

Université de Paris VI
L.I.P.6

E.N.S.T. Paris
Option ICC

D.E.A. I.A.R.F.A.

RAPPORT DE STAGE

Emergence et coexistence de groupes en multi-agents

Par

David SERVAT

Avril-Septembre 1997

Effectué au
Laboratoire d'Informatique Appliquée
Orstom

Sommaire

RÉSUMÉ.....	3
1. INTRODUCTION.....	4
1.1. <i>La simulation multi-agents : genèse d'un engouement</i>	4
1.2. <i>Vers le concept de laboratoire virtuel</i>	4
1.3. <i>Problématique générale : émergence et coexistence de groupes</i>	5
2. RÉFLEXIONS SUR LES GROUPES.....	6
2.1. <i>Choix méthodologiques</i>	6
2.2. <i>De l'individu au groupe</i>	6
2.2.1. Règles de regroupement.....	6
2.2.2. Adhésion à un groupe.....	8
2.2.3. Gestion du contrôle au sein de l'agent groupe.....	10
2.2.4. Coexistence de regroupements récursifs.....	11
2.3. <i>Interventions de l'utilisateur</i>	12
2.3.1. Création de types de groupes et transfert des connaissances.....	12
2.3.2. Mise en place d'instances de groupes au départ de la simulation.....	13
2.3.3. Nécessité d'outils pour la représentation spatiale des relations entre agents.....	13
3. PRÉSENTATION DE L'OUTIL INFORMATIQUE.....	14
3.1. <i>Partis pris et simplification</i>	14
3.2. <i>Règles et mécanismes implémentés</i>	15
3.2.1. Etat actuel.....	15
3.2.2. Travaux en cours.....	15
3.3. <i>Expérimentations</i>	16
3.3.1. Emergence de groupes.....	17
3.3.2. Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur.....	18
3.3.3. Dissolution de groupes posés par l'utilisateur.....	19
4. CONCLUSION PERSPECTIVES.....	21
5. RÉFÉRENCES.....	22
ANNEXES.....	24
1. <i>Détail des illustrations</i>	24
1.1. Emergence de groupes.....	24
1.2. Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur.....	27
1.3. Dissolution de groupes posés par l'utilisateur.....	31
1.3.1. Premier exemple.....	31
1.3.2. Deuxième exemple.....	34
2. <i>Fonctionnalités</i>	37
2.1. Edition de groupes par l'utilisateur.....	37
2.2. Outils de visualisation.....	38
3. <i>Gestion des paramètres</i>	40

D.E.A. I.A.R.F.A.

Rapport de stage

Emergence et coexistence de groupes en multi-agents

David Servat

Servat@email.enst.fr

Avril-Septembre 1997

Résumé

Ce document constitue une synthèse des travaux que j'ai menés au cours de mon stage de D.E.A. I.A.R.F.A. (Intelligence Artificielle, Reconnaissance des Formes et Applications). Ce stage s'est déroulé au sein du Laboratoire d'Informatique Appliquée (L.I.A.) de l'Orstom (Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération), sous la direction d'Alexis Drogoul du laboratoire LIP6 de Paris VI, et le co-encadrement d'Edith Perrier et de Jean-Pierre Treuil du L.I.A.

Nous nous intéressons dans ce document à ce que *pourrait* être la simulation de phénomènes complexes à l'aide de systèmes multi-agents. Depuis MANTA [Drogoul 1993], cette approche a suscité un intérêt sans cesse plus vif au sein de la communauté scientifique. Les concepts du multi-agents séduisent par la facilité avec laquelle ils permettent de transposer les connaissances que l'on a d'un domaine, en vue de construire une représentation informatique, manipulable, d'une réalité souvent trop complexe à appréhender par des méthodes classiques. Néanmoins, ces simulations n'offrent à l'heure actuelle que des moyens d'*observation* et d'interprétation *a posteriori* des phénomènes dont on constate l'émergence au cours d'une simulation. L'expérimentateur n'a pas la possibilité d'introduire *au cours de la simulation* les entités d'analyse qu'il juge pertinentes pour l'explication et la représentation de ces phénomènes émergents. En fonction des objectifs de sa simulation et des phénomènes qu'il souhaite observer, l'utilisateur aimerait en effet posséder des moyens d'*action* sur ces phénomènes émergents, notamment pour projeter dans la simulation son propre point de vue sur l'interprétation de ces phénomènes. Or, dans les simulations multi-agents actuelles, les entités émergentes restent des collectifs d'agents individuels *sans* existence propre. Elles ne sont donc pas manipulables par l'utilisateur. Pourtant, ces phénomènes, constitués et produits par un collectif d'agents individuels au cours de la simulation, possèdent dans le monde réel des caractéristiques et des comportements spécifiques et forment, pour l'expert du domaine, de véritables objets d'étude. Si l'on veut offrir de véritables outils d'expérimentation en laboratoire virtuel, il est donc fondamental que l'on puisse, dans un même formalisme, ici le formalisme multi-agents, introduire et faire coexister au sein d'une même simulation toutes les entités d'analyse qui constituent, pour l'expérimentateur, autant de points de vue pertinents sur le phénomène étudié.

Dans la perspective de tenter de simuler de façon la plus exacte possible ce que l'on observe dans la réalité, mais aussi de faire de ces simulations de véritables outils d'expérimentation et d'observation, il faut donc s'interroger sur les moyens d'introduire, sous forme d'agents, toutes les catégories abstraites dont l'expert se sert dans son domaine et qui relèvent de diverses échelles de temps et d'espace, et sur les moyens de les articuler entre elles. Autrement dit, au-delà du domaine propre à la simulation multi-agents, comment donner à des agents les moyens de créer un agent incarnant le phénomène émergent, résultant de leur activité collective, et comment introduire et faire coexister sous forme d'agents, des catégories abstraites qui soient à la fois collectifs d'entités et entités individuelles ayant leur existence propre. C'est à ce problème très général que nous tentons d'apporter des réponses. L'exemple qui servira de base de réflexion est donné par le projet RIVAGE [Solignac 1996] dont le propos est de simuler des processus d'infiltration et de ruissellement. Cette simulation repose sur la modélisation distribuée des transferts hydriques sous forme d'agents boules d'eau individualisés, en mouvement sur une surface donnée. Ces boules d'eau, sous l'effet du ruissellement, se regroupent en mares et ravines, formant des agents de type nouveau dont l'extension spatiale évolutive et la dynamique spécifique exigent d'introduire de nouvelles règles de comportement et d'interaction.

1. Introduction

1.1. La simulation multi-agents : genèse d'un engouement

Depuis quelques années, les simulations multi-agents remportent de vifs succès et suscitent un intérêt pluridisciplinaire certain dans les sciences de la modélisation de l'environnement. Les expérimentations menées dans ces domaines, comme [Drogoul 1993] et [Cambier 1994] ont entraîné un véritable essor de cette thématique. Il est intéressant de se pencher sur la genèse de cet engouement pour le multi-agents dans un domaine tel que l'hydrologie, afin de dégager ce qui fait la spécificité de l'approche multi-agents et ce qui suscite cet emballement au sein des chercheurs. La naissance du projet RIVAGE au sein de l'Orstom nous en fournit un excellent exemple.

Classiquement en hydrologie, lorsque l'on s'intéresse à l'étude du ruissellement et de l'infiltration sur une parcelle de terrain au cours d'une pluie, on construit un modèle mathématique plus ou moins global que l'on valide ensuite en calculant un certain nombre de relations entre grandeurs mesurables dans la réalité, comme la relation pluie-débit à l'exutoire d'une parcelle. Les phénomènes tels que l'infiltration, le ruissellement ou l'érosion sont appréhendés sous forme de coefficients qui doivent rendre compte globalement des phénomènes, comme dans le système hydrologique européen [Abbot et al 1986] ou SIMSURF [Perrier 1992]. Généralement, ces modèles sont très spécifiques et acceptent difficilement de prendre en compte de nouveaux phénomènes ou de s'intégrer au sein d'une simulation plus vaste. Certains phénomènes se laissant mal traduire en termes de variables, comme la formation de cours d'eau ou ravines au cours d'une pluie, ils sont bien souvent négligés, faute d'un cadre d'accueil suffisamment souple. Ainsi, dans [Crave 1995], on s'affranchit du problème posé par la formation de mares lors du ruissellement aux minima locaux de la surface d'étude, en considérant ces minima comme des artefacts dus à la numérisation du terrain. Il n'empêche que l'étude et la prise en compte de la formation de ces mares deviennent fondamentales lorsque l'on étudie des régions endoréiques, dans lesquelles les eaux ne peuvent gagner la mer sans se perdre avant dans les terres, et pour lesquelles la présence de mares influe énormément sur la capture des eaux. Par ailleurs, ces modèles globaux, quoique distribués, ont du mal à gérer les effets dus à la répartition spatiale de zones de nature hétérogène. Un calcul de pourcentages globaux à l'échelle de la parcelle étudiée ne permet pas de rendre compte de ces effets : ainsi, sur un plan incliné, il ne suffit pas de dire que 30% du terrain est imperméable contre 70% perméable, pour pouvoir prédire le ruissellement à l'exutoire ; la répartition spatiale de ces zones imperméables peut radicalement changer l'importance de ce ruissellement.

Le manque de souplesse des modèles classiques, leur faible pouvoir représentatif et leur incapacité à prendre en compte certains phénomènes observés par les naturalistes expliquent l'intérêt suscité par d'autres approches qui permettraient une gestion plus facile de ces phénomènes que l'on perçoit comme des interactions entre événements locaux opérant à diverses échelles. Certains chercheurs se sont tournés vers des expérimentations à l'aide de modèles analogiques, maquettes représentant à l'échelle la surface d'étude, et sur lesquelles on fait artificiellement pleuvoir. Ces laboratoires d'expérimentation nécessitent néanmoins beaucoup de moyens, tant pour la conception que pour l'utilisation : il faut faire quantité de relevés de mesure avec des lasers, puis ces données doivent être traitées. Aussi n'est-on pas surpris de l'engouement suscité par l'approche alternative que constitue la simulation multi-agents : souplesse dans la conception permettant une transposition presque directe des phénomènes et des connaissances dans les entités peuplant la simulation multi-agents et une intégration plus aisée de nouveaux phénomènes. Ainsi, naquit l'idée des boules d'eau de RIVAGE, s'agglutinant en mares et ravines [Perrier & Cambier 1996].

1.2. Vers le concept de laboratoire virtuel

Cependant, il ne faudrait pas croire que l'idée d'une simulation individus-centrée constitue l'apanage du multi-agents. En effet, les automates cellulaires proposent depuis bien plus longtemps une approche alternative où les phénomènes sont distribués au sein d'un grand nombre de processus en interaction. En hydrologie, ou plus généralement en mécanique des fluides, cette approche s'est concrétisée par la construction des modèles dits des *gaz sur réseaux*, dans lesquels les cellules représentent les mailles d'un réseau sur lequel circulent des particules de fluide. Ces particules subissent des chocs entre elles et sont déviées de leur trajectoire. Ces modèles permettent de retrouver globalement le comportement d'un fluide dans un espace caractérisé par ces conditions aux limites, en particulier les équations de Navier-Stokes. De nombreuses recherches sont menées dans ce domaine et connaissent de francs succès, [Fredkin 1990], [Toffoli & Margolus 1990].

Dès lors, que peut-on attendre de la simulation multi-agents, que nous apporte-t-elle de plus pour la simulation de processus physiques, interprétables de façon distribuée ? En fait, ce qui n'est pas possible dans l'approche par automates cellulaires, c'est de *manipuler* les phénomènes émergents, l'utilisateur se voyant cantonné dans un rôle d'observateur passif. Il ne peut que constater que des phénomènes se produisent, par exemple, l'apparition de phases gazeuses ou liquides. Celles-ci n'ont aucune existence propre au sein de la simulation et ne constituent qu'un épiphénomène causé par le jeu des interactions entre entités individuelles.

De même dans [Solignac 1996], on peut visualiser les chemins parcourus par les boules d'eau qui ruissellent. Ces chemins d'eau constituent pour l'hydrologue autant de ravines potentielles. Cependant ces chemins n'ont aucune existence propre, ils sont constatés par l'observateur, mais ne peuvent être dotés d'un comportement propre, par exemple celui d'accentuer l'érosion de la surface sur leur passage.

Cette lacune se retrouve dans toutes les simulations multi-agents actuelles. Ainsi dans MANTA [Drogoul 1993], on observe l'émergence d'une division du travail au sein des fourmis, en fonction de leur répartition spatiale. Les fourmis s'acquittent tour à tour de différentes tâches, comme de s'occuper du couvain ou de la recherche de nourriture, prenant part, selon un schéma d'existence fixe, repérable, à différents groupes sociaux. Ces groupes sont un objet d'étude fondamental pour les éthologues qui ont amassé quantité d'informations sur eux. Or, ces groupes n'existent pas au sein de la simulation, et l'utilisateur ne dispose pas de moyens d'intervention efficaces pour conduire ses expérimentations. On voudrait pouvoir introduire ces groupes sociaux qui prendraient en charge le destin des fourmis. La fourmière serait vue, non plus seulement comme une collectivité d'individus, mais comme une interaction entre groupes. Récursivement, on voudrait que se crée un agent incarnant la fourmière avec ses caractéristiques propres : aire de chasse, ressources consommées, cycles de ponte. Ces catégories abstraites que sont l'agent fourmi, le groupe social ou l'agent fourmière sont autant de facettes d'une même réalité. Selon les objectifs de la simulation, il sera tour à tour plus commode, comme le font les éthologues, d'adopter différents points de vue et de les manipuler simultanément. La fourmière sera tout à la fois une entité ayant son comportement propre, par exemple pour l'insérer au sein d'une simulation d'un écosystème, une collectivité d'individus, par exemple pour observer en détails son organisation, ou une interaction entre groupes sociaux qui pourraient être le support d'un apprentissage chez les fourmis.

On touche ici au problème fondamental du rôle de l'observateur en simulation [Balian 1995] et de l'échelle d'analyse pertinente [Perrier 1990]. Si l'on veut modéliser une foule qui participe à une manifestation dans les rues d'une ville, le cortège pourra être vu comme une multitude d'individus avec leur comportement propre, notamment si l'on se trouve au milieu du cortège, ou comme un serpent parcourant à une vitesse moyenne les rues de la ville. Cette capacité à inclure plusieurs points de vue, à donner une nature ambivalente, collectif d'entités ou entité ayant son existence propre, aux phénomènes observés, fait partie de la gymnastique intellectuelle du scientifique, qui doit adopter tour à tour différents points de vue. En tant que telle, elle constitue donc, à notre sens, une condition nécessaire pour concevoir de réels outils de simulation, qui offrent un grand pouvoir d'expérimentation à l'utilisateur, par le biais d'observations et d'interventions actives au *niveau d'échelle propre des phénomènes*, et puissent donner corps au concept de laboratoire d'expérimentation virtuel évoqué par [Ferber 1995] ou [Treuil et al 1997].

En réalité ce problème dépasse le cadre de la simulation multi-agents. En conception de systèmes multi-agents de façon générale, on est classiquement amené à attribuer une tâche à un collectif d'agents, par exemple un ensemble de robots. Lorsque l'on veut décrire l'activité de ces robots, on parle naturellement du groupe ou du collectif des robots, en tant qu'entité à part entière, car force est de constater qu'à défaut d'exister et d'être incarné par un agent, ce collectif a une réalité pour l'observateur. Dès lors on aimerait, non seulement à des fins pédagogiques mais aussi pour manipuler plus facilement ce collectif de robots et l'insérer par exemple dans un univers plus complexe, doter ce collectif d'une existence propre, matérialisée par un agent. Dans un autre domaine, on peut citer l'exemple du projet TREMMA, décrit dans [Marcenac et al 1997], qui s'intéresse à la construction du modèle de l'apprenant d'un système tuteur intelligent. Dans ce projet, l'évolution des connaissances de l'apprenant est modélisée par agrégation d'agents représentant des connaissances de granularité fine : les agrégats d'agents obtenus s'organisent en agents de niveau intermédiaire, représentant des portions de raisonnement. Cette possibilité de représenter les connaissances de l'apprenant avec plusieurs niveaux de granularité apporte alors un avantage indéniable pour fournir de l'aide appropriée à l'apprenant.

1.3. Problématique générale : émergence et coexistence de groupes

Voici posé le cadre qui circonscrit la réflexion menée au cours de mon stage de D.E.A. Le projet RIVAGE fournit un excellent exemple pour guider la réflexion. Au cours d'une pluie, des agents boules d'eau individualisés ruissellent sur une surface d'étude. En s'agglutinant, les boules d'eau forment des

agents mares et des agents ravines. Dès lors, se pose le problème de la nature des agents mares et ravines ainsi créés, de leur création, de leur interaction avec l'extérieur, notamment leur rétroaction sur les agents boules d'eau qui les constituent, la vie et la mort de ces agents créés, enfin la perspective de regroupements récursifs en agents réseau de ravines et de mares, et leur coexistence... Autant de questions auxquelles ce rapport tente de donner des éléments de réponse. L'exemple donné par RIVAGE est suffisamment typique du problème qui nous préoccupe pour permettre de dégager des principes génériques. De plus, il est l'un des rares projets de simulation multi-agents de processus *purement physiques*, où donc l'importance du passage d'un niveau de description microscopique à un niveau de description macroscopique prend tout son sens, de par la nature même des phénomènes que l'on souhaite modéliser. Dans ce contexte, le formalisme multi-agents pose l'idée qu'une manière possible et prometteuse de représenter ces phénomènes macroscopiques émergents consiste à les réifier en agents de granularités différentes, adaptées au niveau d'analyse de l'utilisateur¹ : une mare à l'échelle d'une région ne représente pas une entité pertinente, par contre elle est fondamentale à l'échelle d'une parcelle de culture ; de même, envisager une ravine, voire un fleuve, sous la seule forme d'une collection de boules d'eau individuelles aurait peu de sens. Nous voilà donc bien forcés de chercher comment articuler, au sein d'une même simulation, plusieurs catégories abstraites matérialisées par des agents de granularité plus ou moins grande, avec les catégories de niveau inférieur qui les constituent, et faire coexister pacifiquement tout ce beau monde...

