enfin une expérimentation ainsi que des résultats sont commentés à la fin de ce chapitre.

– Enfin la troisième partie conclut dans le chapitre 9 sur les perspectives d'amélioration et les autres pistes de recherche suggérées par ce travail.

# CHAPITRE II

## LES SYSTEMES D'ENSEIGNEMENT ASSISTE PAR ORDINATEUR

---

Dès leur apparition, la vocation des systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) est de faciliter et d'optimiser la transmission d'information tout en diminuant le coût financier et humain de la formation. Ils ont pour objectif de donner à l'utilisateur un certain regard sur un domaine particulier et de créer chez lui les dispositions nécessaires à la compréhension et à l'assimilation des informations diffusées. Comme nous allons le voir, les techniques mises en œuvre pour satisfaire ces objectifs ont beaucoup évolué au fil du temps.

### **2.1. Didacticiels**

Dans le courant des années 50, Skinner (Skinner, 1954) propose une révolution scientifique de l'enseignement basée sur les résultats de recherches fondamentales et sur les lois de l'apprentissage mises en évidence chez l'animal (rat, pigeon). Il considère qu'il est possible d'enseigner n'importe quelle notion à un élève si on utilise la technique dite de l'enseignement programmé. Le principe de cet enseignement repose sur des principes tels que, le découpage de la matière à enseigner en petites unités et l'individualisation du rythme d'apprentissage. Cet enseignement est réalisé à l'aide de machines à enseigner dont la sophistication technique variait du simple manuel papier à des dispositifs relativement complexes.

A la même époque, d'autres tentatives d'applications ont consisté à proposer aux élèves des exercices de consolidation des connaissances ou drill (révision de livrets, exercices d'orthographe, etc.). Les enseignants et les parents ont été heureux d'être déchargés de la tâche fastidieuse et répétitive que constitue ce type d'exercices ; quant aux élèves, ils ont pu apprécier la grande patience de la machine à leur égard. Dans les années soixante, une transposition de ces principes a permis de construire des logiciels, au départ, relativement simples. Ce furent les premières tentatives d'Enseignement Assisté par Ordinateur (ou EAO). Ils étaient souvent basés sur un même principe : des scénarios définis dans des graphes imposant une succession figée d'écrans pour une succession d'actions toutes aussi figées. L'évolution de tels systèmes (fermés) est difficile et coûteuse en temps. Pourtant, cette méthode est longtemps restée et est, encore, à la base de nombreuses applications.

### **2.2. Systèmes Tutoriels Intelligents (STI)**

L'étape suivante est l'apparition de l'EIAO (Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur, traduction de "Intelligent Computer Aided Instruction"). Ce domaine s'est

développé dès 1970 aux Etats-Unis, à partir du constat de certaines limites des systèmes d'EAO classiques. Il s'agissait de réaliser, en utilisant des techniques d'intelligence artificielle, des systèmes plus souples, plus interactifs, s'adaptant mieux à leurs utilisateurs.

Plusieurs approches ont été explorées. La décennie 80-90 a été marquée par celle des *systèmes tutoriels intelligents*, fortement liée au développement des systèmes à base de connaissances en intelligence artificielle.

Il s'agissait principalement de concevoir des systèmes d'apprentissage individualisé, fondés sur des activités de résolution de problèmes, ces activités étant généralement considérées comme complémentaires d'un enseignement du domaine effectué par ailleurs (cours magistral par exemple, ou bien autre type d'environnement informatique). Dans un STI, la résolution d'un problème proposé par le système ou par l'apprenant, peut, en principe, être effectuée, soit par le système, avec certaines capacités d'explication, dans un mode "observation" pour l'apprenant, soit par l'apprenant, dans un mode "action", avec un guidage et un contrôle plus ou moins rapprochés du système. C'est le cas, par exemple, du système APLUSIX, dans le domaine de la factorisation de polynômes aux niveaux collège et lycée, dont la première version date de 1987 (Nicaud, 1987), et du système QUIZ, pour l'enseignement du bridge, de J.M. Labat et M. Fattersack (Fattersack, 1990) (Labat, 1990).

En même temps plusieurs applications industrielles voient le jour, parfois très complètes, comme le développement du dispositif de formation CECIL sur les unités de cuisson en cimenterie (Prévoit, 1992).

Le célèbre système SCHOLAR de Carbonell (Carbonell, 1970), relatif à la géographie de l'Amérique du Sud, mérite également d'être mentionné. Dans ce système de "dialogue à initiative mixte", la connaissance, représentée dans des structures d'information, était utilisée, non seulement pour être présentée, pour déterminer des questions à poser à l'apprenant et pour vérifier ses réponses, mais aussi pour répondre à des questions de ce dernier, non explicitement prévues à la conception du système, et ce en "langage naturel" (anglais limité à des phrases simples). Plus précisément, Carbonell avait représenté des objets et concepts géographiques dans une structure globale organisée sous forme de réseaux sémantiques (réseaux d'entités reliées entre elles par des relations). Les réseaux sémantiques étaient vus comme des modèles de représentation et de mémorisation de connaissances utilisées par les humains. Carbonell avait, aussi, doté SCHOLAR de capacités embryonnaires de *modélisation de l'apprenant*, plus précisément d'un mécanisme d'évaluation des connaissances de celui-ci. On trouve dans ces travaux précurseurs et dans ceux qui ont suivi (dans la décennie 70) les idées fondamentales de l'EIAO, à savoir :

- une représentation explicite des connaissances du domaine et des mécanismes de raisonnement, qui dotent le système de la capacité de répondre à des questions, de résoudre des exercices dont la solution n'a pas été explicitement prévue et dont l'énoncé peut être proposé par l'apprenant ;

- un processus de modélisation de l'apprenant, visant à disposer explicitement d'informations telles que son degré de maîtrise des connaissances du domaine : l'objectif général étant de permettre une adaptation dynamique et individualisée du système à son interlocuteur ;
- l'explicitation de stratégies pédagogiques, pour permettre au système d'engendrer dynamiquement ses interventions en fonction de la situation, d'objectifs pédagogiques et du modèle de l'apprenant ;
- la recherche de capacités de communication souples et variées, avec des possibilités d'intervention et de prise d'initiative de l'apprenant.

Ces idées fondamentales servent de base à l'architecture générale proposée classiquement pour un STI (figure 2).

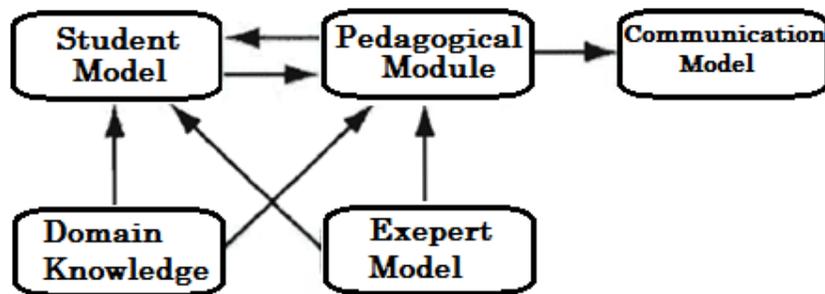


Figure 2. Architecture d'un STI (Beck, 1996)

- **Modèle du domaine** (expert) : il correspond à l'expertise du domaine à enseigner. Il permet de structurer et d'organiser le savoir dans le but de mettre en évidence les différents concepts et les liens qui existent entre eux ;
- **Modèle de l'apprenant** (élève) : correspond à l'expertise des connaissances relatives à l'apprenant. Son but est de modéliser les connaissances de l'apprenant par rapport à chaque concept du domaine ;
- **Modèle de l'interaction** (interface) : contient les descriptions de chaque média (reconnaissance vocale, synthèse vocale, interface...) en termes de capacités, de conditions d'utilisation et de contraintes de combinaison ;
- **Modèle du tuteur** (pédagogique) : spécifie les dialogues tutoriels et les méthodes de remédiation. En fonction des informations que le tuteur possède sur l'apprenant, en particulier des connaissances erronées mises en œuvre par l'apprenant lors des interactions précédentes, il est capable de prendre des décisions didactiques.

Plusieurs travaux sur les STI ont été développés, parmi ceux-ci nous citons : LISP Tutor (Anderson et al., 1989); Geometry Tutor (Anderson et al., 1985) ; STEVE (Soar Training Expert for

Virtual Environments) (Elliott et al., 1999). Un autre Système Tutoriel Intelligent qui suscite beaucoup d'intérêt est le Tactical Language Training System (TLTS) (Simulateur de situation TLTS). Il a pour finalité d'aider à l'acquisition des aptitudes communicatives élémentaires d'une langue étrangère (Johnson, 2006). Toutes ces recherches justifient l'adverbe "intelligemment", ajouté au sigle EAO, à la fois en terme d'intelligence du système et en terme de problématiques et de techniques relevant de l'intelligence artificielle.

Néanmoins, lorsque l'on s'attache à regarder l'utilisabilité des systèmes développés, on voit rapidement que les résultats attendus initialement n'ont pas été atteints. Ce manque de résultats s'est traduit par l'apparition d'une autre appellation pour le sigle EIAO, développé en "Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur", correspondant à l'appellation en langue anglaise "Interactive Learning Environments" et mettent fortement en évidence le caractère pluridisciplinaire de ce domaine de recherche qui s'est fortement confirmé ces dernières années dans les communautés internationales.

### **2.3. Environnements Interactifs pour l'Apprentissage humain**

C'est au cours de la décennie 80-90 que s'est développé l'usage des micro-ordinateurs et des stations de travail multimédia, avec une évolution rapide des matériels, des logiciels et des interfaces homme-machine. Tous ces éléments ont permis de développer une véritable interactivité système-utilisateur. On est alors passé de l'idée de systèmes de résolution de problèmes, où les échanges avec l'utilisateur se limitaient à la saisie des données et à la fourniture des résultats, à celle de systèmes interactifs d'aide à la résolution de problèmes, d'aide à la décision, ou d'aide au pilotage, avec une communication plus intense tout au long du processus.

Les EIAH (Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain), auparavant appelés EIAO (Enseignements Intelligemment Assistés par Ordinateur), sont fondés sur l'apport des différentes disciplines des sciences humaines et sociales et de l'Intelligence Artificielle. Tchounikine définit ainsi un EIAH :

*Un EIAH au sens large est un environnement qui intègre des agents humains (i.e. élève ou enseignant) et artificiels (i.e., informatiques) et leur offre des conditions d'interactions, localement ou à travers les réseaux informatiques, ainsi que des conditions d'accès à des ressources formatives (humaines et/ou médiatisées) locales ou distribuées. (Tchounikine, 2003)*

Les EIAH visent d'autres objectifs en termes de situations et de formes d'activités proposées aux apprenants, le point commun étant des capacités d'interactivité intentionnellement destinées à favoriser des apprentissages de l'utilisateur, dans un cadre d'utilisation relativement autonome (Bruillard, 1997). Par exemple, le système SIAM de J. Courtois (Courtois, 1990), système d'assistance à des activités de travaux pratiques de physique, aide un étudiant à comprendre pourquoi le montage qu'il a réalisé ne se comporte pas comme

prévu (situation indirecte de résolution de problèmes de diagnostic). D'autres systèmes comportent un module important de simulation de dispositifs techniques, sur lequel sont basées des activités de formation, dans des domaines de sciences expérimentales ou en formation professionnelle par exemple.

Les simulateurs pédagogiques, tels que APLUSIX (Nicaud, 1994), permettent à l'apprenant d'agir et de voir les conséquences de son action. Cette réactivité permet à l'autonomie d'être profitable en ancrant l'action de l'apprenant dans une réalité à laquelle il peut se confronter et en lui fixant un objectif de travail sanctionné par une modification de cette réalité. La communication est le prolongement de la réactivité, elle peut-être considérée du point de vue homme-machine, mais également, depuis la démocratisation des réseaux informatiques, du point de vue homme-homme (médiatisé via la machine). La communication homme-machine dans les EIAH est portée par les interfaces graphiques plutôt que par des interfaces en langues naturelles (limitées par l'interprétation hasardeuse de la machine). La difficulté de concevoir la communication via une interface graphique réside dans l'opposition entre des interfaces puissantes, en terme d'expressivité mais complexes à manipuler, et des interfaces simples, mais permettant peu d'interaction (Balacheff et al., 1997).

Une des évolutions actuelles des EIAH est la structuration des échanges homme-homme via la communication en réseau. Les EIAH intègrent, ainsi, des notions telles que l'apprentissage coopératif entre apprenants ou l'assistance à distance par un tuteur.

Une approche connexe se base sur des micromondes ou sur des environnements d'exploration, de découverte plus ou moins guidée. Par exemple, l'environnement LOGO (Papert, 1980), considéré comme le premier prototype de micromonde, a largement été expérimenté dans les années 80 dans des contextes scolaires (niveau primaire ou collège). L'objectif pédagogique annoncé était de développer des capacités de découverte, en proposant aux élèves un dispositif mobile matériel ou abstrait (tortue ou écran graphique) réagissant à des commandes formulées au moyen d'un programme en langage LOGO. De nombreuses études et d'expérimentations ont été menées pour préciser des situations d'usage et analyser les apprentissages résultant, effectivement, de telles activités, reprises et étendues à d'autres dispositifs dans le champ de la robotique pédagogique. Un autre exemple de micromonde réactif est le système CABRI-Géomètre ([www.cabri.net](http://www.cabri.net)), cahier de brouillon en géométrie, qui permet, via l'utilisation d'un ensemble de commandes symboliques et d'opérations de manipulation directe, de construire une figure géométrique, puis de la déformer en maintenant les relations déclarées entre ses éléments (un point déclaré sur une droite reste sur la droite, le point milieu d'un segment reste au milieu du segment si ses extrémités se déplacent). On conçoit aisément l'intérêt d'un tel environnement pour l'étude de figures, de propriétés géométriques et la formulation de conjectures, intérêt d'ailleurs attesté par les nombreuses expérimentations de ce système. De même, de

nombreux modules de simulation de phénomènes ou de dispositifs peuvent être employés dans des situations de formation, tout en n'ayant que des capacités réactives : l'apprenant fixe des valeurs de paramètres et peut observer le comportement résultant du modèle simulé. Les principales propriétés des *micromondes* sont l'autonomie, la réactivité et la communication. L'accès à une certaine autonomie est une hypothèse forte des EIAH car l'apprenant doit pouvoir être acteur (et non spectateur) de sa formation. Ainsi les *micromondes*, tels que LOGO ou Cabri-Géomètre, offrent un environnement permettant à l'apprenant de créer, d'être auteur mais l'autonomie qui lui est proposée, pour être efficace d'un point de vue de la formation, doit être associée à un contrôle de l'activité. Ce contrôle se manifeste dans les EIAH sous la forme de réactions formulées par le programme en fonction des actions de l'apprenant, telles que l'explication des erreurs, le guidage, voire la perturbation (Piché *et al.*, 1998). Les micromondes comme LOGO et Cabri sont des logiciels éducatifs dénués de toute connaissance, mais peuplés d'éléments avec lesquels l'apprenant interagit. La connaissance n'est plus déductive mais inductive.

Il convient alors de préciser les limites des micromondes. Ainsi, certains de ces environnements sont simplement réactifs, c'est-à-dire qu'ils ne font qu'exécuter des commandes de leur utilisateur, sans effectuer de contrôle de celui-ci, ni d'intervention tutorielle et ont donc un rôle pédagogique moins évident. Ils doivent alors être utilisés sous le contrôle d'un enseignant qui est chargé d'assurer la pédagogie de l'utilisation. Ceci ne signifie pas qu'ils ne peuvent pas être utilisés dans un contexte d'autoformation, et que l'on ne peut pas apprendre en les utilisant.

Les jeux d'entreprise mettent des sous-groupes d'apprenants, en concurrence dans un univers multimédia interactif. L'intérêt de ce dernier point est évident : les apprenants suffisamment pris, voire passionnés, par l'enjeu (véritable "leurre") franchissent sans douleur et sans véritablement en prendre conscience, les étapes cognitives ou conceptuelles nécessaires pour avancer dans le jeu. Les objectifs des apprenants (gagner, relever un défi, ...) sont ainsi différents de ceux du formateur qui lui veut faire comprendre et maîtriser, en situation d'action, des notions, des règles, des concepts...

La modélisation et la structuration (architecture) du jeu s'appuient ici sur l'identification de places conceptuelles (étapes pédagogiques de la trajectoire de formation) et leur séquençement possible pour assurer une construction progressive des connaissances et savoir faire (Individuels ou collectifs). Ceci impose un travail important sur le découpage et la durée du jeu (Tarpin-Bernard *et al.*, 2000). Cette phase de conception informatique ne peut se faire indépendamment du rôle que jouera l'enseignant lors de l'utilisation du jeu. Véritable accompagnateur d'un processus de développement de compétences, il veille au maintien d'une certaine synchronisation entre les apprenants et leur propose à travers des débriefings réguliers (toutes les 20 à 30 minutes) une analyse critique comparée (partage) de l'expérience vécue dans le but de la transformer en savoir positif et durable. Par exemple,

Réactik Multimédia2 (Réactik-MM) est un jeu d'entreprise multimédia reconçu à partir de Réactik, un produit CIPE (Centre International de la Pédagogie d'Entreprise). Lors du déroulement de ce jeu, quatre groupes, chacun composé de trois étudiants, découvrent, mettent en situation et s'approprient une douzaine de concepts liés à la gestion des flux et des stocks dans les entreprises. Réactik-MM est également utilisable dans le cadre de la formation continue. Le jeu enchaîne une douzaine de séquences pédagogiques interactives. Chaque séquence présente et illustre un concept, puis le scénarise en mettant les apprenants en situation de décision pour progresser dans l'amélioration des performances de leur entreprise : 4 entreprises, de production de bagages concurrents, essaient d'accéder aux marchés de 12 pays (chacun requérant des conditions d'accès différentes).

L'animateur supervise la formation qui se déroule, selon le niveau des étudiants, sur deux ou trois séances de 4 heures. Les étudiants enchaînent des phases de briefing où l'animateur explique sommairement la tâche qui les attend, des phases d'interaction avec le logiciel (de 15 mn à 1h chacune) et des phases de débriefing (de 15 à 30 mn chacune), véritables séquences de "partage" et de sédimentation des connaissances, où l'animateur fait un retour avec les étudiants sur les concepts abordés en suscitant tour à tour réflexions et questions. Ces séances de débriefing peuvent se dérouler à distance en fonction de l'éloignement des groupes d'apprenants et des outils disponibles. Une dizaine de jeux d'entreprises ont, depuis, été développées et expérimentées selon les mêmes principes.

## **2.4. Les jeux sérieux**

Au début des années 80, le jeu vidéo connaît son premier boum économique et génère presque deux fois plus de bénéfices que l'industrie du cinéma américain (Vedrashko, 2006). Ainsi, en 2003, à l'échelle mondiale, selon Louise Sauvé, le secteur des jeux vidéo représentait 18 milliards de dollars en chiffre d'affaires (Sauvé, 2007). C'est dans ce contexte qu'apparaît le jeu sérieux, ou plutôt le jeu à intention sérieuse, qui a pour principale vocation d'apprendre, d'informer, d'expérimenter, de pratiquer tout en permettant de jouer. Les champs d'application du serious game concernent de façon non exhaustive le secteur militaire, celui de la santé, de l'éducation, de la politique, de l'industrie, de la recherche, de la communication...

Selon le syndicat national du jeu vidéo (France), au niveau mondial, le secteur du jeu vidéo pèse en 2011 52 milliards d'euros. Les prévisions tablent sur une progression de ce chiffre d'affaires à 78 milliards d'euros en 2015 (Snyj, 2012).

L'avènement du serious game en tant qu'application informatique, daterait, selon Ben Sawyer<sup>7</sup> de 2002. C'est assez récent. Il est donc probable que cet objet ne soit pas encore

---

<sup>7</sup> Président de la société américaine de développement informatique Digitamill, et co-directeur du Serious Games Initiative. Institution soutenue par des fonds publics et privés dont la mission est d'étudier les affaires américaines et internationales : <http://www.wilsoncenter.org>

bien cerné et défini. Le jeu sérieux est un environnement d'apprentissage vidéo ludique dans lequel de plus en plus d'entreprises investissent pour former leur personnel dans le cadre de simulations et de reconstitutions de situations particulièrement complexes, difficiles à décrypter dans le cadre de formations dites "traditionnelles" en face à face. Ces jeux ont pour particularités de privilégier la qualité et la durée d'apprentissage : l'apprenant/joueur apprend plus rapidement et plus efficacement que si la même formation lui est dispensée par voie classique, elle vaut parfois mieux que les grands discours... !!

Ils permettent une modélisation des activités d'une entreprise tout en lui conférant une profondeur dans le champ de vision de l'organisation et une réelle objectivité dans les entretiens en face à face avec la clientèle, les bonnes attitudes à adopter, les bons gestes, les meilleures postures, etc.

Cependant, il faut distinguer entre jeux sérieux et jeux éducatifs : Les jeux éducatifs classiques sont apparus dans les années 1970-1980, s'adressent aux enfants et adolescents. Les plus classiques permettent d'améliorer la logique ou les compétences lexicales et syntaxiques. D'autres jeux se basant sur des activités de la vie de tous les jours, telles que la cuisine ou le jardinage, ont pour objectif premier de se familiariser avec un ordinateur tout en s'amusant. Alors que les jeux sérieux proposent, quant à eux une réelle formation qui ne s'adresse pas seulement aux enfants mais à une cible beaucoup plus large. La formation professionnelle est un débouché important : plutôt que de mobiliser un formateur, les chefs d'entreprise commandent des formations ciblées, sur un domaine précis de leur activité et forment ainsi leurs collaborateurs en un temps bien déterminé avec un réel résultat. La formation se termine en général par un test de connaissances qui situe très exactement l'employé dans sa progression. Cette méthode, en plein développement, est, il faut le dire, bien acceptée par des salariés de plus en plus formés à l'informatique. Ceux-ci considèrent ce type de formation comme plus moderne et ludique.

La plupart des pages web ne définissent pas le concept du serious game ou le décrivent vaguement. Communément, de nombreux sites Web considèrent les jeux sérieux comme un croisement de disciplines plutôt qu'un domaine. Selon la communauté du serious game, Michael Zyda <sup>8</sup> et Ben Sawyer ont, semble-t-il, joué un rôle majeur dans l'essor du jeu sérieux. Dans son article "*From Visual Simulation to Virtual Reality to Games*" (Zyda, 2005), Zyda propose une définition plus formelle, le divertissement est explicitement considéré comme un ingrédient :

*"Un défi cérébral, joué avec un ordinateur selon des règles spécifiques, qui utilise le divertissement en tant que valeur ajoutée pour la formation et l'entraînement dans les milieux*

---

<sup>8</sup> Directeur du laboratoire GamePipe : <http://gamepipe.usc.edu/Serious.php>

institutionnels ou privés, dans les domaines de l'éducation, de la santé, de la sécurité civile ainsi qu'à des fins de stratégie de communication."

Michael et Chen (Michael et Chen, 2006) définissent les serious games comme "des jeux dont le divertissement, le plaisir, ou la distraction n'est pas l'objectif principal". Cependant, ils précisent que cette définition n'affirme pas que les jeux sérieux ne soient pas divertissants, agréables, ou plaisants, seulement une importance majeure est consacrée au processus simulé pour la formation.

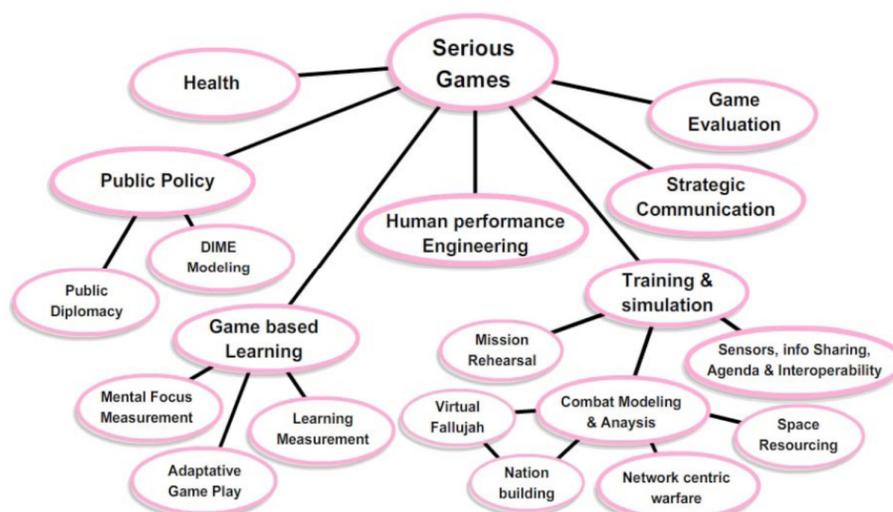
Ainsi, il nous semble que le serious game doit, dès sa conception avoir une visée qui s'écarte du divertissement.

### 2.4.1. Champs d'application des jeux sérieux

Zyda a dressé un organigramme qu'il met régulièrement à jour pour cerner les différents champs d'applications du serious game. A titre d'exemple, La figure 3 présente la version d'août 2007.

Cet organigramme recense l'utilisation des serious games dans les secteurs de l'éducation, de l'évaluation par le jeu, de la formation, de la défense, de la santé, de la simulation, de la communication, de l'ergonomie, de la sécurité civile.

Dans leur ouvrage consacré aux serious games, Michael et Chen répertorient également des applications dans les domaines de la politique, de la religion, de l'Art, de l'industrie etc.



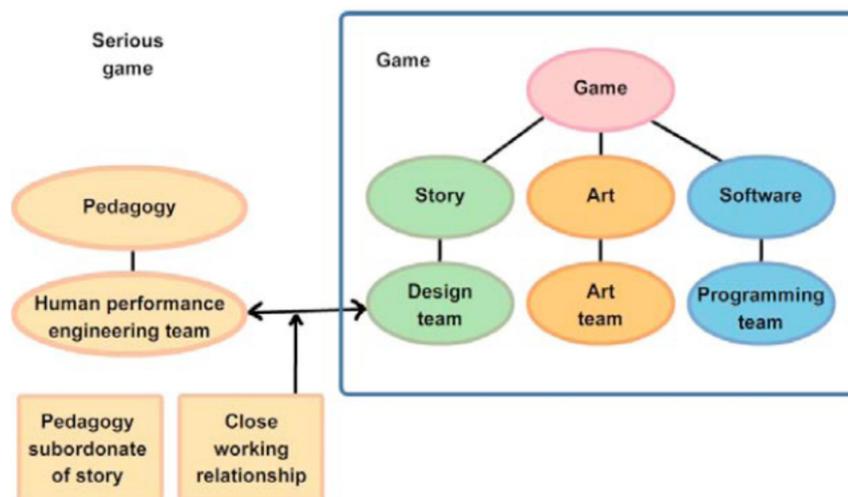
**Figure 3.** Champ d'application des serious games selon M. Zyda (Août 07)  
D'après Alvarez (Alvarez, 2007)

### Le serious game sous-tend "un scénario pédagogique"

Pour tenter de différencier le jeu vidéo du serious game d'un point de vue informatique, Zyda part du postulat qu'un jeu vidéo est défini par "l'histoire, l'art et le logiciel". Puis, il précise que les serious games intègrent en plus de ces trois composantes du jeu vidéo, une dimension pédagogique :

" Les serious games sont cependant, plus qu'une histoire, de l'art et du logiciel [...] ils impliquent la pédagogie : des activités qui éduquent ou instruisent, diffusant de ce fait de la connaissance ou de la compétence. Cet ajout rend les jeux sérieux."

La figure 4, qui reprend le schéma établi par Zyda pour illustrer ses propos, nous montre la dimension pédagogique qui vient compléter le jeu vidéo pour donner naissance à un serious game.



**Figure 4.** Schéma représentant le lien entre le jeu vidéo et la composante pédagogique en vue d'élaborer un jeu vidéo. D'après Alvarez (Alvarez, 2007)

Quoi qu'il en soit, ce "scénario pédagogique" qui entre en jeu dès la conception de l'application pour répondre à un "objectif pédagogique" semble être la composante qui spécifie le serious game, sur le plan informatique.

Avec cette approche, un serious game se distinguerait ainsi du jeu vidéo dont on détourne a posteriori le principe d'utilisation. Puisque dans ce dernier cas, il s'agit d'ajouter l'objectif pédagogique a posteriori, par une approche purement cognitive, sans implémenter de ce fait un "scénario pédagogique".

#### **2.4.2. Les avantages des jeux et des jeux sérieux.**

Une importante question se pose sur les avantages acclamés par l'utilisation des jeux sérieux. Ce que nous savons est que les jeux, les environnements simulés et les systèmes, etc., permettent aux apprenants d'expérimenter des situations qui sont impossibles dans le monde réel pour des raisons de sécurité, coût, temps, etc. (Corti, 2006) (Squire & Jenkins, 2003).

Nous savons aussi que les expériences réalisées au fil des années, montrent constamment que les jeux favorisent l'apprentissage (Szcurek, 1982, VanSickle 1986, Randel et al. 1992, cité par van Eck, 2006). Mitchell et Savill-Smith (Mitchell and Savill-Smith, 2004) discutent un certain nombre de questions concernant l'impact des jeux sur les joueurs. Des impacts négatifs possibles comprennent: les problèmes de santé (maux de tête, fatigue, les

microtraumatismes répétés, etc.), les problèmes psychosociaux (dépression, isolement social, un comportement peu positif envers la société en général, jeu accru, substitue les relations sociales, etc.), et les effets des jeux vidéo violents (comportement agressif, développement de personnalité négatif, etc.).

Quant aux impacts positifs, les jeux incitent le développement de différentes compétences, tel que discuté par Mitchell et Savill-Smith; des compétences analytiques et spatiales, stratégiques et perspicacité, d'apprentissage, aptitudes psychomotrices, attention sélective visuelle, etc. Des impacts positifs plus spécifiques ont été signalés, par Enochsson (Enochsson *et al.* 2004), qui a trouvé une corrélation positive entre l'expérience dans les jeux d'ordinateur et la performance en simulation endoscopique d'étudiants en médecine. La meilleure performance des joueurs est attribuée à leur expérience de perception en trois dimensions due aux jeux d'ordinateur. De même, en architecture et design, les jeux informatiques peuvent être utilisés comme moyens de développement des capacités en matière de modélisation spatiale et de création de formulaire (Coyne, 2003; Radford, 2000). Guy et al. (Guy et al., 2005) suggèrent de jouer avec des modèles en trois dimensions afin d'améliorer l'urbanisme d'une ville. Par ailleurs, De Lisi et Wolford (De Lisi et Wolford, 2002) rapportent sur la façon dont les aptitudes spatiales, plus précisément, la capacité de rotation mentale, peut être améliorée par les jeux tels que Tetris. D'autres avantages potentiels des jeux concernent l'amélioration de l'autocontrôle, de la reconnaissance et la résolution de problèmes, la prise de décision, une meilleure mémoire à court terme et à long terme, et l'amplification des compétences sociales telles que la collaboration, la négociation et la prise de décision collective. Par exemple, Squire et Steinkuehler (Squire et Steinkuehler, 2005) rapportent que les jeux communautaires en ligne favorisent la création collective de connaissances, et permettent la maîtrise de différents types d'information.

Mansour souligne que l'utilisation des jeux sérieux implique plusieurs avantages pédagogiques qui peuvent encourager les chercheurs et les éducateurs de se tenir derrière l'utilisation de jeux sérieux comme un outil pédagogique fort (Mansour, 2008). Ces avantages sont les suivants:

- Soutenir le développement d'un certain nombre de compétences diverses telles que la réflexion stratégique, la planification, la communication, la collaboration, la prise de décision collective, et les techniques de négociation.
- Améliorer l'acquisition des connaissances et le taux de rétention.
- Adapter l'expérience d'apprentissage en fonction des caractéristiques des apprenants et du style d'apprentissage.
- Faciliter l'apprentissage dans un contexte significatif pour le jeu.
- Favorise la formation d'équipe.

## **2.5. Bilan sur les systèmes d'enseignement assisté par ordinateur**

Dans ce chapitre nous nous sommes attachés à décrire l'évolution des systèmes d'enseignement assisté par ordinateur. De l' "Enseignement Assisté par Ordinateur" ou EAO (ex. micromondes (Papert, 1980)) ; on est passé à l' "Enseignement Intelligemment Assisté par Ordinateur" ou EIAO, avec les premiers tuteurs intelligents (SOPHIE (Brown J. Seely, 1977), ACT (Anderson, 1993)), l'accent étant alors mis sur l'introduction de techniques d'Intelligence Artificielle (IA) ; puis aux "Environnements Interactifs d'Apprentissage avec Ordinateur", l'accent étant alors mis sur l'importance fondamentale de l'interactivité des systèmes (Bruillard et al., 2000). Le terme courant utilisé aujourd'hui dans les milieux francophones est "Environnement Informatique pour l'Apprentissage Humain" ou EIAH. Tandis que dans les milieux nord-américains ou anglophones, on parle de "Systèmes Tutoriels Intelligents" (STI) pour rappeler l'importance de poursuivre la recherche sur les systèmes intelligents, modèles et architectures à des fins d'application éducatives. L'effort est interdisciplinaire et comprend des domaines tels que l'informatique, l'éducation, les sciences cognitives, les technologies éducatives, la psychologie, la linguistique et le génie, pour n'en citer que quelques-uns. L'avènement des jeux sérieux qui ont pour principale vocation d'apprendre, d'informer, d'expérimenter, de pratiquer tout en permettant de jouer a ouvert de nouvelles horizons dans le domaine de l'éducation et de l'apprentissage. De plus en plus d'entreprises investissent pour former leur personnel dans le cadre de simulations et de reconstitutions de situations particulièrement complexes permettent aux apprenants d'expérimenter des situations qui sont impossibles dans le monde réel pour des raisons de sécurité, coût, temps, etc.

Tous ces systèmes d'enseignement ont fortement contribué à promouvoir l'enseignement et en particulier l'enseignement assisté par ordinateur.

Afin de mesurer le progrès et les lacunes des apprenants, ces systèmes utilisent des techniques d'évaluation pour statuer sur le profil de ces apprenants. Le chapitre suivant introduit les formes et les pratiques d'évaluation utilisées dans ces systèmes.

## CHAPITRE III

### L'ÉVALUATION DANS LES SYSTEMES D'ENSEIGNEMENT ASSISTÉ PAR ORDINATEUR

---

Selon Hadji (Hadji, 1990) (chercheur en sciences de l'éducation), "évaluer, c'est mettre en relation des éléments issus d'un observable appelé référé et un référent pour produire de l'information éclairante sur le référé afin de prendre des décisions".

- le référent, c'est à dire les critères de qualité selon lesquels un objet sera examiné, et les compétences qu'il aura fallu mettre en œuvre pour parvenir à la construction de cet objet ;
- le référé, c'est-à-dire ce qui sera effectivement observé dans la production évaluée.

L'évaluation est la mise en relation de ce référent et de ce référé.

L'évaluation est pratiquée dans de nombreux domaines mais nous nous intéressons ici à l'évaluation des apprentissages, donc principalement à l'évaluation telle qu'elle se pratique à l'école avec les individus et les groupes. Dans l'univers scolaire, l'évaluation a principalement pour objectif de permettre aux enseignants de vérifier que leurs élèves ont acquis les connaissances utiles et nécessaires à la poursuite de cette scolarité.

L'enseignant doit transmettre un corpus de connaissances à ses élèves. L'évaluation lui permet de vérifier, de contrôler l'acquisition des connaissances par ses élèves. Généralement, cette évaluation est réalisée périodiquement, c'est le contrôle continu (Rolland et al., 2000) rencontré du premier cycle au supérieur.

Chaque contrôle permet à l'enseignant d'apprécier la performance de ses élèves et de se faire ainsi une idée de l'état de leurs connaissances. Cette appréciation se concrétise généralement par l'obtention d'une note. Les notes permettent de faire des moyennes, des moyennes de moyennes qui permettent de sélectionner l'orientation scolaire des élèves. La note est ainsi un élément crucial car elle conditionne le futur des élèves. La note est aussi un indicateur qui permet à l'élève d'adapter sa démarche d'apprentissage et lui permet de savoir si la méthodologie qu'il emploie est en accord avec ce qui est attendu par l'enseignant.

Selon les objectifs poursuivis, il existe de nombreuses manières d'évaluer d'une part les contextes dans lesquels cette évaluation a lieu, d'autre part les personnes qu'elle concerne. Ce chapitre se propose d'abord d'en énumérer quelques unes et de montrer ce qu'elles ont de commun et de spécifique et ensuite de présenter une vue non exhaustive sur les pratiques de ces différentes formes d'évaluation dans les EIAH et les jeux sérieux.

### **3.1 Les pratiques d'évaluation**

Pour mener les nécessaires évaluations (Dintilhac et al., 2005) liées à ses enseignements, l'enseignant dispose de plusieurs types d'évaluation :

- l'évaluation pronostique ;
- l'évaluation formative ;
- l'évaluation diagnostique ;
- l'évaluation sommative.

Sont absentes de cette typologie les évaluations normatives [Hadji, 1990] et critériées (Hadji, 1997). L'évaluation normative consiste à comparer les résultats d'un apprenant par rapport à ceux d'autres apprenants. En outre, nous pensons que tout type d'évaluation repose sur des critères, explicites ou non. Les évaluations normatives et critériées sont donc transversales aux cinq autres présentées ici.

#### **3.1.1. L'évaluation pronostique**

L'évaluation pronostique "fonde des décisions de sélection ou d'orientation en fonction de l'aptitude présumée à suivre un nouveau cursus, par exemple telle filière du secondaire ; elle se situe en amont d'un cursus et sous-tend un choix" (Perrenoud, 2001). L'évaluation pronostique permet d'évaluer la capacité d'un apprenant à commencer un apprentissage, un cycle d'étude ou à exercer une profession. C'est une évaluation en amont d'une réalisation ou d'un apprentissage.

#### **3.1.2 L'évaluation formative**

L'évaluation formative est une "évaluation dont l'ambition est de contribuer à la formation" (Hadji, 1990).

Dans ce contexte, elle a pour but de réguler l'enseignement. L'évaluation fournit des informations permettant à l'enseignant d'adapter son enseignement aux particularités de l'apprenant, elle entre dans le cadre d'un enseignement différencié. Comme l'explique Perrenoud (Perrenoud, 1997), "toute différenciation appelle une évaluation formative". Pédagogie différenciée et évaluation formative sont intimement liées. L'évaluation formative joue le rôle d'une "discrimination positive" qui vise à emmener chaque apprenant, en tenant compte de ses différences, à un niveau de connaissances. La pédagogie différenciée s'inscrit dans un processus égalitaire d'acquisition d'un savoir. En ce sens, cette pédagogie et l'évaluation formative qui l'accompagne ont du mal à faire leur place dans l'enseignement scolaire encore habitué à une pédagogie élitiste qui vise à sélectionner les élèves. Contrairement aux autres évaluations, l'évaluation formative ne se contente pas d'évaluer les productions des élèves mais aussi les situations actives permettant de comprendre la démarche des apprenants, leurs rapports aux savoirs, leurs capacités de métacognition, etc. (Perrenoud, 1997).

### **3.1.3 L'évaluation formatrice**

C'est une forme particulière d'évaluation formative. Selon (Bonniol, 1986), l'évaluation formative s'inscrit dans une visée de régulation de l'apprentissage par l'enseignant tandis que dans l'évaluation formatrice, la régulation est assurée par l'apprenant. En ce sens, l'activité d'auto-évaluation, qu'elle soit individuelle, mutuelle ou collective, est une évaluation formatrice. L'auto-évaluation est une "évaluation interne conduite par le sujet de sa propre action et de ce qu'elle produit. C'est un processus d'altération de son référentiel d'action au cours de confrontations entre son propre référentiel et celui ou ceux d'autrui" (Campanale, 1997).

L'auto-évaluation ne peut donc pas être contrainte, elle est tributaire du bon vouloir de l'évalué.

### **3.1.4 L'évaluation diagnostique**

L'évaluation formative s'appuie en partie sur l'évaluation diagnostique. L'évaluation diagnostique permet d'évaluer un niveau de compétence bien souvent juste avant une nouvelle phase d'apprentissage. Dans le cadre d'une évaluation formative, ce diagnostic permet la remédiation et la mise en œuvre d'une pédagogie différenciée.

La notion de compétence abordée ici est récurrente dans la littérature sur l'évaluation. Selon Chomsky (Chomsky, 1965), la compétence en linguistique désigne le système de règles intériorisées qui permet de comprendre et de produire un nombre infini de phrases inédites. Tandis que la performance désigne la manifestation de la compétence des locuteurs et réfère à la diversité des actes de langage et des contextes d'énonciation et de communication. Ainsi, la performance peut être considérée comme la mise en application, en pratique d'une compétence. C'est donc par la performance qu'on évalue la compétence de l'apprenant.

En sciences de l'éducation, une compétence est souvent vue sous l'angle d'un ensemble de savoir-faire conceptualisés (Malglaive, 1990) (Vergnaud, 1995).

### **3.1.5 L'évaluation sommative**

C'est l'évaluation par laquelle on fait un inventaire des compétences acquises, ou un bilan, après une séquence de formation d'une durée plus ou moins longue" (Hadji, 1990). L'évaluation met donc l'accent sur les performances, elle contrôle les connaissances. Elle est en opposition avec l'évaluation formative, elle ne régule pas l'apprentissage, elle le contrôle. L'évaluation sommative peut prendre la forme d'examens périodiques qui valident un apprentissage. Elle conduit à l'obtention d'une note qui sanctionne une activité d'apprentissage afin d'établir un classement, sélectionner les apprenants ou certifier leur niveau. En mettant l'accent sur les performances, l'évaluation sommative s'intéresse essentiellement aux productions réalisées par les apprenants (Campanale, 2001).

### 3.1.6 Synthèse

Dans l'enseignement, l'évaluation est un concept polymorphe. Il n'y a pas une mais des définitions de l'évaluation. Nous avons vu que l'évaluation est une activité subjective qui se doit d'être la plus objective possible. Le praticien dispose de différents types d'évaluation pour concevoir des enseignements selon ses besoins. Le tableau suivant, issu de la synthèse de (Poggi-Combaz, 2006), récapitule les évaluations existantes en termes d'objectifs (utilisation de l'évaluation) et d'insertion dans les processus d'apprentissage (à quel moment l'évaluation est menée). Dans la suite, nous essayons de positionner notre réflexion sur l'évaluation dans les systèmes d'enseignement assisté par ordinateurs au regard de cette typologie des évaluations.

**Table 1.** Synthèse sur les pratiques d'évaluation

Types d'évaluation	Pronostique	Diagnostique	Formative	Formatrice	Sommative
<b>Objectifs</b>	Prédire. Contrôler l'accès à un cycle ou une année d'étude	Informers. Evaluer un niveau de compétences.	Informers. Réguler l'activité de l'apprenant.	Informers. Permettre à l'apprenant de réguler son apprentissage	Certifier. Etablir un bilan certifié des résultats de l'apprenant
<b>Moment d'insertion</b>	Avant l'apprentissage	Juste avant un apprentissage	Pendant l'apprentissage	Pendant l'apprentissage	Après l'apprentissage

### 3.2 Pratiques d'évaluation dans les EIAH

Historiquement, les outils informatiques utilisés dans le cadre scolaire ou de la formation ont toujours intégré des moyens d'évaluer les apprenants. Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) (Tchounikine, 2002) ne dérogent pas à cette règle.

L'évaluation joue un rôle particulier en EIAH. Selon Charles Juwah (Juwah, 2003), chercheur dans le domaine des EIAH, l'évaluation doit :

- être motivante pour l'apprenant ;
- encourager une activité d'apprentissage soutenue ;
- contribuer à la progression de l'apprenant ;
- être faible en coût humain et facilement maintenable.

Son point de vue est que l'évaluation joue un rôle primordial dans l'activité pédagogique, non seulement comme le moyen de vérifier les acquisitions mais aussi comme le moyen de motiver ces apprentissages et d'inciter les élèves à progresser. C'est la volonté d'obtenir de bons résultats qui doit inciter l'élève à apprendre et c'est la satisfaction qu'il éprouve à réussir qui doit lui donner l'envie de persévérer et d'aller plus loin. L'enseignant n'est plus seulement confronté à la nécessité de comprendre ce qui fait obstacle à la réussite de ses élèves mais il

peut aussi, lorsqu'il utilise certains outils informatiques, se servir de l'évaluation comme un "moteur" pour les apprentissages (Dintilhac et Rak, 2005), l'évaluation devenant un moyen pédagogique.

En EIAH, les cinq grandes catégories d'évaluation sont rencontrées. L'évaluation sommative est la plus pratiquée, compte tenu de la facilité de sa mise en œuvre. Elle repose bien souvent sur des questionnaires à choix multiples ou fermés relativement faciles à évaluer automatiquement.

L'évaluation diagnostique a fait l'objet de recherches bien connues, avec entre autres le logiciel Casyopée (Maracci et al., 2009).

L'évaluation sommative qui a pour mission de certifier les connaissances de l'apprenant et l'évaluation diagnostique peuvent être associées. Dans la classe, l'enseignant fait souvent appel aux deux, l'évaluation diagnostique permettant à l'enseignant de réguler l'apprentissage. Certains EIAH, tels que TDmaths<sup>9</sup> essaient d'intégrer ces deux types d'évaluation.

Toujours dans un souci de régulation des apprentissages, l'évaluation formatrice est aussi rencontrée en EIAH. L'auto-évaluation (self assessment) avec le logiciel GenEval (David, 2003) et l'évaluation par pairs ou Co-évaluation (peer assessment) avec des systèmes tels que Web-SPA (Sung et al., 2005), constituent deux exemples parmi les plus connues. L'évaluation formatrice est souvent utilisée lorsque l'évaluation n'est pas automatisable (productions libres des apprenants) (Maor, 1998) (Juwah, 2003).

L'évaluation formative est présente sous l'angle de l'assistance à la régulation des activités par l'enseignant. L'objectif est alors de fournir des indicateurs à l'enseignant lui permettant de mener des évaluations formatives en relation avec une activité d'apprentissage. Ces dernières années, de nombreux systèmes de "monitoring" de l'activité pédagogique sont apparus, tels que FORMID SUIVI (Gueraud et al., 2004), GISMO (Mazza et Milani, 2005) mais aussi Aplusix (Sander et al., 2005) qui enregistre la totalité des actions des apprenants.

### **3.2.1. L'évaluation sommative et pronostique**

L'évaluation sommative est souvent menée dans des environnements d'apprentissage basés sur des banques de questionnaires à choix multiples (QCM). Chaque questionnaire est organisé en parcours et sanctionne l'apprenant par une note finale. Le test du TOEFL<sup>10</sup> qui permet d'évaluer le niveau d'anglais d'une personne étrangère est certainement le plus connu. Ce test fait partie de ce qu'on appelle les tests adaptatifs par ordinateurs ou CAT pour "Computer Adaptive Test". Ces tests permettent de certifier des connaissances de base (Biggs, 1999). Outre une évaluation sommative, un CAT peut aussi offrir une évaluation

---

<sup>9</sup> Site de TDmaths, <http://www.tdmaths.com/>

<sup>10</sup> TOEFL : <http://www.ets.org>

pronostique comme le test du GRE<sup>11</sup> qui conditionne l'accès aux formations universitaires par les bacheliers aux Etats-Unis.

Le principe de base d'un CAT est simple. Un élève se place seul devant un ordinateur et répond à une liste de questionnaires à choix multiples. Pour chaque question, si la réponse est correcte, la question suivante sera un peu plus difficile. Dans le cas contraire, la question suivante sera un peu plus facile (Auger et Séguin, 1992). Il en va ainsi tout au long du test, ce qui permet au logiciel de déterminer le niveau du candidat et de lui attribuer un score. Les systèmes de CAT s'appuient sur le modèle de la théorie de réponse aux items (Item Response Theory) (Lord, 1980). Ce modèle guide le concepteur dans la construction d'un système de CAT. Le but de ces modèles est d'optimiser la cohérence entre les scores obtenus et les réelles compétences de l'évalué.

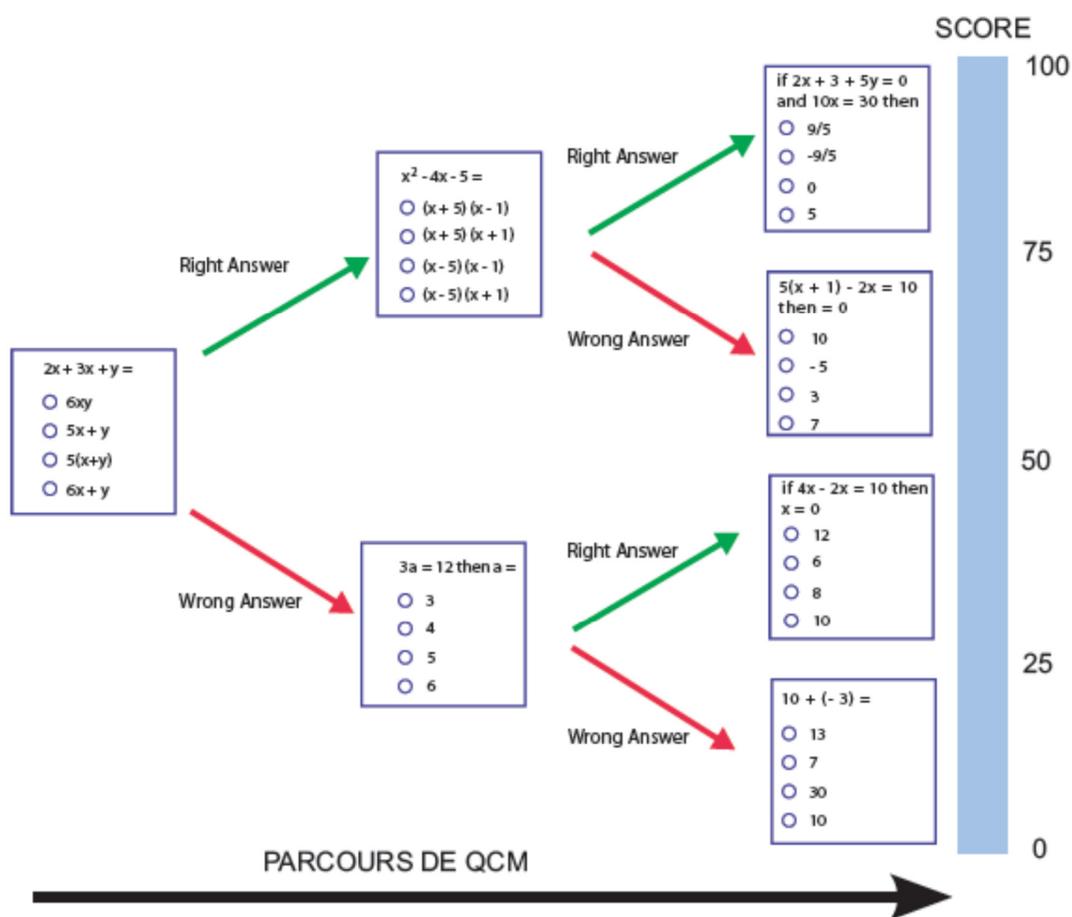


Figure 5. CAT : principe

### 3.2.2. L'évaluation diagnostique des compétences

Contrairement aux évaluations sommatives et pronostiques des CAT, les systèmes d'évaluation diagnostique ne se contentent pas de corriger les productions des apprenants

<sup>11</sup> Graduate Record Examination : <http://www.ets.org>

et de comptabiliser des points, mais proposent des diagnostics de compétences de l'apprenant. Chaque réponse de l'apprenant est alors analysée pour essayer de l'associer à une erreur envisagée par les concepteurs de l'exercice et à son origine potentielle. Le logiciel Pépité (Delozanne et Grugeon, 2004) et ses dérivés illustrent la mise en œuvre de cette évaluation diagnostique en EIAH.

Pépité est un logiciel qui a pour objectif d'aider les enseignants à diagnostiquer les compétences de leurs élèves en algèbre élémentaire. Pépité a été réalisé dans le cadre du projet pluridisciplinaire Lingot (Delozanne et al., 2003), dont l'objectif est concevoir des logiciels qui aident les enseignants à réguler les apprentissages en algèbre. Pépité est un outil logiciel composé de trois parties :

- PepiTest qui est destiné aux élèves. Il permet à ces derniers de résoudre une liste de 22 exercices constitués de questions ouvertes et fermées en algèbre ;
- PepiDiag qui est le module d'analyse des réponses. Il interprète les réponses des élèves à partir des analyses didactiques élaborées en amont du projet ;
- PepiProf qui est l'outil enseignant. Il établit le profil de chaque élève et permet de modifier les réponses apportées par les élèves dans le cas où l'enseignant les trouverait contestables.

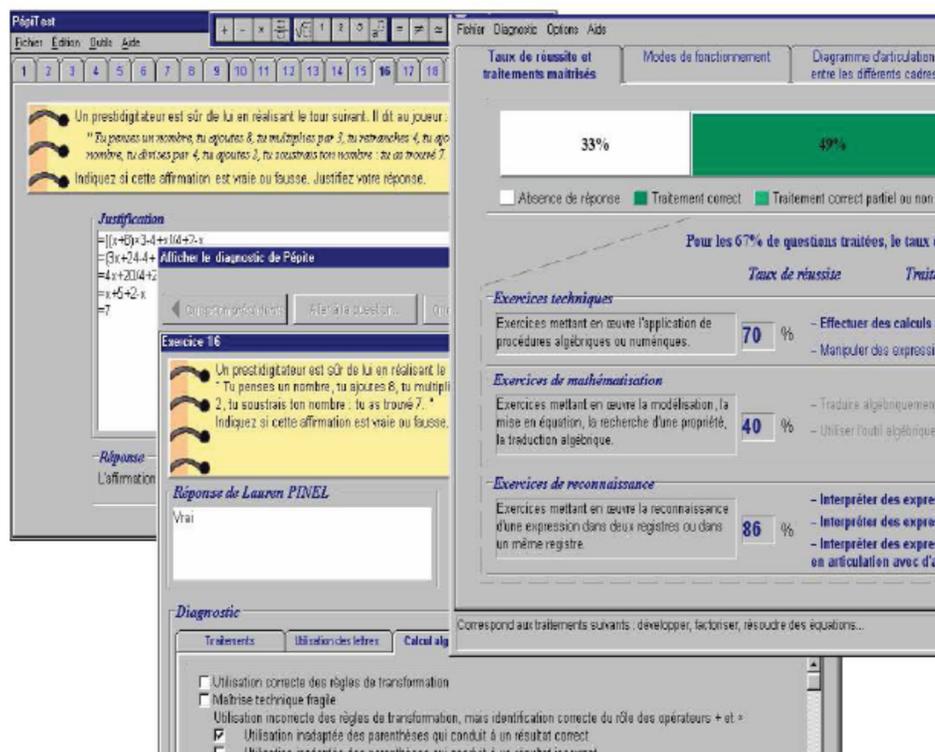


Figure 6. Pépité : de gauche à droite, les interfaces de PepiTest, PepiDiag et PepiProf

### L'évaluation dans Pépité

Pépité permet d'évaluer les compétences des apprenants en algèbre. Cette évaluation sommative et individuelle de l'apprenant est automatique. Il fournit grâce à PepiDiag une

synthèse en pourcentages d'acquisition des compétences mises en jeux par le questionnaire. L'enseignant obtient pour chaque apprenant un diagnostic composé de quatre parties :

- La partie "Taux de réussite et traitements maîtrisés" indique le taux de réussite par type d'exercice ;
- La partie "Modes de fonctionnement" détaille la manière de justifier les réponses et entre plus en détail dans la résolution des exercices. On s'attache aux compétences transversales de l'apprenant ;
- La partie "Diagramme d'articulation entre les différents cadres" représente graphiquement les modes de fonctionnement de l'apprenant ;
- La partie "Résumé du profil" propose un résumé textuel du diagnostic.

### **3.2.3. L'évaluation sommative et diagnostique**

Certains exercices commerciaux tels que TDmaths intègrent les deux types d'évaluation, sommative et diagnostique. TDmaths prend aussi en compte l'évaluation normative.

TDmaths est un exerciceur de mathématiques destiné aux élèves de niveau collège. Il équipe près de 400 collèges. TDmaths est une application client-serveur java.

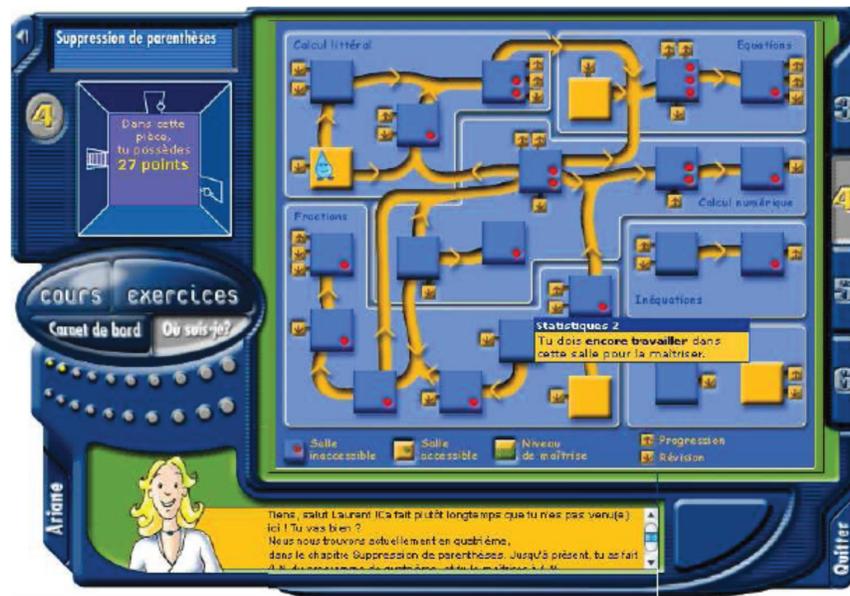
Les élèves progressent en autonomie, encouragés et guidés par leur enseignant. L'ensemble du programme d'algèbre du collège est présenté sous forme de cours synthétiques, illustrés par des exemples et structurés en chapitres. Les liens entre les chapitres dessinent la carte des mathématiques. Cette carte présente les différents parcours possibles dans le programme.

En suivant ces liens, l'élève progresse au fur et à mesure de sa maîtrise des notions, validée par ses succès aux exercices. Les exercices, de difficulté croissante, ont des énoncés aléatoires. TDmaths offre ainsi plus de 600 exercices, une grande variété de formes (QCM, saisie alphanumérique, calcul mental chronométré, représentation graphique).

#### **L'évaluation dans TDmaths**

Dans TDmaths, trois types d'évaluation sont intégrés :

- Une évaluation sommative individuelle des performances sanctionnée par des scores obtenus dans les exercices de mathématiques;
- Une évaluation diagnostique des apprenants. Les compétences transversales des apprenants sont évaluées et un diagnostic graphique est ensuite proposé à l'enseignant. Il peut alors envisager des remédiations à partir de cette évaluation. Dans ce cas, l'évaluation s'inscrit alors dans un cadre formatif ;
- Une évaluation normative des apprenants. Que ce soit au niveau des scores ou des compétences transversales, le logiciel propose de positionner les résultats de ces évaluations par rapport à la classe.



**Figure 7.** TDmaths : parcours de l'apprenant

Dans le sens où TDmaths est un outil commercial largement diffusé, il est représentatif des pratiques en EIAH. Du point de vue de l'évaluation, TDmaths est dual. D'une part, il offre une évaluation de type "testing" partagée par le plus grand nombre d'EIAH, d'autre part il introduit l'évaluation diagnostique des compétences. Celle-ci est plus souvent rencontrée dans des outils de recherche tels que Pépite. Il confirme donc l'attente des enseignants d'une évaluation fine des compétences des apprenants.

### 3.2.4. L'auto-évaluation

Dans certains cas, il peut être utile de proposer à l'apprenant de s'auto-évaluer afin de favoriser l'auto-régulation de ses apprentissages en s'insérant dans le cadre d'une évaluation formative. Le logiciel GenEval (David, 2003) propose une liste de questions, dans laquelle l'apprenant peut naviguer. Pour chaque question, l'apprenant peut bénéficier ou non d'indications pour répondre. Une fois la réponse donnée et corrigée, l'apprenant évalue sa maîtrise des compétences mises en jeu dans les questions en se donnant une note.

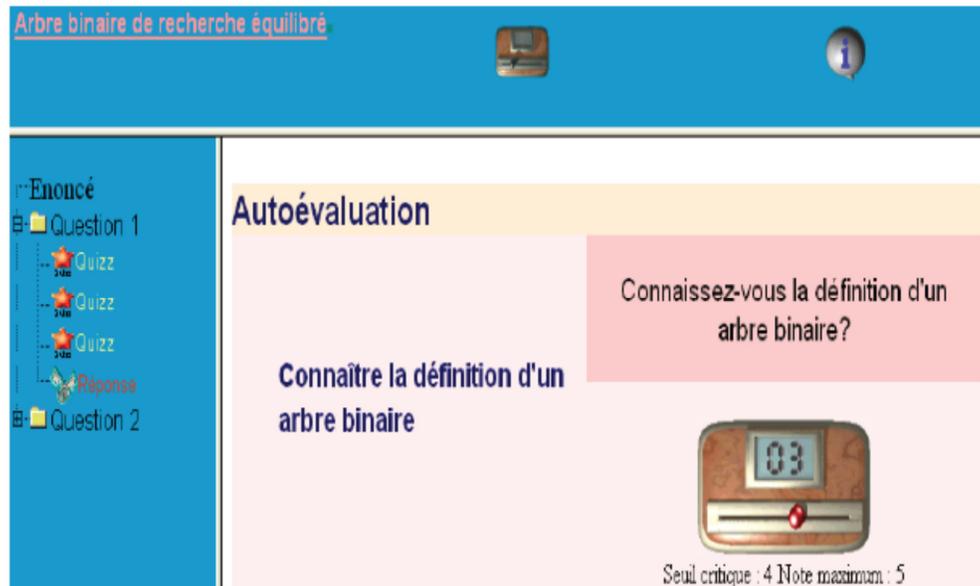
GenEval est un logiciel qui permet de générer des exercices d'auto-évaluation. Ce logiciel a été développé par le Centre d'Auto-Formation et d'Innovation Multimédia (CAFIM) dans le cadre du projet européen ARIADNE (Alliance of Remote Instructional Authoring and Distribution Networks for Europe).

GenEval propose à l'apprenant une suite de questions auxquelles il doit répondre. Il dispose dans cet exercice d'indices qu'il peut ou non utiliser pour répondre aux questions. Il répond à toutes les questions puis évalue sa maîtrise des compétences mises en jeu dans le questionnaire.

#### L'évaluation dans GenEval

Dans GenEval, deux types d'évaluation sont menés conjointement :

- Une évaluation individuelle sommative. Lorsque l'apprenant répond à une question, le système GenEval donne une correction ;
- Une auto-évaluation. L'apprenant évalue sa maîtrise des compétences. Cette évaluation favorise l'auto-régulation de ses apprentissages en s'insérant dans le cadre d'une évaluation formative (Schunk, 1990).



