



THÈSE

Présentée pour l'obtention du titre de :
Docteur de l'Université de Paris 6
Spécialité : *Informatique*

MODÉLISATION DE DYNAMIQUES DE FLUX PAR AGENTS.
Application aux processus de ruissellement, infiltration et
érosion.

par

David SERVAT

Soutenue le 27 novembre 2000 devant le jury composé de :

P. Davy	DR CNRS Univ. Rennes	Rapporteur
S. Moss	Prof. Univ. Manchester (GB)	Rapporteur
M. Amara	Prof. Univ. Pau	Examineur
E. Perrier	CR IRD Bondy	Examineur
J-F. Perrot	Prof. Univ. Paris 6	Examineur
O. Shehory	PhD IBM (Israël)	Examineur
C. Valentin	DR IRD Bondy,	Examineur
A. Drogoul	MdC Univ. Paris 6	Directeur

MODÉLISATION DE DYNAMIQUES DE FLUX PAR AGENTS.

**Application aux processus de ruissellement, infiltration et
érosion.**

David SERVAT

REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à Alexis Drogoul, Edith Perrier et Jean-Pierre Treuil qui m'ont donné la chance de travailler sur un sujet passionnant et m'ont guidé tout au long de cette thèse. Depuis l'époque de mon DEA, je me suis senti encadré et porté par trois personnes avec qui j'ai eu un immense plaisir à discuter, argumenter et clarifier mes idées, et qui ont su toujours me communiquer un élan d'enthousiasme nécessaire pour repartir de l'avant dans les moments difficiles.

Je tiens également à remercier Philippe Davy et Scott Moss pour avoir accepté d'endosser le rôle de rapporteurs et témoigner par leur expertise respective des différents aspects du travail de modélisation que j'ai réalisé. Je suis heureux que mon travail ait suscité l'intérêt de personnes travaillant dans des domaines aussi divers que les mathématiques, l'informatique et l'hydro-pédologie et je remercie Mohamed Amara, Jean-François Perrot, Onn Shehory et Christian Valentin qui ont accepté de juger ce travail.

J'ai connu pendant plus de trois ans l'ambiance chaleureuse du Laboratoire d'Informatique Appliquée de l'IRD Bondy. C'est un lieu de travail où se côtoient différentes disciplines, différentes approches de modélisation, un lieu d'échanges et de rencontres, au sein duquel j'ai pu découvrir et apprécier le monde de la recherche. Je souhaite remercier toute l'équipe pour son accueil. Je comprends pourquoi tant d'étudiants de passage au LIA aiment à revenir régulièrement ici. Au terme de ce travail, je ressens moi-même déjà une certaine nostalgie de ces années passées.

Je voudrais dire à Joël Léonard combien je le suis redevable. J'ai trouvé au quotidien un interlocuteur enthousiaste et critique, disponible et toujours heureux de rendre service. Je pense que je ne pouvais rêver meilleur co-locataire. Un grand merci également à Jean-François Delerue avec qui j'ai partagé les joies de l'installation et l'utilisation de l'environnement OpenDX.

Je ne voudrais pas oublier l'équipe MIRIAD du LIP6 et ses membres adoptés. J'ai trouvé des oreilles attentives toujours curieuses de mon travail, que j'ai bien souvent sollicitées de façon tout à fait égoïste, qu'elles en soient remerciées aujourd'hui.

Je n'aurais sans doute pas entrepris ce périple sans le soutien et les échanges réguliers que j'ai eus avec Frédéric Kaplan et Sébastien Picault, depuis nos premiers enthousiasmes aux cours d'IA de l'ENST, nos soirées lanionnaises et "édeniques", et les parcours d'obstacles répétés des inscriptions administratives.

Je souhaite remercier mes parents qui, en m'insufflant le goût d'apprendre, m'ont fait un inestimable cadeau. Je suis peut-être au terme de mes études mais je serai toujours étudiant grâce à eux.

Enfin c'est grâce à toi, Manue, que j'ai connu pendant toutes ces années soutien et amour sans lesquels tout ceci n'aurait aucun sens. Merci pour tout.

RÉSUMÉ

L'étude de dynamiques de flux est une question centrale dans la modélisation des milieux naturels, physiques et sociaux. Ce travail de thèse expose une recherche méthodologique et pratique sur la modélisation informatique de telles dynamiques à l'aide de systèmes multi-agents.

L'idée centrale consiste à décrire de tels processus en termes d'agents hétérogènes interagissant dans un espace continu, l'introduction de couplages entre différents processus s'interprétant comme l'identification de règles d'interaction entre ces agents. En dotant les agents de moyens de reconnaissance de situations d'interaction remarquables, des mécanismes génériques ont été mis au point d'agentification des modes d'organisation qui émergent en cours de simulation. Ces idées se sont concrétisées dans une thématique particulière d'étude de dynamiques de flux : les processus de ruissellement, d'infiltration et d'érosion en hydrologie, à travers la construction du simulateur RIVAGE.

Ce travail dans le domaine de l'hydrologie montre que le choix d'une description particulière pour la dynamique de circulation de l'eau, sous la forme d'entités en mouvement dans un espace continu, présente certaines qualités : possibilité de conduire des analyses de trajectoires individuelles, souplesse de gestion de conditions aux limites complexes, ouverture à la prise en compte de différentes situations de couplages entre processus, prise en compte de différents niveaux d'agrégation de ces dynamiques.

Des pistes de transposition à d'autres thématiques ont pu être identifiées, notamment la modélisation de dynamiques de foules et la représentation spatiale et hiérarchique de flux d'information.

Enfin, ce travail a montré que les systèmes multi-agents, en fédérant approches particulières et individus-centrées, constituent dans ce cadre un outil de fond tout à fait intéressant. En mettant en avant un certain nombre de concepts clés, comme interaction, groupe et organisation, les systèmes multi-agents proposent un cadre de conception sur lequel peut s'appuyer la construction de modèles informatiques qui deviennent des outils d'analyse et d'interprétation de systèmes complexes.

ABSTRACT

The modelling of various natural and physical systems share a common interest in the study of flow dynamics. An account of a methodological research is presented which aims at applying agent-based systems to model such dynamics.

This approach rests upon a description of flows in terms of heterogeneous agents that interact in a continuous space, and whose various laws of interaction enable to account for the coupling of concurrent processes. By granting agents a capacity to recognize some remarkable situations of interaction, generic solutions have been developed to agentify the organizational modes that emerge during the course of simulations. This research has led to the development of the RIVAGE simulator of runoff, infiltration and erosion processes in the field of hydrological modelling.

This work puts emphasis on the properties that such an agent-based description of water flows show regarding the study of individual trajectories, the management of complex boundary conditions, the account of different situations of coupling between processes and the analysis of dynamics at different levels of aggregation.

Attempts have been made to apply the models developed in the field of hydrology to other domains of research, namely the modelling of crowd dynamics and the spatial organisation of information flows representation.

In the light of this research, agent-based systems turn out to be a valuable and relevant framework which federates particle-based and individual-based modelling. By putting forward such concepts as interaction, group and organisation, multi-agent systems offer some keys to the development of models which provide computational means to help the analysis of complex systems.

Table des matières

1	Modélisation, simulation et recherche en informatique.	1
1.1	Modélisation et simulation numérique.	2
1.1.1	Notion de modèle et processus de modélisation.	2
1.1.2	La simulation numérique : un mal nécessaire.	2
1.1.3	Modélisation exploratoire par simulations.	4
1.2	Recherche en informatique et modélisation.	5
1.2.1	Abstraction de modèles.	6
1.2.2	De la simulation à la programmation orientée objet.	7
1.2.3	Organisation, nouveau paradigme de programmation.	9
1.3	Enjeux d'une recherche en informatique sur la modélisation.	9
2	Modélisation de dynamiques de flux et systèmes multi-agents.	11
2.1	Modélisation de dynamiques de flux.	12
2.1.1	Le projet de recherche GEODES.	12
2.1.2	Des questions thématiques autour de dynamiques de flux.	13
2.1.3	Des choix méthodologiques de modélisation.	16
2.2	Les systèmes multi-agents.	17
2.2.1	Introduction.	17
2.2.2	Exploration de modes d'organisation.	18
2.2.3	Questions de recherche ouvertes	19
2.3	Démarche et objectifs de la thèse.	21
3	Application aux processus hydrologiques.	23
3.1	Contexte de recherche en hydrologie.	24
3.2	La dynamique du ruissellement.	25

3.3	Couplage avec d'autres modèles.	27
3.4	Autres pistes de modélisation.	28
3.5	Prise en compte de différents niveaux d'agrégation.	29
3.6	Plan de l'exposé.	31
4	Modélisation du ruissellement.	33
4.1	Construction du modèle.	34
4.1.1	Premiers éléments.	34
4.1.2	Mouvement des agents boules d'eau.	35
4.1.3	Le modèle.	38
4.1.4	Quelques points techniques.	39
4.1.5	Premières vérifications.	40
4.2	Analyse de sensibilité.	44
4.2.1	Paramètres du modèle.	44
4.2.2	Ruissellement sur des surfaces paramétrées.	46
4.2.3	Synthèse.	52
4.3	Comparaison avec un modèle EDP.	53
4.3.1	Le modèle analytique.	53
4.3.2	Cadre des simulations.	54
4.3.3	Résultats.	56
4.3.4	Synthèse.	60
4.4	Temps de transfert.	61
5	Interaction avec d'autres modèles.	65
5.1	Problématique générale.	66
5.2	Conditions aux limites complexes.	67
5.2.1	Principes.	67
5.2.2	Régulation de crue par barrage.	69
5.2.3	Discussion.	73
5.3	Infiltration sur une zone de sol.	75
5.3.1	Modèle.	75
5.3.2	Comparaison à des données expérimentales.	78
5.4	Infiltration dans des macropores.	80

5.4.1	Modèle.	80
5.4.2	Expériences.	81
6	Simulation exploratoire des processus d'érosion.	85
6.1	Elaboration d'un modèle.	86
6.1.1	Description des processus dans leur contexte naturel.	86
6.1.2	Modèle.	87
6.2	Expériences.	91
7	Appréhender une dynamique à différents niveaux d'agrégation.	95
7.1	Reconnaissance et agentification de modes d'organisation émergents.	96
7.1.1	Principes.	96
7.1.2	Regroupement d'agents et création d'agents groupes.	100
7.1.3	Algorithme.	100
7.1.4	Exemple.	101
7.1.5	Paramètres du modèle.	103
7.2	Enjeux pour l'explicitation de dynamiques.	104
7.2.1	Des niveaux intermédiaires de description.	104
7.2.2	Des indicateurs de suivi de dynamiques.	107
7.2.3	Un rôle actif dans les dynamiques simulées.	111
8	Transposition à d'autres contextes d'application.	113
8.1	Application à la dynamique de foules.	114
8.1.1	Des modèles hydrodynamiques pour la modélisation de foules.	114
8.1.2	Exemples d'application de RIVAGE.	114
8.2	Représentation de flux d'information.	121
8.2.1	Des systèmes multi-agents pour la visualisation de systèmes complexes. .	121
8.2.2	Métaphores hydrologiques pour la structuration de flux d'information. .	122
9	Espace et organisation dans les systèmes multi-agents.	125
9.1	Représentation de l'espace.	126
9.1.1	Vers un formalisme de représentation d'objets spatiaux.	126
9.1.2	Pour une réflexion autour des modèles d'espace.	133
9.2	Modèles d'organisation d'agents.	135

9.2.1	Pistes pour un cadre de conception générique.	135
9.2.2	Méthodologie et concepts.	136
10	Conclusion.	139
10.1	Synthèse et perspectives.	140
10.2	Un courant de réflexion autour de la complexité.	142
10.3	Une voie d'étude systémique fondée sur l'auto-organisation.	143
A	Environnement de programmation.	155
A.1	Historique du simulateur RIVAGE.	155
A.2	Présentation de OpenDX.	158
A.2.1	Exemple.	158
A.2.2	Programmation modulaire.	159
A.3	Quelques points techniques.	160
A.4	Discussion.	162

Liste des figures

3.1	Vision particulière et continue du ruissellement.	26
3.2	Interception par barrage.	27
3.3	Infiltration sur des zones de sol.	28
3.4	Erosion d'une surface de sol.	29
3.5	Suivi de mares et de chemins d'eau.	30
4.1	Variations des fonctions W et ∇W utilisées pour les calculs de h et ∇h avec $\eta = 4$	37
4.2	Positions des boules d'eau sur une surface topographique et champ de hauteur d'eau correspondant. Les couleurs correspondent aux valeurs des hauteurs d'eau.	38
4.3	Positions des boules d'eau sur une surface topographique et champ de vitesse correspondant. Les couleurs sont fonction des hauteurs d'eau.	39
4.4	Estimation d'une hauteur d'eau constante de 0.5cm représentée par une distribution aléatoire uniforme de boules d'eau (fig. a. en haut à gauche). Les calculs sont réalisés avec la fonction de noyau $W(\vec{r}, \eta)$ définie par l'équation 4.7, pour des valeurs croissantes du rayon de sondage η . La convergence vers $h = 0.5\text{cm}$ est obtenue pour $\eta \geq 1\text{cm}$ (à droite fig. b). La fonction de noyau pour la valeur $\eta = 1\text{cm}$ est figurée en bas à gauche (fig. c).	41
4.5	Etablissement d'un régime permanent sur un plan incliné de pente $\theta = 0.01$, soumis à un flux amont de débit $Q = 0.8\text{cm}^2/\text{s}$. Les histogrammes des vitesses et hauteurs d'eau des particules aux deux instants $t = 11\text{s}$ et $t = 28\text{s}$ sont placés en regard de l'image des positions des particules à ces deux instants. Les résultats montrent une convergence vers les valeurs attendues $\bar{h} = 0.22\text{cm}$ et $\bar{v} = 3.6\text{cm}/\text{s}$ sur l'ensemble de la population de boules d'eau.	43
4.6	Surface topographique de type X : $A \cos(\frac{2\pi x}{\lambda}) + \theta y$, avec $A = 2\text{cm}$, $\lambda = 30\text{cm}$, $\theta = 0.1$	47

4.7	Résultats de simulation au bout de 400s. En haut à gauche positions des boules d'eau (555 boules), en haut à droite champ de hauteur d'eau correspondant. En bas à gauche, champ des vitesses, et en bas à droite débit de sortie en mm/h (courbe bleue moyennée sur 5s) obtenu après simulation pour $r = 100mm/h$ (courbe jaune), $\eta = 3.6cm$, $\omega = 0.52cm^3cm$, $\Delta t = 1s$. Le régime permanent est atteint dès 100s. Les couleurs du champ de hauteurs d'eau sont une interpolation des valeurs calculées sur un maillage ; pour réduire les discontinuités de couleur, il faudrait augmenter la résolution du maillage sur lequel est évalué ce champ.	48
4.8	Débits de sortie en mm/h pour $\phi = 0.6cm$ (en rouge) et $\phi = 1.1cm$ (en bleu). Les courbes montrent une même convergence, elles se superposent même exactement (couleur mauve) au début de la simulation. Les fluctuations sont par contre réduites pour ϕ le plus faible.	49
4.9	Surface topographique de type Y : $A \cos(\pi + \frac{2\pi y}{\lambda}) + \theta y$, avec $A = 2cm$, $\lambda = 30cm$, $\theta = 0.1$	51
4.10	Débits de sortie en mm/h pour le cas de la surface de type Y, présentant des sillons perpendiculaires à la pente. On peut noter le temps supérieur à 2min, nécessaire pour atteindre le bas de la surface, après remplissage des sillons successifs. Les fluctuations sont dues au choix d'un pas de temps un peu grand.	51
4.11	Remplissage successif des sillons (en haut au bout d'une minute, en bas au bout de 2 minutes). Les discontinuités de couleur s'estompent avec une plus grande résolution en nombre de boules et un maillage plus fin sur lequel le champ continu de hauteur d'eau est calculé.	52
4.12	Surface topographique utilisée pour la comparaison avec le modèle de St-Venant.	54
4.13	Champ des hauteurs d'eau obtenu en fin de simulation ($t = 400s$) par le modèle de référence de St-Venant (à gauche) et avec RIVAGE (à droite). Paramètres synthétiques ($\alpha = 0.12$, $\beta = 0.8$).	56
4.14	Faisceau de courbes de débit à l'exutoire obtenu pour les meilleures simulations, la courbe "lisse" en mauve est la courbe du modèle de St-Venant, celles obtenues par RIVAGE présentent des fluctuations : en noir ($\alpha = 0.06$; $\beta = 0.7$), en vert ($\alpha = 0.09$; $\beta = 0.4$), et en rouge ($\alpha = 0.12$; $\beta = 0.3$).	57
4.15	Faisceau de courbes d'écart relatif <i>diff</i> (cf. équation 4.22) au cours du temps entre les champs de hauteur d'eau obtenus respectivement par St-Venant et RIVAGE. On observe une décroissance puis une convergence autour d'un écart relatif de 20%.	58
4.16	Evolution de l'écart relatif <i>diff</i> (cf. équation 4.22) sur le champ des hauteurs d'eau pour une simulation étendue à 1600s (quatre fois la durée initiale).	58
4.17	Evolution de l'écart relatif <i>diff</i> sur le champ des hauteurs d'eau pour $\alpha = 0.12$ et $\beta = 0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.4; 0.3$ (resp. bleu, vert, rouge, blanc, mauve, bleu ciel). L'écart diminue avec la décroissance de β	59

4.18	Evolution de l'écart relatif <i>diff</i> sur le champ des hauteurs d'eau pour $\beta = 0.8$ et $\alpha = 0.12; 0.09; 0.06$ (resp. bleu, orange, rouge). L'écart diminue avec la décroissance de α	59
4.19	Champ des vitesses obtenu en fin de simulation ($t = 400s$) par le modèle de référence de St-Venant (à gauche) et avec RIVAGE (à droite). Paramètres synthétiques : ($\alpha = 0.12; \beta = 0.3$).	60
4.20	Surfaces de $1m^2$, utilisées pour l'expérience des temps de transfert, même pente moyenne de 0.025. En haut à gauche plan "lisse", en haut à droite plan présentant une rugosité aléatoire, en bas à gauche surface avec dépressions et en bas à droite surface présentant une dépression et un chemin d'écoulement préférentiel.	61
4.21	Histogrammes des temps de transfert obtenus en fin de simulation. La disposition correspond à celle de la figure 4.20 : en haut à gauche, plan incliné, en haut à droite plan avec rugosité aléatoire, en bas à gauche surface avec dépressions et en bas à gauche surface avec dépressions et un chemin d'écoulement préférentiel.	62
4.22	Isochrones obtenus en milieu (en haut) et en fin de simulation (en bas) pour les surfaces 3 (à gauche) et 4 (à droite). Les points de couleur représentent les positions initiales des boules d'eau qui ont pu atteindre l'exutoire du domaine, les couleurs étant fonction du temps de séjour de ces boules sur la surface. En milieu de simulation, seules les boules tombées dans la partie basse des surfaces ont eu le temps d'atteindre l'exutoire, ce qui explique que seules ces régions des surfaces soient visibles.	64
5.1	Mouvements de boules d'eau contraints par un mur à deux arêtes sur plan incliné.	68
5.2	Hyétogramme de pluie (en vert) et sortie à l'exutoire (en noir). Un débit permanent s'établit puis décroît légèrement pendant le temps mis par la crue pour atteindre le barrage, enfin le débit reflète la crue avec un retard de 60s environ.	69
5.3	Champ des hauteurs d'eau avant (en haut : 0.08cm) et au passage de la crue (en bas : 0.2cm).	70
5.4	Champ de hauteur d'eau dans le cas d'une régulation par barrage. En régime de pluie simple (en haut), le barrage ralentit un peu le flux (en raison des approximations de calcul), d'où l'augmentation de la hauteur d'eau à son niveau. Au passage la crue (en bas), on peut observer la différence nette de hauteur en amont et en aval du barrage.	71
5.5	Champ de hauteur d'eau au plus fort de la crue (en haut) et positions des boules d'eau correspondantes (en bas). Les boules d'eau sont positionnées à leur altitude ($z + h$). Les discontinuités au niveau des hauteurs d'eau et les positions aberrantes des boules d'eau qui paraissent flotter en l'air proviennent des problèmes de calcul d'interpolation sur la discontinuité matérialisée par le barrage (cf. 5.2.3).	72
5.6	Courbe de sortie à l'exutoire dans le cas d'une régulation par barrage (courbe noire) et pluie (courbe verte). L'effet de la crue est beaucoup moins important que dans le cas sans barrage (figure 5.2).	73

5.7	Evolution schématique de la vitesse d'infiltration f en fonction de la profondeur du front d'humectation L . K_s est la conductivité à saturation du sol.	76
5.8	Infiltration sur des zones de sol hétérogènes. A gauche trois zones de sol de couleur différente sur lesquelles circulent des boules d'eau, la taille des boules d'eau reflète leur variation de volume sous l'action des processus d'infiltration. A droite, on a représenté l'évolution des vitesses d'infiltration sur les trois zones avec des couleurs correspondantes.	77
5.9	Parcelle d'étude de $1m^2$	78
5.10	Comparaison des courbes d'évolution du débit à l'exutoire (en rouge données expérimentales, en orange simulée) et de l'infiltration (en bleu données, en bleu ciel simulée) sur un épisode pluvieux complexe (en vert). Les courbes simulées reproduisent les courbes expérimentales avec quelques fluctuations. On peut noter le temps mis pour que l'eau commence à ruisseler : $5min$ (time to ponding).	79
5.11	Evolution du flux estimé dans un macropore situé au centre d'un plan incliné soumis à une pluie constante. Les courbes montrent différents résultats suivant un diamètre de boule d'eau décroissant $\phi = 1.3cm$ (rouge) ; $1.0cm$ (vert) ; $0.8cm$ (bleu) : on peut observer une réduction des fluctuations avec la décroissance de ϕ autour d'une valeur moyenne inférieure à $0.15cm^3/s$, soit un écart relatif de 20% avec la valeur attendue.	82
6.1	Evolution d'une surface topographique (plan incliné) soumise aux processus d'érosion	89
6.2	Couplage érosion-infiltration. La surface est constituée de trois zones de sol hétérogènes, en vert, jaune et rouge dans l'ordre décroissant de leur capacité d'infiltration. A gauche, initiation du ruissellement sur la zone verte, la moins infiltrante, qui se sature plus vite. Au milieu, la zone jaune reçoit les écoulements amont et commence à se saturer elle aussi, pendant que dans le même temps les zones se morcellent, rendues localement imperméables par le tassement dû au splash (zones en noir). A droite la zone rouge en infiltrant presque toute l'eau sur sa surface, est la moins protégée du splash, elle devient majoritairement imperméable.	90
6.3	Plan incliné de pente 0.1 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s (rouge).	91
6.4	Plan incliné de pente 0.05 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s	92
6.5	Plan incliné de pente 0.01 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s	92