2. Réflexions sur les groupes

2.1. Choix méthodologiques

Nous présentons tout d'abord une réflexion conceptuelle sur les méthodes d'introduction de groupes dans une simulation multi-agents. Les problèmes que nous abordons et les solutions que nous présentons sont parallèlement testées dans une implémentation d'un simulateur jouet lié au thème du projet RIVAGE. L'outil informatique obtenu est décrit dans la partie suivante afin de ne pas alourdir la réflexion, et de souligner le souci de généricité qui guide notre réflexion.

Dans un premier temps, nous abordons le problème du regroupement d'agents individuels, leur adhésion à des groupes et les relations qui gèrent les interactions au sein de cette entité ambivalente que constituent l'agent groupe et le groupe d'agents, deux facettes d'une même réalité. Nous tentons ensuite d'appréhender l'extension de ce regroupement à des agents de niveau quelconque, dans la perspective de regroupements récursifs, coexistant au sein d'une même simulation.

Dans un deuxième temps, les mécanismes de formation de groupe étant définis, il s'agit de se pencher sur la coexistence entre agents créés dynamiquement et agents posés par l'utilisateur en début de simulation, de voir comment l'expérimentateur peut intervenir dans la création et le contrôle de ces agents en fonction des objectifs qu'il s'est fixés. Pour y voir clair dans ce magma de relations, on réfléchit enfin au problème posé par la représentation graphique des relations unissant ces diverses entités.

Cette décomposition de la réflexion en deux temps ne doit pas laisser croire que les problèmes doivent être abordés dans cet ordre chronologique, en réalité la réflexion et l'implémentation attaquent simultanément les deux niveaux.

2.2. De l'individu au groupe

2.2.1. Règles de regroupement

Considérons que nous cherchons à observer des phénomènes produits par le regroupement d'agents individuels. Nous voulons que ces phénomènes soient représentés par des agents de granularité supérieure, et qu'ils apparaissent dynamiquement avec intervention minimale de l'utilisateur. Idéalement, on souhaite que l'utilisateur fournisse en début de simulation l'ensemble des phénomènes, qu'il désire observer, représentés par des groupes d'agents, le programme se chargeant de la vie et mort de ces groupes.

¹ Une manière de concevoir le changement d'échelle du niveau microscopique au niveau macroscopique réside alors dans le regroupement d'agents.

Deux approches peuvent alors être envisagées :

- un mécanisme d'observation situé au niveau global détecte l'apparition de ces phénomènes et décrète la création de groupes,
- les agents individuels sont dotés de capacité d'auto-observation de leur état et de leur voisinage, et peuvent se regrouper localement avec des agents dont ils se sentent proches.

Quel que soit le choix que nous faisons, mécanisme global ou local, il apparaît clairement que le regroupement d'entités individuelles doit s'appuyer sur des critères de ressemblance ou de partenariat entre entités au niveau local, voir figure 1. Ainsi, lorsqu'un ensemble de boules d'eau se retrouve confiné dans un même voisinage et ne peut plus se déplacer, il y a fort à parier que cet ensemble peut entraîner la création d'une mare. Mais pour ce faire, il faut que ces boules soient capables de calculer des similarités entre elles, ou que ces similarités puissent être détectées au niveau global.

De même, des fourmis doivent être capables de reconnaître qu'elles s'emploient à un même type de tâche, ou à une tâche commune, et qu'elles pourraient donc former un groupe social.

Il s'agit donc de mener une investigation des règles de regroupement possibles entre un ensemble d'agents. Cet ensemble de règles doit être le plus générique possible, et surtout restreint dans un souci d'efficacité. Il est bien sûr évident que ces règles de regroupement sont concrètement très dépendantes du domaine de l'application et liées aux connaissances que l'on a du domaine dans le cas d'une simulation multi-agents. Néanmoins, on peut dégager un certain nombre de types de règles, relativement génériques, qui pourront se retrouver dans de nombreuses applications.

On peut distinguer deux grands types de critères :

- similarités entre états internes des agents :

Considérons par exemple un espace discrétisé en cellules, où chaque cellule peut prendre plusieurs états : 0 si elle est libre, 1 si elle est occupée par une boule d'eau, et 2 si la boule qui l'occupe est piégée et ne peut quitter la cellule. Une cellule qui serait dans l'état 2 pourrait observer son voisinage et, remarquant qu'elle est entourée par des cellules dans le même état qu'elle, envisagerait de former un groupe agent mare, qui regrouperait l'ensemble de ces cellules.

L'état d'un agent doit être pris dans un sens très général : il peut tout aussi bien s'agir d'un vecteur d'attributs pouvant prendre un certain nombre de valeurs, température pression..., ou d'une tâche effectuée par l'agent, recherche de nourriture, prise en charge du couvain. On peut imaginer des robots ramasseurs d'objets, qui pourraient comparer l'inventaire des objets qu'ils possèdent, ou encore des agents de recherche d'informations sur un réseau comme le Web qui auraient en commun des critères de recherche : sites parlant de sport, de musique...

- relations de connexité ou de partenariat :

Nos cellules de l'exemple précédent sont des nœuds d'un graphe tridimensionnel, et comme telles, elles entretiennent des relations de connexité définies par un certain voisinage : ce voisinage n'est pas forcément l'ensemble des cellules auxquelles une cellule est reliée par une arête, il peut s'étendre sur un plus ou moins grand nombre de nœuds. Par exemple, on peut imaginer une modélisation du plan d'un métro par un système multi-agents, dans lequel les agents, représentant des stations joignables moyennant un seul changement, soient en relation.

Au-delà de ces relations évidentes de connexité, on peut aussi envisager dans le même registre des relations de partenariat liant par exemple un agent producteur et un agent consommateur. Dans le cas d'agents recherchant de l'information sur le Web, [Servat 1996], on a souvent affaire à deux types d'agents : un agent personnel d'un utilisateur, chargé de prendre en charge les requêtes de son utilisateur attiré, et un certain nombre d'agents recherchant effectivement de l'information. Entre ces deux types d'agents existent des relations d'accointances plus ou moins renforcées en fonction du succès de leur association – confiance mutuelle liée à une satisfaction de l'utilisateur.

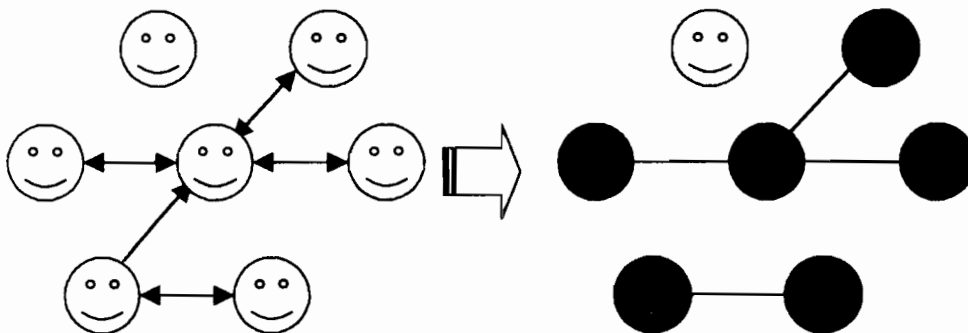


Figure 1 Regroupements d'agents individuels

On peut donc donner deux grands types de critères pour le regroupement d'agents : critère lié à la topologie de l'espace dans lequel ils évoluent, ou à des relations fonctionnelles entre eux², et critère lié à des similarités entre états internes des agents, la notion d'état interne devant être prise au sens large.

Ces critères supposent donc de doter nos agents de capacité de mémorisation de leur état et de communication avec leurs accointances. Il est clair, en effet, que des ressemblances entre états devront généralement prendre en compte un *historique* des états passés de l'agent : dans le cas des boules d'eau, il ne suffit pas qu'une cellule soit à un moment donné dans l'état 2, c'est-à-dire porteuse d'une boule piégée, pour qu'instantanément il y ait possibilité de formation d'une mare ; de même, on sent bien que si l'on veut suivre des chemins d'eau privilégiés empruntés par les boules d'eau, il faut être capable de laisser évoluer le système pendant un certain temps, de façon à mettre en relief les chemins les plus fréquentés.

En ce qui concerne la communication entre agents, elle doit permettre le calcul de similarités entre état d'agents voisins. En toute généralité, il s'agit d'un calcul de distance : la définition de cette distance dépendant bien évidemment des objectifs recherchés et des attributs que l'on veut comparer.

Supposons que A et B soient deux agents voisins et E_A, E_B leur vecteur d'état respectif, on calcule $|E_A - E_B| < \mathcal{D}$, où \mathcal{D} représente un certain vecteur de distance minimale pour que l'on considère les agents comme proches.

Ces calculs de distance peuvent aussi être réalisés au niveau global, par un mécanisme d'observation de l'historique des états des agents voisins. Ces critères doivent être complétés par un certain nombre de pré-conditions à la formation de groupes, comme par exemple le nombre d'agents impliqués dans le regroupement : ces pré-conditions sont directement liées à la définition des groupes que l'on veut voir apparaître. Ainsi, il apparaît naturel de considérer que des boules d'eau formant des mares doivent former un amas conséquent. On touche ici au problème de transfert des connaissances du domaine étudié pour la définition des attributs et pré-conditions aux groupes, nous y reviendrons plus loin. Néanmoins, on peut rapprocher ces critères de regroupement d'agents à une reconnaissance dynamique locale de formes prédéfinies.

En résumé, on peut voir de façon générale comme le soulignent [Treuil et al 1997], le regroupement d'agents individuels comme un calcul de corrélations entre agents : corrélations spatiales et corrélations fonctionnelles. Les agents ainsi rapprochés doivent en outre satisfaire un certain nombre de pré-conditions, avant de pouvoir prétendre à former un véritable groupe : par exemple, une ravine ne pourra être formée que si le groupe potentiel possède un exutoire vers l'extérieur ou vers un autre groupe, de façon à gérer le transport des boules qu'elle contient.

2.2.2. Adhésion à un groupe

Les bases du regroupement d'agents étant définies, il convient désormais de réfléchir aux mécanismes qui président à la création de groupes proprement dite. Nos cellules porteuses de boules d'eau ont la faculté de s'agglutiner en amas de cellules partageant certaines propriétés. On assiste donc, de fait, à une pré-structuration du milieu dans lequel elles évoluent. Mais, comment va-t-on passer de ces pré-structures à des structures effectives, ou autrement dit, comment l'amas donne-t-il naissance au groupe ? Et à quel groupe ?

Le mécanisme de création de groupe peut être réalisé au niveau global, ou localement au niveau des agents individuels eux-mêmes. Dans [Marcenac & Calderoni 1997] où l'on développe un système multi-agents pour simuler l'apparition de séismes, le choix s'est porté sur un mécanisme agissant au niveau global, dénommé *méta-fonction*, chargé de concrétiser les regroupements d'agents individuels en agents groupes. Ce choix s'explique par le fait que, dans cette application, l'ensemble des groupes possibles se réduit à un seul élément : le séisme. Dans un souci de généralité, il nous semble fondamental que ce mécanisme soit, *au contraire*, géré localement par les agents eux-mêmes. Ce mécanisme local semble, en effet, plus en accord avec une vision d'agents s'agglutinant du fait de similarités et *délibérant* quant au choix du groupe auquel ils voudraient adhérer. Cette délibération permet en outre de faire apparaître clairement les éventuels problèmes de gestion de conflits entre plusieurs types d'agents

² Il est à noter que les relations de voisinage définies par une topologie donnée sont bien souvent le support de relations fonctionnelles : ainsi, dans le cas de nos cellules porteuses de boules d'eau, les relations de voisinage sont le support du transfert des boules d'eau de cellule en cellule. De même, introduire une vitesse de transfert des boules sur le réseau de cellules reviendrait, spatialement, à faire varier dynamiquement les relations de voisinage entre cellules, ou temporellement, à quantifier les relations entre deux cellules par la fréquence de leurs échanges de boules. Aussi nous semble-t-il légitime d'opérer ce rapprochement.

groupes candidats : on peut imaginer des boules qui soient partagées entre adhérer à une mare ou à une ravine par exemple.

Le problème se pose en termes de prise de décision de la part des agents formant les prémisses d'un groupe. Sans doute pourra-t-on réutiliser avec profit les nombreux travaux menés dans ce cadre en multi-agents, gestion de conflits, partage de plans...

Il convient tout d'abord de remarquer que se pose à nous le problème de la prédéfinition ou non des groupes possibles. On pourrait imaginer, en effet, que les agents ne puissent adhérer qu'à un seul type de groupe, complètement général, qui verrait son comportement influé par les interactions et l'état des agents qui le constituent. Cependant, cette vision apparaît très vite comme irréaliste et en désaccord avec l'optique que nous nous sommes fixé de construire les bases d'un véritable laboratoire virtuel d'expérimentation. Lorsque l'on veut observer certains phénomènes au cours d'une simulation, on sait ce que l'on veut observer, et il n'y a aucune raison pour ne pas prédéfinir les groupes qui incarneront ces phénomènes. L'observation de la formation de groupes complètement généraux que l'on ne pourrait rattacher à des catégories spécifiques apporterait peu en termes d'expérimentation et d'analyse. Par ailleurs, mais il serait hors de propos de rentrer dans le grand débat de l'émergence³, il nous semble que l'on ne peut observer que ce que l'on sait pouvoir observer, il serait faux de croire qu'une simulation pourrait nous faire apparaître, comme par enchantement, une nouvelle catégorie du domaine que l'on étudie.

L'adhésion des agents à un groupe peut être vue comme un processus d'élection. Les agents se sont regroupés en circonscriptions et doivent se prononcer en faveur de tel ou tel groupe, voir figure 2. Les groupes prédéfinis, candidats à l'élection, constituent autant de bulletins de vote, et sont ceux dont les pré-conditions sont vérifiées par les agents. Chaque agent se prononce en faveur de tel ou tel candidat. Les critères de choix peuvent être similaires à ceux définis précédemment : il suffit de définir pour chaque groupe l'agent individuel type qui lui correspond. Ainsi, chaque agent se compare avec l'agent type mare ou type ravine, et se prononce pour le groupe dont il se sent le plus proche. L'élection se fait, par exemple, à la majorité. On pourrait par la suite, filant plus avant la métaphore, envisager des raffinements dans les modes de scrutin : par exemple, si des agents appartenant déjà à un groupe sont amenés à participer à une élection, ils pourraient se voir attribuer un droit de veto à l'encontre de toute autre proposition de groupe différent du leur ; ou au contraire, instituer un système moins autoritaire et tyrannique, en mettant en place une recherche de compromis, ou encore la remise en cause pure et simple du groupe déjà formé si une majorité se prononce pour un autre type de groupe⁴.

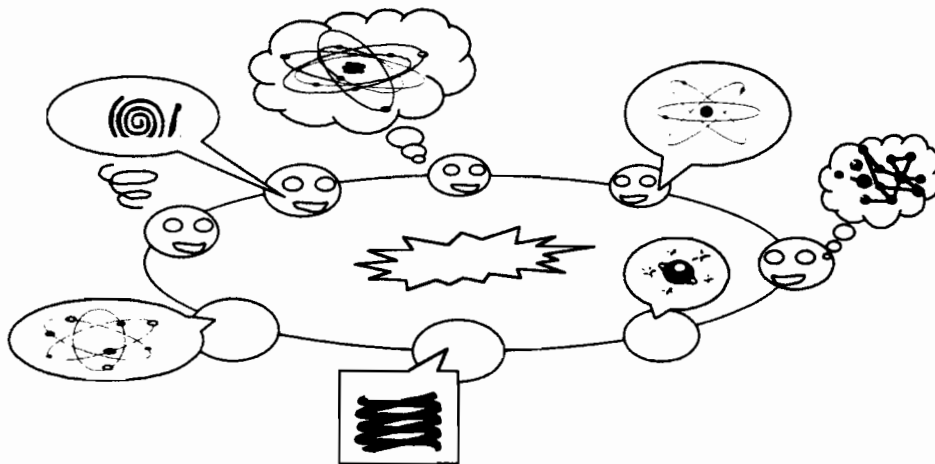


Figure 2 Adhésion à un groupe

Pour donner corps à cette assemblée délibérante, il pourrait être commode de concrétiser le rassemblement des agents qui vont participer à une élection locale au sein de *proto-groupes* ou *pré-groupes* auxquels on confierait la gestion du vote et le dépouillement. Ces pré-groupes pourraient aussi constituer le support d'une interrogation des agents au cours de la vie du groupe. Ainsi, ayant en vue la dissolution de groupes déjà formés, on peut imaginer que la dissolution du groupe soit de même votée par l'ensemble des agents le constituant au sein du pré-groupe.

³ On pourra se référer avec profit à [Jean 1997] pour une discussion sur le concept d'émergence.

⁴ Un pas vers la démocratie dans le monde multi-agents ?