**Figure 8.** GenEval : phase d'auto-évaluation de l'apprenant

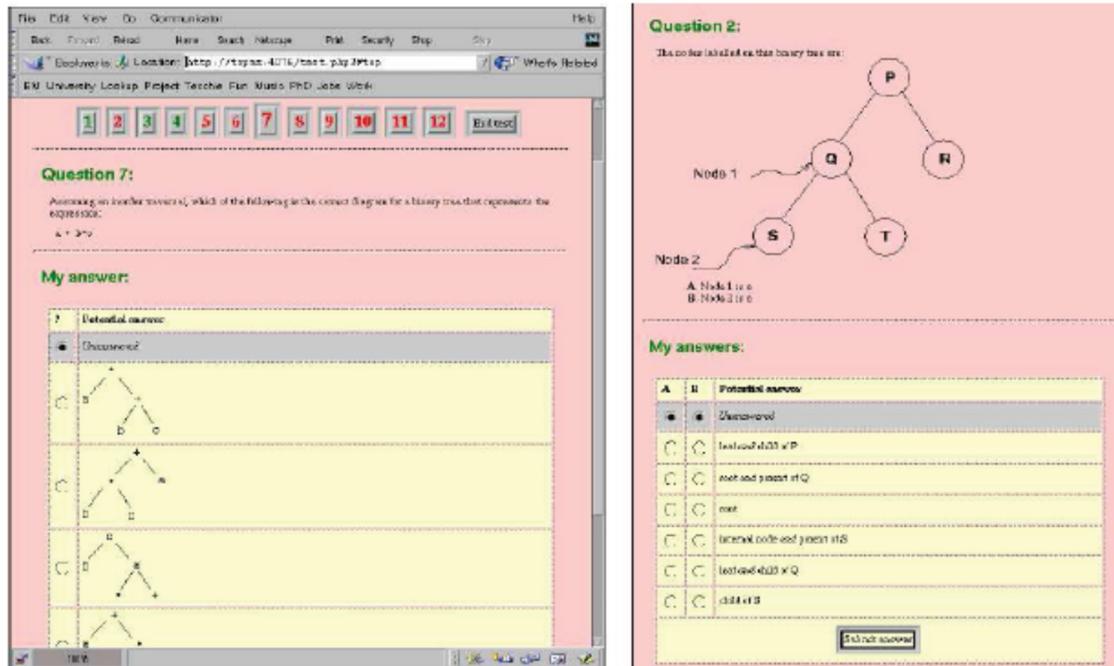
Contrairement aux autres pratiques d'évaluation, l'auto-évaluation est peu représentée. Pourtant, comme le soulignent certains psychologues (Schunk, 1990), cette évaluation s'intègre idéalement dans une logique formative de l'évaluation, en responsabilisant l'apprenant dans sa construction du savoir. C'est donc une pratique d'évaluation légitime et intéressante dans cette optique.

### 3.2.5. L'évaluation par pairs

Une des premières pratiques d'évaluation des activités collaboratives en EIAH est l'auto-évaluation par pairs (Maor, 1998). Cette évaluation peut être :

- Individuelle. Un apprenant évalue un autre apprenant (Bhalerao et Ward, 2001).
- Collective. Un groupe d'apprenants évalue un apprenant ou un groupe d'apprenants (Lai et Lan, 2006).

Le développement d'OASYS (On-line Assessment System) a débuté en 2000 et s'est terminé en 2002 avec une nouvelle version OASYS2 (Ward et al., 2004). Cet outil a été conçu par des chercheurs de l'Université de Warwick à Coventry en Angleterre. OASYS est un outil WEB d'évaluation par pairs. Il permet de créer et diffuser auprès d'apprenants des questionnaires. Les questionnaires sont composés de questions à choix multiples et de questions ouvertes.



**Figure 9.** OASYS : exemple de question fermée

Les concepteurs ont choisi l'évaluation par pairs pour évaluer les réponses aux questions ouvertes dont l'évaluation est difficilement automatisable. OASYS a été expérimenté en 2002 dans le cadre de cours en programmation.

### L'évaluation dans OASYS

Dans OASYS, chaque apprenant répond tout d'abord aux questions qui lui sont posées avant de devenir évaluateur. L'apprenant doit ensuite évaluer trois autres apprenants dont les copies lui sont automatiquement attribuées. Pour l'évaluation de chaque question, l'enseignant a préalablement défini les critères d'évaluation, c'est-à-dire les éléments sur lesquels l'apprenant va devoir se focaliser pour évaluer la réponse. Pour évaluer, l'apprenant dispose d'un questionnaire qui apprécie le respect des critères sélectionnés par l'enseignant. Dans le processus d'évaluation, l'enseignant joue le rôle de modérateur. Il est prévenu si un écart entre les différentes évaluations d'une même copie est important. La version OASYS2 intègre de nouvelles fonctionnalités. Dans la phase d'évaluation, les apprenants peuvent être groupés. Ils évaluent ensemble les réponses d'autres groupes en échangeant leurs points de vue dans un chat. A la fin du processus d'évaluation, chaque apprenant reçoit son résultat.

### 3.3 Pratiques d'évaluation dans les jeux sérieux

Les jeux sérieux immersifs offrent une approche très prometteuse pour rendre l'apprentissage plus attrayant, satisfaisant, stimulant, et probablement plus efficace. Ainsi, il n'est pas étonnant qu'à l'heure actuelle il existe une frénésie significative sur l'apprentissage à base de jeu (ABJ) (cf. Kickmeier-Rust et al. 2006).

Bon nombre des avantages potentiels de l'ABJ (ex. l'interactivité, la rétroaction, la résolution de problèmes) sont considérés comme importants pour un apprentissage réussi et efficace (Merrill 2002).

Du point de vue psychopédagogique, l'état de l'art dans l'apprentissage à base de jeu est à un stade précoce. La plupart des jeux sérieux immersifs existants sont plutôt de petits jeux et souvent simples, et se focalisent sur l'aperçu des processus et des problèmes complexes (ex., the Palestine conflict). Plus important encore, les jeux existants ne fournissent pas de méthodes d'évaluation solides et généralement il ya un déséquilibre entre l'apprentissage et les jeux. Enfin, tandis que l'intelligence dans le jeu est bien développée, les jeux éducatifs ne traitent pas l'adaptation à l'apprenant en termes de connaissances, de progrès dans l'apprentissage, de motivation, ou des préférences individuelles. Ainsi, ils ne peuvent rivaliser avec leurs homologues commerciaux et ils ne peuvent pas exploiter pleinement le potentiel des jeux immersifs en considérant l'efficacité et l'expérience de l'apprentissage.

Nous présentons dans cette section des techniques d'évaluations récentes utilisées dans les jeux sérieux. Il ne s'agit pas ici de résumer la théorie de l'évaluation, mais de poser les bases théoriques sur lesquelles s'appuient nos contributions.

### **3.3.1. Le jeu ELEKTRA**

ELEKTRA est un projet européen visant à produire un jeu d'aventure en 3D pour l'enseignement de la physique. Dans ELEKTRA, l'évaluation se déroule dans des situations de jeu intégrés et individualisés au sein desquelles les apprenants doivent accomplir des tâches adaptées et taillées liées à la physique.

Le jeu ELEKTRA offre une micro-adaptativité, il s'agit d'une évaluation par l'interprétation des comportements de l'apprenant et de l'adaptation dans les situations d'apprentissage (**SA**).

La base même de l'évaluation des compétences micro-adaptative et non-invasives interventions est un modèle formel d'interprétation du comportement (solution du problème) de l'apprenant dans des situations d'apprentissage et d'évaluation dans un jeu éducatif. A titre d'exemple, un apprenant peut être confronté à une torche, un certain nombre de stores, et un écran. La tâche de l'apprenant pourrait consister à réduire le cône de lumière de la torche en un faisceau étroit de lumière en utilisant les stores (en contribuant à la compréhension que la lumière se propage en ligne droite).

Pour obtenir un modèle formel, Kickmeier et ses coauteurs (Kickmeier et al., 2008) décrivent une telle situation de jeu et son statut actuel à un certain moment du temps par une série d'accessoires (ex. une torche, des stores et un écran) et leurs propriétés actuelles (ex. l'emplacement ou l'alignement). Pour chacun des états d'une situation un nombre d'actions admissibles peut être effectué par l'apprenant (ex. pour allumer la torche ou positionner un store). En retour, chaque action est interprétée sur son exactitude ou sa pertinence pour accomplir la tâche (ex. réduire le cône de lumière). Ces interprétations du comportement

permettent de conclure (dans un sens probabiliste) au sujet de la présence de certaines compétences et, dans certains cas, également de l'absence de certaines compétences.

ELEKTRA s'appuie sur le cadre formel de la théorie "Competence-based knowledge space Theory (CbKST)". Originnaire du tutorat personnalisé et adaptatif classique, ce cadre théorique permet de supposer des hypothèses sur la structure des compétences d'un domaine de connaissances et de lier les compétences latentes avec un comportement observable.

#### **A. Structure de compétences**

CbKST est une extension de la théorie "behavioral Knowledge Space Theory (KST, Doignon & Famagne 1985, 1999 cité dans (Kickmeier et al., 2008))" où un domaine de connaissances **Q** est caractérisé par un ensemble de problèmes ou par des items de test. L'état des connaissances d'un individu est identifié par le sous-ensemble de problèmes dont il est capable de résoudre. En raison des dépendances mutuelles entre les problèmes capturées par les relations entre pré-requis, il est impossible que tous les états potentiels des connaissances aient lieu. La collection de tous les états possibles est appelé structure de connaissance **K**. Pour tenir compte du fait qu'un problème peut avoir plusieurs pré-requis (i.e. relations de type and/or) la notion de fonction de pré-requis a été introduite. L'idée de base de CbKST est de supposer un ensemble **E** de compétences abstraites qui sous-tendent les problèmes et les objets d'apprentissage du domaine. Les relations entre les compétences et les problèmes sont établies par une *fonction de compétence*. Une telle fonction attribue une collection de sous-ensembles de compétences (i.e. états de compétence) à chaque problème, qui sont pertinents pour le résoudre et attribue les compétences nécessaires pour chaque objet d'apprentissage enseigné.

En associant les compétences aux problèmes d'un domaine, une structure de connaissance sur l'ensemble des problèmes est induite. Les compétences qui ne sont pas directement observables, peuvent être découvertes sur la base de la performance observable d'une personne. Une autre extension est de supposer des relations de pré-requis entre les compétences (quelle compétence est nécessaire pour une tierce compétence), induisant une structure des compétences sur l'ensemble des compétences (Korossy 1999 cité dans (Kickmeier et al., 2008)).

#### **B. Problème des espaces**

En outre du modèle formel de la connaissance du domaine, ses compétences, et les relations de pré-requis entre ces compétences, un modèle formel des tâches et des définitions de problèmes doivent être définis au sein d'un **SA**; ces espaces sont appelés *espaces de problème*.

Chaque **SA** est caractérisé par un ensemble d'accessoires ou d'objets (ex. une torche, des stores, et un écran) que l'apprenant peut manipuler pour atteindre un certain objectif.

Pour résoudre un certain problème, l'apprenant peut effectuer différentes actions pour modifier les objets et donc changer l'état du problème. En outre, il est supposé que tout problème peut être résolu en un nombre fini d'étapes.

l'état d'un problème est décrit par un N-tuple regroupant toutes les propriétés des objets  $(p1, \dots, pN)$ . Si  $pi = \emptyset$  alors le ième objet n'apparaît pas dans la situation du problème. Contrairement si  $pi \neq \emptyset$  alors le ième objet apparaît dans la situation du problème et peut être manipulé par l'apprenant. L'ensemble  $S$  de tous les états de problèmes est appelé l'espace de problème :  $S = P1 \times \dots \times PN$ .

La combinaison de la structure des compétences et des espaces de problème permet l'interprétation continue du comportement/actions de l'apprenant dans une **SA** en termes de compétences présentes et absentes.

### **3.3.2. Jeu de simulation des approvisionnements**

Le jeu utilisé dans cette expérience est une simulation d'un système de gestion des approvisionnements (Klassen et Willoughby, 2003), où des groupes d'étudiants passent des commandes mensuelles pour un article (en supposant que leur connaissance sur la demande est limitée), l'instructeur les informe ensuite sur la demande pour le mois considéré. Les joueurs subissent des coûts pour les articles non vendus et des coûts pour une rupture de stock. Ensuite, les étudiants procèdent à la commande du mois prochain.

Pour évaluer l'apprentissage des élèves, deux méthodes ont été utilisées: un questionnaire avant et après le jeu, et une évaluation des compétences après deux séries de jeu. Les deux méthodes permettent la mise en place d'une référence, suivie par une mesure de l'amélioration des étudiants. Pour le questionnaire, les réponses ont été évaluées, et une comparaison **paired t-test** a été calculée pour évaluer l'apprentissage.

Cette étude est déjà confirmée dans l'usage général des jeux de simulation, bien qu'elle ajoute à la littérature existante dans laquelle il existe peu sur la gestion des opérations et les jeux de systèmes d'information et de leur évaluation. En outre, cette étude comporte deux évaluations indépendantes du même jeu, deux méthodes d'évaluation différentes dans deux universités différentes.

#### **A. Description du jeu**

Ce jeu de gestion des approvisionnements est une simulation d'un détaillant d'articles de sport qui a besoin de prendre des décisions appropriées de commande pour un type de bâton de hockey. Plus précisément, les étudiants décident quand et combien de bâtons de hockey faut-il commander chaque mois pendant une année entière. Le jeu prend entre 20 et 40 minutes de temps de classe.

Pour jouer au jeu en classe, les élèves sont divisés en groupes de 3 à 6 membres chacun et sont informés des instructions. Ils sont également fournis avec quelques exemples de calculs et d'une feuille de calcul pour suivre leurs niveaux de stocks à travers le temps. Pour

commencer, les étudiants déterminent la quantité à commander pour le premier mois. Une fois que tous les groupes ont passé leurs commandes, l'instructeur informe les étudiants de la demande actuelle pour ce mois (prédéterminée de façon aléatoire, compte tenu de certains paramètres). Le tableur calcule automatiquement le bénéfice (ou les pertes) pour chaque groupe, après quoi les groupes planifient leurs provisions pour le mois prochain. Tout au long du jeu, les étudiants comparent leur profit à ceux des autres groupes et à la fin du jeu les élèves comparent leurs profits au total maximal qui aurait pu être atteint s'ils avaient su la demande a priori.

La version du jeu utilisée nécessite que les étudiants mettent en œuvre des techniques de prévision un peu différemment et suppose également que la demande suit une distribution normale (au lieu d'une distribution uniforme). Les étudiants peuvent consulter les demandes au cours des deux dernières années (pour un bâton de hockey similaire). Grâce à ces données, ils sont informés sur la façon de déterminer la moyenne et l'écart-type de la demande pour tout mois de l'année en cours, comme suit:

Demande = Normal ((D2 + (D1\*3)) / (4 \* valeur-absolue (D1-D2)) avec

D1 : la demande de ce mois pour l'année dernière et

D2 : la demande pour ce même mois deux ans auparavant.

Les auteurs notent que les étudiants n'ont pas besoin d'utiliser la formule ci-dessus, ils peuvent tout simplement utiliser leur intuition sur la base de la demande préalable. Cela permet de simplifier le jeu pour améliorer à la fois l'apprentissage et le plaisir.

## **B. Les Instruments d'évaluation**

Développer des instruments d'évaluation efficaces s'est avéré être une tâche difficile pour un certain nombre de raisons. Tout d'abord, les auteurs ont réfléchi à séparer l'apprentissage acquis à l'issue du jeu de l'apprentissage acquis à la suite d'autres techniques pédagogiques utilisées pour enseigner ce même sujet. Par ailleurs, ils ont jugé qu'il est souhaitable de déterminer le niveau de connaissance des élèves avant de jouer le jeu afin de le comparer à la connaissance acquise après le jeu. Ainsi, il n'était pas souhaitable d'avoir tout simplement un test à la fin du jeu. Afin d'obtenir une lecture précise sur le rapport avant et après test, il est préférable que les résultats avant le jeu pour chaque élève puissent être comparés aux résultats après le jeu pour le même élève.

En conséquence, deux évaluations différentes ont été utilisées à chacune des deux écoles. Le premier type d'évaluation utilise les questionnaires avant et après le jeu (similaire à la méthode utilisée par Westbrook et Braithwaite en 2001 cité dans (Klassen et Willoughby, 2003)). Ainsi, le premier questionnaire est présenté, les élèves jouent au jeu, ensuite répondent au second questionnaire - avant même que ce chapitre ne soit enseigné. Les questions étaient volontairement très simples, les auteurs ayant présupposé que les étudiants n'avaient eu aucun enseignement sur la gestion des approvisionnements.

A propos des questions posées aux questionnaires:

La question 1 était une tentative pour comprendre si les étudiants avaient compris le but de la gestion des approvisionnements, aussi bien avant qu'après le jeu. La question 2 testait s'ils avaient compris les concepts de base de l'approvisionnement, en particulier les concepts de stocks restants à partir d'une période antérieure, et de rupture de stock. Cette question était identique sur le deuxième questionnaire, sauf que des nombres différents ont été utilisés.

La troisième question concernant un test sur les coûts pertinents dans une décision de commande d'approvisionnement.

La quatrième question a été incluse afin de vérifier si la connaissance sur les décisions de commerce complexes prises en vertu de l'incertitude a été renforcée par cet exercice.

Le second questionnaire a posé deux questions supplémentaires, pour demander si les étudiants ont apprécié l'expérience. Ainsi qu'une question ouverte sur les aspects les plus importants appris par les étudiants durant cette session de jeu.

La deuxième méthode d'évaluation a été conçue pour éliminer tout biais dû au questionnaire. Il s'agissait de procéder à deux sessions de jeu, pour vérifier si le rendement des élèves sera amélioré durant la deuxième session de jeu.

Fondamentalement, la seule façon d'optimiser ces décisions de gestion des stocks serait d'utiliser la méthode de programmation dynamique de Wagner-Whitin (Silver, Pyke et Peterson, 1998 cité dans (Klassen et Willoughby, 2003)). Cependant, les étudiants sont contraints d'utiliser leur intuition plutôt que de simples formules apprises.

Pour la deuxième session du jeu, différentes structure de demande d'approvisionnement ont été utilisées. En conséquence, les profits ne peuvent être comparés directement. Ainsi, une mesure de rapprochement a été développée pour mesurer à quel point chaque équipe était proche du profit optimal possible, comme indiqué dans l'équation 2. La proximité = profit du groupe / profit optimale (2)

Cette mesure varie entre 0 et 1, plus elle est proche de 1, meilleure est la performance de l'équipe.

Dans les deux jeux, la stratégie optimale était de commander dans six des mois. Pour mesurer l'efficacité des stratégies de chaque groupe, la différence entre le nombre optimal de mois et le nombre réel de mois pendant lesquels les commandes ont été faites a été calculée (pour tous les groupes). Les différences dans la première session du jeu et les différences dans le deuxième ont été comparées statistiquement.

Les auteurs attestent que tous les résultats (sauf un) indiquent que les élèves ont appris par le jeu. Les connaissances de base sur les approvisionnements ont été testées dans les 3 premières questions du questionnaire. Deux d'entre elles ont montré une amélioration significative. Toutefois, ces 3 questions peuvent être moins importantes que le reste des résultats, sachant que le reste du questionnaire traitait en général le niveau conceptuel. La question 4 a montré que les élèves ont apprécié la complexité des questions et de prise de

décision en général. La question 5 affiche que les étudiants ont bien aimé le jeu et pensent que c'était une expérience d'apprentissage utile. La question 6 (1ère étude) et la réduction du nombre de mois pendant lesquels les commandes ont été placées (2e étude) ont démontré que de nombreux élèves ont adopté les meilleures stratégies.

En conclusion, les auteurs avancent que les jeux de simulation offrent de bonnes expériences d'apprentissage parce qu'ils stipulent les étudiants à prendre des décisions, à consulter les résultats de ces décisions, et donc à améliorer les prochaines décisions sur la base de ces résultats. La plupart des simulations impliquent une incertitude; par conséquent, ils sont des outils utiles pour familiariser les étudiants avec cet aspect de la prise de décision.

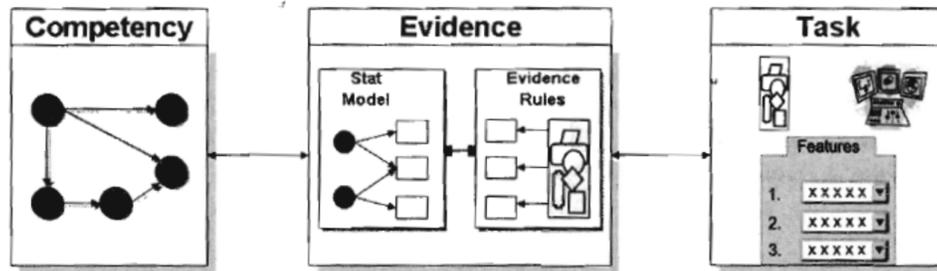
### **3.3.3. L'évaluation dissimulée dans les Jeux sérieux : cas du jeu *Oblivion***

Dans cette étude, il s'agit de combiner les jeux sérieux et l'évaluation formative intégrée (ou évaluation dissimulée) par l'utilisation de : (1) la conception à base de preuves (evidence-centered design - ECD) (Mislevy, Steinberg & Almond, 2003- cité dans (Shute et al., 2009)) et (2) les réseaux bayésiens (Pearl, 1988 cité dans (Shute et al., 2009)) afin de superviser et de soutenir l'apprentissage dans un contexte de jeu sérieux. L'approche ECD, selon les auteurs, permet d'intégrer des évaluations directement dans l'environnement de jeu, ce qui devrait faciliter la collecte discrète et l'analyse de données significatives utilisées pour améliorer l'efficacité et l'efficacité de l'expérience de jeu et d'apprentissage.

L'approche d'intégration de l'évaluation dissimulée est illustrée dans un environnement de jeu immersif assez bien connu (*The Elder Scrolls IV: Oblivion*, 2006) afin d'obtenir des preuves sur les attributs cognitifs et non cognitifs actuels et émergents. L'idée est d'utiliser les données obtenues à partir de l'évaluation dissimulée pour orienter les changements dans l'environnement de jeu dans le but de soutenir l'apprentissage et d'orienter la création des nouveaux jeux.

#### **A. La conception à base de preuve**

Un jeu qui intègre l'évaluation dissimulée doit susciter des comportements qui présentent des preuves sur les compétences et les connaissances clés, et il doit en outre fournir des interprétations sur ces preuves qui répondent à l'objectif de l'évaluation. La figure 10 montre les structures de base d'une approche à base de preuves pour la conception d'évaluation (Mislevy et al., 2003 cité dans (Shute et al., 2009)).



**Figure 10.** Les modèles de la conception d'évaluation à base de preuves.

Les variables du modèle de compétences (CM) décrivent les connaissances, les compétences et les aptitudes sur lesquelles les inférences doivent être fondées. Le modèle de l'élève est souvent utilisé pour désigner une instantiation du modèle de compétence. Les valeurs dans le modèle de l'élève expriment la croyance actuelle de l'évaluateur à propos du niveau d'un élève sur les variables du CM.

Les variables du modèle de tâche décrivent les caractéristiques des situations qui seront utilisées pour obtenir des performances. Un modèle de tâche fournit un cadre pour la caractérisation et la construction des situations avec lesquelles un apprenant interagit pour fournir des preuves sur les aspects ciblés de la connaissance.

Dans les jeux incluant une évaluation dissimulée, le modèle de l'élève accumule et représente la croyance sur les aspects ciblés de la compétence, exprimée sous forme de distributions de probabilité pour les variables du modèle de l'élève (Amande & Mislevy, 1999 cité dans (Shute et al., 2009)). Le modèle de preuves permettra d'identifier ce que l'élève entreprend pour fournir une preuve au sujet de ces compétences (Steinberg & Gitomer, 1996 cité dans (Shute et al., 2009)) et d'exprimer dans un modèle psychométrique la façon dont la preuve dépend des variables du modèle de compétence (Mislevy, 1994 cité dans (Shute et al., 2009)). Le modèle de tâche exprime des situations qui peuvent évoquer les preuves requises.

### **B. Application de l'approche ECD sur un jeu hautement Immersif**

Le but de cette étude de cas est de tester la viabilité de cette approche au sein d'un jeu immersif et d'identifier les connaissances, les compétences et les capacités qui peuvent être apprises pendant le jeu.

Cette expérience est menée sur le jeu Oblivion, le premier jeu de rôle développé en 3D. L'utilisateur peut choisir d'être l'un des nombreux personnages (par exemple, chevalier, magicien, elfe), chacun d'entre eux possède différentes forces et faiblesses. Chaque personnage a aussi (ou peut obtenir) une variété d'armes, de sorts et d'outils. L'objectif principal du jeu est de surmonter les étapes et de compléter différentes quêtes dans un massif de terres pleines de châteaux, grottes, personnages virtuels, monstres et d'animaux. Il existe de multiples mini-quêtes tout au long du jeu et la quête majeure consiste à gagner le

jeu. Les quêtes peuvent inclure la localisation d'une personne pour obtenir des informations, l'élimination d'une créature, la récupération d'un élément manquant, ou de trouver un indice pour les quêtes futures. Les compétences sur lesquelles se focalisent les auteurs sont présentées dans ce qui suit.

### **B.1 La Persistance**

Il ya beaucoup de compétences à améliorer pour un personnage dans le jeu Oblivion, et chaque amélioration de compétence est prouvée par le nombre d'actions réussies par rapport à une compétence particulière. Améliorer ces compétences nécessite de nombreuses heures de jeu, et de nombreuses heures de jeu impliquent la persistance. En éducation, il a été démontré que les attributs de la persistance et l'autodiscipline prédisent de manière significative le rendement scolaire des élèves (Duckworth & Seligman, 2005; Dweck, 1996 cités dans (Shute et al., 2009)).

### **B.2 Accomplissement de quête (Résolution de problèmes)**

Il ya plus de 100 quêtes dans Oblivion. Le principal défi dans ces quêtes est de rester en vie et de vaincre les créatures qui tentent d'éliminer le personnage. La résolution de problèmes (qui peut aller du simple au complexe) joue un rôle clé dans les quêtes puisque le joueur doit comprendre ce qu'il faut faire et comment le faire (par exemple, trouver des informations pertinentes qui donnent des indices pour mener à bien une quête en cours). En éducation, la résolution de problèmes est souvent considérée comme l'activité cognitive la plus importante dans les contextes quotidiens et professionnels ( Hiebert et al, 1996; Jonassen, 2000; Reiser, 2004 cités dans (Shute et al., 2009)). De même que pour la persistance, les auteurs pensent que l'évaluation et le soutien des compétences de résolution de problèmes sont d'une importance vitale pour améliorer le potentiel d'apprentissage des élèves à long terme.

### **B.3 Combat (attention et multitâche)**

Les scénarios de combat sont un des éléments permettant l'engagement du joueur dans le jeu. Dans *Oblivion*, le combat oblige l'utilisateur à surveiller plusieurs facteurs: son niveau de santé, le niveau de magie, de la fatigue, le plan de manœuvre de l'ennemie, le niveau de santé de l'ennemi, et le plan de fuite. Comme pour de nombreux jeux en général, et les jeux de combat en particulier, la concentration et l'attention jouent un rôle clé dans la réussite. En éducation, le rôle central de l'attention dans l'apprentissage a été clairement démontré depuis des décennies (Kruschke, 2001; Nosofsky, 1986; Trabasso & Bower, 1968 cités dans (Shute et al., 2009)).

### **C. Illustration de l'idée de l'évaluation dissimulée**

Pour illustrer l'évaluation dissimulée de l'une des compétences citées ci-dessus en utilisant l'approche ECD, les auteurs se concentrent sur l'attribut "*résolution créative de problèmes*". La résolution créative de problèmes peut être considérée comme l'agrégation de deux sous compétences (voir figure 11) : la créativité et la résolution de problèmes. La créativité est un

processus mental impliquant la génération de nouvelles idées ou concepts, ou de nouvelles associations entre des idées ou des concepts existants. La résolution de problèmes se rapporte généralement à un ordre supérieur de processus cognitifs invoqués pour évoluer d'un état initial à un état objectif. La combinaison de ces deux concepts ensemble, permet aux auteurs de définir la résolution créative de problèmes (RCP) comme le processus mental de création d'une solution à un problème. Il s'agit d'une forme particulière de résolution de problèmes dans laquelle la solution est créée de façon indépendante plutôt que apprise avec une assistance.

#### **D. Cadre conceptuel pour la résolution créative de problèmes**

Basé sur les travaux de Sternberg (Sternberg, 1999 cité dans (Shute et al., 2009)), les auteurs adoptent une notion de la RCP mesurable dans un contexte tel que défini à travers un scénario particulier ou une quête dans un jeu. En associant la créativité à la résolution de problèmes, deux attributs contribuant aux buts seront évalués : l'innovation et l'efficacité. La figure 11 montre un fragment des modèles de l'approche ECD pour cette variable RCP. Le modèle d'action reflète la modélisation dynamique des séquences d'action des élèves. Ces séquences d'action constituent la base pour l'élaboration des preuves et des inférences et peuvent être comparées à des réponses aux tâches dans les évaluations classiques. La scène est utilisée pour définir une quête particulière dans le jeu. Les différents modèles de l'approche ECD, adaptée aux jeux, sont explicités dans ce qui suit.

##### **D.1 Le modèle de compétence**

La compétence "*résolution créative de problèmes*" est composée par les capacités "*créativité*" et "*résolution de problèmes*". Dans ce modèle, l'efficacité contribue à la fois à la résolution de problèmes et à la créativité, mais l'innovation contribue seulement à la créativité. L'innovation est définie par rapport au choix des actions les moins fréquentes dans la solution des problèmes, alors que l'efficacité est définie par rapport à la quantité et la qualité des étapes suivies en vue d'une solution.

##### **D.2 Le modèle de preuve**

Le modèle de preuve définit les liens entre des observables spécifiques et leurs compétences sous-jacentes -- innovation et efficacité. Ces connexions sont représentées sous forme de tableaux de distribution dans la seine 1 du modèle de preuve dans la figure 11. En particulier, le modèle de preuve comprend : (1) les règles de notation pour extraire les observables à partir des indicateurs de jeu de l'élève se trouvant dans les fichiers journaux; (2) les observables et (3) les règles de mesure pour les preuves accumulées à partir des observables, qui sont ensuite utilisées pour mettre à jour les variables du modèle de l'apprenant. Le degré avec lequel les variables informent différemment leurs nœuds parents est représenté par un réseau Bayésien.

### D.3 Le modèle d'action

Une action représente tout ce qu'un joueur réalise dans le contexte de la résolution d'un problème particulier (contenue dans une scène), tels que traverser une rivière ou explorer une grotte. Chaque action que le joueur réalise pour résoudre un problème donné peut être caractérisée selon deux dimensions: l'innovation et l'efficacité. Une liste d'indicateurs est explicitement liée à chaque action. Ce sont ces dimensions qui peuvent être mesurées directement et sauvegardées dans le fichier journal du joueur.

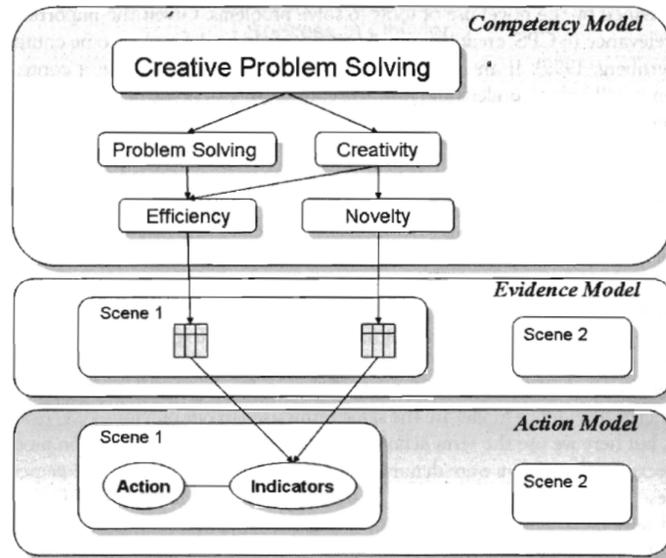


Figure 11. Les modèles ECD appliqués aux jeux (Shute et al., 2009)

### 3.4 Bilan sur les pratiques d'évaluation

Il est généralement admis que l'évaluation en EIAH améliore la détection des progrès et lacunes des apprenants suivant la rapidité et la qualité des interactions qu'ils ont avec et dans l'EIAH.

L'évaluation en EIAH est en ce sens une extension des méthodes et techniques traditionnelles d'évaluation.

En outre, nous constatons que les pratiques référencées dans les EIAH couvrent les grandes catégories classiques d'évaluation (voir section 3.1). Cependant, les pratiques d'évaluation dans les jeux sérieux ne couvrent pas toutes les catégories énoncées dans ce chapitre et se contentent d'évaluer l'apprenant ou le joueur pendant la session du jeu. Nous avons présenté dans ce chapitre trois études différentes d'évaluation des joueurs, certaines s'appuient sur un cadre formel d'une théorie et d'autre sur de simples question-réponses. Toutefois, malgré les avantages de ces modèles d'évaluation, ils n'offrent pas de possibilité d'évaluer une constellation de compétences.

Parce que nous nous intéressons à évaluer un ensemble de compétences et d'aptitudes du joueur à l'issue de ses interactions avec un jeu ou une simulation, les méthodes pour analyser la séquence des comportements pour en déduire ces capacités ne sont pas aussi évidentes. L'Évaluation distribuée est une méthode qui peut résoudre ces problèmes et permet le développement de systèmes d'apprentissage à base de jeu ou de simulation robustes et valides.

L'approche multi-agents peut être utilisée pour formaliser et simuler cette méthode. Chaque évaluateur est alors décrit comme un agent dont la tâche consiste à évaluer un type de comportement du joueur et d'en déduire ses capacités. Le chapitre suivant s'intéresse à l'approche multi-agents et la simulation participative.

# CHAPITRE IV

## SIMULATION PARTICIPATIVE & SYSTEMES MULTI-AGENT

---

Depuis quelques années, on observe le développement de jeux pour mettre les experts en situation " virtuelle " de choix stratégiques. Le jeu peut avoir différentes fonctions selon les objectifs souhaités, il peut servir d'outil de recherche ou d'apprentissage, ou pour définir des choix stratégiques. On distingue différentes catégories de jeu (Gaudé, 2003) (Piveteau, 1996). Ce sont d'une part, des jeux dont l'objet est essentiellement technique, où l'on teste à partir d'un modèle formalisé, les conséquences de situations de choix ou de cas de gestion. D'autre part, on trouve des jeux ayant une portée davantage sociale. Ces jeux relèvent de la pratique d'intervention et leurs objectifs principaux consistent à révéler les relations entre les individus.

Des jeux techniques, on peut rapprocher les jeux de simulation qui sont construits autour d'un modèle dynamique du système de référence généralement élaboré. Dans cette catégorie, on trouve principalement les jeux assistés par ordinateur dans lesquels chaque acteur peut tester des situations d'actions complexes. Ainsi, la simulation rend compte des effets qui résultent de l'interaction de nombreuses règles. Ce type de jeu offre la possibilité (i) de tenir un ou plusieurs rôles, définis par des objectifs précis et des comportements spécifiques, (ii) d'évaluer le résultat des différents choix sous une forme comptable.

Dans les jeux ayant une portée plus sociale, on peut citer les jeux de rôles (JdR). Ces jeux sont des univers virtuels, centrés sur des personnages où l'individu est l'élément de base constitutif du jeu. Le personnage du joueur ainsi que l'univers évoluent en fonction des actions de l'utilisateur.

Ceux-ci sont très employés pour comprendre les relations humaines. Dans ce cas, le matériel initial consiste généralement dans l'évocation des grandes lignes d'une situation et dans la présentation des différents personnages impliqués. A partir de là, autant le déroulement du jeu que l'interprétation des rôles sont laissés à l'initiative des participants.

Dans notre approche, nous utiliserons le jeu au sens jeu de simulation, afin d'inculquer les comportements nominaux aux acteurs impliqués dans le domaine de la lutte contre les rongeurs ravageurs de cultures.

De même, le concept d'agent est devenu très important dans le domaine de la simulation participative et plus généralement dans celui des jeux de rôles. Cependant, il existe plusieurs définitions sur le terme « agent » et « système multi-agents » mais certaines spécificités peuvent être convenues et se retrouvent plus au moins chez la plupart des chercheurs de la communauté.

Nous allons donc aborder, dans ce chapitre, des définitions et des concepts clés dans le domaine de la simulation participative et celui des systèmes multi-agents (SMA) qui nous paraissent les plus appropriés compte-tenu du point de vue que nous développons dans cette thèse. Notre objectif n'est pas, bien entendu, d'établir un état de l'art complet et rigoureux de ces notions mais plutôt d'introduire certaines spécificités qui nous seront utiles par la suite. Il s'articulera essentiellement autour de quatre sections : la première section s'attachera à présenter la simulation participative et les jeux de rôles. La deuxième s'intéressera à la présentation des thématiques agent et SMA. La troisième fera un rapide tour d'horizon sur la combinaison des simulations participatives et des SMA. Et la quatrième s'attardera plus spécifiquement sur la notion de négociation dans les SMA.

#### 4.1. La Simulation participative

Dans cette section, nous donnons une brève présentation de ce nouveau domaine de recherche qui forme une des bases de notre approche. La « simulation participative » suppose la participation des experts comme acteurs dans des JdR qui simulent un phénomène ou une situation réelle. Les trois sections qui suivent résument l'utilisation des JdR pour trois objectifs de recherche différents, la quatrième discutant des JdR entièrement médiés par ordinateur.

##### 4.1.1. Jeux de rôles pour l'entraînement

Le plus prédominant parmi les modes d'utilisation des JdR pour la recherche et dans des processus de développement est celui de l'entraînement. Il vise à placer des joueurs dans des situations réalistes afin de les entraîner à réagir à des conditions spécifiques ou à se familiariser avec les autres joueurs.

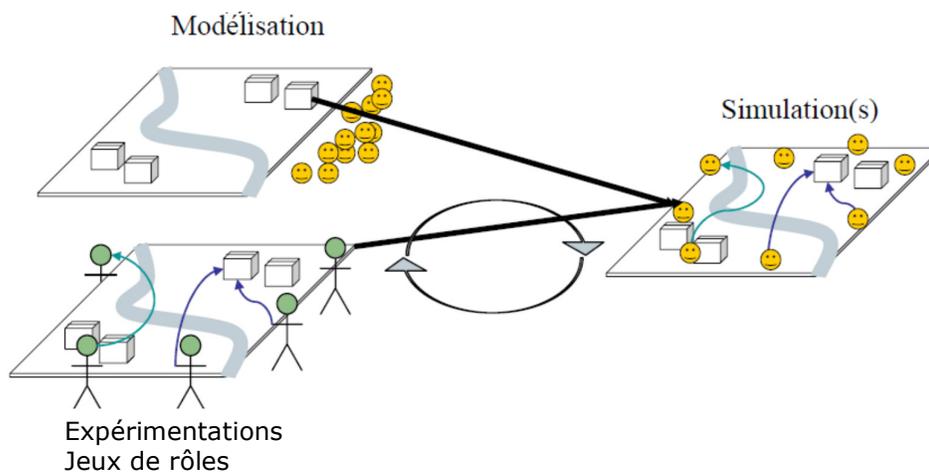


Figure 12. Simulation participative

Le jeu de (Burton 1989) est un exemple dans le domaine de la gestion de l'irrigation. Les joueurs prennent les rôles de responsable du département d'irrigation, de directeur de l'eau d'un village et de fermier. Ils doivent contrôler ensemble un système d'irrigation virtuel. Un des objectifs principaux du jeu est d'améliorer la prise de conscience de l'importance de la communication interpersonnelle dans la gestion de l'irrigation. Le jeu fournit un canal d'approvisionnement de l'eau à huit villages. Les fermiers de chaque village élisent un directeur de l'eau pour être responsable de la planification de l'emblavage et de la distribution de l'eau dans leur secteur. Ce directeur doit également communiquer avec l'officier de département d'irrigation au sujet de l'allocation de l'eau dans le canal principal aux huit villages.

Un autre type de JdR, considéré comme un outil d'entraînement pour les joueurs, vise à aider à la prévision: les joueurs sont mis dans une situation qui est comparable à celle qu'ils pourraient rencontrer dans l'avenir. Les exercices stratégiques peuvent jouer le rôle d'un paradigme pour ce genre d'outil d'entraînement (Mermet 1993) (Toth 1988). Dans de tels exercices, les joueurs tentent d'apprendre quelles décisions mettre en œuvre dans quel contexte et comment les négociations peuvent évoluer. C'est d'ailleurs le but d'utilisation des JdR dans cette thèse où les joueurs impliqués seront confrontés à des scénarios de campagne de lutte contre les rongeurs arvicoles.

#### **4.1.2. Jeux de rôles pour l'apprentissage interactif**

Les tendances actuelles dans les systèmes d'aide à la prise de décision collective s'orientent vers l'apprentissage social, avec des méthodes interactives, nécessitant des outils et plateformes spécifiques. Ces outils favorisent l'apprentissage par interactions et dialogues. Dans le jeu Stratagène (Aubert et al. 2002), visant à faciliter les négociations entre « dépositaires » dans la gestion des ressources phytogénétique, les scientifiques acquièrent des connaissances sur les processus de gestion en jouant le jeu avec les « dépositaires », ou autrement dit, en interagissant avec ces derniers dans des situations simulées.

Ces jeux, considérés comme des méthodes interactives d'apprentissage, caractérisent la configuration du groupe à partir des situations réelles. Pour les joueurs, l'apprentissage peut alors concerner comment interagir avec les autres. Par exemple, des interactions sociales complexes, comme l'établissement de consensus, peuvent être simulées par un JdR (Innes et Booher 1999) dans lequel les gens agissent comme des représentants des groupes sociaux et jouent ainsi des rôles spécifiques.

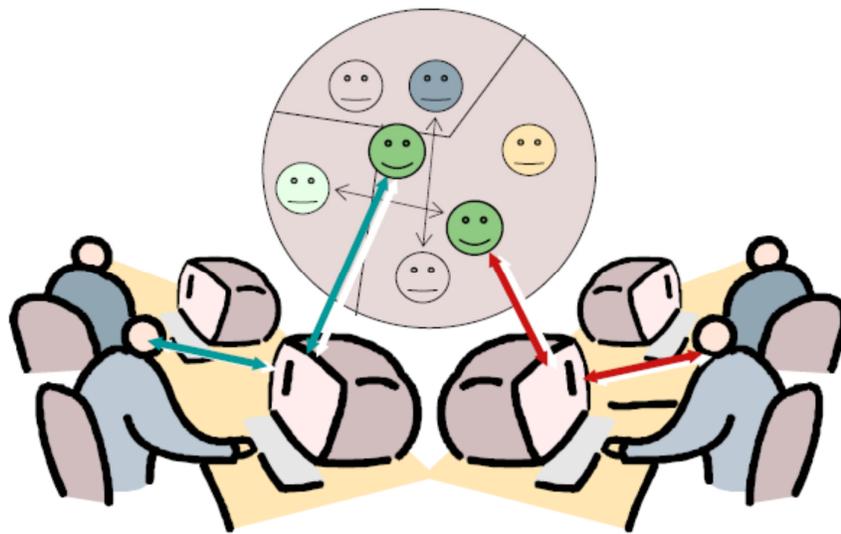
#### **4.1.3. Jeux de rôles pour l'aide à la discussion**

Certains JdR servent d'outil d'aide à la discussion, en fournissant une représentation et une simulation des scénarios des règles collectives (par exemple celles pour la gestion de ressources naturelles communes (Bousquet et al. 1999)). Ils offrent un canal additionnel de

communication entre les chercheurs, qui est, de plus, contrôlable et ouvert. En apportant une connaissance commune, ils peuvent empêcher ainsi des conflits dus à des malentendus ou à de fausses déclarations.

Concernant l'aide à la négociation, le plus important est la légitimité du contenu dans le processus de négociation. Cette légitimité est exigée dès que la première partie de la négociation commence, par le biais de la constitution d'une représentation commune du système (Funtowicz et al. 1999). Un nombre important d'échecs provient en effet de ce que le modèle utilisé dans la négociation n'est pas partagé par tous les négociateurs (Reitsma et al. 1996). Une manière de renforcer cette légitimité est d'ouvrir la boîte noire du modèle, d'en révéler le contenu et de demander aux personnes impliquées dans la négociation si les hypothèses du modèle sont assorties à leur propre représentation du système. Le modèle seul, dans certains contextes, offre peu d'intérêt si les personnes n'ont pas le temps d'en comprendre le fonctionnement. L'ouverture de la boîte noire, en utilisant les JdR, avec des négociateurs comme joueurs (Barreteau 1998), peut aider à atteindre l'objectif de rendre « réelles » des hypothèses et d'induire des discussions en se basant sur une représentation commune du système.

#### 4.1.4. Jeux de rôles informatiques



**Figure 13.** Jeux de rôles informatiques (simulation participative médiée par ordinateur)

La plupart des JdR utilisés jusqu'à présent pour la recherche n'est pas entièrement sous forme d'un logiciel, et les principaux supports utilisés sont des cartes, des tables ou des tableaux. Par contre, dans le secteur des jeux vidéo, les enfants s'habituent déjà à des JdR distribués, soit sur des réseaux d'ordinateurs soit sur Internet. Pour pouvoir utiliser les agents computationnels

comme nous l'entendons, il faut implémenter des JdR entièrement informatisés et ces jeux doivent être distribués pour faciliter, comme dans un jeu vidéo, la participation de plusieurs personnes.

Dans le cadre de l'apprentissage à la gestion de la ressource ou du territoire, un certain nombre de jeux sont déjà pratiques. A ce titre, nous détaillerons brièvement certains de ces jeux :

- **Le simulateur SHADOC** (Simulateur hydro-agricole décrivant les modes d'organisation et de coordination) a été développé par (Barreteau, 2003) afin de comprendre les liens entre les modes de coordination et les viabilités des systèmes irrigués dans la vallée du fleuve Sénégal. A partir de ce système virtuel, des expériences ont été conduites en imaginant des scénarios dans lesquels les règles collectives, les comportements individuels et les paramètres environnementaux variaient. Ce travail n'a pas pu être réalisé dans le monde réel pour des raisons éthiques et pratiques.

Un jeu de rôles a donc été développé pour tester et présenter le modèle aux différents acteurs de la zone. Ce jeu est basé sur les cartes qui décrivent le comportement possible des différents joueurs – les productions, le statut social, la prédisposition des acteurs au remboursement. Le jeu a lieu sur une demi-journée et se décompose en trois phases :

(1) présentation du jeu et des différents rôles, (2) le jeu lui-même, (3) discussion du jeu (Daré et Barreteau, 2003).

- **Le jeu de rôles SylvoPast** (Etienne, 2003) permet l'enregistrement, l'observation et l'analyse des modalités de négociation et de structuration de l'espace mises en œuvre par des joueurs essayant de mettre en place un aménagement sylvopastoral sur un massif forestier sensible aux incendies, ce modèle est fondé sur une architecture multi-agent.

Dans le jeu, on distingue deux rôles : (1) le joueur agriculteur qui peut (i) faire bouger son troupeau d'une cellule à une autre, (ii) acheter des animaux ; (2) le joueur forestier qui peut modifier la structure de sa forêt. Ce jeu a été utilisé avec des gestionnaires, des techniciens et des amateurs. Il a permis, en fonction des différents publics, (i) de créer une aide à l'apprentissage, (ii) d'identifier les stratégies d'organisation spatiales développées, (iii) d'établir une typologie des tactiques de négociation employées. Le retour au modèle multi-agent enrichit la représentation des négociations dans le modèle et facilite l'explicitation des actions et des décisions des agents.

- **L'approche SELFORMAS** (d'Aquino et al., 2003), fondée sur un modèle multi-agent, a pour objectif de tester des simulations afin d'aider les autorités locales et les personnes sous leur jurisprudence à organiser une meilleure gestion du territoire en prenant en compte les différents usages sur le territoire (agriculture, production animale, environnement ...) au Sénégal. Le jeu se déroule sur trois jours avec les acteurs locaux. Le jeu est développé conjointement avec les décideurs. Cette approche donne la possibilité (i) aux décideurs de

participer activement à la construction du système final (multi-agent), (ii) de développer une interface de dialogue entre le modélisateur, l'ordinateur et les différents acteurs. Ils peuvent ainsi interpréter les comportements et les interactions entre eux.

Ces différents jeux permettent aux participants (i) de comprendre le modèle et ainsi de comprendre les différentes simulations proposées (le plus souvent sous formes spatialisées), (ii) de discuter des résultats obtenus, (iii) d'apprendre à décider dans des circonstances de mise en situation.

## 4.2. Les agents et les systèmes multi-agents

### 4.2.1. Qu'est-ce qu'un agent?

Le nombre de définitions rencontrées pour représenter un agent ne manque pas, que ce soit dans le domaine de l'Intelligence Artificielle classique ou celui de l'Intelligence Artificielle Distribuée. En ce qui concerne l'Intelligence Artificielle classique, Newell est le premier à avoir parlé d'agent rationnel pour représenter un système (Newell, 1982). Cet agent est doté de fins - l'ensemble des buts -, de moyens physiques d'interaction avec le monde extérieur - l'ensemble des interactions - et de compétences - le corpus de connaissances - liant fins et moyens selon le principe de rationalité. Si l'on se restreint maintenant au niveau de la communauté multi-agents, parmi toutes les définitions qu'il est possible de trouver, celle de Russel et Norvig (Russell and Norvig, 1995) présente l'agent comme celui qui peut percevoir et agir sur son environnement à travers des capteurs et des effecteurs, qui sont, à priori, imparfaits. En effet, les capteurs ne donnent qu'une image partielle de l'environnement à l'agent (une image peut-être imprécise si, par exemple, un obstacle se trouve dans le champ de vision du capteur) et les effecteurs peuvent être non déterministes puisqu'il n'est pas toujours possible de prévoir leurs effets sur l'environnement. La figure 14 permet d'illustrer ces propos :

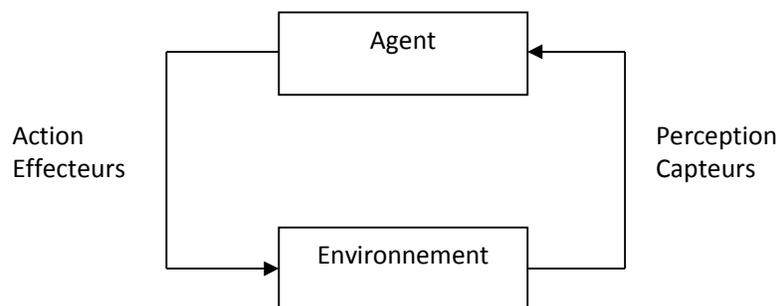


Figure 14. Représentation d'un agent selon Russel et Norvig

Cette première définition, très généraliste, permet certes, de pouvoir identifier des agents dans plusieurs domaines d'applications, mais elle ne nous fournit aucune indication sur le comportement de l'agent et ses capacités à communiquer avec le monde extérieur.

Pour répondre à ce besoin, la définition donnée par Wooldridge en 1995 (Wooldridge, 1995) introduit certains concepts clefs précisant ainsi la notion d'agent : « *An agent is a computer system that is situated in some environment, and that is capable of autonomous and flexible action in this environment in order to meet its design objectives* ».

- **L'autonomie** implique que l'agent est capable d'agir sans l'intervention d'un tiers et contrôle ses propres actions ainsi que son état interne.
- **La flexibilité** englobe les termes de capacités sociales (l'agent interagit avec d'autres agents à travers des langages de communication), de réactivité (l'agent perçoit son environnement et répond aux changements qui y surviennent), de pro-activité (l'agent n'agit pas simplement en réponse à son environnement mais énonce aussi ses objectifs en prenant des initiatives).
- Le terme **situé** indique que l'agent est capable d'agir sur son environnement à partir des entrées sensorielles qu'il reçoit de ce même environnement.

Ainsi, un agent est donc une entité physique ou virtuelle en situation dans un environnement avec lequel il interagit. Une des propriétés importantes qui apparaît dans cette définition est celle d'autonomie, puisque sans elle, l'agent se restreint à un simple objet informatique qui possède des données et propose des méthodes (Odell, 2002).

Jacques Ferber considère comme agent intelligent « toute entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi-agents, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents » (Ferber, 1995). Cette définition met l'accent sur les capacités de l'agent à interagir avec les autres agents et à s'adapter en fonction de chaque changement de situation. Bien qu'ayant certaines similitudes avec la définition de Wooldridge, la définition de Ferber permet d'évoquer la notion de représentation partielle de l'environnement qui est une propriété très utile dans un certain nombre d'applications (exemple : un agent mobile a seulement une représentation partielle du réseau Internet).

Un élément important, qui n'a pas encore été évoqué de manière explicite mais qui nous sera particulièrement précieux pour la suite de nos travaux, est la notion de conversation.

A ce sujet, Jean Sallantin (Sallantin, 1997) associe un agent à « *un système modifié par son interaction avec son environnement* ». Ainsi, un système qui a la capacité de s'auto-modifier en apprenant est appelé agent. Selon le degré d'autonomie de l'agent et selon sa forme

d'interaction avec les autres agents, il sera réactif si son comportement est réflexe, délibératif s'il peut tenter d'expliquer son raisonnement et intentionnel s'il peut planifier des actions.

A l'issue de ces différents points de vue, deux notions clés nous apparaissent primordiales lors de la construction d'un agent : l'autonomie, la capacité de communication avec un savoir faire conversationnel.

Selon Léonard Foner (Foner, 1993), on ne peut parler d'agents que pour des entités en relations entre elles, ces entités doivent être dotées de quatre caractéristiques: (i) l'autonomie, (ii) la personnalisation, (iii) la conversation et (iv) la coopération. Nous nous intéressons ici à la troisième caractéristique qui est la conversation, cette caractéristique est essentielle pour permettre à nos agents de prendre part dans un processus de négociation.

- **La conversation** : ce point est essentiel et fait toute la spécificité de la définition de Foner. Il pose que pour être considérée comme agent, une entité informatique doit posséder des capacités d'interaction avancées. Il aborde explicitement la notion d'enchaînement conversationnel et d'évolution des conversations entre deux partenaires au cours des différentes interactions. Grâce à ce critère, Foner fait remarquer qu'une boîte à vitesse automatique ou un ramasse-miettes de table ne peuvent être considérés comme des agents car il leur manque ces capacités conversationnelles.

Pourtant selon certaines définitions, un ramasse-miettes qui prend des initiatives pour rendre un environnement de travail plus efficace pourrait être qualifié d'agent.

**Architecture interne d'un agent** : Un autre aspect important lors de la construction d'un agent est la description de son architecture. Par opposition à l'architecture externe (regroupant les capteurs et effecteurs dont l'agent est doté), l'architecture interne d'un agent se compose des mécanismes qui régissent son comportement. Ce point de vue interne correspond aux étapes de perception, de raisonnement et d'action avec une mention particulière à la *décision d'action* lors de l'étape de raisonnement. Il englobe ainsi l'ensemble des mécanismes, plus ou moins complexes, produisant le comportement de l'agent.

A ce titre, une distinction classique se fait dans le domaine multi-agents entre les **agents réactifs**, réagissant de façon réflexe à leur environnement et pouvant fonctionner selon le schéma stimuli-réponses, et les **agents cognitifs**, capables de planifier sur la base d'un modèle de leur univers et pouvant faire appel à des représentations de l'environnement, des mécanismes d'apprentissage et de planification, de communication directe avec d'autres agents... La limite entre ces deux notions est, cependant, quelque peu, imprécise.

En effet, un agent construit sur un simple réseau de neurones sera considéré comme un automate à moins qu'un mécanisme d'apprentissage lui permettant de s'adapter efficacement à son environnement soit introduit. De plus, certains chercheurs affirment qu'il

est difficile de travailler avec une architecture typiquement réactive ou délibérative et suggèrent, au contraire, d'utiliser des **agents hybrides**, qui combinent les deux :

- Un sous système délibératif contenant un monde symbolique qui peut planifier, délibérer, apprendre...
- Un sous système réactif qui réagit aux évènements sans raisonnement complexe.

Nous ne développerons pas dans cette section un panorama des différentes architectures ou modèles d'agents existants, un état de l'art assez complet est disponible sur la toile sur ce sujet. Au vue des différentes caractéristiques nécessaires à nos agents, nous considérerons, par la suite, que suivant le contexte nos agents sont cognitifs ou réactifs.

**Mémoire de l'agent :** Pour terminer cette partie, nous allons évoquer rapidement la mémoire pour un agent, notion qui nous sera utile dans nos travaux. Deux principaux types de mémoire peuvent-être rencontrés : la mémoire à court terme, situation dans laquelle un agent peut choisir une action sans se souvenir de ce qu'il a fait précédemment, par opposition à la mémoire à long terme, où l'agent enregistre et mémorise les actions qu'il a fait auparavant afin de pouvoir s'en servir par la suite.

Etant donné que nous utilisons des processus de déplacement spatial, nous emploierons plutôt une forme de mémorisation à long terme puisque notre agent (représentant un rongeur) intégrera automatiquement la direction suivie à chaque nouveau déplacement dans la grille simulant la zone agricole (nous reviendrons plus en détails sur ce point dans le chapitre 7 de cette thèse).

#### **4.2.2. Qu'est-ce qu'un système multi-agents?**

Comme nous pourrions nous en douter, un agent ne constitue pas à lui seul un système multi-agents (bien que selon le principe de récursion (Demazeau, 1997), un système multi-agents peut être considéré comme un seul agent à un niveau supérieur d'abstraction, c'est à dire qu'à un niveau interne un agent peut-être un système multi-agents). Au contraire, ce système se compose de plusieurs agents en interactions les uns avec les autres. La sous-section suivante s'attache à présenter les principales définitions possibles dans ce domaine.

Le système multi-agents (Multi-Agent System en anglais) peut être défini comme étant un ensemble organisé d'agents (Briot et Demazeau, 2001). Ceci signifie que dans un système multi-agents, il existe une ou plusieurs organisations qui structurent les règles de cohabitation et de travail collectif entre les agents (définition des différents rôles, partage de ressources, dépendance entre tâches...). Les agents sont généralement situés dans un environnement contenant également des entités passives communément appelés objets. Un système multi agent est donc intrinsèquement décentralisé (Briot et Demazeau, 2001).

En 1995, une approche intégrée (l'approche « Vowels ») des systèmes multi-agents est proposée par Yves Demazeau. Elle est basée sur une décomposition en quatre parties (Demazeau, 1995) :

- **Agents A**, qui concernent les modèles ou architectures utilisées pour la partie active de l'agent, depuis un simple automate jusqu'à un système complexe à base de connaissances.
- **Environnement E**, qui sont des milieux dans lesquels évoluent les agents. Ils sont généralement spatiaux.
- **Interactions I**, qui englobent les infrastructures, les langages et les protocoles d'interactions entre agents, depuis les interactions physiques jusqu'aux interactions par actes de langage.
- **Organisation O**, qui structurent les agents en groupes, hiérarchies, relations...

De plus, cette approche est guidée par deux principes :

- **L'approche déclarative** qui peut se résumer à travers cette équation :

$SMA = Agents + Environnement + Interactions + Organisation$

- **L'approche fonctionnelle** : d'un point de vue informatique, les fonctionnalités des SMA incluent les fonctionnalités individuelles des agents enrichies des fonctionnalités qui résultent de la valeur ajoutée par le système multi-agents lui-même, parfois appelée intelligence collective. Une deuxième équation peut alors être formulée :

$Fonction(SMA) = \sum Fonctions(Agents) + FonctionCollective$

Pour Ferber, un système multi-agents doit être composé des éléments suivants (Ferber, 1995) :

- **Un environnement E**, c'est-à-dire un espace.
- **Un ensemble d'objets O**. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ils sont passifs, peuvent être perçus, détruits, créés et modifiés par les agents.
- **Un ensemble A d'agents** qui sont des objets particuliers, lesquels représentent les entités actives du système.
- **Un ensemble de relations R** qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- **Un ensemble d'opérations Op** permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer, et manipuler des objets. Cela correspond à la capacité des agents de percevoir leur environnement, de manger, etc.
- **Des opérateurs** chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification (que l'on appelle les lois de l'univers).

Cette définition donne ainsi une vision assez large de la structure d'un système multi-agents mais sous-entend la présence de tous ces éléments pour qu'un système soit considéré comme tel.

Jennings donne un sens plus général au terme système multi-agents et l'utilise pour tous types de systèmes formés de plusieurs composants autonomes qui respectent les caractéristiques suivantes (Jennings et al., 1998) :

- Chaque agent a des possibilités limitées pour résoudre un problème - il a ainsi un point de vue partiel ;
- Il n'existe pas de contrôle global du système ;

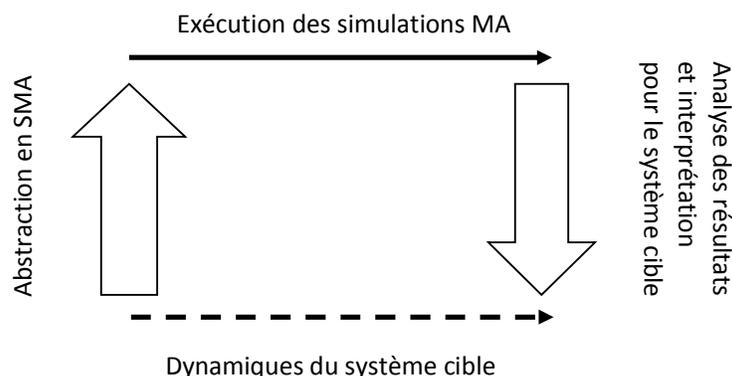
- Les données sont décentralisées ;
- Le calcul est asynchrone.

Enfin, conformément au point de vue généralement utilisé, un système multi-agents est composé de différents agents qui interagissent mais qui sont limités et différent au sein de leurs capacités sensorielles et cognitives aussi bien que dans leur connaissance de l'environnement (Weiss and Dillenbourg, 1999).