6.6	Quantités de sédiment à l'exutoire (splash et érosion linéaire sommés) pour une pente variable : en rouge 0.1, en vert 0.05 et en bleu 0.01. Il semble qu'ici l'augmentation de la pente procure d'abord une augmentation de l'érosion, assez logique car les vitesses sont plus fortes, puis une diminution, corrélée à celle du splash.	93
6.7	Courbes d'infiltration obtenues pour une pente variable : en rouge 0.1, en vert 0.05 et en bleu 0.01. Il semble qu'ici l'augmentation de la pente procure d'abord une diminution de l'infiltration, car l'eau stagne moins sur la surface, puis une augmentation, corrélée à celle de l'érosion linéaire qui compense l'effet limitant du splash.	94
7.1	A gauche on a figuré les positions des boules d'eau au cours du ruissellement. A droite, on a isolé les trajectoires des boules d'eau le long d'un chemin préférentiel exhibé par la topographie et dans une dépression. Les trajectoires représentent les chemins suivis sur quelques pas de temps.	97
7.2	On a isolé deux ensembles de boules d'eau présentant des trajectoires différentes (à gauche), et on a représenté à droite ces mêmes boules d'eau avec une couleur reflétant leur indicateur de trajectoire I . Les valeurs les plus élevées sont atteintes au niveau de la dépression et les valeurs les plus faibles, proche de 0 le long du chemin d'eau. C'est sur la base de cet indicateur et de son interpolation locale J que les boules d'eau vont former des regroupements de proche en proche.	99
7.3	Image 1 : trois ravines dans des tons de bleu et vert (sphères) et une petite mare (cubes rouge). Les boules d'eau non regroupées ne sont pas représentées. Image 2 : les deux petites ravines ont fusionné (à droite), l'autre (à gauche) s'étend. La mare n'a pas trop évolué. Image 3 : de nouvelles mares apparaissent. Les deux ravines s'étendent. Image 4 : la mare la plus important (à droite) déborde à l'exutoire. Image 5 : un train de boules venant de la ravine de gauche se fraye un chemin vers celle de droite, annonçant une prochaine fusion. Image 6 : la fusion est effective, mais elle n'est que partielle, certaines boules (en vert) ayant été isolées des autres lors de l'actualisation des groupes.	102
7.4	Surfaces présentant différentes configuration de dépressions.	104
7.5	Image 1 : formation de 16 mares (cubes dans des tons de rouge au vert). Image 2 : les mares grossissent et débordent des petites dépressions de la topographie. Image 3 : les 16 mares fusionnent en 4 mares de taille moyenne. Image 4 : les 4 nouvelles mares s'étendent et recouvrent entièrement les cuvettes de la topographie.	105
7.6	Image 1 : formation de 16 petites mares. Image 2 : les 16 petites mares débordent tandis que 4 mares de taille moyenne se forment. Image 3 : toutes les dépressions sont maintenant remplies par les différentes mares. Image 4 : fusion en cours des petites mares.	106
7.7	Schéma de lecture des indicateurs de suivi des groupes. En abscisse : numéro et temps. En ordonnée : effectif des groupes. Chaque groupe est représenté par une courbe dont la couleur dépend du groupe.	108

7.8	Suivi des mares qui se sont formées dans l'expérience de la figure 7.5. La figure représente les courbes d'évolution dans le temps des effectifs de chaque mare. Un des axes représente le numéro de chaque mare : ce numéro est repris dans les couleurs attribuées à chaque courbe. Un deuxième axe, gradué de 0 à 150, figure le temps. Le troisième axe, gradué de 0 à 250, représente le nombre de boules d'eau dans chaque mare. On observe 16 courbes correspondant aux 16 mares qui se forment au départ. Les effectifs de chacune de ces mares augmente au cours du temps. Puis, environ au milieu de la simulation, certaines courbes disparaissent (figure à gauche). C'est le moment de la fusion des 16 mares en 4 mares moyennes. Seules les 4 courbes du fond (tons de bleu) sont présentes à partir de ce moment : elles correspondent aux 4 mares moyennes qui sont apparues. Leurs effectifs continuent d'augmenter au cours du temps. On peut remarquer que les courbes se superposent relativement bien, ce qui montre que chaque mare a connu la même évolution au cours du temps (initiation, augmentation de l'effectif, puis dissolution éventuelle).	109
7.9	Suivi des mares qui se sont formées dans l'expérience de la figure 7.6. La figure représente les courbes d'évolution dans le temps des effectifs de chaque mare. Un des axes représente le numéro de chaque mare : ce numéro est repris dans les couleurs attribuées à chaque courbe. Un deuxième axe, gradué de 0 à 150, figure le temps. Le troisième axe, gradué de 0 à 250, représente le nombre de boules d'eau dans chaque mare. On observe 20 courbes correspondant aux 20 mares qui se sont formées dans des temps voisins. Les effectifs de chacune de ces mares augmente au cours du temps, de façon similaire. Puis, seules quelques courbes correspondant aux mares plus importantes voient leur effectif augmenter : d'une part les mares de taille moyenne (tons de bleu au fond) et les mares qui résultent de la fusion des 16 mares de taille plus petite (tons jaune et vert).	110
8.1	Deux groupes d'agents se croisent dans le passage d'un sas étroit.	116
8.2	Même situation que précédemment. Une "mare" se forme puis se résorbe (en jaune) indiquant une situation d'engorgement.	117
8.3	Image 1 : une centaine d'agents répartis en quatre groupes arrivent en même temps dans une salle complexe (à l'image de groupes de touristes effectuant une visite d'un musée). Chaque groupe d'individus est doté d'une direction souhaitée (située à l'opposé de leur point d'arrivée). Image 2 : rencontre des deux groupes venant de chaque côté. Image 3 : les piétons se bousculent. Image 4 : certains individus ont été complètement coupés de leur groupe, en particulier deux individus en bleu.	118
8.4	Utilisation des "mares" pour visualiser les situations d'engorgement. On a repris la même succession d'images que précédemment. Les individus plus gros en rouge signalent des situations de blocage dans la circulation.	119
8.5	Même séquence que précédemment, mais cette fois des "ravines" sont identifiées (flèches marron).	120
8.6	Illustration des métaphores hydrologiques pour la gestion d'un flux d'informations.	123

9.1	Distribution initiale d'agents (aléatoire uniforme sur un carré de côté 100).	127
9.2	Distribution d'agents obtenue au bout de quelques pas de temps sous la contrainte de minimisation de densité. Les agents se répartissent de façon uniforme sur l'espace à une distance inter-agents supérieure ou égale à 2η (ici 50).	127
9.3	Au-delà d'un seuil de densité $d = 0.02$, les agents se repoussent et s'attirent en-deçà de ce même seuil. Une configuration stable en cercle est obtenue au bout de quelques pas de temps. La figure montre les agents (points noirs) et le champ de densité correspondant.	128
9.4	Reproduction d'une surface topographique par une distribution d'agents. A gauche variations de la topographie, à droite champ de densité d'agents.	129
9.5	Distribution d'agents représentant la surface topographique précédente.	130
9.6	La distribution d'agents reproduit les variations de la surface topographique autour des zones comprises entre $0.9cm$ (isocourbe verte) et $1.1cm$ (isocourbe jaune).	131
9.7	Distribution d'agents figurant le logo de l'IRD.	132
9.8	Reconstruction d'un objet spatial (image du logo IRD à gauche) par un champ de densité de particules (à droite).	132
9.9	Recombinaison de zones de voronoi, entre trois "agents" (carrés et rond gris).	133
9.10	Illustration des idées exposées en 9.1.2. Objets spatiaux présents dans l'espace d'interaction (à gauche). Zones de couverture des agents médiateurs (polygones de Voronoi) (centre). Réseau d'agents médiateurs correspondant (triangulation de Delaunay, à droite).	134
9.11	Méthodologie Cassiopée.	137
A.1	Copie d'écran de la version Java de RIVAGE utilisant le package VisAD.	157
A.2	Fenêtre d'édition de programmes de OpenDX. Cette fenêtre consiste en deux palettes et d'un "canvas". Les palettes listent des catégories d'outils ou modules (à gauche) et des modules individuels (en bas à gauche). Le "canvas" est une aire permettant la création et l'édition de programmes visuels sous la forme de réseau de modules interconnectés.	159
A.3	Exemple d'image générée par le programme donné en exemple. Il s'agit du champ de densité en électron d'une molécule d'eau. Plusieurs modes permettent de contrôler la visualisation, comme ici par rotation (globe et axes).	160
A.4	Fenêtre d'édition du programme RIVAGE. On peut voir à gauche la catégorie (sélectionnée) regroupant les modules implémentés (en bas à gauche). Le programme se présente donc sous la forme de "boîtes" interconnectées, que l'on peut organiser sur plusieurs pages, et réutiliser dans d'autres applications. Chaque module possède une interface de configuration.	161

Liste des tableaux

4.1	Ruissellement sur une surface de type X pour un nombre croissant de boules d'eau : ϕ diamètre et ω volume des boules ; N nombre final de boules sur la surface ; \bar{h} et \bar{v} hauteur d'eau et vitesse moyenne en régime permanent ; t_{cpu} temps de calcul.	48
4.2	Ruissellement sur une surface de type X pour un pas de temps décroissant avec $\phi = 1.1cm$ et $\omega = 0.7cm^3$; N nombre final de particules sur la surface ; \bar{h} et \bar{v} hauteur d'eau et vitesse moyenne en régime permanent ; t_{cpu} temps de calcul.	49
4.3	Réinterprétation des résultats du tableau 4.1 en terme du rapport d_{inter}/η avec $\eta = 3.6cm$; ϕ diamètre des particules ; N nombre final de particules sur la surface ; d_{inter} distance moyenne inter-particules estimée comme $\sqrt{S/N}$, où S est l'aire de la surface ici $8100cm^2$	50
4.4	Organisation des simulations de comparaison avec le modèle de St-Venant, selon les deux rapports $\alpha = \eta/\lambda$ et $\beta = d_{inter}/\eta$. Chaque case (i, j) comporte les valeurs respectivement de η et ϕ (en cm) utilisées dans la simulation pour le couple (α_i, β_j) . Les volumes unitaires des particules correspondant sont compris entre $1.2cm^3$ pour $\phi = 1.3cm$ et $0.2cm^3$ pour $\phi = 0.7cm$	55
4.5	Synthèse des simulations. Chaque case (i, j) comporte les valeurs respectivement de : N nombre de boules d'eau final sur la surface et temps de calcul en min . Le pas de temps utilisé est dans tous les cas $\Delta t = 1s$ sauf pour la dernière ligne correspondant à une valeur de $\eta = 2cm$ pour laquelle le pas de temps est de $0.5s$. Toutes les simulations exhibent en régime permanent une hauteur d'eau moyenne d'environ $1.1mm$ pour une vitesse moyenne comprise entre $0.8 - 1cm/s$. La vitesse maximale étant par ailleurs comprise entre $2.5 - 3cm/s$	56

Avant-propos.

Mon travail de thèse s'inscrit dans une problématique de recherche en informatique pour la modélisation. Ce travail s'est déroulé au sein de deux laboratoires : le laboratoire d'informatique appliquée (LIA) de l'IRD (Institut de Recherche pour le Développement) à Bondy et le laboratoire d'informatique de l'Université de Paris 6 (LIP6), dans l'équipe du thème Objets et Agents pour les Systèmes d'Information et la Simulation (OASIS).

Depuis 1987, le LIA a cherché avec diverses unités de recherche de l'IRD à apporter des réponses mathématiques et informatiques aux questions que celles-ci lui posaient. De nombreuses expériences exploratrices à l'aide de simulation ont permis de tester des hypothèses théoriques de fonctionnement de milieux très divers : en épidémiologie [Pichon et al., 1991], en dynamique des populations [Bousquet, 1994], [LePage et Cury, 1996], [Shin et Cury, 1999] ou en sciences du sol [Perrier et al., 1995]. Ces expériences ont montré la récurrence de la question de l'interdépendance entre l'organisation géométrique et la dynamique de ces milieux, et ont fait valoir la pertinence d'un certain cadre de représentation de ces organisations et dynamiques sous la forme d'entités hétérogènes en interaction : l'étude de cette question constitue le cœur du projet de recherche de l'unité GEODES¹.

Le thème OASIS du LIP6 mène depuis de nombreuses années une recherche méthodologique et appliquée sur la construction d'architectures informatiques pour le traitement de l'information et la représentation de connaissances en résolution collective de problèmes et en simulation, en liaison avec les travaux des chercheurs des autres thèmes qui constituent le LIP6. Un axe important de cette recherche concerne les systèmes multi-agents [Drogoul, 2000] [Hutzler, 2000] [Foisel, 1998a] [Guessoum, 1996], c'est-à-dire la conception de systèmes informatiques distribués sur des entités à forte autonomie, travaillant collectivement à l'exécution d'une tâche commune. Dans cette conception, une source importante d'inspiration est fournie par des travaux de recherche en simulation en partenariat avec de nombreux laboratoires, dont le LIA.

Une collaboration s'est donc établie à travers stages de DEA² et thèses, entraînant une circulation de concepts entre chercheurs en informatique et chercheurs en modélisation des milieux naturels. C'est cette circulation de concepts qui a motivé le développement de ma thèse dirigée par Alexis Drogoul du thème OASIS et co-encadrée par Edith Perrier et Jean-Pierre Treuil du LIA.

¹cf. texte du projet, [GEODES, 1999]

²DEA IARFA de l'Université de Paris 6 dans le cadre de l'école doctorale EDITE.

Dans le cadre de cette collaboration³, j'ai mené un travail de recherche méthodologique et pratique dans le domaine de la modélisation de dynamiques de flux en cherchant à :

- montrer que les concepts développés en informatique dans les systèmes multi-agents offrent un cadre original de conception de modèles pour cette question de recherche,
- proposer des pistes pour une prise en charge informatique de l'interprétation des dynamiques obtenues en simulation.

L'idée centrale de mon travail consiste à décrire de telles dynamiques en termes d'agents hétérogènes interagissant dans un espace continu, l'introduction de couplages entre différents processus s'interprétant comme l'identification de règles d'interaction entre ces agents. En dotant les agents de moyens de reconnaissance de situations d'interaction remarquables, j'ai mis au point des mécanismes génériques de réification en objets actifs du simulateur, des organisations qui émergent en cours de simulation. Cette agentification de modes d'organisation donne des pistes intéressantes pour concevoir des outils d'analyse et d'interprétation de systèmes complexes. Ces idées se sont concrétisées dans une thématique particulière d'étude de dynamiques de flux : les processus de ruissellement, d'infiltration et d'érosion en hydrologie. Ce travail a donné lieu à la construction du simulateur RIVAGE qui offre les bases d'un environnement de simulation original et ouvert pour l'étude de questions de recherche dans cette thématique.

Un premier chapitre introductif s'attache à montrer les liens étroits qui unissent recherche en modélisation et recherche en informatique et situe dans ce cadre les enjeux d'une recherche en informatique sur la simulation. Le chapitre suivant met en avant la proximité conceptuelle qui existe, d'une part entre les modèles développés pour l'étude de dynamiques de flux dans un certain nombre de disciplines - hydrologie, écologie et sciences sociales -, d'autre part la problématique de conception de systèmes multi-agents en informatique. Cette proximité fonde les motivations de mon travail de recherche.

Le chapitre 3 explicite les principes qui ont guidé ma démarche de modélisation en hydrologie, comme exemple de dynamique de flux et support d'une recherche méthodologique, autour du projet RIVAGE, et propose une synthèse des expériences et réalisations informatiques qui sont exposées dans les chapitres suivants (chapitres 4 à 7). Le chapitre 8 s'attache à montrer que les modèles, conçus dans la thématique particulière de l'hydrologie, offrent des transpositions intéressantes à d'autres domaines, autour de deux exemples : la modélisation de dynamiques de foules et la conception de systèmes informatiques de gestion de flux d'informations. Enfin, cet exposé se termine au chapitre 9 par une discussion qui montre l'éclairage apporté par ce travail sur la représentation de l'espace et la gestion des modes d'organisation d'agents, du point de vue de la méthodologie de conception des systèmes multi-agents.

³qui va s'instituer en véritable association à l'occasion du projet GEODES

Chapitre 1

Modélisation, simulation et recherche en informatique.

Nature and Nature's laws lay hid in night :
God said, let Newton be! and all was light.

A. Pope

(Projet d'épithaphe pour Isaac Newton, mort en 1727,
cité dans [Prigogine et Stengers, 1979].)

RÉSUMÉ :

Ce chapitre introductif propose une relecture de l'évolution des recherches en modélisation des systèmes et en informatique qui fait apparaître, d'une part le rôle de plus en plus moteur joué par les simulations informatiques dans une démarche exploratoire en modélisation, d'autre part une évolution des recherches en informatique qui rapproche de plus en plus la conception de programmes d'un travail de modélisation.

Cette présentation vise à montrer que des modèles développés dans une thématique particulière de recherche peuvent bénéficier d'architectures et de paradigmes nouveaux en informatique, et réciproquement de nouvelles abstractions informatiques peuvent être extraites des modèles développés par un travail de recherche en modélisation.

Cette introduction permet de donner un cadre général à mon travail de thèse qui puise sa motivation dans cette double transposition, en abordant dans une démarche alliant modélisation et conception informatique la question de la représentation et de la modélisation de dynamiques de flux.

1.1 Modélisation et simulation numérique.

1.1.1 Notion de modèle et processus de modélisation.

La notion de modèle est une clé de la démarche scientifique : “un modèle est une image simplifiée de la réalité, forgée à partir d’une certaine sélection des données d’observation et d’un certain nombre d’hypothèses. Ces dernières concernent l’importance présumée des faits à retenir et, si le modèle est explicatif, les mécanismes probablement en jeu.” [Coquillard et Hill, 1997].

Un modèle est donc éminemment ancré dans la somme des connaissances accessibles à un instant donné sur un domaine particulier. Expérimentations et observations viennent corroborer ou prendre en défaut le modèle, relançant le processus même de modélisation.

La sélection des caractéristiques du phénomène modélisé est guidée par l’obtention de deux qualités majeures :

- un modèle doit être *maniab*le, c’est-à-dire plus maniable que la réalité brute tant du point de vue de sa description qu’éventuellement de sa maîtrise pratique.
- un modèle doit être *pertinent*, c’est-à-dire que les conclusions et décisions d’actions déduites du comportement du modèle doivent être proches de celles que l’on déduirait d’un examen de la réalité, si celle-ci pouvait être directement appréhendée.

Le modèle entretient donc un caractère de ressemblance avec le système réel mais en constitue une simplification. La pertinence de cette idéalisation s’évalue en regard des réponses qu’elle peut permettre d’apporter sur le fonctionnement du système réel. A la manière de Minsky :

To an observer B, an object A^* is a model of an object A to the extent that B can use A^* to answer questions that interest him about A [Minsky, 1965].

Une question beaucoup plus délicate est d’apprécier dans quelle mesure un modèle permet de comprendre ou d’expliquer le phénomène modélisé. Les conceptions diffèrent en fonction des sensibilités de chacun.

Idéalement, un phénomène ne peut être vraiment compris que lorsque l’on en a fait une théorie admissible, au terme de laquelle il apparaît que ce phénomène “ne pouvait pas ne pas avoir lieu”. Autrement dit, la valeur d’un modèle dépend très fortement de la validité de la théorie qui le sous-tend et qui permet d’établir certaines propriétés globales du système modélisé. Cette démarche se fonde généralement sur l’étude des propriétés analytiques de modèles mathématiques.

Cependant, la complexité croissante des modèles équationnels amène un recours de plus en plus systématique à la simulation numérique pour “plonger dans le temps et dans l’espace” un nombre croissant de modèles dont les propriétés ne se laissent pas établir analytiquement. Et la simulation numérique de devenir un mal nécessaire.

1.1.2 La simulation numérique : un mal nécessaire.

Nous présentons brièvement quelques grandes classes de modèles mathématiques dont la résolution numérique fait encore l’objet de nombreux travaux de recherche en analyse numérique

1.1. Modélisation et simulation numérique.

et en simulation :

- équations différentielles ordinaires du type :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, t)$$

où x est une grandeur scalaire ou vectorielle, et f une fonction suffisamment régulière. La donnée de cette équation doit être accompagnée des conditions initiales, portant par exemple sur la valeur de x à $t = 0$. Un tel système est également appelé système dynamique. L'étude exploratoire en simulation de certains de ces systèmes a montré qu'ils pouvaient présenter une grande sensibilité aux valeurs initiales de leurs paramètres et des non-linéarités. Leur étude rentre aujourd'hui dans le cadre de la théorie du chaos. Dans les cas les plus simples, l'arsenal des méthodes de résolution numérique est toutefois bien balisé (Runge-Kutta, Leap-frog, etc. cf. [Pavé, 1994]).

- équations aux dérivées partielles : elles introduisent la prise en compte de l'espace. Par exemple, l'équation de diffusion classique :

$$\frac{\partial x(r, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 x(r, t)}{\partial r^2}$$

où x est une grandeur scalaire ou vectorielle, et D représente le coefficient de diffusion. La donnée de cette équation doit être complétée par l'ensemble des conditions aux limites du système, c'est-à-dire généralement des conditions de flux particulières aux bords du domaine. Dans beaucoup de cas, une résolution numérique est nécessaire. Plusieurs méthodes existent : schémas aux différences finies ou résolution par éléments finis. Elles s'appuient la plupart du temps sur un maillage du domaine en éléments (cases, noeuds), dont la définition et la résolution plus ou moins fine conditionne la qualité des solutions obtenues ; la génération de tels maillages adaptés voire adaptatifs (pour suivre des conditions aux limites variables dans le temps) fait l'objet de nombreuses études [George et Borouchaki, 1997].

- équations différentielles stochastiques : ce type d'équations s'introduit naturellement lorsque l'on veut intégrer la notion de bruit à une équation différentielle ordinaire. Le bruit contient tous les aspects "parasitaires" par rapport au comportement moyen du système :

$$\frac{dx}{dt} = A(x) + C(x)L(t)$$

avec $L(t)$ processus stochastique blanc gaussien avec $\langle L(t)L(t') \rangle = \Gamma \delta(t - t')$. L'introduction du bruit est souvent utilisée pour rendre compte de phénomènes microscopiques que l'on connaît mal ou qui, à l'échelle considérée, peuvent être approximés par des perturbations aléatoires. Il existe une alternative à la résolution difficile de telles équations, où l'on simule un tel processus stochastique (simulation de Monte-Carlo [Coquillard et Hill, 1997]).

- équations du type Fokker-Planck : elles décrivent l'évolution temporelle de la probabilité p_n que le système soit dans l'état n à l'instant t [Kampen, 1992] :

$$\frac{dp_n(t)}{dt} = \sum_{n'} \{W_{nn'} p_{n'}(t) - W_{n'n} p_n(t)\}$$

les états du systèmes sont indexés par n et n' , W est une matrice de transition entre états : $W_{nn'}$ est la probabilité qu'une transition se fasse de l'état n' vers l'état n . Ces équations peuvent résumer statistiquement un système comportant un grand nombre de marcheurs aléatoires, modèle souvent utilisé pour rendre compte du comportement exploratoire d'individus dans leur environnement [Coquillard et Hill, 1997]. En toute généralité $W_{nn'}$ dépend de t et de l'ensemble de la distribution $\{p_n\}$, ce qui aboutit généralement à un système que l'on ne peut résoudre analytiquement.

L'utilisation de ces modèles mathématiques fait donc bien souvent appel en pratique à des simulations numériques, ce qui a généré de nombreuses recherches et donné naissance à des disciplines à cheval entre mathématiques et informatique, telle la géométrie algorithmique qui s'intéresse à la définition de méthodes constructives de maillages bi ou tri-dimensionnels possédant de "bonnes" propriétés en regard de leur application à des problèmes de résolution d'équations [Boissonnat et Yvinec, 1995].

Cette situation a naturellement influencé la manière avec laquelle les modèles sont conçus, en mettant en avant le problème de leur représentation informatique dès conception et a amené les modélisateurs à s'intéresser de près aux techniques de programmation leur permettant de coder des méthodes de résolution numérique.