En résumé, nos agents dotés de capacités à se regrouper, en calculant des corrélations entre agents de leurs voisinages, siègent en assemblée constituante, par exemple au sein de pré-groupes, et se prononcent, à l'issue d'un processus d'élection, en faveur de tel ou tel type de groupe. Dès lors, le groupe est créé localement et un nouvel agent apparaît. Le niveau global en est bien sûr averti de façon à posséder à tout moment une vision d'ensemble des relations unissant les agents du monde, qui, du fait de l'apparition dynamique de groupes, se trouve en perpétuelle restructuration.

2.2.3. Gestion du contrôle au sein de l'agent groupe

Nous atteignons ici un point crucial de la discussion. Il s'agit de définir les règles d'interaction entre agents groupes venant d'être formés et agents non encore impliqués dans un groupe, et la gestion du contrôle des agents appartenant à l'agent groupe. Il faut imaginer un bouillonnement de boules d'eau libres, de mares en formation, et de ravines déjà formées. Comment gérer cet ensemble d'agents de différents niveaux, et comment définir le cycle de vie des groupes⁵ ?

Il convient de prendre conscience que ce problème est éminemment lié à la perception du temps au sein des diverses entités. Nous en avons eu un petit aperçu *cf. supra* lorsque nous avons parlé de la nécessité de doter nos agents de capacité de mémorisation de l'historique de leurs états internes. Il est clair que des délibérations pour choisir tel ou tel type de groupe ne peuvent avoir lieu à chaque cycle d'une simulation par événements discrets, au risque d'obtenir une structuration sans cesse chaotique de l'environnement. Idéalement, il conviendrait que chaque entité soit dotée de sa propre perception du temps, et agisse de façon complètement asynchrone : on peut aussi définir pour chaque entité un nombre de cycles entre chaque action.

Ce problème fait entrer en jeu la question de la prise de contrôle des agents individuels par le groupe et de la pérennité des agents individuels une fois regroupés.

Deux visions des choses s'offrent à nous :

- les agents individuels se regroupent mais continuent d'exister en tant que tels. Dès lors ils participent périodiquement à des élections qui décident du devenir du groupe auquel ils appartiennent et de la formation éventuelle de nouveaux groupes à la faveur de rapprochements entre agents.

Les mares existent, mais périodiquement, les boules d'eau qui la constituent, ainsi que d'autres boules d'eau, encore libres, se rassemblent et décident de former une autre mare – ce qui entraîne la dissolution de celle à laquelle elles prenaient part -, ou d'agrandir la mare préexistante – ce qui entraîne une modification des attributs de ladite mare.

Dans cette optique, les agents groupes ne possèdent pas une autonomie complète, ils sont soumis aux aléas des décisions rendues par les agents individuels. Leur comportement se réduit au calcul d'un certain nombre de paramètres macroscopiques, volume, extension spatiale, et à un signalement à l'adresse de l'utilisateur : attention, une mare s'est formée. Les agents ne sont, en quelque sorte, rien de plus que des observateurs privilégiés d'un phénomène spécifique.

- les groupes une fois formés prennent entièrement le contrôle des agents individuels et l'agent groupe est doté de moyens d'auto-observation, *via* des mécanismes d'interrogation des agents qui le constituent

Typiquement, une mare observe périodiquement sa périphérie. Dès lors qu'elle remarque qu'elle a la possibilité d'évacuer une partie de ses boules, elle le fait et se dissout partiellement, ou totalement si elle se retrouve sans aucune boule. Les boules ainsi libérées ont loisir de s'assembler ensuite avec d'autres.

Dans cette optique, la vie et mort des groupes est confiée aux groupes eux-mêmes, dans une autonomie complète avec l'extérieur. Les agents ne sont plus seulement des observateurs de phénomènes, ils sont acteurs des phénomènes qu'ils incarnent et contrôlent les agents de granularité inférieure qui les constituent.

C'est cette deuxième vision de l'interaction entre les entités créées qui emporte notre adhésion. Il paraît en effet plus élégant que chaque niveau possède son autonomie propre, ces différents niveaux étant de fait soumis à des lois différentes. Ainsi, les cellules porteuses de boules d'eau s'échangent des boules une à une, en revanche, les ravines gèrent des *flux* de boules d'eau qu'elles échangent avec d'autres groupes, *via* leurs exutoires. Cette gestion de flux est plus en accord avec la vision de l'hydrologue qui raisonne en terme de débits d'eau pour des cours d'eau. De plus, cette absorption des agents de niveaux inférieurs au sein d'entités de granularité supérieure donne tout son sens, à la fois en terme d'optimisation des ressources et de calculs, et en terme de modélisation de la réalité, à la création de groupes. On

⁵ Pour les joueurs de Go, le parallèle est frappant avec les problèmes de *Tsume-Go*, vie et mort des groupes

s'éloigne définitivement d'une modélisation du type automates cellulaires, où les échanges sont toujours gérés au niveau de granularité le plus bas.

Il convient dès lors de préciser comment sont perçues les interactions entre les différentes entités de l'environnement.

Les agents appartiennent à différents niveaux de granularité : niveau individuel, niveau du groupe, ... etc. Les échanges entre agents d'un même niveau sont régis par des lois propres à chaque niveau : ainsi, les cellules individuelles de l'environnement s'échangent une à une leur boule, en revanche les mares et les ravines gèrent des flux de boules. Le passage d'un niveau à un autre s'effectue lors de rapprochement d'agents d'un même niveau : des boules s'assemblent pour former une mare, des mares fusionnent, ou créent des réseaux avec des ravines. Les groupes sont dotés de capacité d'auto-gestion, en particulier, ils décident de leur dissolution partielle ou totale au gré de leur histoire, libérant par-là même les agents de niveau inférieur qui les constituaient. Les agents individuels appartenant à un groupe voient leur comportement altéré : ainsi, une cellule faisant partie d'une ravine, continuera à *recevoir* des boules d'eau provenant de ses voisines libres, mais ces boules viendront augmenter le stock d'eau du groupe ravine qui gèrera de façon indépendante les flux de groupe en groupe, et les boules *ne seront plus acheminées de cellule en cellule à travers la ravine*. Les cellules du groupe ne jouent qu'un rôle de *membrane* entre le groupe et l'extérieur. De plus, les cellules appartenant à un groupe se voient retirer leur droit de vote, elles ne participeront plus aux rassemblements des cellules libres, elles demeurent liées à leur groupe⁶.

2.2.4. Coexistence de regroupements récursifs

Pourquoi se contenter d'un seul niveau intermédiaire entre niveau individuel et niveau global à l'instar de [Marcenac et al 1997] ? Et si l'objet d'étude de l'hydrologue consistait justement dans la formation de réseaux de ravines et de mares sur une surface d'étude ? Ou encore, comment introduire une fourmilière au sein d'une simulation écologique si l'on n'a pas la possibilité de manipuler la fourmilière en tant qu'entité à part entière ayant ses propres caractéristiques ?

Prévoir dès le départ des niveaux récursifs de regroupement, voir figure 3, est un aspect fondamental pour coller à notre objectif d'outil de simulation. Cela revient à pouvoir définir l'échelle d'analyse pertinente des phénomènes en fonction de leur place dans l'environnement simulé et disposer simultanément de plusieurs niveaux d'analyse : si l'on veut modéliser les infrastructures ferroviaires d'un pays et que l'on considère plusieurs villes, il ne serait pas pertinent de rester seulement à l'échelle de la gare ou de la station de métro, le réseau des transports sera aussi vu comme une entité à part entière, une sorte de *boîte noire* capable de gérer des flux de marchandises ou de personnes. Que l'on doive acheminer des personnes en métro, puis en train, pour les mener d'une ville à une autre, est une contrainte gérée en interne par la boîte noire du réseau des transports, elle ne devrait pas intervenir à un autre niveau : sauf bien sûr, en cas de perturbation du réseau...

Les mêmes mécanismes de regroupement peuvent s'appliquer récursivement à tous les niveaux, moyennant sans aucun doute d'adapter quelque peu les critères de regroupement évoqués plus haut. Ainsi, on ne peut pas vraiment parler de relations de similarité ou de distance entre des agents de nature différente, comme des ravines ou des mares. Il faut se tourner vers de nouvelles métaphores. Nous avons parlé déjà de la notion de *partenariat*, en remplacement de la notion de voisinage. Il faudrait creuser dans ce sens. Il s'agit de définir de nouvelles formes de règles : regroupements fonctionnels, regroupements en groupes de travail, regroupements de nature sociologique. Il suffit qu'une ravine connaisse les groupes avec lesquels elle est en relation – et c'est le cas, car elle garde en mémoire les exutoires vers l'extérieur ou vers les autres groupes, pour gérer ses flux de boules. Ces interactions générées par l'échange de flux de boules fournissent déjà les bases d'un regroupement possible : si ces relations sont durables, des ravines peuvent être amenées à se regrouper au sein d'un vaste réseau qui gèrera à son tour de façon transparente les flux de boules.

La possibilité d'opérer des regroupements récursifs ne pose donc pas de problème majeur. En réalité tout dépend de la décision prise par l'expérimentateur et le point de vue qu'il adopte sur les relations qui unissent les groupes formés. Peut-être souhaitera-t-il considérer qu'il y a là un réseau de ravines, ou peut-être préférera-t-il, en se basant sur ces mêmes échanges, décréter que des ravines qui entretiennent des relations durables, doivent fusionner et ne former plus qu'une seule et même ravine. Toujours est-il que ces différents niveaux d'analyse doivent être accessibles simultanément. Nous abordons là le problème de la coexistence entre agents créés dynamiquement par le système et agents posés par l'utilisateur.

⁶ Il reste qu'un mécanisme de consultation des cellules constitutives du groupe pourrait être envisagé.

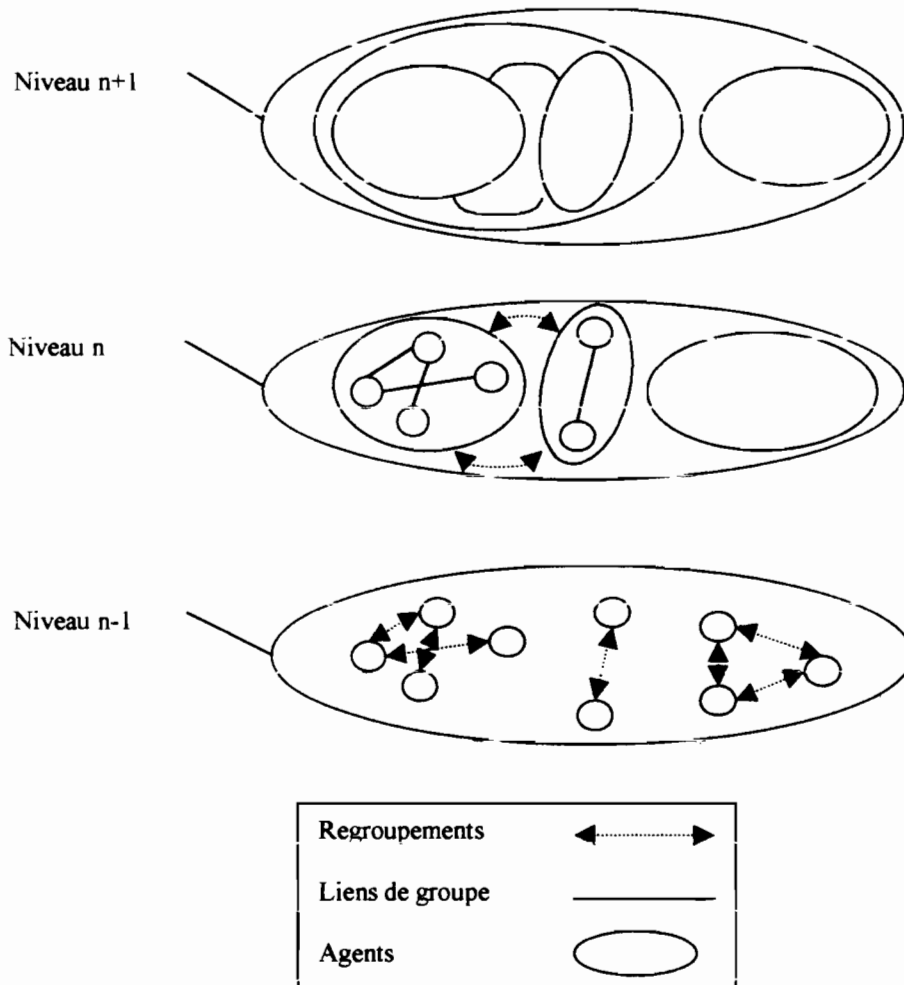


Figure 3 Coexistence de plusieurs niveaux d'analyse lors de regroupements récurrents

2.3. Interventions de l'utilisateur

2.3.1. Création de types de groupes et transfert des connaissances

Nous avons vu que la formation d'agents groupes se faisait à l'issue d'un processus de délibération et d'élection au sein d'une assemblée d'agents envisageant un regroupement. Leur choix se faisait par comparaison avec des agents types. La définition du type de ces agents ainsi que des agents de niveaux supérieurs est propre au domaine d'étude. On a essayé de dégager un certain nombre de principes et de mécanismes devant présider à la création et aux interactions entre les diverses entités d'un univers multi-agents, il reste que, concrètement, l'instanciation de ces principes et de ces règles doit être dirigée par l'expert du domaine.

Ce transfert des connaissances est du reste un procédé sur lequel repose déjà toute la conception de systèmes multi-agents. Dans le cas qui nous occupe le plus gros du travail réside dans la transposition, en des entités manipulables dans une simulation, des catégories d'analyse dont se servent les experts du domaine. Dès lors que cette transposition est réalisée, on bénéficie de tout l'arsenal des méthodes propres au monde multi-agents, et, en quelque sorte, le plus gros est fait... Ainsi, dans le cas d'une simulation de fourmière, c'est l'éthologue qui souhaite retrouver dans la simulation les groupes sociaux d'insectes qu'il étudie dans la réalité : groupes de chasse, groupes d'ouvrières... , ainsi que les attributs de ces groupes : pour une fourmière, son aire de chasse, les ressources qu'elle consomme, ses cycles de ponte... Dans le cas de l'hydrologie, ce transfert des connaissances ne va pas sans poser de problème : en effet, il est difficile par exemple de définir exactement ce que sont les attributs d'une ravine. On peut considérer qu'il s'agit d'un chemin d'eau privilégié qui se crée au cours du ruissellement de l'eau, et qui

entraîne un certain nombre de phénomènes : érosion, transport de matières, création d'un cours d'eau durable... Des caractéristiques précises nous manquent pour lors, et il faudrait mener une véritable investigation des types d'objets manipulés par les hydrologues, afin de leur donner des équivalents agents au sein d'un simulateur. Pour l'instant, nous avons défini un certain nombre de critères, comme la présence d'un exutoire, et des comportements de transport de flux de boules d'eau, sans trop se soucier de leur vraisemblance. L'idée est avant tout de développer un exemple jouet qui permette de tester nos idées sur le regroupement d'agents et leur coexistence.

Dans une perspective à plus long terme, lors du travail de thèse notamment, il conviendra de réfléchir à une véritable typologie des phénomènes observables par l'hydrologue. La recherche de cette typologie s'inscrira dans un travail pluridisciplinaire, de nature à enrichir informaticiens et hydrologues.

2.3.2. Mise en place d'instances de groupes au départ de la simulation

Dès lors que l'on veut faire des simulations multi-agents de véritables outils d'expérimentation et d'analyse, il faut s'attacher à pouvoir introduire au sein de la simulation, des agents groupes que l'on a repérés et qui préexistent. Ce sera par exemple une mare dont on a mesuré l'étendue, ou un fleuve dont le cours d'eau et la dynamique sont connus, et que l'on souhaite insérer dans la simulation.

Cette édition d'agents ne pose pas de problèmes fondamentaux, mais repose encore le problème du transfert des connaissances d'un domaine. Il faut pouvoir rendre l'édition de groupes la plus naturelle possible pour l'utilisateur, c'est-à-dire coller au plus près avec la vision qu'il a des phénomènes observés dans la réalité. Les attributs de l'agent groupe doivent être des quantités mesurables dans la réalité, leurs autres caractéristiques internes, calculées par le simulateur.

De même, l'utilisateur décide des groupes qu'il souhaite ou non observer au cours d'une simulation. La nature de ces groupes va en effet varier en fonction des objectifs que l'on se fixe lors de la simulation, les phénomènes que l'on désire observer, et les enseignements que l'on souhaite en tirer. Si l'on ne veut pas prendre en compte les mares qui peuvent se former, et il faut que l'utilisateur ait la possibilité d'interdire leurs formations.

Toutes ces remarques ne font que marteler la perspective dans laquelle nous nous plaçons à long terme : donner les moyens d'un véritable laboratoire virtuel d'expérimentation à l'utilisateur. En d'autres termes, il doit se sentir aussi à l'aise que devant ses aquariums à fourmis, ou sa maquette d'un bassin versant...

2.3.3. Nécessité d'outils pour la représentation spatiale des relations entre agents

L'environnement de la simulation, à la faveur des regroupements entre agents, est en perpétuelle restructuration. De nouveaux agents groupes apparaissent, des relations se nouent entre divers niveaux d'abstraction, ce qui rend problématique la visualisation du graphe des interactions entre toutes les entités présentes au cours de la simulation.