### 4.3. Simulation multi-agents

L'intelligence artificielle distribuée (IAD) est une branche de l'intelligence artificielle qui s'intéresse particulièrement à la conception de systèmes distribués, c'est-à-dire composés de plusieurs entités similaires qui sont reliées. Les propriétés qu'elle cherche à mimer sont les propriétés du système dans son ensemble, et non pas les propriétés des entités individuelles. Un des outils les plus performants de l'IAD est la simulation multi-agents. L'essence de la simulation multi-agents est une conséquence de la théorie de la complexité : *"Complexity theory shows that even if we were capable to have a complete understanding of the factors affecting individual action, this would be still insufficient to predict group or institutional behaviour"* (Casti, 1999). L'apport des systèmes multi-agents vient de leur capacité à représenter aussi bien les comportements individuels (Bensaid et al., 2001) que leur organisation collective (Tambe et al., 1995). La modélisation multi-agents peut fournir un puissant outil, là où la limite de la modélisation mono-agent apparaît (Parunak et al., 1998). La construction d'une simulation à base de SMA suit plusieurs étapes (voir figure 15) :

- Un système multi-agents est construit suivant une approche de conception (abstraction, conception et implémentation) ;
- Des simulations sont réalisées à partir du simulateur construit, suivant certaines hypothèses;
- Les résultats des simulations sont analysés (inférences) ;
- Des leçons sont à apprendre par interprétation des résultats de l'analyse. Des comportements possibles du système cible peuvent émerger, des déductions peuvent être faites à partir des hypothèses de la simulation.

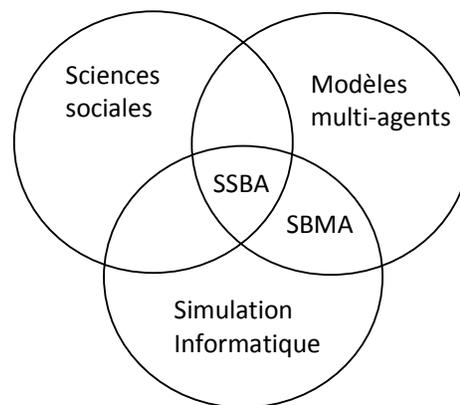


**Figure 15.** Un système multi-agents utilisé comme un modèle formel, selon Edmonds.

Nous nous intéressons dans cette thèse, particulièrement, à la simulation sociale multi-agents pour sa capacité à représenter des exemples de systèmes complexes qu'il est intéressant de mimer. Dans notre cas il s'agit de simuler le développement d'une population de rongeurs dans une zone agricole et les dégâts causés aux cultures par ces mammifères. L'observation des comportements des rongeurs permet de construire des systèmes artificiels capables de résoudre des problèmes similaires. Ces systèmes informatiques sont des systèmes multi-agents, c'est-à-dire des ensembles d'entités possédant des propriétés proches de celles des rongeurs, comme l'autonomie et la pro-activité. Notre deuxième centre d'intérêt porte sur les simulations multi-agents participatives parce qu'elles sont fondées sur la participation et la mise en situation. Il s'agit de faire participer des joueurs humains à des simulations inspirées du réel. Dans notre cas, il s'agit de faire participer les acteurs concernés par la lutte contre les rongeurs aricoles au jeu qui simule une campagne de lutte.

#### 4.3.1. Simulation sociale multi-agents

La simulation sociale à base d'agents artificiels (SSBA) se trouve à l'intersection de trois domaines distincts (Figure 16) : les sciences sociales, la simulation informatique et la modélisation multi-agents (Davidsson, 2002). La SSBA est l'utilisation de la technologie des agents pour simuler les phénomènes sociaux.



**Figure 16.** Trois composantes pour la simulation sociale basée sur des agents artificiels, selon Davidsson.

Dans le cadre d'une simulation sociale basée sur des agents artificiels, deux catégories de modèles peuvent être considérés. Le premier mode considère l'individu comme unité d'abstraction.

Ce type de modèles est généralement utilisé pour la compréhension de systèmes multi acteurs (Hamel et Pinson 2005). Les acteurs dans ce cas, peuvent représenter des humains, des robots ou des programmes. L'objectif de la simulation est de chercher à comprendre ou à évaluer l'impact des comportements individuels (niveau micro) sur le collectif (niveau macro). Par exemple, la simulation du comportement d'un consommateur (Bensaid et al.,

2001). Le deuxième mode, considère un groupe d'individus comme unité d'abstraction. L'objectif ici est d'étudier l'émergence de structures organisationnelles (Guessoum et al. (2004) ou encore l'auto-organisation (Chevrier, 2005).

L'intérêt de cette famille de simulation multi-agent dans les sciences sociales est d'étudier l'émergence de propriétés au niveau global. Deux exemples associés aux domaines de l'éthologie et de la simulation sociale sont ici présentés.

### **Manta**

Le projet MANTA, qui est né de la rencontre de deux domaines de recherches, l'éthologie et l'intelligence artificielle distribuée, a porté sur la modélisation par systèmes multi-agents d'une colonie de fourmis au cours de son évolution. Les expérimentations ont porté notamment sur sa sociogénèse, c'est à dire sur la constitution d'une colonie mature à partir d'une (ou plusieurs) reines, sur l'adaptation d'une colonie à son environnement et en particulier sur la division des tâches (polyéthisme) et la spécialisation des ouvrières, et enfin sur la polygynie (Drogoul et al.1995).

Il s'agissait en particulier de tester une hypothèse éthologique concernant l'aspect distribué de la prise de décision dans une colonie de fourmis. Le comportement des individus suffisent-ils à expliquer la génération et la stabilité des formes sociales observées (division du travail, polyéthisme d'âge, dynamique de la fondation de la société, etc ...) ? D'après cette hypothèse, en effet, l'organisation du travail dans une colonie de fourmis est le fruit d'un ensemble d'interactions et de contrôles locaux, sans qu'il soit nécessaire de faire intervenir une quelconque entité centrale de régulation, les performances adaptatives de la société étant le résultat des comportements, forcément élémentaires, de chacun de ses membres.

### **Sugarscape**

Sugarscape (Epstein et Axtell 1996) est un bon exemple d'un modèle à grande échelle qui simule une société artificielle dans laquelle les agents se déplacent sur une grille de 50x50 cellules. Chaque cellule a une quantité graduellement renouvelable de sucre de sorte que l'agent localisé sur cette cellule peut en manger. Les agents doivent consommer du sucre afin de survivre. S'ils moissonnent plus de sucre qu'ils n'en ont besoin immédiatement, ils peuvent en sauvegarder et en manger plus tard. Ils peuvent regarder vers le nord, le sud, l'est et l'ouest de leurs positions actuelles et peuvent voir à une portée qui varie aléatoirement selon la dotation génétique des agents. Les agents se déplacent pour chercher du sucre selon une seule règle: chercher la cellule inoccupée qui a le niveau de sucre disponible le plus élevé dans les limites de perception, et s'y déplacer. Si le niveau de sucre d'un agent tombe à zéro, il meurt. De nouveaux agents remplacent les morts avec une dotation initiale de sucre aléatoire.

Epstein et Axtell présentent une série d'élaborations du modèle Sugarscape afin d'illustrer divers phénomènes sociaux. Ce modèle prouve que même si les agents commencent par une distribution de sucre approximativement égalitaire, une distribution fortement biaisée se

développe bientôt: peu d'agents relativement bien dotés peuvent accumuler de plus en plus de sucre, alors que la majorité en a juste suffisamment pour survivre (ou meurt).

#### **4.3.2. Les simulations multi-agents participatives**

Ce sont des expériences menées en laboratoires ou à travers le réseau Internet, avec des participants humains et qui s'inscrivent dans une démarche multi-agents. Ces simulations sont caractérisées par deux propriétés :

- les agents (logiciels) dans ces simulations participent à la simulation comme les humains et ne sont pas des entités qui fournissent des services.
- les participants (humains) accèdent à la simulation exactement comme le font ou le feraient des agents. En d'autres termes, chaque participant est assis à un poste de travail, et toutes les interactions, conçues comme des interactions entre agents, se font par le biais de l'ordinateur.

Les trois composantes de l'expression "simulations multi-agents participatives" sont essentielles et décrivent la spécificité de ce type d'expériences. Le terme de "simulations" décrit le rapport de ces expériences avec la réalité. Les simulations multi-agents participatives ne sont pas seulement des systèmes multi-agents participatifs. Elles sont conçues pour explorer, modéliser et reproduire des phénomènes réels en les simulant. Elles conservent une distance avec à la réalité.

Le terme "multi-agents" est central dans cette expression. Les simulations multi-agents participatives constituent un type très spécifique et particulier de simulations participatives. Ce sont des expériences informatiques, conçues par des chercheurs en informatique avec, en premier lieu, des objectifs informatiques. Contrairement à d'autres expériences participatives en informatique, les simulations multi-agents participatives entretiennent un lien fort avec le domaine des agents : elles s'inscrivent dans la tradition des simulations multi-agents. Chaque participant associé à l'agent qu'il contrôle peut constituer un agent au sens informatique, avec toutes les propriétés désirées des agents dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée : un tel agent est intelligent, autonome, proactif, guidé par des buts, etc. Les simulations multi-agents participatives constituent un cadre idéal pour explorer, modéliser et reproduire des comportements collectifs sous la forme de simulations et de systèmes multi-agents.

Enfin, le qualificatif "participatif" rattache les simulations multi-agents participatives au domaine de la conception participative. Il souligne également que cette participation est prise dans toute sa dimension : ce qualificatif fait écho à la recherche action participative (Wadsworth, 1998). La participation ne se fait pas en sens unique et les simulations multi-agents participatives prennent en compte l'impact qu'elles ont sur les participants. Ce ne sont pas des expériences qui utilisent les participants, mais elles se font avec eux.

#### **4.4. La négociation dans les systèmes multi-agents**

La négociation est la principale approche utilisée pour résoudre des conflits dans un système multi-agents. Elle permet de parvenir à un accord acceptable par toutes les parties impliquées. La négociation est une activité sociale définie par Faure dans © 1996 Enciclopedia Universalis comme :

“Un processus par lequel deux ou plusieurs parties interagissent dans le but d'atteindre une position acceptable au regard de leurs divergences”.

La négociation est constituée selon Faure (Faure et al., 1998) de cinq éléments fondamentaux : acteurs, structure, stratégies processus et résultats.

Des acteurs ou parties vont chercher à satisfaire leurs objectifs par un certain jeu de pouvoir. Ce jeu est contraint par la structure de la négociation qui englobe aussi bien le contexte (conférence internationale, relations commerciales, ...) que les objets de la négociation, la divergence pouvant prendre de formes très variables, de simples interprétations différentes au conflit déclaré. Les interactions entre les parties sont dirigées par leurs stratégies et s'inscrivent dans le temps comme un processus d'échange de propositions, de contre-proposition, de concessions, ..., qui aboutit à un résultat satisfaisant, à des degrés divers, les protagonistes. La négociation présente à la fois des dimensions coopératives et des dimensions conflictuelles ; coopératives puisqu'une partie ne peut atteindre ses buts sans l'autre partie, conflictuelles du fait des divergences d'intérêts entre les parties. Selon l'importance de l'une ou de l'autre de ses dimensions on distingue deux types de négociation : coopérative et distributive.

##### **4.4.1. Les types de négociation**

Dans une négociation dite coopérative (dénommée également intégrative ou concertative), les négociateurs collaborent entre eux afin d'aboutir à un accord qui donne satisfaction à chacun. Il y a recherche de solution constructive. Dans une négociation dite distributive (dénommée également conflictuelle ou compétitive) chaque protagoniste cherche à être le gagnant de l'échange. Chacun campe sur ses positions.

En fait, dans toute négociation des phases relevant de l'un ou de l'autre type sont présentes. La négociation se distingue en cela d'une part de l'entente où chacun oublie ses intérêts propres pour construire une solution optimale du point de vue collectif, et d'autre part de l'affrontement où chaque partie cherche à imposer ses vues (Simos, 1990).

Comme le précise Putnam (Putnam and Poole, 1987), ces types de négociation vont influencer sur les messages échangés au cours de la négociation. Par exemple, l'argumentation mettra l'accent sur les positions propres de chaque interlocuteur (en trouvant des arguments en sa

faveur) dans le cas d'une négociation distributive, tandis que dans une négociation de type coopératif, le négociateur aura tendance à établir des priorités sur ses propres buts.

#### **4.4.2. Des agents capables de négocier**

Dans de nombreux cas, les agents doivent interagir afin d'atteindre leurs objectifs que ce soit parce qu'ils n'ont pas la capacité de résoudre seul leur problème ou que leurs activités présentent des interdépendances (ressources limitées, précédence, ...). Ces interactions peuvent se traduire, par la délégation d'une tâche, par la modification des plans d'un agent, ou par un accord entre les agents sur la séquence d'actions à entreprendre. La négociation est une méthode très utilisée pour coordonner et résoudre les conflits entre agents.

Pour construire des agents capables de négocier, après avoir spécifié l'objet de la négociation, il faut les doter de capacités de communication et de décision (MÜLLER, 1996). Les premières, par l'intermédiaire d'un langage de communication et de protocoles, autorisent les échanges d'informations entre agents et les structurent. Les secondes dotent les agents d'un mécanisme leur permettant de faire des propositions, d'évaluer les propositions de ses partenaires et d'en inférer des contre-propositions.

Nous disposons alors de cinq éléments constitutifs d'une négociation. Les agents représentent les acteurs de la négociation, ils disposent d'objectifs et de mécanismes leur permettant d'évaluer des propositions. La structure de la négociation est définie par l'objet de la négociation ainsi que par les relations que peuvent avoir les agents entre eux. Les protocoles d'interaction qui organisent les échanges entre les agents correspondent à la description du processus. Les mécanismes de décision définissent la stratégie d'un agent face aux alternatives que le protocole lui offre, et lui permettent d'élaborer des propositions. Enfin, les résultats peuvent également être évalués par rapport aux objectifs initiaux des agents, mais aussi du point de vue de l'efficacité du processus global pour la résolution du conflit.

#### **4.4.3. Langages et protocoles de communication pour des agents en négociation**

Dans les systèmes multi-agents, les communications constituent le principal support des interactions entre agents. Ces interactions qui prennent la forme d'échange de messages peuvent être représentées sous forme de protocoles de communication de haut niveau.

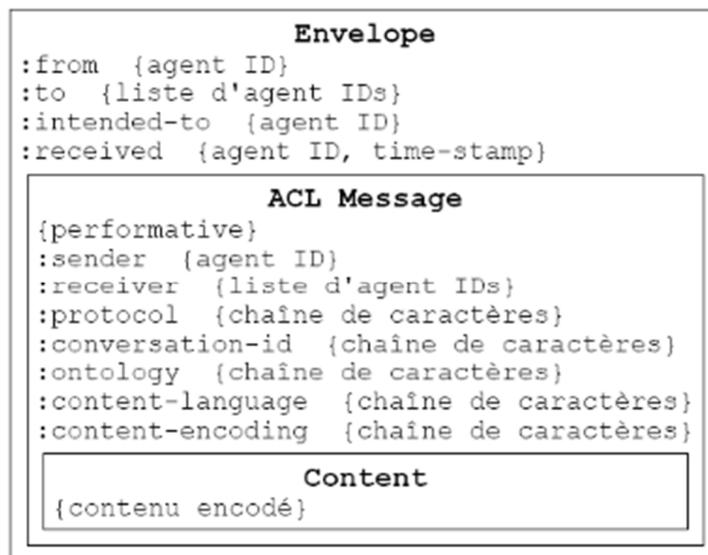
##### **4.4.3.1. Langages de communication pour la négociation**

La théorie des actes de langage a été proposée pour caractériser les communications entre agents. Cette théorie a été élaborée par Austin (Austin, 1962) et complétée par Searle (Searle, 1969). Selon cette théorie, dire quelque chose c'est effectuer une action intentionnelle, d'où le terme d'acte de langage. Un acte de langage est défini comme une

structure formée de trois composantes, (i) les actes locutoires associés à la formulation d'un énoncé, (ii) les actes illocutoires qui correspondent à la catégorisation de l'énoncé par le locuteur (question, commande, ...) et enfin, (iii) les actes perlocutoires spécifiques aux effets indirectes que la composante illocutoire peut avoir sur le récepteur.

KQML (Knowledge Query Modeling Language) (Finin et al., 1993) et ACL (Agent Communication Language) (FIPA, 1997) qui représentent les deux langages les plus utilisés dans les SMA se réfèrent à cette théorie. Chacun d'entre eux définit un acte de communication, par une structure de message composée de différents champs (voir figure 17 ) par une syntaxe de constitution de messages et par un catalogue de verbes performatifs, correspondant à un acte illocutoire, associées éventuellement à une sémantique. On a reproché à KQML son manque de sémantique et le fait que les performatifs proposés pouvaient être interprétés de différentes manières (Brassac et al., 1996). Le langage ACL proposé par la FIPA quant à lui, propose une représentation formelle des différents performatifs fondée sur les états mentaux des agents.

Pour organiser les échanges d'informations, les chercheurs en IAD ont défini des protocoles schématisant le déroulement d'une conversation. Ces protocoles structurent et caractérisent les interactions entre agents. Souvent nécessaire à la compréhension du message, leur identifiant peut être transmis, dans ACL par exemple, comme paramètre des messages.



**Figure 17.** Principaux composants d'un message ACL

#### 4.4.3.2. Description de protocole de communication

Un protocole de communication décrit une séquence de messages que deux ou plusieurs agents s'accordent à suivre pour communiquer entre eux (Cost et al., 1998). Le protocole

défini l'ensemble des règles qui régissent l'interaction. Une conversation donnée entre deux agents correspond à une instance de protocole.

Il existe de nombreux protocoles de communication dans la littérature en IAD, ils correspondent à des stratégies de résolution de problèmes définis par le concepteur du SMA sont spécifiques à une tâche particulière. Ainsi le réseau contractuel CENT (Davis and Smith, 1988), est conçu pour résoudre le problème d'allocation de tâche sur un ensemble d'agents, le protocole hiérarchique (Durfee and Montgomery, 1990) pour la coordination d'agent, le protocole MALE (Sian, 1991) pour l'apprentissage coopératif.

L'expression d'un protocole se traduit sous la forme d'une succession d'étapes élémentaires de traitement local défini au sein des agents, étapes s'intercalant entre toute réception et émission de message. Chacune des étapes est représentée par un état. Une interaction provoquant le passage d'une étape à une autre est représentée par une transition. Les états sont regroupés en protocoles permettant d'exprimer des enchainements relatifs à un type de comportement de communication dans le système.

Les diagrammes états-transitions sont souvent utilisés pour représenter le protocole de communication entre agents. Ils peuvent être utilisés soit pour décrire les changements d'états de la conversation, soit pour représenter les changements d'états de chacun des agents impliqués dans la conversation, on parle alors de protocole de rôles.

#### **4.4.4. Mécanismes de décision des agents en négociation**

La prise de décision rationnel le consiste à choisir parmi un ensemble d'alternatives celle qui coïncide avec les préférences et les croyances d'un décideur. Elle suppose qu'un individu dispose d'informations complètes, qu'il soit capable de classer toutes les actions possibles selon un ordre stricte et qu'il soit également capable d'en évaluer toutes les conséquences. Le choix rationnel se traduit en économie comme une optimisation d'une fonction d'utilité attendue. Le principe de rationalité relative ou limitée revient sur ces hypothèses jugées trop restrictives, il ne suppose plus que l'individu fasse le meilleur choix possible du point de vue d'un observateur extérieur. L'individu agit en fonction de ce qu'il lui paraît être son intérêt compte tenu des fins qu'il poursuit. La théorie du choix rationnel et les modèles mathématiques qui la mettent en œuvre constituent une des bases de la modélisation des comportements d'agents non-coopératifs. Ces agents sont dotés d'objectifs, de croyances et de capacités différentes, ils privilégient leur intérêt propre. Dans notre problématique où les agents représentent les évaluateurs, ce type d'agent est approprié. Comme le précise Wellman (Wellman, 1999), le fait que nous ayons affaire à des agents non-coopératifs ne signifie pas qu'ils ne puissent pas coopérer, mais seulement qu'ils coopèrent quant ils trouvent leur intérêt. Nous présenterons ci-après des modèles informatiques de négociation fondés sur des approches économiques.

#### **4.4.4.1. Le système Persuader**

Sycara (Sycara, 1989) propose un modèle de négociation entre trois agents : le syndicat, une entreprise et un médiateur. Le médiateur échange des arguments alternativement avec chacune des parties, de façon à modifier les croyances des agents.

Chaque agent dispose d'un modèle privé d'utilité multi-attributs lui permettant de calculer la valeur d'une proposition. Il peut utiliser sa mémoire des négociations passées pour rechercher des cas similaires selon les techniques du Case Base Reasoning.

Persuader est un système intéressant par la mise en place d'une mémoire de l'agent négociateur, qui va pouvoir utiliser son expérience passée pour résoudre le conflit actuel.

#### **4.4.4.2. Approches orientées marché**

Les mécanismes de marché ont été utilisés pour l'allocation de ressources ou la répartition des tâches dans un système distribué. Dans les systèmes de marché les agents interagissent à travers une échelle commune de valeur : les prix (Wellman, 1998). Le monde est divisé en producteurs et consommateurs. Les consommateurs sont caractérisés par une fonction d'utilité qui spécifie leurs préférences par rapport à un ensemble de produits et à un budget. Ils vont échanger des produits en fonction des prix du marché en cherchant à maximiser leur fonction d'utilité. Les producteurs, quant à eux, transforment les produits et cherchent à maximiser leurs bénéfices.

Dans le système WALLRAS de Wellman (Wellman, 1998) une vente aux enchères est réalisée pour chaque produit. Les agents peuvent ainsi obtenir un produit en faisant des enchères pour tout produit souhaité. Dans une enchère, l'agent donne le prix et quantité du produit qu'il veut acheter ou vendre. Le marché est en équilibre quand la quantité demandée du produit est compensée par la quantité fournie.

Ce mécanisme qui met en jeu  $N$  agents et  $N$  biens, repose sur l'hypothèse de substituabilité des biens qui sont tous caractérisés par un prix, soit une échelle commune de valeurs.

#### **4.4.4.3. Travaux de Farantin**

Les travaux de Farantin, Sierra et Jennings (Farantin et al., 1999) s'intéressent à la négociation commerciale de contrat portant sur plusieurs points entre client et fournisseur. Comme Sycara dans Persuader ils utilisent la théorie de l'utilité multi-attributs.

Ainsi le score d'un contrat est donné par la moyenne pondérée des utilités de chacun des éléments du contrat. Soit  $j$  un élément du contrat, le score accordé par l'agent  $i$  est représenté par :

$$V_j^i : [min_j, max_j] \rightarrow [0,1]$$

Le score du contrat comprend N éléments est alors :

$$V^i(x) = \sum_{1 \leq j \leq n} W_j^i V_j^i(x_j)$$

Avec

$$\sum_{1 \leq j \leq n} W_j^i = 1$$

La stratégie de négociation repose sur le principe de substituabilité entre critères (les éléments du contrat), l'agent diminue ses prétentions sur un (ou des) élément(s) du contrat, mais en contre partie les augmente sur d'autres éléments. Ainsi, l'agent va calculer une courbe d'indifférence, c'est-à-dire les valeurs des critères qui lui permettent de conserver le score de sa première proposition. Pour générer une contre-proposition il choisira parmi l'ensemble de ces valeurs celles qui sont le plus « similaires » à la proposition de l'opposant.

Ils explorent également les stratégies de négociation consistant à modifier l'ensemble des éléments sur lesquels porte le contrat par ajout ou élimination de certains d'entre eux.

Les travaux de Farantin proposent un modèle complet de négociation de contrat entre deux agents. Ils définissent, en effet le protocole, les messages échangés ainsi que les stratégies des agents impliqués.

#### **4.5. Bilan sur la simulation multi-agents participative et la négociation**

Dans ce chapitre nous avons d'abord décrit la simulation participative et les différents usages des jeux de rôles, ensuite nous avons présenté brièvement les agents et les systèmes multi-agents. La combinaison des simulations participatives et des SMA constitue un cadre idéal pour explorer, modéliser et reproduire des comportements collectifs sous la forme de simulations et de systèmes multi-agents. Elles sont conçues pour explorer, modéliser et reproduire des phénomènes réels en les simulant. Dans notre cas, il s'agit de simuler une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de cultures en faisant participer les acteurs principaux de cette campagne dans une simulation de scénario réel. Le but de cette simulation est l'apprentissage des acteurs (amélioration des comportements dans des situations critiques de lutte). Dans nos travaux, l'intérêt de l'usage de la technologie des agents dans la simulation sociale est d'étudier l'émergence de propriétés au niveau global. Nous nous intéressons, d'une part, au développement de la population des rongeurs en se basant sur les taux de reproduction et de mortalité et d'autre part aux dégâts causés aux cultures par ces mammifères.

Dans la partie négociation, nous nous sommes attachés à décrire la modélisation de la négociation au sein d'un SMA. Cette modélisation revêt deux aspects principaux, la description des interactions et la formalisation des mécanismes de décision.

Les protocoles de négociation modélisent les échanges d'informations entre agents en spécifiant les accords possibles et les séquences d'offres et de contre-offres autorisées.

Les approches économiques des SMA proposent des modèles de décision, permettant à un agent de faire et d'évaluer une proposition. Si ces approches reposent sur des hypothèses discutables pour analyser le comportement humain (rationalité, préférences, ...), elles semblent bien adaptées à la représentation des interactions entre agents artificiels. Ces derniers sont en effet dotés, de comportements visant à satisfaire leurs buts, et de mesures explicites de leurs préférences. Dans le processus de négociation que nous proposons, l'objet de négociation consiste en la validité de la session de jeu pour un joueur. La prise de décision des agents suit une approche d'utilité maximum.

## Conclusion sur l'état de l'art

Il est connu que les productions agricoles subissent chaque année des dégradations estimées à 30% de la production, dues aux maladies et aux ravageurs des cultures. Mais, ce sont surtout les fléaux des cultures qui causent les dégâts les plus spectaculaires. Les rongeurs champêtres dénommés encore rongeurs arvicoles. Parmi les nombreuses espèces qui se nourrissent en Algérie de produits végétaux, c'est la mérione qui constitue pour l'agriculteur une contrainte sérieuse à la productivité et aux rendements agricoles.

L'accès à l'information et la connaissance est depuis longtemps considéré comme élément clé du développement de l'agriculture. Bien qu'une quantité considérable et en progression permanente d'information concernant le domaine de l'agriculture est disponible sur Internet, on constate encore un manque de formation en ligne. L'enjeu, cependant, est de définir les moyens de formation à utiliser pour fournir la connaissance aux communautés rurales et aux agriculteurs. En dépit de tous les systèmes de communication de l'information utilisés actuellement, le service de formation par la pratique fournit par les professionnels qualifiés reste de loin la méthode la plus efficace pour aider les agriculteurs à adopter de nouveaux systèmes de gestion afin d'exploiter les nouvelles informations et ceci grâce à la technologie qu'offrent les systèmes d'enseignement.

Dès leur apparition, la vocation des systèmes d'Enseignement Assisté par Ordinateur (EAO) est de faciliter et d'optimiser la transmission d'information tout en diminuant le coût financier et humain de la formation. Ils ont pour objectif de donner à l'utilisateur un certain regard sur un domaine particulier et de créer chez lui les dispositions nécessaires à la compréhension et à l'assimilation des informations diffusées.

Dans le but de mesurer avec précision les progrès et les lacunes des apprenants, nous nous intéressons dans cette thèse, entre autre, à modéliser le comportement de l'apprenant dans le domaine de la lutte contre les rongeurs arvicoles et à développer un mécanisme d'évaluation nous permettant de juger avec précision le comportement de chaque acteur impliqué dans cette campagne de lutte.

La simulation multi-agents participative constitue une réponse à la volonté d'explorer, de former et reproduire des comportements collectifs sous la forme de simulations et de systèmes multi-agents. Contrairement à d'autres expériences participatives en informatique, les simulations multi-agents participatives entretiennent un lien fort avec le domaine des agents : elles s'inscrivent dans la tradition des simulations multi-agents. Chaque participant associé à l'agent qu'il contrôle peut constituer un agent au sens informatique, avec toutes les propriétés désirées des agents dans le domaine de l'intelligence artificielle distribuée : un tel agent est intelligent, autonome, proactif, guidé par des buts, etc.

Les SMA proposent des modèles de négociation et de coopération pour coordonner les actions des agents. La négociation est une méthode très utilisée pour coordonner et

résoudre les conflits entre agents. Pour construire des agents capables de négocier, après avoir spécifié l'objet de la négociation, il faut les doter de capacités de communication et de décision. Les premières, par l'intermédiaire d'un langage de communication et de protocoles, autorisent les échanges d'informations entre agents et les structurent. Les secondes dotent les agents d'un mécanisme leur permettant de faire des propositions, d'évaluer les propositions de ses partenaires et d'en inférer des contre-propositions.

Dans cette thèse nous nous sommes inspirés de l'évaluation utilisée dans les systèmes éducatifs et qui consiste à impliquer les professeurs dans un processus de négociation pour valider l'admission des élèves en classe supérieure. Nous proposons de définir et de réaliser un SMA où chaque agent soit responsable de l'évaluation d'une compétence de l'apprenant et dont l'évaluation globale est soumise à une négociation de ces agents évaluateurs.

# CHAPITRE V

## Description du Problème Etudié

---

La wilaya de Tiaret est une région agropastorale dont la production du blé présente un important enjeu économique au niveau national. Seulement, cette production est souvent menacée par les fléaux agricoles qui provoquent des pertes conséquentes chaque année malgré les campagnes de lutte organisées par le service de la protection des végétaux. Rappelons que notre recherche vise à mettre en œuvre un environnement de formation afin d'aider les acteurs impliqués dans la campagne de lutte à mieux gérer et conduire cette campagne.

Dans ce chapitre nous allons présenter le problème rencontré dans la procédure de lutte contre les rongeurs arvicoles. Tout d'abord nous présentons les phases composant une campagne de lutte, ensuite nous apportons la preuve du dysfonctionnement de la procédure de lutte et présentons l'historique des infestations sur une période de cinq années. Afin de bien comprendre le rôle de chaque acteur dans la campagne de lutte, un scénario de jeu sera présenté où tous les actions entreprises par les acteurs seront signalées. Finalement, nous présentons le métamodèle qui décrit les concepts et les liens entre ces concepts de notre environnement de formation ainsi que l'approche des micro jeux adoptée dans le développement de notre environnement.

### **5.1. Présentation de la campagne de lutte**

La collecte d'informations de notre étude s'est déroulée au service de la protection des végétaux, attaché à la Direction des Services Agricoles de la wilaya de Tiaret (DSA). Dans cette présentation, nous focalisons d'abord sur la mission générale de ce service ensuite nous décrivons les différentes phases d'une campagne de lutte.

L'activité de ce service consiste en deux missions :

- Mission de contrôle.
- Mission de protection des végétaux.

#### **La Mission de contrôle**

Elle consiste à contrôler la qualité des semences. Un premier contrôle s'effectue en période d'automne pendant les labours. Des échantillons sont pris, par une brigade de contrôle, et analysés au laboratoire pour vérifier si la semence est traitée et si elle répond aux normes. Les analyses permettent de dire si un seuil de tolérance n'est pas dépassé. Si c'est le cas, la

semence est bloquée et le périmètre semé est Célé définitivement. Si les analyses sont satisfaisantes, la semence est autorisée à continuer.

Le deuxième contrôle s'effectue pendant la période de collecte de la semence et consiste à vérifier si les céréales sont punaisées (présence de punaises) ou échaudées (graines maigres sous l'effet du siroco).

### **La mission de protection des végétaux**

Cette mission est la plus importante du service, elle nécessite un contrôle périodique durant toute l'année.

A chaque période de l'année, le service de protection des végétaux fait face à un fléau qui menace la semence vu que la région est une région agricole spécialisée dans la culture des céréales (blé tendre et blé dur).

Quatre fléaux identifiés menacent l'agriculture locale à savoir :

- Les rongeurs arvicoles
- Le moineau espagnol
- Le criquet Pellerin
- La punaise des céréales

La protection des végétaux se déroule en trois (03) phases :

- 1- Phase de prospection
- 2- Phase de lutte
- 3- Phase d'observation et d'évaluation

Ces phases sont identiques pour les quatre types de fléaux, mais chacun d'eux possède des spécificités auxquels font face différemment les agents du service de protection des végétaux. Nous nous intéressons dans cette étude à la lutte contre les rongeurs ravageurs de cultures.

La section suivante présente les trois phases qui composent une campagne de lutte.

#### **1- la phase de prospection**

Cette phase se déroule durant la période (septembre / octobre) qui correspond à la période de disette (hibernation) du rongeur arvicole (rongeur spécifique aux grains).

Le réseau de surveillance chargé de la collecte d'information sur le terrain, procède à des prospections suite aux informations données par les agriculteurs ou sur des sites connus par les prospecteurs pour abriter des foyers des rongeurs.

Le rôle du réseau de surveillance est de :

- Collecter les informations sur le terrain
- Evaluer la situation
- Suivi des traitements.

Suivant le nombre de terriers découverts, la phase de lutte sera déclenchée ou non :

- 1 terrier par Hectare : la lutte n'est pas nécessaire.
- 2 à 3 terriers par Hectare : la lutte est utile.
- 4 et plus : la lutte est urgente et obligatoire.

Dans le cas où la lutte serait nécessaire, les prospecteurs doivent fournir les informations suivantes au service de protection des végétaux :

- le nombre présumé de rongeurs par région
- zones infestées
- évaluation de la superficie infestée

Pour fournir ces informations les équipes de prospection se basent sur la donnée d'un couple par terrier en général et chaque couple donne un portée de 5 à 7 petits.

A la base de ces données, le service de protection des végétaux calcule et planifie la quantité de raticide à utiliser dans la deuxième phase : la phase de lutte. Cette phase ne pourrait débuter sans l'octroi d'un arrêté préfectoral qui précise la date de début et la date de fin de la campagne de lutte.

## **2- La phase de lutte**

Les données collectées par le service de protection des végétaux ainsi que la quantité de raticide nécessaire à l'opération de lutte sont communiquées à l'INPV (Institut National de la Protection des Végétaux- qui se trouve à Alger) qui procède à l'élaboration du raticide en changeant à chaque campagne de lutte la matière active du raticide pour éviter le phénomène d'accoutumance du rongeur au produit.

A la réception du raticide, le service de protection des végétaux peut refuser les produits qui n'ont pas donné satisfaction après une campagne de lutte.

Afin de procéder à la lutte, une campagne de sensibilisation et de formation des agriculteurs à l'utilisation du raticide et aux techniques d'appâtage (préparation et pose des appâts) sont planifiés. Les agriculteurs participent aux opérations d'appâtage suivant la superficie cultivée (on ne pourrait utiliser seuls les moyens humains du service de protection des végétaux à cause de l'urgence de l'opération et du risque de prolifération de rongeur.)

La quantité du raticide nécessaire par agriculteur n'est pas fournie en bloc à ce dernier, mais par petites quantités pour assurer le suivi et sa sensibilisation et obtenir par la même occasion des informations sur le déroulement de l'opération de lutte.

Le réseau de surveillance du service continu à faire le suivi technique jusqu'à la fin de la campagne de lutte.

### 3- La phase d'observation et d'évaluation

A la fin de l'opération de lutte, les informations sont collectées par l'équipe technique et par l'intermédiaire des agriculteurs sur l'activité du rongeur.

Les techniciens observent sur le terrain l'activité du rongeur en déterminant :

- le nombre de terriers encore actifs
- en vérifiant s'il y a confection de nouveaux terriers
- présence sentie du rongeur dans l'environnement

Après observation, le service de protection des végétaux évalue la campagne et élabore un bilan définitif détaillant :

- La superficie infestée
- La superficie traitée
- La quantité du produit utilisée
- Le nombre d'agriculteurs bénéficiaires

## 5.2. Description du problème rencontré

La wilaya de Tiaret est une région céréalière. La protection des céréales contre les rongeurs arvicoles est vitale pour les agriculteurs. L'espèce la plus répandue dans la région est la mérione de Shaw, elle est caractérisée d'une forte capacité de reproduction (jusqu'à 12 embryons par portée).

L'étude des bilans de lutte des différentes années montre que les résultats obtenus d'une campagne ne sont validés que par les prospections de l'année suivante. Un taux d'infestation de 10 à 12% est toléré par rapport à l'infestation de l'année dernière sur la même zone. En particulier, dans certaines années la surface traitée étant égale à la surface infestée, alors que l'année suivante, les prospections montrent que la surface infestée représente plus de la moitié de celle de l'année dernière dans la même zone traitée! (Tables 2 et 3). Les responsables de l'inspection de protection des végétaux (IPV) expliquent cette incohérence par les comportements inadaptés de certains acteurs impliqués dans la lutte.

**Table 2.** Bilan campagne anti-rongeur (résumé) (2004-2005)

<b>Superficie infestée</b>	<b>Superficie Traitée</b>
<b>97511 ha</b>	<b>97511 ha</b>

**Table 3.** Bilan campagne anti-rongeur (résumé) (2005-2006)

<b>Superficie infestée</b>	<b>Superficie Traitée</b>
<b>56000 ha</b>	<b>56000 ha</b>

Ce dysfonctionnement de comportement concerne les trois types d'acteurs impliqués dans une campagne de lutte à savoir les agents phytosanitaires, les prospecteurs et enfin les

agriculteurs. Afin de leurs inculquer les techniques et les décisions adéquates, nous allons tout d'abord identifier les types d'actions requises dans la gestion de la campagne de lutte. Mais avant d'entamer cette étude, nous décrivons brièvement, dans les sections suivantes, les caractéristiques des entités composant cet agroécosystème, les rongeurs et les humains.

### **5.2.1. Les rongeurs**

Il existe plusieurs espèces de rongeurs arvicoles en Algérie, mais l'espèce la plus préjudiciable à l'agriculture est la mérione de Shaw "Mériones shawi". Ce rongeur a été déclaré comme fléau agricole par le décret N° 95 387 du 28 Novembre 1995.

L'activité de la mérione est diurne en période froide et crépusculaire ou nocturne en période chaude. Elle prolifère après une bonne année agricole, lorsque la pluviométrie est importante entre le mois de novembre et le mois d'avril. La période de reproduction commence en fin d'hiver et atteint le maximum au printemps. La durée de gestation est de l'ordre de 20 jours. Le nombre de petits est de 5 à 12 par portée.

Le régime alimentaire de la mérione est très varié ; elle consomme des fruits et légumes au printemps, des céréales en automne et lorsque la source de nourriture est tarie en hiver elle peut consommer des insectes. Ce rongeur effectue des réserves durant l'été qui peuvent atteindre 40Kg/terrier actif.

Sur une superficie de 100 000 ha infesté, les pertes peuvent être considérables avoisinant 13 000 tonnes.

En plus des dégâts causés aux cultures, la mérione est identifiée comme un réservoir de la Leishmaniose cutanée. C'est une maladie qui, une fois transmise à l'homme, attaque les globules blancs humains, occasionne des lésions qui, après guérison, laisse des cicatrices indélébiles et des plus redoutables sur le visage.

Pour illustrer l'ampleur de l'infestation des zones agricoles dans la région de Tiaret, nous avons élaboré une carte d'infestation à base des bilans annuels (de 2004 à 2008) de l'inspection de protection des végétaux. Cette carte (figure 18) illustre la région de Tiaret avec toutes ses Daïras. La densité des rongeurs est donnée par nombre de foyers par hectare (1 foyer = 3 à 4 terriers, 1 terrier = un couple de rongeur + éventuellement 5 à 6 petits).

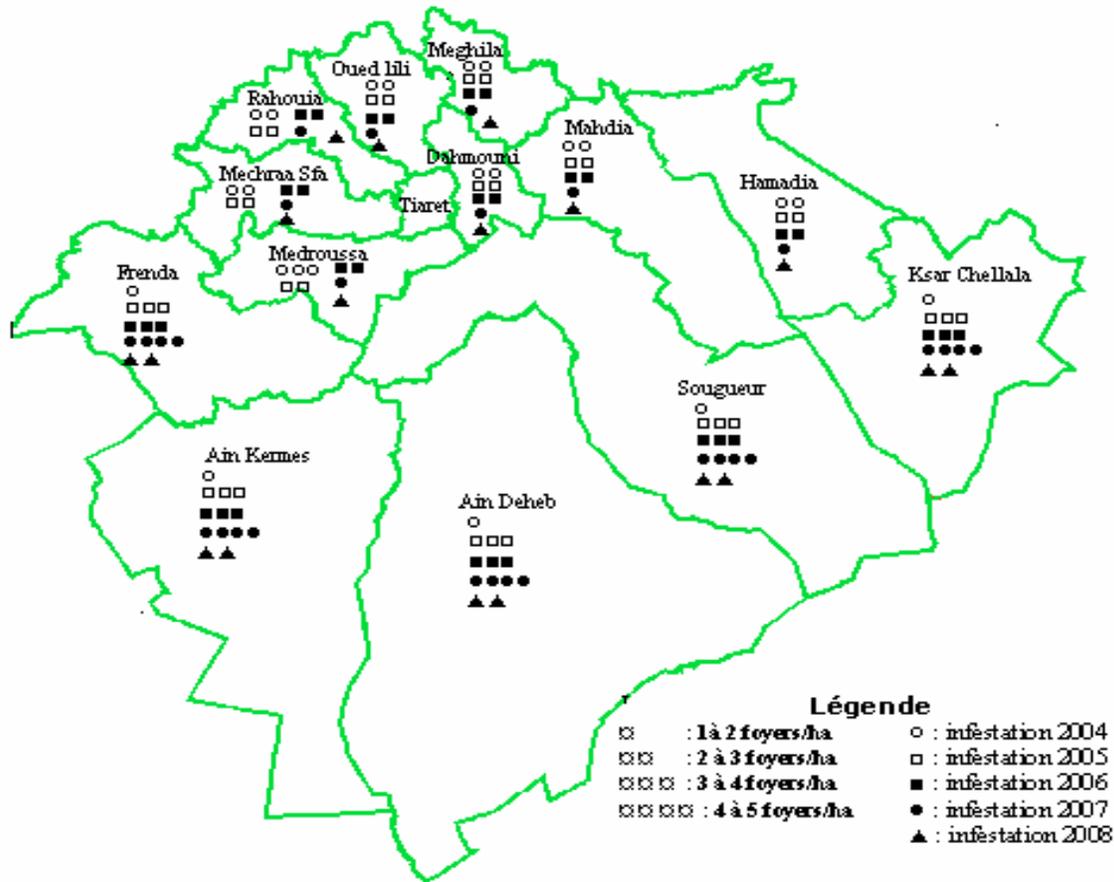


Figure 18 – Taux d'infestation de la région de Tiaret par la mérione Shawi (2004 – 2008).

### 5.2.2. Les acteurs

Une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de culture implique plusieurs acteurs. Le rôle et les responsabilités de chacun sont décrits comme suit :

- **L'agent phytosanitaire (AP)** : il organise, planifie et gère la campagne de lutte. Il doit estimer la zone infestée, la densité des rongeurs, le nombre de prospecteurs à déployer et la quantité de rodenticide à commander.
- **Le prospecteur** : son rôle est de prospecter la zone signalée par l'AP, d'élaborer une carte d'infestation et un rapport de prospection et de calculer la quantité de rodenticide à distribuer à chaque agriculteur. Au moment de la lutte, il prépare les appâts, les distribue aux agricultures et participe aux opérations de détection de trous actifs.
- **L'agriculteur** : il doit d'abord signaler la présence des rongeurs sur ces terres. Il procède aussi à la lutte après avoir reçu les appâts. Il commence par détecter le trou actif de chaque terrier, pose l'appât et surveille la réaction des rongeurs. Il est souvent amené à appâter à plusieurs reprises.

L'engagement de ces acteurs est l'atout du succès d'une campagne de lutte, si au moins l'un d'eux néglige ses responsabilités, c'est toute la campagne qui est vouée à l'échec. Comme acclamé dans la problématique, les responsables de l'inspection de protection des végétaux pointent du doigt les comportements inadaptés de certains acteurs. Le tableau 4 représente les comportements incompetents illustrés par des actions sur le terrain de chaque type d'acteur. Ces actions d'incompétence sont dégagées suite à des interviews d'experts de la lutte anti-rongeurs, quoique cette liste ne soit pas exhaustive. (Inspection de la protection des végétaux).

**Table 4.** Liste des actions incompetentes par acteur

<b>Acteur</b>	<b>Action</b>
<b>L'inspecteur phytosanitaire</b>	Ne pas vérifier toutes les zones signalées (choix d'un certain nombre de sites sur la totalité des sites signalés et estimation du degré d'infestation à la base de ces sites)
	Nombre insuffisant de prospecteurs engagés dans l'opération de prospection.
	Ne pas procéder aux prospections systématiques en l'absence de signalisation de présence de rongeurs par les agriculteurs.
	Organisation de prospections à partir de 3 signalisations dans la même zone (1 à 2 signalisations sont considérées en dessous du seuil toléré)
	Ignorer les zones avoisinantes des zones signalées.
	Programmation aléatoire de prospection des zones sans tenir compte des priorités (nombre de signalisation, type de végétation -- céréale, maraichage, package & jachères --)
	Surestimation de la quantité de raticide à commander (stock de produit périssable à court terme)
	Sous estimation de la quantité de raticide à commander (rupture de stock en plein campagne de lutte)
	Ne pas arrêter la lutte à la date indiquée dans l'arrêté préfectoral.
	Ne pas procéder à la vérification suite à un rapport de prospection indiquant une grande infestation (nombre de terrier/hectare $\geq 5$ ) (nombre d'hectares infestés $\geq 5000$ )
<b>Le prospecteur</b>	prospection aléatoire sans prendre en compte la nature des sols (en période de disette, les rongeurs confectionnent leurs terriers dans les sols calcaires pour éviter l'effondrement des galeries).
	Ne pas favoriser les zones céréalières en période de poussée des végétaux.
	Ne pas favoriser les zones jachères avant la levée des végétaux.
	Ne pas prendre comme référence les infestations précédentes.
	Mauvais choix de sites à prospector (suivant l'infestation, l'échantillonnage des sites se fait tous les 2 à 3 km ou tous les 5 à 10 km – stratégie de prospection)
	Ne pas alterner les sites à prospector à gauche et à droite du parcours du prospecteur.
	Mauvaise estimation du risque d'infestation des zones avoisinant les zones infestées.
	Ne pas découvrir la totalité des terriers.
	Attribuer à l'agriculteur une quantité de raticide supérieur au niveau d'infestation
	Ne pas vérifier le résultat des traitements réalisés par les agriculteurs.

<b>L'agriculteur</b>	Lutter ou ne pas lutter.
	Ne pas boucher tous les trous d'un terrier.
	Pose d'appât aux abords du trou.
	Application d'une dose insuffisante du raticide.
	Ne pas faire le réappâtage.
	Appâtage en temps de pluie.
	Ne pas lutter en temps opportun.
	Lutter après la fin de la campagne de lutte.
	Ne pas porter de gans pendant la préparation de l'appât (les rongeurs reconnaissent l'odeur des humains et ne touchent pas à l'appât).

### 5.3. Vers un environnement de formation des acteurs

Les rares travaux sur la lutte anti-rongeurs impliquant les TICs se limitent à l'aspect économique suivant les actions entreprises par les agriculteurs dans un certain contexte (Brown et al., 2001) et n'implique pas tous les acteurs afin d'étudier et par conséquent d'améliorer leurs comportements.

La lutte contre les rongeurs nécessite en plus d'une formation assez spécialisée, l'intervention de plusieurs acteurs, comme nous l'avons déjà indiqué, les agents phytosanitaires, les prospecteurs et les agricultures rendant la tâche difficile d'autant qu'elle ne bénéficie d'aucune assistance informatique.

Sachant que le personnel qualifié ne peut subvenir aux besoins de tous les agriculteurs en matière d'assistance et que les dégâts causés par les rongeurs sont dus aux comportements inadéquats des acteurs durant les différentes phases de lutte, notre objectif principal s'oriente vers le développement d'un environnement de formation afin de bien rendre efficace la lutte surtout dans les régions rurales. Il s'avère nécessaire de former le personnel responsable de la lutte contre les rongeurs aussi bien au niveau central que provincial afin d'acquérir les connaissances concernant la biologie, l'écologie et les moyens et stratégies appropriés pour lutter contre ces mammifères en temps opportun.

Notre travail de recherche s'inscrit dans cette problématique et consiste à développer un environnement de formation et d'aide à la décision par simulation participative des agents phytosanitaires, des acteurs communaux et des agriculteurs (méthode MAS/RPG – *Multi-Agent Systems/Role Playing Games*). Un grand nombre d'études ont décrit et analysé les méthodes participatives (Mendoza et Prabhu, 2005) (Rauschmayer et Risse, 2005). Ces méthodes sont considérées les plus appropriées et les plus efficaces pour assurer le développement agricole durable (Mickwitz et al., 2006) (Siebenhüner et Volker, 2005)., elles permettent aux acteurs impliqués de jouer des rôles actifs dans le processus de planification de gestion et de prendre des décisions sur la gestion de stratégies et leur implémentation (Hagggar et al., 2003)( Kuntashula et Mafongoya, 2005). Notre choix s'est porté sur l'approche participative et la simulation afin d'améliorer par le jeu de scénarios le comportement des différents acteurs, de faciliter l'émergence de ces comportements et d'inculquer au moindre

coût les connaissances des stratégies de lutte en utilisant des agents pour remplacer les experts du domaine.

Notre environnement aura une double visée. D'une part, assister les agents phytosanitaires à la compréhension et l'expérimentation de plans d'action spécifique de lutte en collaboration avec les prospecteurs et les agriculteurs à l'aide d'une série de jeux de rôles paramétrables (nombre d'explorateurs, définition d'une stratégie d'exploration, définition de comportements standard de dératisation, ...). Et d'autre part, servir de support de formation aux différents acteurs et aux futurs responsables dans le domaine de la protection des végétaux. Notamment en vue d'une vulgarisation des enjeux et des pratiques. Ceci nous amène dans un premier temps à modéliser les compétences composant le comportement d'un acteur (les actions réalisées par l'acteur -- le joueur -- dans un certain contexte) et dans un second temps à modéliser le système d'évaluation de ces comportements.

Afin de suivre l'évolution des acteurs au cours des simulations notamment en vu d'analyser la performance de leurs actions, il sera fait recours à des approches de modélisation de l'apprenant telle que employée dans les environnements de formation assisté par ordinateur. L'intérêt de cette modélisation n'est pas de développer un modèle sur les connaissances de l'acteur, mais plutôt d'une modélisation de comportement. Par la suite, on simule l'impact de ces actions sur le système et le résultat sera présenté au joueur. Le modèle comportemental de l'acteur sera créé sur la base des actions réalisées dans un certain état du système. À travers ces résultats, le joueur pourra, dans un prochain tour de jeu, calibrer ou améliorer ses actions vers une efficience du système en modifiant son comportement.

Avant d'entamer l'étude des principaux composants de notre environnement de formation, nous présentons d'abord le métamodèle du champ d'étude afin de prendre conscience des concepts utilisés dans ce domaine d'étude et des liens entre ces concepts. De même, nous détaillerons les notions de scénario de jeu et de micro jeu.

### **5.3.1. Métamodèle**

Toute formalisation étant l'expression d'un point de vue sur un système, la création d'un métamodèle est indispensable.

La figure 19 présente le métamodèle qui décrit les concepts et les liens entre ces concepts de notre environnement de formation. Dans ce métamodèle l'environnement de formation est décrit come un jeu à base de simulation de modèles. Ces modèles peuvent être de différents types (objet, Multi-agent ou Mathématique). Le jeu est considéré comme une interaction entre plusieurs micro-jeux dont chacun possède un scénario, ces micro-jeux sont assignés à chaque type d'acteur. Chaque joueur interagit avec l'environnement de formation à travers son Micro-jeu, les compétences du joueur seront évaluées par le système est un feedback est envoyé au joueur.

Nous préconisons la modélisation multi-agents pour le système humain et le système animal.

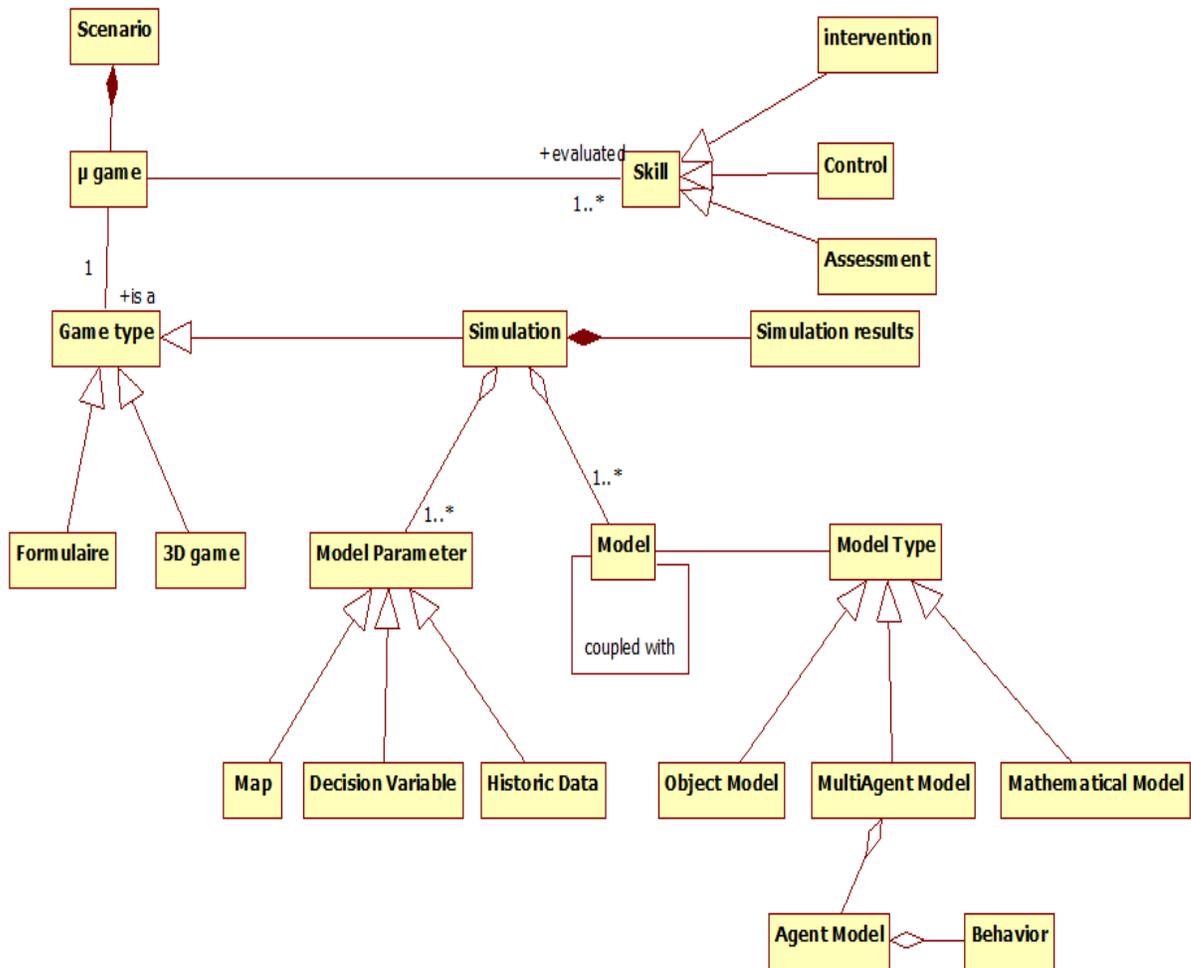


Figure 19. Métamodèle de l'environnement de formation

### 5.3.2. Scénario de jeu

A travers les jeux de rôle de formation on obtient la formation à un rôle professionnel. Il s'agit pour le sujet en formation de s'adapter à des contraintes et d'intégrer des conduites données. Dans les méthodes d'apprentissage par l'action, l'objectif est l'acquisition d'un savoir et/ou d'un savoir-faire. Contrairement aux méthodes d'apprentissage uniquement intellectuelles et verbales, le jeu de rôle de formation est une méthode d'apprentissage par l'action. Le savoir devient un savoir-faire et son intégration à la personnalité donne le savoir-être. Lors des situations professionnelles simulées, chacun va avoir son rôle à jouer. Contrairement à un cours magistral où les élèves se contentent d'observer et poser des questions, il s'agit ici de s'investir et de s'immerger dans le contexte professionnel proposé afin d'atteindre l'objectif pédagogique défini en début de séquence.

C'est par l'investissement de tous que cette pratique peut permettre de proposer une finalité pédagogique.

La mise en œuvre de l'environnement de formation va permettre de mettre en scène des situations du rôle (agent phytosanitaire ou prospecteur ou agriculteur) dans lesquelles il y a souvent interaction entre ces différents rôles. La simulation va consister à mettre le joueur dans des situations proches de la réalité (ex : quantité de raticide à commander, distance entre les zones prospectées, etc.). Elle peut aussi le conduire à devoir réagir à des imprévus ou des aléas. Ces situations plus critiques auront alors l'intérêt de le préparer à des problématiques auxquelles l'apprenant risque d'être confronté plus tard dans une campagne de lutte.

La création de situation de jeu nécessite la reproduction d'éléments essentiels de la vraie situation. Un scénario de jeu doit répondre aux critères suivants :

- c'est une mise en scène concrète qui fait appel à un cas réel authentique.
- ce jeu fait appel à une situation totale complexe dont les éléments sont présentés dans un document qui définit la situation. Tous les faits disponibles sur la situation sont présentés.
- le jeu présente une situation-problème qui appelle, pour les acteurs, une solution.
- la solution de la situation problème mise en scène dans le jeu est justement un rôle approprié à tenir (ou, plus simplement, un comportement de rôle approprié). C'est une conduite que le jeu tente de faire apprendre.

À travers le scénario de jeu suivant, nous projetons de décrire les actions principales à réaliser par chaque joueur et définir le flux d'information entrant et sortant pour chaque rôle du jeu. Dans ce scénario, nous ne détaillons pas la réalisation des actions en totalité car certaines d'entre elles sont décomposables en tâches (ex. l'action calcul de l'indice de risque est subdivisée en plusieurs tâches : accès à l'historique de pluviométrie, choix des mois concernés par la formule et choix du seuil de pluviométrie en millimètres). La scénarisation du jeu est assurée par un personnage extra-jeu, c'est le maître du jeu, il présente un scénario avec des données exploitables par les différents joueurs.

La table 5, présente le scénario en question.

**Table 5.** Scénario de jeu

**Phase 1 :** paramétrage du jeu (choix d'un scénario)

phase	Maître du jeu	Agent phytosanitaire	prospecteur	Agriculteur
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Choix des parcelles infestées</li> <li>- Définition du nombre de terriers par parcelle</li> <li>- Définition de la période de l'année (stade de croissance des végétaux)</li> <li>- Définition des cultures dans les parcelles</li> <li>- Données pour le calcul de l'indice de risque</li> </ul>	X	x	x

	- Définition du nombre de prospecteurs			
--	--	--	--	--

**Phase 2** : Décision de prospection de sites

phase	Maître du jeu	Agent phytosanitaire	prospecteur	Agriculteur
2	X	- Calcul de l'indice de risque (évaluation de la situation) - Désignation des sites à prospecter suite aux signalisations des agriculteurs - Détermination du nombre de prospecteurs suivant le nombre de sites déclarés infestés.	x	x

**Phase 3** : Prospection

phase	Maître du jeu	Agent phytosanitaire	prospecteur	Agriculteur
3	X	x	- Choix de la zone du site à prospecter suivant la nature des végétaux - Choix de la stratégie de prospection - Prospection - Déclaration d'une zone infestée ou non suivant la densité des rongeurs/ hectare (terriers découverts) - Evaluation du risque d'infestation pour les zones voisines - rédaction du rapport pour l'inspection phytosanitaire	x

**Phase 4** : Evaluation de la situation (lutte nécessaire ou non)

phase	Maître du jeu	Inspecteur phytosanitaire	prospecteur	Agriculteur
4	X	- Décider ou non de l'octroi d'un arrêté préfectoral de lutte anti-rongeurs - Demander ou non la livraison des raticides suivant les quantités en stock (si oui combien faut-il demander ?) - Lancement de la lutte (affectation des prospecteurs aux zones infestées et distribution des raticides par zone	x	x

**Phase 5** : Lutte

phase	Maître du jeu	Agent phytosanitaire	prospecteur	Agriculteur
5	X	x	- Formulation d'un état d'infestation en hectare par parcelle d'agriculteur - Distribution des raticides (calcul de la quantité) aux agriculteurs - Fourniture d'une carte illustrant la concentration des rongeurs sur les parcelles des agriculteurs.	x

**Phase 6 : Lutte (suite)**

Phase	Maître du jeu	Agent phytosanitaire	Prospecteur	Agriculteur
6	x	x	x	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Signaler la présence des rongeurs si besoin.</li> <li>- Lutter ou ne pas lutter (comportement)</li> <li>- Pour chaque terrier, boucher les trous (pour déterminer le trou actif)</li> <li>- Revenir le lendemain et poser l'appât dans le trou ré ouvert par le rongeur</li> <li>- fermer le trou actif le 3<sup>ème</sup> jour.</li> <li>- vérifier le 4<sup>ème</sup> jour si le trou actif est ré-ouvert</li> <li>- procéder au réappâtage si le trou est ré-ouvert</li> <li>- Etablissement d'un état du nombre de terriers encore actifs / nombre de terriers traités</li> </ul>

**5.3.3. Micro-jeu**

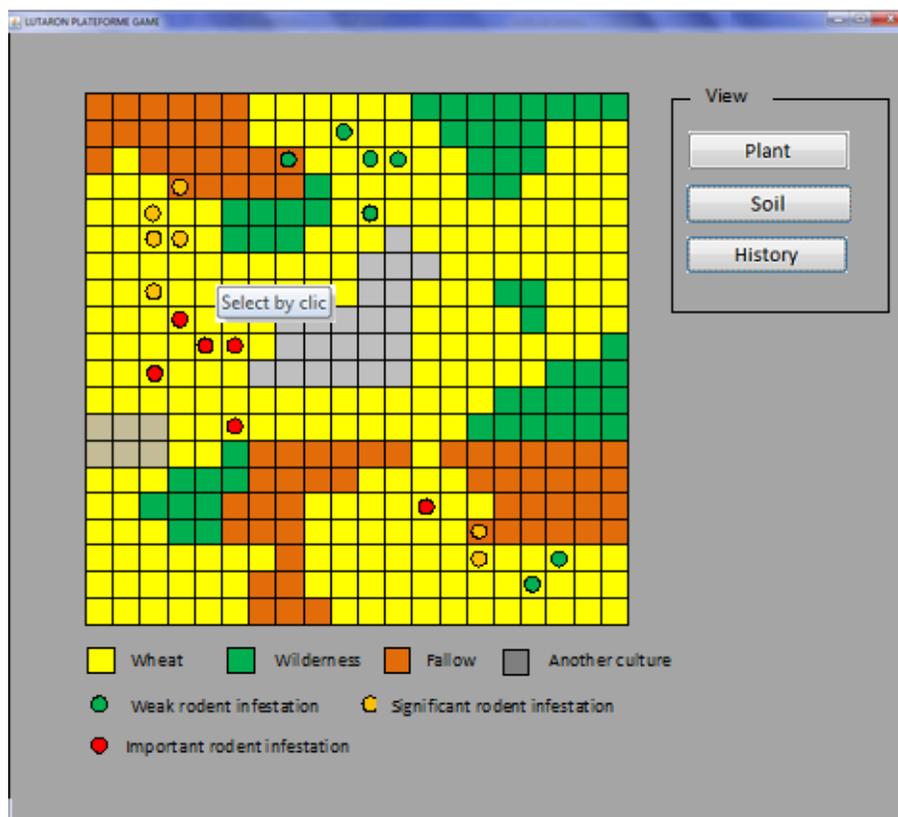
L'approche que nous proposons pour construire un environnement de formation, le recours aux simulations multi-agents participatives, est aussi fondée sur la participation et la mise en situation. Il s'agit de faire participer des joueurs humains à des simulations inspirées du réel. Parce qu'il mêle agents entièrement contrôlés par des joueurs humains et agents logiciels autonomes, le système mis en place pour la simulation est à mi-chemin entre le système informatique tel qu'on cherche à le construire, et le groupe humain qui exhibe les compétences ou le comportement que l'on cherche à améliorer. Cette approche a deux avantages intrinsèques. D'une part, tous les détails du contrôle exercé par les humains sont enregistrés et peuvent être analysés afin de révéler leurs stratégies et leurs comportements. D'autre part, la médiation de l'outil informatique force les acteurs à avoir un comportement délibéré et donc plus conscient, ce qui favorise la discussion lors des séances de verbalisation qui suivent les expériences de simulation.