1.1.3 Modélisation exploratoire par simulations.

Par ailleurs, les difficultés soulevées par l'étude analytique de modèles mathématiques en regard de la simplicité avec laquelle un modèle complexe peut être codé et simulé informatiquement ont entraîné l'essor de la simulation, comme outil d'exploration en modélisation.

Avec l'avènement de l'ère numérique et la puissance accrue des ordinateurs, la simulation numérique a perdu peu à peu son statut de "mal nécessaire" pour devenir un véritable moyen d'investigation en modélisation - notamment grâce à l'amélioration des techniques informatiques d'acquisition et de traitement de données.

La mise en œuvre de tels moyens d'investigation a ouvert des champs nouveaux à la modélisation, notamment en ce qui concerne les écosystèmes [Coquillard et Hill, 1997], pour lesquels l'impossibilité de conduire des expérimentations en laboratoire a rendu nécessaire le développement d'une approche exploratoire basée sur des reconstructions synthétiques sur ordinateur de représentations simplifiées de systèmes réels. Cette démarche de recherche à l'aide de mondes simulés a permis de tester des hypothèses de fonctionnement, en codant des règles de comportement difficilement exprimables a priori sous la forme d'équations mathématiques.

Ces reconstructions se sont notamment appuyées sur des modèles discrets facilement implémentables informatiquement, dont les automates cellulaires constituent l'exemple type [Czaran, 1998]. Ce sont des réseaux de cellules à une, deux trois ou n dimensions. Le temps et l'espace sont représentés de manière discrète. Chacune des cellules contient un automate à états finis qui calcule son état en fonction d'un voisinage, par exemple ses deux cellules adjacentes dans le cas d'un automate à une dimension, ou bien ses quatre ou huit cellules adjacentes en dimension deux. Chacun des automates est défini par un ensemble de règles locales qui vont spécifier son comportement en fonction de son voisinage, des voisinages différents pouvant conduire à des états différents de l'automate considéré.

1.2. Recherche en informatique et modélisation.

Inventés en 1966 par Von Neumann [Neumann, 1966], ce n'est que récemment, en développant leur usage informatique, que l'on a pu apprécier toute la richesse des dynamiques qu'ils peuvent engendrer à partir de règles très simples, suscitant un vif intérêt pour l'étude de la dynamique spatio-temporelle de certains phénomènes, en écologie ou en dynamique des populations notamment.

Leur simplicité formelle a entraîné par la suite le développement de leur étude d'un point de vue mathématique, principalement dans la cadre des outils de la physique statistique. Cependant ces études n'ont donné que peu de résultats : ils s'appuient principalement sur des méthodes de champ moyen qui donnent des résultats généralement très approximatifs (cf. [Czaran, 1998] chapitre 5), ainsi que sur des démonstrations d'équivalence avec des machines universelles de traitement de l'information. Ainsi, une classification des automates cellulaires [Wolfram, 1986] a été établie en fonction du type de leur dynamique : convergence vers un point fixe, convergence vers un attracteur périodique de petite taille, vers un attracteur chaotique... et les autres, les plus intéressants qui donnent sous certaines conditions initiales des structures stables [Langton, 1990].

L'usage de tels modèles, dans des disciplines aussi diverses que la dynamique des populations, la modélisation d'écosystèmes, les sciences sociales ou la physique [Wolfram, 1986] [Frisch et al., 1986], alors même que peu de résultats théoriques les sous-tendent, témoigne d'une tendance nouvelle en modélisation dans laquelle le développement de modèles *informatiques* s'affirme de plus en plus. Les automates cellulaires, de même que les modèles individus-centrés [Grimm, 1999], permettent au modélisateur d'encapsuler dans une même abstraction des règles individuelles de comportement plus ou moins formalisées et de plus, hétérogènes d'un individu à l'autre. Cette approche, à la différence des modèles analytiques dont nous avons parlé plus haut, s'accommode plutôt bien de descriptions naturalistes des comportements, qui s'attachent à donner des tendances, à supputer des buts poursuivis par des individus [DeAngelis et Gross, 1992].

L'essor de cette "informatisation" de la modélisation entraîne des demandes fortes en matière d'outils et de techniques nouvelles à l'adresse de la communauté informaticienne. Cet engouement ne doit toutefois pas faire oublier que cette démarche, exploratrice avant tout, si elle fournit une grande richesse de résultats, n'offre pour l'instant que peu de moyens d'analyse et d'interprétation, ce qui pose le problème essentiel de la validation de ces simulations [Grimm, 1999].

1.2 Recherche en informatique et modélisation.

Parallèlement au développement de la simulation comme démarche d'exploration et à l'utilisation de constructions informatiques en modélisation, on peut constater l'influence exercée par des travaux en simulation sur le développement de la recherche en informatique. Ce n'est pas un hasard si les concepts de robustesse, redondance, autonomie, qui sont aujourd'hui des maîtres mots du génie logiciel, sont avant tout des propriétés que l'on prête traditionnellement aux systèmes vivants. Ils reflètent l'attention croissante accordée par les concepteurs de systèmes informatiques aux mécanismes régulateurs, très souvent collectifs, trouvés dans les systèmes naturels. Dans le même temps, l'avènement d'un paradigme de programmation fondé tout d'abord sur le concept d'objet, puis sur la notion d'organisation, rapproche d'une façon

significative la conception de systèmes informatiques d'une démarche de modélisation.

1.2.1 Abstraction de modèles.

L'histoire récente de l'informatique souligne la richesse des sources d'inspiration provenant de la physique, de la biologie et de l'écologie [Bounds, 1987]. Les réseaux connexionnistes [Lippman, 1987], les algorithmes génétiques [Goldberg, 1989], les systèmes de classifieurs [Holland, 1986], les algorithmes de recuit-simulé [Greening, 1990], les automates cellulaires [Wolfram, 1986], l'éco-computation [Huberman, 1988], constituent autant de techniques qui sont nées à l'origine de tentatives d'abstraction de processus présents dans les milieux naturels.

En voici quelques exemples :

- les automates cellulaires dont nous avons déjà parlé (cf. section 1.1.2) furent introduits par Von Neumann pour tenter d'abstraire la forme logique du processus naturel de reproduction, en travaillant sur des automates cellulaires auto-reproducteurs.
- les réseaux connexionnistes : ils constituent une abstraction de la forme logique de traitement d'information telle que l'envisageait l'école cybernétique. La première réalisation remonte aux années soixante (Perceptron de Rosenblatt [Rosenblatt, 1962]) et s'appuie sur le comportement de réseaux de processeurs élémentaires interconnectés. Chaque processeur peut être considéré comme une simplification extrême d'un neurone, ce que McCulloch et Pitts ont appelé un "neurone formel".

Chaque neurone j détermine sa valeur de sortie en fonction des valeurs d'entrée qu'il reçoit d'autres neurones i . La fonction de transfert du neurone est donnée par l'équation :

$$y_j = f\left(\sum_i w_{ij}x_i\right)$$

où les x_i sont les valeurs de sortie des unités i , les w_{ij} sont les poids des connexions reliant les neurones i aux neurones j , et f est la fonction d'activité (classiquement fonction à seuil ou sigmoïde) qui indique qu'un neurone est actif (ou d'autant plus actif) à partir du moment où la somme des valeurs qu'il reçoit sur ses entrées dépasse une certaine valeur. Cette approche a suscité un regain d'intérêt lorsque des études théoriques ont montré que ce type d'architecture permettait de construire une forme évoluée de mémoire associative : sous certaines conditions, une fonction de R^n dans R^m , connue uniquement à partir d'un ensemble d'échantillons que l'on présente en entrée du réseau, peut être mémorisée dans les liaisons pondérées du réseau. Les applications de telles architectures sont nombreuses en reconnaissance des formes, prédiction de série temporelle, optimisation, architecture de contrôle adaptative pour la robotique, etc.

- les algorithmes génétiques : dans le même esprit que Von Neumann, John Holland [Holland, 1975] [Holland, 1986] a tenté d'abstraire la forme logique du processus de l'évolution. Bien que très simples dans leur principe les algorithmes génétiques se sont révélés être particulièrement puissants pour une grande variété d'applications, notamment dans l'optimisation de fonction [Goldberg, 1989]. Ils ont fourni aussi une base pour l'étude et l'application des mécanismes de l'évolution. Dans les algorithmes génétiques, un "génotype" symbolique représente une chaîne de caractères codant une solution potentielle d'un problème : par exemple, les coefficients d'une matrice. Cette solution peut être évaluée par rapport à certains critères de qualité, ce qui permet d'associer à chaque chaîne de

1.2. Recherche en informatique et modélisation.

caractère, donc chaque génotype, une valeur de “fitness” ou qualité. L’idée consiste à faire alors évoluer une population de solutions potentielles vers une population de solutions de plus en plus performantes.

La force de ces algorithmes tient dans l’introduction pour la sélection des meilleures solutions de deux mécanismes inspirés de la biologie : les solutions sont répliquées au prorata de leur fitness, et des opérateurs génétiques de mutation et de cross-over introduisent de la diversité dans ce processus de réplication. L’utilisation de tels mécanismes de sélection est devenue une branche de recherche active concernant les systèmes à base de classifieurs, dont on se sert par exemple pour créer des comportements adaptatifs [Wilson, 1991]. Une extension de cette approche a été proposée par John Koza où la sélection ne concerne plus seulement des génotypes codant pour des solutions d’un problème d’optimisation mais de véritables programmes informatiques [Koza, 1991].

Par ailleurs, ces techniques ont bénéficié de résultats théoriques établis en mathématiques et en physique. Ainsi les outils de la thermodynamique statistique développés à l’origine pour l’analyse des machines thermiques ont permis dans un passé récent des progrès importants dans la compréhension de modèles physiques et biologiques et ont également conduit à de nouvelles méthodes de résolution de problèmes [Bienenstock et al., 1990]. En particulier c’est grâce à l’introduction d’une fonction d’énergie que [Hopfield, 1982] a pu établir une analogie formelle entre les verres de spins et les mémoires associatives, et ses travaux ont été étendus dans la dernière décennie à l’étude de la dynamique de différents réseaux d’automates [Fogelman-Soulié, 1985] [Barndorff-Nielsen et al., 1993].

Ainsi un large éventail de techniques aujourd’hui phares dans la recherche informatique se sont apparentées au départ à des travaux de recherche en modélisation, avec en point de mire la construction d’abstractions opératoires. La méthodologie de conception des systèmes informatiques elle-même a subi une semblable influence, comme le montre le développement de la programmation orientée objet.

1.2.2 De la simulation à la programmation orientée objet.

Les premiers programmes étaient écrits en langages machines et dépendaient donc étroitement de l’architecture des ordinateurs sur lesquels ils étaient implantés. Les techniques de programmation ont ensuite évolué vers une séparation de plus en plus nette entre les concepts manipulés dans les programmes et leur représentation interne en machine.

Les principes de la programmation objet sont nés de deux motivations relativement anciennes¹. D’une part la difficulté de maintenir des programmes de taille importante a imposé dans les années 70 la notion de programmation structurée avec l’école ALGOL et des langages tels que Algol 60 [Naur, 1963] ou Pascal [Wirth, 1971]. D’autre part, les travaux en Intelligence Artificielle sur la modélisation du raisonnement humain ont mis en évidence la nécessité de structurer la masse de connaissances manipulées, en regroupant dans une entité unique les informations et les propriétés relatives à un même concept [Minsky, 1990] et [Brachman, 1977].

A l’origine destiné à la simulation, notamment la modélisation de systèmes physiques en

¹Le lecteur intéressé pourra se référer à la “bible” [Masini et al., 1989] (notamment chapitres 1 et 6) qui décrit de manière exhaustive le contexte historique ainsi que les notions de la programmation orientée objet.

recherche nucléaire [Nygaard, 1986], Simula 1 [Dahl et Nygaard, 1966] fut le premier langage à regrouper données et procédures dans une même entité. Son successeur Simula [Birtwistle et al., 1973] a formalisé les concepts d'objet et de classe : un programme est une collection d'objets actifs et autonomes disposant de procédures et de variables locales qui leur sont propres. Ces objets ont un comportement propre, ce qui permet en particulier de simuler des processus parallèles. Une classe sert à spécifier un comportement commun à un ensemble d'objets, appelés instances de la classe, et s'inscrit dans une hiérarchie d'héritage. Simula a servi de modèle à toute une lignée de langages parmi lesquels C++ [Stroustrup, 1986] et Eiffel [Meyer, 1989], ou encore plus récemment Java.

Le concept d'encapsulation est devenue l'une des clés de la programmation actuelle. Le regroupement des données et des procédures qui les manipulent dans une même entité, l'objet, a permis d'obtenir une grande souplesse pour la modification et la réutilisation de programmes. Les détails d'implémentation sont cachés, le monde extérieur n'ayant accès aux données que par l'intermédiaire d'opérations constituant l'interface de l'objet. Le programmeur n'a donc pas à se soucier de la représentation physique des entités utilisées et peut raisonner en termes d'abstractions.

La programmation est dirigée par les données : pour traiter une application, le programmeur commence par définir les types d'objets appropriés, avec leurs opérations spécifiques, chaque entité manipulée dans le programme étant un représentant, ou instance, d'un de ces types. L'univers de l'application est par conséquent composé d'un ensemble d'objets qui détiennent, chacun pour leur part, les clés de leur comportement. On retrouve des similitudes fortes avec le travail du modélisateur qui doit formaliser les connaissances qu'il possède sur tel ou tel comportement, et celle du naturaliste développant des taxonomies pour structurer les connaissances d'un domaine.

Ces principes font valoir trois points de vue autour de la notion d'objet :

- le point de vue structurel : l'objet est un type de données, qui définit un modèle pour la structure de ses représentants physiques et un ensemble d'opérations applicables à cette structure.
- le point de vue conceptuel : l'objet est une unité de connaissance, représentant le prototype d'un concept.
- le point de vue acteur : l'objet est une entité autonome et active, qui se reproduit par copie.

Cette polymorphie explique le succès rencontré par l'approche objet, notamment pour la modélisation et la simulation [Coquillard et Hill, 1997]. Elle permet en effet de retrouver dans la nature même de l'objet, un ensemble de procédures de calculs et de données afférentes, ou dans une vision anthropomorphique, un individu possédant des compétences (ses méthodes), percevant le monde extérieur à travers une interface et interagissant avec d'autres "objets". La construction d'un système informatique, regroupant des ensembles d'"individus", s'est donc naturellement orientée vers la métaphore de l'organisation, comme nouveau paradigme de programmation.

1.3. Enjeux d'une recherche en informatique sur la modélisation.

1.2.3 Organisation, nouveau paradigme de programmation.

Les systèmes informatiques, notamment industriels, sont de plus en plus complexes et font intervenir un grand nombre de sous-systèmes de nature fort diverse, comprenant de nombreuses fonctionnalités, interagissant avec plusieurs spécialistes humains (opérateurs, experts, techniciens, etc.), qui se trouvent souvent répartis en différents lieux dans l'espace physique.

Aborder la conception de tels systèmes nécessite, pour des raisons de maintenance et de réutilisabilité, de les décomposer en modules "faiblement couplés", en unités indépendantes dont les interactions sont limitées et parfaitement contrôlées. C'est-à-dire comme le dit Ferber ([Bonabeau et Theraulaz, 1994] p158) : "au lieu de se trouver en présence d'une "machine", d'une entité bien localisée par sa structure et son architecture, on se trouve, comme le développement des langages à objet l'a montré, devant un ensemble d'entités en interaction, chaque entité étant définie de manière locale sans vision globale détaillée de toutes les actions du système. Cette façon d'envisager des programmes apporte de nouvelles méthodes de conception de génie logiciel et introduit un changement de point de vue en passant de la notion de programme à celle d'organisation [Erceau et Ferber, 1991]".

Autrement dit, appréhender dans sa globalité la formidable complexité des systèmes informatiques actuels n'est plus possible. Le concepteur doit nécessairement raisonner à l'aide de modèles qui ne retiennent que les caractéristiques pertinentes à l'échelle du sous-système sur lequel il travaille. A l'heure où les informations sont regroupées dans d'immenses bases de données et transitent entre des centaines de programmes répartis en des nœuds d'un vaste réseau, la notion d'organisation s'impose comme une métaphore expressive.

En retour, cette métaphore invite à adopter une posture intentionnelle pour décrire les fonctionnalités des composants d'un système, en termes de comportements, d'interactions et de coopération, et à concevoir la résolution d'un problème comme une tâche réalisée collectivement par plusieurs entités autonomes, dont les compétences et les connaissances sur le monde extérieur sont partielles.

On peut retrouver dans cette tendance nouvelle l'image d'une véritable démarche de modélisation, avec en points de mire une décomposition en éléments autonomes, la formalisation de règles d'interaction entre ces éléments et le choix d'un niveau d'abstraction pertinent.

1.3 Enjeux d'une recherche en informatique sur la modélisation.

La tâche de conception de systèmes informatiques relève de plus en plus d'un travail de modélisation, et l'apparition d'un nouveau paradigme de programmation fondé sur la notion d'organisation offre un cadre conceptuel propice à l'intégration de modèles développés dans diverses thématiques scientifiques, comme modèles d'organisation potentiels de systèmes informatiques.

Inversement, l'informatique, en offrant des capacités toujours plus grandes de stockage et de traitement d'informations, en permettant d'étendre la résolution numérique d'équations mathématiques, est amenée à jouer un rôle de plus en plus important pour la modélisation. Avec l'extension de la capacité d'expression des langages de programmation, elle ouvre aujourd'hui

la voie à de nouvelles méthodes de modélisation qui prennent la forme d'une construction de modèles *informatiques* pour représenter des situations réelles de plus en plus complexes.

Mener un travail de recherche en informatique sur la modélisation présente l'enjeu de pouvoir établir des transpositions fécondes de modèles informatiques vers un domaine thématique particulier et réciproquement. Comme le souligne [Jolivet, 1992], les frontières entre disciplines doivent être rendues perméables, et c'est manifestement au niveau de la modélisation que la communication est la plus facile, en raison des abstractions et simplifications inhérentes aux modèles.

Une telle démarche de va-et-vient entre informatique et modélisation soulève des questions de fond. A l'heure où l'usage de la simulation informatique se développe dans tous les domaines et suscite un enthousiasme si manifeste, on ne doit pas perdre de vue que la construction de modèles informatiques et leur mise en œuvre ne donnent pas de certitudes, elles permettent d'explorer des hypothèses de fonctionnement et de fournir une abondante source de résultats qu'il faut ensuite *interpréter et valider*.

Pour ma part je pense que c'est précisément dans la prise en charge de ces étapes d'analyse et d'interprétation que se situe l'enjeu majeur d'une recherche en informatique sur la modélisation.

L'informatique possède pour cela un atout important : modèles et exécution de ces modèles relèvent d'un même formalisme, ils sont construits comme des *abstractions opératoires*. Autrement dit, des structures de contrôle informatiques peuvent être ajoutées aux modèles, et inversement, les modèles peuvent servir de support de contrôle aux processus informatiques. C'est par la combinaison de ces deux types d'abstraction que l'informatique peut fournir des moyens pratiques d'analyse, complémentaires à une démarche analytique mathématique, pour tenter de mieux cerner certaines propriétés des systèmes dynamiques.

En m'investissant dans un domaine de recherche thématique, la modélisation de dynamiques de flux dans les milieux naturels, physiques et sociaux, mon objectif de départ est double :

- apporter une contribution originale de construction de modèles informatiques dédiés à l'étude de telles dynamiques,
- capitaliser en retour ces modèles, comme mécanismes d'organisation potentiels pour la conception de systèmes informatiques.

Les dynamiques de flux constituent un domaine riche de questions théoriques autour des notions d'espace, d'organisation géométrique et de structuration dynamique. Bon nombre de ces questions demandent, comme nous allons le voir au chapitre suivant, des outils de modélisation et d'analyse nouveaux, ouverts à la prise en compte de couplages dynamiques entre processus. Ces questions trouvent un écho dans un domaine aujourd'hui en plein essor de la recherche en informatique, les systèmes multi-agents dont les principes même, fondés sur les notions d'ancrage dans l'environnement, d'organisation et d'interaction, offrent un cadre de conception de modèles et de simulateurs, intéressant pour l'étude de telles dynamiques.

Chapitre 2

Modélisation de dynamiques de flux et systèmes multi-agents.

RÉSUMÉ :

Le projet que développe l'unité de recherche GEODES au sein du LIA de l'IRD consiste à synthétiser un certain nombre de questions thématiques concernant les milieux naturels, physiques ou sociaux, au sein d'une problématique générale d'étude des relations entre organisation géométrique de milieux et dynamiques de flux. Dans ce cadre, des choix méthodologiques restent à préciser concernant la représentation de tels processus de flux et de l'espace dans lequel ils interagissent.

En étudiant un certain nombre de travaux de recherche menés dans différents domaines, une description en termes d'interaction entre entités hétérogènes, peut sembler prometteuse. Elle doit être évaluée et demande le développement de méthodes associées en modélisation mathématique et informatique.

Sur ce point, les techniques et concepts développés dans les systèmes multi-agents, domaine en plein essor de l'Intelligence Artificielle Distribuée et de la Vie Artificielle, peuvent offrir un cadre intéressant. En effet ce domaine a pris le parti d'adopter précisément une description en termes d'interactions entre des entités informatiques autonomes, appelées agents, comme paradigme de construction de systèmes informatiques.

Mon travail de thèse consiste à évaluer l'apport que les systèmes multi-agents peuvent représenter pour la modélisation de dynamiques de flux, dans l'une des thématiques de recherche de l'unité GEODES, les dynamiques de transferts d'eau de surface en hydrologie.

2.1 Modélisation de dynamiques de flux.

2.1.1 Le projet de recherche GEODES.

A travers l'expérience accumulée dans de nombreux travaux de modélisation dans divers domaines (cf. notamment [Pichon et al., 1991] [Bousquet, 1994] [Perrier et al., 1995] [LePage et Cury, 1996] [Shin et Cury, 1999]), les chercheurs du LIA ont pu apprécier la récurrence de la question de l'interdépendance entre organisation géométrique des milieux naturels et effet structurant de processus physiques et sociaux.

Le projet de recherche GEODES a vocation à fédérer autour de cette question clé, ces recherches transthématiques, menées dans les domaines de l'hydro-pédologie, de la dynamique des populations (migrations urbaines en sciences sociales, populations marines en biologie) et en épidémiologie, en ouvrant une recherche sur la modélisation mathématique et informatique de telles lois d'organisation et de rétroaction [GEODES, 1999].

Dans ce contexte, il s'agit d'entreprendre une démarche incrémentale de capitalisation de méthodes de modélisation en s'appuyant sur des simulations sur mondes virtuels, sous contrôle de mathématiques appropriées et avec une volonté de construction et de validation à partir d'études de cas concrets (modèles de processus, hypothèses de fonctionnement, analyse de données spatiales et temporelles, observées et simulées). Pour cela, un certain cadre de description général, permettant d'abstraire les particularités thématiques des différents milieux physiques et sociaux étudiés s'avère nécessaire.

Un point de départ consiste à remarquer que la plupart des systèmes environnementaux et sociaux étudiés peuvent tous être décrits comme des dynamiques de processus de flux (transferts, migrations, transports, dispersions) de substances diverses (énergie, fluide, matière, poissons, parasites, êtres humains, informations) dans un milieu donné.