Il convient donc de réfléchir aux moyens de représenter efficacement le jeu spatio-temporel de ces interactions. Une étude récente, [Proton et al 1997], décrit un outil qui a pour but de représenter graphiquement l'évolution de l'organisation d'un système multi-agents. Il est basé sur une visualisation de la dynamique de l'état des agents et de leur réseau de communication. A chaque agent du domaine est associé un agent de l'observateur, représenté sous la forme d'un nœud d'un graphe planaire, voir figure 4. Ce graphe représente un *point de vue* sur l'organisation. Une fonction d'attraction-répulsion, dépendant de la fréquence des échanges de messages entre les agents deux à deux, définit une distance entre les différents nœuds. En cours de simulation, on peut alors se faire une idée du jeu des échanges entre agents par l'intermédiaire de ce graphe évolutif. Grâce à ce système d'observation, les auteurs montrent qu'une analyse plus pointue des expériences est rendue possible.

C'est une idée extrêmement intéressante. L'idée de disposer, outre la représentation de l'espace physique proprement dit, d'un système de visualisation auxiliaire pour représenter le jeu des interactions entre entités constitue une piste de recherche prometteuse. On disposerait alors de deux espaces de visualisation : l'un lié spécifiquement à l'espace physique, l'autre, peut-être plus abstrait, figurant l'ensemble des relations fonctionnelles et spatiales unissant les diverses entités de la simulation.

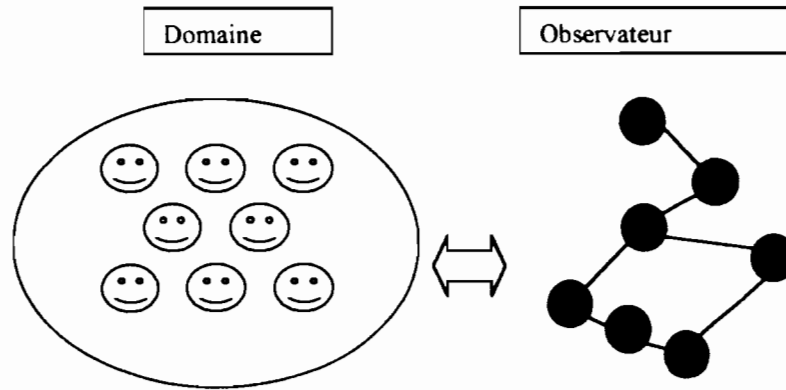


Figure 4 Représentation spatiale de l'organisation d'une société d'agents, d'après [Proton et al 1997]

3. Présentation de l'outil informatique

3.1. Partis pris et simplification

Nous présentons maintenant l'outil informatique que nous avons développé parallèlement à la poursuite de notre réflexion. Cet outil s'inscrit dans la thématique du projet RIVAGE, [Solignac 1996], [Perrier & Cambier 1996]. Il faut y voir un exemple de simulateur-jouet, dont le but est d'offrir un chantier de développement où l'on cherche à donner corps aux concepts discutés précédemment. En accord avec ce principe, nous simplifions volontairement le cadre que voudrait un véritable simulateur de phénomènes de ruissellement et d'infiltration. Nous en donnons tout de suite les principes de base.

L'espace est ici représenté sous la forme d'un maillage tridimensionnel, dans lequel chaque maille, ou cellule, est un agent, qui peut accueillir une et une seule boule d'eau. La pluie est simulée par l'introduction périodique d'un nombre paramétrable de boules d'eau. A chaque cycle, les boules se déplacent de cellule en cellule en cherchant à chaque instant la cellule libre la plus basse, dans un voisinage cubique de 26 voisines. Lorsqu'il existe plusieurs cellules cibles, l'une d'elles est choisie aléatoirement. Une cellule située à la limite de la surface d'étude se débarrasse de sa boule vers l'extérieur, et la boule est retirée du jeu. Les cellules peuvent prendre trois états selon, état 0, qu'elles ne sont occupées par aucune boule d'eau, état 1 qu'elles sont au contraire porteuses d'une boule d'eau de passage, enfin état 2, qu'elles sont porteuses d'une boule d'eau, qui, piégée momentanément en raison de l'encombrement du voisinage, ne peut s'échapper.

Chaque cellule tient à jour l'historique de ses états successifs sur une fenêtre temporelle de longueur paramétrable. Périodiquement, les cellules opèrent des rapprochements entre elles selon des règles de connexité et de similarité entre historiques. Lorsqu'un de ces rapprochements vérifie les prémisses des lois d'existence de groupes, un nouvel agent groupe, mare ou ravine, est créé par les cellules. La mare et la ravine prennent le contrôle des cellules qui les constituent. En particulier, elles gèrent des stocks et des flux de boules d'eau *via* leurs exutoires. Elles sont de plus dotées de capacités d'auto-observation qui permettent une gestion autonome de leur propre dissolution ou fusion. Lors d'une dissolution, les cellules, libérées, retrouvent leur comportement de base.

Armé de ces quelques esquisses, nous présentons dans un premier temps une revue plus approfondie des règles et mécanismes implémentés, puis, dans un second temps, nous offrons quelques illustrations d'expérimentations, qui permettent d'entrevoir les atouts d'une telle approche pour la simulation en multi-agents.

3.2. Règles et mécanismes implémentés

3.2.1. Etat actuel

Le système actuel s'appuie sur des discriminations au sein de l'ensemble des cellules, afin de donner un support à leur regroupement. Pour ce faire, chaque cellule tient à jour, comme nous l'avons dit précédemment, un historique de ses états successifs sur une fenêtre de longueur paramétrable. Cet historique conditionne l'appartenance d'une cellule à *trois catégories distinctes* :

- une cellule appartient à la catégorie des *ravines potentielles* lorsque son historique témoigne qu'elle a toujours été occupée par une boule d'eau de passage,
- une cellule appartient à la catégorie des *mares potentielles* lorsque son historique atteste qu'elle a gardé la même boule d'eau sur toute la durée de la fenêtre temporelle,
- enfin une cellule appartient à la catégorie des *versants potentiels*, dans le cas où elle est parfois inoccupée⁷.

Cette distinction cherche à prendre en compte le fait que certaines cellules sont plus fréquentées que d'autres.

Au sein des deux premières catégories, s'opèrent des rapprochements entre cellules voisines. Si ces rapprochements portent sur un nombre suffisant de cellules⁸ et vérifient certaines pré-conditions, un agent groupe, ravine ou mare, est formé. Ainsi, un agent mare est créé dès lors qu'un nombre suffisant de cellules, appartenant à la catégorie des mares potentielles, sont situées dans un même voisinage. Un agent ravine est créé lorsque plusieurs cellules, appartenant à la catégorie des ravines potentielles, sont voisines et qu'au moins l'une d'entre elles est en contact avec l'extérieur de la surface d'étude ou avec un autre groupe, constituant ainsi un exutoire pour l'agent ravine.

L'agent groupe ainsi créé prend le contrôle des cellules impliquées dans le regroupement. Celles-ci ne jouent plus qu'un rôle d'interface avec le milieu : elles continuent à recevoir des boules d'eau venant des autres cellules extérieures au groupe, mais ne gère plus d'échanges de boules de cellule en cellule.

En raison de la prise de contrôle des cellules par l'agent groupe, de nouvelles règles d'échange sont définies. Le groupe raisonne en terme de flux pour la gestion des boules d'eau. Chaque groupe est doté d'une capacité maximale d'accueil de boules d'eau. Pour l'instant, elle correspond simplement au nombre de cellules du groupe. Les cellules du groupe n'acceptent des boules que dans la limite de la capacité assignée au groupe, au-delà, elles se comportent comme une membrane isolante.

Périodiquement, l'agent groupe cherche à évacuer son stock de boules, *via* ses exutoires. Un groupe possédant un exutoire vers l'extérieur se débarrasse directement de toutes ses boules. Si l'agent groupe ne possède pas d'exutoire vers l'extérieur, il interroge les autres agents groupes auxquels il est lié par ses exutoires, et leur envoie un flux de boules d'eau, dans la limite de leur capacité. Des échanges de flux de boules s'opèrent ainsi directement au niveau des agents groupes. Toutes les boules restantes sont stockées au sein du groupe. Ainsi, dans le cas d'une mare, qui est isolée des autres groupes, le stock de boules n'évolue pas sauf dans le cas d'une modification de sa périphérie rendant soudainement possible un déversement.

La vie de l'agent groupe est réglée par la dynamique des flux de boules reçus. Lorsque l'agent reçoit, entre deux cycles successifs, un nombre décroissant de boules d'eau, c'est le cas lors d'une diminution de la pluie, l'agent groupe décide de sa propre dissolution partielle. Il se sépare, pour l'instant aléatoirement, d'un nombre de cellules proportionnel à la diminution du flux de boules. Les cellules retirées du groupe retrouvent leur comportement de base. Si l'agent groupe, à la suite de dissolutions partielles successives, n'est plus formé que par un nombre critique de cellules, il décrète sa propre dissolution, et l'agent groupe disparaît de la simulation.

3.2.2. Travaux en cours

Voici résumé le fonctionnement des regroupements et des interactions entre groupes. Certains points restent en suspens et font présentement l'objet de développements.

⁷ La catégorie des versants potentiels n'est pas exploitée pour l'instant dans le cadre de regroupements.

⁸ Ce nombre correspond à une projection de notre vision des formes que doit prendre le groupe : une mare se doit d'être un groupe compact, dans lequel chaque cellule possède un nombre important de voisines ; une ravine, quant à elle, comprend des cellules dont les connections suffisent à définir un chemin d'eau, ainsi une cellule de la ravine peut se contenter de posséder un nombre restreint de voisines.

La gestion des boules, qui constitue le seul comportement actuel de l'agent groupe, peut être rattachée à une notion de débit. Dans l'état actuel, le groupe cherche à se débarrasser de *tout* son stock de boules, mais il devrait y avoir, associée à chaque groupe, une capacité variable à envoyer des flux de boules, par exemple fonction de la taille du groupe, du dénivelé, de sa vitesse moyenne dans le cas des ravines.

Par ailleurs, nous ne gérons pas encore l'interaction entre ravines et mares. En effet, les mares sont pour le moment dotées d'une capacité d'accueil de boules qui ne dépasse pas leur nombre de cellules. Or chacune des cellules de la mare est occupée par une boule. Par conséquent, aucun échange de flux de boules ne peut se produire entre une ravine et une mare. Dans un souci de généralité et pour introduire la notion de débordement d'une mare causé par une arrivée massive d'un flux de boules, il faudrait permettre à une mare d'accepter un nombre de boules plus important, donc une capacité supérieure à son nombre de cellules. Dans ce cas, des échanges entre ravines et mares seraient possibles et si le nombre de boules présentes au sein d'une mare excédait cette capacité, la mare se verrait contrainte de déverser l'excédent vers l'extérieur. Cette notion nécessiterait l'introduction d'une vitesse d'écoulement des boules. Cette vitesse pourrait s'appuyer sur un voisinage évoluant dynamiquement, ou sur des calculs de fréquences d'échange entre cellules, de façon à ce qu'une boule puisse se déplacer plus loin que de cellule en cellule ou plus rapidement dans le temps.

Par ailleurs, nous tentons actuellement de donner plus de généralité aux mécanismes de regroupement, en nous appuyant sur les principes que nous avons évoqués précédemment. Ainsi, il serait dommage de continuer à utiliser une discrimination *a priori* des cellules au sein de diverses catégories. Cette notion a permis un développement rapide et la mise en relief des problèmes liés à la définition des groupes. Néanmoins, à terme, il serait bon d'avoir un véritable système de regroupement général, sans discrimination. Nous implémentons actuellement des méthodes reprenant les principes de regroupement par détection de similarité, par le biais d'une définition de distance entre historiques, et conduisant à la formation de pré-groupes au sein desquels les cellules délibèrent quant au choix du groupe auquel elles souhaiteraient appartenir. Faute de temps, ces implémentations n'en sont encore qu'au stade du chantier.

Nous avons aussi développé, pour réaliser des expérimentations, plusieurs fonctionnalités, comme l'édition de groupes préexistants, ou liées à une meilleure visualisation de l'évolution des événements, zoom, changement d'échelle, rotations, dont nous donnons un aperçu en annexes. Le programme est développé en Java, ce qui devrait aider à poursuivre sur la voie d'une gestion asynchrone des événements et des comportements des groupes. Enfin, pour l'instant, les messages rendant compte de l'évolution des groupes, créations, gestions de flux, sont donnés à l'utilisateur dans la console Java, et n'ont pas encore été intégrés dans une fenêtre de contrôle du programme, ce qui permettrait l'accès à plus d'informations pour l'utilisateur.

Nous présentons dans le paragraphe suivant plusieurs expérimentations que nous avons menées à l'aide du simulateur actuel, reposant sur les règles décrites dans le paragraphe précédent.

3.3. Expérimentations

Dans cette partie, nous donnons quelques exemples de fonctionnement, dont les détails sont regroupés en annexes. Ces exemples s'articulent autour de trois axes : l'émergence au cours d'une pluie de groupes de cellules, la coexistence de groupes émergents et de groupes introduits par l'expérimentateur, enfin la dissolution de groupes posés en début de simulation par l'expérimentateur, qui montre que la simulation est capable de corriger une vision erronée posée par l'utilisateur.

La fenêtre du simulateur est constituée d'un certains nombres de champs et de boutons servant à la gestion des paramètres et à la visualisation. Au centre de la fenêtre, on a une image de l'espace d'étude, voir figures suivantes, dans lequel la surface topographique est représentée sous forme discrète par des cellules de couleur blanche. Les cellules de couleur représentent les cellules possédant une boule d'eau en bleu clair, et les cellules faisant partie d'un groupe, en bleu foncé pour une mare, en rouge, jaune ou vert pour une ravine, dans les exemples suivants. Les agents groupes créés dynamiquement ou posés par l'utilisateur sont donc figurés par l'ensemble des cellules d'une même couleur.

La pluie est simulée en introduisant un nombre paramétrable de boules d'eau, cellules en bleu clair, dans la simulation.

3.3.1. Emergence de groupes

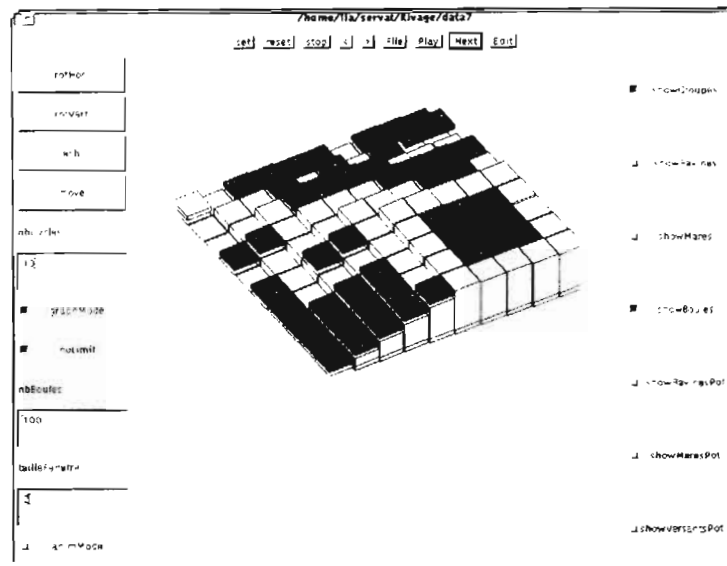


Figure 5 Emergence de groupes : état initial. La pluie est simulée par l'introduction de 100 boules d'eau par cycle. Les cellules occupées par une boule d'eau sont représentées en bleu clair sur l'image. Les cases blanches figurent le relief de la surface d'étude.

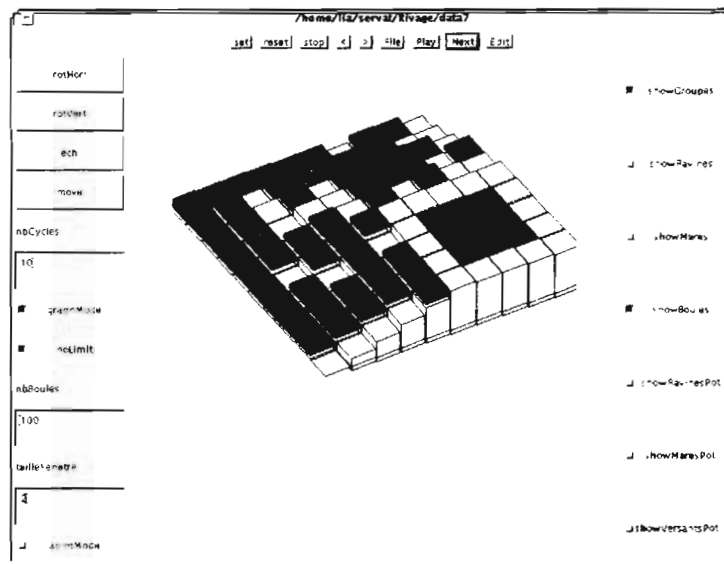


Figure 6 Emergence de groupes : état final, après une dizaine de cycles. Les cellules porteuses de boules d'eau se sont regroupées en trois groupes distincts : une mare en bleu foncé, une ravine occupant pratiquement tous les versants en rouge, et un embryon de ravine en vert. Les cellules figurées en bleu clair sont libres et n'appartiennent pas à un groupe.