Les simulations multi-agents participatives diffèrent des jeux de rôles sur plusieurs points. À l'inverse des expériences MAS/RPG, toutes les actions des joueurs s'effectuent par le biais de l'ordinateur et elles sont toutes enregistrées. La forme que prend la participation des joueurs est également différente. Dans un jeu de rôles, les joueurs peuvent agir à peu près comme dans la réalité ou en ayant recours à des symboles représentant des activités réelles qui sont discutées et choisies en commun. En revanche, dans les simulations multi-agents participatives, les joueurs se comportent comme s'ils prenaient le contrôle d'agents. Les interactions entre les joueurs se font dans le strict cadre des interactions entre agents. Cependant, cette propriété n'est pas une conséquence du jeu par ordinateur.

Comme indiqué dans le métamodèle de la figure 19. Notre jeu de simulation est conçu sous forme de micro-jeux. Chaque micro-jeu représente une mise en situation particulière et

correspond à une des phases du scénario décrit dans la section précédente. Il s'agit dans un micro-jeu d'immerger le joueur dans un environnement propre à son rôle et d'évaluer son comportement. Comme le stipule la simulation participative, il s'agit de faire participer des joueurs par l'intermédiaire d'ordinateurs à une simulation où chaque joueur tient un rôle. L'avantage des micro-jeux est qu'ils se comportent comme une boîte noire par rapport à la globalité de la simulation et constituent des composants micro-simulation qui s'enchaînent pour former à la fin du jeu une entité synchronisée. Chaque micro-jeu reçoit en entrée un flux d'information composé de données et de messages envoyés par les autres joueurs, après interaction du joueur avec l'interface (réalisation des actions, prise de décisions et envoi de messages) le micro-jeu enregistre les données nécessaires à l'enchaînement de la simulation et envoi par l'intermédiaire d'agent les messages résultats attendus.

Afin d'illustrer cette notion de micro-jeu, nous présentons dans la figure 20 un exemple de micro-jeu propre à l'acteur "Prospecteur".



**Figure 20.** Interface de Micro-jeu (Mise en situation : prospection)

Dans de ce micro-jeu, le prospecteur est mis en situation de prospection, il peut choisir d'afficher sur la grille la carte des cultures, la nature du sol ou l'historique des infestations par année afin de prendre la meilleure décision pour la prospection. Cette prospection consiste

à sélectionner les zones du site à prospector. Un comportement nominal pour ce micro-jeu serait de :

- 1- Vérifier l'historique du site
- 2- Repérer les signalisations sur la carte
- 3- Choisir une stratégie de prospection selon le taux d'infestation.

Le micro-jeu enregistre les actions du joueur sur l'interface, chaque action réalisée sera évaluée et contribuera à l'évaluation de la compétence concernée.

#### **5.4. Conclusion**

L'étude de la protection des agroécosystèmes, ne peut aujourd'hui se désintéresser de l'impact de la formation et de l'apprentissage sur la lutte contre les fléaux de ces agroécosystèmes. Toutefois cette dimension est difficile à apprécier.

Le comportement des acteurs est souvent la cause principale de l'échec d'une campagne de lutte contre les rongeurs, l'inculcation des comportements nominaux passe obligatoirement par la formation qu'elle soit assistée par ordinateur ou pas. Seulement le manque des experts nous oblige à opter pour un environnement de formation.

Nous avons proposé une démarche de développement de l'environnement basée sur l'utilisation des micros jeux qui sont issus des différents scénarios de jeu. Cette approche permet de diagnostiquer facilement la phase de micro-simulation dans laquelle les apprenants rencontrent des difficultés.

Nous allons dans le chapitre suivant présenter la spécification du modèle d'évaluation adoptée dans notre environnement de formation.

## CHAPITRE VI

### Proposition d'un Système d'Évaluation des Apprenants à Base d'Agents Négociateurs

---

L'utilisation des environnements de formation basés sur la simulation est encore entravée par le manque de méthodes et d'outils permettant d'évaluer les progrès des apprenants au cours d'une session de formation. Par exemple, dans l'apprentissage en classe, l'évaluation est généralement réalisée de deux façons (formative et sommative) et est réalisée par des experts humains. Cependant, dans l'apprentissage basé sur la simulation, ces méthodes d'évaluation deviennent inadéquates, car elles consistent souvent en une rétroaction négative sans explication ni conseils pour l'amélioration, ce qui peut provoquer la perte de motivation chez l'apprenant. En outre, pour ce qui est de l'évaluation, il existe peu de méthodes d'évaluation appropriées et adaptées à l'apprentissage/ formation par simulation (Ekanayake et al., 2011). Actuellement, l'évaluation des compétences dans les environnements de formation à base de simulation est souvent dispensée par des instructeurs humains en utilisant des méthodes qualitatives subjectives (basé sur l'expertise humaine) difficile à automatiser comme le stipule l'apprentissage basé sur la simulation par rapport à la réduction du temps et des coûts d'enseignement (Eck 2006).

Afin d'aider les élèves à mieux faire face aux difficultés rencontrées dans la résolution de problèmes, de nombreux chercheurs ont mis au point des outils d'évaluation intelligents basés sur des approches de l'intelligence artificielle (Stathacopoulo et al., 2005)(Huang et al., 2008). Par exemple, le cadre conceptuel développé par Mislevy (Mislevy et al. 2003) adopte une conception basée sur les preuves (Evidence Centered Design - ECD), qui permet la conception d'évaluations valides et peut fournir des estimations en temps réel des niveaux de compétence des élèves à travers une gamme de connaissances et de compétences. Cependant, certaines questions dans les modèles d'évaluation existants nécessitent une enquête plus approfondie:

- Les outils d'évaluation procèdent souvent à l'évaluation des compétences des apprenants en une seule étape, et se concentrent davantage sur l'attribution d'une note que de donner des explications détaillées sur ce que ne comprennent pas les apprenants ou ce qu'ils n'arrivent pas à mettre en pratique (Chang et al., 2006). En outre, les évaluations des apprenants peuvent être insuffisantes et manquent de précision pour aider les étudiants.

- En générale, tous les outils d'évaluation admettent un score seuil pour réussir les tests. Cela défavorise les apprenants dont la note finale est proche de la limite de passage. Est-ce qu'un apprenant ayant 9,9 comme note finale est significativement moins bon qu'un apprenant ayant 10 comme note finale? De plus si on considère les marges d'erreurs potentielles.
- Les outils d'évaluation existants se concentrent davantage sur l'évaluation de la performance de l'apprenant indépendamment du fait que cette évaluation contribue ou non à la motivation des apprenants afin qu'ils n'abandonnent pas l'apprentissage.

Ces questions peuvent être abordées d'abord en affinant les critères de compétences d'évaluation afin de préciser quelle partie du processus d'apprentissage a mal tourné. Deuxièmement, les notes doivent être manipulées avec une marge d'erreur, évitant ainsi les phénomènes de seuil. De plus, en tenant compte d'une compensation limitée entre les différents critères d'évaluation (comme au moment de décider si un élève passe en classe supérieur ou pas), accorderait une évaluation plus souple identique à celle des évaluateurs humains. Enfin, rapporter la rétroaction à l'apprenant peut ensuite être détaillé et pas entièrement négatif, ce qui réduit le phénomène de la démotivation.

Dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser des agents évaluateurs distribués pour évaluer les compétences individuellement et ainsi informer précisément sur les difficultés rencontrées par l'apprenant à chaque compétence. En utilisant les ensembles flous, les agents évaluateurs sont en mesure d'évaluer le niveau de contrôle de chaque compétence en considérant la difficulté de chaque action de la compétence. Notre stratégie repose sur une approche en deux étapes (voir la figure 24a): la première étape se concentre sur l'évaluation des compétences des apprenants par l'intermédiaire d'agents évaluateurs; chacun est responsable de l'évaluation d'une seule compétence de l'apprenant. Les résultats de la première étape seront utilisés dans la deuxième étape de la démarche, qui concerne l'évaluation globale des capacités de l'apprenant. Cette deuxième étape de l'évaluation est gérée par un agent global et est basée sur les évaluations des agents évaluateurs, permettant à un processus de négociation de décider si l'apprenant obtiendra ou non la qualification des compétences requises.

## **6.1. L'évaluation, les agents et la négociation**

Notre approche s'apparente à un système tuteur Intelligent (STI) ou un jeu sérieux car il vise à améliorer la lutte contre les rongeurs à travers avec un environnement de formation en utilisant des technologies liées à l'intelligence artificielle. Classiquement, les STI sont structurés en quatre fonctions / modules (Anderson et al., 1995).

- Module Interface: permet au tuteur ou à l'apprenant d'interagir avec le système. Comme la nature de l'interaction dépend soit du domaine d'application et / ou des connaissances ou des compétences visées par le STI, le module d'interface peut varier du simple questionnaire de base jusqu'à la manipulation des éléments graphiques 2D et la simulation 3D ou encore les environnements de la réalité virtuelle (Buche et al., 2004).
- Module du domaine: contient les connaissances à enseigner aux utilisateurs du système. Encore une fois, un tel contenu peut varier en fonction du langage de représentation des connaissances choisie, de règles de systèmes experts ou d'équations d'ontologie etc.
- Module de l'apprenant: regroupe toute information décrivant les connaissances acquises par l'apprenant. Il peut être considéré comme un sous-ensemble du module du domaine (ontologie avec valeur indiquant si l'apprenant a acquis la connaissance ou non), etc. Parmi les approches les plus couramment utilisées pour représenter les connaissances de l'apprenant, il existe le modèle de superposition qui considère la connaissance de l'apprenant comme un sous-ensemble des connaissances de l'expert. Le modèle Buggy qui est une évolution du modèle de superposition suppose que l'apprenant a une connaissance en commun avec l'expert et une connaissance fautive spécifique à l'apprenant.
- Module Tutorat : ce dernier module pilote le processus pédagogique qui permet aux apprenants de suivre (éventuellement dynamiquement) le long d'un scénario de formation visant à améliorer leurs connaissances et leurs compétences. Ce module peut s'adapter aux progrès des élèves, contrôler la séquence d'exercices ou d'étapes de la formation. Les Processus de mise à jour des informations du module de l'apprenant sont parfois inclus dans ce module.

Bien que cette architecture générale soit reconnue, la distribution des sous-fonctions peut varier en fonction du domaine d'application et des besoins d'évaluation des connaissances. Dans nos objectifs pour améliorer la formation des futurs agents phytosanitaires ou autres parties prenantes, nous nous sommes focalisés sur deux exigences principales: 1) fournir une simulation du système naturel et/ou des comportements des acteurs dont les résultats sont suffisamment proches de la réalité pour permettre aux utilisateurs de l'environnement de formation d'accepter ses résultats, et 2) la mise en œuvre d'une approche d'évaluation des compétences basée sur un scénario de formation reproduisant une campagne de lutte contre les rongeurs. Plus de détail sur le premier objectif peut être trouvé dans (Chadli et al., 2009).

L'évaluation est utilisée principalement pour aider l'apprenant dans sa formation, un bon environnement devrait permettre au tuteur, mais aussi à l'apprenant à percevoir lui-même

ses forces et ses difficultés. Les chercheurs dans le domaine de la modélisation de l'apprenant ont utilisé l'intelligence artificielle (IA) afin de développer des modèles qui fournissent un diagnostic détaillé sur les connaissances de l'élève, sur ses bugs et ses erreurs de conception, et/ou qui simulent le comportement cognitif de l'apprenant en cours d'apprentissage et des activités de résolution de problèmes (voir (Greer et McCalla, 1991) pour les rapports sur les différentes approches). Ces approches ont souligné la nécessité de développer des formes d'évaluation avec une plus grande pertinence pour les apprenants, et la fiabilité des fins d'évaluation. Il est à souligné que l'évaluation innovante est perçue par les apprenants comme étant plus pertinente à l'apprentissage (McDowell, 1995). Idéalement, le modèle de l'apprenant doit comprendre tous les aspects du comportement des apprenants et des connaissances qui ont des répercussions sur leur performance et leur apprentissage (Wenger, 1987). Cependant, dans la recherche en IA appliquée à l'éducation, le diagnostic du comportement de résolution de problèmes est généralement considéré comme extrêmement difficile (Wenger, 1987).

Un certain nombre d'environnements d'apprentissage intelligents sont concernés par l'évaluation des apprenants dans un but de fournir des orientations d'apprentissage individuel pour les apprenants et d'améliorer la performance de chaque apprenant. Par exemple, Stathacopoulou et al. ont développé un réseau de neurones pour la mise en œuvre d'un modèle basée sur la logique floue dans un processus de diagnostic dans le but de fournir un diagnostic précis pour les environnements d'apprentissage intelligents (Stathacopoulou et al., 2005). Huang et al. ont proposé un système d'évaluation d'apprentissage intelligent comme support d'un modèle d'apprentissage orienté web, qui vise à cultiver la capacité des apprenants à l'intégration des connaissances en permettant aux apprenants de sélectionner les sujets d'apprentissage qui les (Huang et al., 2007). Basé sur l'analyse multi-niveaux d'une production écrite en FLE (Français langue étrangère), Bourdet et Teutsch ont exploré la possibilité d'évaluer les apprenants à différents niveaux: application des instructions, la cohérence sémantique, l'exactitude syntaxique et la précision lexicale (Bourdet et Teutsch, 2000).

Cependant, l'évaluation des compétences et des capacités pose des problèmes pour les modèles de mesure traditionnels utilisés dans l'évaluation. Tout d'abord, dans les tests traditionnels la réponse à chaque question est considérée comme une donnée indépendante. En revanche, les actions individuelles au sein d'une séquence d'interactions dans une simulation ou un jeu sont souvent très dépendantes l'une de l'autre (par exemple les tâches d'action d'intervention présentées dans la table 6 doivent être accompli dans l'ordre où elles apparaissent). A l'instar de ce que l'on fait dans un simulateur de vol à un moment donné dans le temps influe sur les actions ultérieures plus tard. Deuxièmement, dans les tests traditionnels, les questions sont souvent conçues pour obtenir un élément particulier de la

connaissance. Répondre correctement à une question est une preuve que l'on connaît un fait certain, cela dit une question - un fait. En analysant les réponses des apprenants à toutes les questions, chacune d'elles fournit une preuve sur l'assimilation d'un fait ou un concept par les apprenants, par conséquent les environnements pédagogiques peuvent obtenir une image globale de ce que les apprenants sont susceptibles de savoir et ne pas savoir. Parce que nous voulons généralement évaluer toute une constellation de compétences à partir d'interactions des joueurs dans un jeu ou une simulation, les méthodes d'analyse d'une séquence de comportements pour déduire ces compétences ne sont pas aussi évidentes. L'évaluation distribuée est une méthode qui peut résoudre ces problèmes en combinant des méthodes hétérogènes d'évaluation de compétences et permettre ainsi le développement de systèmes d'apprentissage à base de jeu ou de simulation qui soient robustes et valides.

Le sujet que nous traitons dans cette partie de la contribution concerne l'analyse du comportement. Pour améliorer l'approche traditionnelle largement utilisée dans la plupart des environnements d'apprentissage, nous proposons de décomposer le comportement de résolution de problèmes de l'apprenant en plusieurs catégories de connaissances, et de considérer les connaissances de l'apprenant comme des compétences dont l'association représente la performance de cet apprenant. Nous insistons particulièrement sur l'importance du comportement cognitif dans le processus d'évaluation. Par conséquent, la méthode d'évaluation que nous proposons consiste à évaluer différemment ces différentes compétences.

Les agents ont été largement utilisés dans des environnements de formation à des fins différentes. La modélisation multi-agents est probablement l'outil le plus utilisé dans ces environnements. Cependant, certains systèmes ont mis l'accent sur l'implication des agents dans l'évaluation des apprenants par rapport à leur capacité d'intelligence et d'autonomie. Parmi ces systèmes, "Baghera" est un système tutoriel intelligent qui utilise un agent démonstrateur pour la vérification automatique de preuves (Caferra et al., 2000). Webber et al. (Webber et al., 2002) ont mis au point un mécanisme permettant de diagnostiquer et de modéliser les conceptions de l'apprenant (concept mathématique) basé sur un modèle théorique des conceptions. Ils considèrent le diagnostic comme le résultat émergent de l'interaction des agents à un niveau micro, un résultat qui est interprété par des agents spécialisés d'un niveau supérieur (niveau macro). Au niveau micro, les agents interagissent et, suite à un processus de vote, forment des coalitions. Au niveau macro, les agents spécialisés sont capables d'interpréter les coalitions en termes de diagnostic. Pilato et al. (Pilato et al., 2008) ont utilisé un agent conversationnel pour évaluer les connaissances des élèves par une procédure question/réponse en langage naturel. Ils ont utilisé la technique de l'analyse sémantique latente (LSA) pour déterminer l'exactitude des phrases de l'apprenant dans le but de savoir les concepts maîtrisés par l'apprenant. Un agent évaluateur est utilisé par Lai et

Lan (Lai et Lan, 2006), cette approche permet aux étudiants dont l'exercice est noté, de négocier avec les évaluateurs par l'intermédiaire de cet agent évaluateur afin de parvenir à une évaluation finale.

Notre approche est basée sur l'utilisation d'agents évaluateurs intégrant des contraintes floues dans le processus d'évaluation des compétences d'un seul apprenant. L'évaluation finale est une forme d'évaluation collaborative négociée impliquant les agents évaluateurs et un agent global. Cette évaluation est basée sur les critères de performance de l'apprenant. En appliquant la méthode proposée, les agents peuvent atteindre des accords mutuellement acceptables qui permettent d'éviter les jugements subjectifs et les évaluations injustes. Ainsi, l'accord négocié fournit aux apprenants de meilleures évaluations, améliorant ainsi l'efficacité de l'apprentissage.

Un deuxième volet de notre recherche consiste à développer l'idée de l'évaluation collaborative négociée. Cette évaluation est basée sur des évaluations individuelles dont le processus utilise les techniques de la logique floue. Certaines recherches ont démontré que la discussion et la négociation entre des évaluateurs indépendants peuvent améliorer la fiabilité des critères d'évaluation des portfolios (Rees et Sheard, 2004). Cette idée a été utilisée dans un premier temps dans le modèle ouvert de connaissances de l'élève (Dimitrova et al., 1999), le processus implique l'élève et l'évaluateur (ou un agent agissant pour le compte de l'évaluateur) dans une négociation d'un accord d'évaluation de l'élève (Brna et al., 1999). La négociation est également utilisée dans l'évaluation par pairs, Robert Lai et Hsien Lan ont développé une méthode de modélisation de l'apprentissage collaboratif par l'usage d'un agent négociateur en utilisant des contraintes floues. La méthode proposée agrège les notes des élèves pour réduire les erreurs d'évaluation. Dans ce cadre, les élèves définissent différentes fonctions d'appartenance floues en fonction de leurs concepts d'évaluation et les agents facilitent les négociations élève-élève au cours du processus d'évaluation (Lai et Lan, 2006).

L'approche que nous proposons permet aux acteurs de se livrer à une sorte de jeu et éventuellement d'évaluer différemment les compétences identifiées (voir la section suivante) à la fin du jeu. Cette méthode offre la possibilité de négocier l'évaluation globale du comportement par l'utilisation des résultats de l'évaluation actuelle des compétences et de la performance précédente des apprenants dans un contexte d'évaluation collaborative.

## **6.2. Identification des compétences**

Dans cette section, nous allons décrire les compétences requises lors d'une campagne de lutte, chacune des actions entreprises par un acteur durant cette campagne est liée à une catégorie de compétence.

Afin de mieux identifier et de caractériser ces compétences, nous avons suivi la classification des connaissances classiquement utilisés dans la théorie de la métacognition (Schraw et Moshman, 1995), où trois types de connaissances sont définis:

- **Connaissances déclaratives:** constituent le savoir théorique : les faits, les règles, les lois, les principes. Elles sont constituées de concepts liés entre eux pour former des propositions. Celles-ci, cependant, ne permettent pas d'agir à elles seules sur le réel. Plutôt statiques, elles devront être traduites en dispositions et procédures pour permettre une action.
- **Connaissances procédurales:** Le savoir-faire constitue cette seconde catégorie de connaissances. Ce sont les procédures, la connaissance du comment de l'action. Les connaissances procédurales font intervenir une vitesse d'exécution dans une suite d'actions. C'est par elles qu'on apprend à réaliser une tâche réelle. Les connaissances procédurales exigent de la pratique, de la répétition, pour arriver à les maîtriser.
- **Connaissances conditionnelles:** Les connaissances conditionnelles, quant à elles, concernent le quand et le pourquoi. Elles réfèrent aux conditions de l'action. Elles permettent, dans différents contextes, d'appliquer les connaissances déclaratives et procédurales. En effet, des connaissances qui ne sont pas liées aux conditions d'utilisation sont inertes et sans utilité, car elles ne seront pas appelées au bon moment et ne pourront donc pas soutenir l'expert dans l'action. La figure 21. Illustre ces trois catégories de connaissances.

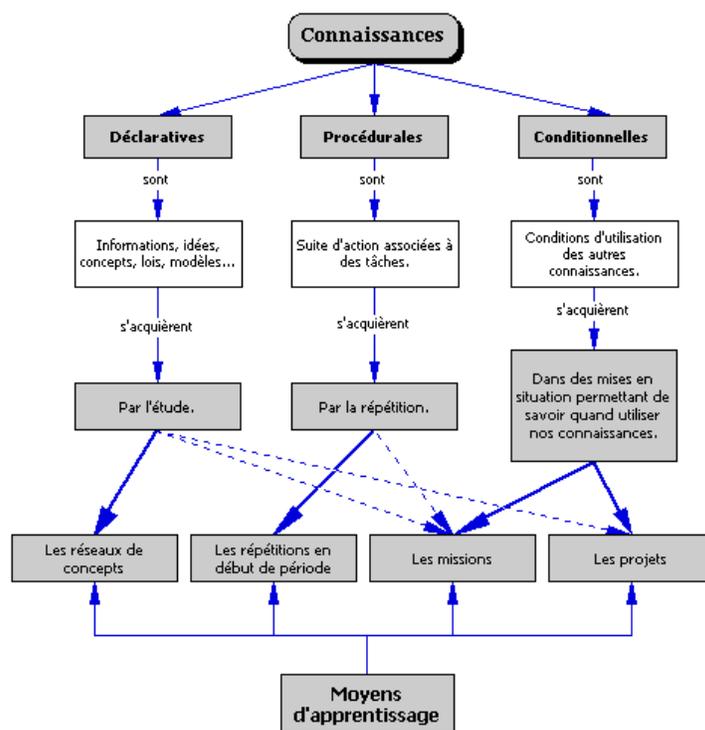


Figure 21. Synthèse des types de connaissance

En utilisant cette analyse de la connaissance, notre étude sur le terrain et auprès des différents acteurs nous a conduits à regrouper les actions réalisées par les trois acteurs, durant les différentes phases d'une campagne de lutte, en trois catégories : les actions de contrôle, les actions d'intervention et les actions d'évaluation. Chacune de ces catégories d'action représente une compétence à évaluer. Le comportement d'un acteur-joueur sera donc composé de ces trois types d'action.

- **Action de contrôle** : une action de contrôle est une action reflétant la capacité de l'acteur à identifier et exploiter les indicateurs de contrôle dont il dispose : soit parce qu'ils représentent une information importante nécessaire à la réalisation d'autres actions (exemple : l'estimation du risque de prolifération nécessite la connaissance des données météorologiques, l'historique des infestations précédentes, ...) soit ils représentent une partie du domaine de connaissance nécessaire au rôle afin de participer vigoureusement à la campagne. De telles actions peuvent être liées à des connaissances déclaratives.
- **Action d'intervention** : ce type d'action représente la réalisation d'une ou plusieurs tâches séquencées correctement et accomplies à un temps  $T_{t\grave{a}che}$  parmi une liste de tâches identifiées pour le rôle de l'acteur. De telles actions peuvent être liées à des connaissances procédurales.
- **Action d'évaluation** : cette catégorie d'action indique la faculté de l'acteur à évaluer une situation ou un besoin en ressources en considérant la satisfaction de certaines conditions. Ce type d'action précède une ou plusieurs actions d'intervention. De telles actions peuvent être liées à des connaissances conditionnelles. La table 6 illustre un exemple de catégories d'actions.

**Table 6.** Exemple illustratif des trois catégories d'action

Action Type	Control
Actor	Phytosanitary agent
Action	Calculating the risk index
Indicator	Meteorological data, infestation rate of last year.
Action Type	Intervention
Actor	Farmer
Action	Baiting
Task 1	Plugging the hols of the burrow
Task 2	Baiting in each active hole
Task 3	Plugging active holes a second time
Task 4	Check if the holes are still active
Action Type	Assessment
Actor	Prospector
Action	Choice of sampling for exploration according to the infestation (small distance between plots in the event of large infestation)
Condition	Is (infestation rate low ? or high ?)

### 6.3. Organisation Multi-agents

L'objet de cette section concerne l'analyse du SMA conduisant à l'élaboration d'une organisation multi-agents et à la spécification détaillée des composants du SMA et de leurs interactions contextualisées dans le cadre d'une évaluation collective et négociée. Mais avant d'aborder cette modélisation, nous argumentons le choix de l'approche agent plutôt qu'une démarche orientée objet.

Les méthodes du génie logiciel reposent sur le concept d'objet, qui encapsule au sein d'une même entité des états et des méthodes (comportements). Les méthodes de conception objet permettent principalement de définir les fonctionnalités que doit fournir le système, la structure statique (description des relations structurelles entre classes) et le comportement dynamique des objets. Ces méthodes sont aujourd'hui largement utilisées pour la conception de logiciels.

L'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi-agents sont des domaines dont le développement actuel fait apparaître le besoin de méthodes de conception adaptées. Toutefois la variété des types que peut prendre un agent, son organisation en société, la complexité des interactions qu'il peut avoir, ne facilitent pas la définition de telles méthodes.

Plusieurs propositions de méthodes orientées-Agents ont été faites. Certaines d'entre elles s'appuient sur des méthodes objets existantes. Ces dernières ont en effet atteint un haut niveau de maturité, et les similarités existant entre objets et agents en font une des bases naturelles au développement de méthodologies agents.

Toutefois, comme nous l'avons vu dans l'état de l'art, le concept d'agent est une abstraction plus riche que le concept d'objet, en effet :

- Les agents ont une structure et un comportement plus complexes : les états internes s'expriment en termes de notions mentales (croyances, buts, ...) et non par de simples attributs.
- Alors que les objets ne deviennent actifs qu'à la réception d'un message, un agent agit pour atteindre ses buts, selon un plan déterminé. Ceci confère une autonomie d'action face aux événements extérieurs et aux messages en provenance d'autres agents.
- Les interactions entre agents mettent en œuvre des messages structurés organisés en protocoles.
- Enfin, les agents sont sociaux, l'organisation dans la quelle ils interviennent doit être définie.

Malgré l'expansion des technologies agents, l'apparition de méthodes adaptées ne concerne, pour la plupart de ces propositions que le niveau analyse. A ce niveau il s'agit de décrire les spécifications fonctionnelles du système à développer (le quoi) en identifiant les agents et les services qui leurs sont associés et en représentant les relations et interactions entre ces différents agents. Le niveau conception qui définit l'architecture logicielle permettant la réalisation du système (le comment), est actuellement encore mal appréhendé, principalement du fait de l'absence de standard tant pour la définition d'un agent que de son architecture interne.

L'approche orientée agents consiste à décomposer les problèmes en agents autonomes capables d'interactions au sein d'une organisation. Les propositions de méthodologies, dans la phase d'analyse du système, se concentrent sur les concepts organisationnels visant à décrire l'activité du système. Pour cerner ces aspects organisationnels, l'identification des rôles est primordiale, elle constitue un préambule à la plupart des propositions méthodologiques rencontrées.

### **6.3.1. Identification des rôles des agents**

Le modèle de l'organisation multi-agents que nous proposons (voir figure 22) repose sur la définition des agents à partir des rôles qu'ils peuvent tenir. Le rôle permet tout à la fois de représenter la fonction qu'accomplit l'agent et la position qu'il tient dans une organisation (Collinot et Drogoul, 1996)

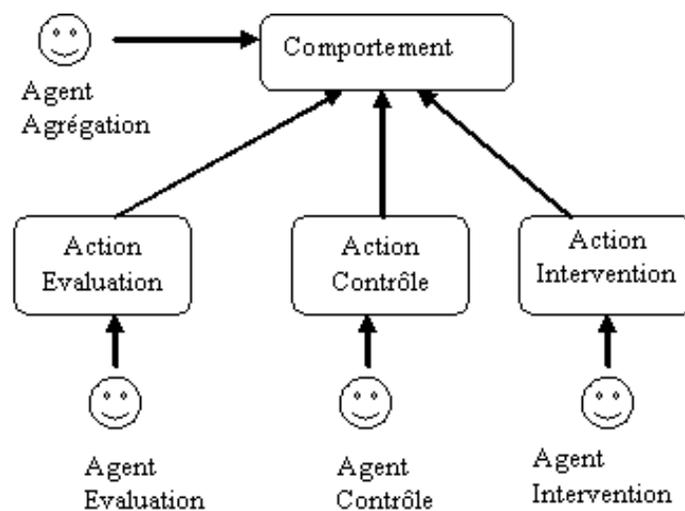
Après avoir identifié les rôles nécessaires à l'application, il s'agit de les décrire en termes de responsabilité. Une fois l'ensemble des rôles définis, chacun est affecté à un type d'agent. Le résultat de cette étape est présenté dans le tableau 7, où à un type d'agent est associé un ensemble de rôles.

Ainsi l'agent Contrôle sera chargé d'évaluer la compétence contrôle qui est représentée par toutes les actions de type contrôle réalisées par le joueur durant la session du jeu et prendra part à la négociation éventuelle sur le succès de la mission du joueur dans la campagne de lutte. Les rôles des agents Intervention et Evaluation sont identiques à celui de l'agent Contrôle mais respectivement pour les compétences Intervention et Evaluation.

L'agent Agrégat est responsable de l'évaluation globale du joueur. Cette évaluation repose sur les évaluations individuelles par les agents évaluateurs. L'Agent Agrégat procède au calcul de la moyenne des scores attribués par les agents évaluateurs, et décide suivant un algorithme, réalisé conjointement avec les responsables du service de protection des végétaux, suivant cette moyenne il sera annoncé le succès, l'échec ou le recours à la négociation pour statuer sur la mission du joueur durant la session de jeu.

**Table 7.** Types d'agent et rôles affectés

Type d'agent	Nb	Rôles tenus
Agent Contrôle	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer la compétence contrôle représentée par l'accomplissement des actions de type contrôle (voir section 6.2.)</li> <li>- Participer à la négociation de l'évaluation globale du joueur.</li> </ul>
Agent Intervention	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer la compétence intervention représentée par l'accomplissement des actions de type intervention.</li> <li>- Participer à la négociation de l'évaluation globale du joueur.</li> </ul>
Agent Evaluation	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluer la compétence évaluation représentée par l'accomplissement des actions de type évaluation.</li> <li>- Participer à la négociation de l'évaluation globale du joueur.</li> </ul>
Agent Agrégat	1	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Evaluation globale du joueur à la base des évaluations de ses différentes compétences.</li> <li>- Initiation du processus de négociation dans le cas où l'évaluation globale nécessite un recours à la négociation.</li> </ul>



**Figure 22.** Organisation multi-agents pour l'évaluation du comportement d'un joueur

### 6.3.2. Architecture interne des agents

De manière générale, l'architecture interne de nos agents comporte plusieurs modules (figure 23):

- **Le module de perception des actions du joueur** : consiste à percevoir et enregistrer les actions du joueur et ses choix sur l'interface du micro-jeu associée à chaque situation et à chaque rôle, l'évaluation des actions est réalisée suivant le type d'action de la compétence (voir la section 6.4.4.1). Une action du joueur peut être associée à un clic sur un bouton, un choix de paramètre, une visualisation typée, un calcul, un affichage de données, ou une action parmi les actions proposées au joueur dans une situation donnée. Ces actions sont comptabilisées et classées selon qu'elles soient correctes, erronées ou sans effet. Toutes ces données seront ensuite envoyées au module d'évaluation floue pour évaluer la compétence concernée.
- **Le module Evaluation floue** : ce module est chargé d'évaluer les actions du joueur selon la théorie de la logique floue afin de lever le biais sur l'évaluation vu que les actions réalisées par le joueur sont classées par niveau de difficulté (voir la section suivante). Ce module est subdivisé en 03 sous modules qui sont : le sous module fuzzification, le sous module inférence et le sous module défuzzification. Chacun de ces sous modules est responsable d'une étape du processus. Plus de détail sur chacune de ces étapes est donné dans la section Evaluation de compétence.
- **Le module négociation** : le recours à la négociation est initié par l'agent Agrégat qui suite au calcul de la moyenne et évaluation du niveau du joueur décide de recourir à la négociation pour statuer sur le succès ou l'échec de la mission de ce joueur. Ce module prend en charge le protocole de négociation et les primitives propres à chaque type d'agent. Le processus de négociation est décrit dans la section 6.4.2.

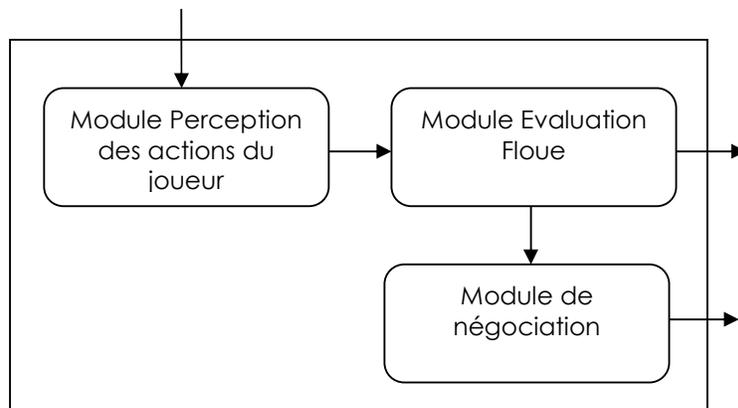


Figure 23. Architecture interne d'un agent évaluateur

## **6.4. Modélisation de l'évaluation**

Selon Bloom (Bloom, 1971), la fonction de l'évaluation diffère suivant le moment où elle est pratiquée, avant, pendant ou après un temps de formation. Dans notre contexte, pour rendre cette évaluation significative, il est important de comparer les aptitudes du joueur à une mesure commune. A cet effet, nous adoptons l'évaluation critériée qui a pour but de fournir des informations sur l'écart entre le comportement visé et le degré de maîtrise des acquisitions attendues (Hadji, 2000). Avant d'entamer le modèle de l'évaluation proposé, nous présentons les notions d'évaluation critériée et de critères.

En pédagogie moderne, l'essentiel n'est pas la sélection d'une minorité de surdoués, mais bien la promotion de tous. Dans le cadre d'une évaluation, on s'intéresse aux performances réalisées par les apprenants (joueurs). Les références de l'évaluation peuvent se résumer à des références critériées :

### **La référence critériée**

Il s'agit dans ce cas, d'évaluer une performance en la situant par rapport à des critères car la seule référence utile dans une perspective pédagogique est celle qui situe la performance de l'élève par rapport à des objectifs d'apprentissage ; elle est qualifiée de critériée.

Dans cette approche, c'est une rupture avec la conception classique qui met l'accent sur la sélection. Un changement de paradigme s'opère. La performance individuelle n'est plus estimée en fonction de celles des autres, mais bien en fonction de la distance qui la sépare d'un objectif d'apprentissage dont une définition opérationnelle ou opératoire précise les critères qui permettent de dire dans quelle mesure elle est atteinte. Dès lors, un maximum d'apprenants doit pouvoir maîtriser un maximum d'objectifs d'apprentissage. En quelque sorte, l'enseignant doit combattre la « distribution normale » (la fameuse courbe de Gauss) caractérisée par un faible taux de résultats supérieurs. On parle, dans ce sens, de « pédagogie de maîtrise ». Selon la règle « 80/80 » de GAVINI, à la fin d'une formation, 80 % des apprenants devraient atteindre 80 % des objectifs prévus.

Dans la nouvelle conception de l'évaluation il est simplement indiqué si le candidat maîtrise ou pas les capacités minimales et terminales de l'unité concernée. Cela nécessite de repérer ces capacités au préalable et de déterminer les critères qui permettent de décider si ces capacités sont maîtrisées ou pas : d'où le nom d'évaluation critériée.

Dès lors des interrogations s'imposent : qu'est-ce qu'un critère ? Comment le formuler dans une évaluation ?

## **La notion de critères et d'indicateurs**

Il est toujours utile de rappeler lorsqu'on aborde ces deux concepts que les critères sont référés à une compétence donnée tandis que les indicateurs sont corrélés à une situation d'évaluation. Dès lors, les indicateurs changent en fonction de la situation.

Dans le cadre d'une évaluation, on s'intéresse aux performances réalisées par les élèves.

Puisqu'il s'agit d'une évaluation à interprétation critériée, on ne se focalise plus à ce que l'élève réalise un score donné à une épreuve, mais à ce qu'il satisfasse à un certain nombre de critères liés à la maîtrise d'objectifs.

On peut donc concéder au critère les considérations ci-dessous :

- un critère est un élément auquel on se réfère pour porter une appréciation, un jugement,
- le critère apparaît comme repère sur lequel les acteurs s'entendent à un moment donné ;
- le critère est un élément de communication entre la personne qui évalue et la personne qui est évaluée ;
- le critère est un langage sur lequel les acteurs s'entendent pour évoquer le niveau des acquis ou la qualité des acquis.

Dans nos classes nous utilisons les critères d'évaluations suivants : l'échelle de notes de 0 à 20 et l'échelle des appréciations (nul, passable, bien, très bien, excellent), c'est ainsi que 10/20 devient un critère pour le passage en classe supérieure. Il est proche de la notion de seuil de réussite. Dans nos travaux, nous nous inspirons de ce critère pour valider la mission du joueur. Il s'agit de fixer un seuil pour le succès de la mission, un seuil pour l'échec et un intervalle pour la négociation du niveau de l'apprenant.

Nous présentons dans cette section une approche d'évaluation pragmatique à base d'agents permettant de statuer sur l'efficacité du joueur dans un contexte de simulation multi agents participative appliquée à la lutte anti-rongeur. Afin d'analyser les actions des joueurs, nous avons adopté un système d'évaluation collaborative à deux niveaux (figures 24a, 24b). Au premier niveau, trois agents, l'Agent Évaluation, l'Agent Contrôle et l'Agent Intervention sont chargés d'apprécier les connaissances des joueurs dans trois compétences différentes. Le recours à la théorie des ensembles flous à ce niveau permet une évaluation analogue à celle d'un expert. Au deuxième niveau l'agent Agrégat assure une évaluation globale élaborée à la base des évaluations individuelles de chaque agent. Au lieu de considérer un critère seuil qui décide de la réussite et de l'échec de la mission du joueur, nous avons préféré une évaluation collaborative négociée semblable aux évaluations scolaires qui favorisent les élèves selon leurs résultats. Ainsi, dans certaines situations, un processus de négociation est initié par l'agent Agrégat dans lequel chaque agent utilise les

résultats du joueur dans sa compétence pour défendre sa position. L'évaluation finale est le résultat de cette négociation.

En favorisant l'évaluation par compétence au premier niveau, nous assurons une représentation granulaire de l'état des connaissances de chaque joueur. L'agrégation des différentes compétences nous renseigne sur le degré de maîtrise globale du rôle joué par l'acteur. Nous présentons dans ce qui suit l'évaluation de la compétence et son rôle dans l'évaluation globale du comportement du joueur.

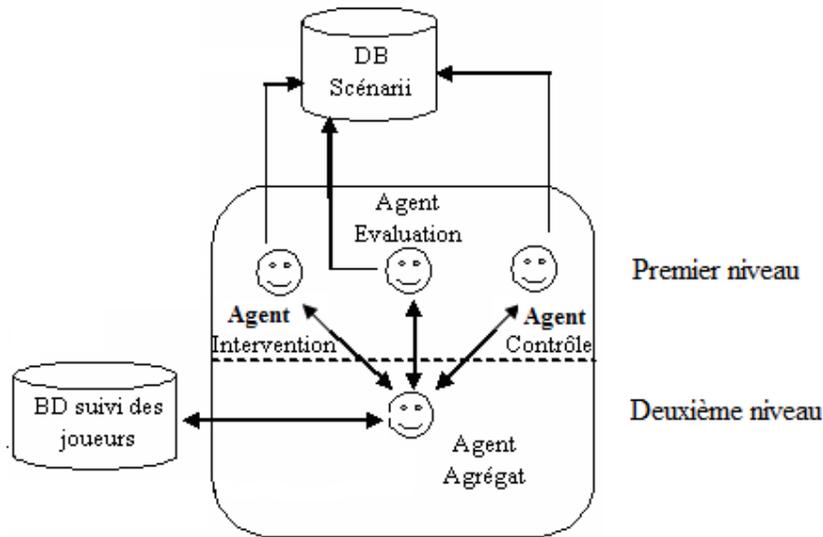


Figure 24a. Modèle d'évaluation

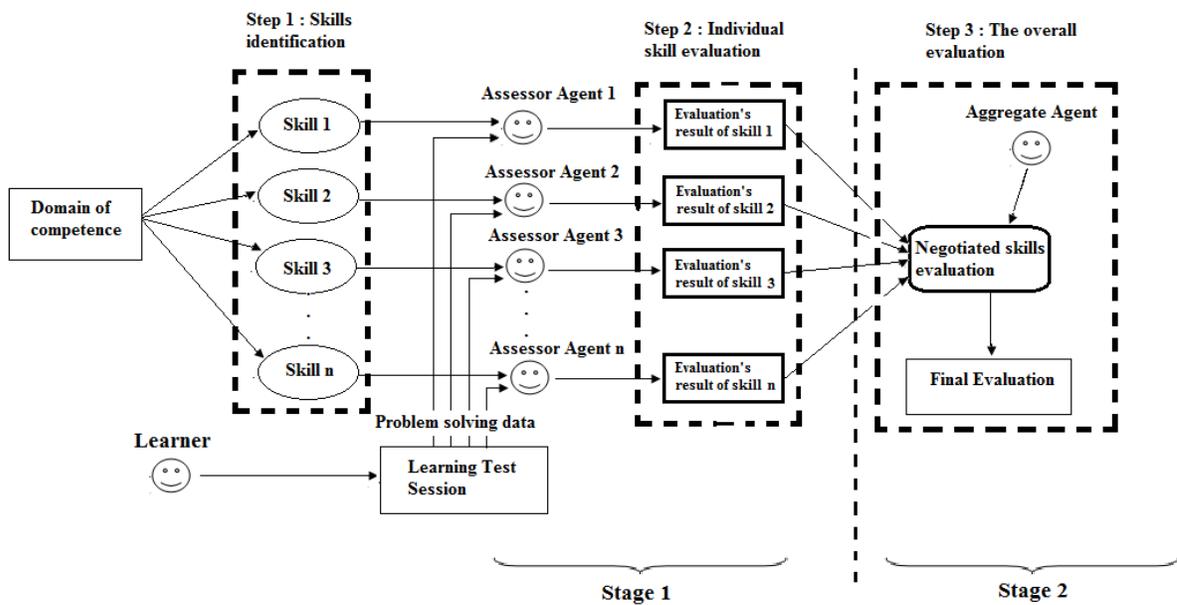


Figure 24b. Vue général du système d'évaluation adopté pour plusieurs compétences

### **6.4.1. Evaluation de la compétence**

La présence d'information imparfaite est un facteur important qui mène souvent aux erreurs dans l'évaluation de l'apprenant. Cette imperfection semble due aux erreurs et aux approximations impliquées lors du recueil de l'information, partiellement en raison de la nature abstraite de la connaissance humaine et de la perte d'information résultant de sa quantification. Afin de traiter cette imperfection, nous proposons d'utiliser une approche basée sur la théorie des ensembles flous. Dans le but d'évaluer les compétences du joueur, nous avons modélisé les connaissances des experts du domaine afin de les utiliser par notre système d'évaluation sous forme de processus d'inférence.

#### **6.4.1.1. Approche d'évaluation**

Afin de mesurer la connaissance du joueur dans chaque compétence, nous avons imposé un niveau de difficulté sur les actions réalisables pour chaque rôle. Ainsi, trois niveaux de difficulté sont dégagés : (i) Actions à niveau de difficulté élevé, (ii) Actions à niveau de difficulté moyen et (iii) Actions à niveau de difficulté faible. Par ailleurs, l'échelle utilisée pour le classement des connaissances des joueurs s'inspire de la classification classique des performances employée par les évaluateurs : (i) insuffisant, (ii) acceptable et (iii) satisfaisant (Merrill, 1983). Le processus d'évaluation consiste à vérifier les actions réalisées par le joueur sur l'interface du micro-jeu. L'agent responsable de l'évaluation de la compétence comptabilisera le nombre des actions réalisées (pourcentage des actions réalisées par niveau de difficulté) par rapport aux actions réalisables du scénario. L'évaluation de chaque type d'action respecte les spécificités de ce type d'action :

**Evaluation des actions de contrôle** : il s'agit pour l'agent Contrôle de vérifier pour chaque action si les indicateurs référant à cette action ont été identifiés et utilisés correctement par le joueur. Par exemple, pour évaluer l'action "Estimation du risque d'infestation" l'agent Contrôle vérifie si le joueur (assurant le rôle de l'agent phytosanitaire) a identifié les indicateurs suivants :

- Nombre de signalisations de présence des joueurs dans une zone,
- Calcul de l'indice de risque de cette zone,
- Historique des infestations de cette zone,
- Données pluviométriques de cette zone.

**Evaluation des actions d'intervention** : une action d'intervention consiste à réaliser une ou plusieurs tâches ordonnancées au préalable. L'agent Intervention vérifie le séquençement de ces tâches et leurs temps de réalisation. Par exemple, l'évaluation de l'action prospection vérifie si le joueur a réalisé les tâches suivantes :

- Choix des zones prioritaires (tâche N° : 01)
- Consultation de l'historique d'infestation de ces zones (tâche N° : 02)
- Prospection des zones suivant le type du sol (prospection des sols calcaires en premier) (tâche N° : 03).
- Prospection des zones jachères en deuxième temps (tâche N° : 04).

Le séquençement correct de ces tâches indique que le prospecteur maîtrise cette action, cependant si ces tâches sont réalisées dans le désordre, l'agent Intervention estime que le joueur maîtrise à un degré moins la réalisation de ces tâches (maîtrise la réalisation des tâches mais pas leur séquençement).

**Evaluation des actions d'Evaluation :** afin d'évaluer ce type d'action, l'agent Evalueur vérifie si le joueur a bien évalué une situation à la quelle il est confronté ou s'il a estimé correctement le besoin en ressources pour répondre à une nécessité. Par exemple, en considérant l'évaluation d'une situation telle que la surface totale infestée (par le joueur : agent phytosanitaire), suite à un rapport de prospection, le joueur devrait comparer l'infestation actuelle de cette zone avec son infestation de l'année dernière pour valider les chiffres données par les prospecteurs. Un exemple d'estimation de besoin en ressources est la détermination de la quantité de raticide à commander auprès de l'INPV (par l'agent phytosanitaire aussi).

#### **6.4.1.2. Le modèle flou**

La logique binaire est basée sur vrai ou faux. De temps en temps cette méthode n'est pas applicable pour formaliser des actions humaines. Un exemple est le phénomène 'être vieux'. Demandons-nous : quand est-on vieux ? La logique binaire poserait simplement : mettez une frontière avec une valeur numérique par exemple quelqu'un est vieux à 60 ans. Mais cela veut dire que quelqu'un le jour avant son anniversaire est encore jeune et le jour après il est vieux. Cette transition est trop brusque. On peut exprimer le terme linguistique vieux d'une façon mathématique par construction d'une transition qui donne une certaine valeur de vérité selon l'âge. On peut interpréter ceci comme une valeur de probabilité. On demande à cent personnes quand une personne est vieille il y en a qui vont répondre à 52, d'autres répondent à 55, encore un autre à 66. Le groupe va construire une valeur de vérité pour la notion vieux. Le nombre de personnes qui trouve quelqu'un vieux à un certain âge est la valeur de vérité. Par exemple dans un groupe de cent personnes 5 personnes trouvent que quelqu'un est vieux à 55 et 7 personnes trouvent que quelqu'un est vieux à 67 et 25 personnes trouvent que quelqu'un est vieux à 60. Donc 60 ans a la valeur de vérité de 25 et 67 a une valeur de vérité de 7. D'une telle manière on construit une courbe qui représente 'être vieux' et cette courbe est appelée fonction d'appartenance.

Le modèle flou représente la connaissance de l'expert en forme linguistique et inclut les caractéristiques du joueur sous forme d'un ensemble de systèmes flous permettant ainsi une évaluation analogue à celle d'un expert.

Au départ, la théorie de la logique floue s'affirme comme une technique opérationnelle. Utilisée à côté d'autres techniques de contrôle avancé, elle fait une entrée discrète mais appréciée dans les automatismes de contrôle industriel.

Les bases théoriques de la logique floue (fuzzy logic) ont été établies au début des années 1965 par le professeur Zadeh de l'université de Californie de Berkeley.

Cette technique associe les notions de « sous-ensemble flou » et de « théorie des possibilités ».

Il s'agit d'une approche calquée sur le raisonnement humain plutôt que sur des calculs rigides; pour des problèmes mal définis, l'être humain est irremplaçable.

En effet, le mode de raisonnement en logique floue est plus intuitif que la logique classique. Il permet aux concepteurs de mieux appréhender les phénomènes naturels, imprécis et difficilement modélisables en s'appuyant sur la définition de règles et de fonctions d'appartenance à des ensembles dits « ensembles flous ».

Un ensemble flou est caractérisé par une fonction d'appartenance  $f: E \rightarrow [0,1]$ , qui positionne les membres de l'univers de discours  $E$  dans l'intervalle d'unité  $[0,1]$  (Zadeh, 1965). La valeur 0 signifie que le membre n'est pas inclus dans l'ensemble donné, 1 décrit un membre complètement inclus. Les valeurs entre 0 et 1 caractérisent les membres flous. L'univers de discours d'une variable couvrira l'ensemble des valeurs prises par cette variable. Dans notre cas, l'univers de discours  $E$  correspond au pourcentage des actions réalisées, discrétisé en 11 éléments  $\{0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100\}$ .

Le processus d'automatisation floue est réalisé en trois étapes.

- **Fuzzification** : Transformation de variables quantitatives en variables logiques floues. Pour cela on assigne des fonctions d'appartenances aux valeurs d'entrée.
- **Inférence floue** : utilisation de règles logiques pour évaluer de nouvelles variables floues en sortie.
- **Défuzzification** : transformation de ces variables floues en variables. Il y a plusieurs possibilités mais la plus utilisée est la méthode du centre de gravité.

#### **Etape 1 - Fuzzification**

Dans l'étape de transformation de variables quantitatives en variables logiques floues (*fuzzification* : transformation des résultats du joueur en variables floues), nous avons défini trois variables d'entrée et une variable de sortie en collaboration avec les experts de la DSA:

VE1 : pourcentage des actions réalisées avec un niveau de difficulté faible,

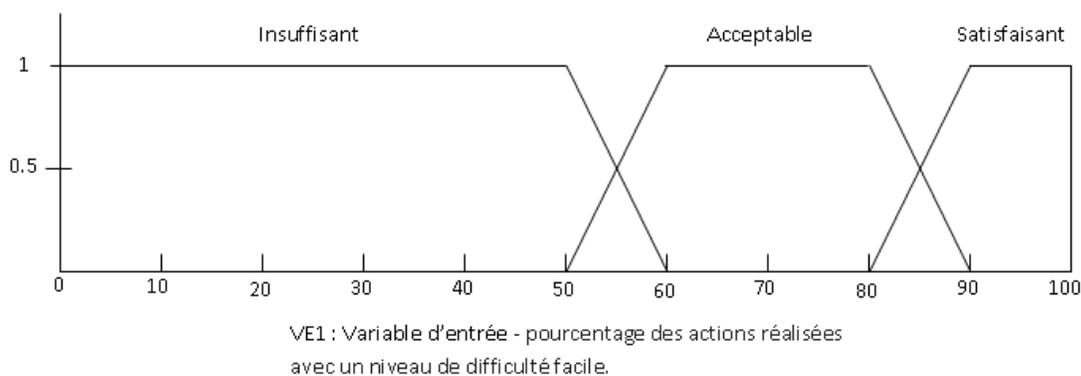
VE2 : pourcentage des actions réalisées avec un niveau de difficulté moyen,

VE3 : pourcentage des actions réalisées avec un niveau de difficulté élevé.

VS (variable de sortie) : représente le niveau de connaissance qualitatif du joueur {Très faible, Faible, Insuffisant, Moyen, Bon, Très bon, Excellent}.

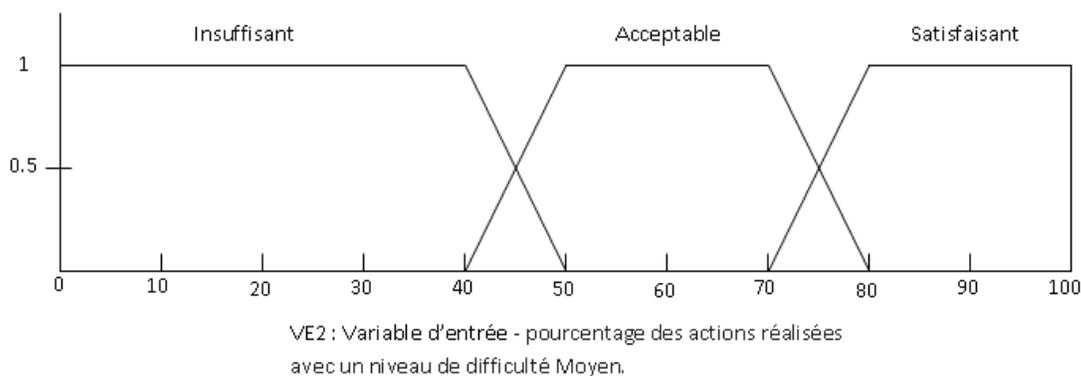
Pour chacune de ces variables une fonction d'appartenance est définie en collaboration avec les experts du domaine de la lutte anti-rongeurs.

Nous avons divisé l'univers de discours de chaque variable d'entrée en trois sous ensembles flous {Insuffisant, Acceptable, Satisfaisant}.

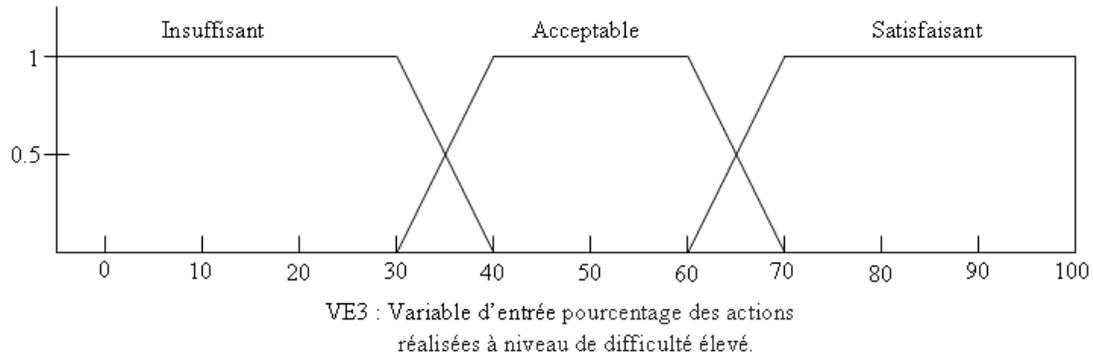


**Figure 25.** Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE1

La fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE1 traduit le pourcentage des actions réalisées avec un degré de difficulté facile, ainsi si le joueur a réalisé correctement entre 0 et 60% des actions ceci est considéré insuffisant mais avec des degrés différents entre 0 et 1. Si le joueur a réalisé entre 50 et 90% des actions le jugement est acceptable (là aussi avec des degrés différents) et entre 90 et 100% des actions on considère que son niveau est satisfaisant.



**Figure 26.** Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE2

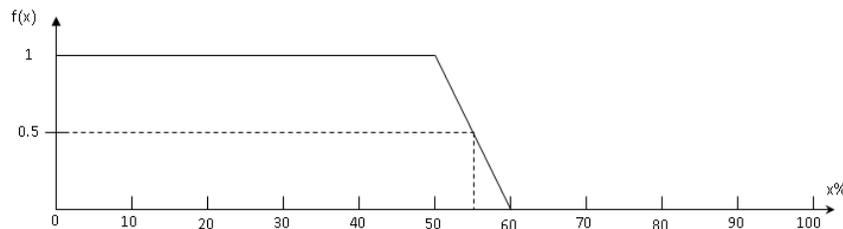


**Figure 27.** Fonction d'appartenance pour la variable d'entrée VE3

Comme exemple, considérons le sous-ensemble flou 'Nombre d'actions insuffisant' de l'entrée VE1 (figure 25). La fonction d'appartenance établie avec les experts de la DSA est comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Si } x \leq 50\%, f(x)=1 \\ \text{Si } 50\% < x \leq 60\%, f(x) = \frac{60-x}{60-50} = \frac{60-x}{10} \\ \text{Si } x > 60\%, f(x)=0 \end{array} \right.$$

Pour  $x = \{0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100\}$  : pourcentage des actions réalisées correctement par le joueur.



**Figure 28.** Fonction d'appartenance du sous ensemble flou 'Nombre d'actions insuffisant' de l'entrée VE1

Il en résulte que pour  $x=55$ , la valeur de la fonction  $f$  est  $f(55)=0.5$  : ceci signifie que le niveau de connaissance d'un joueur qui a réalisée correctement 55% des actions avec un degré de difficulté facile peut être considéré 'insuffisant' au degré de 0.5.

### Etape 2- Règles d'inférence

La conception d'une base de règles floues est un processus interactif. La plus grosse part de travail se trouve au niveau du recueil des connaissances expertes. Ainsi, en utilisant les données correspondant aux différentes entrées et sorties, les experts de la DSA fournissent

une série de combinaisons qui se rapprochent de leur raisonnement. Un des intérêts de la logique floue est la possibilité de valider la base de règles auprès de ceux qui ont fourni l'expertise, avant de la tester sur un système.

L'étape suivante consiste à concevoir une base de règles floues et à établir les règles d'inférence, ces règles ont été validées par les experts du domaine. L'agent évaluateur utilisera ces règles d'inférence pour positionner le niveau du joueur sur l'échelle de classement. Nous avons établi 27 règles d'inférences correspondants aux différentes évaluations relatives aux trois niveaux de difficulté.

*Exemple* : SI (EADF = Satisfaisant) ET (EADM=Satisfaisant) ET (EADE= Insuffisant) ALORS (Niveau connaissance= Moyen).

Avec : EADF : Évaluation des Actions à Difficulté Faible,

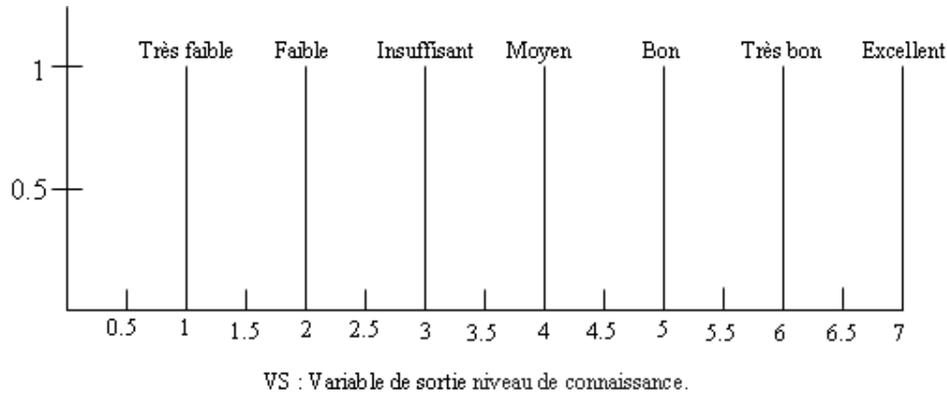
EADM : Évaluation des Actions à Difficulté Moyenne,

EADE : Évaluation des Actions à Difficulté Élevé.

### **Etape 3- Défuzzification**

A la fin de l'inférence, l'ensemble flou de sortie est déterminé par l'agent évaluateur, mais il n'est pas directement utilisable pour fournir une information précise. Il est nécessaire de passer du monde flou au monde réel, c'est la défuzzification. Il existe plusieurs méthodes, dont la plus utilisée est le calcul du centre de gravité de l'ensemble flou. La valeur de sortie 'VS', une fois évaluée au moyen des règles d'inférence, puis défuzzifiée, donne une estimation du niveau de connaissances du joueur en fonction du pourcentage des actions réalisées correctement pour chacune des compétences (Actions de contrôle, Actions d'intervention et Actions d'évaluation).

Les sous ensembles flous associés à la variable de sortie 'VS' sont {Très faible, Faible, Insuffisant, Moyen, Bon, Très bon, Excellent}. La génération de la variable de sortie se fait par l'agent évaluateur en utilisant la méthode du centre de gravité, selon laquelle l'agent calcule le nombre puis l'arrondit au nombre entier le plus proche. Selon le résultat obtenu, l'agent évalue le niveau de connaissance du joueur dans la compétence considérée. Ainsi, si (VS=1), l'agent caractérise le niveau de connaissance du joueur comme 'Très faible', si (VS=2) comme 'Faible', si (VS=3) comme Insuffisant, si (VS=4) comme 'Moyen', si (VS=5) comme 'Bon', si (VS=6) comme 'Très bon' et si (VS=7) comme 'Excellent'.