Les dynamiques de tels processus de flux apparaissent principalement déterminées par l'organisation géométrique des milieux dans lesquels ces processus agissent. Sous la contrainte d'obstacles, de zones d'attraction homogènes ou de chemins d'écoulement ou d'échanges privilégiés, des structures particulières de lignes de flux apparaissent dans l'espace. Ces structures peuvent en retour faire évoluer la géométrie du milieu elle-même : phénomène de dépôt et d'érosion par transfert de matière et de fluide, apparition de bassins d'attraction par migration de populations. Ces structures nouvelles se superposent aux structures initiales et génèrent de nouvelles modalités d'organisation : agrégations de populations, réseaux trophiques, mares, formations de rivière en tresse.

Ces mécanismes se produisent à des échelles de temps et d'espace diverses et s'expriment dans un jeu complexe d'interactions. La question consiste alors à identifier de telles interactions, explorer leurs modes d'organisation et rechercher des lois qui permettraient de décrire comment un tel réseau d'interactions dynamiques peut générer des structures macroscopiques observables.

Des choix méthodologiques de modélisation doivent être adoptés, notamment en matière de représentation d'espace et de description de telles dynamiques de flux. L'étude d'un certain nombre de travaux de recherche dans les domaines de l'hydrodynamique et de la dynamique des populations, en écologie et en sciences sociales, peut permettre d'explicitier ces choix, en regard des interrogations des chercheurs dans leur thématique, et avec la contrainte supplémentaire

2.1. Modélisation de dynamiques de flux.

d'une recherche qui se veut ouverte sur expérimentations et données de terrain.

2.1.2 Des questions thématiques autour de dynamiques de flux.

La tendance qui se dégage de la plupart des travaux de recherche menés actuellement aussi bien en hydrologie qu'en dynamique des populations, fait valoir un besoin de plus en plus marqué pour mieux prendre en compte l'aspect *spatial* des processus physiques et sociaux.

Depuis quelques décennies, le besoin d'analyse spatiale est régulièrement souligné [Shorrocks et Swingland, 1990] [Durrett et Levin, 1994]. Elle constitue une composante essentielle de l'explication des dynamiques biologiques, notamment pour les concepts de peuplement, d'habitat, d'environnement fragmenté. En réalité, cette prise en compte de l'espace est une préoccupation relativement ancienne, dont les origines en écologie par exemple remontent aux observations réalisées par Darwin dans les Galapagos, puis, par exemple avec Mac Arthur et son modèle d'îles [MacArthur et Wilson, 1967].

Classiquement, les modèles mathématiques permettant de prendre en compte une spatiation de dynamiques relèvent des équations aux dérivées partielles (EDP) comme on l'a vu précédemment (cf. 1.1.2). C'est le cas par exemple des modèles d'hydrodynamique basés sur les équations de Navier-Stokes : ces équations de mécanique des fluides régissent aussi bien les courants océaniques que les écoulements de surface ou les mouvements de masses d'air en météorologie [Vreugdenhil, 1994]. En dynamiques des populations, on note aussi l'utilisation de semblables modèles qui font intervenir des couplages entre des équations de diffusion et des équations classiques de dynamiques des populations en écologie [Skellam, 1973] et en épidémiologie [Murray et al., 1986] [Anderson et May, 1991]. Cette approche a connu notamment une grande réussite théorique dans le cas d'un modèle dû à Alan Turing qui combine ainsi des relations de prédation avec un mécanisme de diffusion¹.

Ces modèles mathématiques semblent toutefois présenter deux types d'inconvénients majeurs :

- d'une part ils privilégient la vision d'un espace homogène et isotrope. Ils ont ainsi du mal à prendre en compte des structures spatiales hétérogènes existant dans les milieux : par exemple les structures localisées de populations en écologie [Caswell et Cohen, 1991], ou la richesse d'un tissu urbain qui apparaît de nature fractale [Batty et Longley, 1994].
- d'autre part ils présentent des difficultés d'ordre théorique et algorithmique pour la prise en compte de conditions aux limites complexes [Vreugdenhil, 1994]. La résolution des équations de Navier-Stokes pour la gestion des écoulements entre les grains d'un milieu poreux en est un cas typique. La géométrie complexe des bords des grains fournit des conditions aux limites si nombreuses qu'elle nécessite l'utilisation de maillages adaptatifs (cf. 1.1.2) dont la mise en œuvre est extrêmement complexe et source d'instabilité dans les méthodes de résolution numérique.

Ces deux sources de difficultés ont entraîné des recherches sur des modèles qui permettraient de s'affranchir de telles limitations : ils ont amené une réflexion autour de la représentation de l'espace et de la description des processus de flux.

¹Les solutions du modèle de Turing présentent des structures spatiales remarquables ; cependant le modèle de Turing, construit initialement dans un cadre de dynamique des populations, a trouvé ses applications effectives dans des domaines différents, notamment en cinétique chimique [Murray, 1993].

Représentation de l'espace.

La nécessité de prendre en compte l'hétérogénéité de l'espace et l'existence de structures particulières, dont le rôle est important pour la dynamique de certains phénomènes, a amené le développement de représentations de l'espace sous la forme de réseau d'unités spatiales diverses, notamment en dynamiques des populations.

Ainsi, les modèles de "patch" reposent sur la définition de mécanismes déterministes au niveau d'unités spatiales discrétisées, appelées "patches" [Chalvet-Montfray et al., 1998] [Czaran, 1998]. Ils s'appuient de plus en plus sur des modèles d'automates cellulaires [Caswell et Cohen, 1991] (cf. 1.1.3). Une démarche semblable s'est développée pour la modélisation de dynamiques urbaines : le territoire est découpé en petites cellules carrées ; chacune possède des caractéristiques de milieu, d'habitat, d'habitants ; des fonctions d'état permettent de caractériser le déterminisme d'une dynamique en spécifiant comment chaque cellule évolue en fonction de son état et de l'état de ses voisins.

Ces modèles présentent l'avantage de reposer sur une abstraction de l'espace qui permet de faire ressortir certaines relations entre topologie du réseau et dynamique des populations représentées [Czaran, 1998] [Durett et Levin, 1994].

Toutefois, ce découpage de l'espace en unités identiques s'avère souvent contraignant. Ainsi il ne permet pas toujours de représenter naturellement l'organisation hiérarchisée d'une ville, notamment en ce qui concerne le réseau des influences : l'évolution d'un îlot ne dépend pas que de l'état des îlots voisins et peut être contrainte par des phénomènes se développant à un autre niveau. Dans ces cas la complexité des modèles s'accroît considérablement : travaux sur les villes d'Ottawa [Langlois et Phipps, 1997], Rome [Colonna et al., 1998] ou San-Francisco [Clarke et al., 1997]. En hydro-géologie, pour des échelles de temps et d'espace très grandes, le travail de Teles [Teles et al., 1998] a montré la pertinence de l'utilisation d'objets à différentes échelles (mouvement de blocs de sable et d'argile, évolution morphologique d'un fleuve, courbure des méandres, localisation des bancs d'un fleuve en tresse) pour décrire l'évolution de la formation de structures lithologiques sous l'action de processus de dépôt et d'érosion.

Dans le cas des villes, des approches résolument géographiques ont montré l'intérêt qu'il y aurait à pouvoir prendre en compte une grande variété de représentations, en zones concentriques, en secteurs, à noyaux multiples, ou décrivant l'organisation du tissu urbain selon un ensemble structuré de critères comprenant des caractéristiques d'accès aux infra-structures [Batty et Longley, 1994].

Description de processus de flux.

En mécanique des fluides, la nécessité de prendre en compte des conditions aux limites complexes a amené le développement d'approches particulières ou lagrangiennes, pour lesquelles les processus sont décrits sous la forme d'entités en mouvement dans l'espace.

C'est le cas notamment des simulations dites de "gaz sur réseau" [Boon, 1992] : on représente un fluide comme un ensemble de particules qui se déplacent sur les mailles d'un réseau en respectant des contraintes physiques de conservation d'énergie et de quantité de mouvement au cours des déplacements et des chocs. Ces méthodes de simulation empruntent en fait beaucoup aux automates cellulaires. Des études ont montré une équivalence entre ces simulations et une

2.1. Modélisation de dynamiques de flux.

résolution des équations de Navier-Stokes. Cependant si elles permettent de prendre en compte des conditions aux limites complexes dans un milieu quelconque, elles ne sont applicables que pour une résolution très fine [Garcia-Sanchez et al., 1996].

Cette limitation a suscité le développement de méthodes particulières ne reposant sur aucune grille ou maillage de l'espace ("meshless methods" [Belytschko et al., 1996]) : par exemple, les "smoothed particles hydrodynamics" (SPH) [Benz, 1990] [Monaghan, 1992]. La méthode consiste à faire mouvoir des entités discrètes, qui représentent des points d'interpolation mobiles permettant à chaque instant de reconstituer des champs de densité, de vitesse, de pression et d'énergie. Les lois de leur mouvement s'expriment sous forme d'équations différentielles qui se déduisent de Navier-Stokes par une forme particulière d'intégration. Le respect de certaines règles au cours de ce calcul assure la conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie.

De façon assez singulière, de telles approches ne font pas l'unanimité en ce qui concerne leur enjeu de départ : la prise en compte de conditions aux limites complexes. Ainsi les lois de déplacements semblent pouvoir être adaptées, avec quelques difficultés, à la prise en compte de conditions aux limites complexes [Zhu et al, 1997], en considérant ces conditions aux limites comme formées elles-même de particules (boundary particles) qui interagissent avec les premières au travers de forces diverses. Mais certains auteurs émettent des réserves quant aux instabilités générées par de telles solutions [Belytschko et al., 1996]. Il faut toutefois souligner que si de telles critiques ont pu être formulées, c'est précisément parce que ces méthodes peuvent être comparées à des modèles classiques par EDP. Cette possibilité de faire de telles comparaisons constitue un atout non négligeable, elle permet d'établir la qualité des modèles développés dans ces approches par rapport à des modèles depuis longtemps validés.

Le gain qu'apportent de telles méthodes particulières semble donc être moins leur capacité à prendre en compte de telles discontinuités que leur facilité à prendre en compte des trajectoires et historiques des entités dans le "destin" du système tout entier. Cet avantage, lié à la nature lagrangienne de leur description des processus de flux, permet de se prêter facilement, de par la continuité existentielle des entités, à des analyses longitudinales des trajectoires, notamment pour le calcul d'indicateurs : statistiques de temps de parcours, couplages origines/destinations, etc., qui interviennent par exemple pour la traçabilité des solutés en hydro-géologie.

Dans un contexte tout à fait différent, de semblables méthodes, "particulières", ont été développées. Il s'agit des modèles individus-centrés ou individual-based models (IBM) [DeAngelis et Gross, 1992] [Huston et al., 1988] en dynamique des populations, dans lesquels on simule le comportement biologique (croissance, reproduction, prédation, migration) d'individus ou de groupes en interaction. Cette approche fait actuellement l'objet de multiples travaux [Lomnicki, 1999] dont la revue *Ecological modeling* a dressé récemment le tableau. Dans le cas de ces modèles, il ne s'agit pas à proprement parler de mieux gérer des conditions aux limites complexes, mais de prendre en compte des hétérogénéités de comportements au niveau des individus d'une population.

Enfin une dernière méthode, les "active brownian particles" [Schweitzer, 1997], se situe en quelque sorte à l'intersection de ces deux approches, physiques et écologiques. Elle repose sur une généralisation des formalisations de type marcheurs aléatoires s'appliquant aux processus de diffusion. Des particules se déplaçant dans un espace continu, sont dotées d'états internes

et sont guidées par le gradient d'un potentiel mais avec une part de déplacements aléatoires. En retour elles modifient le potentiel de manière déterministe. Les états internes eux-mêmes se modifient en fonction des positions des particules et des valeurs du potentiel. Cette interaction ternaire - (positions, vitesses), (états internes), (potentiel) - détermine des dynamiques très variées selon les fonctions précises mises en jeu. Cette méthode a pu être développée dans différents contextes de modélisation [Schweitzer, 1998].

L'utilisation d'une discrétisation en éléments, "particules" ou "individus", pose cependant le problème du coût de leur mise en œuvre, par rapport à la rapidité des méthodes de résolutions par éléments finis des EDP. A priori la gestion d'un très grand nombre d'entités en interaction, notamment dans le cas des modèles IBM, pour lesquels chaque individu peut présenter une complexité non négligeable, amène inévitablement l'idée de regrouper certaines de ces entités, et de travailler à différents niveaux d'agrégation, c'est du moins le souhait qu'exprime Grimm [Grimm, 1999].

2.1.3 Des choix méthodologiques de modélisation.

Il ressort de cette étude une certaine confusion : certaines approches semblent ne répondre que partiellement à leurs objectifs de départ. La nécessité de travailler avec plusieurs représentations de l'espace et selon différents niveaux d'agrégation se fait clairement sentir, ce qui n'incite pas à faire des choix définitifs.

Une solution peut être d'adopter un cadre qui soit le moins contraignant possible, le plus ouvert à des changements de représentation et de niveaux d'agrégation. Si l'on souhaite permettre des couplages avec des outils existants (systèmes information géographique SIG ou modèles d'autres processus), prendre en compte de façon souple des données de terrain (échantillonnées selon différents protocoles de mesure), ou encore faciliter la comparaison de résultats obtenus par différents modèles (reposant sur des types d'approche différents), il faut s'attendre à devoir établir des ponts entre différents modes de représentation.

Sur ce point, les solutions s'appuyant sur des maillages ou des réseaux de cellules semblent contraindre trop fortement la résolution à laquelle l'espace est perçu et en fin de compte se prêter difficilement à de tels changements. Le recours à un maillage unique a ainsi montré ses limites dans le cadre des SIG lorsqu'il s'agit de faire correspondre différents niveaux d'organisation d'information et des dynamiques spatialisées [Slothower et al., 1998].

Une solution relativement ouverte semble être d'adopter un espace *continu*. Elle propose en fin de compte de considérer un espace abstrait d'interaction, sur lequel existe une métrique, mais sans imposer un mode de représentation unique des processus : peuvent cohabiter dans cet espace, des points matériels et des objets spatialement étendus aux géométries complexes.

Dans le même esprit d'ouverture à différents contextes de modélisation, la description de flux sous forme particulière présente l'avantage de réunir une certaine souplesse pour prendre en compte des conditions aux limites (même s'il existe des réserves à ce sujet) et des comportements individuels hétérogènes. Si l'on cherche à construire des modèles permettant d'abstraire certaines lois d'organisation, qu'il s'agisse de fluide ou d'individus, ce choix, au vu des travaux de Schweitzer, apparaît intéressant. De plus, dans certains cas, la comparaison avec des modèles de diffusion classiques reste envisageable.

2.2. Les systèmes multi-agents.

Une question demeure cependant largement ouverte. Elle concerne la prise en compte de structures macroscopiques émergentes qui vont venir à leur tour contraindre d'autres dynamiques et processus. Ainsi, en hydrodynamique côtière, l'espace des courants apparaît comme un réseau organisé en sous-structures hiérarchisées, volumes d'écoulement laminaire ou tourbillonnaire, zones de rétention, jets ; en dynamique de la mobilité urbaine, des pôles d'attraction ou de grandes tendances migratoires peuvent être identifiées ; de la même façon, en hydrodynamique du ruissellement, mares, chemins d'eau, ravines en formation présentent des formes et des régimes de fonctionnement spécifiques. Par exemple, une zone de rétention permet de maintenir des conditions favorables au renouvellement des stocks des espèces piscicoles.

Cette question demande d'introduire des représentations de nature plus qualitative, intermédiaires entre la représentation de trajectoires individuelles et une caractérisation globale par quelques indicateurs quantitatifs.

Les approches particulières et individus-centrées n'apportent pas de pistes tangibles pour aborder cette question. En effet si elles reposent sur la mise en interaction d'entités pour décrire un système dynamique, elles ne semblent pas vraiment tirer parti des modes d'organisation que présentent de tels ensembles.

Les pistes sont peut-être à chercher dans le domaine des systèmes multi-agents en informatique, qui reposent sur une semblable description en termes d'entités en interaction, appelées agents, mais dont le paradigme de conception utilise explicitement *l'organisation* de tels ensembles d'agents pour la résolution collective de problèmes.

2.2 Les systèmes multi-agents.

2.2.1 Introduction.

Il faut ici rappeler le mouvement d'évolution de la recherche en informatique (cf. 1.2) en général et du génie logiciel en particulier, allant d'un paradigme centré sur les traitements à un paradigme reposant sur la notion d'organisation, après celle d'objet. Ce contexte n'est sans doute pas étranger à la naissance d'une discipline qui se fonde précisément sur cette notion d'organisation.

Les systèmes multi-agents² constituent l'objet d'étude de l'Intelligence Artificielle Distribuée (IAD), branche récente de l'Intelligence Artificielle [Smith et Davis, 1980] [Huhns, 1987] [Bond et Gasser, 1988] [Demazeau et Müller, 1989] [Gasser et Huhns, 1989] [Werner et Demazeau, 1992]. L'IAD s'intéresse à la conception d'agents artificiels capables de s'organiser efficacement pour accomplir collectivement les fonctionnalités qui leur sont demandées (articles de références [Erceau et Ferber, 1991] [Chaib-Draa, 1992] [Sycara, 1998]).

Une part importante des travaux conduits en IAD concerne la conception d'architecture individuelle d'agents : la manière dont ils stockent ou manipulent leurs connaissances, leurs capacités de planification, ou leurs compétences [Jennings, 1993] [Rao et Georgeff, 1991] [Gues-soum, 1996] [Lhuillier, 1998]. Cependant les recherches dans ce domaine se placent en rupture

²Le lecteur pourra avec profit se tourner vers les ouvrages et publications ayant servi à écrire la présente section [Ferber, 1995] (notamment chapitres 1.3 historique, 1.4 simulation multi-agent, 4 action et comportement, et 5.7 sur le passage à l'acte réactif) et [Drogoul, 2000] (notamment chapitres 1 et 4).

par rapport à l'approche classique de l'IA³. Elles mettent moins l'accent sur le comportement individuel des agents que sur leurs capacités d'organisation et de fonctionnement en interaction, c'est pourquoi certains travaux s'intéressent par exemple à la notion de représentation sociale [Castelfranchi, 1998] [Drogoul et Picault, 1999].

Le principal axe des recherches conduites en IAD consiste à développer des mécanismes de communication, de coopération, de coordination ou de négociation pouvant permettre à des agents artificiels d'accomplir ensemble les tâches qui leur sont confiées, en tirant parti de leurs compétences individuelles et en exploitant les ressources de l'organisation qu'ils forment (cf. travaux récents [Baeijs et Demazeau, 1996] [Foisel, 1998b] [Foisel, 1998a] [el Fallah-Seghrouchni, 2000] [LeMaître et el Fallah-Seghrouchni, 2000]).

La conception de tels mécanismes a trouvé une importante source d'inspiration dans les modes d'organisation qui permettent à des agents naturels de fonctionner collectivement dans la réalité : de l'auto-organisation physico-chimique [Ashby, 1962] [Atlan, 1972] [Dumouchel et Dupuy, 1983] [von Foester, 1960] aux organisations rationnelles de sociétés, notamment des colonies d'insectes sociaux [Beckers, 1992] [Drogoul, 1993] [Theraulaz, 1991], "tout mode de composition s'est révélé comme métaphore possible d'une procédure de fonctionnement collectif" [Drogoul, 2000].

Le choix en matière de granularité des agents distingue tout de même, au moins historiquement - les frontières ayant tendance à s'estomper - deux écoles de pensée. L'école "cognitive", très prégnante sur la communauté, choisit des systèmes comprenant un petit nombre d'agents déjà complexes, disposant d'une base de connaissance et de facultés de "raisonnement", de prises de décision par rapport à un ensemble d'actions possibles. Au contraire, l'école "réactive" prétend qu'il n'est pas nécessaire que les agents soient individuellement "intelligents" pour que le système ait un comportement global adapté. Des mécanismes de réactions aux événements, ne prenant en compte aucune explicitation des buts ni un quelconque mécanisme de planification, peuvent, par effet de bord, faire émerger des structures qui sont elles-mêmes la ou une des solutions recherchées. C'est cette deuxième école qui s'est le plus intéressé aux modes d'organisation physique et biologique.

2.2.2 Exploration de modes d'organisation.

Bien plus que l'IA classique, peut-être trop obnubilée par les formalismes logiques, l'IAD a été influencée par le concept d'action tel qu'il est utilisé en physique : c'est-à-dire l'action comme déplacement physique, comme accélération. Cette approche s'est montrée particulièrement féconde pour exprimer les comportements d'agents réactifs situés, pour lesquels l'environnement est conçu comme un espace métrique. Lorsque des agents se déplacent, leur comportement se manifeste naturellement comme un mouvement dans un espace euclidien.

Cantonnées longtemps dans une approche symbolique et logique de l'analyse des déplacements, les recherches en planification de mouvement (de robots par exemple) ont connu des avancées spectaculaires lorsque des techniques issues de champs de potentiels ont vu le jour. Ces techniques sont en fait très simples (calcul vectoriel) mais apparaissent encore "spectaculaires" par la simplicité même avec laquelle elles permettent de résoudre certains problèmes difficiles (comme l'évitement d'obstacles). La combinaison de plusieurs champs se superpo-

³qui privilégie l'image du programme isolé, "penseur solitaire" replié sur lui-même

sant peut permettre d'exprimer plusieurs contraintes simultanément [Barraquand et Latombe, 1989] [Reynolds, 1987]. Le principe général est de considérer que les objets de l'environnement émettent des signaux dont l'intensité est proportionnelle à la distance. Les champs peuvent être attractifs (buts) ou répulsifs (obstacle). L'agent suivant les gradients de potentiel, essaye de trouver une trajectoire présentant le meilleur compromis entre l'attraction du but d'une part et la répulsion des obstacles d'autre part. Si l'on désire que la trajectoire passe plus près des obstacles, il suffit de donner une valeur plus "pentue" aux champs répulsifs et inversement de les "arrondir" si l'on désire s'en éloigner. Certaines difficultés toutefois, comme l'existence de minima locaux, ne permettent pas toujours l'application de méthodes aussi simples. Des algorithmes spécifiques, de calcul par vague, ont pu être développés pour répondre à ces problèmes (en considérant non plus la distance absolue mais la distance minimale des chemins menant d'un objet à un autre).

Ces techniques directement inspirées par le mouvement de particules dans des champs en physique ont ouvert une voie qui a dépassé le seul cadre de la description de mouvements. Faire de l'environnement des agents tout à la fois un repère et une mémoire, et baser la sélection d'actions par les agents non plus sur la représentation de cet environnement, mais sur la seule perception locale. Cette notion d'action "située" est devenue une conception très importante en IAD, et notamment en robotique collective ou en vie artificielle. Une autre façon est de dire que "les buts sont dans l'environnement". Cette vision a conduit à des techniques, désormais classiques, d'allocation émergente à l'aide de signaux, de marquage volatile de l'espace où l'on retrouve en substance les mécanismes des phéromones des colonies de fourmis.

Ces concepts de perception de l'environnement ont donc contribué à l'introduction de véritables "tropismes" pour le contrôle des agents. Dans le même temps, l'étude des dynamiques d'insectes sociaux a constitué une source de nombreux modèles désormais classiques, qui vont dans ce même sens. Le plus utilisé s'inspire du modèle d'activation conçu par Konrad Lorenz en éthologie [Lorenz, 1984], qui pose les bases d'une sélection d'actions, par association entre stimulus externes et réponses instinctives, pondérée par des seuils d'inhibition. Ce modèle a servi de noyau aussi bien à des systèmes de simulation comme MANTA [Drogoul et al., 1993] qu'à des systèmes de résolution de problèmes [Drogoul, 1993] ou de systèmes artificiels (comme les "animats" [Meyer et al., 1993]).