3.3.2. Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur

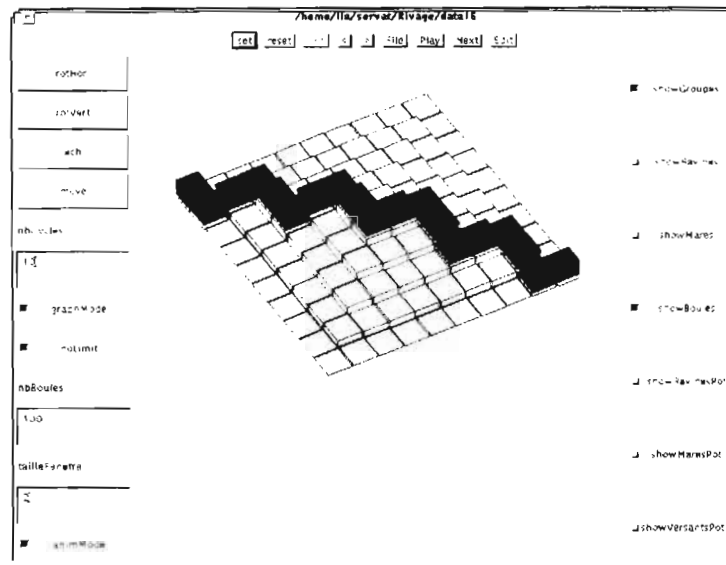


Figure 7 Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur : état initial. L'utilisateur a introduit dans la simulation une ravine figurée en rouge sur l'image. On va l'intégrer dans une simulation où l'on fait pleuvoir 100 boules par cycle.

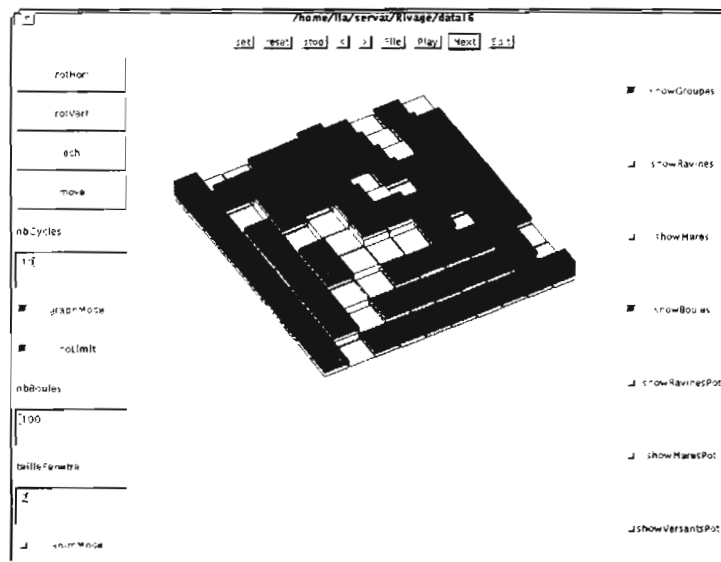


Figure 8 Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur : état final, après une dizaine de cycles. La ravine rouge s'est développée en des chemins d'eau parallèles aux escaliers formés par la surface. Une deuxième ravine, en vert, a vu le jour sur l'autre versant. Les cellules en bleu clair sont des cellules n'appartenant pas à un groupe.

3.3.3. Dissolution de groupes posés par l'utilisateur

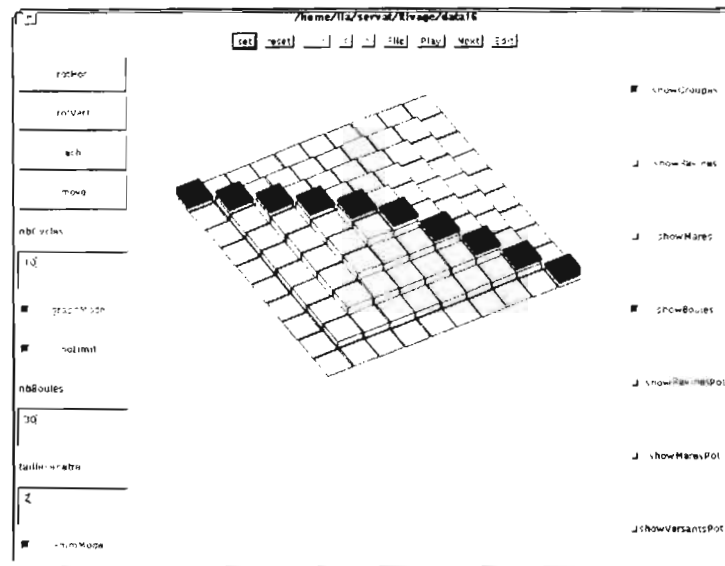


Figure 9 Dissolution d'une ravine : état initial. L'utilisateur a introduit une ravine, figurée en rouge. Pour simuler une pluie fine, on introduit seulement 30 boules par cycle, de façon à provoquer l'assèchement de la ravine.

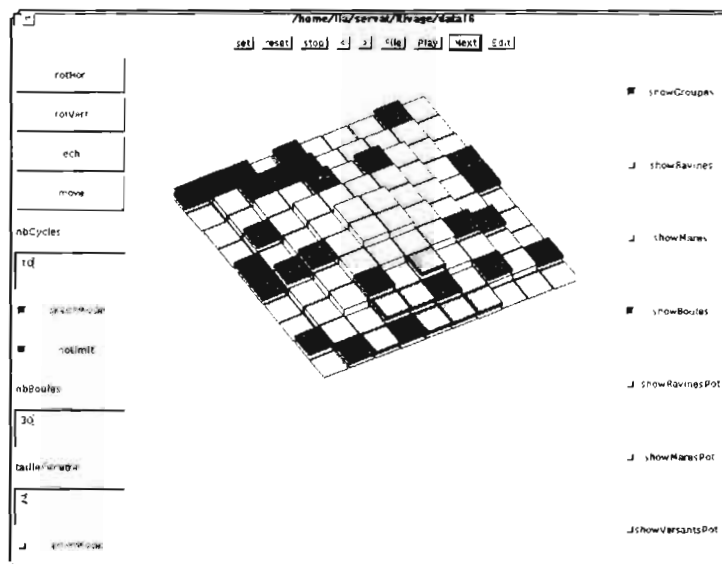


Figure 10 Dissolution d'une ravine : état final, après une dizaine de cycles. La ravine rouge a disparu. Il se forme un embryon de ravine, en jaune, sur l'un des versants. Toutes les autres cellules, en bleu clair, ne se sont pas regroupées.

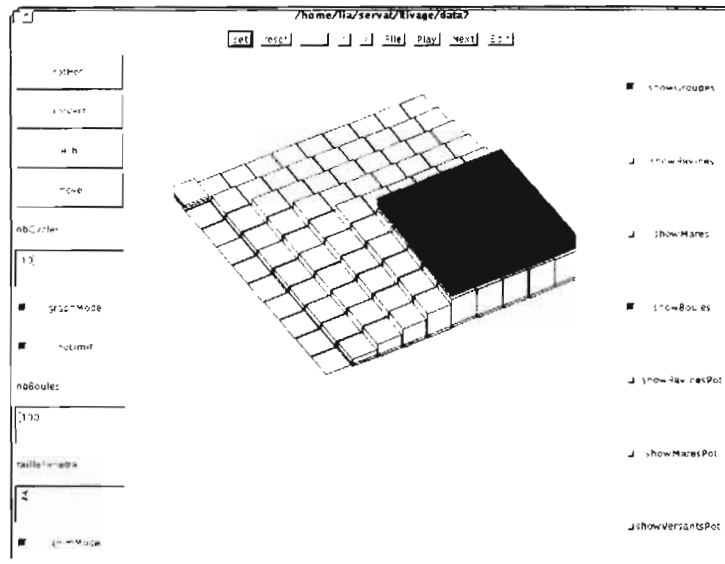


Figure 11 Dissolution d'une mare : état initial. La mare, introduite par l'utilisateur, ici en bleu foncé, est manifestement trop grande. Elle va être ramenée à de justes proportions au cours de la simulation.

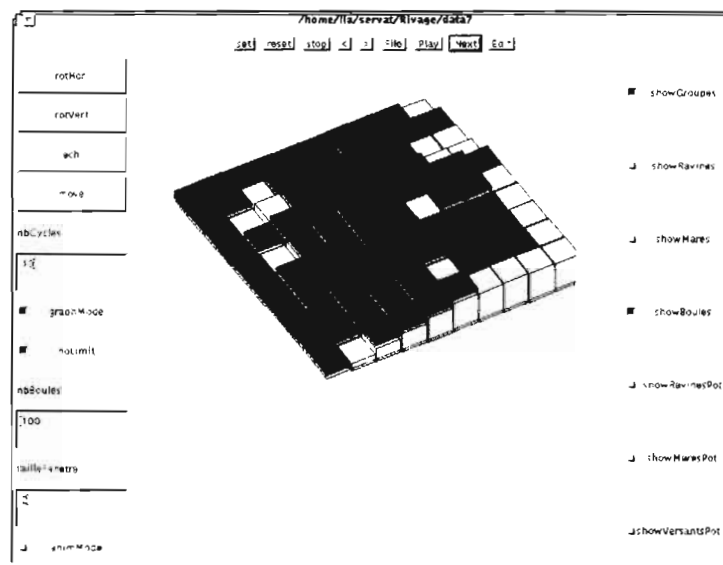


Figure 12 Dissolution d'une mare : état final, après une dizaine de cycles. La mare s'est en partie déversée sur les versants, et a produit l'apparition d'une ravine, en rouge sur l'image. La mare initiale, en bleu foncé, a été ramenée à de justes proportions, qui assurent son existence. Quelques cellules, en bleu clair, ne se sont pas regroupées. La simulation a corrigé une erreur d'appréciation de l'expérimentateur.

4. Conclusion Perspectives

Nous avons présenté dans ce document la synthèse d'une première étape d'un travail de réflexion et d'implémentation de longue haleine, qui sera poursuivi en thèse.

Les principes de base de l'introduction et de la coexistence de groupes d'agents de granularité différente sont posés. Des agents se regroupent selon un ensemble restreint de règles : connexités, partenariats, similarités d'états... A l'issue d'un processus local d'élection, ces agents adhèrent à un type de groupe, parmi ceux prédéfinis par l'utilisateur. Dès lors, une nouvelle entité est créée localement, qui prend le contrôle des agents qui ont participé à sa création. Ce nouvel agent s'intègre alors à la simulation et peut participer à son tour à des regroupements récursifs. Plusieurs niveaux d'abstraction coexistent ainsi au sein d'une même simulation, structurant le modèle de l'environnement et reflétant fidèlement le point de vue de l'expérimentateur sur le monde qu'il étudie.

L'outil informatique présenté, quoique embryonnaire, montre la faisabilité d'une telle approche, et laisse entrevoir tous les bénéfices que l'on pourra en retirer tant sur le plan d'un pouvoir accru d'analyse que d'un pouvoir d'expérimentation facilité, pour les simulations multi-agents à venir.

De nombreux problèmes, soulevés au cours de la discussion demeurent en suspens. Ils constituent autant d'objets d'une investigation prochaine, au cours du travail de thèse. Nous pouvons dès à présent donner quelques pistes de recherche à suivre :

- Les difficultés rencontrées lors de la définition des groupes d'agents et de leurs comportements soulignent la nécessité d'un véritable travail d'investigation sur une *typologie* des entités d'analyse utilisées par l'hydrologue et leur représentation en tant qu'agents. Il s'agira de définir une véritable méthodologie de représentation et de transfert des connaissances d'un domaine vers l'univers multi-agents. Ce travail, par essence pluridisciplinaire, est un aspect fondamental de la conception de systèmes multi-agents, et nous espérons pouvoir réutiliser avec profit les nombreuses études réalisées dans ce domaine.
- Le processus local d'élection, lors de l'adhésion à un groupe, met en relief l'existence de possibles conflits entre plusieurs groupes candidats. Nous avons brièvement envisagé, sur le plan métaphorique, la possibilité d'utiliser des modes de scrutin divers, suivant les objectifs recherchés : recherche de consensus, système majoritaire, loi du plus fort... Beaucoup de choses sont sans doute à reprendre dans le domaine de recherche que constitue la gestion de conflits, le partage ou la fusion de plans en conception de systèmes multi-agents.
- En se plaçant d'emblée dans la perspective de permettre des regroupements récursifs au sein d'entités de granularité croissante, de nombreux modèles d'organisation et de modes de regroupement peuvent être envisagés : parmi ceux-ci, les recherches menées sur les organisations en systèmes multi-agents, et notamment sur la création de hiérarchies dans une société d'agents constituent autant de directions de travail à venir.
- Un aspect important, et cependant peu abordé dans cette discussion, concerne la notion du temps dans la simulation multi-agents. Les agents relèvent non seulement de diverses échelles d'espace, mais aussi d'échelles de temps différentes. Il faudrait doter chaque agent de sa propre perception du temps. On pense à des plates-formes de simulation telles que SWARM, [Swarm Team 1994], dans laquelle des agents évoluent à leur propre échelle de temps et d'espace. C'est une question qui suscite particulièrement notre intérêt, et l'on s'attachera à creuser ce problème tant au niveau de la réflexion qu'au niveau de l'architecture et de l'implémentation, en dotant par exemple les groupes d'un comportement complètement asynchrone au sein de la simulation.
- La question de la recherche d'outils de visualisation de l'évolution du graphe des interactions entre entités de la simulation devra être abordée, surtout si l'on souhaite, à terme, s'affranchir d'une représentation calquée sur celle de l'espace où évoluent les entités de granularité la plus fine : notamment, dans le cas de RIVAGE, il s'agit de s'éloigner le plus possible d'une représentation reposant sur le modèle de la topographie. Cette approche, certes simple de prime abord, empêche l'ouverture sur d'autres perceptions du temps et de l'espace, notamment le passage à un modèle continu, et rend problématique l'intégration de données provenant d'autres sources d'information ne partageant pas la même vision du temps et de l'espace, systèmes d'information géographiques entre autres. L'outil présenté par [Proton et al 1997] donne l'idée du gain apporté par une séparation entre représentation de l'espace modélisé et représentation de l'espace observé.

La recherche à venir suivra ces diverses pistes, parmi d'autres. Le bout du chemin semble loin, mais déjà un premier pas conceptuel est fait, qui apporte, à notre sens, les prémisses d'un éclairage nouveau sur la conception de systèmes multi-agents et le concept même d'agent.

Les notions de groupe, de regroupement et d'inclusions récursives de groupes d'agents les uns dans les autres, sont au cœur du multi-agents. Elles façonnent notre vision des choses et se retrouvent par là même dans la conception des systèmes multi-agents que l'on construit comme modèles de cette vision. Cependant, l'agent semble s'arracher difficilement de l'héritage de son aîné, l'objet, son comportement se réduisant bien souvent à un ensemble de méthodes. Dans la perspective de l'intégrer parmi d'autres agents relevant d'échelles de temps et d'espace diverses, il devra se voir doter, dès sa conception, de règles d'interactions avec ses congénères, et surtout, il devra *leur offrir les moyens de sa propre création*. La fourmilière ne sera plus seulement définie comme une entité ayant ses propres attributs et comportements, vision classique, mais comme entité dont la création est laissée au seul jugement des agents fournis, qui possèdent les moyens de *donner corps aux phénomènes résultant de leur propre activité collective*, et de *coexister avec cette entité émergente*. Son autonomie ainsi accrue, l'agent s'écarte encore davantage de l'objet, et le concept d'agent prend alors tout son sens.

La première pierre est posée, l'âme de l'édifice, tout à l'heure esquissée, sort peu à peu des limbes...

5. Références

[Abbot et al 1986] M.B. ABBOT, J.C. BATHURST, P.E. O'CONNEL, J. RASMUSSEN. « An Introduction to the European Hydrological System – Système Hydrologique Européen- S.H.E. – 2: Structure of a Physically-Based, Distributed Hydrological System », *Journal of Hydrology*, 87, 61-77, 1986.

[Balian 1995] R. BALIAN. « Le temps macroscopique », in *Le temps et sa flèche*, Editions Frontières, 1995.

[Cambier 1994] Ch. CAMBIER. « SIMDELTA. Un système multi-agents pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger », *Thèse de l'Université de Paris VI*, 1994.

[Cambier et al 1997] Ch. CAMBIER, E. PERRIER, J.P. TREUIL, Ph. PREUX. « Action physique et espace géométrique, contribution à une réflexion sur l'utilisation des modèles multi-agents pour la simulation de processus physiques, application RIVAGE », *Actes des 5èmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents*, Hermès, 1997.

[Crave 1995] A. CRAVE. « Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques », *Thèse de l'Université de Géosciences de Rennes*, Rennes, 1995.

[Drogoul 1993] A. DROGOUL. « De la simulation Multi-Agents à la résolution collective de problèmes. Une étude de l'émergence de structures d'organisation dans les systèmes Multi-Agents », *Thèse de l'Université de Paris VI*, Paris, Novembre 1993.

[Ferber 1995] J. FERBER. « Les systèmes multi-agents : Vers une intelligence collective », InterEditions, 1995.

[Fredkin 1990] E. FREDKIN. « Digital Mechanics, An Informational Process Based on Reversible Universal Cellular Automata », *Cellular Automata, Theory and Experiment*, H. Gutowitz (Eds) MIT/North-Holland, p254-270, Amsterdam, 1990.

[Jean 1997] M.R. JEAN, Groupe de travail « Collectif » IAD/SMA de AFCET/AFIA. « Emergence et SMA », *Actes des 5èmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents*, Hermès, 1997.

[Marcenac & Calderoni 1997] P. MARCENAC, S. CALDERONI. « Self-Organisation in Agent-Based Simulation », *Proceedings of MAAMAW'97*, Ronneby, Sweden, May 1997.

[**Marcenac et al 1997**] P. MARCENAC, S. CALDERONI, R. COURDIER, S. LEMAN. « Construction expérimentale d'un modèle multi-agents », *Actes des 5èmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents*, Hermès, 1997.