**Figure 29.** Fonction d'appartenance pour la variable de sortie VS

L'approche d'évaluation basée sur la théorie des ensembles flous permet une estimation du niveau de connaissance du joueur aussi proche que possible de celle de l'expert du domaine. Ainsi, le joueur est conscient des forces et des faiblesses de son comportement. A la fin du jeu, chacun des agents évaluateurs dispose d'une estimation du niveau de connaissance du joueur dans la compétence considérée. Cette évaluation partielle contribuera à une évaluation globale dirigée par l'agent Agrégat du deuxième niveau.

#### 6.4.2. Evaluation globale

Nous avons exposé les différentes échelles d'évaluations aux experts de la DSA (direction des services agricoles) afin de définir les niveaux de validation et de l'échec de la mission du joueur. Ils ont argumenté le choix du niveau de validation par les graves conséquences qu'engendrerait une maîtrise moyenne des compétences de chaque acteur. Finalement, le consensus pour la validation de chaque compétence est fixé à BON (voir table 8).

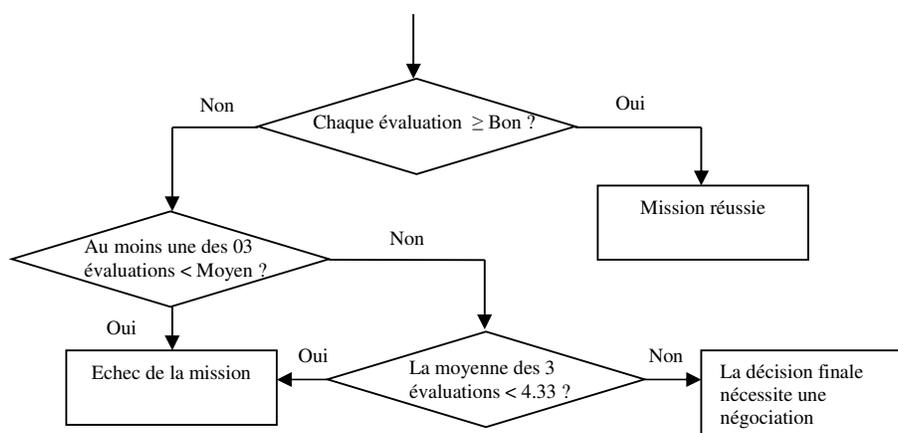
**Table 8.** Échelle d'évaluation

Très faible	Faible	insuffisant	Moyen	Bon	Très bon	Excellent
1	2	3	4	5	6	7

Cependant, ils tolèrent la compensation entre les différentes compétences avec un score seuil minimum pour chaque compétence, à l'inverse d'autres domaines de comme la médecine où la compensation entre les compétences n'est pas acceptée (Frank et al., 2010). Dans le diagnostic des compétences, deux classes de modèles ont été couramment utilisés: les modèles conjonctifs et les modèles compensatoires. Si un domaine de connaissance nécessite des compétences multiples et lorsque la faible maîtrise d'une seule d'entre elles suffit pour ne pas avoir cette connaissance du domaine, le modèle est considéré comme faisant partie de la classe des modèles conjonctifs, ce qui signifie que toutes les compétences sont nécessaires à la maîtrise des connaissances correspondantes.

Inversement, si une forte maîtrise de certaines compétences est suffisante pour réussir un test, il sera considéré comme faisant partie de la classe des modèles compensatoire (Desmarais et al., 2012) (Roussos et al., 2007). Notre approche combine les deux classes de modèles, en définissant un degré de maîtrise seuil de chacune des compétences et en autorisant la compensation entre les compétences par le moyen d'attribution des bonus.

À la réception des trois évaluations (fournis par les agents évaluateurs), l'agent agrégat analyse chacun d'elles individuellement et calcule la moyenne si nécessaire. Trois décisions peuvent être prises (mission réussie, échec de la mission, l'évaluation nécessite une négociation). Notez qu'un score minimum est fixé pour le succès possible de la mission (c'est à dire que le joueur a mené avec succès la campagne de lutte). Ce score est calculé en fonction de l'intervalle couvert par l'octroi des bonus. Au-delà du score 4.33, aucun bonus n'est attribué et donc le jeu n'est pas validé (cf. la mission a échoué). L'analyse de l'agent agrégat obéit à l'algorithme représenté à la figure 30.



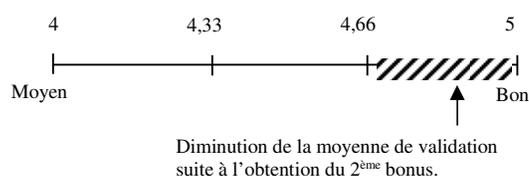
**Figure 30.** Décision de l'agent agrégat

L'évaluation a un impact sur l'apprentissage des élèves, de nombreuses études ont démontré que les élèves bénéficient considérablement de l'évaluation collaborative. Selon Pitts (Pitts et al., 2002), l'évaluation collective permet de fournir une meilleure évaluation de l'apprenant afin d'améliorer ses compétences. En outre, Rees et Sheard (Rees et Sheard, 2004) suggèrent par les résultats de leurs études que la discussion et la négociation entre les évaluateurs indépendants peuvent améliorer la fiabilité des critères d'évaluation de portfolios. Dans le même contexte, plusieurs auteurs montrent que l'attribution des bonus aux étudiants est l'une des stratégies d'intervention sur l'engagement cognitif et la réussite scolaire (Black et Duhon, 2003) (Tuckman, 1996).

### 6.4.2.1. Processus de négociation

Selon Brna (Brna et al., 1999), l'évaluation collaborative permet de fournir à l'apprenant le meilleur retour pour améliorer ses compétences. Cette collaboration se traduit par une négociation entre les évaluateurs afin d'utiliser certains atouts au profit ou à l'encontre de l'apprenant. Généralement ces avantages concernent les résultats de l'apprenant, son assiduité, sa discipline, etc. Dans notre cas, nous matérialisons ces atouts par l'attribution de bonus pour favoriser le joueur selon ses résultats actuels (session de jeu courante).

Les points bonus sont généralement donnés pour des facteurs tels que l'attitude des élèves, les efforts fournis par ceux-ci, l'achèvement des travaux dans les délais et / ou de propreté de l'ouvrage fini. Dans notre approche, nous proposons d'attribuer des bonus pour encourager le joueur en fonction de ses résultats actuels (session en cours). L'obtention d'un bonus permet de diminuer le score de validation du jeu (initialement égale à 5 pour 'Bon') de 0.17 pour le premier bonus et de 0.34 pour le deuxième bonus. Le choix du score de validation du jeu après avoir obtenu un bonus a été établi en collaboration avec les experts de la DSA.



**Figure 31.** Calcul de la moyenne de validation

Notons que Le choix de la valeur de réduction de la moyenne suite à l'obtention d'un bonus a été établi en collaboration avec les experts de la DSA. Par exemple, dans le cas de la figure 31, si le score moyen de l'apprenant est égal à 4.66 (inférieur au score de validation  $4.66 < 5$ ) et qu'un agent évaluateur lui a attribué le bonus 2, le nouveau score de validation pour ce joueur qui sera proposé par cet agent durant la négociation est de  $5 - 0,34$ .

Le processus de négociation que nous proposons peut être assimilé à une négociation entre 3 vendeurs (nos 3 agents évaluateurs) et un acheteur (l'agent Agrégat) pour l'achat d'un produit. Le produit sera vendu à l'acheteur si au moins deux des trois agents donnent leurs accords. L'agent agrégat dispose d'une somme d'argent (par analogie la moyenne obtenue par le joueur). Les trois vendeurs négocient le prix de vente, ils doivent proposer un prix de vente à l'acheteur (en l'occurrence une moyenne de validation) sachant que chacun d'eux ne puisse dépasser un certain seuil propre à lui (sa moyenne après calcul et attribution des bonus 1 et 2). L'agent agrégat lui-même peut attribuer un 3<sup>ème</sup> bonus qui consiste à ajouter la valeur 0.17 au score moyen du joueur si celui-ci a réalisé au moins les 2/3 de toutes les actions réalisables nécessaires.

### 6.4.2.2. Attribution des bonus

- **Bonus 1** : est attribué par l'agent évaluateur si le joueur a réalisé au moins 80% des actions avec un niveau de difficulté élevé, dans le cas contraire le joueur ne bénéficie pas de ce bonus. L'obtention du bonus 1 permet de diminuer la moyenne de validation globale d'une valeur de 0,17.

- **Bonus 2** : chaque agent décide de l'attribution du 2<sup>ème</sup> bonus suivant la moyenne des scores (MS) obtenus dans la réalisation correcte des actions de la compétence.

\* Si  $MS \geq 6$  alors l'agent attribut le bonus 2 au joueur (diminution de la moyenne de validation globale d'une valeur de 0.34)

\* Si ( $MS \geq 5$  et  $MS < 6$ ) alors l'agent attribut la moitié du bonus 2 au joueur (diminution de la moyenne de validation globale d'une valeur de 0.17)

\* Si  $MS < 5$  alors l'agent n'attribut pas de bonus au joueur

- **Bonus 3** : L'agent agrégat peut attribuer un 3<sup>ème</sup> bonus qui consiste à améliorer la moyenne du joueur d'une valeur de 0.17 si celui-ci a validé les 2/3 des compétences du domaine (par exemple, si le score moyen du joueur est de 4.66, l'agent agrégat propose de valider la mission du joueur – durant la négociation – avec un score de  $4.66 + 0.17$ ).

Une fois les bonus déterminés par les agents et les nouvelles valeurs de validation calculées, chaque agent évaluateur construit sa table de satisfaction en affectant un degré de satisfaction à chaque score de validation qu'il peut proposer à l'agent agrégat au cours de la négociation. . Cette table de satisfaction sera utilisée dans le processus de négociation, l'agent évaluateur commence par proposer la première valeur de validation dans sa table, la proposition se poursuit jusqu'à ce qu'un accord soit atteint ou que le degré de satisfaction de la proposition soit nulle (cf. l'agent évaluateur abandonne la négociation).

Un exemple de trois tables de satisfaction correspondant à trois cas différents d'attribution des bonus est présentée dans le tableau 9, où dans le cas (a) bonus1 + ½ Bonus2 est attribué, dans le cas (b) les bonus 1 et 2 sont attribués à la fois et seulement le bonus1 est accordé dans le cas (c).

**Table 9.** Exemples de construction de table de satisfaction

Cas	Bonus	Valeur de Validation	Degré de satisfaction
a	1	4.83	2
	2	4.66	1
	0	4.50	0
b	1	4.83	3
	2	4.66	2
	2	4.50	1
	0	4.33	0
c	1	4.83	1
	0	4.66	0

Par exemple, dans le cas (a) la première valeur de validation est fixé à 4.83 (soit  $4.83 = 5 - 0.17$ ) suite à l'attribution du bonus 1, le degré de satisfaction correspondant à cette valeur est 2, car il ya une autre valeur de validation 4,66 (cf.  $4,66 = 4,83 - 0,17$ ) calculée après l'attribution de la moitié du bonus 2. Le degré de satisfaction de cette seconde proposition est égal à 1 car c'est la dernière proposition. La dernière valeur 4.5 a un degré de satisfaction nul, ce qui signifie que si l'agent agrégat propose à l'agent évaluateur de valider la mission du joueur avec un score inférieur ou égal à 4.50, l'agent évaluateur rejettera cette proposition. Notez que plus le degré de satisfaction est élevé, plus la croyance de l'agent évaluateur à faire la proposition correspondante est élevée.

#### 6.4.2.3. Protocole de négociation

La mise en œuvre de la négociation suppose la définition d'un protocole de communication entre agents et la mise au point de stratégies privées pour chacun des agents (Jennings et al., 2001). Nous présentons ici le protocole de négociation utilisé dans notre système d'évaluation et les règles utilisées par les agents permettant d'atteindre un compromis. L'objectif du protocole est de définir les messages que les agents pourront s'envoyer. Le protocole de négociation que nous proposons est caractérisé par une suite de messages échangés entre un initiateur (l'agent agrégat) et des participants (agents évaluateurs) comme dans le cadre du Contract Net Protocol (Smith, 1980).

Le protocole que nous proposons peut être décomposé en trois phases (voir figure 32):

- **La phase d'initialisation** : Cette phase est la première phase de notre protocole, elle initie la négociation. Elle comprend la fourniture des données, concernant le joueur, aux agents évaluateurs pour l'attribution des bonus et la construction des tables de satisfaction.

- **La phase de négociation** : Cette phase de notre protocole définit l'échange de messages entre les agents. Chaque agent utilise ses stratégies de concession, de refus, de proposition ou de promesse suivant sa table de satisfaction.

La négociation débute quand l'agent Agrégat envoie un appel d'offre (primitive *CallForPropose()* ) à tous les agents évaluateurs. Chacun des agents répond à cet appel d'offre par une proposition (primitive *Propose()* ). L'échange de messages continue jusqu'à la satisfaction des conditions d'arrêt. Dans certaines situations l'agent Agrégat promet à l'agent évaluateur de faire une concession si celui-ci lui accorde une concession à son tour.

- **La phase de décision finale** : Cette phase de décision finale aboutit soit à la validation de la mission du joueur soit à son échec. Cette décision est prise par l'agent Agrégat selon les réponses des agents évaluateurs aux propositions qu'il leur a faites. A la fin de chaque round de la négociation, l'agent Agrégat évalue les propositions. Deux situations peuvent alors se présenter :

1. l'agent Agrégat accepte au moins deux des trois propositions, la négociation se termine par un succès et la mission du joueur est validée avec succès.

2. l'agent Agrégat élimine au moins deux agents évaluateurs de la négociation, le processus de la négociation se termine sur un échec et le jeu n'est pas validé pour le joueur concerné.

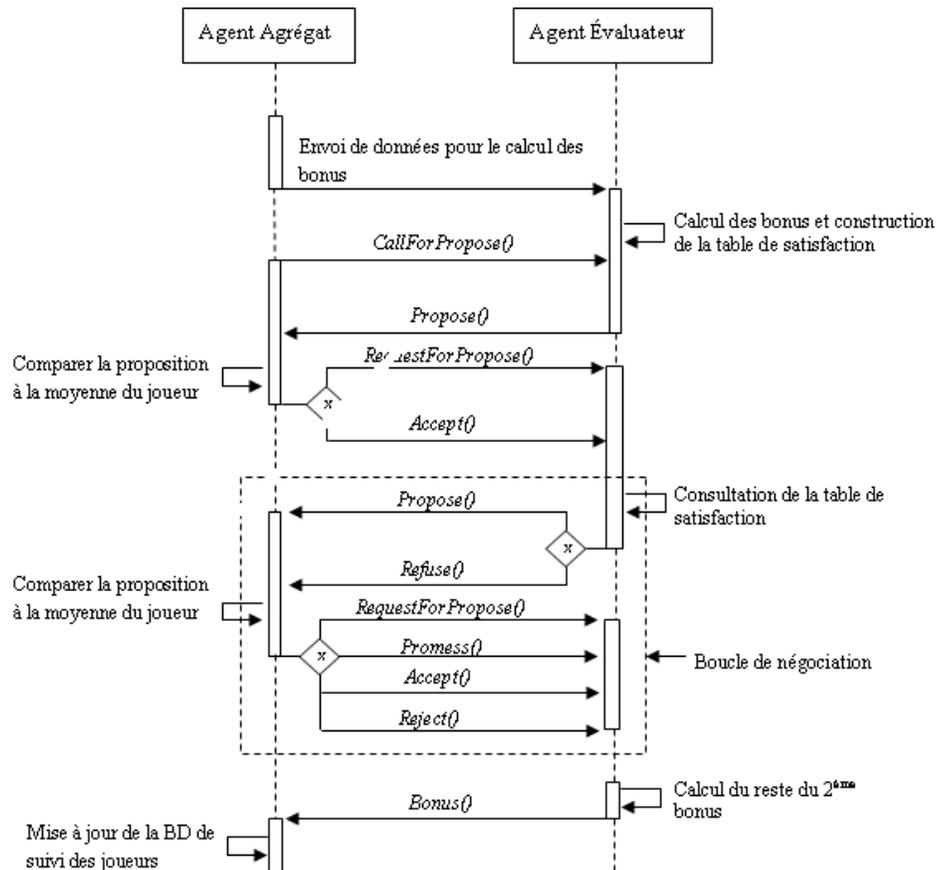


Figure 32. Processus de négociation entre l'agent Agrégat et un agent évaluateur

La figure 32 décrit le processus de négociation engagé une fois que l'agent Agrégat a décidé qu'un processus de négociation est nécessaire pour évaluer les actions du joueur au cours de la campagne simulée de lutte contre les rongeurs (c'est à dire après la fin du jeu de simulation). Le processus commence par l'envoi de données du joueur aux trois agents évaluateurs afin qu'ils calculent les bonus et construisent leurs tables de satisfaction. L'agent agrégat envoie alors un message **CallForProposal** aux agents évaluateurs. La négociation se poursuit jusqu'à ce que l'agent agrégat envoie le message **Accept** à au moins deux agents évaluateurs (cf. validation de la mission avec un score égal à la dernière proposition faite par les agents évaluateurs) ou s'il élimine au moins deux agents évaluateurs du processus de négociation (cf. échec de la mission du joueur).

#### 6.4.2.4. Primitives de négociation

Pour mener à bien un processus de négociation entre agents, il est nécessaire de définir des primitives spécifiques à l'initiateur et des primitives spécifiques aux participants. Nous avons introduit une nouvelle idée dans le processus de négociation qui consiste à faire une promesse de concession par l'agent agrégat à l'agent évaluateur si celui-ci accepte de faire une concession à son tour. Le séquençement de ces primitives entre l'agent Agrégat et un des agents évaluateurs est représenté à la figure 32. Examinons plus en détail ces primitives dans la table 10 et la table 11.

**Table 10.** Les primitives de l'agent agrégat

<b>Primitive</b>	<b>Sémantique</b>
<i>CallForPropose ()</i>	C'est la première primitive que l'agent Agrégat envoie aux agents évaluateurs pour les inviter à envoyer leurs propositions.
<i>RequestForPropose (g)</i>	En réponse aux messages <b>Propose(v, prop)</b> , l'agent Agrégat compare la moyenne du joueur à la proposition de l'agent évaluateur (valeur de validation proposée à partir de la table de satisfaction), si cette proposition est supérieure à la moyenne du joueur, il demande aux agents évaluateurs concernés (composant le groupe g) d'améliorer leurs propositions. Cette amélioration consiste à diminuer la valeur du score de validation d'un pas égale à 0.17.
<i>Accept (v, prop)</i>	L'agent agrégat accepte la proposition prop de l'agent évaluateur v.
<i>Reject (v)</i>	L'agent évaluateur v est éliminé de la négociation suite à un double refus de concession.
<i>Promise (v, prop)</i>	L'agent Agrégat promet à l'agent v de faire une concession (pas de concession = 0.17) si ce dernier accepte à son tour de proposer une proposition meilleure que la proposition prop. Cette situation correspond au cas où l'agent évaluateur a déjà envoyé un refus d'amélioration de proposition et sa dernière proposition est à un ou deux pas de concession de la moyenne du joueur sachant que l'agent Agrégat dispose d'au moins une marge de concession.

**Table 11.** Les primitives de l'agent évaluateur

Primitive	Sémantique
<i>Propose (v, prop)</i>	En réponse à un message <b>CallForPropose ()</b> ou à un <b>RequestForPropose()</b> , l'agent évaluateur <i>v</i> envoie une proposition <i>prop</i> à l'agent Agrégat. Après consultation de la table de satisfaction, l'agent évaluateur accepte la demande de concession si le degré de satisfaction de cette nouvelle proposition est supérieur ou égal à 2.
<i>Refuse (prop)</i>	Suite à une demande d'amélioration de proposition ou à une promesse de concession émanant de l'agent Agrégat, l'agent évaluateur peut envoyer un refus soit parce qu'il ne peut plus améliorer sa dernière proposition (cf. le degré de satisfaction de la proposition est nul, $Sat(prop) = 0$ ), soit parce que le degré de satisfaction de la nouvelle proposition est égale à 1 (i.e. sa dernière proposition), et que le score moyen du joueur est séparé de la dernière proposition de score de validation par deux ou plusieurs pas de concession. L'agent évaluateur refuse la concession sauf s'il reçoit une promesse de concession de la part de l'agent agrégat.

## 6.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une approche pragmatique d'évaluation qui permet de statuer sur l'efficacité des apprenants dans un contexte de systèmes d'apprentissage à base de simulation multi-agents. Cette méthode d'évaluation peut être intégrée dans les systèmes d'apprentissage basés sur la simulation, l'apprentissage basé sur le jeu ou tout apprentissage de résolution de problèmes assisté par ordinateur. Notre modèle d'évaluation comporte trois étapes: 1) Identification des compétences pertinentes du domaine de connaissances, 2) l'évaluation de l'apprenant par rapport à ces compétences et 3) l'évaluation de la capacité de l'apprenant à résoudre un problème de ce domaine de compétences. Afin d'évaluer les compétences des apprenants, nous avons adopté une stratégie qui implique une approche en deux étapes basé sur un système d'évaluation collaborative. Dans la première étape, un certain nombre d'agents évaluateurs sont chargés d'apprécier les connaissances des apprenants par rapport aux compétences identifiées du domaine. Le recours à la théorie des ensembles flous à ce stade permet une évaluation similaire à celle d'un expert. Dans la deuxième étape, l'agent agrégat assure une évaluation globale élaborée sur la base des évaluations individuelles de chaque agent évaluateur. Au lieu de considérer un score de seuil moyen qui décide de la réussite et de l'échec du test d'apprentissage de l'apprenant, nous avons préféré une évaluation collective négociée similaire aux évaluations académiques qui favorisent les étudiants en fonction de leurs

résultats, ainsi que les efforts fournis durant la période d'apprentissage. Ainsi, dans certaines situations, un processus de négociation est initié par l'agent agrégat où chaque agent évaluateur utilise les résultats de l'apprenant dans sa compétence pour négocier la réussite du test de l'apprenant par le biais d'attribution des bonus. Le résultat de cette négociation représente l'évaluation finale.

Notre système d'évaluation permet d'abord une estimation des compétences de l'apprenant, cette première étape nous informe sur les forces et les faiblesses de l'apprenant, et nous permet de proposer des recommandations de haute précision aux apprenants. Par conséquent, la qualité des rétroactions fournira un impact positif sur l'amélioration de la performance des compétences de l'apprenant. Dans un second temps, l'évaluation globale nous permet de conclure quant à l'efficacité de l'apprenant à résoudre le problème. Ainsi, les tuteurs peuvent facilement diagnostiquer les faiblesses des apprenants.

Dans le chapitre suivant il s'agira de traiter le deuxième volet de recherche de cette thèse qui consiste en une démarche de modélisation de l'agroécosystème basée sur l'utilisation des systèmes multi-agents comme outil de modélisation et de simulation, pour aborder ce système complexe et aider à la compréhension de l'interaction des différents sous-systèmes.

## CHAPITRE VII

### Modélisation Environnementale et Sociale : Agents et Objets en Interaction

---

Dans le premier volet de notre recherche, nous nous sommes concentrés sur la modélisation de l'évaluation d'un joueur par notre environnement de formation où nous avons proposé une évaluation distribuée basée sur la logique floue et la négociation entre les agents évaluateurs. Ce travail a fait l'objet d'une publication (à voir dans la partie annexe de cette thèse) dans un journal international IEEE : "Journal of Educational Technology and Society".

Le deuxième volet de notre travail de recherche porte sur la modélisation des interactions entre les sous systèmes du système naturel à savoir le système animal et le système végétal ainsi que la modélisation de la gestion d'une campagne de lutte anti-rongeur. Les modèles développés dans ce chapitre sont nécessaires à la réalisation de la simulation de la dynamique de population des rongeurs ainsi que celle de la campagne de lutte.

#### **7.1. Modélisation de l'agroécosystème**

Les écosystèmes sont des systèmes complexes composés d'éléments différents et en interaction. Pour appréhender cette complexité une démarche conjuguant modélisation et simulation est tout à fait adaptée (Hill, 2000). Un écosystème peut, en effet, être défini comme l'ensemble des interactions des espèces entre elles et entre celles-ci et le milieu (Frontier, 1990). De ce fait, le moyen permettant une meilleure compréhension du fonctionnement et de l'évolution d'un écosystème est la modélisation de ses entités et des interactions intra et inter-entités. Dans ce cadre, notre recherche porte sur la modélisation de deux systèmes, le système naturel composé lui-même de deux sous systèmes (le système végétal et le système animal) et le système social composé des acteurs impliqués dans la gestion d'une campagne de lutte anti-rongeur.

Pour étudier un système complexe, il est souvent nécessaire d'en réaliser une représentation simplifiée : le modèle. Le modèle constitue ainsi une abstraction de la réalité permettant de mettre en évidence les éléments pertinents de cette réalité par rapport à une certaine finalité. La modélisation consiste à définir le système et à concevoir un modèle de ce système. La simulation consiste à mettre en œuvre ce modèle abstrait du système réel, le plus souvent au moyen d'un ordinateur.

De nombreux travaux de modélisation ont été et sont réalisés dans le but d'éclaircir la complexité des écosystèmes et apporter une aide à leur gestion. Citons par exemple les travaux de Bonte pour étudier les risques émergents et leur gestion dans le domaine

phytosanitaire (Bonte et al., 2008), de Bécu pour la gestion des ressources naturelles (Bécu et al., 2003) et de Mialhe (Mialhe et al., 2012) pour l'analyse de la dynamique des agroécosystèmes en réponse aux changements environnementaux dans le delta du Pampanga (Philippines).

La wilaya de Tiaret (Algérie) est connue pour sa production de céréales, et son économie en dépend fortement. Seulement, les pullulations des rongeurs (Mériones shawi) causent des pertes considérables au rendement de cette production. Les moyens mis en œuvre par l'inspection de la protection des végétaux permettent d'atténuer ces dégâts mais ne suffisent pas pour contrôler et gérer les campagnes de lutte. Nous proposons dans cette partie une modélisation destinée à mettre en évidence l'impact des rongeurs sur le milieu végétal et à faciliter la mise en œuvre de politiques de gestion d'une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de culture. Pour réaliser cette modélisation, il est nécessaire de prendre en compte l'espace, avec sa structure et sa dynamique, les rongeurs et les acteurs concernés par cet espace, chacun ayant des comportements spécifiques. Nous avons retenu une approche mixte basée sur l'objet et les systèmes multi-agents (SMA) comme outil de conception et de simulation d'agroécosystèmes.

#### **7.1.1. Modélisation individu-centré**

La modélisation d'écosystèmes s'oriente depuis plus d'une vingtaine d'années vers des simulations centrées sur les individus composant l'écosystème (Bousquet et Le Page, 2004). On parle alors de modèles individus-centrés. L'intérêt pour ce type de modèles provient du fait qu'ils tiennent compte de l'unicité des individus et la spatialité des interactions (Mathevet et al., 2003).

La modélisation et la simulation basée sur les SMA fait partie de l'approche individu-centrée. Les entités à modéliser et à simuler y sont représentées individuellement soit sous forme d'agents, soit sous forme d'objet. Les agents sont dotés de capacités de communication et de délibération, qui permettent de représenter les mécanismes de décisions intervenant lors du choix d'une action. Ces caractéristiques en font un outil adapté pour la modélisation d'écosystèmes anthropisés.

Pour aborder la complexité de cet agroécosystème et pour mettre en évidence les interactions liées au comportement des rongeurs et à la gestion d'une campagne de lutte, nous proposons une modélisation multi-agents basée sur deux modèles (i) le modèle du système naturel qui va représenter les réactions de l'environnement face à ses modifications, et (ii) un modèle social qui définit l'organisation et les processus décisionnels mis en œuvre dans la gestion d'une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de cultures.

Ces modèles sont en forte interaction. Ainsi le modèle social influence sur le modèle de l'environnement par le degré d'efficacité de ses stratégies en matière de lutte, de techniques agricoles et de gestion collective de crise phytosanitaire. L'environnement traduit

les effets de cette gestion sur les agroécosystèmes qui sont ici directement dépendants de l'équilibre de la population de rongeurs. Le degré d'infestation d'une zone peut en retour modifier les stratégies et choix des acteurs de la gestion d'une campagne de lutte.

### **7.1.2. Modélisation de l'environnement**

Dans le cadre de l'étude des interactions entre la gestion d'une campagne de lutte et l'écosystème en question (région agropastorale de la wilaya de Tiaret), modéliser l'environnement s'avère nécessaire. En effet il nous faut disposer d'un modèle pouvant rendre compte à une échelle globale de l'action locale de l'homme sur l'agroécosystème et des interactions entre les composants de celui-ci. Bien sur il ne s'agit pas ici de représenter tous les composants de l'agroécosystème, mais du moins les éléments immisçant à grande échelle dans le cycle de vie des rongeurs ou modifiés par celui-ci.

Il existe d'ores et déjà dans la littérature des modèles mathématiques de dynamique des populations de rongeurs mais le phénomène de crise phytosanitaire, que nous désirons étudier ici, demande que l'on prenne également en compte des problématiques telles que le comportement et la dynamique des rongeurs et l'impact des dégâts causés aux cultures à différents stades de la croissance. En outre, dans le but de fournir un support à la définition de politiques de gestion et l'efficacité de leur mise en œuvre (simulation, calibration,...), il est nécessaire d'explicitier le comportement des acteurs sociaux impliqués dans une campagne de lutte anti-rongeurs de manière à pouvoir évaluer l'efficacité des décisions et des actions entreprises à différentes étapes de la lutte.

Nous avons identifié, pour le système naturel, deux sous systèmes et nous définissons, pour chacun d'entre eux, un métamodèle sous forme d'ontologie. Cette décomposition en sous systèmes distincts nous permet de nous étendre davantage sur chacun des thèmes.

Le métamodèle animal qui représente l'organisation des rongeurs et leurs comportements constitue la partie essentielle du modèle de l'environnement. Il repose sur un ensemble d'entités identifiant les connaissances et les concepts bruts de notre domaine d'étude. La dynamique des rongeurs y est présentée sous forme de comportements. La figure 33 présente cette ontologie: chaque case représente un concept dont le nom se trouve dans la partie haute et les caractéristiques principales dans la partie basse. Nous distinguons deux types de caractéristiques. Les caractéristiques « occurrences », qui caractérisent un individu particulier désigné par ce concept (comme par exemple le sexe du rongeur occupant un terrier donné) et les caractéristiques « états » qui définissent l'état d'un individu à un instant donné (comme la quantité de nourriture disponible sur une cellule donnée qui va varier au cours du temps et donc au cours d'une simulation).

La population des rongeurs est représentée par un ensemble de foyers composés eux-mêmes par des terriers. Un terrier, ensemble de trous, peut être occupé par un rongeur célibataire ou par un couple ayant éventuellement 5 à 7 petits. Le comportement des

rongeurs se résume à la recherche de nourriture (consommation et dégradation de la production), la reproduction, la distribution spatiale sur les cellules et la mortalité. L'enjeu de cette modélisation est multiple: (I) représenter le comportement des rongeurs à travers duquel une simulation sera conduite pour expliciter l'impact des rongeurs sur la production, (II) expliciter l'impact des conditions météorologiques sur la dynamique des rongeurs, à travers le taux de reproduction et les probabilités de déclin et enfin (III) la dispersion spatiale des rongeurs sur l'espace occupé.

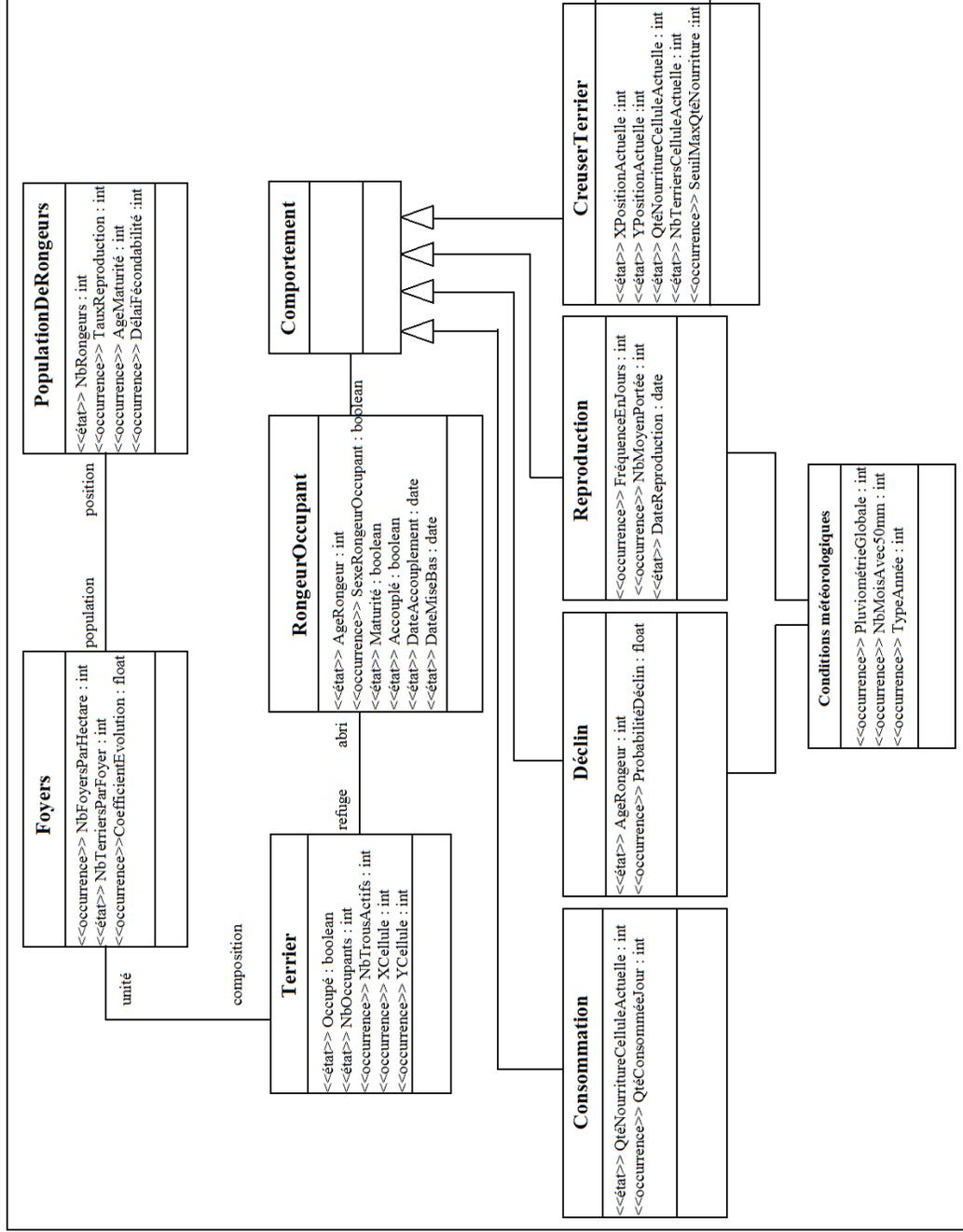


Figure 33. Le métamodèle animal : Concepts et relations

La figure 34 présente les connaissances du sous système végétal de l'écosystème. Cette ontologie du domaine végétal permet d'établir et de formaliser les connaissances en jeu. L'enjeu de cette partie du modèle porte sur la discrétisation de l'espace afin de localiser les rongeurs et leurs déplacements et sur l'influence des conditions météorologiques sur chaque type de culture et par conséquent l'impact de la production sur le développement de la population des rongeurs. Ce métamodèle est constitué d'un ensemble de zones végétales. Il repose sur une discrétisation de l'espace réalisée de manière à définir des unités homogènes (cellules, parcelles, ...) vis à vis de sa gestion. Les végétaux sont localisés sur les cellules et leur croissance dépend des conditions météorologiques. Le modèle végétal traduit ainsi les conséquences du modèle animal sur la culture. Notre choix de discrétisation de l'espace (parcelles) en cellules repose sur la technique de prospection utilisée, qui consiste à délimiter, dans la zone de prospection des rongeurs, des cellules d'un hectare afin de faciliter la détection des terriers.

Le système de l'environnement dans son ensemble constitue en fait la réunion des deux métamodèles. Les concepts à retenir pour ce système seront considérés comme des entités concrètes. Le modèle de l'environnement permet de décrire les entités statiques et dynamiques de l'écosystème. Cette dynamique est articulée autour des agents rongeurs qui par leurs comportements vont agir sur les entités statiques (cellule, culture, terrier,...). Les entrées du modèle correspondent à une zone de prospection discrétisée en cellules, à chaque cellule peut être affecté ou non un type de culture (céréale, maraichère, fruitier, jachère, non cultivable, ...). La population de rongeurs est représentée par des agents réactifs régis par des comportements à savoir l'action de recherche de nourriture sur les cellules avoisinantes sachant que les céréales attirent le plus les rongeurs, l'action de recherche de cellule pour creuser le terrier sachant qu'une cellule (hectare) ne peut abriter plus de 5 foyers, la décision de se reproduire ou non suivant la maturité de l'agent et la réunion des conditions propices à la reproduction.

L'action des agents rongeurs sur les entités statiques fait transiter l'agroécosystème d'un état à un autre. Les conséquences des dégâts subis par la culture, le nombre des nouveaux terriers confectionnés, et la densité de la population à un instant  $t$  du calendrier de reproduction constituent les sorties du modèle. Ces sorties seront exploitées à la suite de la mise en œuvre du modèle dans une simulation multi agents.

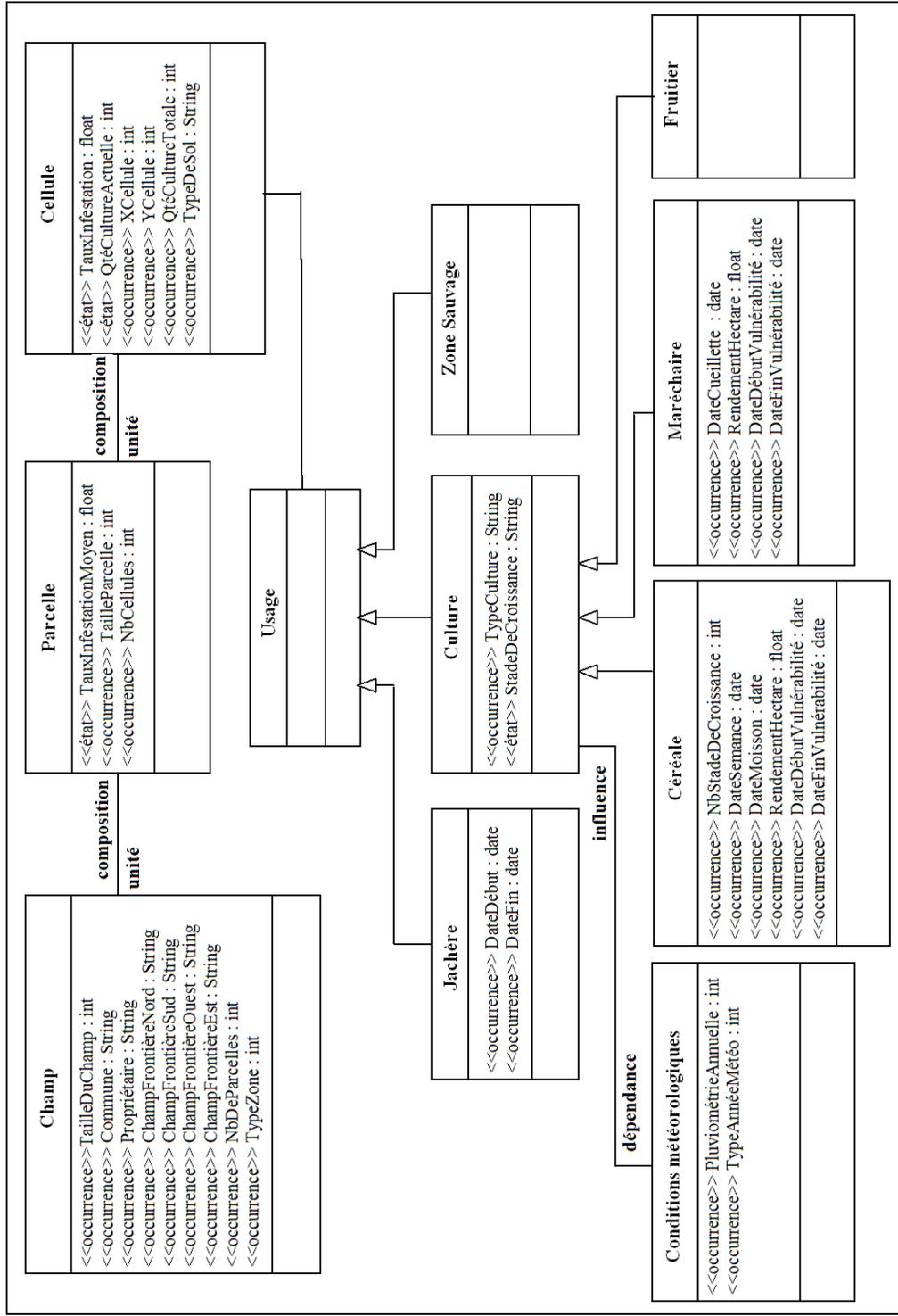


Figure 34. Le métamodèle Végétal : Concepts et relations

### 7.1.3. Modélisation du système humain

Une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de culture implique plusieurs acteurs. Le rôle et les responsabilités de chacun sont décrits dans la section 5.2.2.

Le modèle social présenté à la figure 35 considère les trois types d'acteur, chacun ayant des tâches à réaliser. L'entité campagne de lutte regroupe les concepts et les connaissances propres à chacune des trois phases considérées dans la lutte, à savoir, une phase de prospection, une phase de lutte et une phase d'évaluation. Le scénario de jeu est une instance de la campagne de lutte, il spécifie les paramètres du jeu à prendre en compte par les joueurs (acteurs). Chaque joueur est confronté, dans le jeu, à des situations de prise de décisions de type différents : les actions de contrôle concernent le niveau de contrôle réalisé par le joueur (exemple : est ce que l'agent phytosanitaire a procédé à la vérification d'un taux d'infestation présomptif annoncé par un prospecteur ?). Les actions d'intervention regroupent toutes les actions nécessitant l'intervention d'un acteur à une phase donnée de la campagne (exemple : est ce que l'agriculteur a fermé tous les trous d'un terrier ?). Les actions d'évaluation caractérisent les prises de décisions où le joueur est amené à évaluer une situation (exemple : à partir de quel nombre de signalisations de présence des rongeurs, l'agent phytosanitaire ordonne-t-il la prospection ?).

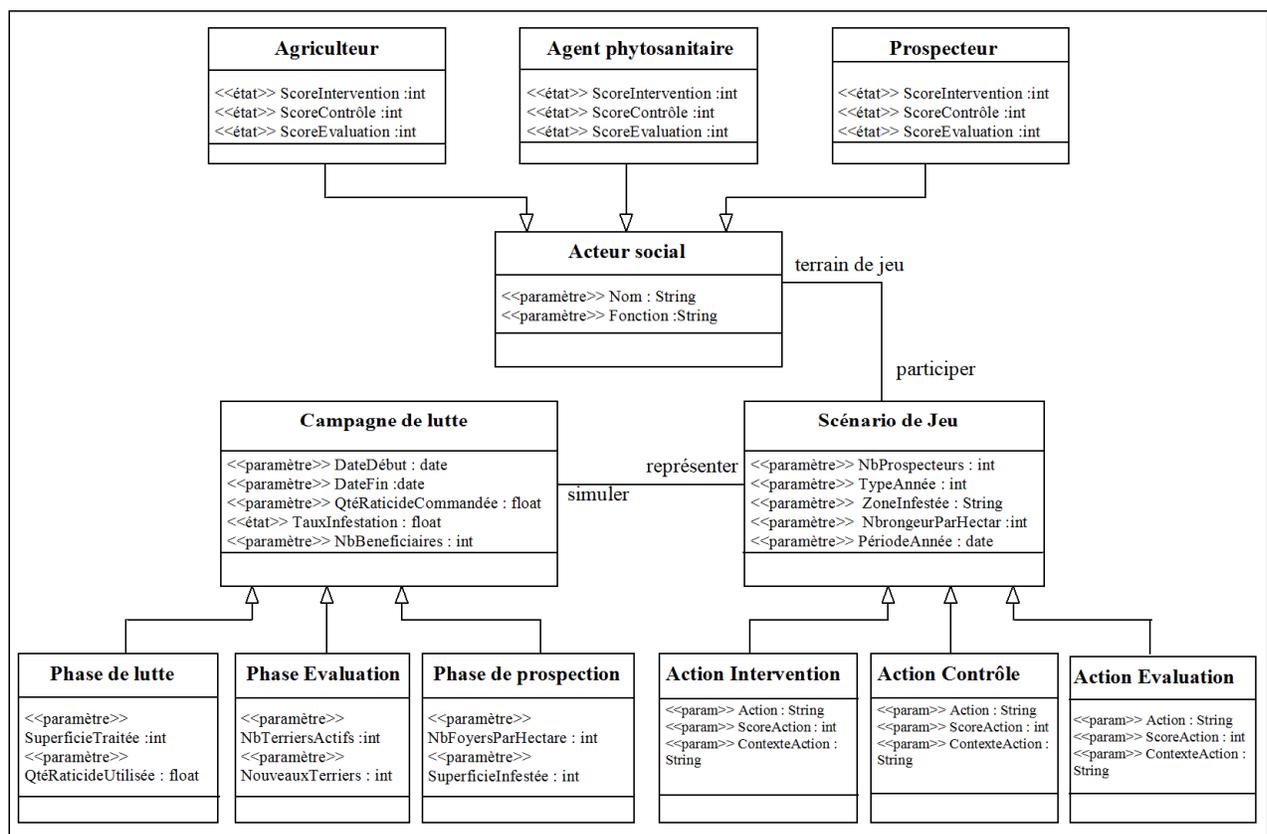


Figure 35. Le métamodèle social : Concepts et relations

#### 7.1.4. Modélisation de la dynamique de population des rongeurs

Dans cette section, nous présentons un modèle mettant en évidence le développement de la population de rongeurs et leur impact sur le rendement des céréales. Nous adoptons un modèle individu-centré afin de surmonter la modélisation macroscopique (taux de recrutement global des rongeurs, nombre d'hectares de céréales ravagés et la distribution spatial des rongeurs). Chaque individu (rongeur) est localisé dans son environnement ; et possède une sensibilité différente à la maturation (et donc à la reproduction) et à la zone de confection des terriers. Ce sont les contraintes environnementales qui façonneront les dynamiques spatiotemporelles de la population de rongeurs lors de la simulation. Notre modèle individu-centré est adapté à partir d'un modèle mathématique décrivant la dynamique des populations de rongeurs en fournissant les taux mensuels de survie, de maturation et de reproduction

Le modèle écologique que nous avons adopté est basé sur le modèle présenté dans (Leirs et al., 1997) par Leirs et utilisé ultérieurement par Skonhoff dans une étude de bioéconomie. Ce modèle illustre la dynamique d'une population de rongeurs dans un contexte environnemental. Les paramètres de reproduction et de survie sont régis à la fois par des processus dépendant de la densité et par les précipitations, ces dernières sont considérées comme un facteur stochastique dépendant du temps et indépendant de la densité. L'échelle du modèle utilisée par les auteurs est égale à un hectare.

Ce modèle de dynamique de population se présente sous forme d'une matrice de Leslie (Leslie, 1948). La population de rongeurs dans le mois  $t$  est donnée par:

$$N_t = M * N_{t-1} \quad (1).$$

Où  $N_t$  est le vecteur abondance composé de trois étapes de femelles et trois étapes de mâles (juvéniles, subadultes et adultes), et  $M$  est une matrice de transition de type Leslie donnée par:

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & (1/2) B(P,N) & 0 & 0 & 0 \\ S_{f0} & \phi_{f1}(P,N) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \phi_{f2}(P,N) & S_{f2}(P,N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1/2) B(P,N) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{m0} & \phi_{m1}(P,N) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \phi_{m2}(P,N) & S_{m2}(P,N) \end{bmatrix}$$

Avec:

$$\begin{aligned}\phi_{f11}(P,N) &= S_{f1}(P,N)(1-\phi_{f12}(P,N)) \\ \phi_{f12}(P,N) &= S_{f1}(P,N)(\phi_{f12}(P,N)) \\ \phi_{m11}(P,N) &= S_{m1}(P,N)(1-\phi_{m12}(P,N)) \\ \phi_{m12}(P,N) &= S_{m1}(P,N)(\phi_{m12}(P,N))\end{aligned}$$

Où

- $B(P, N)$  : est le taux de reproduction mensuel par femelle adulte;  $S_0$  est le taux de survie des nouveaux nés à l'âge subadultes;
- $S_{f1}(P, N)$  et  $S_{m1}(P, N)$  : sont les taux de survie mensuels respectivement des femelles et mâles subadultes;
- $\psi_{f12}(P, N)$  et  $\psi_{m12}(P, N)$  : sont les taux de maturation des subadultes à l'âge adulte respectivement des femelles et des mâles;
- $S_{f2}(P, N)$  et  $S_{m2}(P, N)$  : sont les taux de survie mensuels respectivement des adultes mâles et femelles;
- $P$  et  $N$  traduisent respectivement le niveau des précipitations et la catégorie de la densité du mois concerné, ce qui implique que tous les paramètres démographiques à l'exception de la survie et la croissance des juvéniles sont affectés d'une façon non linéaire par les facteurs dépendant et non dépendant de la densité. La survie et l'intégration des juvéniles sont discrétisés et fixés à 0.5.

**Table 12.** Les valeurs mensuelles des paramètres démographiques du modèle de dynamique de la population des rongeurs (Skonhoft et al., 2006)

<i>Regime definition</i>							
Rainfall in the past 3 months (mm)	$V_n$	<200	<200	200-300	200-300	>300	>300
Density per ha	$N_n^{(e)}$	>150	<150	>150	<150	>150	<150
<i>Demographic rates</i>							
Net reproductive rate	$B(V_n, N_n^{(e)})$	1.29	5.32	0.30	6.64	4.69	5.82
Juvenile survival in the nest	$S_{0n}$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Juvenile survival after weaning	$S_{0w}$	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Subadult survival	$S_1(V_n, N_n^{(e)})$	0.629	0.513	0.682	0.617	0.678	0.595
Subadult maturation	$\psi(V_n, N_n^{(e)})$	0.000	0.062	0.683	0.524	0.155	1.000
Adult survival	$S_2(V_n, N_n^{(e)})$	0.583	0.650	0.513	0.602	0.505	0.858

Cette table présente les valeurs mensuelles des paramètres démographiques pour chacun des régimes précipitations/densité dans le modèle de dynamique de la population. Les valeurs ont été obtenues à partir d'une analyse démographique (Leirs et al. 1997).

Nous supposons que l'effet combiné de la mortalité naturelle et la mortalité suite à l'application de rodenticide est toujours constant et égale à 0,90. Ceci est compatible avec l'expérience sur terrain des agents de lutte contre les rongeurs, les poisons utilisés sont efficaces pour tuer les rongeurs. Cependant, environ 10% des rongeurs survivent suite à

l'application des rodenticide dans un champ soit parce qu'ils ne consomment pas l'appât accidentellement, soit, soit parce qu'ils présentent le danger.

#### **7.1.5. Les agents : Attributs et comportements**

**Les agents** : le modèle multi-agents de la population des rongeurs que nous proposons est basé sur le modèle mathématique présenté dans la section précédente. Dans ce modèle, chaque agent représente un rongeur (mâle ou femelle). A part la population initiale, chaque nouvel agent est créé avec un statut de «juvénile» et devient après un certain temps «subadulte» s'il survit, enfin il acquiert le statut «adulte» (voir figure 37). Chaque agent adopte les comportements appropriés à son statut dans le temps.

La représentation des agents est particulièrement simple. Elle consiste en un seul type d'agents réactifs : les rongeurs. A chaque pas de la simulation, ces agents testent leurs attributs afin d'adopter les comportements adéquats. Les conditions régissant ces comportements sont les précipitations enregistrées durant les trois mois précédant le mois en cours et la densité des rongeurs qui occupent la même cellule dans la grille de la zone (cf. l'environnement est discrédité en cellules d'un hectare).

**Les comportements** : Les différents entretiens avec les experts de la DSA ont permis d'identifier sept comportements de l'agent rongeur. Certains comportements sont spécifiques aux femelles adultes tels que la «reproduction» et «la mise bas», d'autres sont adoptés uniquement par les subadultes («creuser terrier», «maturation»), les comportements «vieillessement», «déclin» et «consommation» sont communs à tous les agents. Notre simulation établit des relations de parenté entre l'agent nouveau-né et l'agent géniteur (femelle) afin de maintenir l'intégrité des résultats. A chaque pas de simulation, l'agent rongeur exécute les comportements correspondant à sa classe (juvénile, subadulte ou adulte) et à son sexe, le séquençement de ces comportements est préétabli et permet à l'agent de prendre des décisions en fonction de son état interne et les influences environnementales. La figure 36 présente un métamodèle décrivant l'organisation et la dynamique des populations de rongeurs. Il est basé sur un ensemble d'entités identifiant les connaissances et les concepts de l'écologie des rongeurs. La dynamique des rongeurs est présentée sous la forme de comportements. A chaque pas de la simulation un agent rongeur ne peut appartenir qu'à une seule classe, le déroulement du temps fait que l'agent incrémente son âge à chaque pas de simulation (un pas = un jour) en exécutant le comportement *Vieillessement*. A la suite de l'exécution de ce comportement, l'agent ayant un statut de juvénile ou subadulte vérifie s'il peut changer de statut (devenir respectivement subadulte ou adulte). L'exécution des comportements *Maturation*, *Reproduction* et *Mise bas* est soumise à des conditions. Le métamodèle montre aussi l'influence des facteurs densité et climat sur les comportements : *Maturation*, *Reproduction* et *déclin*.

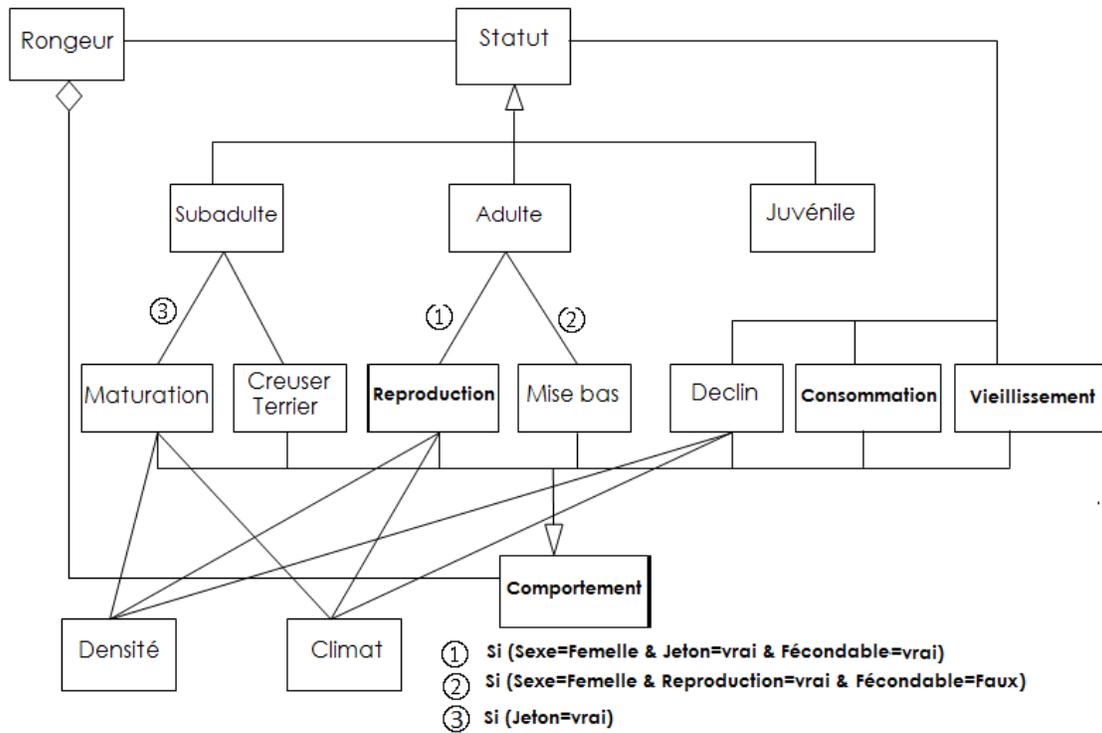


Figure 36. Métamodèle de la dynamique de population

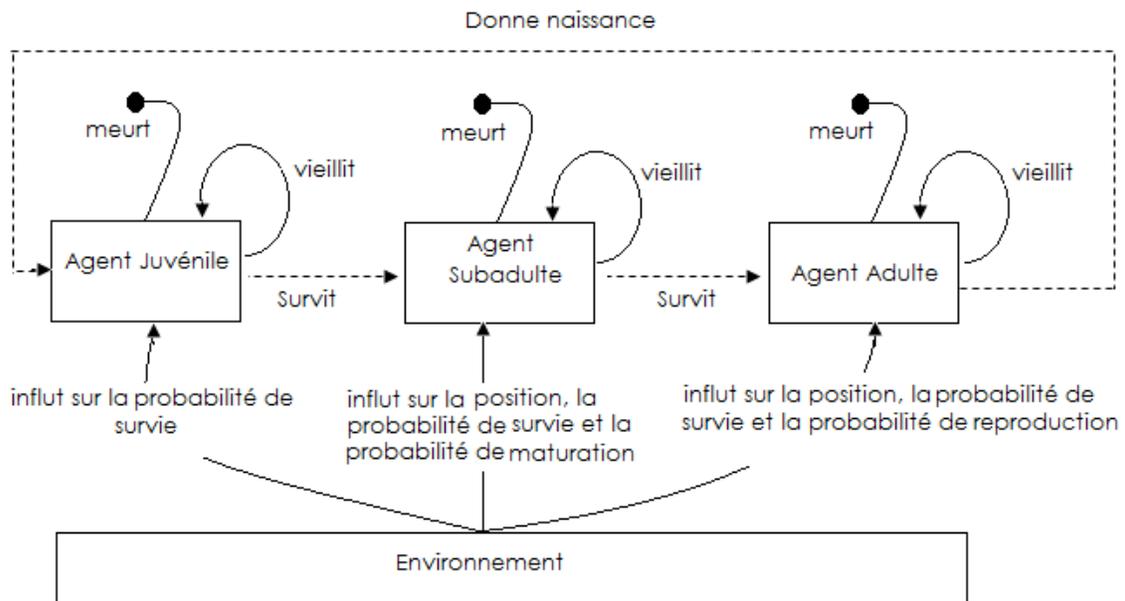
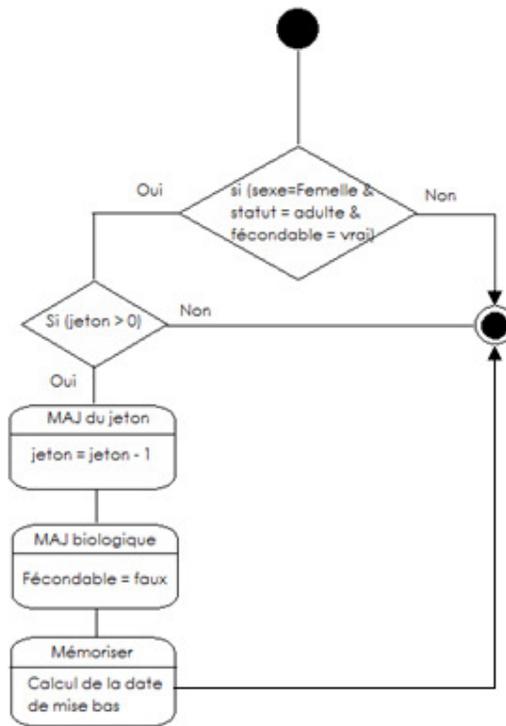


Figure 37. Cycle de vie d'un agent rongeur

**Le comportement Reproduction :** ce comportement est adopté uniquement par les agents femelles adultes. Durant la période de reproduction, l'agent vérifie d'abord s'il reste un jeton de reproduction (seulement une partie des femelles se reproduira, le taux de reproduction par mois est régi par la densité par hectare et le cumul de pluviométrie durant les trois derniers mois, voir la table 12). Un test auto-biologique permet à l'agent de capter le jeton, si le jeton est capté, l'agent décrémente le nombre de jetons et un changement d'état interne survient, l'agent calcule alors sa date de mise bas.



**Figure 38.** Digramme du comportement « Reproduction »

**Le comportement Maturation :** concerne les agents ayant le statut « subadultes ». A chaque pas de simulation et après avoir mis à jour son âge, l'agent subadulte vérifie si son âge est supérieur ou égal à l'âge de maturation, pour les mâles l'âge de maturation est à 02 mois alors que pour les femelles il est à 03 mois. Si le test est positif, l'agent vérifie la disponibilité d'un jeton de maturation, dans le cas positif il capte le jeton, met à jour le nombre de jetons de maturation et bascule son statut à adulte.

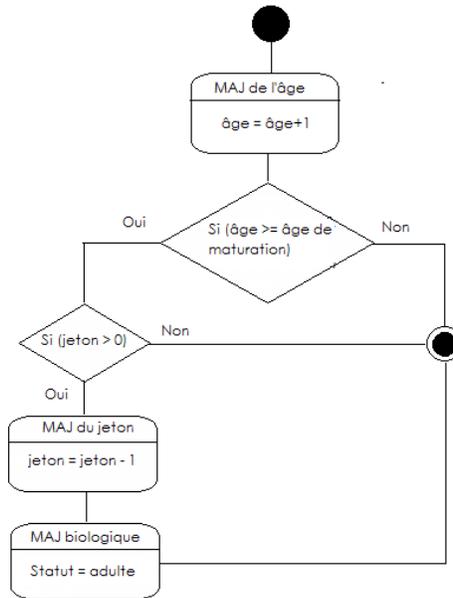


Figure 39. Digramme du comportement « Maturation »

**Le comportement Mise bas :** de même que le comportement « Reproduction », ce comportement est adopté uniquement par les agents femelles adultes qui ont déjà capté un jeton leur permettant de se reproduire. Chaque agent ayant capté un jeton de reproduction au préalable a déjà calculé et mémorisé sa date de mise bas. A chaque pas de temps, l'agent concerné compare la date actuelle avec sa date de mise bas, si ces dates sont égales alors l'agent crée des agents (rongeurs nouveau-nés) dont le nombre et le sexe dépendent de valeurs aléatoires respectivement entre 5 et 12 et male ou femelle. L'agent créateur initialise les attributs de chaque agent crée (âge, position sur la grille, le numéro, le numéro de l'agent géniteur, etc.)