2.2.3 Questions de recherche ouvertes

La discipline encore jeune s'est vu (trop) rapidement propulsée sur le devant de la scène et doit aujourd'hui faire face à l'engouement, parfois aveugle, qu'elle suscite. Le milieu universitaire se lance dans des simulations et des modélisations par agents, le milieu industriel, à travers des applications de commerce électronique sur internet ou des préoccupations de méthodes de conception distribuée, tente de s'approprier ces techniques. Cette demande exerce une pression pour la définition d'une méthodologie de conception incrémentale et vérifiable, permettant de formaliser ce domaine riche mais encore flou.

Qu'est-ce qu'un agent ? Quelles définitions peut-on donner à des concepts aussi centraux que interaction, adaptation, situation, pro-activité, autonomie, organisation, etc. qui abondent dans la littérature sur les SMA et sur lesquels personne n'est d'accord ? Une formalisation est

nécessaire ; c'est une tâche difficile⁴.

L'élaboration d'une méthodologie n'est guère plus simple, mais du moins plus concrète dans ces objectifs, car elle s'attache à établir une manière "d'agentifier" un système (par exemple la méthode Cassiopée [Collinot et Drogoul, 1998]). A l'heure actuelle, ce sont davantage des principes méthodologiques qui ont été forgés au cours d'expériences menées autour de longs projets comme le Jardin des Hasards [Hutzler, 2000], Microbes [Drogoul et Picault, 1999] ou l'étho-modélisation [Drogoul, 1993], qui prônent notamment un réductionnisme méthodologique et une conception incrémentale, hiérarchisée en niveaux, inspirée par l'éthologie.

Tout reste à formaliser, mettant en avant, comme le soulignait déjà [Ferber, 1995], la nécessité pour l'IAD d'une démarche de modélisation des systèmes multi-agents eux-même, notamment :

- modélisation des actions des agents et de leurs conséquences sur l'environnement,
- modélisation du fonctionnement même d'un agent, comportements observables et mécaniques internes,
- interaction entre agents et notamment les différents modes de communication,
- l'évolution du système multi-agents, résultant des organisations dynamiques entre agents en interaction,
- la nécessité d'outils, de représentations intermédiaires pour l'appréhension de la dynamique des SMA,
- et corrélativement, le choix en matière de niveau d'abstraction.

De telles questions suscitent l'intérêt non seulement des informaticiens du domaine mais aussi d'une nombre croissant de modélisateurs, utilisateurs de tels systèmes.

Les concepts d'agent et d'organisation ont constitué des pistes intéressantes pour la construction d'outils de simulation des milieux naturels, dans des contextes où interviennent à la fois la dynamique d'une ressource et des processus de décision individuels ou collectifs en œuvre dans son exploitation [Paz-Betancourt, 1997] [Bousquet et al., 1992] [Cambier, 1994] [Cambier et al., 1992] [Barreteau et Bousquet, 1999]. Les succès remportés par ces mises en œuvre ont suscité un engouement pour l'utilisation des systèmes multi-agents dans le cadre de simulations d'écosystèmes [Coquillard et Hill, 1997], de sociétés [Epstein et Axtell, 1996] ou en hydro-géologie [Teles et al., 1998] et géophysique [Marcenac et al., 1997].

Et de fait depuis quelques années une communauté internationale s'est formée qui utilise les systèmes multi-agents pour la simulation dans des domaines divers. Cette communauté s'organise en marge des grandes conférences telle ICMAS [Demazeau, 1998] qui lui accordent aujourd'hui une place plus importante, aux côtés de travaux plus classiques en IAD, dans des workshops à vocation spécialisée comme MABS [Sichman et al., 1998] ; et dans la communauté francophone, à l'occasion de colloques comme SMAGET sur l'utilisation des systèmes multi-agents pour la modélisation de l'environnement [Ferrand, 1998] ou lors des Journées Francophones sur l'IAD et les Systèmes Multi-Agents.

La simulation multi-agents est en passe aujourd'hui de s'affirmer comme une branche à part entière. Elle est partie prenante du débat autour de méthodologie et conception, et apporte un éclairage nouveau sur les questions que l'on vient de formuler en les rapprochant singulièrement des préoccupations exprimées par les utilisateurs des approches particulières

⁴Qu'on en juge par les discussions interminables autour de la définition d'un lexique commun lors du dernier séminaire au vert de l'équipe MIRIAD en avril 2000.

et individus-centrées, notamment sur la possibilité de travailler sur des entités hétérogènes et à différents niveaux d'agrégation, en vue de construire des simulateurs multi-niveaux.

2.3 Démarche et objectifs de la thèse.

A l'issue de cette présentation, il semble exister une certaine similitude entre les modèles que cherchent à construire les modélisateurs des milieux naturels et les systèmes que développent les chercheurs en informatique en IAD.

Cette convergence motive le travail que j'ai entrepris au cours de cette thèse. Il s'agit d'évaluer le potentiel des systèmes multi-agents et de leur paradigme pour la modélisation et la simulation de processus de flux dans les milieux naturels. C'est un travail de recherche méthodologique qui s'est instancié en pratique sur une dynamique de flux particulière autour du projet RIVAGE⁵. L'objectif est de construire un environnement de simulation pour l'étude des processus hydrologiques de ruissellement, d'infiltration et d'érosion, généralisable à d'autres domaines d'application.

Au cours de ce travail, j'ai été amené peu à peu à préciser l'apport des composantes de la recherche sur les agents pour la simulation de dynamiques de flux [Servat et al., 1998] [Servat, 2000].

En premier lieu et au-delà d'une simple question de vocabulaire, le concept d'agent peut être considéré comme une abstraction des entités - particules ou individus - sur lesquels se basent les approches particulières et individus-centrées. Le courant des agents réactifs et les formalisations d'inspiration physique ou mathématique [Kiss, 1996] [Schweitzer, 1997] dans lesquelles des agents dotés d'états internes se déplacent sous l'effet de champs de potentiels qu'ils contribuent à créer, constituent une généralisation de ces approches. Ainsi certaines idées exprimées par les utilisateurs des approches particulières ou IBM, consistant à tirer parti de leur nature lagrangienne pour le suivi de trajectoires ou le calcul d'indicateurs, s'expriment dans le cadre des SMA comme des compétences données aux agents, de percevoir leur environnement local et d'analyser leur trajectoire, en mémorisant l'historique de leurs déplacements.

Les SMA intentionnalisent les règles de déplacement et d'interaction que les approches particulières et IBM décrivent généralement sous la forme d'équations : l'agent se déplace, il n'est pas mu par un processus extérieur. Ce changement de posture, qui n'empêche pas de concevoir l'utilisation de formalisations mathématiques, permet de se donner un espace de liberté beaucoup plus grand, un cadre général dans lequel il devient naturel de concevoir l'ajout, en marge de la dynamique principale que l'on cherche à modéliser, de processus de calcul, de mécanismes de contrôle qui rendent compte de l'apparition au cours de ces dynamiques de situations remarquables.

C'est en ce sens que les SMA peuvent apporter des heuristiques nouvelles. A la fin du chapitre 1, on a vu que la critique essentielle de l'usage intensif de la simulation pour la modélisation de phénomènes provenait de l'absence d'outils d'analyse et d'interprétation de la masse de résultats que fournissent ces simulations. Je suis pour ma part convaincu que la possibilité d'introduire des abstractions informatiques supplémentaires de suivi de trajectoires, de reconnaissance de structures ou de régimes de fonctionnement spécifiques, à l'intérieur

⁵Acronyme pour Ruissellement et Infiltration Vu par des AGENTS.

même d'un modèle central est une voie essentielle pour rendre ces simulations plus expressives, donc plus facilement interprétables. Cela relève pour moi du même besoin de montrer des résultats numériques sous la forme de courbes ou de graphiques. Imaginer un système dont les éléments donnent des informations supplémentaires, expriment ce qui se passe dans le système est un élément essentiel. Les SMA, en donnant une certaine liberté de conception au niveau des entités agissant dans le système permettent d'imaginer de telles constructions.

Dans ce même ordre d'idées, on peut penser, sur un plan d'ingénierie informatique, utiliser les agents sous leur acception cognitive. Il s'agit alors de faire coopérer des agents n'ayant pas nécessairement d'interprétation dans la réalité, pour assurer des tâches nécessaires à la bonne marche des simulations : par exemple des "agents de contrôle" assurant la coordination entre modèles partiels, situés sur des machines différentes, et échangeant, à des rythmes temporels ajustables, données et résultats sous forme de messages [Fianyo et al., 1998] ou encore des "agents médiateurs" chargés de gérer les interactions entre les particules simulées et leur milieu [Treuil, 1998] [Servat, 2000].

Le problème d'introduire des niveaux d'agrégation différents au sein d'une même simulation trouve à mon sens une réponse intéressante dans les concepts de groupe et d'organisation. En dotant les agents de moyens de reconnaître certains modes d'organisation stables et durables, on se donne des moyens pratiques de représenter différents niveaux d'agrégation comme des regroupements d'agents en interaction stable.

On l'a vu, l'enjeu est grand de pouvoir explorer des modes d'organisation de telles entités et de prendre en compte les structures qu'elles font émerger au niveau de la géométrie des milieux naturels. Utiliser ces structures émergentes en les réifiant en objets actifs d'un simulateur au moyen de structures de contrôle informatiques adaptées apparaît possible. Une telle construction dans laquelle des organisations sont tantôt perçues comme des ensembles d'entités microscopiques, tantôt comme des unités macroscopiques, concrétise les changements de points de vue qu'il semble nécessaire de pouvoir adopter dans l'étude de dynamiques de flux (cf. 2.1.3).

Je me suis attaché à concrétiser de telles idées dans la construction d'un simulateur dédié à l'étude de la dynamique de circulation de l'eau en hydrologie, dans lequel des agents représentant des objets hydrologiques se déplacent et interagissent. En construisant mon modèle autour de la notion d'interaction, la vision de l'espace que j'ai été naturellement amené à concevoir est celle d'un espace abstrait, dans lequel peuvent coexister et interagir des agents ponctuels ou spatialement étendus. Cette vision est essentiellement celle d'un espace continu. Ce faisant, cette construction instancie les choix méthodologiques d'une description particulière d'une dynamique dans un espace continu, à laquelle on a prêté a priori un certain nombre d'intérêts (cf. 2.1.3) : prise en compte de conditions aux limites complexes, couplages avec d'autres modèles, prise en compte de structures agrégatives, etc.

La démarche que j'ai menée, de construction d'un modèle ouvert à la prise en compte de couplages entre processus hydrologiques du ruissellement, d'infiltration et d'érosion, puis de transposition à d'autres thématiques, s'est attachée d'une part à évaluer de telles assumptions et à voir dans quelle mesure les modèles que je construisais pour une thématique donnée s'avéraient transposables à d'autres contextes.

En chemin, cette recherche donne un éclairage original sur des concepts aussi fondamentaux pour les SMA que interaction, organisation ou groupe.

Chapitre 3

Application aux processus hydrologiques.

RÉSUMÉ :

Le chapitre précédent a donné le contexte général de mon travail de thèse : mener une recherche méthodologique sur l'application des systèmes multi-agents à la modélisation de dynamiques de flux.

Pour circonscrire cette recherche je me suis investi dans une thématique particulière, la modélisation des processus hydrologiques liés à la dynamique de circulation de l'eau, dans le cadre du projet de construction du simulateur RIVAGE.

L'objectif de ce travail consiste d'une part à évaluer la pertinence de certains choix méthodologiques que l'on a été amené à formuler au chapitre précédent - choix d'une description particulière, choix d'un espace continu, choix d'un paradigme agent - en regard de la prise en compte de situations de couplages et d'interactions diverses, notamment l'apparition de structures agrégatives à des niveaux intermédiaires.

D'autre part concernant le domaine applicatif de l'hydrologie ce travail vise à construire un environnement de simulation permettant à terme de fournir un outil de travail ouvert pour l'étude de questions précises dans cette thématique.

Ce chapitre explicite la place de ce travail dans le contexte des recherches qui sont menées en hydrologie, puis reprend en substance l'essentiel des réalisations informatiques et des expériences de simulation que j'ai menées au cours de ma thèse.

Le lecteur pourra ensuite se reporter aux chapitres suivants qui exposent les différents aspects de ce travail et à l'annexe pour tout ce qui concerne l'environnement de programmation.

3.1 Contexte de recherche en hydrologie.

J'ai cherché à développer la démarche de recherche méthodologique que l'on a exposée au chapitre précédent dans le cadre d'une thématique particulière : les processus physiques liés à la circulation de l'eau en milieu naturel, étudiés en hydrologie.

Les questions de recherche qui sont abordées dans ce domaine montrent une grande variété d'interactions entre des processus de flux (transferts d'eau en surface, infiltration d'eau dans le sol, transports de soluté, etc.) et des objets naturels (réseaux de fossé, aménagements de parcelles, interception par le couvert végétal, etc.), conduisant à l'apparition de régimes de fonctionnement spécifiques, identifiables (mares, chemins d'eau, etc.), qui jouent un rôle important dans certains phénomènes (érosion le long de rigoles, etc.). Ce domaine fournit donc un contexte d'application tout à fait intéressant des principes que l'on cherche à mettre en œuvre : gestion de conditions aux limites, représentation d'espaces organisés, et prise en compte de différents niveaux de description de dynamiques.

En fait historiquement, c'est la richesse même des questions soulevées dans cette thématique qui a principalement motivé la recherche méthodologique plus générale que j'ai menée autour de la modélisation de dynamiques de flux, avec comme point de départ le projet RIVAGE de construction d'un environnement de simulation ouvert pour l'étude de ce type de questions en hydrologie.

Ce projet est né à l'origine d'un constat [Perrier et Cambier, 1996]. La plupart des modèles et simulateurs existant en hydrologie relèvent :

- soit d'outils intégrateurs de gestion à grande échelle comme SHE [Abbot et al., 1986] dont la vocation est de prendre en compte tout un ensemble de processus physiques liés à la dynamique des transferts d'eau.
- soit de modèles construits pour répondre à une question précise, mettant en jeu un ou plusieurs processus hydrologiques dans un cadre bien circonscrit d'étude.

Les premiers intègrent l'ensemble des processus en jeu dans un modèle central et se prêtent difficilement à l'étude d'une question précise identifiant un nombre restreint de processus. Les seconds, construits sur un modèle élaboré pour répondre à des objectifs précis, ne peuvent généralement pas servir de base à des ajouts successifs de composantes pour prendre en compte d'autres processus en jeu dans l'étude de questions nouvelles.

Dans la continuité des premières idées qui ont conduit à la naissance de ce projet [Perrier et Cambier, 1996] [Cambier et al., 1997] et dans le contexte d'une recherche transthématique autour de dynamiques de flux, mon objectif n'a pas été de réaliser un travail de recherche en hydrologie sur une question précise, mais plutôt d'apporter une contribution d'informaticien pour répondre aux enjeux et difficultés soulevés par la construction d'un simulateur qui puisse se révéler à terme un outil de travail ouvert pour l'étude de questions précises dans cette thématique.

Il s'agit donc davantage d'une recherche méthodologique autour de la question suivante : dans quelle mesure un modèle peut-il être conçu de la manière la plus ouverte possible à tous types de couplages dynamiques, non nécessairement présents en tous points de l'espace. Autrement dit, pour situer ce travail par rapport aux outils que l'on vient d'évoquer, le maître-mot n'est pas intégration mais couplage.

3.2. La dynamique du ruissellement.

Le point de départ est de privilégier une démarche incrémentale autour d'une organisation distribuée, plutôt que hiérarchique, mettant en jeu des couplages dynamiques, plutôt que fixes, entre différents modèles de processus : ruissellement, infiltration, érosion. La dynamique des transferts d'eau apparaissant centrale dans tous ces processus, cette organisation s'est construite autour d'un modèle de ruissellement.

3.2 La dynamique du ruissellement.

Les modèles qui sont adoptés en hydrologie pour rendre compte du ruissellement relèvent généralement :

- de modèles mettant en jeu une résolution numérique d'équations aux dérivées partielles, du type Navier-Stokes [Lane, 1998] [Zhang et Cundy, 1989] [Estèves et al., 2000] (éventuellement intégrées : équations de St-Venant ou shallow water equations [Vreugdenhil, 1994]),
- d'approches alternatives à de telles résolutions, mais reposant sur les mêmes bases physiques : simulations de gaz sur réseaux [Garcia-Sanchez et al., 1996] (cf. 2.1.2),
- d'approches simplificatrices, reposant sur des lois de report d'eau de maille en maille sans vitesse [Perrier, 1992] [Darboux, 1999]

On a vu que, d'une part les approches EDP apparaissent relativement contraignantes pour la prise en compte de conditions aux limites complexes et d'hétérogénéités spatiales, d'autre part que les approches de gaz sur réseaux se révèlent pertinentes pour des résolutions spatiales nécessairement fines, et donc circonscrivent généralement l'échelle à laquelle les processus peuvent être étudiés (cf. 2.1.3).

De ce point de vue, les approches mettant en jeu des lois de report, consistant à représenter les transferts d'eau sous la forme de déplacements de volumes d'eau discrets, présentent une plus grande adaptation à des échelles d'étude différentes.

Ainsi, le modèle de précipitons - marcheurs aléatoires portant des quantités d'eau discrètes - développé au département de Géosciences de l'Université de Rennes a permis de traiter des questions diverses à différentes échelles : notamment les travaux de [Crave, 1995] [Crave et Gascuel-Odoux, 1997] sur la formation et l'évolution de réseaux de drainage et de [Darboux, 1999] sur l'effet du stockage de l'eau par la rugosité du sol sur le déclenchement du ruissellement.

C'est sur une idée semblable que les premiers travaux méthodologiques sur RIVAGE [Perrier et Cambier, 1996] [Solignac, 1996] [Cambier et al., 1997] [Treuil et al., 1997] avaient été développés à la même époque : transferts représentés par des mouvements de quantités d'eau discrètes, appelées boules d'eau.

Dans l'optique de permettre des couplages avec des processus d'infiltration et d'érosion pour lesquels apparaissent fondamentales des données non seulement de hauteurs d'eau mais aussi de vitesses, le modèle de ruissellement ne doit toutefois pas trop s'éloigner des modèles physiques du type EDP. Certaines questions ne demandent pas un tel niveau de complexité. Ainsi, dans le cas du travail de [Darboux, 1999], qui cherche à définir des indicateurs quantifiant l'effet de la rugosité sur la capacité de stockage d'une surface, un modèle comme celui des précipitons dans lequel les vitesses sont négligées et les mouvements discrétisés sur une grille

répond au problème : pour prendre en compte une dynamique temporelle, on définit alors un temps universel correspondant à un cycle d'exécution des marcheurs aléatoires. Toutefois, lorsqu'il s'agit par exemple d'introduire un couplage avec un processus d'infiltration, cet aspect devient plus gênant, comme le signale Darboux : le processus d'infiltration n'intervient qu'à la fin du pas de temps, et ne porte que sur les quantités d'eau stockées dans les dépressions, la contribution de l'eau ruisselante n'étant pas du tout prise en compte.

Le modèle de ruissellement de RIVAGE doit donc se situer à un niveau plus élevé de généralité aussi bien dans la prise en compte de l'espace que des dynamiques, en permettant si possible de donner le même type d'informations (vitesses, hauteurs d'eau, temps, etc.) que des modèles EDP, de façon à permettre des couplages qui nécessiteraient de telles informations ; quitte à ne se servir que d'une partie de ces informations, lorsque la question étudiée autorise des simplifications plus importantes.

Sur ces principes, en reprenant l'idée d'un modèle de ruissellement qui repose sur des transferts de boules d'eau dans un espace continu, j'ai cherché à donner des règles de mouvement qui offrent une prise en compte des vitesses et des accumulations d'eau, proche de celle des modèles EDP. Cette recherche m'a conduit à utiliser un formalisme d'interpolation permettant de calculer localement une hauteur comme une densité de boules d'eau dans un certain voisinage.

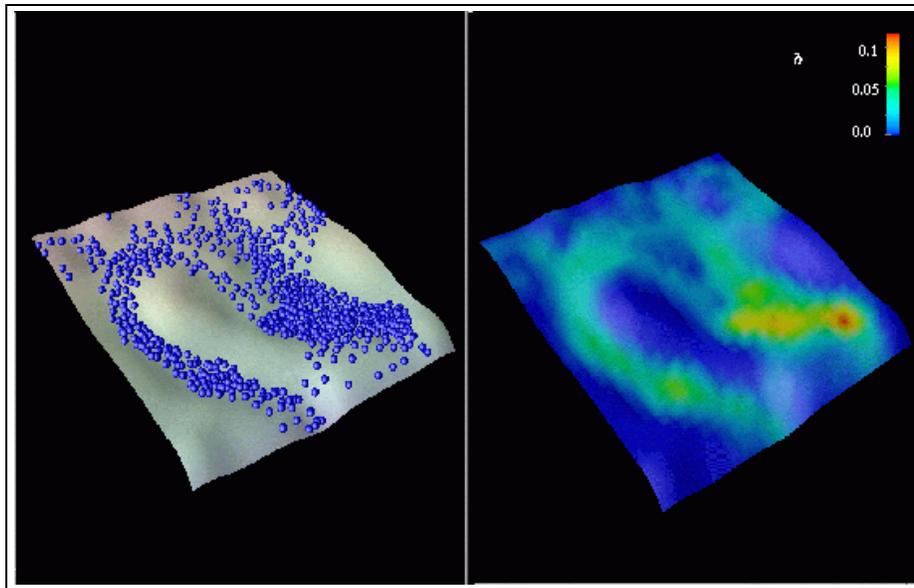


FIGURE 3.1 – Vision particulière et continue du ruissellement.

L'exposé de ce modèle central est fait au chapitre 4. A tout moment on peut obtenir simultanément une vision particulière (positions des boules d'eau) et une vision continue correspondante (champ de hauteur d'eau) (cf. figure 3.1). Un important travail de validation a été conduit, en collaboration avec Joël Léonard, étudiant en thèse d'hydrologie au LIA, pour établir la convergence de ce modèle, notamment on a mené une comparaison avec les solutions obtenues par un modèle EDP utilisé par Léonard pour les besoins de sa thèse [Léonard et al., 1999].

3.3. Couplage avec d'autres modèles.

On a pu tester ensuite l'intérêt d'une approche particulière en conduisant des expériences de calcul de temps de transfert et de suivi de l'évolution des isochrones de surfaces d'étude. Ces expériences pourraient constituer les bases d'une contribution aux travaux qui portent en hydrologie sur la définition fonctionnelle d'indicateurs de rugosité.