[**Perrier 1992**] E. PERRIER. « SIMSURF. Simulation numérique et graphique de l'infiltration et du ruissellement sur une surface de sol. Influence du relief et des états de surface », *Document ORSTOM*, 1992.

[**Perrier 1990**] E. PERRIER. « Modélisation du fonctionnement hydrique des sols. Passage de l'échelle microscopique à l'échelle macroscopique », *SEMINFOR IV Le transfert d'échelle*, ORSTOM Editions, Brest, Septembre 1990.

[**Perrier & Cambier 1996**] E. PERRIER, Ch. CAMBIER. « Une approche multi-agents pour simuler les interactions entre acteurs hétérogènes de l'infiltration et du ruissellement d'eau sur une surface de sol », *Journées du programme Environnement, Vie et Sociétés, Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement*, Cité des Sciences et de l'Industrie, Paris, 15-17 Janvier 1996.

[**Proton et al 1997**] H. PROTON, F. BOUSQUET, Ph. REITZ. « Un outil pour observer l'organisation d'une société d'agents. Le cas d'une société d'agents chasseurs agriculteurs », *Actes des 5èmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents*, Hermès, 1997.

[**Servat 1996**] D. SERVAT. « Personnalisation de services avec des ressources limitées », *Rapport de stage de 3^{ème} année, ENST Paris*, Paris, Octobre 1996.

[**Solignac 1996**] Ch. SOLIGNAC. « Projet RIVAGE (Ruissellement et Infiltration Vu par des Agents) », *Rapport de D.E.A. I.A.R.F.A. (Intelligence Artificielle et Reconnaissance des Formes) de l'Université de Paris VI*, Paris, Septembre 1996.

[**Swarm Team 1994**] '94 Swarm Team, « An Overview of the Swarm Simulation Systems », Santa Fe Institute, 1994.

[**Toffoli & Margolus 1990**] T. TOFFOLI, N.H. MARGOLUS. « Invertible Cellular Automata : a Review », *Cellular Automata, Theory and Experiment*, H. Gutowitz (Eds) MIT/North-Holland, p229-253, Amsterdam, 1990.

[**Treuil et al 1997**] J.P. TREUIL, E. PERRIER, Ch. CAMBIER. « Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques », *Actes des 5èmes Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-agents*, Hermès, 1997.

Annexes

1. Détail des illustrations

Nous donnons ici les détails des illustrations évoquées dans le corps du rapport.

1.1. Emergence de groupes

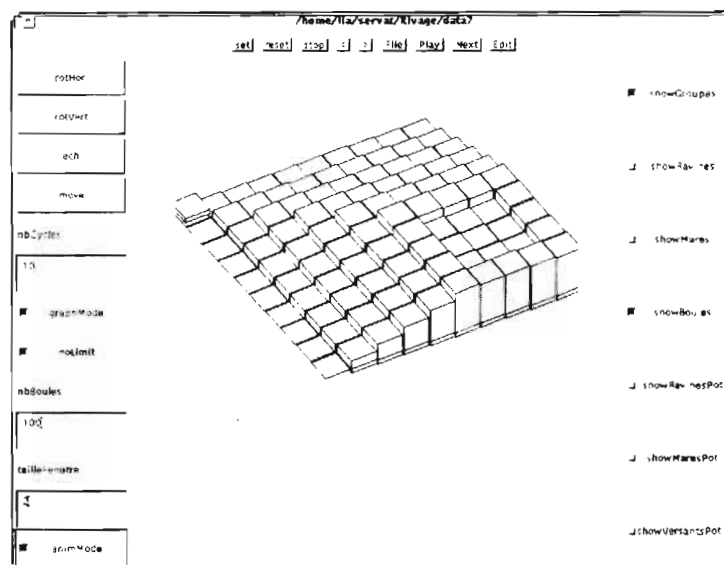


Figure 1.a. La surface d'étude à l'instant initial. La topographie est représentée de façon discrète, par des cubes ou cellules de couleur blanche.

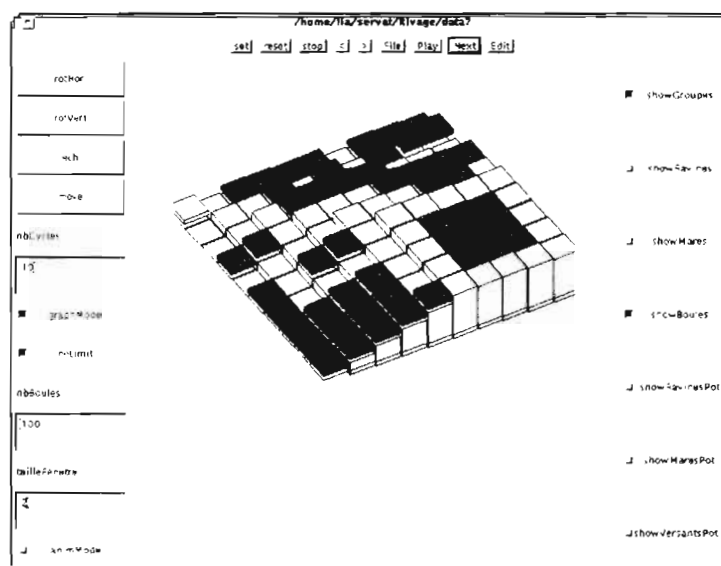


Figure 1.b. Cycle 1 : début de la pluie, 100 boules par cycle. Les cellules porteuses de boule d'eau apparaissent en bleu clair sur l'image de l'environnement.

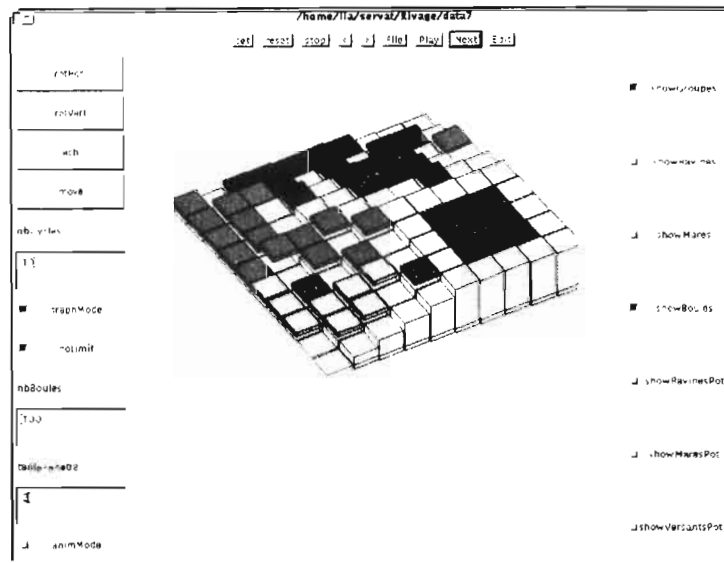


Figure 1.c. Cycle 2 : apparition de deux ravines. Il se forme deux ravines, en rouge et en jaune, sur chacun des versants. Les cellules en bleu clair situées en bas à droite de l'image préfigurent l'apparition d'une mare, car elles sont coupées du reste de la surface et ne pourront donc pas se débarrasser de leur boule d'eau.

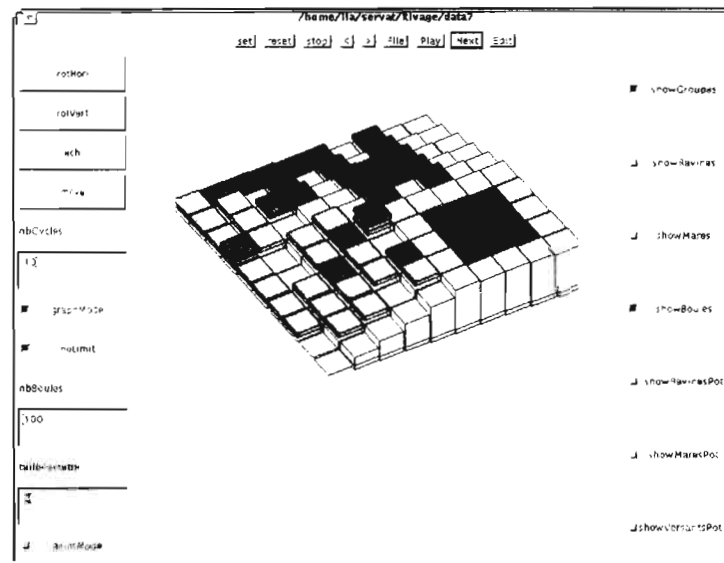


Figure 1.d. Cycle 3 : apparition d'une mare. Les deux ravines précédentes se développent, et les cellules dont on parlait à la figure précédente se sont effectivement constituées en mare, en bleu foncé sur l'image.

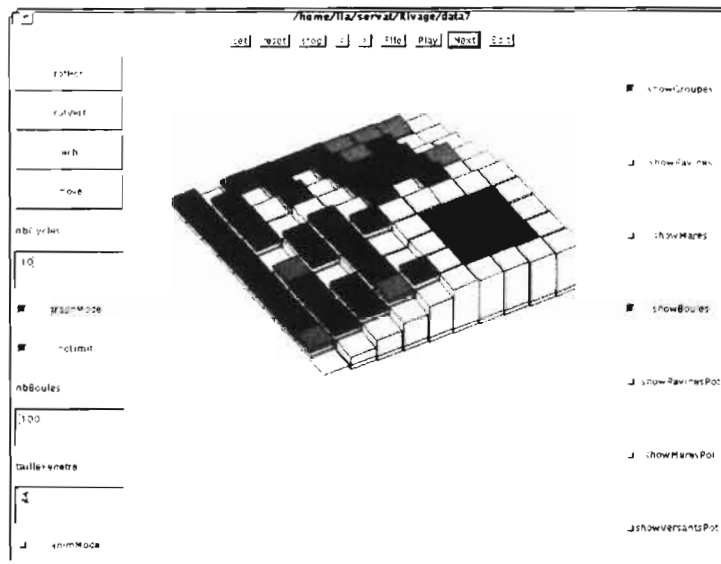


Figure 1.e. Fusion des ravines rouge et jaune précédentes. La ravine rouge s'impose. La mare, en bleu foncé, n'évolue pas.

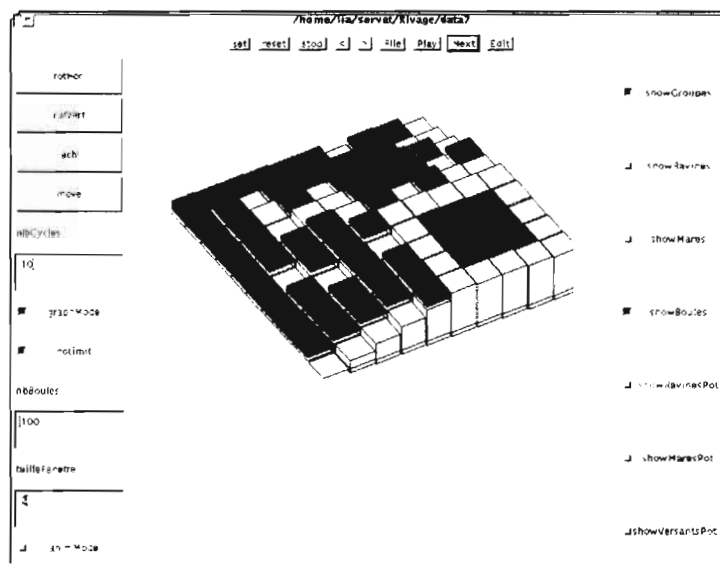


Figure 1.f. Etat final, après une dizaine de cycles. Apparition d'un embryon de ravine, en vert. Les autres groupes se sont stabilisés.

1.2. Coexistence avec des groupes posés par l'utilisateur

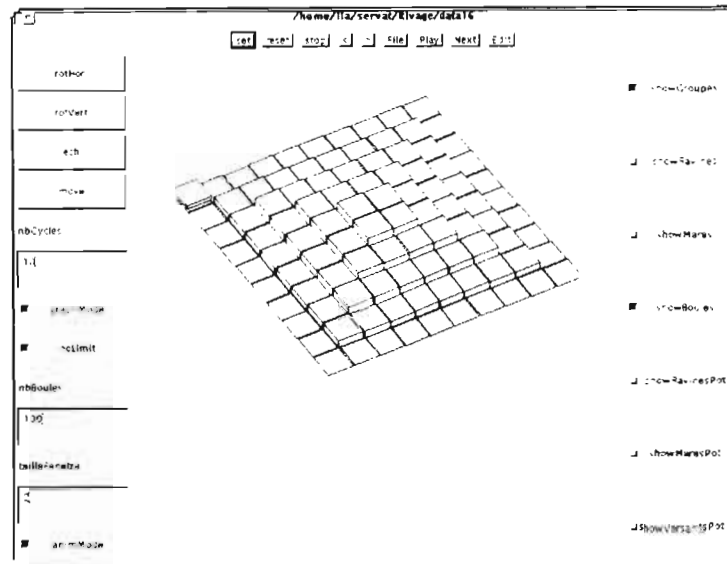


Figure 2.a. Surface d'étude à l'état initial

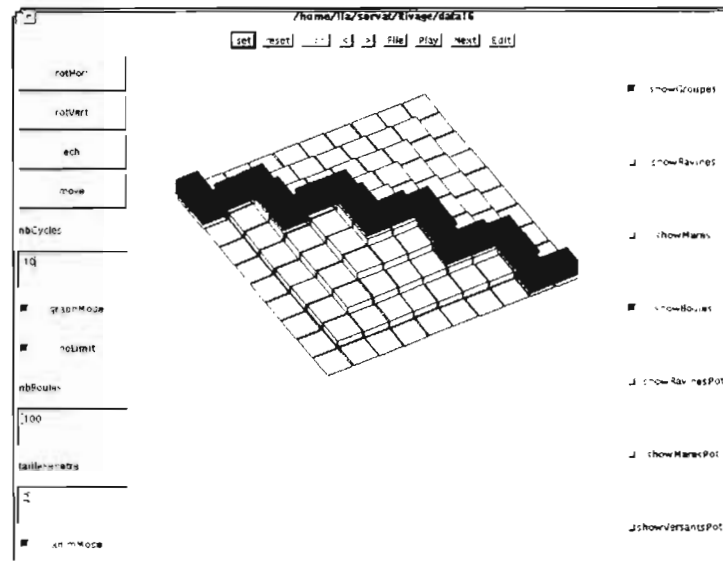


Figure 2.b. Introduction d'une ravine par l'utilisateur, en rouge sur l'image.

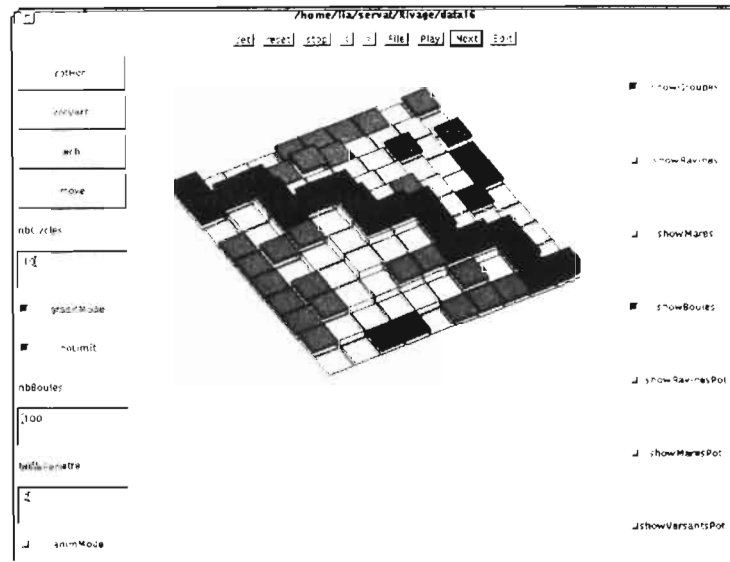


Figure 2.c. Cycle 1 de la simulation. La pluie, 100 boules par cycle, commence. Les cellules en bleu clair sont celles qui possèdent une boule d'eau à ce cycle. La ravine en rouge est intégrée à la simulation

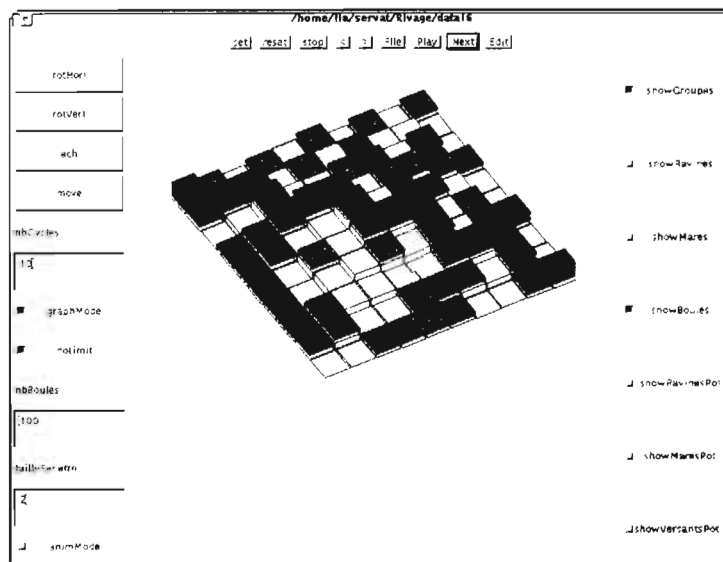


Figure 2.d. La ravine en rouge s'agrandit, et une autre ravine en jaune voit le jour sur l'autre versant

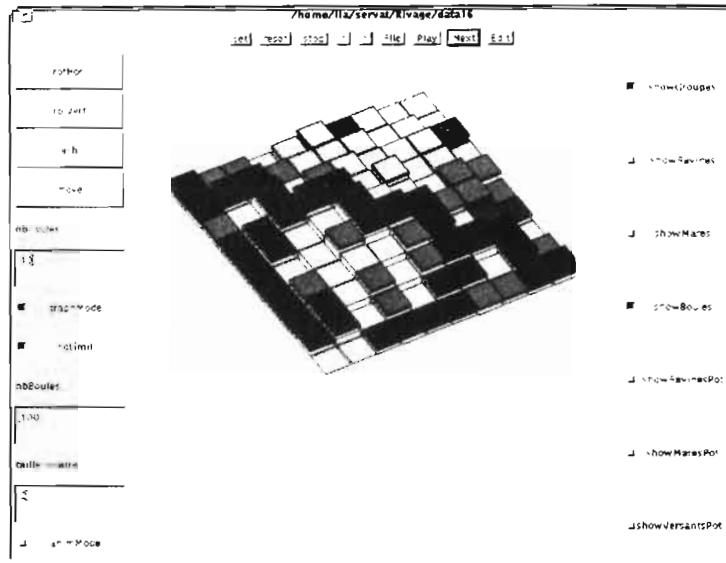


Figure 2.e. Le deuxième versant voit un conflit entre plusieurs ravines, figurées en jaune et en vert.