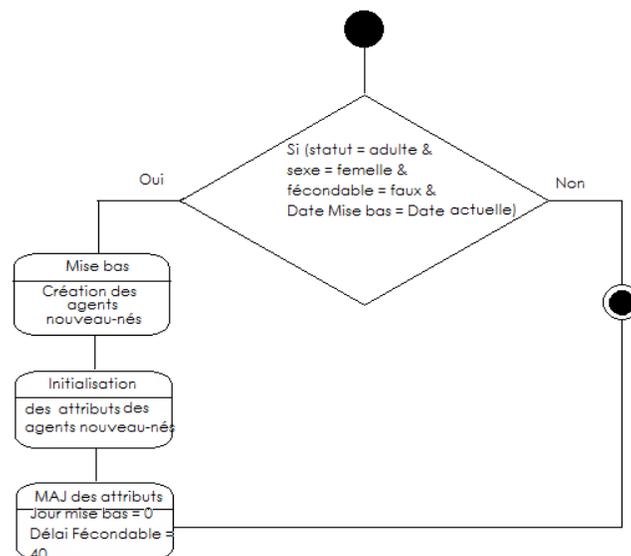
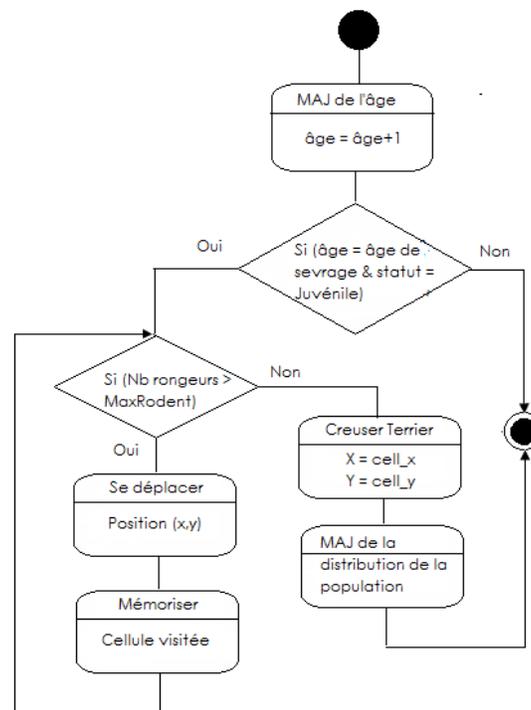


Figure 40. Digramme du comportement « Mise bas »

L'agent ayant mis bas déclenche un temporisateur qui permettra de basculer l'attribut fécondable à vrai après 40 jours (voir figure 40).

**Le comportement Creuser terrier** : l'agent juvénile devenant subadulte quitte le terrier familial pour creuser son propre terrier. Il commence d'abord par tester le nombre de rongeurs présents sur la cellule actuelle (là où il se trouve) si le nombre de rongeurs est inférieur à un certain seuil, il creuse son terrier sur la cellule actuelle sinon il doit se déplacer de cellule en cellule jusqu'à ce que cette condition soit satisfaite. Ce déplacement se fait en spirale afin que l'agent ne revisite pas une cellule déjà visitée en utilisant un mécanisme de mémorisation du parcours déjà effectué. Ce comportement est aussi adopté par les agents situés sur une zone dont la source de nourriture commence à diminuer et ils seront obligés de creuser de nouveaux terriers proches de leurs sources de nourriture. Une fois le terrier creusé, la distribution de la population est mise à jour : on incrémente le nombre de terriers dans la cellule concernée et la population de cette cellule sera augmenté de 1 alors que la population de la cellule d'origine sera décrémentée de 1.



**Figure 41.** Digramme du comportement « Creuser Terrier »

**Le comportement vieillissement** : il s'agit d'un comportement exécuté par l'ensemble des agents. A chaque pas de temps (le jour), l'agent incrémente son âge et vérifie s'il peut exécuter les comportements maturation, reproduction, creuser-terrier ou mise bas.

**Le comportement consommation** : A chaque pas de temps, chaque agent suivant son âge consomme une certaine quantité de blé prédéterminée.

**Le comportement déclin** : l'agent rongeur peut mourir s'il a atteint un âge avancé ou s'il consomme un appât empoisonné.

**Les attributs** : afin de permettre aux agents d'exécuter les différents comportements, et d'agir de façon autonome, nous les avons dotés d'attributs dès la création. En voici la signification de certains d'entre eux qui sont directement liés à l'exécution des comportement. Notez que cette description n'est pas exhaustive :

- numéro: chaque agent est identifié par un numéro attribué à la création,
- âge : donne l'âge de l'agent,
- sexe : donne le sexe de l'agent,
- palier : indique le statut de l'agent (juvénile, subadulte ou adulte),
- posx : donne la position du terrier dans l'axe des x,
- posy : donne la position du terrier dans l'axe des y,
- posNourx : indique la position de la cellule de nourriture de l'agent sur l'axe des x,
- posNoury : indique la position de la cellule de nourriture de l'agent sur l'axe des y,
- fécondable : indique si l'agent de sexe femelle est dans un état fécondable,
- JourMiseBas : indique le nombre de jours écoulés après la mise bas afin de changer éventuellement l'état de fécondabilité,
- NbPetits : donne le nombre de petits d'un agent femelle,
- sevrage : indique si l'agent nouveau-né a atteint l'âge de sevrage afin de prendre en considération la quantité de nourriture fournie par l'agent géniteur,
- mother : indique le numéro de l'agent géniteur, pour déplacer les agents nouveau-nés en cas de déplacement de l'agent géniteur.

En plus de ces attributs, d'autres attributs servent au déplacement des agents sur la grille représentant l'environnement, à la mémorisation du chemin parcouru pour chercher la nourriture afin de ne pas revisiter les cellules déjà visitées, à l'animation du déplacement sur la grille, à la consommation journalière de la nourriture (quantité fixée par jour et par classe d'agent), etc.

## **7.2. Conclusion**

Dans le présent chapitre, nous avons présenté les trois modèles principaux du champ d'étude à savoir, le modèle de l'agroécosystème qui est composé des sous modèles : animal et végétal, et le modèle social, dans chacun des modèles sont mis en évidence les concepts du domaine et les relations entre ces concepts.

Le modèle animal montre la structure et l'organisation de la population des rongeurs dans leur habitat ainsi que les comportements qui régissent la vie d'un rongeur.

Le modèle végétal traduit les conséquences du modèle animal sur la culture. L'enjeu de ce modèle porte sur la discrétisation de l'espace afin de localiser les rongeurs et leurs

déplacements et sur l'influence des conditions météorologiques sur chaque type de culture et par conséquent l'impact de la production sur le développement de la population des rongeurs.

Le modèle social décrit les acteurs impliqués dans une campagne de lutte, le scénario de jeu et les actions à entreprendre par les joueurs dans le jeu.

Les modèles sont présentés dans le but de rendre compte à une échelle globale de l'action locale de l'homme sur l'agroécosystème et des interactions entre les composants de celui-ci.

La modélisation de la dynamique des rongeurs est inspirée d'un modèle mathématique. Afin d'étudier en détail le comportement des rongeurs, un modèle multi-agents a été proposé où chaque rongeur est considéré comme un agent possédant des comportements qu'il exécutera en compétition avec les autres agents.

L'architecture et l'implémentation de ces agents sera détaillée dans le chapitre suivant au même titre que toutes les expériences effectuées pour valider le modèle d'évaluation et la simulation de la dynamique des rongeurs. Les résultats obtenus seront commentés et discutés.

# CHAPITRE VIII

## Implémentation et résultats

---

Au terme des deux derniers chapitres, les comportements de chacune des entités (objets ou agents) du modèle d'évaluation des apprenants ou des modèles de l'agroécosystème ont été définis. L'objet de ce chapitre est de présenter l'implémentation qui a été réalisée sur la base de ces spécifications et d'en illustrer les résultats obtenus suite aux expérimentations réalisées.

Le premier prototype concernant l'évaluation des joueurs implémente la totalité du modèle de l'évaluation des compétences du joueur définie dans le chapitre 6 et l'ensemble du processus décisionnel basé sur la logique floue ainsi que le mécanisme de négociation auquel prennent part les agents.

Le deuxième prototype intégrant le premier considère la simulation de la campagne de lutte ainsi que la dynamique des rongeurs sur une parcelle agricole représentée par une matrice 20 x 20. Le temps de la simulation s'étale sur une année agricole de septembre à juillet avec un pas de 1 jour. Toutefois nous n'avons développé le jeu que pour le rôle du joueur "agent phytosanitaire". De plus, concernant la dispersion spatiale des rongeurs sur la grille, nous n'avons considéré qu'un déplacement d'une cellule à la cellule la plus proche qui répond aux critères. En effet nous ne disposons pas d'éléments permettant d'orienter le déplacement des rongeurs sur la grille selon des algorithmes issus d'études menées sur les rongeurs.

La méthodologie objet retenue pour modéliser certaines parties du modèle de l'agroécosystème (ex. la dimension spatiale) nous a naturellement orienté vers un langage à objets pour le développement de cette partie. Notre choix s'est porté sur JAVA qui en plus de ces qualités intrinsèques présente l'avantage d'être compatible vis-à-vis de la plateforme multi-agents JADE.

Après avoir présenté l'architecture de notre environnement de formation, nous décrivons les simulations réalisées avec les prototypes. Cette description permettra de présenter les difficultés liées à la validation des modèles décrivant la dynamique de l'agroécosystème et de commenter les premiers résultats.

## 8.1. Architecture de l'environnement de formation

Notre environnement de formation est composé de trois parties en interaction, à savoir le module de l'environnement de simulation, le module d'évaluation des compétences et le module utilisateur. Chacun de ces modules prend en charge une tâche spécifique, la réalisation ainsi que la coordination de l'ensemble de ces tâches permet d'obtenir un environnement de simulation participative à base d'agents doté d'une capacité d'évaluation de comportement des joueurs participant au jeu de formation (voir figure 42)

**Le module utilisateur:** ce composant offre la possibilité au joueur d'accéder au jeu et d'interagir avec les différents modèles par l'intermédiaire d'une interface homme-machine, les actions du joueur sur l'interface sont projetées sur le système humain par l'usage d'un Agent Utilisateur qui se chargera aussi de les stocker et de les envoyer au module évaluation des compétences pour analyse. À la réception de la rétroaction, l'agent utilisateur communiquera le résultat au joueur.

**Le module environnement de simulation :** le pilotage de la simulation est assuré par l'Agent Pilotage qui choisie un scénario aléatoirement ou sur proposition du maître du jeu (acteur externe au jeu) parmi un ensemble de scénarii. Le scénario choisi provoque des interactions entre les différents systèmes et les changements d'état dans ces différents systèmes sont recueillis par l'Agent Analyse qui se chargera de les communiquer au module évaluation des compétences afin de servir comme résultats des actions réalisées par les joueurs.

**Le module évaluation des compétences :** il représente la valeur ajoutée de notre environnement. Ce composant a pour rôle d'évaluer les actions des joueurs sur le système, de suivre l'évolution de leurs comportements et d'en tirer les recommandations pour chaque type de joueur à la fin du jeu. Comme décrit dans le chapitre 6, dans le but d'analyser les actions des joueurs, deux niveaux d'évaluation sont nécessaires. Au premier niveau, le recours aux trois agents, l'Agent Evaluation, l'Agent Contrôle et l'Agent Intervention est justifié par la catégorisation des actions composant le comportement du joueur, l'évaluation finale du joueur se fera sur l'agrégation des trois catégories d'action effectuées par le joueur. A la réception des actions des joueurs, envoyés par l'Agent Utilisateur, chaque Agent du premier niveau traite le type d'action qui correspond à son profil, l'évaluation de cette action se fait par référence aux actions nominales correspondant au scénario choisi propre à chaque type de joueur. Le résultat de cette évaluation est remis à l'Agent Agrégation du deuxième niveau, qui réalise une évaluation globale du comportement du joueur sur la base des évaluations partielles des agents du premier niveau. Cette évaluation globale est enregistrée par l'Agent Agrégation dans une base de données pour le suivi de l'évolution

des comportements des joueurs. La recommandation calculée par cet agent est envoyée à l'Agent Utilisateur qui se chargera de la communiquer au joueur indiqué.

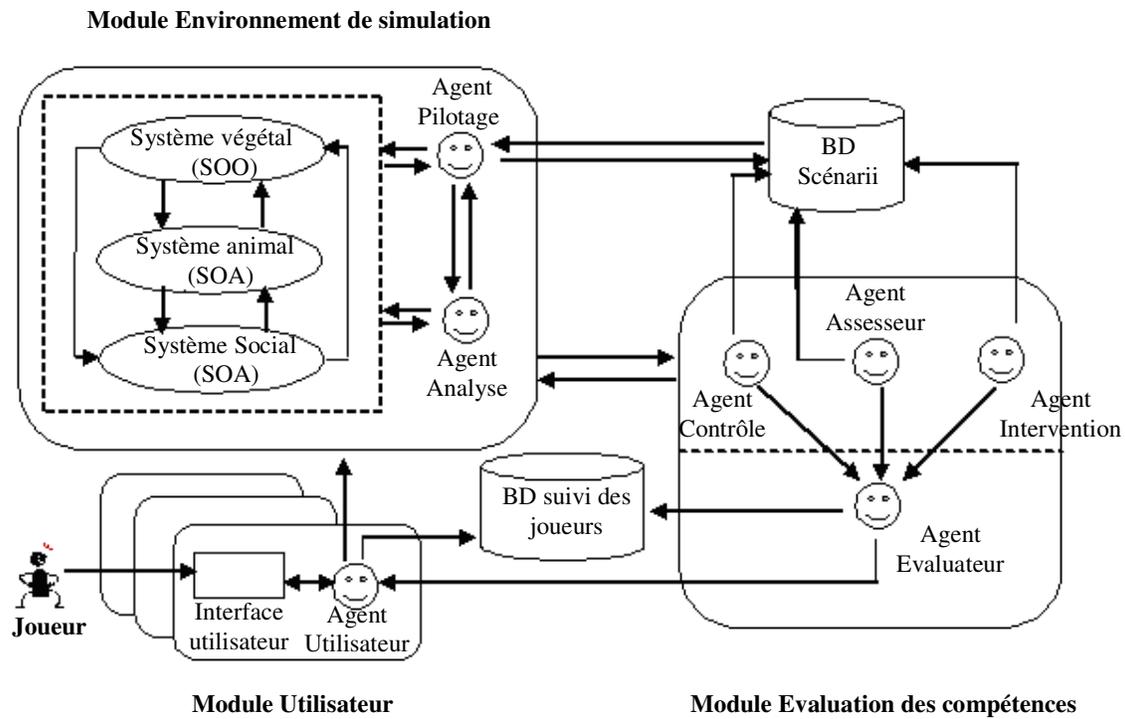


Figure 42. Architecture de l'environnement de formation

## 8.2. Expérimentations et résultats du système d'évaluation des joueurs

Dans cette section, nous commençons tout d'abord par présenter brièvement l'environnement de développement d'agents Jade (**J**ava **A**gent **D**evelopment **E**nvironment) vu que tous les agents de notre environnement de formation sont implémentés en Jade. Nous présentons ensuite un exemple illustratif où les évaluations des agents assesseurs sont exposées ainsi que l'évaluation finale du joueur. Dans le but de vérifier l'efficacité de notre système d'évaluation et de valider ses performances, nous détaillerons enfin les trois expérimentations réalisées.

### 8.2.1. L'environnement JADE

JADE est une plateforme multi agents répartie (multi-hôtes) développé par F.Bellifemine & A. Poggi, G. Rimassa, P. Turci par la société Telecom Italia Lab « Tilab, anciennement CSELT » en 1999. JADE a comme but :

- Simplifier la construction des systèmes multi-agents « SMA » interopérables.
- L'exécution des SMA.

- La réalisation d'applications conformes avec le standard FIPA (The Foundation for Intelligent Physical Agents) pour faciliter la communication des agents JADE avec des agents non JADE.

JADE développée en Java, fonctionne sous tous les systèmes d'exploitation, inclut tous les composants obligatoires qui contrôlent un SMA, et possède une architecture très précise permettant la construction dite « normalisée » d'agents. Pour tout cela la plateforme JADE contient :

1. **Un runtime Environment** : l'environnement où les agents peuvent vivre. Il doit être activé pour pouvoir lancer les agents.
2. **Une librairie de classes** : que les développeurs utilisent pour écrire leurs agents.
3. **Une suite d'outils graphiques**: qui facilitent le débogage, la gestion et la supervision de la plateforme des agents.

Chaque instance du JADE est appelée conteneur « container en anglais », qui peut contenir plusieurs agents. Ainsi qu'un ensemble de conteneurs constituent une plateforme et chaque plateforme doit contenir un conteneur spécial appelé *main-container* et tous les autres conteneurs s'enregistrent auprès de celui-là dès leur lancement.

Un *main-container* se distingue des autres conteneurs car il contient toujours deux agents spéciaux appelés AMS et DF qui se lancent automatiquement au lancement du *main-container*. Ainsi on a un conteneur par machine et lorsque l'on lance un conteneur :

- soit il est seul, il devient alors le conteneur principal (main container)
- soit on lui indique l'adresse du conteneur principal.

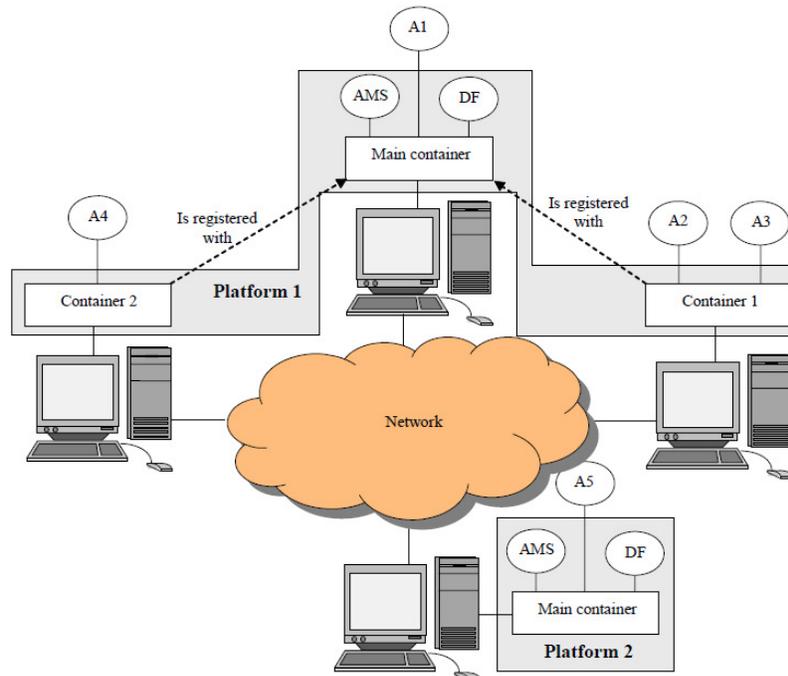
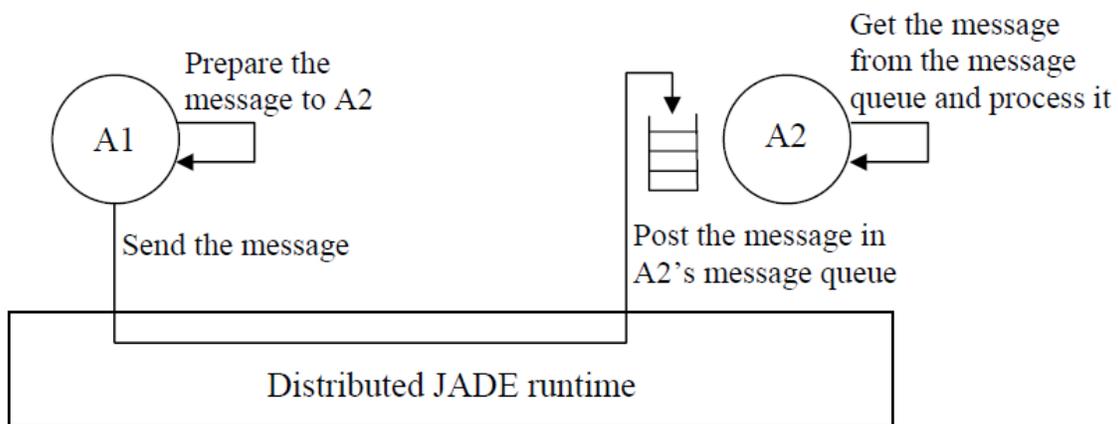


Figure 43. Plate-forme et conteneurs

La communication entre les agents permet de lier un ensemble d'agents et permet d'augmenter les capacités perceptives des agents en leur permettant de bénéficier des informations et du savoir-faire des autres agents. Sans communication, un agent n'est qu'un individu isolé, sourd et muet qui ne fait qu'agir sur lui-même. La communication donc s'appuie sur des langages de communication standard.

FIPA ACL (Agent Communication Language) est l'un des langages de communication entre les agents crée par FIPA dont la spécification consiste en un ensemble de types de message (actes de communication) et en un ensemble de protocoles d'interaction de haut niveau. Cependant, FIPA ACL est indépendant de la langue et le contenu est conçu pour fonctionner avec n'importe quel contenu de la langue et avec toutes les approches de spécification de l'ontologie. Dans FIPA ACL, la communication des agents est basée sur l'envoi de messages (voir figure 44).



**Figure 44.** Paradigme d'envoi de message asynchrone Jade

Un agent JADE utilise l'abstraction Comportement (Behaviour) pour modéliser les tâches qu'il peut exécuter. Ainsi, les agents instancient leurs comportements selon leurs besoins et leurs capacités. Du point de vue de la programmation concurrente, un agent est un *objet actif*, ayant un thread de contrôle. JADE utilise un modèle de programmation concurrente "un thread-par-agent" au lieu du modèle "un thread-par-comportement" pour éviter une augmentation du nombre de threads d'exécution exigés sur la plate-forme d'agents. Cela signifie qu'un agent exécute un Behaviour à la fois mais l'agent peut exécuter plusieurs Behaviours simultanément en choisissant un bon mécanisme de passation d'un Behaviour à un autre (voir figure 45)

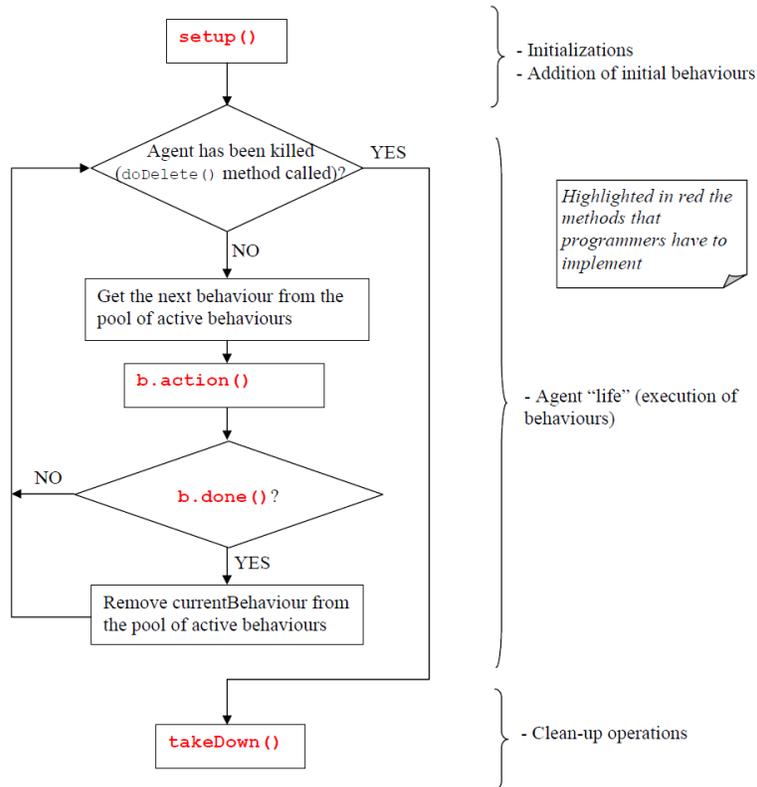


Figure 45. Processus d'exécution d'un thread d'agent Jade

### 8.2.2. Exemple illustratif d'évaluation

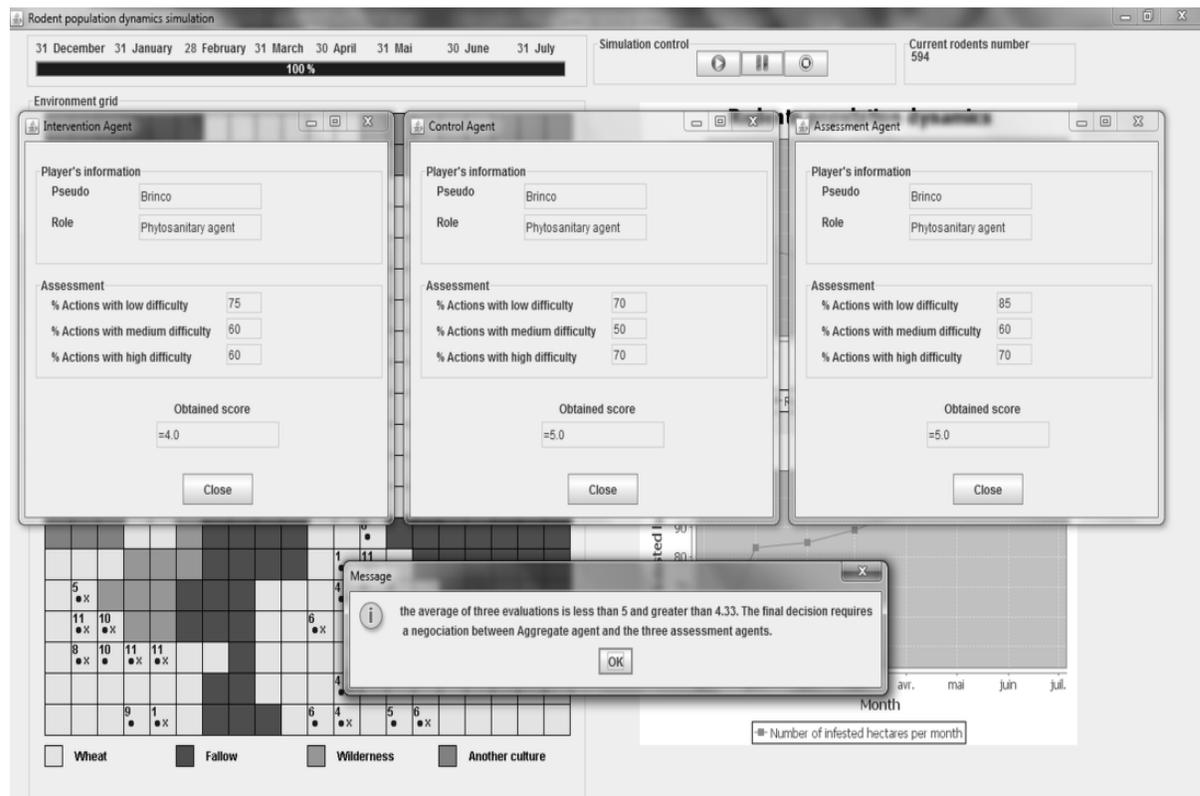
Pour démontrer l'application de notre approche, le scénario décrit dans le tableau 13 est considéré. Nous ne considérons que le rôle du joueur : Agent phytosanitaire. A la fin du jeu et après la réalisation des actions et la prise de décisions, les trois agents évaluateurs évaluent les compétences du joueur. Les résultats de joueur et l'attribution des bonus sont présentés dans le tableau 13, les évaluations des agents sont présentées dans la figure 46. Le résultat définitif de l'évaluation découle de l'échange de messages entre les agents évaluateurs et l'agent Agrégat (cf. l'agent global) (voir figure 47).

Table 13. Scénario d'évaluation

	Actions d'Intervention	Actions de Contrôle	Actions d'évaluation
% actions réalisées avec un niveau de difficulté élevé	60	70	70
% actions réalisées avec un niveau de difficulté moyen	60	50	60
% actions réalisées avec un faible niveau de difficulté	75	70	85
Score obtenu	4.0	5.0	5.0
Attribution du bonus 1	Non	Oui	Oui

Attribution du bonus 2	Non	Oui	Non
Attribution du bonus 3		Oui	

La figure 46, montre un résultat typique que l'environnement de formation peut produire une fois le jeu terminé. Dans ce scénario, les trois agents évaluateurs affichent leurs évaluations et après analyse des scores du joueur (c.-à-d. les scores attribués par les agents évaluateurs) l'agent global affiche un message indiquant que l'évaluation définitive du joueur nécessite une négociation.



**Figure 46.** Capture d'écran des évaluations individuelles des agents assesseurs

La Figure 47 affiche les messages échangés entre les agents au cours du processus de négociation et le résultat final est annoncé par l'agent global (cf. l'agent agrégat).

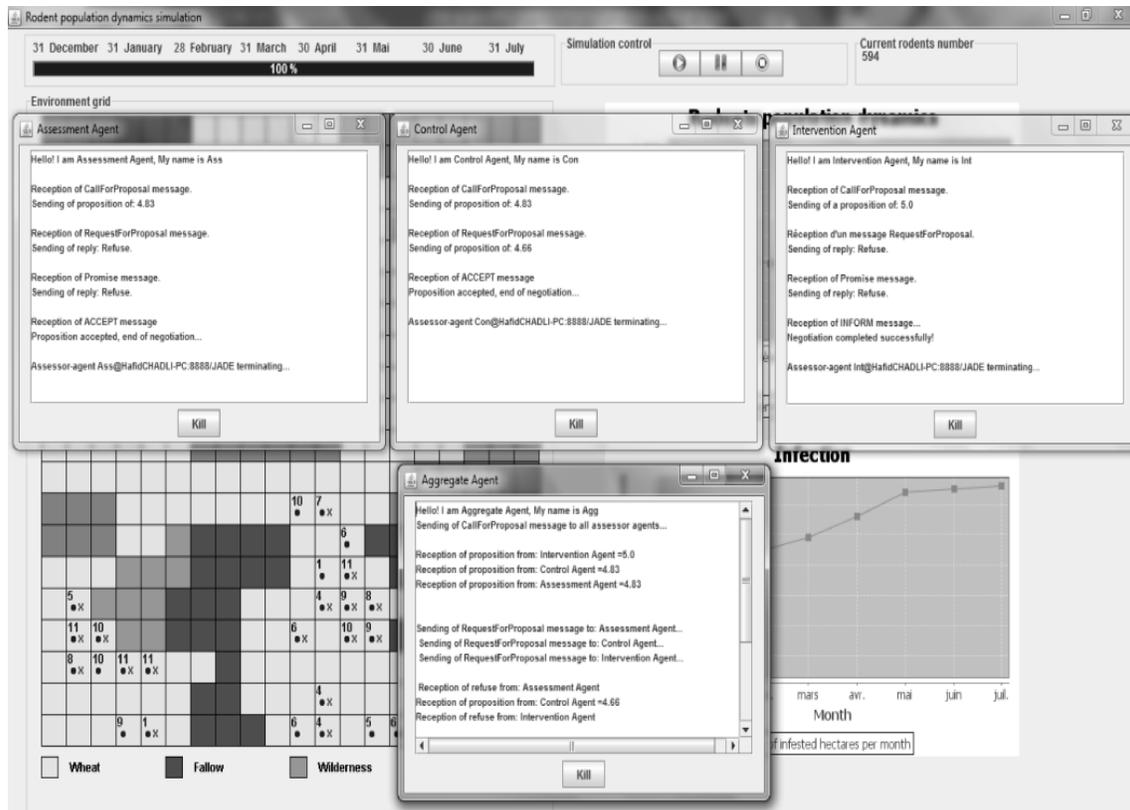


Figure 47. Capture d'écran de l'évaluation finale par la négociation entre les agents

Les expériences que nous avons menées, ne concernent qu'un seul rôle, celui de l'agent phytosanitaire. Une cinquantaine d'étudiants en protection des végétaux – zoophytiatrie ont participé à nos expériences. Ces étudiants ont été divisés au hasard en deux groupes : A (groupe expérimental) et B (groupe de contrôle) de vingt-cinq élèves chacun. Pour vérifier l'efficacité de notre système d'évaluation et de valider ses performances, nous avons effectué trois expériences. Microsoft Excel a été utilisé pour toutes les manipulations de données et tests statistiques.

Nous présentons dans ce qui suit, les finalités de chacune de ces trois expériences, leurs résultats et les discussions sur ces résultats.

### 8.2.3. Première expérimentation

L'objectif de cette expérience est de tester l'efficacité du système d'évaluation, précisément, le premier niveau de l'évaluation impliquant seulement les agents évaluateurs. À cette fin, les étudiants du groupe A ont été évalués par le système durant deux sessions de jeu (c.-à-d. nos trois agents évaluateurs), et après l'adaptation des mêmes scénarios sur papier les réponses de ces mêmes étudiants ont de nouveau été évalués par un expert de la DAS prenant en compte le nombre, le type et la difficulté des actions réalisées correctement. Afin d'éviter le biais entre les évaluations du système et celles de l'expert, nous avons

volontairement effectué deux sessions de jeux. Nous adoptons la corrélation de Pearson pour comparer les corrélations entre les scores attribués par le système (les scores des agents évaluateurs) et les scores de l'expert pour chaque type d'action et pour les deux sessions (tous les scores sont compris entre 1 et 7, voir chapitre 6, section 6.4.2). Le tableau 14 illustre les résultats de cette expérience.

**Table 14.** Analyse des corrélations entre l'évaluation du système et celle de l'expert

Type d'action	Corrélation de la session 1	Valeur critique	Corrélation de la session 2	Valeur critique	Niveau de signification
Action de contrôle	0.7618	0.396	0.8991	0.396	0.05
Action d'intervention	0.8111		0.8326		
Action d'évaluation	0.8101		0.7144		

**Discussion:** Cette première expérience est destinée à étudier l'efficacité de notre système d'évaluation. La meilleure façon d'y parvenir est de comparer les notes attribuées par le système à celles données par un expert du domaine pendant deux sessions de jeu. Ayant trouvé une corrélation significative (la corrélation est supérieure à la valeur critique pour les deux sessions comme indiqué dans le tableau 14) entre les deux évaluations de cette expérience confirme l'efficacité de notre système d'évaluation, nous sommes conscients des limites de notre validation car notre approche est expérimentée sur un seul jeu. En outre, les résultats valident la revendication sur l'importance de l'intégration des ensembles flous dans le processus de l'évaluation. En permettant des actions avec plusieurs niveaux de difficulté, le système est en mesure d'indiquer avec précision le niveau de connaissance du joueur avec une certaine granularité pour chaque type d'action. Cela a une certaine influence sur les exigences logicielles de l'environnement de formation.

En outre, affecter des agents spécialisés pour évaluer chaque type d'action présente plusieurs avantages: La diversité des agents permet une évaluation distribuée et la facilité d'extensibilité du type d'actions évaluées. Les agents hétérogènes peuvent ainsi évaluer une information spécifique (les réponses du joueur par rapport aux réponses prédéfinies, les résultats de la simulation, les interactions des utilisateurs avec le système de formation, etc.). En tant que tel, l'utilisation d'agents fournit donc une évaluation des actions ajustée, distribuée et indépendante les unes des autres (différents critères, différents paramètres et des algorithmes d'évaluation propres à chaque agent).

#### 8.2.4. Deuxième expérimentation

Afin de tester les performances des élèves évalués par le système, nous avons organisé deux sessions de jeu où les étudiants du groupe A sont évalués par le système et reçoivent une rétroaction à la fin de la session du premier jeu qui leur permet de réviser leurs comportements. Certaines études indiquent que recevoir de la rétroaction est corrélée à un

apprentissage efficace (Bangert-Drowns et al., 1991). Pour le même scénario de jeu, les étudiants du groupe B sont évalués par l'expert de la DSA et ne reçoivent aucune explication sur leurs comportements. La comparaison entre les comportements lors de la première session et celles de la deuxième session, pour les deux groupes, permet de se prononcer sur la performance des étudiants des deux groupes. Nous proposons une analyse **t-test** appariée (paired t-test en anglais) pour vérifier l'amélioration des comportements de chaque groupe. Le tableau 15 représente l'analyse des performances du groupe A et celle du groupe B.

**Table 15.** Analyse des performances

Type d'action	Group A				Group B			
	t-value	p-value	Mean de la session 1	Mean de la session 2	t-value	p-value	Mean de la session 1	Mean de la session 2
Action de contrôle	2.6134	0.0152	3.92	4.40	1.6164	0.1191	3.52	3.16
Action d'intervention	2.3842	0.0254	3.52	4.12	1.7321	0.0961	3.40	3.00
Action d'évaluation	2.5981	0.0158	3.32	3.92	2.00	0.0569	3.44	3.84

**Discussion:** En ce qui concerne la performance des joueurs évalués par le système, nous effectuons deux sessions de jeu; les scores obtenus à la deuxième session et comparés à ceux de la première session indiquent si oui ou non les joueurs ont amélioré leurs comportements. L'amélioration de comportement entre les deux sessions de jeu confirme la précision de l'évaluation et de la qualité des rétroactions (feedback) du système. Comme toutes les "p-values" (pour l'expérience de groupe A) ne dépasse pas le seuil de signification  $\alpha$  (avec  $\alpha = 0,05$ ), nous concluons que la différence entre les deux groupes était significative. Les résultats des analyses indiquent que les étudiants du groupe A avaient acquis plus de connaissances que les étudiants du groupe B puisque les scores moyens pour deux types d'actions (contrôle et intervention) ont augmenté de manière significative de 3,92 et 3,52 à respectivement 4,40 et 4,12. Cependant, pour le type d'action d'évaluation, les scores moyens ont subi une légère amélioration de 3,32 à 3,92; nous croyons que c'est en raison de la complexité de l'évaluation de certaines situations dans le jeu par les joueurs. Cependant, les scores moyens des joueurs du groupe B sont restés constants, sauf pour le type d'action d'évaluation où les scores ont augmenté modérément. Tous ces résultats permettent de conclure que les joueurs du groupe A ont appris de la rétroaction générée par le système d'évaluation.

La plupart des élèves du groupe A confirment que le système leur a permis de passer en revue et d'améliorer leurs comportements. Ils ont également estimé que la flexibilité de l'évaluation par l'octroi de bonus et la négociation est un facteur de motivation qui évite le découragement et l'abandon du jeu en plus d'améliorer le comportement global du joueur.

Cependant, certains étudiants pensent que s'ils sont impliqués dans l'évaluation, ils pourraient faire valoir et discuter avec les évaluateurs leur choix d'actions.

En résumé, évaluer les joueurs différemment que les approches existantes, qui se concentrent souvent sur l'évaluation d'une seule partie de la connaissance à un moment donné, nous permet d'aborder le problème de l'évaluation subjective et de surmonter certaines difficultés rencontrées dans les modèles d'évaluation traditionnels. Notre approche peut aider les joueurs à développer des compétences de résolution de problèmes, et d'améliorer leurs comportements à travers les sessions de jeu par l'intermédiaire d'agents évaluateurs indépendants les uns des autres.

### **8.2.5. Troisième expérimentation**

Afin de mesurer l'impact de l'évaluation négociée sur la motivation du joueur pour continuer l'apprentissage et ne pas abandonner le jeu, nous avons organisé six sessions de test d'apprentissage pour les deux groupes (2 séances par jour). Les étudiants du groupe A ont été évalués en utilisant les deux niveaux du système d'évaluation (c.-à-d. l'évaluation individuelle des compétences assurée par les agents assesses ainsi que le mécanisme de négociation) tandis que les étudiants du groupe B n'ont été évalués que par le premier niveau de notre modèle d'évaluation sans aucune possibilité de négociation entre les agents évaluateurs (si le score moyen de l'étudiant est  $\geq 5$ , le test est réussi, sinon le système considère qu'il a failli à sa mission). Plus précisément, nous nous sommes concentré sur le taux de participation et le taux d'abandon du jeu par les étudiants des deux groupes ayant obtenu consécutivement au cours de nombreuses séances un score dans l'intervalle  $[4.33, 5$  [(cf. 4.33 est la valeur minimale du score moyen pour prétendre à une négociation de l'évaluation du joueur, voir chapitre 6 - figure 30, elle a été fixée par les experts du domaine, elle permet donc la négociation entre les agents évaluateurs si le score moyen d'un étudiant du groupe A est  $\geq 4.33$  et réprovoque un étudiant du groupe B par un échec de sa mission si son score moyen est  $< 5$ ). Notez que pour cette expérience, nous ne considérons pas l'abandon des étudiants ayant obtenu d'autres scores. Les étudiants étaient informés qu'ils pouvaient quitter la session du test d'apprentissage à tout moment et donner les raisons de leur abandon par le moyen du questionnaire fourni à chaque session d'apprentissage. Le tableau 16 montre respectivement pour chaque groupe le nombre d'étudiants ayant obtenu successivement pour  $x$  fois un score moyen dans l'intervalle  $[4.33, 5$  [(avec  $x \in [2,6]$ ), suivi par le nombre d'étudiants d'entre eux ayant réussi leur test d'apprentissage à cette tentative (c'est à dire, par moyen de la négociation, valable seulement pour les étudiants du groupe A), suivie par le taux d'abandon de cette tentative. Les 50 étudiants ont participé à la session 1.

**Table 16.** Taux de participation et d'abandon

<i>Tentative</i>	X=2	X=3	X=4	X=5	X=6	<i>Nombre d'abandons</i>
Groupe A	14/7/0	10/7/0	9/4/0	8/5/1	5/4/1	2
Groupe B	9/0/0	7/0/1	5/0/3	2/0/2	0/0/0	6

**Discussion:** Nous remarquons que le taux d'abandon dans le groupe B était plus élevé que celui dans le groupe A pour cette catégorie d'apprenants, cependant il n'est pas très élevé (cf. 6 Vs 2). Afin d'identifier les raisons de cet abandon, nous avons analysé les réponses au questionnaire fourni données par les étudiants ciblés pour indiquer les raisons de l'abandon de la séance test de l'apprentissage (voir le tableau 17). En outre, le faible taux d'abandon des étudiants du groupe A est due au taux élevé de réussite (favorisé par la négociation) contrairement aux étudiants du groupe B (aucune forme de négociation, si l'étudiant obtient un score moyen < 5, alors il est sanctionné par un échec.

**Table 17.** Les réponses des étudiants ayant abandonné le jeu

<b>Question:</b> <i>Quelles sont les raisons pour lesquelles vous avez abandonné le jeu ?</i>	<i>Groupe A</i>	<i>Groupe B</i>
Le test est difficile	1	1
L'évaluation est subjective	1	5
Le jeu n'est pas intéressant	0	0
La simulation de l'environnement de formation ne reflète pas la réalité sur le terrain	0	0
Autres	0	0

Toutes les réponses (sauf une) données par les étudiants du groupe B ayant abandonné le jeu (5 sur 6) pour cette catégorie d'apprenants amènent à conclure que l'évaluation est subjective, les étudiants déclarent qu'ils méritent de réussir leurs séance test d'apprentissage à plusieurs reprises alors que le système considère qu'ils ont échoué, c'est précisément pour cette raison que nous avons choisi cette catégorie d'apprenants (proche du score moyen de réussite, mais malheureusement, en raison d'une évaluation rigide, le système décide qu'ils n'ont pas réussi leurs test). Alors que dans le groupe A, un seul étudiant ayant abandonné la session de test d'apprentissage a estimé que l'évaluation est subjective. Cette comparaison permet de conclure que la principale cause de l'abandon des apprenants est dû à la subjectivité du mécanisme d'évaluation adopté, tandis que l'utilisation de l'évaluation négociée pour les apprenants du groupe A a contribué à la préservation de la motivation pour continuer à apprendre. En outre, nous n'avons pas pris en compte les étudiants abandons ayant obtenu des scores consécutifs différents (cf. les scores n'appartenant pas

tous à l'intervalle [4.33, 5[ ) afin de ne pas fausser les résultats de l'expérience. Bien que nous sommes conscients de l'échantillon réduit de cette expérience, nous avons la conviction qu'une expérience à grande échelle confirmera notre approche.

### 8.3. Simulations et illustration de l'agroécosystème

Le prototype de simulation de l'agroécosystème que nous avons réalisé implémente le modèle naturel et le modèle social décrits dans le chapitre 7. Ce qui nous intéresse dans ce deuxième volet de recherche c'est surtout la simulation de la dynamique des agents rongeurs pour estimer les dégâts causés aux cultures selon les résultats de la campagne de lutte. Par conséquent, nous présentons en premier lieu, dans cette section, la dynamique des agents rongeurs, ensuite nous détaillerons l'architecture d'un agent rongeur pour terminer sur la description des simulations réalisées.

#### 8.3.1. Dynamique des agents rongeurs

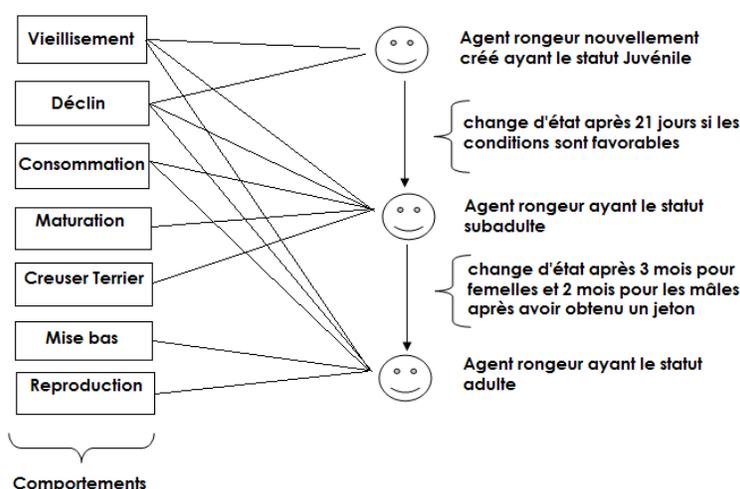


Figure 48. Dynamique des agents rongeurs

La dynamique des agents rongeurs s'appuie sur la modélisation du sous système animal, présenté dans le chapitre 7, figure 36. Cette dynamique concerne la description des comportements des rongeurs dans le monde réel. Ce recueil de comportements a été réalisé auprès des agents phytosanitaires du service de la protection des végétaux de la DSA.

Durant la simulation l'agent rongeur est créé suite à l'exécution du comportement "Mise bas" de l'agent géniteur. Les liens entre les agents (géniteur-généré) sont préservés jusqu'à ce que l'agent généré devienne subadulte et quitte le terrier familial pour creuser son propre terrier, cette relation nous facilite la mise à jour exacte du nombre de rongeurs par parcelle

lors d'un changement de terrier par l'agent géniteur qui doit emmener tous ses petits dans le nouveau terrier . Cependant, tous les agents candidats au statut subadulte ne peuvent changer de statut (juvénile-subadulte) que s'ils obtiennent un jeton. Les jetons représentent le nombre de rongeur pouvant changer de statut calculé selon le modèle décrit dans le chapitre 7, table 12. Ce nombre de jeton dépend de la densité de la population et de la pluviométrie enregistrée dans les trois derniers mois. Les agents rongeurs juvéniles exécutent les comportements : vieillissement et déclin, pour le comportement consommation ils dépendent de l'agent géniteur qui se charge de leur procurer la nourriture. Ci-après la portion de code Java qui traite le passage du palier 1 (juvénile) au palier 2 (subadulte).

```

case 4:
// creuser terrier *** le juvénil devient subadult e***
// tester s'il est devenu juvénile *** âge de sevrage *****
    if(CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).age>=AgeSevrage
        &&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==1)
    {
//basculer de juvénile à subadulte
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier= 2;

//MAJ du nb des juvenils dans l'ancienne cellule
CreateAgent.juv[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
    [CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy] -
-;
// afin de visualiser les déplacements des jeunes en rouge
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).juvenil=true;
// ... et se déplacer

        x_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx;
        y_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy;
        CopyOfx_act=x_act;
        CopyOfy_act=y_act;
        new Rounding2(x_act,y_act);
        MaFenetre.Panel1.repaint();

//MAJ du nb des subadults dans la nouvelle cellule
        if (CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).kill!=true)
        {
            if(CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sexe==true)
CreateAgent.submal[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
    [CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]++;
            else
CreateAgent.subfem[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
    [CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]++;

            x_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx;
            y_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy;
            p = new point();
            p=ref(CopyOfx_act,CopyOfy_act);
            CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx_move=p.x;
            CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy_move=p.y;
            p=ref(x_act,y_act);
            x2=p.x; y2=p.y;
            timer.start();
        } // fin du if sortie
        else
GetSenarioData.simdata_r[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
    [CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]--;
    } //fin du if
    stage++;

    break;

```

Au stade de subadulte l'agent rongeur est autonome. Le premier comportement exécuté est " Creuser Terrier ". De même l'agent subadulte incrémente son âge à chaque pas de temps (le jour), les seuls comportements qu'il n'exécute pas sont " la reproduction " et " la mise bas ". A chaque pas de temps, l'agent subadulte teste son âge pour basculer son statut à adulte. Au début de chaque mois le modèle calcule le nombre de subadulte devenant mature (nombre de jetons par hectare), de même chaque agent subadulte consulte ce nombre de jeton (de sa cellule), s'il est positif, il le décrémente de 1 et devient un agent rongeur mature, sinon il reporte sa maturation au mois prochain comme décrit dans le diagramme de la figure 39 au chapitre 7. Seuls les agents subadulte femelles sont concernés par la maturation afin de pouvoir générer des nouveaux agents rongeurs. Ci-après la portion du code Java décrivant la dynamique des rongeurs subadulte.

```

case 3:
// Maturation
If (population.calcul)
{
// capture des jetons par les subadulte femelles (Maturation)
if(population.maturfem[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]>0)
if (CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==2
&&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sexe==false
&&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).adult==true)
{population.maturfem[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]--;
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier=3;

// MAJ du tableau subfem
CreateAgent.subfem[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]--;

// MAJ du tableau adufem
CreateAgent.adufem[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]++;
}

// capture des jetons par les subadults males (Maturation) //on peut éviter
if(population.maturmal[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]>0)
if (CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==2
&&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sexe==true
&&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).adult==true)
{population.maturmal[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]--;
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier=3;

// MAJ du tableau submal
CreateAgent.submal[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]--;

// MAJ du tableau adufem
CreateAgent.adumal[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]++;

}
}

```

La reproduction est un comportement propre aux agents matures et femelles, le taux de reproduction est calculé par le modèle chaque début de mois (Net Reproductive rate – voir table 12) ce taux dépend de la densité par hectare et la pluviométrie enregistrée durant les 3 derniers mois. Chaque début de mois, les agents rongeurs femelles matures et non fécondés (attribut fécondable=vrai) consultent le nombre de jeton calculé pour leur parcelle, s'il est positif, l'agent le décrémente de 1 et change son attribut fécondable à faux, met à jour le nombre de petit admissible sur la parcelle et calcule sa date de mise bas. Ci-après le code Java du comportement reproduction.

```

// reproduction

if (population.repro[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posy]>0
    &&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),palier==3
    &&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),sexe==false
    &&
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),fecondable==true
    && MaFenetre.jour<=7
    && MaFenetre.jour!=0)

{ // maj du champ correspondant à l'hectare de position (chaque femelle donne en moyenne 11 petits
if (population.repro[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posy]>=11)
    {

population.repro[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posy]-=11;
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),NbPetits=11;
    }
else
    {

CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),NbPetits=
population.repro[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posy];

population.repro[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),posy]=0;
    }
}

// Bascule à l'état non fécondable
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),fecondable=false;

// choix du jour d'accouplement aléatoire dans le mois
Random r = new Random();
int a = r.nextInt(5)+1;//System.out.println("a="+a+"jour="+MaFenetre.jour);
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())),JourMiseBas= a+23;

```

Enfin pour mettre bas, l'agent femelle dont l'attribut fécondable est à faux, vérifie à chaque pas de simulation si le jour courant correspond au jour de mise bas qu'il a calculé au moment de la reproduction (période de gestation = 23 jours). Si la date courante correspond, l'agent créé 11 nouveaux agents rongeurs et met à jour les différents attributs concernant son statut, celui des nouveaux agents et ceux de la population des rongeurs. Ci-après la portion de code Java décrivant le comportement de mise bas.

```

// Mise bas
if(MaFenetre.jour==CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))).JourMiseBas
    && MaFenetre.jour!=0
    && CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sexe==false
    && CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==3)
    {

// création des agents rongeurs
CreateNewBornAgent.flag=true
flagborn=true;
new
CreateNewBornAgent(Integer.parseInt(getLocalName()),CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName
e()))).posx,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).terrier,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).NbPetits);

// MAJ du nb des juvenils dans la cellule
CreateAgent.juv[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]+=
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).NbPetits;

// ajouter un compteur de période de non fécondabilité
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).fecondable=true;

//Initialiser le compteur de sevrage
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sevrage=1;

// afin de nourrir les petits avec la mere
// mettre le champ JourMiseBas à zéro
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).JourMiseBas=0;

// MAJ du nombre de rongeurs dans l'hectare
GetScenarioData.simdata_r[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))).posx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy]+=
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).NbPetits;
MaFenetre.Panel1.repaint();
    }
}
stage++;
break;

```

### 8.3.2. L'architecture logicielle des agents rongeurs

La figure 49 illustre l'architecture logicielle d'un agent rongeur. Elle est composée de quatre modules : le module de perception de l'environnement, le module des connaissances, le module de décision et le module des plans comportementaux.

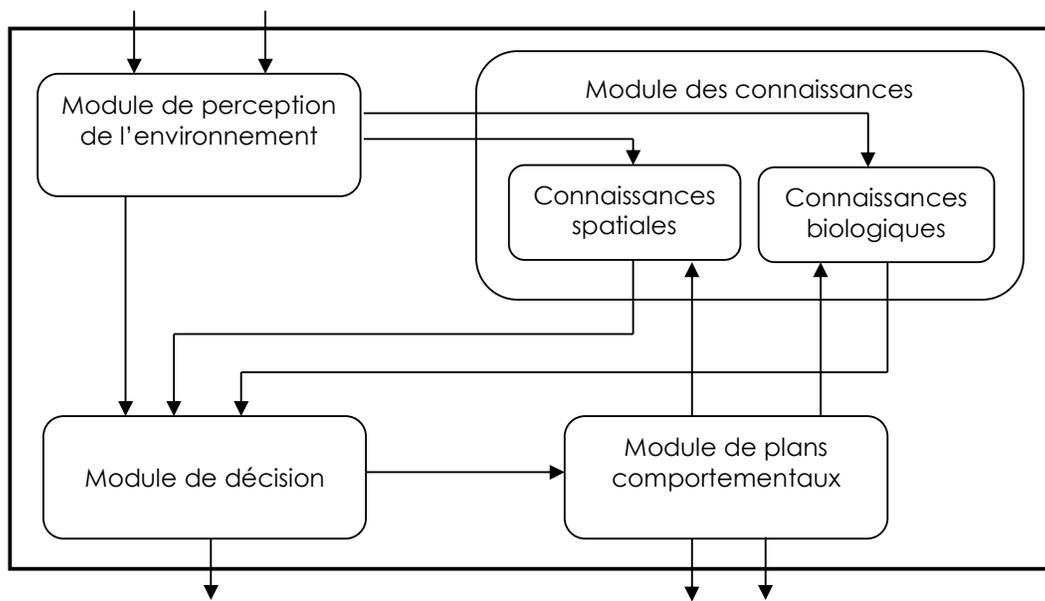


Figure 49. Architecture d'un agent rongeur

**Le module perception de l'environnement :** l'essentiel de ce module consiste à percevoir l'environnement, ses paramètres et ses attributs, par exemple un agent rongeur cherche toujours sa nourriture dans la parcelle où se trouve son terrier, il peut percevoir la quantité de nourriture présente près de son terrier, s'il remarque que cette source de nourriture commence à diminuer, il peut décider de quitter son terrier pour creuser un autre terrier sur une parcelle où la nourriture est abondante. Un autre exemple de perception des attributs de l'environnement consiste à connaître le nombre de terrier présents sur une parcelle avant d'y confectionner son terrier, si ce nombre dépasse un certain seuil il quitte la parcelle en question pour se déplacer sur une autre parcelle où la condition sera satisfaite.

L'extrait de code suivant illustre la perception de la quantité de nourriture sur la cellule actuelle de l'agent (cellule où se trouve le terrier du rongeur) si cette quantité est inférieure au seuil " MinFoodThreshold " l'agent décide de se déplacer en instanciant la classe " Rounding ". Le déplacement s'effectue de cellule en cellule sous forme spirale afin que l'agent ne revienne pas sur une cellule déjà visitée.

```

//Déplacement pour chercher de la nourriture
if((CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==2
    | |
    CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==3)
    && ((MaFenetre.IdMois>=6 && MaFenetre.jour>=15) | |
    MaFenetre.IdMois>=7) )
    {
// tester si la quantité de nourriture présente dans la cellule est <= à MinFoodThreshold (seuil minimum)
if(GetSenarioData.simdata_qte[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNourx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNoury]<= MinFoodThreshold)
    {
// quitter la cellule actuelle et chercher une autre cellule où la nourriture est abondante
// marquer la cellule (valeur négative)
GetSenarioData.simdata_qte[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNourx
]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNoury]=-1;

x_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNourx;
y_act=CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNoury;
CopyOfx_act=x_act;
CopyOfy_act=y_act;
new Rounding(x_act,y_act);

```

**Le module des connaissances :** ce module contient les connaissances nécessaires à l'agent, elles jouent le rôle de la mémoire de l'agent, ces connaissances sont mises à jour à chaque fois que l'agent rongeur dispose d'une nouvelle information concernant sa biologie (son statut, sa date de mise bas, son sexe, le nombre de ces petits, etc.) ou une information décrivant l'espace qu'il parcourt pour consommer la nourriture, les cellules moins peuplées sur la grille, etc. par exemple à chaque fois que le nombre de terriers sur sa parcelle augmente l'agent met à jour cette information dans la base de ses connaissances spatiales. Un autre exemple de connaissance spatiale concerne la position de l'agent sur la grille qu'il mémorise pour ses prochains déplacements.

L'extrait de code suivant montre la quantité de nourriture consommé par un agent rongeur selon son statut (subadulte, adulte ou adulte avec des petits)

```

// si l'agent est un subadulte
if (CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==2)
GetSenarioData.simdata_qte[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNourx
]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posNoury]-= ConsomSub;

// si l'agent est un juvénile ayant plus de 16 jours – peut consommer les graines
else if (CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sevrage>=16)

```

```

GetSenarioData.simdata_qte[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))].posNourx
]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))].posNoury]-= (ConsomAd+
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).NbPetits*ConsomJuv);

// si l'agent est un adulte
else
GetSenarioData.simdata_qte[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))].posNourx]
[CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName()))].posNoury]-= ConsomAd;

```

**Le module de décision:** suite à la perception de l'environnement et la consultation des connaissances propres de l'agent, ce dernier prend sa décision d'agir ou de ne pas agir selon le cas qui se présente. Par exemple lorsqu'un agent subadulte perçoit le début du mois, il tente de décrocher un jeton pour atteindre l'âge de maturation afin de s'accoupler. Si le nombre de jeton est > 0 donc il décide d'exécuter le comportement " Maturation " sinon (tous les jetons sont pris) il s'abstient. Un autre exemple concerne la mise bas d'un agent femelle fécondé, l'agent consulte sur la base de ses connaissances sa date de mise bas et la compare à la date actuelle, si elle correspond il décide de lancer le comportement " Mise bas " sinon il attend la prochaine date.

Dans la portion du code ci-après, si l'agent voit que la date actuelle correspond à la date de la mise bas, il instancie la classe " CreateNewBornAgent " en lui passant les paramètres nécessaires.

```

// Mise à bas
if
(MaFenetre.jour==CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).JourMiseBas
&& MaFenetre.jour!=0
&& CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).sexe==false
&& CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).palier==3)
{
// création des agents rongeurs
CreateNewBornAgent.flag=true
flagborn=true;
new
CreateNewBornAgent(Integer.parseInt(getLocalName()),CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(g
etLocalName())).posx,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).posy,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).terrier,
CreateAgent.InnerData.get(Integer.parseInt(getLocalName())).NbPetits);

```

**Le module des plans comportementaux** correspond aux différents comportements présentés dans la figure 48 : vieillissement, déclin, consommation, maturation, creuser terrier, mise bas et reproduction. L'agent décide de lancer l'exécution d'un plan comportemental quelconque si toutes les conditions de son lancement sont satisfaites.

### 8.3.3. Simulations

La validation est une étape essentielle de l'élaboration d'un modèle. Elle consiste à démontrer qu'un modèle dans son domaine d'application possède un degré de pertinence satisfaisant et consistant avec les applications qui en sont prévues. La validation se distingue de la vérification qui doit démontrer pour un programme informatique que l'implémentation du modèle conceptuel est bien retranscrite : elle se distingue aussi de la calibration qui consiste à ajuster les paramètres et les constantes du modèle pour améliorer la correspondance entre les résultats du modèle et les données disponibles (Rykiel, 1996).

Les modèles de simulation sont particulièrement délicats à valider, notamment lorsqu'il s'agit de valider un modèle d'écosystème ou les éléments représentées ne sont pas complètement connus et où les données disponibles sont souvent peu adaptées aux objectifs de l'étude (Hill, 2000).

Différentes techniques de validation ont été proposées, techniques qui s'appliquent aux différentes étapes de construction du modèle de simulation (modèle conceptuel, vérification du modèle et validation opérationnelle) (Sargent, 1998).

Nous présentons ici la validation opérationnelle de notre modèle. Elle repose sur la comparaison entre les données simulées et les données du monde réel, tout en étant conscients qu'un tel test ne peut démontrer la validité du contenu du modèle, mais qu'il permet d'augmenter sa crédibilité (Rykiel, 1996).

Le cadre expérimental décrit les conditions d'utilisation du prototype, c'est-à-dire : (i) les données utilisées comme entrée du modèle, ici ce sont la population de rongeur de départ (type d'infestation), les conditions climatiques (année sèche, année humide, année très humide) et le géotype (type de blé), (ii) l'initialisation du modèle et (iii) les résultats observés.

Afin de déterminer la pertinence du prototype développé et son adéquation au problème de dégradation des cultures par les rongeurs, l'objectif de cette section est la validation du prototype par une série de simulations fondées sur la modification de la population de rongeurs de départ ainsi que la modification des paramètres climatiques. L'examen de ces simulations met en évidence les possibilités du prototype et ses perspectives d'utilisation.