3.3 Couplage avec d'autres modèles.

Après avoir assis la construction du simulateur sur des bases physiques acceptables, j'ai cherché à ajouter au modèle la possibilité de prendre en compte des couplages dynamiques :

- soit avec des objets naturels existant dans le milieu naturel, par exemple des aménagements anthropiques, qui apparaissent comme des conditions aux limites d'écoulement de l'eau ruissellante. Ce type de couplage est illustré par l'exemple d'un barrage régulant le flux d'une crue (cf. figure 3.2),

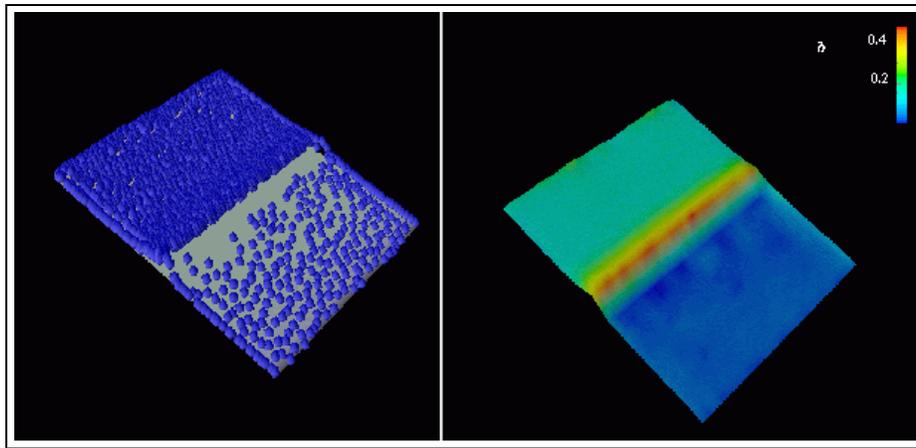


FIGURE 3.2 – Interception par barrage.

- soit avec des modèles existants représentant d'autres processus liés aux transferts d'eau, par exemple les processus d'infiltration. Sur ce point on a testé deux types de modèles :
 1. une infiltration au niveau de zones de sols hétérogènes dont les vitesses d'infiltration suivent un modèle de Green et Ampt [Neuman, 1976] (cf. figure 3.3),
 2. une interception du flux par des objets de type macropores biologiques en utilisant le modèle développé par [Léonard et al., 1999].

L'ensemble de ce travail est exposé au chapitre 5.

Ces expériences présentent des exemples d'interactions possibles. On peut en imaginer d'autres types (fossés, végétation, etc.), et pour le même type, différents modèles peuvent être couplés. On s'est ici davantage intéressé à tester l'ouverture à des couplages qu'aux modèles d'infiltration eux-mêmes, qui pourraient être simplifiés (en donnant une probabilité d'infiltration aux boules d'eau en fonction de la zone de sol sur laquelle elles se trouvent) ou complexifiés (en utilisant un calcul de l'infiltration à l'aide des équations de Richards). Lorsque les boules d'eau s'infiltrèrent, elles disparaissent actuellement de la simulation. Toutefois, elles pourraient être prises en charge par un modèle d'écoulement de sub-surface.

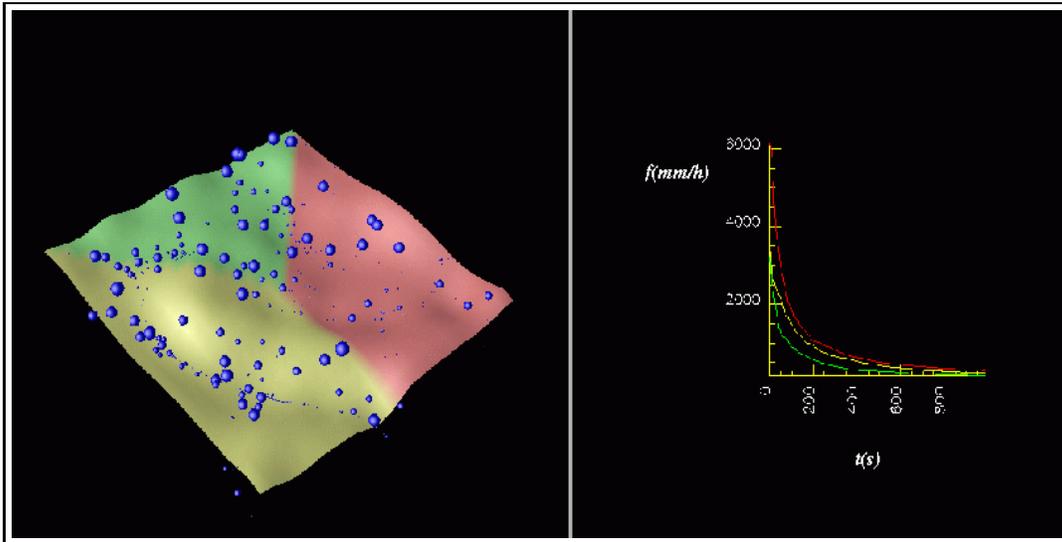


FIGURE 3.3 – Infiltration sur des zones de sol.

Dans toutes ces situations, on a pu exprimer de façon assez naturelle des règles d’interaction entre agents boules d’eau et agents puits ou obstacles. Un certain type d’interaction - diminution du volume d’eau porté, changement de direction - est spécifié et intervient lorsqu’il y a co-occurrence des deux agents dans un voisinage local.

Ces exemples montrent que l’on peut facilement mettre en place des simulations faisant intervenir certaines composantes du milieu naturel, et que le simulateur RIVAGE peut servir de support à des études exploratoires. Ainsi des travaux ont montré que l’apparition de bandes de végétation sur des sols dégradés (“brousse tigrée”) est largement due à l’alternance d’états de surface qui conditionnent infiltration et ruissellement, donc l’approvisionnement en eau de la végétation [Valentin et al., 1999] [Thiéry et al., 1995]. Sur cette question on peut imaginer introduire une nouvelle couche d’information représentant le couvert végétal et prendre en compte des couplages avec différentes structures d’états de surface (limitant l’infiltration) représentées par différentes zones de sol.

3.4 Autres pistes de modélisation.

Par ailleurs, j’ai développé des pistes de modélisation sur érosion, infiltration et états de surface du sol, comme exemples d’interactions entre dynamiques de flux et supports spatiaux. A partir de travaux existant (notamment [Bradford et Foster, 1996] [Fox et Bryan, 1999] [Favis-Mortlock et al., 1998] [Planchon et al., 1999a] [Planchon et al., 1999b] [Planchon et al., 1987]) et de discussions informelles avec des chercheurs à l’IRD dans cette thématique, j’ai développé un premier modèle qui prend en compte au cours d’une pluie les phénomènes d’érosion en splash (détachement entraîné par les impacts de gouttes de pluie) et érosion linéaire (le long de rigoles d’eau), en dotant de nouveaux comportements les agents boules d’eau, en introduisant des agents représentant les transferts de matière arrachée par l’érosion, et en intégrant le modèle réalisé auparavant pour rendre compte de l’infiltration. Cette intégration est vue comme un couplage supplémentaire dans la nouvelle description de l’érosion.

3.5. Prise en compte de différents niveaux d'agrégation.

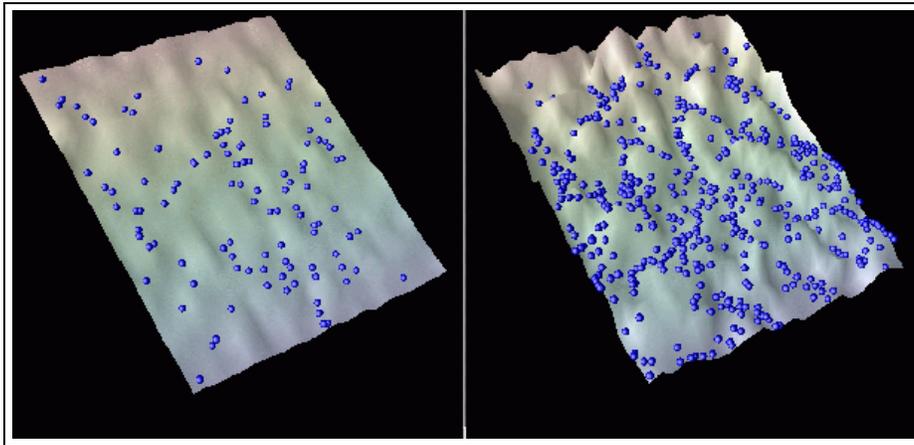


FIGURE 3.4 – Erosion d'une surface de sol.

Ce travail a conduit à des explorations par simulation de l'évolution d'une surface de sol sous l'action de ces processus érosifs (cf. figure 3.4). On a cherché à retrouver certaines relations de dépendance qui ont été observées dans des expériences de terrain, entre la pente locale de la surface d'étude et, d'une part les quantités de matière transportée, d'autre part les quantités d'eau infiltrée.

La description des différents modèles et résultats est faite au chapitre 6.

Le travail réalisé sur l'érosion montre que le choix d'une approche particulière et d'un espace continu permet de se prêter assez facilement à l'exploration d'hypothèses de fonctionnement définies à un niveau local, échelle à laquelle sont exprimées les descriptions de terrain.

D'une façon générale, la recherche principalement d'ordre méthodologique que j'ai menée en hydrologie, que ce soit sur le ruissellement ou l'érosion, a fourni un grand nombre de pistes qu'il faudrait approfondir en travaillant sur des questions de recherche plus précises en liaison avec des données mesurées.

3.5 Prise en compte de différents niveaux d'agrégation.

Cette partie ne concerne pas directement des questions thématiques de recherche en hydrologie. Elle constitue plutôt une recherche dans le cadre du formalisme agent des moyens pratiques de fournir des outils de suivi et d'interprétation d'une dynamique de flux au cours d'une simulation.

Dans le cas de l'eau, les trajectoires des boules d'eau sont largement contraintes par le profil topographique de la surface sur laquelle elles se déplacent. En remarquant que les boules d'eau se concentrent le long de chemins préférentiels ou s'accumulent dans des dépressions locales, on peut vouloir interpréter de tels rassemblements de boules comme des objets hydrologiques macroscopiques - mares, chemins d'eau.

En dotant les boules d'eau de moyens d'analyser leur trajectoire et l'historique des interactions qu'elles entretiennent avec d'autres boules d'eau dans un voisinage local, les agents boules d'eau peuvent reconnaître des situations d'interaction stables et former des regroupe-

ments correspondant à différents modes d'organisation caractéristiques. J'ai étudié les conditions d'instanciation automatique d'agents représentant d'un point de vue macroscopique de tels regroupements (cf. figure 3.5).

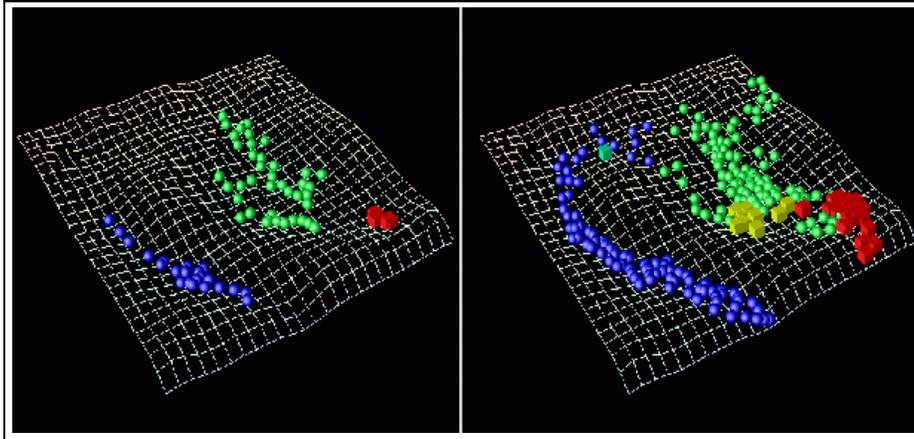


FIGURE 3.5 – Suivi de mares et de chemins d'eau.

Ces agents permettent de rendre compte d'une structuration du réseau de drainage d'une surface. Le suivi au cours du temps de leurs créations, fusions et disparitions constitue une source d'information intéressante. Ainsi on peut imaginer utiliser de telles constructions pour valider à des niveaux intermédiaires des simulations, en confrontant les caractéristiques de ces agents (extension spatiale, volume, vitesse et hauteur d'eau moyenne) à des données observées sur le terrain (photographies d'extension de mares ou chemins d'eau et extraction de ces objets par analyse d'image, mesures de débit et de hauteur d'eau pour un de ces objets identifiés sur le terrain). De telles données n'ont pas été accessibles au cours de ce travail, toutefois on a cherché à donner une idée de ce type d'utilisation en réalisant des simulations sur des surfaces contrôlées pour lesquelles l'évolution du nombre et de la taille de tels objets s'avèrent caractéristique.

L'ensemble de ce travail est exposé au chapitre 7.

Cette vision peut être développée pour introduire en début de simulation des mares et des chemins d'eau déjà existant. On peut aussi imaginer utiliser de tels agents pour spécifier de nouveaux modèles de comportements des boules d'eau les constituant. Ainsi le modèle d'érosion défini précédemment peut être revisité en décrivant les processus érosifs au niveau de ces agents macroscopiques : un chemin d'eau érode la surface le long de sa trajectoire, une mare dépose des quantités de matière transportée par l'eau.

Par ailleurs, la possibilité d'introduire de tels objets ou comportements à des niveaux plus agrégés laisse entrevoir un éventail plus large d'échelles auxquelles peuvent être mis au point des modèles de ces processus complexes : par exemple, à l'échelle d'un bassin versant ou du lit d'un fleuve pour laquelle une description microscopique des processus d'érosion, de formation de croûtes et d'infiltration apparaîtrait contraignante pour introduire des informations de terrain qui sont réalisées à l'échelle humaine. Dans ce cas on peut imaginer réaliser un travail semblable à celui de [Teles et al., 1998] sur l'évolution des méandres d'une rivière mais sur une échelle de temps plus courte à laquelle la dynamique de circulation de l'eau semble jouer un rôle déterminant (rivières en tresse [Murray et Paola, 1994]).

3.6 Plan de l'exposé.

Les chapitres qui suivent reprennent l'ensemble de ces travaux dont on a donné ici un rapide aperçu. La démarche de recherche que j'ai suivie peut se lire à deux niveaux.

Tout d'abord, du point de vue du domaine d'application, l'hydrologie, il me semble que les différentes expériences que j'ai réalisées ouvrent la voie à un environnement de simulation intéressant pour l'étude d'un certain nombre de questions de recherche. En prenant le parti d'exposer une démarche de construction, j'ai voulu montrer la possibilité de travailler à la conception de modèles originaux dans un formalisme agent. En ce sens, RIVAGE est conçu comme un outil dont on peut étendre les fonctionnalités et que l'on peut utiliser comme support de constructions de modèles.

Par ailleurs, les modèles et techniques que j'ai mises au point dans cette thématique s'inscrivent dans une démarche plus générale de modélisation de dynamiques de flux. Le chapitre 8 montre que la plupart de ces réalisations peuvent trouver d'autres champs d'application pour la modélisation d'autres phénomènes de flux (mouvement de foules) mais aussi dans un contexte plus informatique, où l'on souhaite structurer spatialement un flux de données.

Enfin ce travail a suscité un certain nombre de réflexions méthodologiques intéressant la conception des systèmes multi-agents, notamment concernant la représentation et la gestion de l'espace d'interaction entre agents et la représentation à des niveaux intermédiaires d'organisation d'agents. Ces réflexions sont présentées au chapitre 9.

La construction de ces modèles et la mise au point de ces simulations ont nécessité un important travail de programmation. Le besoin impérieux de disposer d'outils de visualisation souples et riches a demandé une recherche d'environnements de programmation adaptés à de telles exigences. Cette recherche fut difficile et j'ai été amené de nombreuses fois à reprogrammer mon système sous différentes plate-formes. On trouvera en annexe une présentation de ces aspects techniques. Ce travail m'a permis toutefois d'acquérir la conviction que les techniques et idées que j'ai expérimentées peuvent être facilement implémentées avec différents langages, selon différentes architectures, et peuvent donc être intégrées à différentes applications informatiques.

Chapitre 4

Modélisation du ruissellement.

RÉSUMÉ :

Ce chapitre présente l'élaboration du modèle de ruissellement qui sert de noyau central dans le simulateur RIVAGE. On expose notamment les processus de calcul de hauteurs d'eau et de vitesses qui interviennent dans le mouvement des agents boules d'eau et qui reposent sur un formalisme général d'interpolation.

Le comportement du modèle est ensuite évalué avec une série d'expériences :

- quelques vérifications préliminaires sont réalisées pour s'assurer de la cohérence du modèle : notamment calcul de hauteur d'eau et test de ruissellement sur un plan incliné,
- une analyse de sensibilité aux paramètres du modèle est conduite dans des simulations d'épisodes pluvieux sur des surfaces topographiques synthétiques : cette étude permet d'établir la convergence du modèle,
- une comparaison quantitative est réalisée entre les solutions produites par le modèle et les solutions obtenues par un modèle de résolution d'équations aux dérivées partielles du type Navier-Stokes.

Ensuite, on cherche à montrer l'intérêt que représente la nature lagrangienne du modèle RIVAGE, en exposant quelques résultats de simulation concernant le calcul de temps de transfert au cours d'une pluie, pour différents types de surfaces topographiques. La possibilité de suivre les trajectoires individuelles des boules d'eau permet de visualiser l'évolution des isochrones en cours de simulation, ce qui constitue un atout intéressant pour l'étude de dynamiques de ruissellement, ou de traçage de solutés.

4.1 Construction du modèle.

A partir de la définition des agents boules d'eau et des agents responsables de la gestion des données de pluie et des données topographiques, on présente le cheminement qui a conduit à la définition des règles de mouvement des agents boules d'eau sur lesquelles repose le modèle de ruissellement mis en œuvre dans RIVAGE.

Le modèle est ensuite présenté, accompagné de vérifications préliminaires concernant la cohérence des processus de calcul mis en jeu.

4.1.1 Premiers éléments.

Transferts d'eau.

Le modèle de ruissellement développé dans le simulateur RIVAGE représente les transferts d'eau en surface par le mouvement d'agents boules d'eau portant des quantités d'eau discrètes dans un espace continu en deux dimensions.

Chaque agent i possède une position \vec{r}_i et une vitesse \vec{v}_i . Le temps est discrétisé en pas de temps Δt . A chaque pas de temps, les agents boules d'eau évaluent leur vitesse et se déplacent en $\vec{r}'_i = \vec{r}_i + \Delta t \vec{v}_i$.

Les quantités d'eau ω_i portées par les boules d'eau sont a priori quelconques. Elles correspondent au niveau de discrétisation choisi en fonction de l'épisode pluvieux et de l'étendue de la surface considérée. Le terme "boule d'eau" rappelle qu'il s'agit d'une abstraction : ce ne sont pas des "gouttes de pluie" - dont l'existence cesse dès l'impact au sol.

Représentation d'un épisode pluvieux.

Un épisode pluvieux est représenté par la génération d'une distribution aléatoire uniforme de boules d'eau sur la zone des précipitations

Plus précisément, des données de pluie (hyétogramme et zone spatiale) sont fournies à un agent pluie. Un hyétogramme correspond aux variations au cours du temps de l'intensité des précipitations : par exemple $22.2mm/h$ pendant 5 minutes, puis $100mm/h$ pendant 2 minutes, etc. A chaque Δt , l'agent pluie génère un nombre entier de boules d'eau correspondant au volume des précipitations qui s'abat sur la zone spatiale pendant Δt .

Pour représenter au mieux l'épisode pluvieux, le nombre de boules d'eau générées varie d'une ou deux boules d'un pas de temps à l'autre de façon à ce que, en moyenne, l'intensité de la pluie simulée corresponde à celle de la pluie réelle. A chaque Δt , l'agent pluie mémorise l'excès ou le défaut de pluie pour le compenser aux pas de temps suivants.

La zone des précipitations peut être un sous-domaine de la surface considérée. Elle peut varier au cours du temps. Plusieurs agents de ce type peuvent coexister et générer des précipitations différentes sur diverses sous-parties de la zone géographique considérée. On pourrait de cette manière représenter des épisodes pluvieux complexes.

Informations topographiques.

Les informations topographiques de la surface d'étude peuvent prendre différentes formes : échantillonnage sur un maillage de résolution donnée, c'est le cas des Modèles Numériques de Terrain (MNT), il peut s'agir de courbes de niveaux ou même de points échantillonnés de façon irrégulière sur un domaine d'étude.

Toutes ces données sont fournies à un agent topographie. Son rôle est de donner à toute position \vec{r} une altitude z et une pente locale ∇z . Cette fonction est assurée par interpolation des données échantillonnées. La faculté de prendre en compte une grande variété de type de représentation de ces données est obtenue grâce à deux modules de calcul générique Gradient et Map (cf. annexe).

Plusieurs agents de ce type pourraient coexister de façon à représenter des surfaces d'étude complexes, dont certains sous-domaines ne relèveraient pas des mêmes données (échantillonnages plus ou moins fins par exemple).

4.1.2 Mouvement des agents boules d'eau.

A partir des éléments que l'on vient de décrire on s'intéresse à l'élaboration progressive des règles de mouvement des agents boules d'eau.

L'idée de départ consiste à déplacer les agents boules d'eau dans la direction de plus grande pente de la surface d'étude, c'est-à-dire en suivant ∇z que l'on peut calculer par interpolation en tout point et en associant à ce gradient une vitesse.

Dans ce cas, on observe que les agents boules d'eau se déplacent de façon tout à fait réaliste, mais finissent par atteindre un minimum local de la surface topographique et n'en sortent plus. Cette idée ne convient donc pas car elle ne tient pas compte des accumulations d'eau dans les dépressions.

Ce problème de gestion des minima locaux a souvent été la source de difficultés dans les modèles qui reposent sur des lois de report de maille en maille. Pour de grands domaines, une solution radicale a été parfois utilisée : prétraiter les données de topographie pour éliminer de tels minima, considérés comme des artefacts à l'échelle d'étude. Cette solution permet de fait aux transferts d'eau d'atteindre l'exutoire de la surface¹, les bilans globaux obtenus sont généralement corrects mais la répartition spatiale des hauteurs d'eau est évidemment erronée.

Une autre solution consiste, toujours dans le cas d'un maillage, à sommer en chaque point la hauteur d'eau h et l'altitude z de la topographie. Les reports se font alors d'une maille à l'autre en choisissant la maille la plus basse. Cette solution permet de gérer efficacement l'accumulation d'eau dans les dépressions [Perrier, 1992] [Crave, 1995].

Dans un espace continu sans maillage, cette question est plus difficile. J'ai essayé plusieurs solutions, notamment définir des potentiels de répulsion entre agents boules d'eau, inspirés par les travaux utilisant des champs de potentiel en systèmes multi-agents (par exemple [Arkin, 1990]). Cette première approche s'est révélée difficile à mettre en œuvre.

Une autre idée, inspirée par la solution adoptée communément pour les modèles de report,

¹ c'est-à-dire le point le plus bas du domaine considéré.

est d'utiliser le gradient $\nabla(h+z)$ à la place de ∇z pour la déplacement des boules d'eau. Ainsi, les boules d'eau suivent les variations de la surface libre des écoulements et les accumulations d'eau dans les dépressions sont correctement gérées.

Le problème revient donc à estimer localement $\nabla(h+z)$.

Si l'on se donne un certain nombre de points autour de la position de la boule d'eau considérée et que l'on sache calculer h en chacun de ces points, il suffit alors que la boule d'eau se déplace vers le point minimisant $z+h$. Le problème revient alors à estimer h .

Pour cela une idée consiste à considérer que les hauteurs d'eau sont proportionnelles aux densités locales de boules d'eau. Par exemple, pour calculer h en un point \vec{r} donné, on se donne un voisinage $V(\vec{r}, \eta)$ centré en \vec{r} et de rayon η . On somme le volume des boules d'eau présentes sur $V(\vec{r}, \eta)$ et l'on divise par l'aire de $V(\vec{r}, \eta)$.