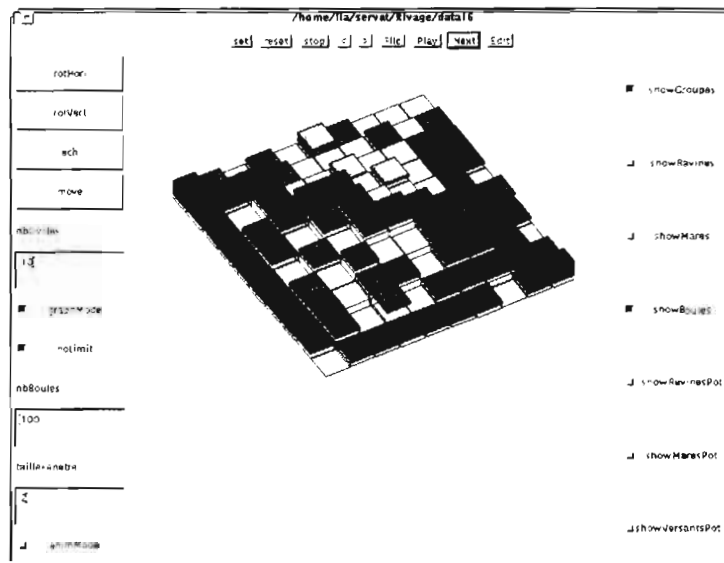


Figure 2.f. La ravine verte l'emporte sur le deuxième versant, la ravine rouge continue à se développer.

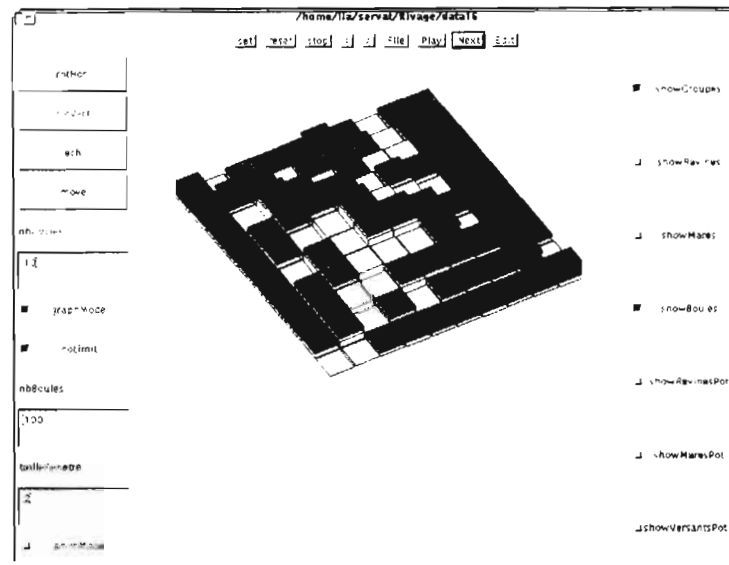


Figure 2.g. L'espace se structure définitivement en deux ravines, rouge et verte. Il reste des cellules non regroupées en bleu clair.

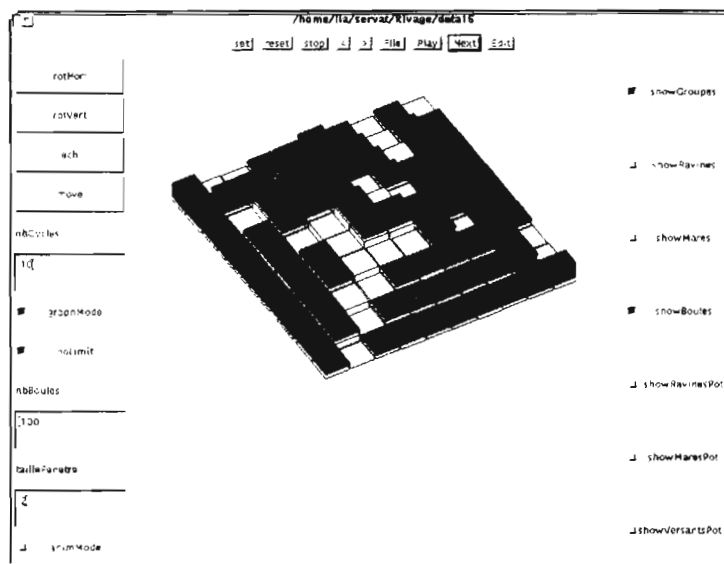


Figure 2.h. Etat final, après une dizaine de cycles. Les deux ravines, rouge et verte, divisent l'espace en deux versants.

1.3. Dissolution de groupes posés par l'utilisateur

1.3.1. Premier exemple

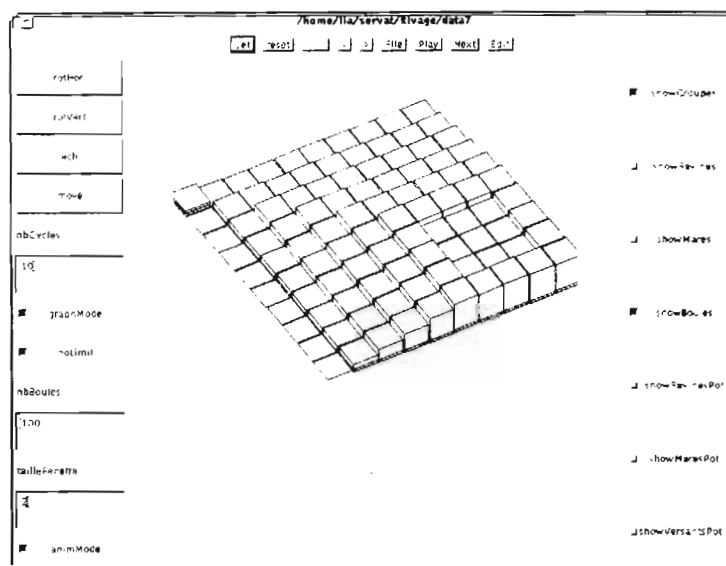


Figure 3.a. Surface d'étude à l'état initial

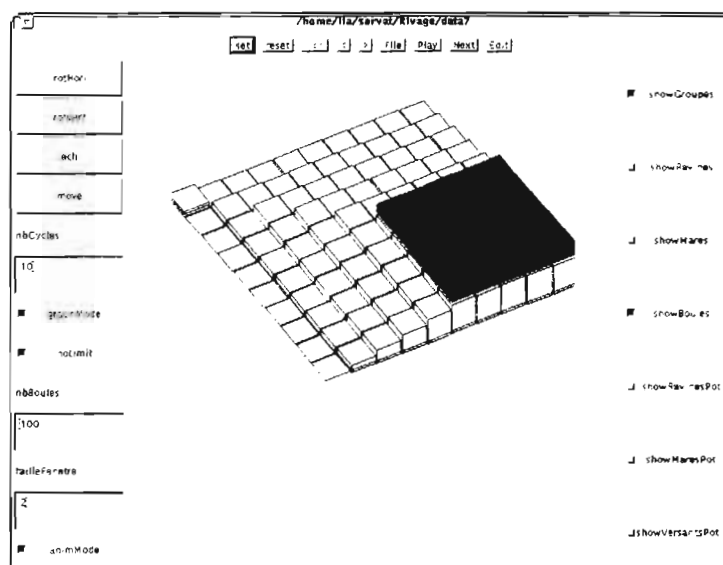


Figure 3.b. Introduction d'une mare par l'utilisateur : la mare, en bleu foncé, est manifestement trop étendue

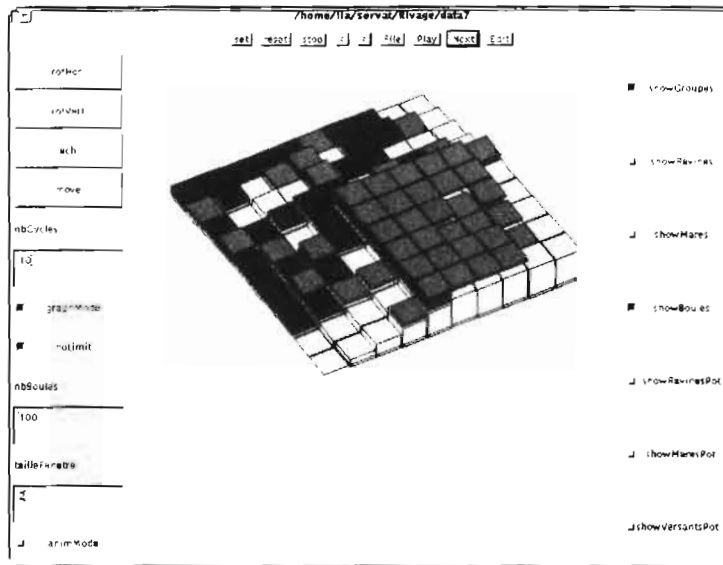


Figure 3.c. De fait la mare, en bleu foncé précédemment, se dissout et disparaît de l'espace. Elle s'est déversée sur les versants, où une ravine, en rouge, se forme. Les cellules libres de la mare dissoute apparaissent en bleu clair.

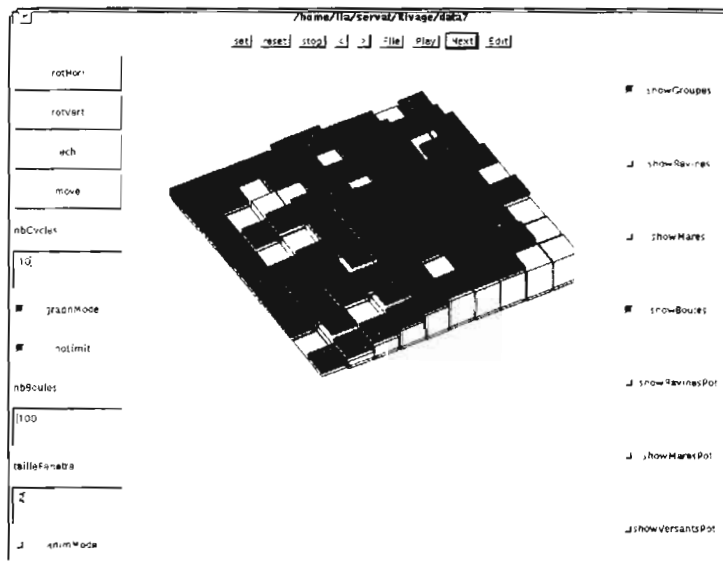


Figure 3.d. La ravine rouge se développe.

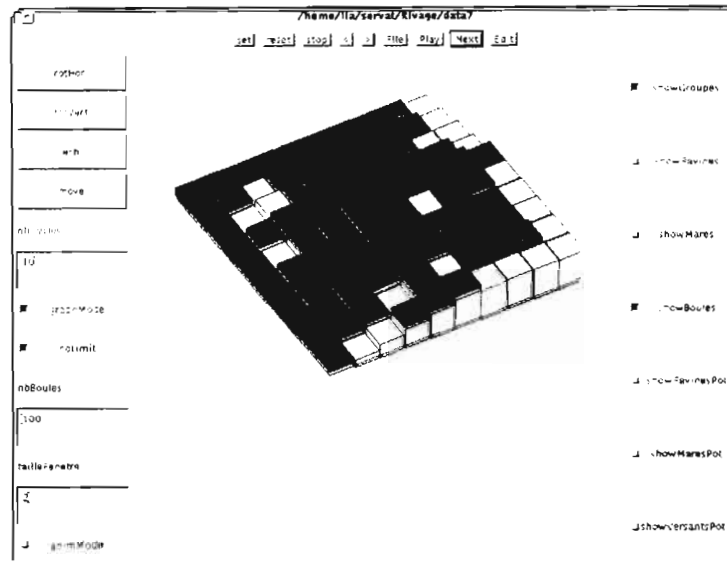


Figure 3.e. La mare, qui avait été posée de façon erronée par l'utilisateur, apparaît à nouveau, mais cette fois son existence ne fait aucun doute, en bleu foncé sur l'image. La ravine rouge n'évolue plus.

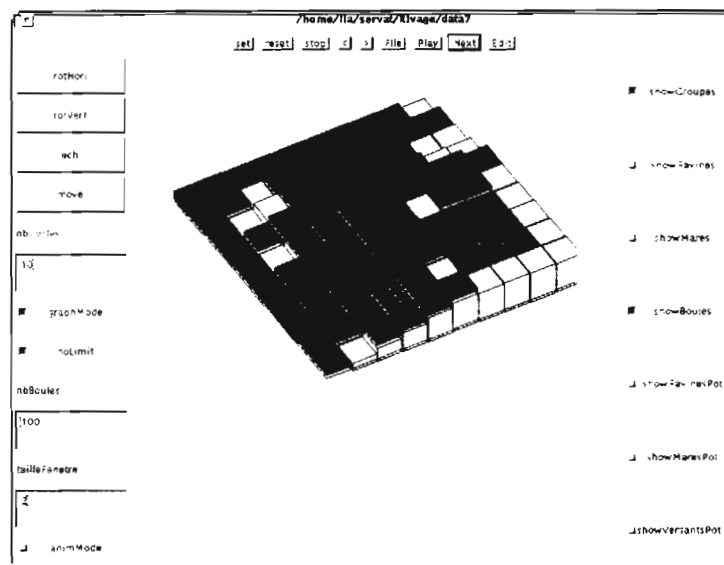


Figure 3.f. Etat final, après une dizaine de cycles : la simulation a corrigé la mare introduite par l'expérimentateur, elle figure en bleu foncé. Une ravine en rouge s'est donc formée à la suite du déversement de la mare.

1.3.2 Deuxième exemple

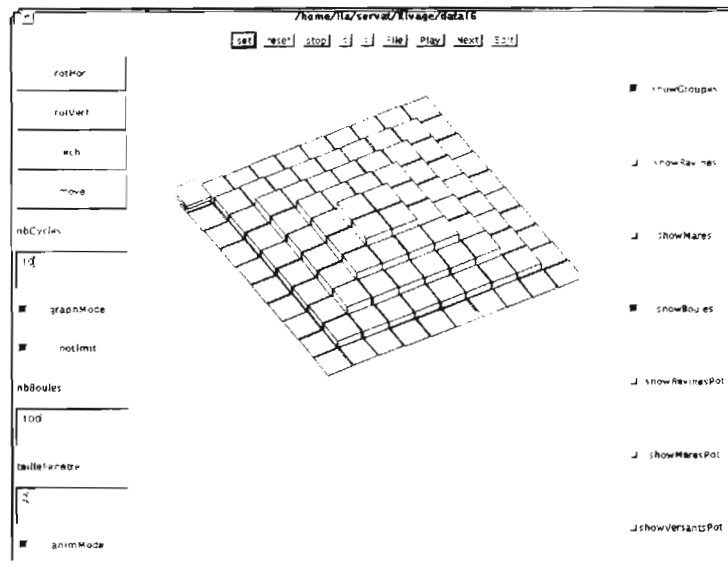


Figure 4.a. Surface d'étude à l'état initial

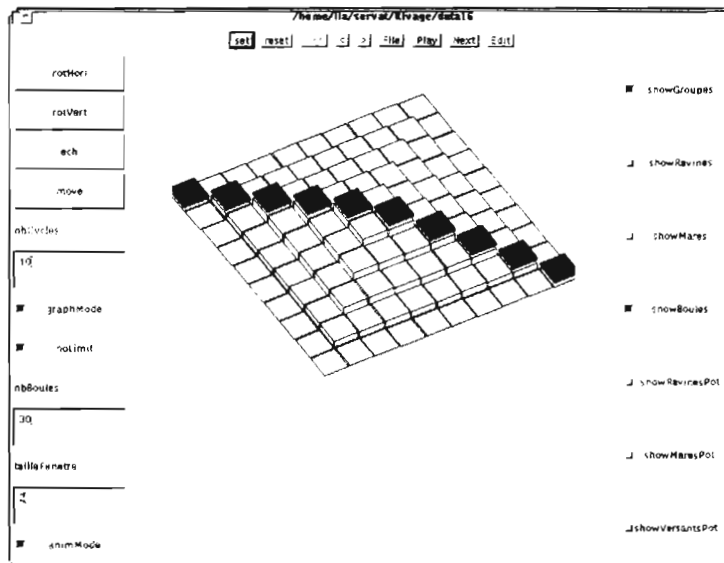


Figure 4.b. Introduction d'une ravine par l'utilisateur, en rouge.