## **1) Gestion du Temps et ordonnancement des agents**

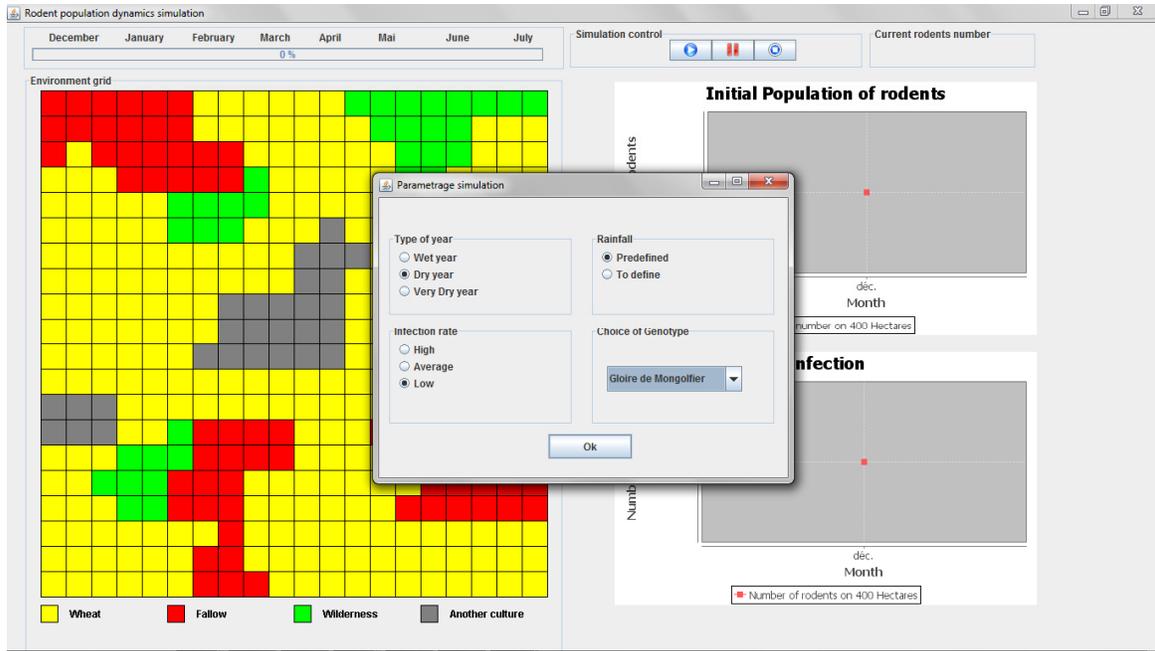
La gestion du temps: le pas de temps de simulation a été défini comme un jour. La finesse de la granularité dépend de la nature des comportements effectués par des agents (les agents consomment chaque jour, la période de gestation est de 21 jours ...). La durée totale d'un jeu de simulation est de huit mois de Décembre (Début de la période de reproduction) à Juillet (fin de la récolte des céréales). Dans la simulation le pas est représenté par une unité de temps de 1seconde (1jour = 1 seconde). Ce choix a surtout été influé par l'échelle de temps utilisée par les rongeurs, par exemple le sevrage s'achève 16 jours après la naissance, la mise bas s'effectue 23 jours après la fécondation, l'agent mâle devient adulte 2 mois après sa naissance, etc.

L'un des problèmes qui peuvent avoir des conséquences néfastes sur les résultats de la simulation est l'ordonnancement des agents. En effet, une stratégie naïve (Meurisse, 2004) dans laquelle les agents sont exécutés toujours dans le même ordre - a une bonne chance de produire ce qu'on appelle un artefact de simulation. Ce phénomène, qui n'est pas décrit par le modèle, est la conséquence de privilège accordé aux premiers agents qui s'exécutent dans un contexte d'une distribution de ressource limitée. Dans notre cas, afin d'éviter ce phénomène indésirable, les agents sont exécutés dans un ordre aléatoire, à chaque pas de simulation, afin de garantir un ordre différent d'exécution.

## **2) Scénario de simulation**

La première version de la simulation dynamique de rongeurs consiste à simuler le niveau d'infestation des terres agricoles à partir d'une population initiale de rongeurs. La distribution des rongeurs dans la zone agricole est liée au mouvement des jeunes adultes qui se déplacent pour creuser leurs propres terriers (comportement présenté dans la figure 41 du chapitre 7). Un agent rongeur juvénile qui devient subadulte est expulsé de son terrier de naissance. Si la cellule de départ n'est pas surpeuplée, il creuse son terrier à proximité; sinon il cherche une autre cellule ou la densité des terriers ne dépasse pas un seuil prédéfini.

Le but de cette simulation est de vérifier les conséquences des décisions prises par le gestionnaire de la campagne (l'agent phytosanitaire) ainsi que les actions et les décisions des prospecteurs et des agriculteurs. Le nombre de rongeurs et le nombre d'hectares infestés à la fin de la simulation sont des indicateurs permettant de se prononcer sur le bon déroulement de la campagne.



**Figure 50.** Paramétrage de la simulation

Selon le cadre expérimental utilisé pour les simulations, nous avons développé notre simulation sur trois étapes : les entrées (inputs), la simulation proprement dite et les sorties (outputs)

**a) Les entrées:** les données nécessaires pour notre simulation consistent en: (i) la spécification du contenu de chaque cellule (céréales, jachère, une autre culture ou d'une zone sauvage), (ii) le génotype de céréales cultivé dans la région (Waha, Vitron, Oued Zenati ou Gloire de Mont-Golfier ...), (iii) le nombre initial de rongeurs par statut d'âge (juvénile, subadulte et adulte) et leur emplacement sur la grille de simulation, et (iv) le type de l'année météorologique (humide, sèche et très sèche). Le montant de la récolte de céréales par hectare est uniquement accessible à partir de la mi-juin (maturation des grains de blé). La figue 50 ci-dessus et la figure 51 ci-dessous montrent respectivement le paramétrage et la création des agents rongeurs à partir d'une base de données d'initialisation des paramètres. Une fois que les agents sont créés, le nombre de rongeurs apparaît dans chaque cellule.

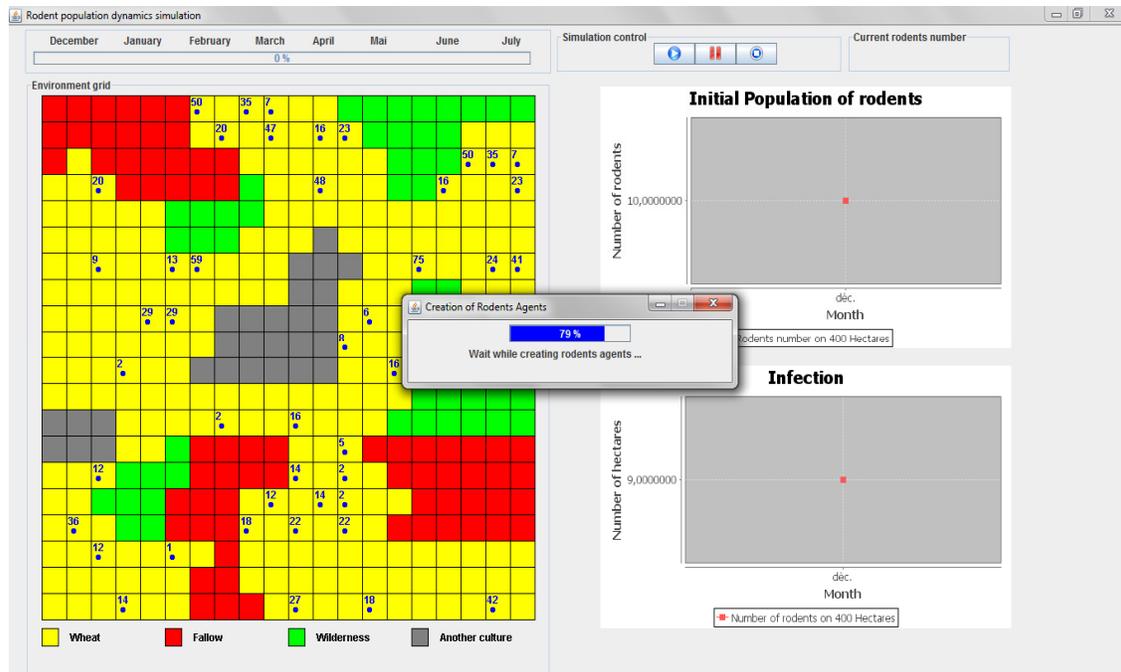


Figure 51. Création des agents représentant la population initiale de rongeurs.

**b) Simulation:** L'interaction des agents entre eux et avec leur environnement représente la dynamique de notre simulation. Ainsi, les agents naissent, vieillissent et meurent en obéissant aux conditions climatique et celles de contrôle de la population. Nous nous concentrons sur deux résultats de la simulation pour évaluer les conséquences de la campagne: l'invasion des hectares de céréales et la dégradation des cultures. En raison du manque de connaissances sur la distribution des rongeurs, nous avons adopté un comportement de déplacement simple pour les rongeurs : "nouvelle quête de terrier"- l'agent rongeur commence toujours par visiter la cellule la plus proche et n'y revient jamais. La figure 52 montre le mouvement des agents subadulte à la recherche des cellules les moins peuplées, matérialisé par des points rouges sur la grille de l'environnement. Encore une fois, le manque de "connaissance du terrain" sur la quantité de blé consommée quotidiennement par la mérione shawi nous oblige à envisager des études théoriques qui font correspondre la quantité de consommation quotidienne aux poids des rongeurs (Petrušewicz, 1970).

La dynamique d'un agent consiste à percevoir son environnement (type de cellule, la densité cellulaire et les précipitations) et l'exécution de ses comportements.

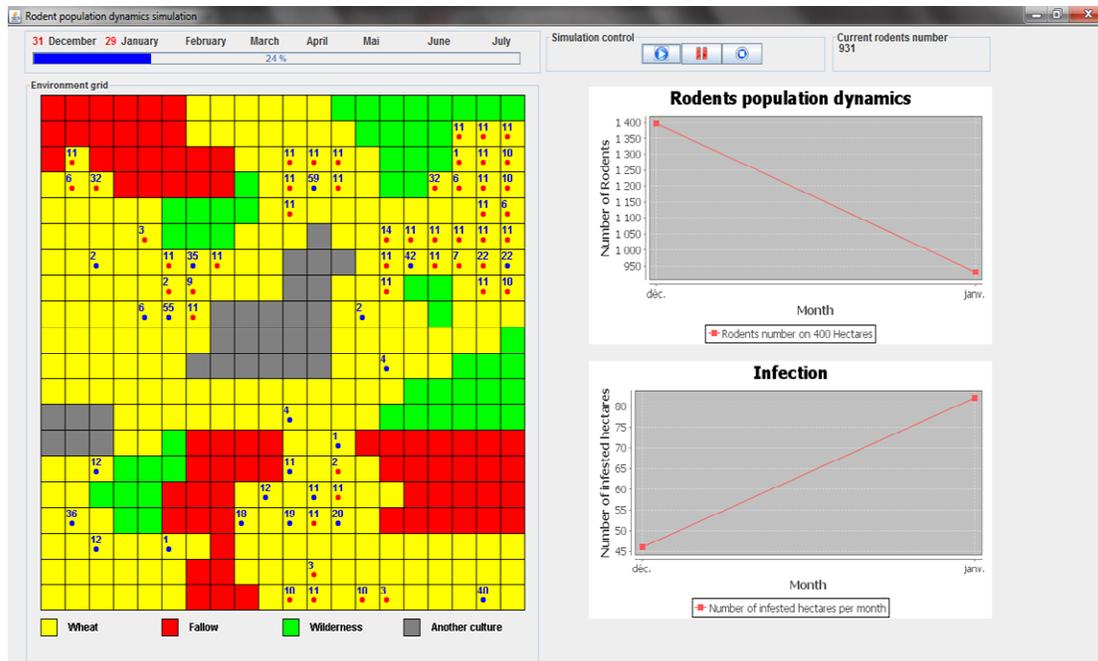


Figure 52. Déplacement sur la grille des agents rongeurs subadulte.

c) **Les sorties:** les résultats de la simulation reflètent l'invasion de l'espace des céréales par les rongeurs ainsi que le développement de la population. Les courbes présentées sur l'interface de la simulation affichent en temps réel l'étendu de l'infestation ainsi que le nombre de rongeurs présents dans la zone agricole. Les résultats présentés dans la figure 53 et la figure 54 sont basés sur un scénario initial de 1000 rongeurs (0 juvéniles, 209 subadultes mâles, 516 subadultes femelles, 173 adultes femelles and 102 adultes mâles), la pluviométrie est indiqué dans la figure 55.

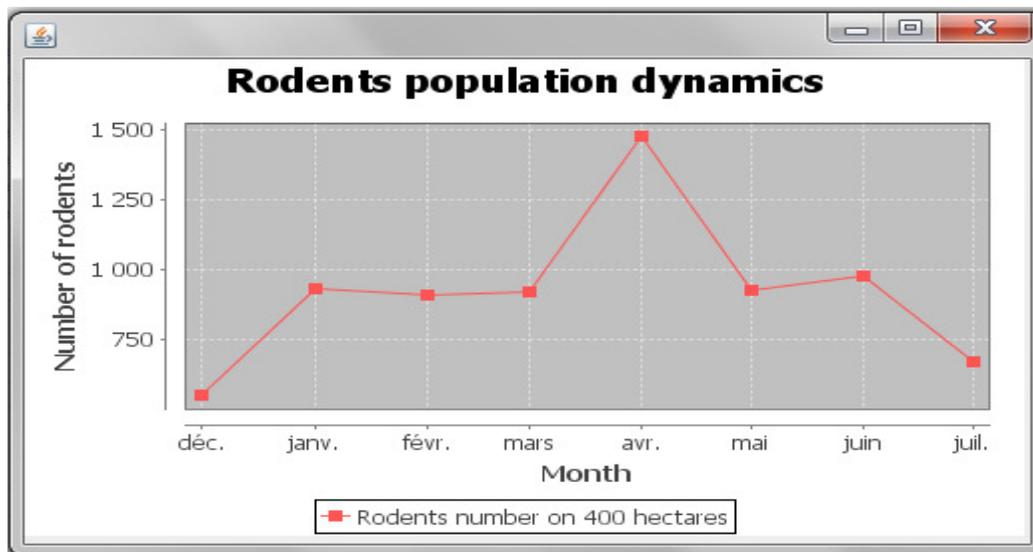
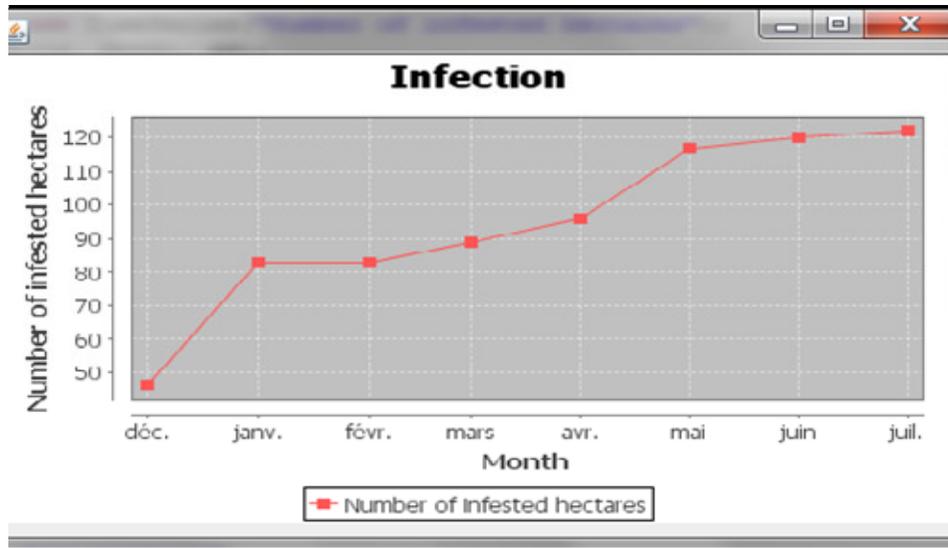


Figure 53. Développement de la population des rongeurs.



**Figure 54.** Infestation des hectares par les rongeurs.

Month	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	Mai	June	July
Rainfall (mm)	90	95	102	120	135	104	120	69	37	26	15

**Figure 55.** Données de la pluviométrie utilisées dans le scénario de la simulation.

**d) Les résultats:** cette première version du simulateur nous a permis de tester différents scénarios: (i) un niveau d'infestation élevé, moyen et bas, (ii) une année sèche, humide et très humide et (iii) une population initiale de rongeurs composée différemment à chaque scénario.

Les tests réalisés pour valider la simulation se sont intéressés à la correspondance entre le nombre de rongeurs obtenu par notre modèle (à base d'agents) et celui donné par le modèle mathématique (donnée sous forme de matrice de Leslie) à la fin de chaque mois de la simulation. La correspondance est exacte pour le premier et le deuxième mois puisque le nombre de femelles adultes fécondées est le même. À partir du troisième mois les différences commencent à apparaître, ceci est dû à la différence entre le nombre de rongeurs juvéniles femelles produit par la simulation qui dépend d'une méthode aléatoire alors que dans le modèle mathématique les auteurs procèdent à un nombre équilibré entre les juvéniles mâles et les juvéniles femelles. Les comportements des agents ont été testés en suivant les étapes de chaque agent dans des fichiers journaux.

La première expérience du prototype de simulation a montré que le nombre de rongeurs diffère selon que les rongeurs (dans la nature) meurent suite à l'exécution du comportement

déclin au début ou à la fin de chaque mois, et par conséquent le nombre d'hectares infestés augmente avec le même ratio.

Cependant, comme la dégradation des cultures n'est pas encore pris en charge par notre simulation, une nouvelle version du simulateur est en cours de développement pour prendre en compte les pertes de rendement des céréales suite à l'infestation des rongeurs et améliorer la correspondance entre les nombres de rongeurs obtenus à la fin de chaque mois à partir des deux modèles.

#### **8.3.4. Conclusion**

La validation que nous avons présentée a comparé le nombre de la population des rongeurs obtenu à la fin de chaque mois par notre simulation à celle obtenu par le modèle mathématique (par un programme MATHLAB). Bien que ne validant pas la structure interne du prototype et les mécanismes sous-jacents (ie. Méthodes des objets et processus décisionnels), ces éléments permettent d'évaluer la capacité du système à reproduire des phénomènes globaux affectés par ces différents mécanismes.

Ainsi dans le prototype présenté, toute la dynamique des rongeurs est réalisée, consommation, déplacement, reproduction, ... les problèmes identifiés lors de la validation (différence entre les nombres de rongeurs obtenus par les deux modèles, exécution du déclin en début ou à la fin du mois, choix de la nouvelle cellule pour creuser des terriers ...) devraient être résolus par un ajustement du modèle animal au moyen de révision du nombre de femelles et de mâles nouveaux nés, ainsi que l'application des critères de déclin des rongeurs par des experts en biologie animal.

La modélisation de ce système complexe a formalisé l'influence de la gestion de la campagne de lutte sur l'agroécosystème. Les simulations que nous venons de présenter précisent cette influence tout en montrant que les pullulations des rongeurs sont loin d'être négligeables.

Ces simulations ont permis de tester différents scénarios fondés sur la modification des caractéristiques de l'année et du nombre de rongeurs initial par statut d'âge. Les prochaines simulations devraient s'attacher à préciser la sensibilité relative du prototype vis-à-vis du type de culture, en précisant par exemple le taux de culture ravagé pour chaque génotype.

Parmi les autres scénarios possibles, mais qui n'ont pu être examinés, citons par exemple l'influence des types de sol sur la dispersion spatiale de rongeurs et l'effet d'application d'algorithmes de propagation spatiale des rongeurs sur un terrain agricole.

Le prototype, élaboré à partir des spécifications décrites dans le chapitre 7 de cette thèse, constitue ainsi un outil d'expérimentation dans lequel différents scénarios peuvent être testés.

# CHAPITRE IX

## Conclusion Générale et Perspectives

---

### 9.1 Bilan

Les volets de cette recherche se situent au croisement de plusieurs domaines scientifiques. Tout d'abord, le premier volet considère les systèmes d'apprentissage assisté par ordinateurs où nous nous sommes focalisés sur l'évaluation des apprenants par l'adoption de techniques émanant de l'intelligence artificielle (systèmes multi-agents et logique floue) et de procédures liées aux systèmes éducatifs (évaluation critériée, évaluation négociée). Le deuxième volet de notre recherche relève d'une part de l'intelligence artificielle distribuée et d'autre part de la modélisation d'écosystèmes, plus particulièrement les agroécosystèmes impliquant plusieurs disciplines, notamment la biologie des rongeurs et leur écologie ainsi que la protection des végétaux. Dans cette conclusion générale nous ferons un bilan de nos travaux en tentant de faire ressortir nos contributions dans le domaine de l'évaluation des apprenants dans un environnement de formation, dans le domaine des SMA et dans celui de la modélisation des agroécosystèmes. Ensuite nous ferons un bilan critique de notre contribution à la modélisation de l'évaluation négociée des apprenants tant d'un point de vue qualitatif, inhérente à notre approche combinée de deux niveaux d'évaluation étroitement liés, que quantitatif en nous appuyant sur l'interprétation des résultats de tests obtenus suite aux expériences réalisées. Enfin nous présentons les différentes perspectives associées à notre recherche.

### 9.2 Premier volet de recherche

Les agents ont été largement utilisés dans des environnements de formation à des fins différentes. La modélisation multi-agents est probablement l'outil le plus utilisé dans ces environnements. Cependant, certains systèmes ont mis l'accent sur l'implication des agents dans l'évaluation des apprenants par rapport à leur capacité d'intelligence et d'autonomie.

L'approche orientée agents consiste à décomposer les problèmes en agents autonomes capables d'interactions au sein d'une organisation. Les propositions de méthodologies, dans la phase d'analyse du système, se concentrent sur les concepts organisationnels visant à décrire l'activité du système. Pour cerner ces aspects organisationnels, l'identification des rôles est primordiale, elle constitue un préambule à la plupart des propositions méthodologiques rencontrées.

Le modèle de l'organisation multi-agents que nous proposons (voir figure 22) repose sur la définition des agents à partir des rôles qu'ils peuvent tenir. Le rôle permet tout à la fois de

représenter la fonction qu'accomplie l'agent et la position qu'il tient dans une organisation (Collinot et Drogoul, 1996).

Après avoir identifié les rôles nécessaires à l'application, il s'agit de les décrire en termes de responsabilité. Une fois l'ensemble des rôles définis, chacun est affecté à un type d'agent. Le résultat de cette étape consiste à affecter un ensemble de rôles à un type d'agent.

Dans la mise en œuvre des agents en tant qu'évaluateurs indépendants, deux contributions nous apparaissent significatives. La première de ces contributions est d'ordre méthodologique. Elle concerne la proposition d'une démarche spécifique et d'un cadre d'évaluation de compétences disparates par l'utilisation de la logique floue. La seconde est centrée sur la proposition, la formalisation et l'implémentation d'un modèle d'évaluation basé sur la négociation reposant notamment sur les décisions individuelles des agents.

### **9.2.1 Contribution méthodologique**

Généralement, tous les systèmes tutoriels intelligents intègrent un mécanisme d'évaluation des apprenants permettant d'évaluer les connaissances acquises par ceux-ci dans le but de réguler leur apprentissage. Seulement, tous les systèmes d'évaluation développés ne s'intéressent pas à la motivation de l'apprenant afin qu'il n'abandonne pas l'apprentissage, à partir de ce point nous avons fondé notre réflexion sur le développement d'un système d'évaluation tenant compte des cas tangent (proches de la moyenne de validation) dans le but de préserver leur motivation et de les encourager à continuer l'apprentissage. Notre contribution méthodologique décrite dans le chapitre 6 consiste à proposer un modèle d'évaluation basé sur trois étapes suivantes :

#### **Etape 1 : identification des compétences du domaine d'étude**

Dans cette étape il s'agit d'identifier et de caractériser les compétences requises du domaine de compétence. Une fois identifiées, les compétences sont subdivisées en sub-compétences par une analyse orienté but jusqu'à n'obtenir que des actions pouvant être réalisées par l'apprenant sur l'interface du système. Par exemple, dans le domaine de la résolution des problèmes mathématiques écrits, quatre compétences ont été identifiées : 1- compréhension du problème, 2- élaboration d'un plan de résolution, 3- l'exécution du plan et 4- révision de la solution. Ces compétences sont considérées comme les compétences principales qu'un apprenant doit maîtriser pour résoudre un problème écrit. Ensuite d'autres compétences sont déduites à partir de celles-ci.

#### **Etape 2 : évaluation des compétences**

Dans notre approche d'évaluation, chaque compétence du domaine d'étude est représentée par une ou plusieurs actions à réaliser par l'apprenant. Cependant, la difficulté de ces actions diffère d'une action à une autre, ceci nous a amené à considérer trois

niveaux de difficulté (facile, moyen et difficile). Nous avons dédié un agent à chaque type de compétence, l'agent est responsable de l'évaluation de la capacité de l'apprenant à maîtriser cette compétence grâce à l'intégration d'un module de logique floue dans le système d'évaluation de l'agent. A partir de là, il existe autant d'agents que de compétences dans notre système d'évaluation.

### **Etape 3 : l'évaluation globale de l'apprenant**

A la réception de toutes les évaluations propres aux agents évaluateurs, l'agent agrégat analyse individuellement chacune d'elles et calcule éventuellement le score moyen obtenu par l'apprenant. Trois décisions peuvent être prises, 1- l'apprenant a réussi son test, 2- l'apprenant a échoué au test ou 3- l'évaluation finale nécessite une négociation.

Notre contribution se situe dans la proposition de ce modèle d'évaluation qui permet d'abord d'identifier les compétences, de les diviser en sous compétences en suivant une analyse orientée but pour aboutir aux actions à réaliser par l'apprenant sur l'interface du système. L'évaluation de ces compétences est réalisée individuellement par des agents qui peuvent utiliser des algorithmes d'évaluation différents selon les spécificités de chaque compétence. Ce type d'évaluation est proposé pour surpasser les évaluations classiques qui se contentent d'évaluer les compétences en une seule étape rendant la tâche difficile pour diagnostiquer à quelle étape ou compétence l'apprenant rencontre des problèmes. Une deuxième contribution relève de l'utilisation de la négociation dans la dernière étape du modèle. Cette négociation permet de repêcher certains apprenants afin qu'ils ne se sentent pas lésés par notre système, ces apprenants sont caractérisés par l'obtention d'un score moyen proche du score de validation. La validation de notre approche d'évaluation a été réalisée par trois expériences où nous avons essayé de mettre en évidence chaque avantage séparément.

### **9.2.2 Contribution par la proposition d'un modèle de négociation**

La négociation que nous proposons permet de statuer sur la réussite de la mission d'un joueur dans la campagne de lutte contre les rongeurs. Cette négociation reflète la collaboration des évaluateurs dans les institutions d'éducation pour favoriser les élèves ayant un score moyen proche du score de validation de l'examen ou du test. Généralement, tous les systèmes d'évaluation utilisent un score seuil pour statuer sur la validation du test, ceci discrimine les apprenants ayant un score moyen proche du seuil de validation. Est-ce qu'un apprenant ayant un score moyen égal à 9.9 possède significativement moins de connaissances qu'un apprenant ayant un score moyen égal à 10 ?

Cette négociation est rendu possible par l'attribution des bonus que nous avons proposée. Chaque agent évaluateur décide d'attribuer les bonus suivant les résultats obtenus par le joueur, ensuite il construit sa table de satisfaction qu'il utilisera dans la négociation.

Cette contribution permet d'ouvrir de nouveaux horizons dans les systèmes d'évaluation dans le sens où elle permet d'éviter une décision statique (réussite si score > 10 et échec si score < 10) elle permet aussi de prendre en considération une catégorie d'apprenants proches de la réussite. La troisième expérience a été réalisée dans le but de confirmer la préservation de la motivation par l'usage de la négociation.

### **9.3 Deuxième volet de recherche**

Après s'être longtemps intéressée à la dynamique des populations en proposant des modèles mathématiques pour prédire leurs évolutions, la modélisation - et la simulation - d'agroécosystèmes s'est proposé d'étudier les interactions entre individus et/ou entre individus et leur environnement. Se sont alors développés les modèles individus-centrés qui reproduisent le comportement d'une population à partir de la description du comportement des individus qui la composent. Ces modèles s'avèrent adaptés à l'étude des agroécosystèmes notamment en permettant la prise en compte de processus décisionnels impliquant des acteurs socio-économiques (processus décisionnels nécessaires par exemple à la gestion de ces agroécosystèmes) et les processus comportementaux des entités composant ces agroécosystèmes. Les comportements, les stratégies de réalisation de buts de ces entités peuvent ainsi être modélisés.

Par leur capacité à modéliser le comportement d'un ensemble d'entités autonomes (les agents) plus ou moins expertes et plus ou moins organisées, capables d'agir et de se coordonner dans un environnement au prix d'éventuels conflits, les SMA, issus de l'intelligence artificielle distribuée, permettent de formaliser fidèlement des modèles individu-centrés. Par ailleurs, les thèmes majeurs de recherche pour les SMA (modélisation de mécanismes de décisions, de coordination et de négociation) les rendent encore plus pertinents pour aborder la modélisation de ces agroécosystèmes. Enfin, par l'homogénéité des concepts mis en œuvre, de la formalisation de ces modèles à leur exécution par émulation-simulation, les SMA permettent une véritable opérationnalisation des modèles individu-centrés. Les modèles ainsi simulés s'apparentent à un laboratoire virtuel où certains intervenants du monde réel et différentes abstractions liées à l'étude de ce monde sont modélisées par des agents permettant alors d'étudier la dynamique du SMA et de la comparer avec celle du système étudié.

Nos contributions dans l'organisation du jeu présenté par l'environnement de formation d'une part et la mise en œuvre des SMA en tant qu'outil de modélisation et de simulation d'agroécosystèmes d'autre part, s'étendent sur deux pistes. La

première piste concerne l'organisation de l'environnement de formation sous forme de micros jeux adaptés aux rôles joués par les apprenants dans le scénario simulé d'une campagne de lutte où les agents sont contrôlés par les joueurs dans leur environnement. La seconde est centrée sur la comparaison des résultats d'un modèle mathématique de développement de population (basé sur la matrice de Leslie) avec un modèle multi-agents issue de la translation de ce même modèle mathématique. Cette formalisation du modèle mathématique en modèle multi-agents est entamée pour surpasser les contraintes liées aux niveaux de description des comportements individuels des individus de la population. Notamment, le modèle mathématique adopté dans cette étude permet seulement de calculer le nombre d'individus de la population pour chaque stade du cycle de vie d'un rongeur, alors que le modèle multi-agents, issu du modèle mathématique, est un modèle individu-centré. Il permet ainsi de suivre la dispersion spatiale des rongeurs, les nouveaux terriers confectionnés, le suivi des hectares infestés, etc.

### **9.3.1 Contribution par la proposition des micros jeux**

Dans les simulations multi-agents participatives, les joueurs se comportent comme s'ils prenaient le contrôle d'agents. Les interactions entre les joueurs se font dans le strict cadre des interactions entre agents. Cependant, cette propriété n'est pas une conséquence du jeu par ordinateur.

Nous avons conçu la partie apprentissage de notre environnement de formation sous forme de micro-jeux. Chaque micro-jeu représente une mise en situation particulière et correspond à une des phases du scénario global de la campagne de lutte. Il s'agit dans un micro-jeu d'immerger le joueur dans un environnement propre à son rôle et d'évaluer son comportement. Comme le stipule la simulation participative, il s'agit de faire participer des joueurs par l'intermédiaire d'ordinateurs à une simulation où chaque joueur tient un rôle. L'avantage des micro-jeux est qu'ils se comportent comme une boîte noire par rapport à la globalité de la simulation et constituent des composants micro-simulation qui s'enchainent pour former à la fin du jeu une entité synchronisée. Chaque micro-jeu reçoit en entrée un flux d'information composé de données et de messages envoyés par les autres joueurs, après interaction du joueur avec l'interface (réalisation des actions, prise de décisions et envoi de messages) le micro-jeu enregistre les données nécessaires à l'enchaînement de la simulation et envoi par l'intermédiaire d'agent les messages résultats attendus.

Un deuxième avantage de cette approche par rapport à une simulation classique ou un jeu global est que chaque micro jeu peut être diagnostiqué individuellement pour éventuellement identifier les micros jeux où les joueurs rencontrent des difficultés. Ceci

permet notamment de cibler les parties de la simulation qui posent problème afin de procéder rapidement à la calibration et la correction des paramètres mis en cause.

### **9.3.2 Contribution par la proposition d'agentification d'un modèle mathématique d'évolution de population**

Nous avons adopté un modèle individu-centré mettant en évidence le développement de la population de rongeurs et leur impact sur le rendement des céréales afin de surmonter la modélisation macroscopique (taux de recrutement global des rongeurs, nombre d'hectares de céréales ravagés et la distribution spatiale des rongeurs). Chaque individu (rongeur) est localisé dans son environnement ; et possède une sensibilité différente à la maturation (et donc à la reproduction) et à la zone de confection des terriers. Ce sont les contraintes environnementales qui façonneront les dynamiques spatiotemporelles de la population de rongeurs lors de la simulation. Notre modèle individu-centré est adapté à partir d'un modèle mathématique décrivant la dynamique des populations de rongeurs en fournissant les taux mensuels de survie, de maturation et de reproduction.

Le modèle écologique que nous avons adopté est basé sur le modèle présenté dans (Leirs et al., 1997) par Leirs et utilisé ultérieurement par Skonhoff dans une étude de bioéconomie. Ce modèle illustre la dynamique d'une population de rongeurs dans un contexte environnemental. Cependant, les objectifs de notre simulation ne pourraient pas être atteints par l'application directe de ce modèle, notamment en ce qui concerne le taux d'infestation des hectares par les rongeurs, leur dispersion spatiale, ainsi que la réalisation de leurs comportements.

Dans le modèle multi-agents de la population des rongeurs que nous proposons chaque agent représente un rongeur (mâle ou femelle). A part la population initiale, chaque nouvel agent est créé avec un statut de « juvénile » et devient après un certain temps « subadulte » s'il survit, enfin il acquiert le statut « adulte ». Chaque agent adopte les comportements appropriés à son statut dans le temps. Pour élaborer ce modèle nous avons adopté un certain nombre d'hypothèses. Ainsi le déplacement des rongeurs sur la grille est soumis à certaines conditions, les liens de parenté entre rongeurs sont mémorisés afin de garder l'intégrité de la population lors des déplacements, de même que le nombre des nouveaux nés soit équitablement partagé entre mâles et femelles.

Le prototype développé de la simulation reprend fidèlement la dynamique des rongeurs en intégrant les dynamiques biologiques et écologiques des rongeurs. Il permet ainsi de tester l'impact des rongeurs sur l'agroécosystème compte tenu de conditions climatiques données et du génotype et permet aussi de mesurer la capacité d'infestation des terrains agricoles par les rongeurs.

L'avantage de la modélisation individu-centrée réside dans le fait que la simulation se concentre plus sur les comportements des individus d'une organisation dans le but d'obtenir une émergence collective permettant d'analyser le comportement global de cette organisation.

La phase de validation du prototype développé étudie la cohérence des résultats obtenus par ce prototype avec des valeurs mesurées sur le modèle mathématique (expériences réalisées sous Matlab). Nous avons montré lors de cette phase que le modèle multi-agents représentait bien le modèle mathématique, mais qu'il devait être affiné de façon à représenter plus fidèlement le comportement du système étudié, notamment lors de la mise bas des nouveaux nés où les proportions entre mâles et femelles doivent être égales.

## **9.4 Perspectives**

Comme la contribution s'est étalée sur deux volets de recherche, nos perspectives concerneront ces deux volets séparément.

### **9.4.1. Perspectives sur le modèle d'évaluation proposé**

Les résultats expérimentaux montrent que le modèle proposé fournit une évaluation similaire à celle d'un expert et améliore sensiblement la performance des joueurs. En outre, la partie négociation du modèle d'évaluation contribue dans la motivation des joueurs comme indiqué dans la troisième expérience. A la base de ce constat, nous concluons que la combinaison de la logique floue avec des agents négociateurs apporte des mérites importants.

Même si notre approche d'évaluation a montré sa capacité à promouvoir l'apprentissage et à motiver les joueurs pour continuer l'apprentissage à travers les expériences réalisées, un travail considérable reste à compléter. Nous synthétisons ce travail dans les points suivants :

- Choix du problème adéquat pour un joueur en tenant compte de son profil et de l'évaluation de ses compétences.
- Considérer d'autres compétences à évaluer comme par exemple le management d'un groupe de travail, la communication, etc. dans un contexte de résolution de problème collaborative.
- Faire participer le joueur à l'évaluation de ses compétences afin de donner des réponses à certaines actions confuses pour les évaluateurs.

### **9.4.2 Perspectives sur la modélisation individu-centrée adoptée**

Afin de permettre une utilisation opérationnelle du prototype des améliorations sont à prévoir. Il s'agit tout d'abord de calibrer le modèle animal avec des experts en biologie et en écologie des rongeurs. Ensuite le déplacement des rongeurs sur la zone infestée est arbitraire

et repose sur la disponibilité de la nourriture, d'autres facteurs spatiotemporels sont à considérer.

L'évolution du modèle de l'agroécosystème est également à envisager. Cette évolution intégrerait des modèles biologiques caractérisant la croissance des plantes sur la période concernée par la simulation.

Nous envisageons aussi d'utiliser l'approche que nous avons définie ainsi que notre expérience de modélisation et de simulation de systèmes à d'autres systèmes et plus particulièrement aux systèmes de lutte contre les ravageurs de culture tels que les criquets.

## Bibliographie

- Abdon B., Raab R., et Ninomiya S. eLearning for international agriculture development: Dealing with challenges. *International Journal of Education and Development using ICT*, January 30 2008.
- Alvarez J. 2007. Du jeu vidéo au serious game : approches culturelle, pragmatique et formelle. Thèse de doctorat en science de l'information et de la communication. Université Toulouse II et III, laboratoires LARA et IRIT
- Anderson R. John, Boyle C. Franklin et Vost Gregg. 1985. "The Geometry Tutor". In the 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence (Los Angeles, Aout 1985), vol. 1.
- Anderson R. John, Conrad G. Frederick et Corbett T. Albert. 1989. "Skill acquisition and the UPS tutor". *Cognitive Science*, vol. 13, p. 467-506.
- Anderson J. R. (1993). *Rules of the Mind*. Hillsdale, NJ, USA: Lawrence Erlbaum Associates.
- Anderson, J.R., Corbett, A.T., Koedinger K.R. and Pelletier, R. "Cognitive tutors : Lessons learned," *Journal of Learning Science*, Vol. 4, No. 2, 1995, pp. 167-207.
- Aubert S., Le Page C., Joly H., Razafindrabe R., Ranaivoson J. F., Ralalaoherivony S. B., N'Diaye I. C. et Bain D., « Conception, adaptation and diffusion of a computer-assisted role game about phytogenetic resources management at a rural level in Madagascar », dans ISEE'02, Sousse, 2002.
- Auger, R. and Séguin, S.P. Le testing adaptatif avec interprétation critérielle, une expérience de praticabilité du tam pour l'évaluation sommative des apprentissages au québec. *Mesure et évaluation en éducation*, 15(1-2) :103-145, 1992.
- Austin, J.L. *How to do things with Words*. Oxford University Press, 1962.
- Balacheff, N., Baron, M., Desmoulins, M., Grandbastien, M. et Vivet, M. Conception d'environnements interactifs d'apprentissage avec ordinateur, tendances et perspectives, In : Actes des 6èmes journées nationales du PRC-GDR Intelligence Artificielle 1997, Hermès, pp. 315-337, 1997.
- Bangert-Drowns R.L., Kulick C.L.C., Kulick J.A. & Morgan M.T. (1991) The instructional effect of feedback in test-like events. *Review of Educational Research* 61, 213-238.
- Barreteau O., Un système multi-agent pour explorer la viabilité des systèmes irrigués: dynamique des interactions et modes d'organisation, Thèse de doctorat, École nationale du génie rural, des eaux et des forêts, 1998.
- Barreteau O., 2003. The joint use of role-playing games and models regarding negotiation processes: characterization of associations. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*,6.
- Bécu., N., Perez, P., Walker, A., Barreteau, O. and Le Page, C. "Agent-based simulation of a small catchment water management in northern Thailand : Description of the CatchScape model", in *Ecological Modelling*, 170 : 319-331.(2003).
- Bensaid, L., Drogoul, A. and Bouron, T. Multi-Agent Based Simulation of Consumer Behaviour : Towards a New Marketing Approach. *International Congress On Modelling and Simulation (MODSIM)*, Vol 3, pp. 1373-1379, 2001.

- Bhalerao, A. and Ward, A. Towards electronically assisted peer assessment : A case study. *The Association of Learning Technology Journal ALT-J*, 9(1) (2001), 2001.
- Biggs, J. *Teaching for Quality Learning at University*. Open University Press/McGraw Hill Educational, 1999.
- Black, H.T. & Duhon, D.L. (2003). Evaluating and Improving Student Achievement in Business Programs: The Effective Use of Standardized Assessment Tests. *Journal of Education for Business*, 70(2), 90-98.
- Bloom, B., Hastings, J.Y. and Madaus, G. "Handbook on Formative and Summative Evaluation of Student Learning," McGraw-Hill Book Co, New York, 1971.
- Bonniol, J.J. L'évaluation ; Approche descriptive ou prescriptive ?, *Recherche et formations. Pour une problématique de l'évaluation formative*. Ketele J., Bruxelles : de Boek, 1986.
- Bonte, B., Bousquet, F., Muller, J.P., Pellegrin, F. and Bonato, O. "Modelling framework for emerging risks simulation in the field of phytosanitary crisis linked to diseases and bio-invasions", *AFPP - 8ème Conférence Internationale sur les Ravageurs en Agriculture*, pp. 594-603, 22-23, Montpellier SupAgro, France, Octobre 2008.
- Bourdet J.F. and Teutsch, P. "Visualization of learner's profile in self-testing situation," *ALSIC Apprentissage des Langues et Systèmes d'Information et de Communication*, Vol. 3, No. 1, 2000, pp. 135-145, <http://alsic.revues.org/index1658.html>.
- Bousquet F., Barreteau O., Le Page C. et Mullon C., « An environmental modelling approach », dans *The use of multi-agent simulations, Advances in environmental and ecological modelling*, Elsevier, pages 113-122, 1999.
- Brassac, C., DE Almeida, J. , Gregori, N. and Saint Didier, V. La théorie des actes de langage en IAD : Utilisations et limites. In J.P. Muller, J. Quinqueton, editors, *IA distribuée et Systèmes multi-Agents*, JFIADSMA'96, pages 229-249. Hermes, 1996.
- Briot, J.P. and DEMAZEAU, Y. *Principes et architectures des systèmes multi-agents*, chapter Introduction aux agents, pages 1-11. Hermès, Paris, France, 2001.
- Brna, P., Self, J.A., Bull, S. & Pain, H. (1999). Negotiated Collaborative Assessment through Collaborative Student Modelling. In Morales, R., Pain, H., Bull, S. & Kay, J. (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 35-42). Le Mans: IOS.
- Brown J. Seely. (1977). *Uses of Artificial Intelligence and Advanced Computer Technology in Education*. In Seidel R. J. & Rubin M. (Eds.), *Computers and Communication: Implications for Education*. New York, NY: Academic Press Inc.
- Brown, P. R., Singleton, G. R., Norton, G. A., Thompson, D. (2001): *MOUSER (Version 1.0): a decision tool for managing mice*. 12th Australasian Vertebrate Pest Conference, 21-25 May, Melbourne, Victoria.
- Bruillard, E. (1997), *Les machines à enseigner*. Paris : Hermes.
- Bruillard E., Delozanne E., Leroux P., Delannoy P., Dubourg X., Jacoboni P., et al. (2000). Quinze ans de recherche informatique sur les sciences et techniques éducatives au LIUM. *Revue Sciences et Techniques Educatives*, 7(1), 87-145.

- Buche, C., Querrec, R., Loor P.D. and Chevaillier, P. "MASCARET: A pedagogical multi-agent system for virtual environment for training," *Journal of Distance Education Technologies*, Vol. 2, 2004, pp. 41-61.
- Buckle A.P. and Smith R.H. (ed.) 1994. *Rodent pests and their control*. Wallingford, UK, CAB International, 405p.
- Burton M. A., « Experiences with the irrigation management game », dans *Irrigation and drainage systems*, pages 217-228, 1989.
- Caferra, R., Peltier, N. & Puitg, F. (2000). *Emphasizing Human Techniques in Geometry Automated Theorem Proving: a Practical Realization*. In Richter-Gebert, J. & Wang, D. (Eds.) *Proceedings of the Workshop on Automated Deduction in Geometry* (pp. 268-305). London: Springer-Verlag, UK.
- Cambier, C. SIMDELTA un système Multi-agents pour simuler la pêche sur le delta central du niger, Thèse de doctorat, Université Paris VI, 1994.
- Campanale, F. *Autoévaluation et transformation de pratiques pédagogiques. Mesure et évaluation en en éducation*, 20 :1-24, 1997.
- Campanale, F. *Quelques éléments fondamentaux sur l'évaluation*. Technical report, IUFM de Grenoble, Cours sur l'évaluation, Janvier 2001.
- Carbonell, J. (1970). AI in CAI: An artificial intelligence approach to computer aided instruction. *Science*, (167):190-202.
- Casti, J.L. *Complexification : Explaining a Paradoxical World Through the Science of Surprise*. London : Abacus. 1999
- Chadli, A., Tranvouez E. and Bendella, F. "Combining Agent-Based Participatory Simulation and Technology Enhanced Learning for Rodent Control," in *Proc. Conf. Summer Computer Simulation Conference*, Istanbul, 2009.
- Chadli, A., Bendella, F. and Tranvouez E. (2010a). Using Multiagent Competence Evaluation with Technology Enhanced Learning techniques: application to rodent control, IFIP WG5.7 14th SIG Workshop, June 13-15 Milan'2010
- Chadli, A., Tranvouez, E., & Bendella, F. (2010b, October). Cooperative skills evaluation and participative multiagent simulation for rodent control training. In *Machine and Web Intelligence (ICMWI)*, 2010 International Conference (pp. 41-47). IEEE.
- Chadli, A., Bendella, F. and Tranvouez E. (2014). A Two-Stage Multi-Agent Based Assessment Approach to Enhance Students' Learning Motivation Through Negotiated Skills Assessment. *Educational Technology and Society*. À paraître en janvier 2015.
- Chevrier, V. *From Self-Organized Systems to Collective Problem Solving 5th International Workshop on Engineering Societies in the Agents World (ESAW'05)*. (Toulouse, France). Springer, LNCS, vol 3451, pp.222-230. 2005.
- Chitty D., 1942- A relative census method for brown rats (*Rattus norvegicus*). *Nature*, 150: 59-60.
- Chomsky, N. *Aspect of the Theory of Syntax*. Cambridge : The MIT Press, 1965.
- Collinot, A. and Drogoul, A. *La method de conception multi-agent casiopée : Application à la robotique collective*. Rapport technique n° 96/25, LAFORIA, Septembre 1996.

- Corti, K. (2006) Games-based Learning; a serious business application. PIXELearning Limited. [www.pixelearning.com/docs/games\_basedlearning\_pixelearning.pdf]
- Cost, R.S., Finin, T., Labrou, Y., Luan, X., Peng, Y., Soboroff, I., Mayfield, J. and Boughannam, A. Jackal: A java –based tool for agent development. In AAI'98 Workshop on software Tools for Developing Agents, 1998.
- Courtois, J. SIAM: un système de diagnostic qui s'adapte aisément à de nouveaux domaines et qui enseigne sa méthode. Thèse de l'Université Paris 6.1990.
- Coyne, R. (2003) Mindless repetition: Learning from computer games. *Design Studies*, 24(3), 199–212.
- D'Aquino P., Le Page C., Bousquet F., Bah A., 2003. Using Self-Designed Role-Playing Games and a Multi-Agent System to Empower a Local Decision-Making Process for Land Use Management : The SelfCormas Experiment in Senegal. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*., 6.
- Daré w.s., Barreteau O., 2003. A role-playing game in irrigated system negotiation: between play and reality. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 6 : 19.
- David, J.P. Modélisation et production d'objets pédagogiques. *Sciences et Techniques Educatives, Hors série 2003, Ressources numériques, XML et éducation*, Hermès, avril 2003.
- Davidsson, P. Agent Based Social Simulation : A Computer Science View. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 5, no 1, <http://jass.soc.surrey.ac.uk/5/1/7.html>. 2002.
- Davis, R. and Smith, R.G. Negotiation as a Metaphor for distributed problem solving. In A.H. Bond, L. Gasser, editors, *Reading in Distributed Artificial Intelligence*, pages 333-356. Morgan Kaufmann, 1988.
- De Lisi, R. & Wolford, J.L. (2002) Improving children's mental rotation accuracy with computer game playing. *Journal of Genetic Psychology*, 163(3), 172–182.
- Delozanne, E., Grugeon, B., Artigue, M. and Rogalski, J. Modélisation et mise en œuvre d'environnements informatiques pour la régulation de l'apprentissage, le cas de l'algèbre avec le projet lingot. réponse à l'appel à projet cognitique 2002, *École et sciences cognitives: Les apprentissages et leurs dysfonctionnements*. Technical report, décembre 2003.
- Delozanne, E. and Grugeon, B. Pépites et lingots : des logiciels pour faciliter la régulation par les enseignants des apprentissages en algèbre. *Cahiers Éducation et Devenir, Hors série, Les TIC à l'école : miracle ou mirage ?* :82–92, septembre 2004.
- Demazeau, Y. From interactions to collective behaviour in agent-based systems. In *Proceedings of European Conference on Cognitive Science*, 1995.
- Demazeau, Y. Steps toward multi-agent oriented programming. In *Proceedings of the First International Workshop on Multi-Agent Systems - IWMASS97*, 1997.
- Desmarais, M.C., Shaun R., & De Baker, J. (2012). A Review of Recent Advances in Learner and Skill Modeling in Intelligent Learning Environments, *User Model. User-Adapt. Interact*, 22(1-2), 9-38.

- Dimitrova, V., Self, J.A. & Brna, P. (1999). The Interactive Maintenance of Open Learner Models. In Lajoie, S.P. & Vivet, M. (Eds.) Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Education (pp. 405-412). Le Mans, France: IOS Press.
- Dintilhac, J.P. and Rak, I. Evaluation de la technologie en collège, académie de montpellier. Technical report, juillet 2005.
- Doty R.E., 1945- Rat control on Hawaiian sugar can plantations. Hawaii. Plant. Rec., 49 (2):71-341
- Drogoul, A., Corbara, B. and Fresneau, D. MANTA : New experimental results on the emergence of (artificial) ant societies. In Artificial Societies : the computer simulation of social life, N. Gilbert and R. Conte (Eds), UCL Press, London. 1995.
- Durfee, E.H. and Montgomery, T.A. A hierarchical protocol for coordinating multiagent behaviors. In AAAI'90; Proceeding of the eighth National Conference on AI, volume 1, pages 86-93, 1990.
- Eck, R.V. (2006). Digital Game-Based Learning: It's Not Just the Digital Natives Who Are Restless. EDUCAUSE Review, 41(2), 16–30.
- Ekanayake, H., Backlund, P., Ziemke, T., Ramberg, R. & Hewagamage, K. (2011). Assessing Performance Competence in Training Games. In Mello, S.D., Graesser, A., Schuller, B. & Martin, J.C. (Eds.) Proceedings of the 4th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction (pp. 518-527). Berlin Heidelberg: LNCS. Springer-Verlag. 6975.
- Elliott Clark, Rickel Jeff et Lester James. 1999. "Lifelike Pedagogical Agents and Affective Computing: An Exploratory Synthesis." Artificial Intelligence Today, vol. 1600, p. 195-211.
- Enochsson, L., Isaksson, B., Tour, R., Kjellin, A., Hedman, L., Wredmark, T. & Tsai-Fellander, L. (2004) Visuospatial skills and computer game experience influence the performance of virtual endoscopy. Journal of Gastrointestinal Surgery, 8(7), 874–880.
- Epstein, J.M. and Robert, A. (October 11, 1996). Growing artificial societies: social science from the bottom up. Brookings Institution Press. pp. 224. ISBN 978-0-262-55025-3.
- Etienne M., 2003. SYLVOPAST : a multiple target role-playing game to assess negotiation processes in sylvopastoral management planning. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 6.
- FAO- Conférence – Trente deuxième session, Rome, 29 novembre – 10 décembre 2003, C 2003/INF/8  
<http://www.fao.org/DOCREP/MEETING/007/J0566f.HTM>
- Farantin, P., Sierra, C., Jennings, N. and Buckle, P. Designing responsive and deliberative automated negotiators. In Proceeding of the AAI workshop on Negotiation: Settling Conflicts and Identifying Opportunities, Orlando, FL, 12-18, 1999.
- Faure, O.G., MerMet, L., Touzard, H. and Dupond, C. La négociation : Situation et problématiques. Nathan, 1998.
- Ferber, J. Les systèmes multi agents vers une intelligence collective. InterEditions, 1995.
- Finin, T., Weber, J., Wiederhold, G., Genesereth, M., Fritzon, R., MacGuire, J., Shapiro, S. and Beck, C. Specification of the KQML agent communication language (draft). Rapport

- technique, DARPA Knowledge Sharing Initiative External Interface Working Group, 1993.
- FIPA. FIPA 97 Specification, Version 2.0, Part 2: Agent Communication Language. FIPA (Foundation for Intelligent Physical Agent), 1997.
- Foner, L.N. What's an agent anyway? - a sociological case study. FTP Report - MIT Media Lab, May 1993.
- Frank, J.R., Snell, L.S., Cate, O.T., Holmboe, E.S., Carraccio, C., Swing, S.R. et al. (2010). Competency-Based Medical Education: Theory to Practice. *Med Teach*, 32(8), 638-645.
- Frontier, S. Ecosystèmes: Structures – Fonctionnement Evolution. Masson, 1990
- Funtowicz S. O., Martinez-Alier J., Mundo G. et Ravetz J. R., « Information tools for environmental policy under conditions of complexity », dans European Environment Agency, environmental issues, 9, 1999.
- Futtersack Michel . QUIZ : une architecture Multi-agents pour un tuteur intelligent. PhD Thesis, Université du Maine 1990
- Gaudé P., 2003. Système multi-agents et jeux. Domaines d'application et bénéfices mutuels. Observatoire français des techniques avancées (OFTA).
- Greer, J.E. and McCalla, G.I. (Eds.). "The Key to Individualized Knowledge-Based Instruction," in Proc. Conf. NATO Advanced Research Workshop on Student Modeling, Springer-Verlag, Ste. Adele, 1991, pp. 211-264.
- Gueraud, V., Adam, J.M., Pernin, J.P., Calvary, G. and David, J.P. L'exploitation d'objets pédagogiques interactifs à distance : le projet formid. STICEF : Sciences et Technologies de l'information et de la communication pour l'Education et la Formation, 11, 2004.
- Guessoum, Z., Rejeb, L. and Durand, R. Using adaptive Multi-Agent Systems to Simulate Economic Models. AAMAS'04, ACM, pp. 68-76, New York City, 2004.
- Guy, B., Bidwell, N. J. & Musumeci, P. (2005) Gameplan: Serious gaming for place making. IE2005: Proceedings of the Second Australasian Conference on Interactive Entertainment. Sydney, Australia: Creativity & Cognition Studios Press, 252.
- Hadji, C. Evaluation, les règles du jeu. ESF, 1990.
- Hadji, C. L'Evaluation démystifiée. ESF, 1997.
- HADJI, C. in Evaluer, règles du jeu, E.S.F. éditeur, Paris, 2000 6ème édition
- Haggar, J., Ayala, A., Diaz, B. and Reyes, C. U. "Participatory design of agroforestry systems: developing farmer participatory research methods in Mexico", *Dev. Pract. London Intermed. Technol* 2003. 11 (4), 417-424.
- Hamel, H. and Pinson, S. Conception participative de simulations multi-agents basée sur une approche d'analyse multi-acteurs. In : A. Drogoul et E. Ramat (Eds). Vers la conception de systèmes artificiels socio-mimétiques. Actes des JFSMA 2005. Calais, Hermès, pp : 1-15. 2005.

- Hill, D.R. Contribution à la modélisation de systèmes complexes, application à la simulation d'écosystèmes, 2000. Mémoire d'habilitation à diriger des recherches de l'université Blaise Pascal, spécialité : Informatique.
- Huang, C., Liu, M., Chu S. and Cheng, C. "An intelligent learning diagnosis system for Web-based thematic learning platform," *Computers & Education*, Vol. 48, No. 4, 2007, pp. 658-679.
- Innes J. E. et Booher D. E., « Consensus building as role playing and bricolage: toward a theory of collaborative planning », dans *Journal of the American Planning Association*, 65, pages 9-26, 1999.
- Jennings, N.R., Wooldridge, M. and Sycara, K. A roadmap of agent research and development. *Journal of autonomous agents and multiagent systems*, 1(1):275–306, 1998.
- Jennings, N.R., Faratin, P., Lomuscio, A.R., Parsons, S., Sierra C. and Wooldridge, M. "Automated negotiation: prospects, method and challenges," *International Journal of Group Decision and Negotiation*, Vol. 10, No. 2, 2001, pp. 199–215.
- Johnson W. Lewis, Vilhjalmsson Hannes et Samtani Prasan. 2006. "The Tactical Language Training System". The First Conference on Artificial Intelligence and Interactive Digital Entertainment (Marina Del Rey, 1-3 Juin 2006).
- Jones M., Role of the private crop consultant in implementation of IPM. In: E. B. Radcliffe and W. D. Hutchison [eds.], *Radcliffe's IPM World Textbook 2000*, University of Minnesota, St. Paul, MN
- Juwah, C. Using peer assessment to develop skills and capabilities. *United States Distance Learning Association*, janvier 2003 :39–50, 2003.
- Kickmeier-Rust, M.D., Schwarz, D., Albert, D., Verpoorten, D., Castaigne, J.-L., and Bopp, M. (2006) "The ELEKTRA project: towards a new learning experience". In M. Pohl, A. Holzinger, R. Motschnig, & C. Swertz (Eds.), *M3 – Interdisciplinary aspects on digital media & education*, Österreichische Computer Gesellschaft, Vienna, pp. 19-48.
- Kickmeier-Rust, M.D., Albert, D., Hockemeyer, C., & Augustin, T.: Not breaking the narrative: Individualized competence assessment in educational games. In *Proceedings of the European Conference on Games-based Learning (ECGBL)*, October 25-26, 2008, Paisley, Scotland (2008)
- Klassen, K.J. and Willoughby, K.A. (2003) In-class Simulation Games: Assessing Student Learning, *Journal of Information Technology Education*, 2, 1-13.
- Krebs C.J. & Myers J.H. (1974) Population cycles in small mammals. *Advances in Ecological Research*, 8, 267-399.
- Kuntashula, E., Mafongoya, P. L. "Farmer participatory evaluation of agroforestry trees in eastern Zambia", *Agric. Syst* 2005. 84, 39–53.
- Labat, J-M. : QUIZ : une amélioration des capacités pédagogiques des tuteurs intelligents, thèse d'université, Paris VI, décembre 1990
- Lai, K.R. and Lan, C.H. (2006) Modeling Peer Assessment as Agent Negotiation in a Computer Supported Collaborative Learning Environment. *Journal of Educational Technology & Society* 9(3):16-26.

- LE Louarn H., Quere, JP., Butet, A., 2003- Les rongeurs de France. *Quae*, 260 : 83-90
- Leary J. and Berge Zane L., *International Journal of Education and Development using Information and Communication Technology (IJEDICT)*, 2006, Vol. 2, Issue 2, pp. 5159.
- Leirs, H., Stenseth, N. C., Nichols, J. D., Hines, J. E., Verhagen, R. and Verheyen, W.N. (1997). Seasonality and non-linear density-dependence in the dynamics of African Mastomys rats. *Nature* 389, 176-180
- Leslie, P.H. "Some further notes on the use of matrices in population mathematics", *Biometrika*, 35, 213-245. (1948)
- Lord, F.M. Applications of item response theory to practical testing problems. 1980.
- Malglaive, G. Enseigner à des adultes. PUF, 1990.
- Maor, D. How does one evaluate students' participation and interaction in an internet-based unit ? In *Teaching and Learning in Changing Times*, actes de la 7eme conférence : Annual Teaching Learning Forum, pages 176-182, février 1998.
- Maracci, M., Cazes, C., Vandebrouck, F., Mariotti, M.A. (2010); Casyopée in the classroom: two different theory-driven pedagogical approaches. *European Research in Mathematics Education VI. Proceedings of the Sixth Congress of the European Society for Research in Mathematics Education*, Lyon, France, January 28 - February, 1, 2009.
- Mazza, R. and Milani, C. Exploring usage analysis in learning systems : Gaining insights from visualisations. In *AIED Workshops (AIED'05)*, juillet 2005.
- McDowell, L. "The impact of innovative assessment of student learning," *Innovations in Education and Training International*, Vol. 32, No. 4, 1995, pp. 302-313.
- Meerburg B.G., Bonde M., Brom F.W.A., Endepols S., Jensen A.N., Leirs H., Lodal J., Singleton G.R., Pelz H.J., Rodenburg T.B., & Kijlstra A. (2004) Towards sustainable management of rodents in organic animal husbandry. *NJAS*, 52, 195-205.
- Mendoza, G. A., Prabhu, R. "Combining participatory modeling and multi-criteria analysis for community-based forest management", *Forest Ecol. Manage.* 207, 2005, 145-156.
- Mermet L., « Une méthode de prospective: les exercices de simulation de politiques », dans *Nature Sciences Sociétés*, 1, pages 34-46, 1993.
- Merrill M D. Component Display Theory. *Educational Technology: Instructional Design Theories and Models* (Reigeluth C eds.), Erlbaum Associates, 1983, pp. 34-39.
- Merrill, M.D. (2002) "First principles of instruction", *Educational Technology, Research and Development*, Vol. 50, pp. 43-59.
- Meurisse, T. Simulation multi-agent : du modèle à l'opérationnalisation, Thèse de doctorat (PhD thesis), Université Paris 6, France, July 2004.
- Mialhe, F., Becu, N., & Gunnell, Y. (2012). An agent-based model for analyzing land use dynamics in response to farmer behaviour and environmental change in the Pampanga delta (Philippines). *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 161, 55-69.