De cette façon :

$$h(\vec{r}) = \frac{1}{\pi\eta^2} \sum_i \omega_i \quad (4.1)$$

où i indexe les boules d'eau présente dans $V(\vec{r}, \eta)$ et ω_i représente leur volume.

Malheureusement ce principe de calcul relativement simple se montre très sensible aux discontinuités locales. Le problème vient du fait que toutes les boules d'eau présentes dans un voisinage $V(\vec{r}, \eta)$ apportent la même contribution à la hauteur d'eau. Pour obtenir une estimation plus robuste aux discontinuités, on peut donc penser pondérer les contributions de chaque boule d'eau en fonction de leur distance au point de mesure.

Schématiquement, par rapport à l'équation 4.1, cela revient à utiliser une fonction de lissage $W(\vec{r}, \eta)$:

$$h(\vec{r}) = \sum_i \omega_i W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta) \quad (4.2)$$

où \vec{r}_i représente la position d'une boule d'eau i , présente dans $V(\vec{r}, \eta)$.

L'équation 4.2 rentre dans un cadre tout à fait général de calcul d'interpolation basée sur des fonctions radiales [Baxter, 1992]. La fonction $W(\vec{r}, \eta)$ est appelée fonction de noyau et doit posséder un certains nombres de "bonnes" propriétés pour qu'un tel calcul soit valide, en particulier :

$$\int_{V(\vec{r}, \eta)} W(\vec{r} - \vec{r}', \eta) d\vec{r}' = 1 \quad (4.3)$$

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} W(\vec{r} - \vec{r}', \eta) = \delta(\vec{r} - \vec{r}') \quad (4.4)$$

Dans ce cas, et si de plus W est différentiable, on peut calculer directement h et ∇h :

$$h(\vec{r}) = \sum_i \omega_i W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta) \quad (4.5)$$

$$\nabla_{\vec{r}} h = \sum_i \omega_i \nabla_{\vec{r}} W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta) \quad (4.6)$$

4.1. Construction du modèle.

uniquement à partir des volumes ω_i des boules d'eau et de leurs positions \vec{r}_i , sans avoir recours à un quelconque maillage.

C'est la solution qui est mise en œuvre dans la version actuelle de RIVAGE. Cette recherche m'a amené à découvrir que les approches particulières du type SPH (cf. 2.1.2) s'appuient sur le même type de formalisme d'interpolation dans leur dérivation lagrangienne des équations de Navier-Stokes [Monaghan, 1992].

Ceci m'a conduit à utiliser l'une des fonctions de noyau classiques de la littérature SPH [Morris, 1996], définie par :

$$W(\vec{r}, \eta) = \frac{15}{7\pi} \begin{cases} \frac{2}{3} - s^2(1 - \frac{s}{2}) & 0 \leq s < 1 \\ \frac{1}{6}(2 - s)^3 & 1 \leq s < 2 \\ 0 & s > 2 \end{cases} \quad (4.7)$$

où $s = \|\vec{r}/\eta\|$.

C'est cette fonction que l'on utilise dans l'ensemble des travaux qui sont présentés dans ce mémoire. Les variations de cette fonction et de sa dérivée sont visibles à la figure 4.1.

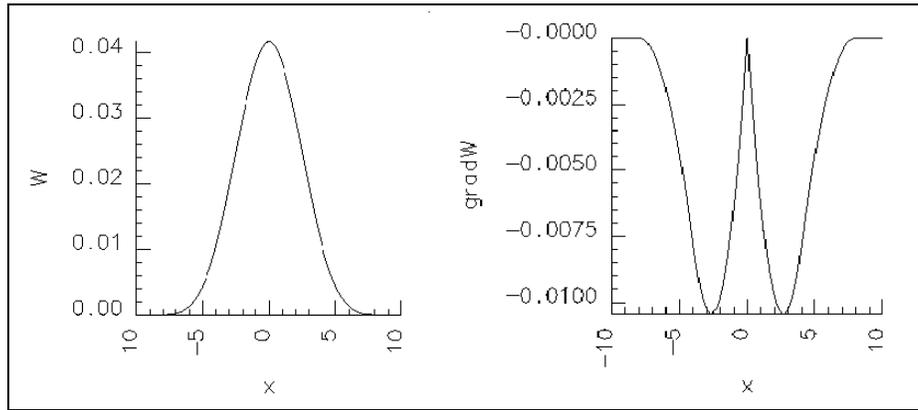


FIGURE 4.1 – Variations des fonctions W et ∇W utilisées pour les calculs de h et ∇h avec $\eta = 4$.

A partir des équations 4.5 et 4.6 et de l'interpolation des données de topographie on peut calculer $\nabla(h + z)$ et h .

On a choisi de relier ces données à la vitesse des boules d'eau en utilisant la formule de Darcy-Weisbach valide pour des fluides en écoulement uniforme² [Vreugdenhil, 1994] :

$$\vec{v}(\vec{r}) = \sqrt{\frac{8gh\nabla_{\vec{r}}(h+z)}{f} \frac{\nabla_{\vec{r}}(h+z)}{\|\nabla_{\vec{r}}(h+z)\|}} \quad (4.8)$$

où f est le coefficient de frottement, g l'accélération de pesanteur, z l'altitude locale et h la hauteur d'eau locale.

On peut maintenant exposer le modèle complet.

²qui se trouve donc en accord avec l'approximation consistant à négliger les termes d'accélération dans les équations de Saint-Venant.

4.1.3 Le modèle.

A chaque pas de temps Δt :

1. un agent pluie génère une distribution aléatoire uniforme d'agents boules d'eau de même volume ω sur la zone spatiale de précipitation. Ces nouveaux agents augmentent la population d'agents boules d'eau déjà présents sur la surface.
2. chaque agent boule d'eau :
 - (a) cherche l'ensemble des agents boules d'eau avec lesquels il est en interaction, c'est-à-dire ceux situés dans un voisinage de rayon 2η autour de sa position,
 - (b) obtient de l'agent topographie la pente locale ∇z ,
 - (c) calcule les hauteurs et gradients de hauteur d'eau à partir de la liste des boules d'eau voisines selon les équations 4.5 et 4.6,
 - (d) calcule sa vitesse selon l'équation 4.8 et valide son déplacement $\vec{r}' = \vec{r} + \vec{v}\Delta t$, en particulier si son déplacement l'amène en dehors de la surface, l'agent est détruit et retiré de la grille, ou si le bord franchi est fermé, son déplacement est recalculé après annulation de la composante de la vitesse normale au bord³.

Ces algorithmes sont implémentés dans un certain nombre de modules (cf. annexe). Les mêmes modules sont utilisés pour calculer le champ des hauteurs d'eau ou de vitesse aux points d'un maillage donné. Ainsi à chaque pas de temps, on peut retrouver à partir de la distribution de boules d'eau, le champ de variables continues (h, \vec{v}) sur tout le domaine d'étude.

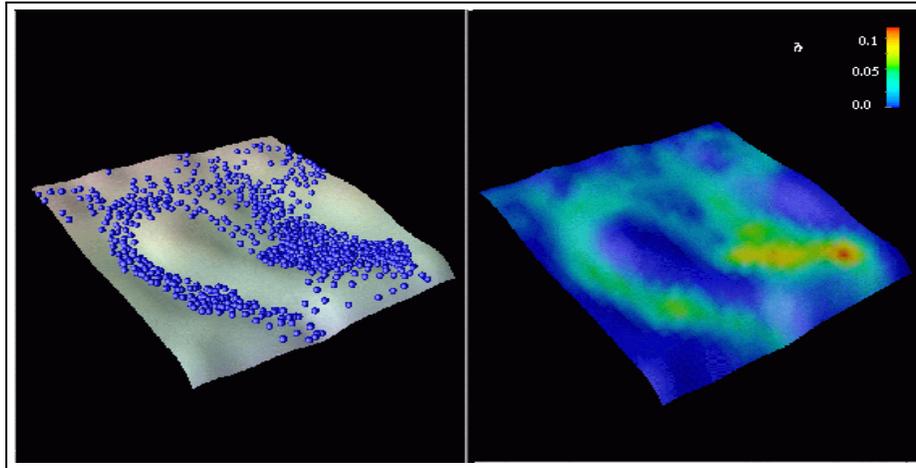


FIGURE 4.2 – Positions des boules d'eau sur une surface topographique et champ de hauteur d'eau correspondant. Les couleurs correspondent aux valeurs des hauteurs d'eau.

Ainsi la figure 4.2 montre une distribution de positions des boules d'eau et le champ continu de hauteur d'eau associé. La figure 4.3 montre cette même distribution et le champ continu des vitesses correspondant.

On peut noter que ce modèle fournit d'une façon assez simple les mêmes données (hauteurs d'eau, vitesses) que des modèles analytiques du type EDP, permettant d'effectuer des comparaisons entre ces deux approches. Une telle comparaison est exposée en 4.3.

³Ceci permet d'établir une condition de flux nul sur certains bords du domaine

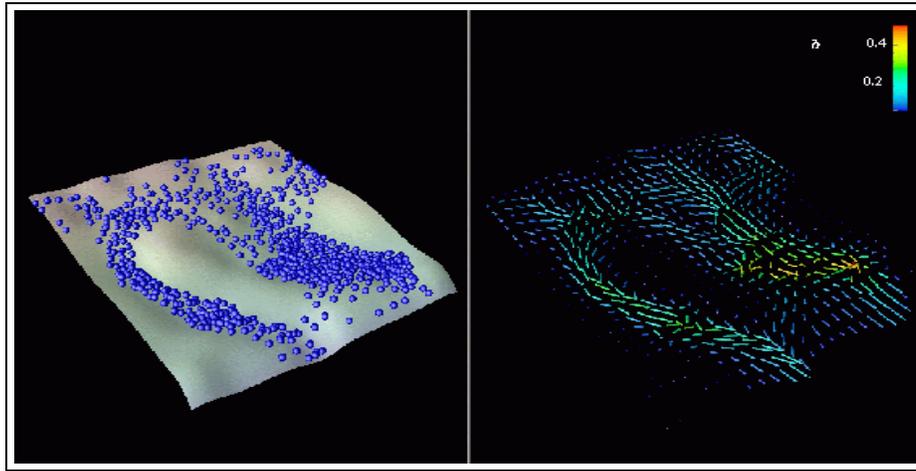


FIGURE 4.3 – Positions des boules d’eau sur une surface topographique et champ de vitesse correspondant. Les couleurs sont fonction des hauteurs d’eau.

4.1.4 Quelques points techniques.

Repérage spatial.

Les calculs d’interpolation font intervenir des sommations sur l’ensemble des boules d’eau présentes dans un voisinage de rayon 2η autour de la position d’une boule d’eau considérée⁴.

Pour une population de n boules d’eau, chaque itération nécessite donc a priori n^2 opérations (calcul des distances entre boules). Une telle complexité entraîne assez rapidement des temps de calcul élevés.

Une solution classiquement adoptée [Hockney et Eastwood, 1988] consiste à utiliser une grille de repérage permettant de localiser et d’ordonner les boules d’eau dans l’espace. En prenant des cases de taille égale à 2η , on limite la recherche aux huit cases voisines de celle dans laquelle est située la boule d’eau considérée. Autrement dit, si m est le nombre moyen de boules d’eau par case, la complexité est réduite à $n * m$ par case à parcourir, soit $9n * m$.

Cette structure de grille, qui peut être implémentée très facilement sous la forme de listes chaînées par exemple, n’intervient que comme moyen de localisation, elle n’affecte pas les résultats des calculs, elle permet seulement d’accélérer la vitesse de l’algorithme.

La construction d’une telle liste de voisins à partir d’une grille de repérage pourrait être confiée à un agent médiateur, chargé de fournir à un agent donné, situé dans l’espace, la liste des agents présents dans son voisinage avec lesquels il est susceptible d’être en interaction. Le rôle de tels agents médiateurs est discuté en 9.1.2.

Gestion synchrone ou asynchrone.

Le déplacement des boules d’eau peut se faire de façon synchrone ou asynchrone. Les deux modes de fonctionnement sont implémentés.

⁴au-delà de 2η la fonction de noyau est nulle

En mode synchrone, tous les agents boules d'eau se déplacent en même temps, donc calculent gradient et hauteur d'eau à partir de la même distribution d'agents. Les déplacements sont validés à la fin d'une itération, pour tous les agents. La distribution obtenue sert pour l'itération suivante.

En mode asynchrone, au cours d'une même itération, le déplacement de chaque boule d'eau est validé l'un après l'autre, donc les boules d'eau tiennent compte du déplacement de leurs voisines. L'ordre de déplacement est tiré aléatoirement pour éviter des artefacts.

Il est intéressant d'observer les différences de résultats obtenus par ces deux méthodes. Schématiquement on peut synthétiser ces différences en regardant le cas de deux boules d'eau. Dans le cas synchrone, les contributions des deux boules d'eau l'une pour l'autre sont symétriques, de par la symétrie de la fonction W . En revanche dans le cas asynchrone, la première des deux boules qui se déplace n'a pas la même contribution que la deuxième après son déplacement : en particulier, lorsque la première se rapproche de la deuxième, la hauteur d'eau augmente, et diminue si elle s'en éloigne.

On a pu constater que l'asymétrie entraînée par une gestion asynchrone pouvait présenter l'avantage de lisser davantage les discontinuités de hauteur d'eau, lorsque des accumulations de boules d'eau se produisent (minima locaux). Aussi est-ce la version asynchrone que nous utilisons couramment pour les simulations de ruissellement.

4.1.5 Premières vérifications.

Le modèle ayant été défini, on cherche à faire un certain nombre de vérifications concernant la cohérence des processus de calculs mis en jeu. Notamment, on s'intéresse :

- à vérifier la convergence du calcul de hauteur d'eau par la formule d'interpolation 4.5 pour différentes valeurs de η dans le cas d'une hauteur d'eau constante représentée par une distribution aléatoire de boules d'eau (cf 4.1.5),
- à observer si les écoulements de boules d'eau sont suffisamment réguliers pour permettre l'établissement d'un régime permanent dans un cas simple de ruissellement sur un plan incliné (cf. 4.1.5).

Estimation d'une hauteur d'eau constante.

Dans ce paragraphe, il s'agit de tester la formule de calcul de la hauteur d'eau h par la formule d'interpolation (équation 4.5) :

$$h(\vec{r}) = \sum_i \omega_i W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta)$$

où ω_i désigne le volume d'eau portée l'agent boule d'eau i .

On utilise la fonction de noyau W définie par l'équation 4.7.

L'expérience consiste à générer une distribution aléatoire de boules d'eau représentant une hauteur d'eau constante sur une surface plane. On estime ensuite la hauteur d'eau en utilisant la formule précédente pour des valeurs croissantes de la longueur du noyau η .

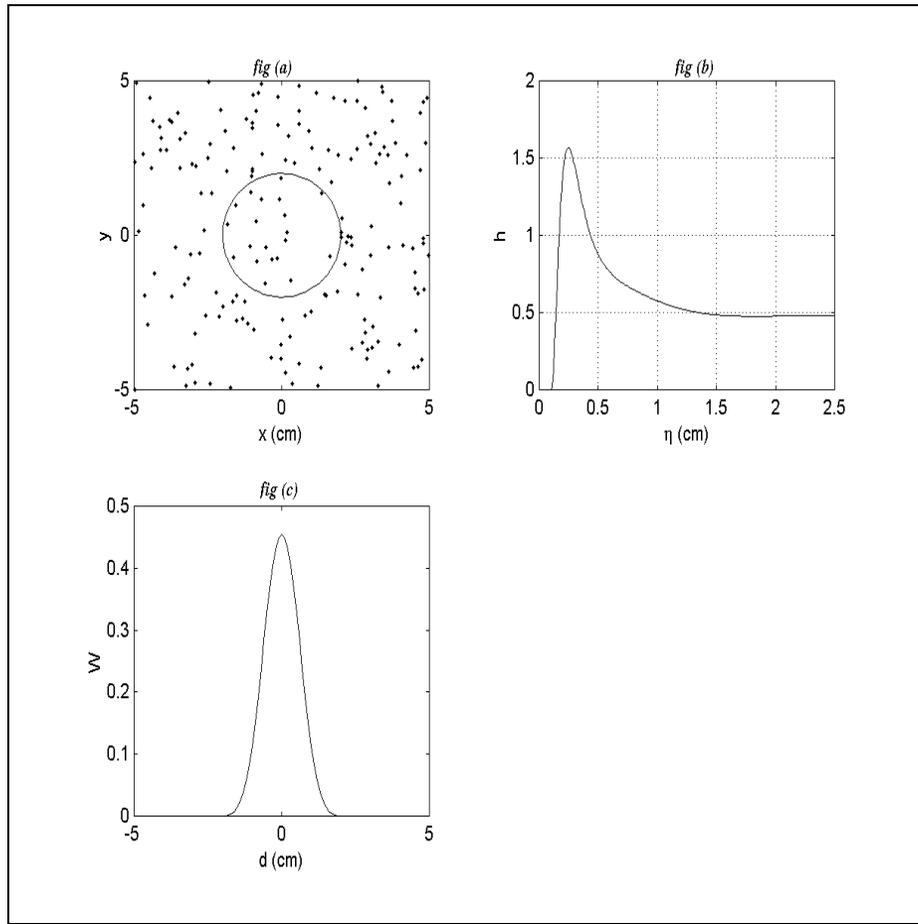


FIGURE 4.4 – Estimation d’une hauteur d’eau constante de 0.5cm représentée par une distribution aléatoire uniforme de boules d’eau (fig. a. en haut à gauche). Les calculs sont réalisés avec la fonction de noyau $W(\vec{r}, \eta)$ définie par l’équation 4.7, pour des valeurs croissantes du rayon de sondage η . La convergence vers $h = 0.5\text{cm}$ est obtenue pour $\eta \geq 1\text{cm}$ (à droite fig. b). La fonction de noyau pour la valeur $\eta = 1\text{cm}$ est figurée en bas à gauche (fig. c).

Dans cette expérience, le volume des boules d’eau est de 0.27cm^3 , la densité moyenne de boules est de 1.87cm^{-2} , soit une cinquantaine de boules disposées aléatoirement sur une surface de 100cm^2 . La hauteur d’eau moyenne est alors de 0.5cm .

On calcule à l’aide de l’équation 4.5 la hauteur d’eau au point $(0, 0)$. La figure 4.4 montre les résultats de ce calcul pour des valeurs croissantes du paramètre η .

On peut constater que la valeur de h estimée (figure 4.4b.) converge vers la valeur attendue 0.5cm dès que $\eta \geq 1\text{cm}$.

Réciproquement un autre test consiste à fixer le rayon de sondage η et à faire varier la taille des particules représentant la hauteur d’eau sur la plan horizontal. Les résultats sur l’estimation de la hauteur d’eau montrent de même une convergence vers $h = 0.5\text{cm}$. Ces résultats ne sont pas figurés ici.

Ces expériences suggèrent que l’estimation de la hauteur d’eau par l’équation 4.5 dépend

uniquement du rapport entre la distance inter-boules et la longueur du noyau (paramètre d_{inter}/η défini en 4.2.1). Ce résultat n'est pas surprenant, intuitivement la précision de l'estimation dépend du nombre de boules d'eau présentes au voisinage du point de mesure (dont le rapport d_{inter}/η donne une estimation).

Etablissement d'un régime permanent sur un plan incliné.

Ce deuxième test consiste à réaliser une expérience de ruissellement sur un plan incliné. Si l'on introduit un flux amont constant, il doit s'établir un régime permanent dont les paramètres (\bar{h}, \bar{v}) peuvent être calculés à partir de la donnée du débit Q du flux et de la pente moyenne θ du plan incliné. Le coefficient de frottement f est supposé connu.

On a ainsi pour le régime permanent qui s'établit⁵ :

$$\begin{aligned}\bar{v} &= \sqrt[3]{\frac{8gQ\theta}{f}} \\ \bar{h} &= \sqrt[3]{\frac{fQ^2}{8g\theta}}\end{aligned}$$

où g désigne l'accélération de pesanteur.

Avec $f = 1.3$, $Q = 0.8\text{cm}^2/\text{s}$, $\theta = 0.01$, ce système donne comme valeurs caractéristiques $(\bar{h} = 0.22\text{cm}, \bar{v} = 3.6\text{cm})$.

On cherche à observer si le modèle discret de mouvement de boules d'eau permet d'obtenir dans les mêmes conditions un régime permanent avec les mêmes caractéristiques.

Un pas de temps est choisi égal à 0.3s après quelques expériences préliminaires. Le débit amont Q détermine le nombre de boules d'eau introduites en amont du plan incliné (490 boules par Δt de volume unitaire 65mm^3). On applique les règles de mouvement définies en 4.1.3. On observe alors l'évolution au cours du temps des hauteurs d'eau estimées au niveau des positions de chaque boule d'eau ainsi que leurs vitesses sur le plan. η est choisi égal à 1cm .

La figure 4.5 montre les résultats obtenus.

Ces résultats sont présentés sous la forme d'histogrammes. Ils montrent une convergence vers les valeurs attendues $\bar{h} = 0.22\text{cm}$ et $\bar{v} = 3.6\text{cm}$, et une homogénéisation de ces valeurs sur l'ensemble de la populations des boules d'eau.

Ce test montre que l'organisation des écoulements de boules d'eau qui s'établit au cours du temps est suffisamment régulière pour retrouver un régime permanent dans les conditions attendues.

Ces tests préliminaires vont être maintenant approfondis dans le cadre d'une analyse de sensibilité des paramètres du modèle.

⁵Si l'on réalise cette expérience en laboratoire, on procède à l'inverse : le coefficient f a priori inconnu est estimé à partir de la mesure de \bar{h} et \bar{v} et de ces mêmes équations.