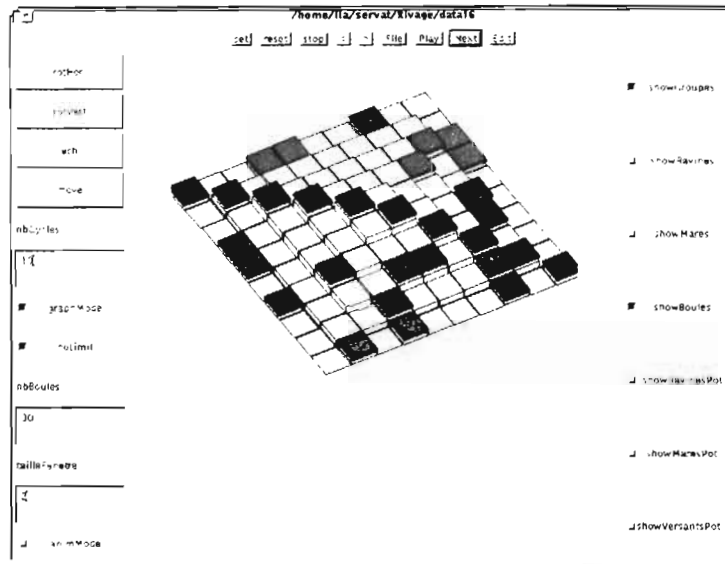


Figure 4.c. Début d'une faible pluie, seulement 30 boules par cycle, la ravine en rouge est intégrée à la simulation

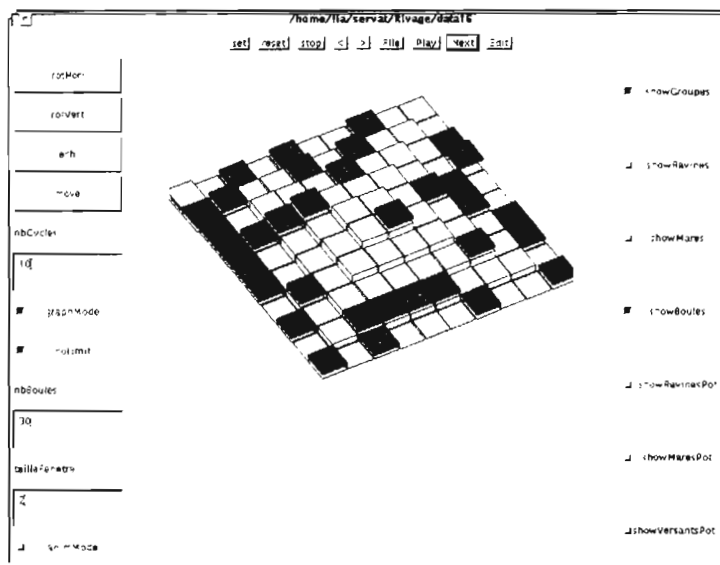


Figure 4.d. La ravine précédente, en rouge, s'assèche et se dissout partiellement. La dissolution partielle se fait aléatoirement et ne préserve pas pour l'instant la connectivité des cellules de la ravine, ce qui fait que la ravine en rouge est constituée par des cellules non connexes.

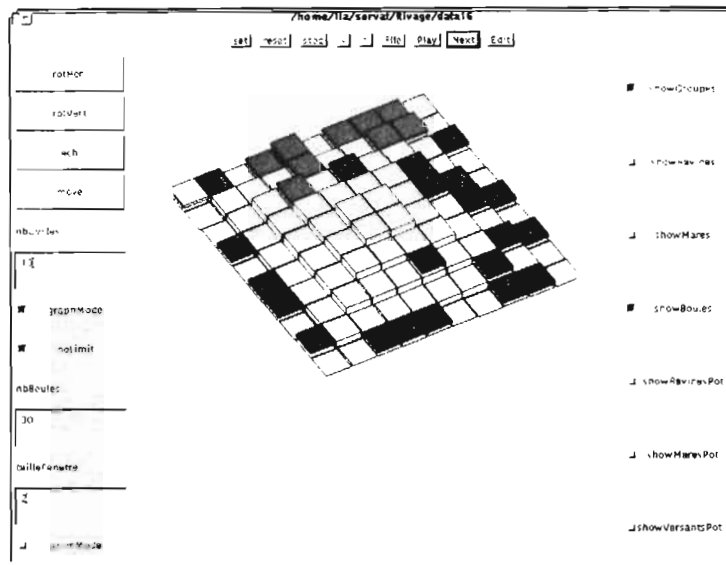


Figure 4.e. La ravine rouge précédente s'est complètement dissoute, et a disparu. Il ne reste plus que des cellules en bleu clair n'appartenant à aucun regroupement.

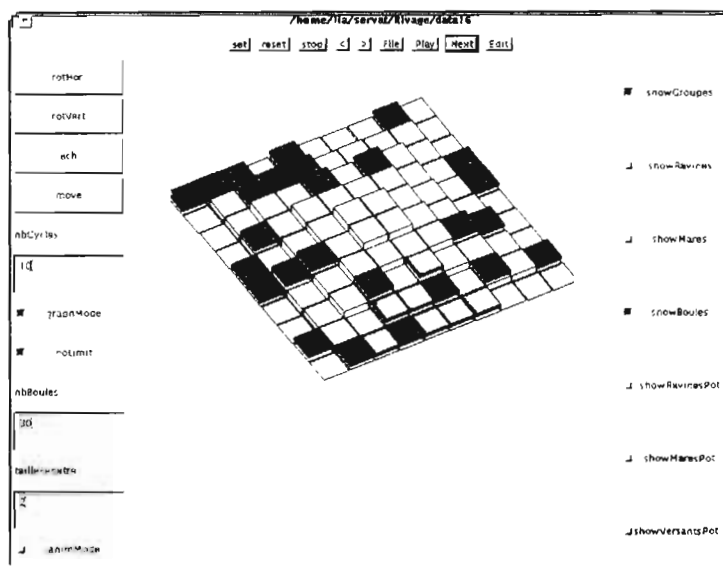


Figure 4.f. Après une dizaine de cycles, la pluie, trop faible, ne provoque l'apparition que d'un embryon de ravine en jaune sur l'image.

2 Fonctionnalités

2.1. Edition de groupes par l'utilisateur

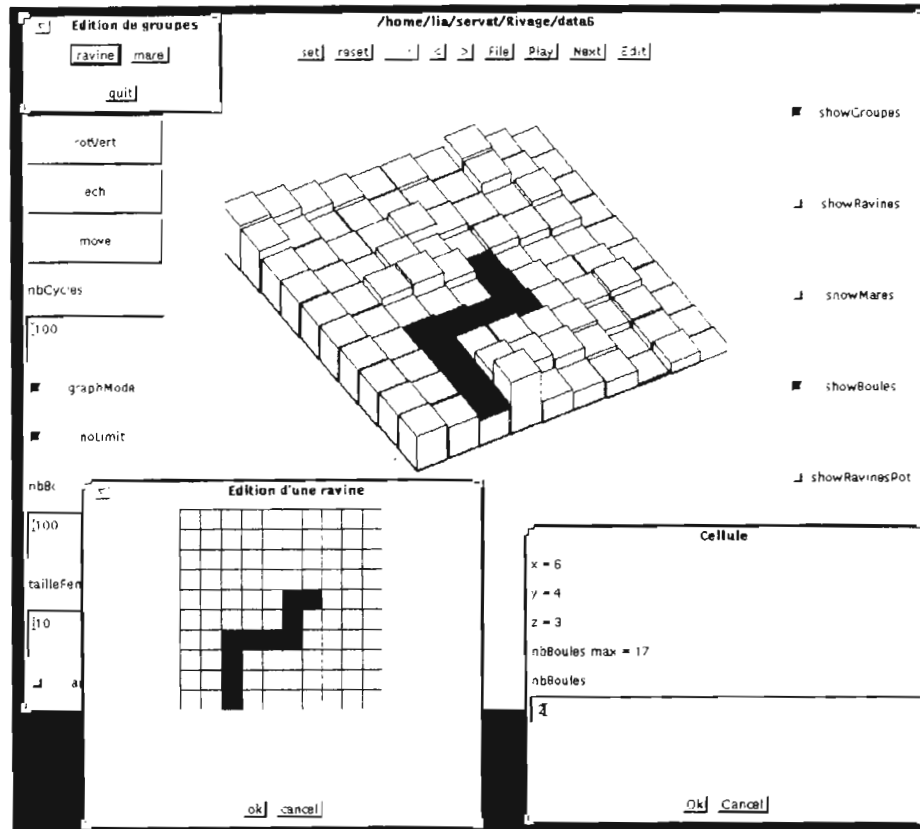


Figure 5 L'édition de groupes se fait à l'aide de plusieurs fenêtres qui permettent de suivre interactivement la mise en place du groupe dans l'environnement. Pour l'instant l'interface reste rudimentaire. Ici, l'utilisateur saisit une ravine en rouge à l'écran. L'utilisateur clique sur la vision en plan de l'espace, puis saisit le nombre de boules qu'il veut intégrer à la ravine.

2.2. Outils de visualisation

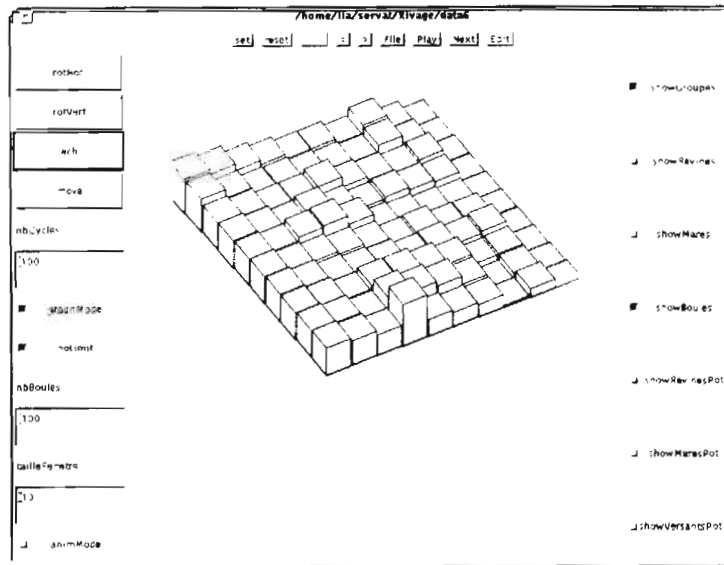


Figure 6.a. Plusieurs outils permettent d'améliorer la vision de l'espace étudié

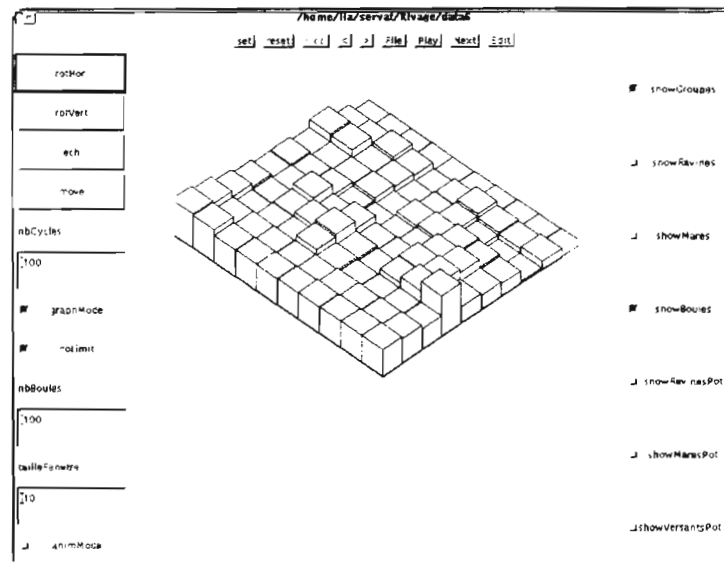


Figure 6.b. On peut opérer des rotations...

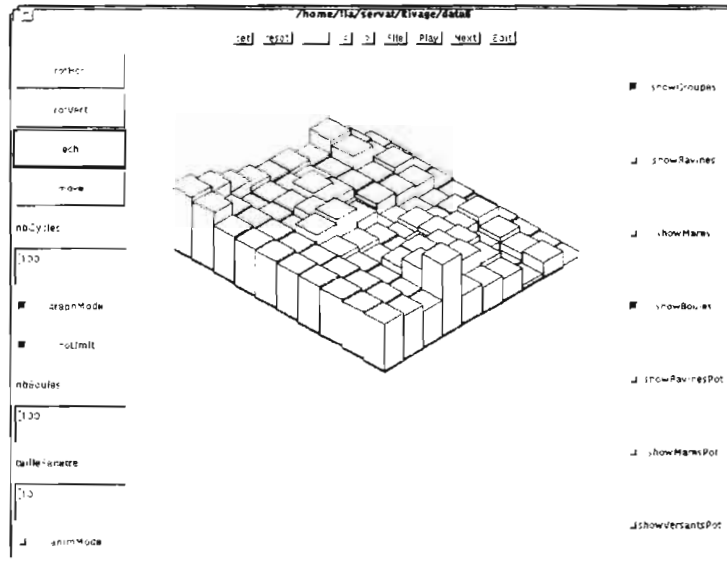


Figure 6.c. ...Et des changements d'échelle pour accentuer la perception du relief.

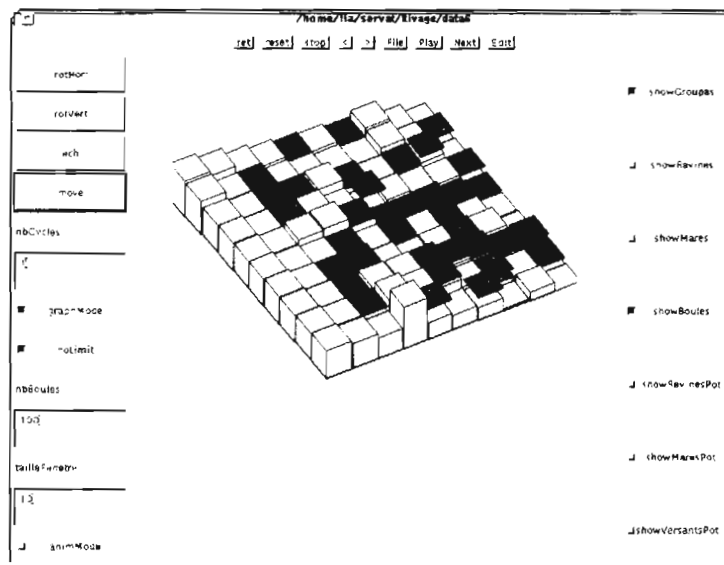


Figure 6.d. Une fonction de zoom à la souris permet d'agrandir une partie de la zone d'étude

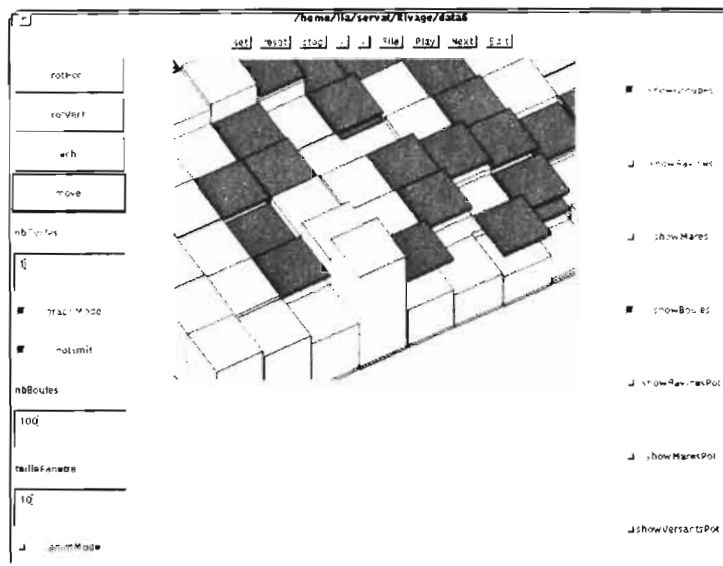


Figure 6.e. Résultat du zoom. Un historique des zooms successifs permet un retour en arrière pas à pas

3 Gestion des paramètres

La plupart des paramètres sont accessibles ou devraient l'être sous peu dans l'interface. En particulier, l'importance de la pluie, en nombre de boules par cycle, la taille de la fenêtre de l'historique des cellules et le nombre de cycles de simulation. On peut soit lancer la simulation pendant n cycles et suivre l'animation ensuite, ou suivre pas à pas l'évolution du système.

La taille de la fenêtre permet de faire varier la rapidité avec laquelle apparaîtront des groupes. Une grande fenêtre temporelle exige un haut degré de similarité entre cellules pour la formation de groupes : il ne suffit pas qu'une cellule ait été mare potentielle pendant un petit nombre de cycles...

Il faudrait pouvoir introduire des scénarios de variation de pluie. Pour l'instant, on ne peut que changer les paramètres au cours de la simulation, mais on ne peut pas introduire une variation programmée du niveau de précipitations.

Par ailleurs, on peut indiquer ce que l'on veut observer : groupe, mare, ravine, boules ou cellules appartenant aux catégories mares potentielles, ravines potentielles, ou versants potentiels. Ceci de façon à pouvoir alléger l'espace de visualisation et mettre en relief les phénomènes que l'on veut observer.