- Michael, D. & Chen, S. (2006) *Serious games: Games that educate, train, and inform*. Boston, MA.: Thomson Course Technology.
- Mickwitz, P., Melanen, M., Rosenström, U. and Seppälä, J. "Regional eco-efeciency indicators a participatory approach", *J.Cleaner Product* 2006. 14 (18), 1603–1611.
- Mislevy, R.J., Steinberg, L.S. & Almond, R.G. (2003). On the Structure of Educational Assessments. *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, (1), 3–62.
- Mitchell, A. & Savill-Smith, C. (2004) *The use of computer and video games for learning: A review of the literature*. Learning and Skills Development Agency.
- [[www.LSDA.org.uk](http://www.LSDA.org.uk)]
- Müller, H.J. Negotiation principles. In O'Hare G.M.P., N.R. Jennings, editors, *Foundation of Distributed Artificial intelligence*, Chapter 7, pages 211-229. Wiley, New York, 1996.
- Newell, A. The knowledge level. *Artificial Intelligence*, 18:87–127, 1982.
- Nicaud J.F. (1987)]. *Aplusix : un système expert de résolution pédagogique d'exercices d'algèbre*. Thèse de l'Université de Paris XI.
- Nicaud, J-F. Modélisation en EIAO, les modèles d'APLUSIX, in N. Balacheff et M. Vivet, *Didactique et intelligence artificielle*, pp. 68-112, La pensée sauvage éditions, 1994.
- Odell, J. Objects and agents compared. *Journal of object technology*, 1(1):41–53, 2002.
- Papert, S. 1980. *Mindstorms: Children, computers and powerful ideas*. New York, New York: Basic Books.
- Parunak, H.V.D, Savit, R. and Riolo, R. Agent-Based Modeling vs. Equation-Based Modeling : A Case Study and User's Guide. In J. Sichman, R. Conte and N. Gilbert (eds). *Multi-Agent-Based Simulation, MABS'98*, Paris, France, pp. 51-69. 1998.
- Perrenoud, P. *La Pédagogie différenciée*. Paris : ESF, 1997.
- Perrenoud, P. Les trois fonctions de l'évaluation dans une scolarité organisée en cycles. *Educateur*, 2 :19–25, 2001.
- Petrusewicz, K. "Productivity of terrestrial animals. Principles and methods", *IBP Handbook*, 13. Blackwell Sci Publ., Oxford. (1970).
- Piché P., Frasson C., Aimeur E. (1998). Amélioration de la formation au moyen d'un agent perturbateur dans un système tutoriel intelligent. *Actes du colloque NTICF'98*, INSA Rouen, France.
- Pilato, G., Pirrone, R. & Rizzo, R. (2008). A KST-Based System for Student Tutoring. *Applied Artificial Intelligence*, 22(4), 283-308.
- Pitts, J., Colin, C., Thomas, P. & Smith, F. (2002). Enhancing Reliability in Portfolio Assessment: Discussions Between Assessors. *Med Teach* 24, 197–201.
- Piveteau V., 1996. *Prospective et territoire : apports d'une réflexion sur le jeu*. Coll. Etudes du Cemagref, Série gestion des territoires edn., France.

- Poggi-Combaz, M.P. L'évaluation scolaire. Ressource pédagogique pour la licence sciences du sport, mention education et motricité de l'université de franche-comté. Technical report, mise à jour en avril 2006.
- Poulet A.R., 1982. Pullulation de Rongeurs dans le Sahel: mécanismes et déterminisme du cycle d'abondance de *Taterillus pygargus* et d'*Arvicanthis niloticus* (Rongeurs, Gerbillidés et Muridés) dans le Sahel du Sénégal de 1975 à 1977. Thèse d'Etat, Université Paris VI
- Prevot, P. Un tuteur intelligent pour la formation industrielle. Application à l'intégration d'un didacticiel cimentier. Workshop of Thunder Bay, pp. 20-39.
- Price L.M.L. and Balasubramanian V.,(1996) Securing the future of intensive rice systems: a knowledge intensive resource management and technology approach. Chapter 6 in: Rice Production Systems in the Asian Region Volume I: Challenges for Rice Research in Asia, Ken S. Fischer, ed. The Pacific basin Study Center, San Francisco.
- Putnam, L.L. and Pool, M.S. Conflict and negotiation. In L.L. ABD, F.J. Putnam, K.H. Roberts, L. Porter, editors, Handbook of Organizational Communication, An interdisciplinary Perspective, pages 549-599. Sage Publication, 1987.
- Radford, A. (2000) Games and learning about form in architecture. *Automation in Construction*, 9(4), 379–385.
- Raoul F. (2001) Ecologie de la transmission d'*Echinococcus multilocularis* chez le renard dans l'Est de la France: dépendance au paysage et à la relation proie-prédateur? Thèse de doctorat, université de Franche-Comté, Besançon, 180 p.
- Rausch, R.L. (1995). Life-cycle patterns and geographic distribution of *Echinococcus* species. In *Echinococcus and hydatid disease* (eds R.C.A. Thomson & A.J. Lymbery), pp. 89-134. CAB International, Wallingford - Oxon.
- Rauschmayer, F., Risse, N. "A framework for the selection of participatory approaches for SEA", *Environ. Impact Assess. Rev.* 25, 2005, 650–666.
- Rees, C. & Sheard, C. (2004). The Reliability of Assessment Criteria for Undergraduate Medical Students' Communication Skills Portfolios: the Nottingham Experience. *Medical Education*, 38(2), 138-144.
- Reitsma R., Zigurs I., Lewis C., Wilson V. et Sloane A., « Experiment with simulation models in water-resources negotiations », dans *Journal of water resources planning and management*, 122, pages 64-70, 1996.
- Ritterfeld, M. Cody, & P. Vorderer (Eds.), *Serious games: Mechanisms and effects* (pp. 295-321). Mahwah, NJ: Routledge, Taylor and Francis.
- Rolland, M.C., Arenilla, L., Roussel, M.P. and Gossot, B. Dictionnaire de pédagogie. Bordas, 2000.
- Roussos, L.A., Templin, J.L. & Henson, R.A. (2007). Skills Diagnosis Using IRT-Based Latent Class Models. *Journal of Educational Measurement*, 44, 293-311.
- Russell, S. and Norvig, P. Artificial intelligence. A modern approach. Englewood Cliffs, New Jersey, USA, 1995.
- Rykiel, E.J. Testing ecological models : The meaning of validation. *Ecological modeling*, 90: 229-244, 1996

- Sallantin, J. Les agents intelligents, essai sur la rationalité des calculs. Hermès, Paris, France, 1997.
- Sander, E., Nicaud, J.F., Chachoua, H. and Croset, M.C.. From usage analysis to automatic diagnosis : The case of the learning of algebra. In AIED Workshops (AIED'05), juillet 2005.
- Sargent, R.G. Verification and validation of simulation models. In Winter Simulation Conference, pages : 121-130, 1998.  
Citeseer.nj.nec.com/sargent98verification.html
- Sauvé L., Les eJeux : Un moyen pour s'engager activement dans son apprentissage. Actes du 4è colloque de Questions de Pédagogies dans l'enseignement supérieur, Louvain-La-Neuve, Belgium, 24-26 January 2007
- Schraw, G. & Moshman, D. (2004). Metacognitive Theories. *Educational Psychology Review*, 7(4), 351-371.
- Schunk, D.H. Goal setting and self-efficacy during self-regulated learning. *Educational Psychologist*, 25(1) :71-86, 1990.
- Searle, J.R. *Speech Acts*. Cambridge University Press, 1969.
- Shute, V. J., Ventura, M., Bauer, M. I., & Zapata-Rivera, D. (2009). Melding the power of serious games and embedded assessment to monitor and foster learning: Flow and grow. In U. Ritterfeld, M. Cody, & P. Vorderer (Eds.), *Serious games: Mechanisms and effects* (pp. 295-321). Mahwah, NJ: Routledge, Taylor and Francis.
- Siebenhüner, B. and Volker, B. "The role of computer modelling in participatory integrated assessments", *Environ. Impact Assess* 2005. Rev. 25, 367-389.
- Simos, J. *Evaluer l'impact sur l'environnement*. Presses polytechniques et universitaires romandes, 1990
- Singleton G.R., Krebs C.J., Davies S., Chambers L., & Brown, P.R. (2001) Reproductive changes in fluctuating house mouse populations in southeastern Australia. *Proceedings of the Royal Society London*, 268, 1741-1748.
- Skinner, B.F. (1954). The science of learning and the art of teaching. *Harvard Educational Review*, 24(2), 86-97.
- Skonhoff, A., Leirs, H., Andreassen, H.P., Mulungu, L.S.A. and Stenseth, N.C. "The bioeconomics of controlling an African rodent pest species", *Environment and Development Economics*, 11, issue 04, p. 453-475. 2006.
- Smith, R.G. (1980). The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on computers*, C-29(12), 1104-1113.
- Snjv-Syndicat national du jeu video. 2012. <http://www.snjv.org/data/document/10-mesures-cles-2012.pdf>Squire, K. & Jenkins, H. (2003) Harnessing the power of games in education. *Insight*, 3(1), 5-33
- Squire, K., & Steinkuehler, C. (2005) Meet the gamers. *Library Journal*, 130(7), 38-42.
- Stathacopoulou, R., Magoulas, G., Grigoriadou, M. & Samarakou, M. (2005). Neuro-Fuzzy Knowledge Processing in Intelligent Learning Environments for Improved Student Diagnosis. *Information Sciences*, 170(2-4), 273-307.

- Staver C. 2004. El MIP eficaz: aprendizajes metodológicos sobre la relación familias rurales – extensionistas en los proyectos CATIE/NORAD en Nicaragua durante los 90's. In *Procesos de Innovación Rural en América Central - Reflexiones y Aprendizajes* (C. Prins, ed.). CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Sung, Y.T., Chang, K.E., and Hou, H.T. (2005). The design and application of a web-based self and peer assessment system. *Computers and Education*, 45(2), 187-202.
- Sycara, K. Multiagent compromise via negotiation. In L. Gasser, M.N. Huhns, editors, *Distributed Artificial Intelligence*, volume 2, chapter 6, pages 119-137. Morgan Kaufmann, 1989.
- Tambe, M., Lewis Johnson, W., Jones, R., Koss, F., Laird, J., Rosenbloom, P. and Schwamb, K. Intelligent agents for interactive simulation environments. *AI Magazine*, 16(1), Spring. 1995.
- Tchounikine, P. Quelques éléments sur la conception et l'ingénierie des eiah, dans les actes du gdr i3. Technical report, 2002.
- Tchounokine, P. (2003), Quelques éléments sur la conception et l'ingénierie des EIAH. In *Actes des deuxièmes assises nationales du GdR I3*.
- Toth F. L., « Policy exercises: objectives and design elements », dans *Simulation and games*, 19, pages 235-255, 1988.
- Tuckman, B.W. (1996). The Relative Effectiveness of Incentive Motivation and Prescribed Learning Strategy in Improving College Students' Course Performance. *Journal of Experimental Education*, 64, 197-210.
- Van Eck, R. (2006) Digital game-based learning: It's not just the digital natives who are restless. *EDUCAUSEreview*, march/april, 16-30.
- Vedrashko I., Advertising in Computer Games, Master of Science in Comparative Media Studies at the M.I.T., 2006, [http://gamesbrandsplay.com/files/vedrashko\\_advertising\\_in\\_games.pdf](http://gamesbrandsplay.com/files/vedrashko_advertising_in_games.pdf)
- Vergnaud, G. Introduction, dossier : Compétences. Performances Humaines & Techniques, 75 et 76 :7-12, 1995.
- Wadsworth, Y. What is Participatory Action Research ? *Action Research International*, 2(1), 1998.
- Ward, A., Sitthiworachart, J. and Joy, M. Aspects of web-based peer assessment systems for teaching and learning computer programming. In *Proceedings of the IASTED International Conference*, 16-18 février 2004.
- Webber, C., Pesty, S. and Balacheff, N. "A multi-agent and emergent approach to learner modeling," in *Proc. 15th. Conf. European Conference on Artificial Intelligence*, 2002, pp. 98-102.
- Weiss, G. and Dillenbourg, P. Cognitive and computational approaches, chapter What is multi in multi agent learning?, pages 64-80. Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1999.
- Wellman, M.P.. A computational market model for distributed configuration design. In M.N. Huhns, M.P. Singh, editors, *Readings in Agents*, pages 371-379. Morgan Kaufmann, 1998.

- Wellman, M.P. Multiagent systems. In R.A. Wilson, F. Keil, editors, *The MIT Encyclopedia of Cognitive Sciences (MITECS)*. MIT press, 1999.
- Wenger, E. "Artificial Intelligence and Tutoring Systems: Computational and Cognitive Approaches to the Communication of Knowledge," Morgan Kaufmann, Los Altos, CA, 1987.
- Woods J., Abdon B.R., et Raab R.T.. ICTs, e-learning, and simulations: bringing knowledge-intensive management to Asian agriculture. International Federation of Information Processing 9.4 Conference, Bangalore, India, 28-31 May 2002.
- Wooldridge, M. and Jennings, N.R. Intelligent agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2):115–152, 1995.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
- Zyda, M. (2005) From visual simulation to virtual reality to games. *Computer*, 38(9), 25-32.

Annexe

## A Two-Stage Multi-Agent Based Assessment Approach to Enhance Students' Learning Motivation Through Negotiated Skills Assessment

Abdelhafid Chadli<sup>1</sup>, Fatima Bendella<sup>2</sup> and Erwan Tranvouez<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ibn khaldoun University of Tiaret, Computer Science Department, Algeria // <sup>2</sup> University of Sciences and Technology of Oran, Computer Science Department, Oran, Algeria // <sup>3</sup> Aix Marseille University, CNRS, LSIS UMR 7296, Marseilles, France

### ABSTRACT

In this paper we present an Agent-based evaluation approach in a context of Multi-agent simulation learning systems. Our evaluation model is based on a two stage assessment approach: (1) a Distributed skill evaluation combining agents and fuzzy sets theory; and (2) a Negotiation based evaluation of students' performance during a training simulation or a Problem-solving process in a Computer-assisted learning system. This paper highlights how this approach deals with the problem of subjective evaluation of students, and shows the impact of Negotiated skills evaluation on reducing the students' rate of dropout. This approach can also compensate the absence of human expert for assessing training results. Applied to training in plant protection, experiments' results showed first the fuzzy sets based assessment to be similar to the domain expert's assessment and second the negotiated skills assessment to be effective in assessing students' abilities and sustaining students' motivation to continue learning. This evaluation approach allows us to address the problem of subjective assessment and overcome some difficulties encountered in traditional measurement models.

### Keywords:

Agent-based evaluation, Negotiated collaborative evaluation, Distributed evaluation, Fuzzy logic based assessment.

### Introduction

The use of Simulation based systems for education and training purposes is still hindered by lack of methods and tools to assess learners' progress during a training session. For instance, in classroom-based learning, assessment is usually conducted in two ways (*formative* and *summative*) and is performed by human experts. However, in Simulation-based learning, these assessment methods become inappropriate, as they often consist in a negative feedback without explanation or improvement guidance, which can lead a learner to lose motivation and to stop learning. Furthermore, when it comes to assessment, there is no appropriate Computer-based assessment methodology adapted to Simulation-based learning/training (Ekanayake et al., 2011). Currently, skills assessment in training simulations is often conducted by human instructors using subjective qualitative methods (based on human expertise), which becomes difficult to automate as expected in Simulation-based learning systems in regards to reduction of instructional time and costs (Eck, 2006).

In order to help students better cope with difficulties encountered in solving problems, many researchers have developed intelligent assessment tools based on artificial intelligence approaches (Stathacopoulos, 2005; Huang, 2008). For example, the conceptual framework developed by Mislevy et al. (2003) adopts an Evidence-Centered Design (ECD), which informs the design of valid assessments and can yield real-time estimates of students' competency levels across a range of knowledge and skills. However, the following issues in existing assessment models require further investigation:

- Assessment tools often proceed in a single stage evaluation of student's skills, and focus more on producing marks than giving detailed explanation on what the students failed to understand or put into practice (Chang et al., 2006). Furthermore, learner feedbacks may be insufficient and lack accuracy to help students.

- Generally, all assessment tools set a threshold score for tests to be succeeded. This discriminates students whose final score is near the passing limit. Does a student with a 9.9 final score have significantly less knowledge than a student with 10 as final mark? Moreover when considering potential error margins.
- The existing assessment tools focus more on assessing learner's performance regardless of whether this assessment contributes to learners' motivation and not give up of learning.

These issues can be addressed first by refining the assessment skills criteria in order to detail what part of the learning process went wrong. Secondly, marks should be handled with a margin error, thus avoiding threshold phenomena where an assessment can change significantly. Moreover, taking into account limited compensation between the different assessment criteria (as when deciding whether a student should graduate or not), would grant a more flexible assessment as humans do. Finally, reporting feedback to the student can then be detailed and not fully negative, reducing the demotivation issue.

In this paper, we propose to use distributed assessor agents to assess skills individually and thus inform precisely about difficulties encountered by the student at each skill. By using Fuzzy sets, assessor agents are able to evaluate the level of control of each skill by considering the difficulty of each action of the skill. Our strategy involves a two-stage approach (see figure 1): the first stage focuses on student's skill evaluation by means of assessor agents; each is responsible of evaluating only one skill of the student. This will inform the second stage of the approach, which concerns the global evaluation of the student's capabilities. This evaluation stage is managed by an aggregate agent and is based on the assessor agents' assessments, allowing a negotiation process to decide whether the student passes the required skills qualification.

The proposed system was evaluated by conducting three experiments using students training in plant protection as subjects. The following three issues are explored here:

1. Comparing the students' assessment by the system to an expert like.
2. Whether provided feedback helped students with their problem solving.
3. Whether assessment method encouraged students to continue learning and not give up the learning system sessions.

This paper is structured in four parts. We first present relevant research works in learning assessment area, related issues and the problematic we address. Then we describe our skills evaluation approach, in this part we detail firstly the skill evaluation and secondly the global evaluation where we expose all related aspects to the negotiation process. Finally, we present the experimental design and analytical results before drawing the conclusion.

## Relevant Research Works and Related Issues

A number of Intelligent learning environments are concerned with evaluating learners in a purpose of providing individual learning guidance to learners, and enhancing the performance of each learner. For example, Stathacopoulou et al. (2005) have developed a neural network implementation for a Fuzzy logic-based model of the diagnostic process as a means to achieve accurate student diagnosis in Intelligent learning environments. Huang et al. (2008) have proposed an intelligent diagnosis and assessment tool, and have incorporated it into an open software e-learning platform developed for programming language courses, based on text mining and Machine learning techniques to alleviate teachers' workload. In order to address the question: *How can Game-based learning be assessed?* Shute and Ke (2012) have adopted a form of stealth assessment based on ECD-based assessments. All these works led to powerful tools that circumvent the weaknesses of the traditional assessment. However, these assessment tools did not deal with the issues referred to above.

Distributed skill centered assessment is a method that can address these problems by combining heterogeneous skill assessment methods and thus enable the development of robust and valid simulation or Problem solving based learning systems (Oulhaci et al., 2013). Additionally, the presence of imperfect information is an important factor which often leads to errors in the learner evaluation. As Fuzzy sets theory is classically used to handle uncertainty by using qualitative output variable, using the learner's level over a knowledge classification scale can help solving this limitation. Many studies focusing on assessment have used the Fuzzy theory, for example, Innocent et al. (2005) have developed a Fuzzy expert system for the medical diagnosis to show how fuzzy representations are useful for taking

uncertainty into account and can be applied to model the acquisition of knowledge by experts. In our assessment tool, the first stage's assessor agents are in charge of applying the Fuzzy logic process to evaluate each skill master degree.

In this research, we also promote the use of Negotiated collaborative assessment based on Fuzzy sets individual evaluation. Some researches proved that discussion and negotiation between independent assessors can enhance the reliability of assessment criteria for portfolios (Rees & Sheard, 2004). According to Pitts et al. (2002), the collaborative assessment makes it possible to provide an enhanced assessment of learner so as to improve his skills. This idea was used first in open model of the student's knowledge (Dimitrova et al., 1999), which involved the student and the assessor (or an agent acting on the assessor's behalf) negotiating an agreed assessment of the student (Brna et al., 1999). Negotiation is also used in peer assessment, Lai and Lan (2006) have developed a method for modeling collaborative learning as multi-issue agent negotiation using fuzzy constraints. The proposed method aggregates student marks to reduce personal bias. In this framework, students define individual Fuzzy membership functions based on their evaluation concepts and agents facilitate student-student negotiations during the assessment process. In the same context, several authors show that the allocation of bonuses to students is a relevant intervention strategy for cognitive engagement and student achievement (Black & Duhon, 2003; Tuckman, 1996).

The approach that we propose allows learners to engage in a Simulation based learning and offers the opportunity for the learner, whose final score is close to the threshold fixed for test success, to negotiate his final score by means of assessor agents through the use of the results of this learner's skills assessments and bonus attribution according to the student's skill performance.

Agents have been widely used in training environments for different purposes. Multi agent modeling is probably the most used tool in these environments, notably by using their intelligence ability and autonomy for learner's assessment. For example, Baghera is an intelligent tutoring system which uses a theorem prover agent for automatic verification of proofs (Caferra et al., 2000). Pilato et al. (2008) have used a conversational agent to assess the student knowledge through a natural language question/answer procedure. They have used the latent semantic analysis technique to determine the correctness of the student sentences in order to establish which concepts the student knows. An assessment agent is used by Lai and Lan (2006), this approach allows student, whose coursework is marked, negotiate with markers using this assessment agent to reach a final assessment.

In conclusion, the discussion above reveals that combining assessor agents, Fuzzy sets theory and negotiation in an assessment tool is an idea that deserves investigation.

## **The Evaluation Modeling**

In this section, we present our two-stage evaluation approach, from the Fuzzy logic modeling of the individual skill assessment to the negotiation process taking place between assessor agents and mediated by the aggregate agent (see figure. 1). Our approach follows three steps:

### **Step1: Skills identification step**

In order to better identify and to characterize the required skills within any of the domains of competence, we propose to follow the knowledge classification classically used in metacognition theory (Schraw & Moshman, 1995), where three types of knowledge are defined: *Procedural knowledge*, *Declarative knowledge* and *Conditional knowledge*.

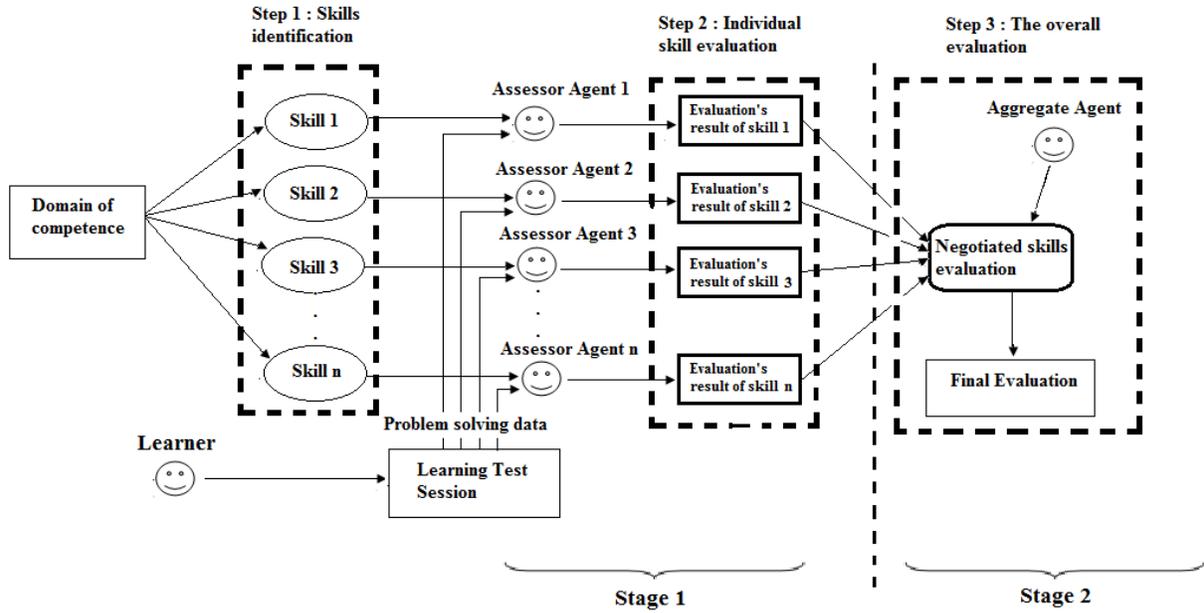


Figure 1. General overview of the system

Using these types of knowledge analysis, the main competences of the domain are first identified and are later divided in sub competences using a goal oriented analysis (see figure 2), until reaching the actions to be performed by the learner via the learning system interfaces. For example in the domain of Word-based mathematical problem solving, four main skills are identified: 1-understanding the problem, 2-making the plan of resolution, 3-executing the plan and 4-reviewing the solution. These competencies are considered as main skills that student must master to solve a Word-based mathematical problem. Then other skills are derived from the main ones until obtaining actions, reflecting identified skills, that student can carry out via the Computer based learning system.

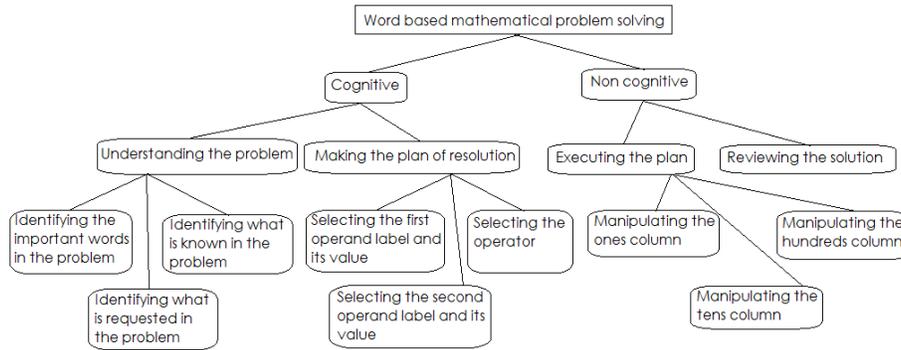


Figure 2. Illustration of a competency model for word based mathematical problem solving

## Step 2: The step of skill evaluation

In our evaluation approach, each skill within a domain of competence is represented by one or more actions that learner can perform, each action's difficulty being qualitatively measured. We have defined according to Problem based learning experts, three levels of difficulty: (1) Actions with high level of difficulty, (2) Actions with average level of difficulty and (3) Actions with weak level of difficulty. Moreover, the scale used for the classification of learners' competency control is inspired by the traditional classification of the performances employed by the assessors: (1) insufficient, (2) acceptable and (3) satisfactory (Merrill, 1983). For example, in the domain of Word based

mathematical problem solving, Polya (1945) has identified four competences. In our system, each of them will be evaluated by an assessor agent through the evaluation of the learner's performed actions (e.g., the competence called *understanding the problem* is characterized by many actions as shown in Table 1). To produce individual action evaluation, a fuzzy model is defined.

Table 1. Illustration of actions to be performed

Action	Level of difficulty
Identifying important words in the problem	High
Identifying what is known in the problem	Average
Identifying what is requested in the problem	Average
Defining the position of the missing part of the problem	Weak

The fuzzy model represents the expert's knowledge in linguistic form and includes the characteristics of the learner in the form of a set of fuzzy systems thus allowing an evaluation similar to that of an expert. A Fuzzy set is characterized by a membership function  $f: E \rightarrow [0,1]$ , which positions the members of the universe of discourse E in the units interval [0,1] (Zadeh, 1965). Value 1 (*resp.* 0) means that the member is (*resp.* not) included in the given set. The values between 0 and 1 characterize the fuzzy members. In our case, the universe of discourse E corresponds to the percentage of the actions performed correctly (classified by type and weighted by level of difficulty), and is divided in 11 elements {0,10,20,30,40,50,60,70,80,90,100}. For the transformation phase of quantitative variables into Fuzzy logical variables (i.e., Fuzzification process), we have defined four variables for each category of action (i.e., level of difficulty):

- Three input variables  $VE_n$  ( $n \in \{1,2,3\}$ ) (one for each level of difficulty) and
- One output variable VS representing the learner's qualitative level of knowledge or mastership of one skill {Very weak, Weak, Insufficient, Average, Good, Very good, Excellent}.

For each one of these variables a membership function is defined in collaboration with experts in education (see figure 3 example). All assessor agents will use inference rules, based on these membership functions, to position the learner's level on the classification scale. We have established 27 inference rules (3 levels of difficulty and 3 classification values for each level) corresponding to the various evaluations related to the three levels of difficulty (see figure 4 example).

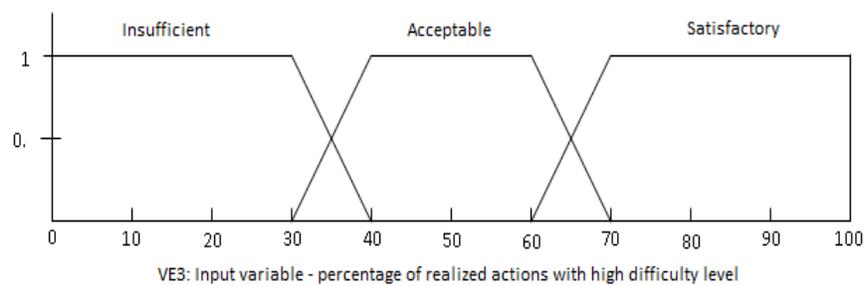


Figure 3. The membership function for the input variable VE3

If (EAWD = Satisfactory) AND (EAAD = Satisfactory) AND (EAHD = Insufficient)  
 Then (Knowledge level VS = Average)

Where EAXD = Evaluation of actions with X level of difficulty  
 { X from W: Weak, A: Average, H: High }

Figure 4. Example of an inference rule

Once computed, this fuzzy information must be converted into a real estimated value (i.e., defuzzified) which will represent the judgment of the assessor agent. The Defuzzification method produces a VS value as a number rounded to the nearest integer between 1 and 7 (1,2,3,4,5,6,7) corresponding respectively to the 7 evaluation levels (Very weak, Weak, Insufficient, Average, Good, Very good, Excellent) . At the end of the learning test session, each assessor agent has estimated the learner’s mastery level in “its” skill. This first stage evaluation will contribute to the overall evaluation of the second stage directed by the aggregate agent.

### Step 3: The Overall Evaluation Step

Generally, tutors set a threshold score for tests to be succeeded, for example in classrooms this score is fixed at 10 (i.e., half of full score). In our approach, we propose that each skill is considered mastered if the learner obtains a score equal or upper the value 5 (i.e., VS=5, GOOD). However, we tolerate compensation between different skills with a minimum threshold score for each skill; unlike other domain of knowledge such as medicine where compensation is not accepted (Frank et al., 2010). In skills diagnosis, two classes of models have been commonly used: conjunctive models and compensatory models. When a domain of knowledge involves multiple skills and when the low mastery of a single one of them is sufficient for failing this domain knowledge, the model is considered part of the *conjunctive class*, meaning that all skills are necessary. Conversely, if a strong mastery of some skills is sufficient to succeed a test, it will be considered part of the *compensatory class* of models (Desmarais et al., 2012; Roussos et al., 2007). Our approach combines both model classes, by defining a minimum threshold degree of mastery of each skill and allowing compensation between skills by means of bonuses attribution for high level skill mastery.

At the reception of all evaluations (provided by assessor agents), the aggregate agent analyzes individually each one of them and computes the average score if necessary. Three decisions can be taken: the learner passes or fails the test, or the learner assessment needs negotiation. Analysis of the aggregate agent follows the algorithm shown in Figure 5.

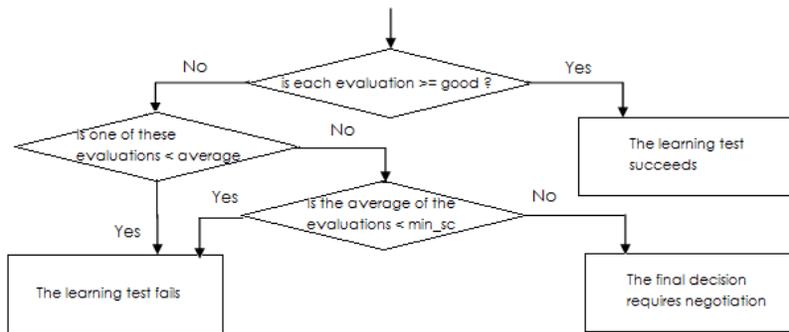


Figure 5. The overall evaluation decision

Bonus marks benefits can improve students' attitude or effort, completion of work on time and/or neatness of finished work. In our approach, we propose to award bonuses to encourage the learner according to his skills performance. Obtaining a bonus allows to decrease the test validation score for a learner (initially equal to 5) of value "*vb1*" (i.e., value to be defined by domain of competence experts) for the first bonus and of "*vb2*" for the second bonus, this score diminution is used in the negotiation process to help learners whose global score is close to the validation score. For example, if a learner’s averaged score is equal to 4.66 (i.e., lower than the preset validation score,  $4.66 < 5$ ) and an assessor agent awarded him *bonus1* and *bonus2*, the new validation score to be proposed by this assessor agent during the negotiation process for this learner is  $5 - (vb1 + vb2)$ .

#### Computation details on how bonus marks guide the negotiation

In our approach, three kinds of bonuses are awarded by agents according to student’s performance:

**Bonus 1:** each assessor agent decides on the attribution of *bonus1* depending on the score obtained in the skill performance.

- **IF (skill's score  $\geq 6$ )** then the assessor agent allots *bonus1* to the learner (reduction in the validation score of a value of *vb1*, the agents accepts to validate the learner's test with a score of  $5-vb1$  ),
- **IF (skill's score  $\in [5, 6[$ )** then he allots half of *bonus1* to the learner (reduction in the validation score of a value of  $(vb1)/2$ ),
- **IF (skill's score  $<5$ )** then he don't allot *bonus1* to the learner.

**Bonus 2:** is allotted by the assessor agent if the learner performs correctly at least 80% of actions with high level of difficulty, otherwise the learner does not receive this bonus. Obtaining *bonus2* allows to decrease the global validation score of a value of *vb2* (i.e., the assessor agent accepts to validate the learner's test with a score of  $5-vb2$ ).

**Bonus 3:** the aggregate agent can allot one third bonus which consists in improving the learner's score by a value of *vb3* if this latter succeeded in at least 2/3 of all skills (e.g., if the learner's averaged score of all skills is 4.66, the aggregate agent proposes to validate the learner's test with a new score equal to  $4.66+vb3$ ).

Once bonuses are calculated, each assessor agent builds its satisfaction table and assigns a satisfaction degree to each validation score that he can propose to the aggregate agent during the negotiations (i.e., the satisfaction degree is used by the assessor agent as an indicator to propose or not a new validation score). This satisfaction table will be used in the process of negotiation; the assessor agent begins by proposing the first validation value in its table and continues until an agreement is reached or the actual degree of satisfaction is null (i.e., the assessor agent rejects the negotiation). An example of four satisfaction tables corresponding to four different cases of bonuses attribution is presented in table 2 (with  $vb1=0.34$  and  $vb2=0.17$ ) where no bonuses are attributed in case (a), only *bonus2* is given in case (b) ,  $\frac{1}{2}$  *bonus1* + *bonus2* are attributed in case (c) and both of bonuses 1 and 2 are awarded in case (d).

Table 2. Four examples of satisfaction tables' construction

Case	Bonus	Validation Value	Degree of satisfaction
a	0	5.00	1
	0	4.83	0
b	2	4.83	1
	0	4.66	0
c	1	4.83	2
	2	4.66	1
	0	4.50	0
d	1	4.83	3
	1	4.66	2
	2	4.50	1
	0	4.33	0

For example in case (c), the first validation value is set to 4.83 (i.e.,  $4.83=5-0.17$ ) after attribution of  $\frac{1}{2}$  *bonus1*, the degree of satisfaction corresponding to this value is 2 because there is another validation value: 4.66 (i.e.,  $4.66=4.83-0.17$ ) computed after awarding of *bonus2*. The degree of satisfaction of this second validation value is 1 since there are no more proposals. The last value 4.5 has a null degree of satisfaction; this means that if a proposal of test validation score is equal or less than 4.50, the assessor agent will reject this proposal. Note that the higher the degree of satisfaction is, the higher is the belief of the assessor agent to propose the corresponding validation value.

#### From Evaluation Marks to Agents Negotiation

The implementation of the negotiation needs the definition of a communication protocol between agents and the development of private strategies for each agent (Jennings et al., 2001). We present here the negotiation protocol used in our evaluation system and the rules employed by agents to reach a compromise. The objective of the protocol is to define the messages exchanged by the agents. The negotiation protocol that we propose is characterized by a succession of messages exchanged between an initiator (aggregate agent) and participants (assessor agents) as in Contract Net Protocol (Smith, 1980). We introduced a new idea in the negotiation process which consists in making a promise of

concession by the aggregate agent if the assessor agent agrees to make a concession in turn (i.e., concession= one bonus consumption).

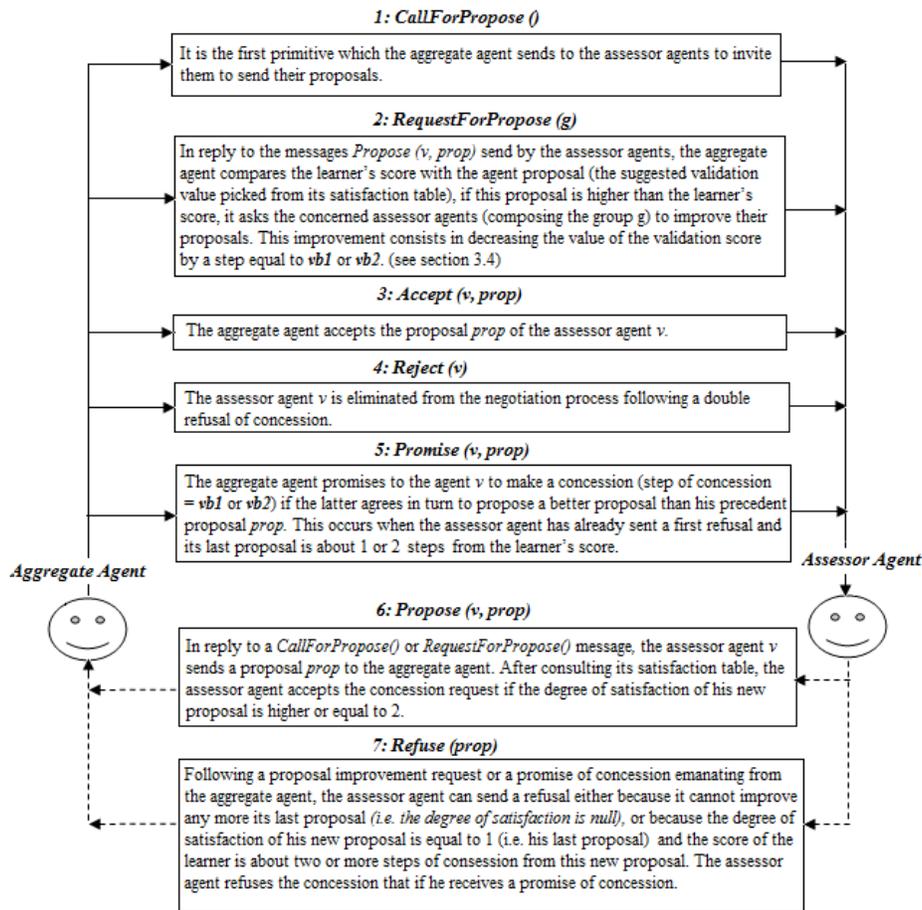


Figure 6. Exchanging messages between the aggregate agent and the assessor agents

Figure 6 describes the conversation between the aggregate agent and assessor agents. The aggregate agent starts by sending a *CallForProposal* message to the assessor agents, the parameter “g” indicates the group of concerned agents. All assessor agents reply by sending their proposals. The negotiation continues until aggregate agent sends an accept message to at least 2/3 of assessor agents (i.e., the test succeeds with a score equal to the last proposal done by assessor agents) or if the aggregate agent removes more than half of assessor agents from the negotiation process (i.e., the learner's test failed).

## Experiments and Results

In order to verify the effectiveness of our assessment approach and to validate its performance, we have chosen the domain of competence of plant protection where a simulation crop pest control training environment is already developed to improve training of future phytosanitary agents. In this learning system, the learners' behaviors have to be observed and analyzed in term of expected skills. However the systematic presence of a human expert cannot be ensured requiring some Computer-assisted assessment. The experts of this domain of competence have identified three main skills:

- **Control Skill:** as the ability of the learner to identify and to exploit several indicators (for ex. estimating a proliferation risk requires knowing current meteorological data, past data on pests' location ...).

- *Intervention skill*: representing the achievement of one or several tasks correctly sequenced and accomplished at the right time.
- *Assessment skill*: the ability of the learner to assess a situation or a resources requirement considering scenario's information and to act accordingly. It thus precedes one or several actions of intervention.

Following our two-stage evaluation process, we have developed three assessor agents and an aggregate agent. All agents are implemented in Jade (Java Agent Development Environment). Figure 7 displays messages exchanged between agents during the negotiation process and the final result is announced by the aggregate agent. Thresholds values (minimum test success score, maximum test failure score, *bonus1*, *bonus2* and *bonus3* values) were established by plant protection experts. The experiments we have conducted involved fifty students training in plant protection - zoophytiastry. These students were divided randomly into two groups: A (experiment group) and B (control group) of twenty five students each. To verify the effectiveness of our assessment system and to validate its performance, we conducted three experiments. Microsoft Excel was used for all data manipulation and statistical tests.

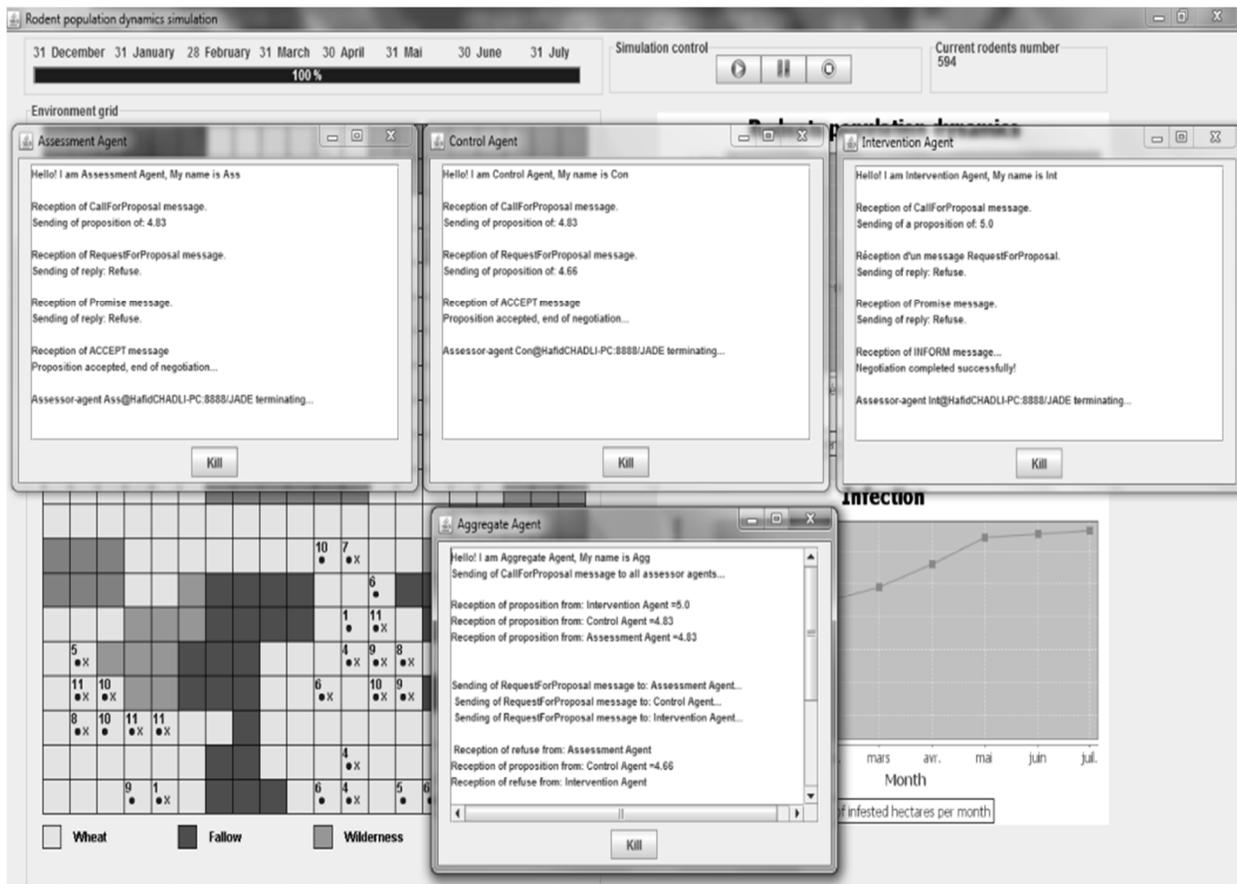


Figure 7. The screenshot of the overall evaluation via negotiation between the assessors

## First Experiment

The objective of this experiment is to test the effectiveness of the evaluation system, precisely, the first stage evaluation involving only assessor agents. To this end, students in group A were assessed during two learning test sessions by the system (i.e., our three assessor agents), and after adaptation of the same test scenario on paper, the responses of these same students were again assessed by an expert of the domain taking into account the number, type and difficulty of the actions carried out correctly. In order to avoid bias between the system's evaluation and that of the expert one, we intentionally conducted two learning test sessions. We adopt the Pearson correlation to compare the correlations

between scores given by the system (assessor agents' scores) and scores of the expert for each type of skill and for both sessions (i.e., all scores are between 1 and 7, see section 3.2). Table 3 illustrates this experiment's results.

Table 3. Correlation analysis between system and expert assessments

Type of competence	Session 1 Correlation	Critical value	Session 2 Correlation	Critical value	Level of Significance
Control skill	0.7618	0.396	0.8991	0.396	0.05
Intervention skill	0.8111		0.8326		
Assessment skill	0.8101		0.7144		

**Discussion:** This first experiment intended to examine the effectiveness of our assessment system. The best way to achieve this is to compare the scores assigned by the system to those given by the domain expert during two rounds. Significant correlation (correlation is greater than the critical value for the two sessions) between the two evaluations in this experiment constitutes a preliminary validation of the effectiveness of our assessment system. We are however aware of the limitations of our validation since our approach is conducted in only one simulation learning system. Also, the results validate the claim regarding the importance of embedding Fuzzy sets in assessment process. By providing actions with several levels of difficulty, the assessment system is able to accurately point the learner's level of knowledge with a certain granularity for each competence of the domain. This has some influence in the training system software requirements.

Furthermore, dedicating specialized agent for assessing each skill individually has several advantages: The diversity of agents enables a distributed assessment and ease of expandability of assessed skills. Heterogeneous agents can thus evaluate specific information (learner's answers versus predefined correct answers, simulation results, users' interactions with the training system etc.). As such, the use of agents allows defining independently each skill assessment method (different criteria, parameters and algorithms).

## Second experiment

In order to test the performance of students evaluated by the system, we have organized two learning test sessions where students in Group A are evaluated by the system and receive feedback at the end of the first learning test session allowing them to revise their behaviors. For the same test scenario, students in Group B are evaluated by the domain expert and receive no explanation on their behaviors. The comparison between behaviors during the first session and those of the second session, for both groups, allows to rule on the performance of the students. We propose a paired t-test analysis to verify the improvement of behaviors in each group. Table 4 represents the analysis of the performances for the group A and the group B.

Table 4. Performance analysis

Type of competence	Group A				Group B			
	t-value	p-value	Session 1 mean	Session 2 mean	t-value	p-value	Session 1 mean	Session 2 mean
Control skill	2.6134	0.0152	3.92	4.40	1.6164	0.1191	3.52	3.16
Intervention skill	2.3842	0.0254	3.52	4.12	1.7321	0.0961	3.40	3.00
Assessment skill	2.5981	0.0158	3.32	3.92	2.00	0.0569	3.44	3.84

**Discussion:** Regarding the performance of students evaluated by the system, we have conducted two learning test sessions. Comparison of students' scores obtained during the first and second learning test session and compared to those of the first session indicates whether or not learners have improved their behaviors. Improvement of behavior between the two sessions confirms the accuracy of assessment and the quality of feedback. As all p-values (group A's experiment) don't exceed the level of significance  $\alpha$  (with  $\alpha=0.05$ ) we conclude that the difference between the two groups was significant. Analytical results indicate that students of group A had acquired more knowledge than students of group B since the means of scores for two types of competence (control and intervention) increased significantly from 3.92 and 3.52 to respectively 4.40 and 4.12. However, for the assessment skill, means of scores gained a slight improvement from 3.32 to 3.92; we believe this is due to the assessing complexity of some situations in the simulation learning environment. Furthermore, means of scores of students in group B remained constant except for assessment

skill where scores have risen moderately. All these results point to the conclusion that learners learned from the feedback generated by the assessment system.

Most students of group A confirm that the system helped them to review and improve their behaviors. They also felt that the flexibility of the assessment through bonuses' awarding and negotiation is a motivating factor that prevents loss of motivation and give up of the learning system besides improving the overall behavior of the learner. However, some would think that if students are involved in the evaluation they could argue their choice of actions.

In summary, assessing learners differently than existing approaches, which assessment frequently focus on the result regardless the learner's skills involved to obtain this result, allows us to address the problem of subjective assessment and overcome some difficulties encountered in traditional measurement models. Our approach can support learners to build problem-solving skills, and to enhance their behaviors over learning test sessions through independent assessor agents.

### Third experiment

In order to measure the impact of the Negotiated assessment on student's motivation to continue learning and not give up the learning system, we have organized six learning test sessions for both groups (2 sessions per day). Students of group A were assessed using both stages of the evaluation system (i.e., individual skills assessments and the negotiation mechanism) while students of group B were evaluated only by the first stage of our evaluation model without any possibility of negotiation between assessor agents (if the student's score  $\geq 5$  then the test is succeeded else it failed). Specifically, we focus on the participation rate and the dropout rate of both groups' students having obtained consecutively during many sessions a score in the interval  $[4.33, 5[$  (i.e.,  $min\_sc = 4.33$ , this value was fixed by the domain experts, it allows negotiation between assessor agents if the score of a learner in group A is  $> 4.33$  and punishes a student of group B by a failure of test if his score is  $< 5$ ). Note that for this experiment, we do not consider the abandonment of learners with other scores. The students were informed that they could leave the learning test session at any time and give reasons for their abandonment by mean of the questionnaire provided at each session. Table 5 shows respectively for each group the number of learners having obtained successively for  $x$  times a score in the interval  $[4.33, 5[$  (with  $x \in [2,6]$ ), followed by the number of learners among them who have succeeded their learning test at this attempt (i.e., by mean of negotiation), followed by dropout rate of this attempt. All 50 students attended the session 1.

Table 5. Participation and dropout rates

Attempt	X=2	X=3	X=4	X=5	X=6	Total of dropouts
Group A	14/7/0	10/7/0	9/4/0	8/5/1	5/4/1	2
Group B	9/0/0	7/0/1	5/0/3	2/0/2	0/0/0	6

**Discussion:** We note that the dropout rate in group B was higher than that in group A for that category of learners although it is not very high (i.e., 6 Vs 2). In order to identify the reasons of this abandonment, we have analyzed the answers of targeted learners to the questionnaire provided for indicating the reasons of giving up the learning test session (see Table 6). In addition, the low dropout rate of group A's learners is due to the high success rate of learners unlike learners of group B by dint of the flexibility of the negotiated assessment as shown in Table 5.

Table 6. Learners' answers about giving up the learning test session

Question: Why you no longer want to continue learning tests?	Group	Group
	A	B
The test is difficult	1	1
The evaluation is subjective	1	5
The learning environment is not interesting	0	0
The simulation learning environment does not reflect the reality on the ground	0	0
Other	0	0

All answers (except one) of group B's dropouts (5 of 6) for this category of learners point to the conclusion that the evaluation is subjective, students report that they deserve to succeed their learning tests sessions at many times while

the system considered they have failed, it is precisely for this reason that we chose this category of learners (close to success, but unfortunately due to a rigid common evaluation, the system decides that they failed their tests). While in group A, only one learner having forsaken the learning test session considered that the evaluation is subjective. This comparison points to the conclusion that the main cause of the abandonment of learners is due to the subjectivity of the adopted assessment mechanism, while the use of the Negotiated evaluation for learners of group A has contributed to the preservation of motivation to continue learning. In addition, we took no heed of dropouts of learners with different consecutive scores (not all belonging to the interval  $[4.33, 5[$ ) so as not to bias the results of the experiment. Although we are aware of the reduced sample of this experiment, we believe that a large-scale experiment will confirm our claim.

### **Limitations of the present study**

1. The participation of students was voluntary and we do not claim that the results of the present study can be generalized.
2. The improvement of learner's behavior performance can be attributed to the use of the proposed evaluation model or to the extra practice by solving similar pest control issues. Even in the third experiment, the profit for education is that students preserve motivation for learning even if the experiment is based on a partial comparison between the experimental and the control groups. Undoubtedly the educational phenomena are multidimensional and we cannot control all the possible involved variables.

### **Conclusion**

This study has presented a pragmatic approach of evaluation that allows giving a ruling on the efficiency of the learners in a context of Multi-agent simulation learning systems. This evaluation approach is to be integrated in Simulation-based learning systems, Game-based learning or any Computer assisted problem-solving based learning. Our evaluation model follows three steps: 1) Identification of relevant skills of the domain of knowledge, 2) Evaluation of the learner compared with these skills and 3) Evaluation of the ability of the learner to solve a problem of this domain of competence. In order to assess learners' competences, we have adopted a strategy that involves a two-stage approach based on a collaborative evaluation system. On the first stage, a number of assessor agents are in charge of appreciating the learners' knowledge compared with identified skills of the domain. The recourse to Fuzzy sets theory at this stage allows an evaluation similar to that of an expert. On the second stage, the Aggregate agent ensures an overall evaluation elaborated on the base of the individual evaluations of each assessor agent. Instead of considering an average threshold score which decides of the success and the failure of the learner's learning test, we have preferred a Negotiated collaborative evaluation similar to academic evaluations which promote students according to their results along the learning period. Thus, in some situations, a negotiation process is initiated by the Aggregate agent where each assessor agent uses the learner's results in its dedicated skill in order to negotiate the learner's test success by means of bonuses awarding. The result of this negotiation represents the final evaluation.

Experimental results indicate that this model provides an assessment similar to that of an expert and significantly improved learners' performance. Furthermore, the Negotiated assessment part of the evaluation model seems to promote motivation of learners as demonstrated in the third experiment. Based on these results, we conclude that combining Fuzzy sets and agent negotiation has important merits.

Our evaluation system allows initially a skill estimate, this first stage informs us about the strengths and weaknesses of the learner, and thus we provide high precision recommendations to the learners. Therefore the quality of feedback will generate a positive impact on improving the learner's skill performance. In the second time, the global evaluation enables us to conclude about the effectiveness of the learner to solve the problem. Thus, tutors can easily address learners' weaknesses.

Finally, although the proposed approach of assessment has yielded promising results in promoting learning effectiveness and maintaining students' motivation to continue learning, considerable work remains to be done, including the choice of adequate problem corresponding to the learner's profile and based on his skills assessments. Also we'll consider other learner's abilities in the future like group managing, communication, etc in the context of collaborative problem solving.

## References

- Black, H.T. & Duhon, D.L. (2003). Evaluating and Improving Student Achievement in Business Programs: The Effective Use of Standardized Assessment Tests. *Journal of Education for Business*, 70(2), 90-98.
- Brna, P., Self, J.A., Bull, S. & Pain, H. (1999). Negotiated Collaborative Assessment through Collaborative Student Modelling. In Morales, R., Pain, H., Bull, S. & Kay, J. (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 35-42). Le Mans: IOS.
- Caferra, R., Peltier, N. & Puitg, F. (2000). Emphasizing Human Techniques in Geometry Automated Theorem Proving: a Practical Realization. In Richter-Gebert, J. & Wang, D. (Eds.) *Proceedings of the Workshop on Automated Deduction in Geometry* (pp. 268-305). London: Springer-Verlag, UK.
- Chang, K.E., Sung, Y.T., & Lin, S.F. (2006). Computer-assisted Learning for Mathematical Problem Solving. *Computers & Education*, 46(2), 140-151.
- Desmarais, M.C., Shaun R., & De Baker, J. (2012). A Review of Recent Advances in Learner and Skill Modeling in Intelligent Learning Environments, *User Model. User-Adapt. Interact*, 22(1-2), 9-38.
- Dimitrova, V., Self, J.A. & Brna, P. (1999). The Interactive Maintenance of Open Learner Models. In Lajoie, S.P. & Vivet, M. (Eds.) *Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence in Education* (pp. 405-412). Le Mans, France: IOS Press.
- Eck, R.V. (2006). Digital Game-Based Learning: It's Not Just the Digital Natives Who Are Restless. *EDUCAUSE Review*, 41(2), 16-30.
- Ekanayake, H., Backlund, P., Ziemke, T., Ramberg, R. & Hewagamage, K. (2011). Assessing Performance Competence in Training Games. In Mello, S.D., Graesser, A., Schuller, B. & Martin, J.C. (Eds.) *Proceedings of the 4th International Conference on Affective Computing and Intelligent Interaction* (pp. 518-527). Berlin Heidelberg: LNCS. Springer-Verlag. 6975.
- Frank, J.R., Snell, L.S., Cate, O.T., Holmboe, E.S., Carraccio, C., Swing, S.R. et al. (2010). Competency-Based Medical Education: Theory to Practice. *Med Teach*, 32(8), 638-645.
- Huang, C.-J., Chen, C.-H., Luo, Y.-C., Chen, H.-X., & Chuang, Y.-T. (2008). Developing an Intelligent Diagnosis and Assessment E-learning Tool for Introductory Programming. *Educational Technology & Society*, 11 (4), 139-157.
- Innocent, P.R., John, R.I. & Garibaldi, J. M. (2005). Fuzzy Methods for Medical Diagnosis. *Applied Artificial Intelligence*, 19(1), 69-98.
- Jennings, N.R., Faratin, P., Lomuscio, A.R., Parsons, S., Sierra, C. & Wooldridge M. (2001). Automated Negotiation: Prospects, Method and Challenges. *International Journal of Group Decision and Negotiation*, 10(2), 199-215.
- Lai, K.R. & Lan, C.H. (2006). Modeling Peer Assessment as Agent Negotiation in a Computer Supported Collaborative Learning Environment. *Journal of Educational Technology & Society*, 9(3), 16-26.
- Merrill, M.D. (1983). Component Display Theory. In Reigeluth, C.M. (Eds.) *Educational Technology: Instructional Design Theories and Models* (pp. 279-333). Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Mislevy, R.J., Steinberg, L.S. & Almond, R.G. (2003). On the Structure of Educational Assessments. *Measurement: Interdisciplinary Research and Perspectives*, (1), 3-62.
- Oulhaci, A., Tranvouez, E., Fournier, S. & Espinasse, B. (2013). A Multi-Agent System for Learner Assessment in Serious Games: application to learning processes in Crisis Management. In Wieringa R., Nurcan S., Rolland C. & Cavarero J.-L. (Eds.) *Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Research Challenges in Information Science* (pp. 1-12). Paris, France: IEEE computer science.
- Pilato, G., Pirrone, R. & Rizzo, R. (2008). A KST-Based System for Student Tutoring. *Applied Artificial Intelligence*, 22(4), 283-308.

- Pitts, J., Colin, C., Thomas, P. & Smith, F. (2002). Enhancing Reliability in Portfolio Assessment: Discussions Between Assessors. *Med Teach* 24, 197–201.
- Polya, G. (1945). *How to Solve It*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
- Rees, C. & Sheard, C. (2004). The Reliability of Assessment Criteria for Undergraduate Medical Students' Communication Skills Portfolios: the Nottingham Experience. *Medical Education*, 38(2), 138-144.
- Roussos, L.A., Templin, J.L. & Henson, R.A. (2007). Skills Diagnosis Using IRT-Based Latent Class Models. *Journal of Educational Measurement*, 44, 293-311.
- Schraw, G. & Moshman, D. (2004). Metacognitive Theories. *Educational Psychology Review*, 7(4), 351-371.
- Shute, V. J., & Ke, F. (2012). Games, Learning, and Assessment. In Ifenthaler, D., Eseryel, D. & Ge, X. (Eds.) *Assessment in Game-Based Learning: Foundations, Innovations, and Perspectives* (pp. 43-58). New York, NY: Springer Science+Business Media New York.
- Smith, R.G. (1980). The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on computers*, C-29(12), 1104-1113.
- Stathacopoulou, R., Magoulas, G., Grigoriadou, M. & Samarakou, M. (2005). Neuro-Fuzzy Knowledge Processing in Intelligent Learning Environments for Improved Student Diagnosis. *Information Sciences*, 170(2-4), 273-307.
- Tuckman, B.W. (1996). The Relative Effectiveness of Incentive Motivation and Prescribed Learning Strategy in Improving College Students' Course Performance. *Journal of Experimental Education*, 64, 197-210.
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.

## Résumé

L'objectif de notre travail est la réalisation d'un environnement pour l'aide à la formation par simulation participative des agents phytosanitaires et des acteurs communaux impliqués dans une campagne de lutte contre les rongeurs ravageurs de culture.

Cet environnement obéira à la composition classique des systèmes tuteurs intelligents et des environnements Informatiques pour l'apprentissage humain. Cependant, notre intérêt porte sur l'évaluation des apprenants dans de tels environnements. Nous nous intéressons aussi à un autre aspect de recherche sur la simulation des agroécosystèmes et les dynamiques de leurs différents composants.

Une grande partie du travail de cette thèse concerne la modélisation d'un système d'évaluation des actions entreprises par les apprenants durant la simulation de la campagne de lutte. L'approche multi-agents a été choisie pour surmonter les difficultés rencontrées dans les systèmes d'évaluation classiques. Cette évaluation est basée sur la logique floue et la négociation.

Le deuxième volet de notre recherche concerne la modélisation d'un agroécosystème composé d'un sous-système végétal, d'un sous-système animal (les rongeurs) et d'un sous-système humain. Encore une fois nous adoptons la modélisation multi-agents sociale pour modéliser les comportements de la population des rongeurs. Cette modélisation sera utilisée pour implémenter un simulateur de la dynamique des rongeurs dans un contexte de dégradation de cultures.

## Mots-clés

Evaluation négociée, Evaluation à base de logique floue, Evaluation à base d'agents, modélisation multi-agents sociale, simulation sociale, ...

## Abstract

The objective of our work is to provide a participatory simulation training environment to help crop protection agents and municipal actors involved in a control campaign against rodents crop pests.

This environment will follow the classical composition of intelligent tutoring systems and information technology environments for human learning. However, we focus on the assessment of learners in such environments. We are also interested in another aspect of research which concerns the dynamics' simulation of agro-ecosystems and their components.

Much of the work of this thesis concerns the modeling of an evaluation system for assessing the actions performed by learners during the simulation of a control campaign scenario. To reach this aim, the multi-agent modeling approach was adopted to overcome the difficulties encountered in conventional assessment systems. This assessment is based on fuzzy logic and negotiation.

The second part of our research concerns the modeling of an agro-ecosystem consisting of a plant subsystem, an animal subsystem (rodents) and a human subsystem. Again we adopt the social multi-agent modeling to model the rodent population's behavior. This modeling will be used to implement a rodent dynamics simulator in a context of crop damage.

## Keywords

Negotiated evaluation, Fuzzy logic based evaluation, Agent baed evaluation, Multi agent social modeling, social simulation, ...