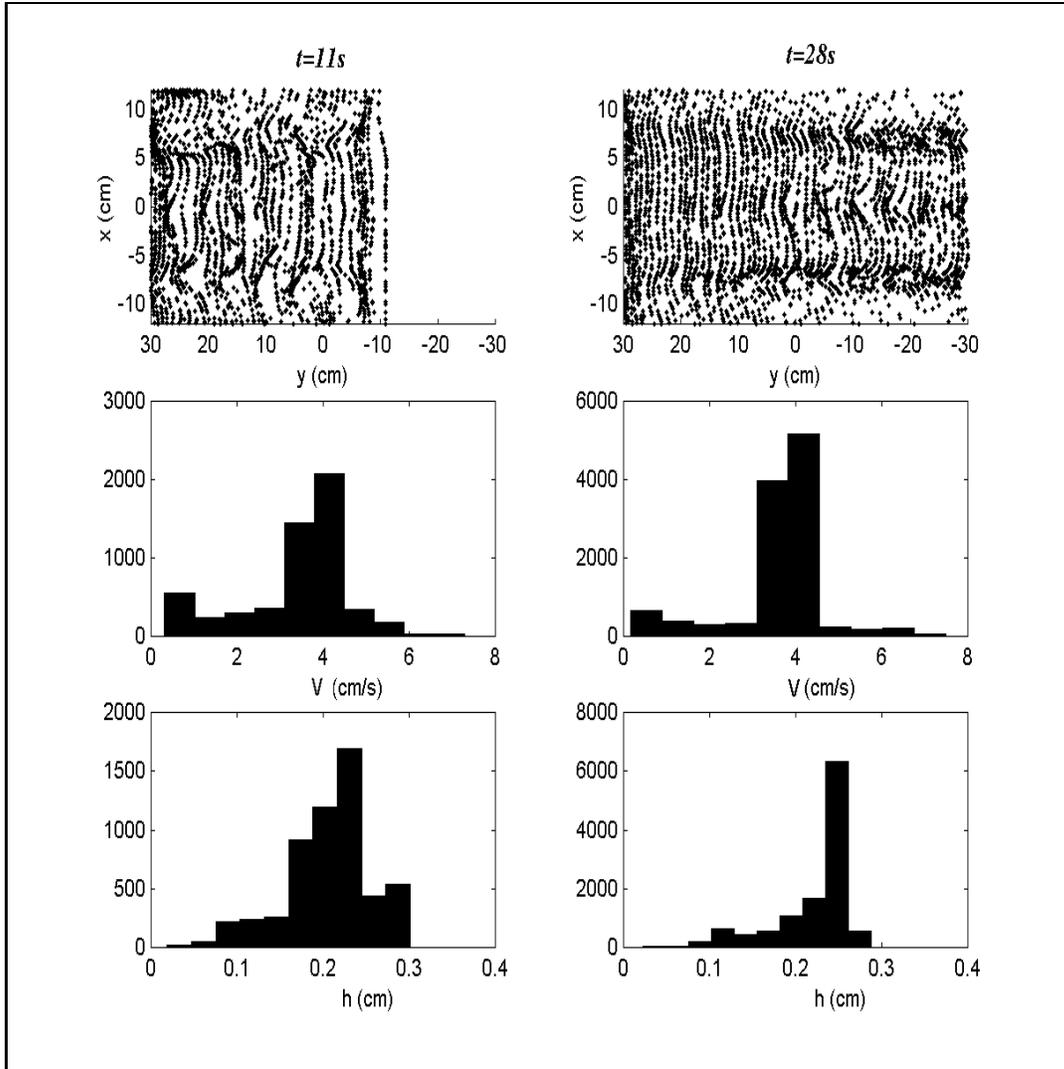


FIGURE 4.5 – Etablissement d'un régime permanent sur un plan incliné de pente $\theta = 0.01$, soumis à un flux amont de débit $Q = 0.8\text{cm}^2/\text{s}$. Les histogrammes des vitesses et hauteurs d'eau des particules aux deux instants $t = 11\text{s}$ et $t = 28\text{s}$ sont placés en regard de l'image des positions des particules à ces deux instants. Les résultats montrent une convergence vers les valeurs attendues $\bar{h} = 0.22\text{cm}$ et $\bar{v} = 3.6\text{cm/s}$ sur l'ensemble de la population de boules d'eau.

4.2 Analyse de sensibilité.

Les tests précédents ont montré une certaine cohérence du modèle : convergence du calcul de hauteur d'eau dès qu'il existe un nombre suffisant de boules d'eau au voisinage du point de mesure, et une certaine régularité dans l'organisation des écoulements permettant l'établissement d'un régime permanent. Il faut maintenant entreprendre une analyse des paramètres du modèle afin d'apprécier sa validité.

4.2.1 Paramètres du modèle.

Les paramètres essentiels du modèle sont :

- ω , volume unitaire des boules d'eau,
- η , longueur du noyau et $W(\vec{r}, \eta)$, la fonction de lissage définie à l'équation 4.7,
- Δt , pas de temps,

La formule centrale (équation 4.5) est un calcul d'interpolation, notamment pour h

$$h(\vec{r}) = \sum_i \omega_i W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta)$$

Plus généralement, on peut écrire pour une fonction ζ quelconque :

$$\hat{\zeta}(\vec{r}) = \sum_i \omega_i \frac{\zeta(\vec{r}_i)}{h(\vec{r}_i)} W(\vec{r}_i - \vec{r}, \eta) \quad (4.9)$$

dans laquelle la hauteur d'eau h s'interprète comme une densité de boules d'eau.

En réalité ce calcul reposant sur une sommation discrète est une approximation d'un calcul de convolution du type (cf. [Baxter, 1992]) :

$$\hat{\zeta}(\vec{r}) = \int \zeta(\vec{r}') W(\vec{r} - \vec{r}', \eta) d\vec{r}' \quad (4.10)$$

dans lequel $\hat{\zeta}(\vec{r})$ est une estimation raisonnable de $\zeta(\vec{r})$ pour peu que W ait de "bonnes" propriétés (cf. équations 4.3 et 4.4).

Autrement dit, les calculs passent donc par deux approximations successives :

- le calcul d'une convolution dont la qualité est conditionnée par η , longueur du noyau W . L'opération de convolution donne en effet une fonction lissée sur un voisinage de longueur η , autrement dit les variations de la fonction originale à l'intérieur de ce voisinage sont perdues. Pour obtenir une bonne reconstruction, il faut donc intuitivement que η soit inférieur à la longueur d'onde caractéristique minimale λ de la fonction originale (par exemple la fonction ζ dans l'équation 4.10).

On peut montrer théoriquement⁶ qu'une bonne estimation de la fonction originale est obtenue dès que :

$$\frac{\eta}{\lambda} < \frac{1}{8} \quad (4.11)$$

⁶Pour les deux résultats suivants on se référera à la littérature SPH [Morris, 1996]

4.2. Analyse de sensibilité.

- puis une approximation due à la sommation discrète sur des points distribués de façon irrégulière dans l’espace. En pratique, W est à support compact, c’est-à-dire que W est nul au-delà d’un rayon 2η . La sommation n’implique donc pas l’ensemble des points, mais le sous-ensemble de points à l’intérieur d’un voisinage de rayon 2η . Il faut donc que ce nombre soit suffisant.

Notons d_{inter} la distance moyenne entre boules d’eau. Le nombre moyen de boules dans un voisinage de rayon 2η est une fonction décroissante de d_{inter}/η . En pratique on peut montrer qu’il suffit que ce rapport soit inférieur à 0.8 pour obtenir une bonne estimation (soit 25 à 30 boules à l’intérieur du noyau en deux dimensions). D’où la relation :

$$\frac{d_{inter}}{\eta} < 0.8 \quad (4.12)$$

Il faut prendre garde que cette dernière relation (équation 4.12) est obtenue dans le cas d’une sommation sur une distribution *uniforme* de points. Ceci n’est généralement pas le cas dans notre modèle, les boules d’eau étant distribuées de façon hétérogène. Ceci oblige donc par précaution à utiliser une discrétisation relativement fine pour que même dans les zones faiblement denses la relation 4.12 soit vérifiée.

D’autres solutions peuvent être envisagées :

- faire varier le rayon η : c’est une solution couramment adoptée dans la littérature SPH [Morris, 1996]. Elle nécessite la plupart du temps d’adapter les équations - notamment introduire une équation de variation de la hauteur d’eau au cours du temps en dh/dt pour réduire les instabilités entraînées par cette rupture de symétrie entre les interactions de deux particules - qui n’ont a priori pas le même η . Par ailleurs, cette solution complique la tâche de repérage des particules dans l’espace.
- alternativement, une solution originale, restant à développer, consisterait à introduire un algorithme de régulation du nombre de particules. En comptant le nombre de boules avec lesquelles elle se trouve en interaction (donc intervenant dans les calculs d’interpolation), une boule d’eau peut “s’apercevoir” que ce nombre est en-deçà ou au-dessus d’un seuil critique. On peut imaginer des mécanismes de fusion ou d’éclatement du volume porté par les boules d’eau par des suppressions ou créations de boules d’eau dans un voisinage. Dans tous les cas, une analyse des perturbations entraînées sur les hauteurs d’eau semble inévitable et reste à faire.

Ces solutions ne sont pas utilisées pour l’instant dans RIVAGE. On se contente d’utiliser un nombre suffisamment grand de boules d’eau pour obtenir une bonne estimation dans les calculs d’interpolation.

La démarche est donc la suivante. A partir d’une analyse de la topographie (par exemple par une analyse spectrale), on extrait la plus petite longueur d’onde significative de la surface d’étude. Dans tous les cas, cette longueur d’onde ne peut être inférieure à la résolution à laquelle la topographie est connue (par exemple le pas de mesure au sol). Ce choix conditionne aussi la plus petite longueur d’onde que l’on pourra observer sur le champ des hauteurs d’eau. La relation 4.11 donne alors une borne supérieure quant à la longueur du noyau η .

A priori, plus η est petit, meilleure doit être l’estimation. Cependant dans le même temps, il faut se souvenir que l’estimation dépend de la présence en nombre suffisant de particules dans ce rayon. Prendre un rayon petit oblige donc en pratique à avoir un plus grand nombre de

particules de taille petite, ce qui peut augmenter considérablement les ressources nécessaires (mémoire, temps de calcul). On a donc dans tous les cas intérêt à prendre la plus grande valeur admissible pour η .

Si l'on possède une idée des valeurs moyennes (\bar{h}, \bar{v}) que l'on est susceptible d'observer pour une simulation donnée, le choix d'une valeur pour η détermine alors :

1. une borne maximale pour le volume unitaire ω des boules d'eau via la relation 4.12, en estimant d_{inter} par $\sqrt{\omega/\bar{h}}$. Soit :

$$\omega \leq 0.64\bar{h}\eta^2 \quad (4.13)$$

2. le choix du pas de temps Δt . Pour éviter d'obtenir des mouvements incorrects des boules d'eau, traversant des minima locaux, il faut forcer les boules d'eau à rester dans une zone sur laquelle l'approximation du calcul de $\nabla(h+z)$ est acceptable. Soit :

$$\bar{v}\Delta t \leq \eta \quad (4.14)$$

Si l'on ne possède pas de telles informations, on procède par essais successifs.

Ce long exposé a permis d'éclaircir un certain nombre de relations de dépendance entre les paramètres du modèle ω , η et Δt .

On cherche maintenant à explorer ces relations de dépendance. En particulier, on cherche à montrer la convergence du modèle vers une solution unique lorsque que l'on utilise des boules d'eau de volume décroissant. Pour cela on envisage différentes simulations sur deux types de surface, générées à partir d'un jeu de paramètres (longueur d'onde, amplitude des fluctuations, pente moyenne), au cours d'un épisode pluvieux d'intensité constante.

4.2.2 Ruissellement sur des surfaces paramétrées.

A partir d'un jeu de paramètres (λ, A, θ) respectivement longueur d'onde, amplitude des oscillations et pente moyenne, on génère deux types de surface, présentant des oscillations orientées dans le sens ou perpendiculairement à la direction de plus grande pente :

$$\text{type X : } z(x, y) = A \cos\left(\frac{2\pi x}{\lambda}\right) + \theta y \quad (4.15)$$

$$\text{type Y : } z(x, y) = A \cos\left(\pi + \frac{2\pi y}{\lambda}\right) + \theta y \quad (4.16)$$

Un exemple de chacune de ces surfaces est donné respectivement sur les figures 4.6 et 4.9.

Surface de type X.

Nous présentons des résultats de simulation sur une surface de type X, générée à partir des paramètres suivant : $A = 2cm$, $\lambda = 30cm$ et $\theta = 0.1$ (cf. figure 4.6). Les dimensions de la surface sont choisies pour observer 3 sillons parallèles à la plus grande pente, soit $90cm * 90cm$

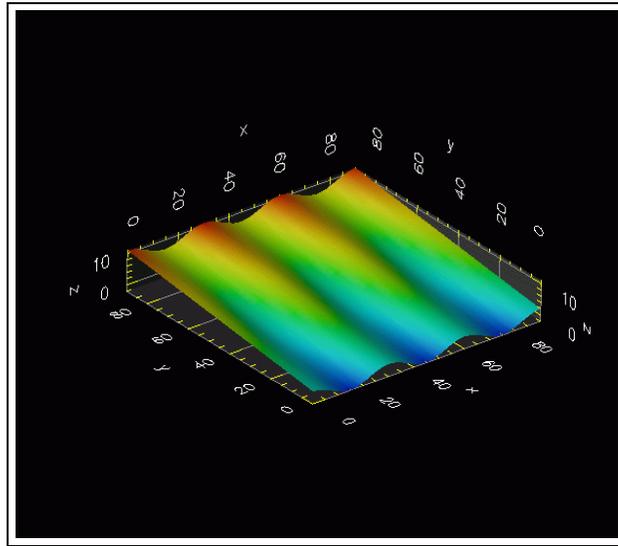


FIGURE 4.6 – Surface topographique de type X : $A \cos(\frac{2\pi x}{\lambda}) + \theta y$, avec $A = 2cm$, $\lambda = 30cm$, $\theta = 0.1$.

Sur cette surface imperméable, on simule un épisode pluvieux d'intensité constante $r = 100mm/h$. La durée simulée est de 400s.

La longueur d'onde λ fixe le rayon de sondage maximal admissible $\eta = 3.6cm$ (cf. relation 4.11). Après essais, le pas de temps choisi est de 1s, les vitesses moyennes obtenues ne dépassant pas $4cm/s$ (cf. relation 4.14). Ce pas de temps conditionne le volume des précipitations à introduire à chaque pas de temps, $22.5cm^3$. Pour obtenir une distribution suffisamment homogène de boules d'eau sur la surface, un bon candidat pour le volume des boules peut être $\omega = 0.7cm^3$, soit une trentaine de boules d'eau introduites par pas de temps⁷.

On réalise alors plusieurs simulations pour une suite décroissante du volume ω des boules, à partir de $\omega = 0.7cm^3$ jusqu'à $\omega = 0.1cm^3$. De façon équivalente, on a fait correspondre à ce volume ω , un diamètre de boules $\phi = \sqrt[3]{6\omega/\pi}$ en cm qui donne une image plus concrète de la diminution de la taille des boules : de $\phi = 1.1cm$ à $\phi = 0.6cm$.

Un exemple typique de résultats obtenus au bout de 400s est donné à la figure 4.7 pour $\omega = 0.52cm^3$, soit $\phi = 1.0cm$. On peut y voir l'ensemble des positions des boules d'eau, le champ de hauteur d'eau et de vitesse correspondant, ainsi que la courbe de débit à l'exutoire. Le régime permanent, i.e. lorsque le débit de sortie atteint l'intensité de la pluie, s'établit au bout de 100 pas de temps .

Les caractéristiques obtenues en régime permanent à $t = 400s$ pour l'ensemble des simulations sont synthétisées dans le tableau 4.1.

Les hauteurs d'eau moyennes obtenues sont très proches d'une expérience à l'autre, autour de $0.34mm$. Les vitesses moyennes décroissent lorsque ω diminue : cette décroissance s'explique par la diminution des discontinuités de hauteur d'eau entre boules voisines à mesure que la résolution devient plus fine ; ces discontinuités peuvent entraîner localement des petites pointes

⁷Ce nombre peut sembler faible, cependant ce que l'on cherche à apprécier est la convergence du modèle en régime permanent ; au bout des 400 pas de temps, un nombre suffisant de boules d'eau a été introduit.

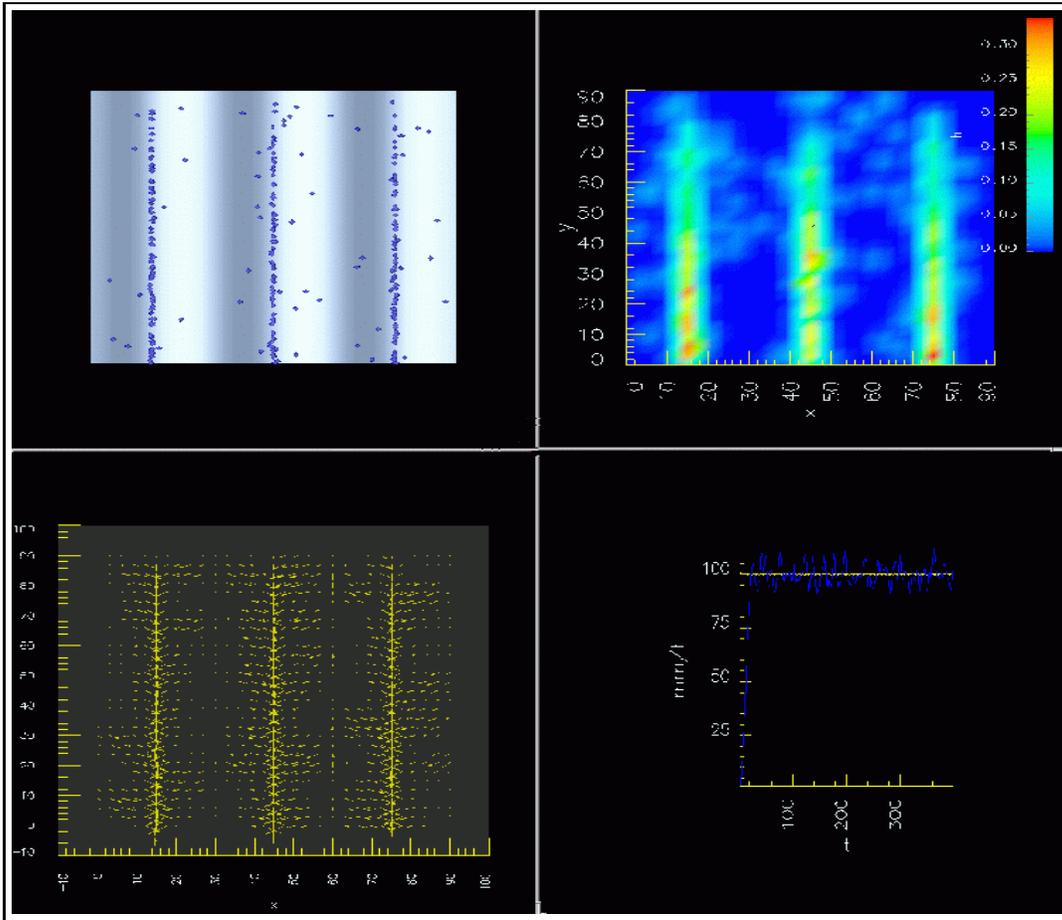


FIGURE 4.7 – Résultats de simulation au bout de 400s. En haut à gauche positions des boules d'eau (555 boules), en haut à droite champ de hauteur d'eau correspondant. En bas à gauche, champ des vitesses, et en bas à droite débit de sortie en mm/h (courbe bleue moyennée sur 5s) obtenu après simulation pour $r = 100\text{mm/h}$ (courbe jaune), $\eta = 3.6\text{cm}$, $\omega = 0.52\text{cm}^3\text{cm}$, $\Delta t = 1\text{s}$. Le régime permanent est atteint dès 100s. Les couleurs du champ de hauteurs d'eau sont une interpolation des valeurs calculées sur un maillage ; pour réduire les discontinuités de couleur, il faudrait augmenter la résolution du maillage sur lequel est évalué ce champ.

$\phi(\text{cm})$	$\omega(\text{cm}^3)$	N	$\bar{h}(\text{mm})$	$\bar{v}(\text{cm/s})$	$t_{cpu}(\text{min})$
1.1	0.7	411	0.35	3.9	<1
1.0	0.5	555	0.34	3.8	<1
0.85	0.3	932	0.34	3.7	2
0.6	0.1	2735	0.33	3.5	8

TABLEAU 4.1 – Ruissellement sur une surface de type X pour un nombre croissant de boules d'eau : ϕ diamètre et ω volume des boules ; N nombre final de boules sur la surface ; \bar{h} et \bar{v} hauteur d'eau et vitesse moyenne en régime permanent ; t_{cpu} temps de calcul.

de vitesse.

Globalement on remarque que les caractéristiques du régime permanent établi sont à peu

4.2. Analyse de sensibilité.

près identiques sur l'ensemble des simulations, alors que l'on multiplie la résolution en terme de nombre de boules d'eau par un facteur proche de 7. Si l'on suit au cours du temps l'évolution des différences de hauteur d'eau mesurées sur un même maillage entre les deux simulations extrêmes ($\phi = 1.1$ et $\phi = 0.6$), on obtient un écart moyen de 1% seulement. On retrouve cette convergence au niveau de l'évolution des débits de sortie à l'exutoire : les courbes forment un faisceau qui montre que ce régime permanent s'établit dans le même temps pour l'ensemble des simulations (figure 4.8) on remarque une diminution des fluctuations pour la valeur de ϕ la plus petite.

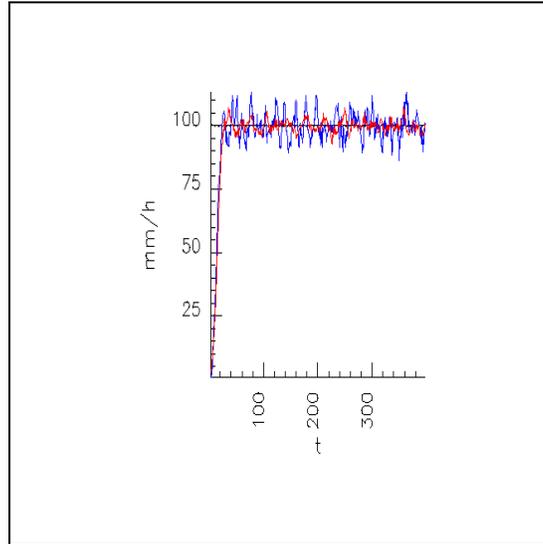


FIGURE 4.8 – Débits de sortie en mm/h pour $\phi = 0.6cm$ (en rouge) et $\phi = 1.1cm$ (en bleu). Les courbes montrent une même convergence, elles se superposent même exactement (couleur mauve) au début de la simulation. Les fluctuations sont par contre réduites pour ϕ le plus faible.

Des simulations ont été conduites dans le cas $\phi = 1.1$ constant, en faisant varier le pas de temps Δt . Les résultats sont repris dans le tableau 4.2. Le peu d'influence joué par ce paramètre est confirmé : en divisant par 16 le pas de temps, hauteurs d'eau moyennes et vitesses moyennes changent de moins de 1%.

$\Delta t(s)$	N	$\bar{h}(mm)$	$\bar{v}(cm/s)$	$t_{cpu}(min)$
1.0	411	0.35	3.9	<1
0.5	418	0.36	3.9	<2
0.25	404	0.35	3.8	3
0.125	405	0.35	3.8	4
0.0625	417	0.36	3.8	10

TABLEAU 4.2 – Ruissellement sur une surface de type X pour un pas de temps décroissant avec $\phi = 1.1cm$ et $\omega = 0.7cm^3$; N nombre final de particules sur la surface ; \bar{h} et \bar{v} hauteur d'eau et vitesse moyenne en régime permanent ; t_{cpu} temps de calcul.

On peut reprendre les résultats du tableau 4.1, en terme du rapport d_{inter}/η (cf. 4.2.1). On peut estimer ce rapport par l'approximation $d_{inter} = \sqrt{S/N}$ où $S = 8100cm^2$ désigne l'aire

de la surface d'étude. Les valeurs de ce rapport sont reprises dans le tableau 4.3.

$\phi(cm)$	N	$\frac{d_{inter}}{\eta}$	$\bar{h}(mm)$	$\bar{v}(cm/s)$
1.1	411	1.2	0.35	3.9
1.0	555	1	0.34	3.8
0.85	932	0.8	0.34	3.7
0.6	2735	0.5	0.33	3.5

TABLEAU 4.3 – Réinterprétation des résultats du tableau 4.1 en terme du rapport d_{inter}/η avec $\eta = 3.6cm$; ϕ diamètre des particules; N nombre final de particules sur la surface; d_{inter} distance moyenne inter-particules estimée comme $\sqrt{S/N}$, où S est l'aire de la surface ici $8100cm^2$.

On remarque que les rapports obtenus sont relativement bien en accord avec la relation 4.12, i.e. $d_{inter}/\eta \leq 0.8$. Ce rapport diminue quand on augmente la résolution en nombre de boules. Il constitue un indicateur intéressant pour spécifier une gamme de paramètres qui ont des chances de produire de bons résultats en simulation.

Cette étude doit être poursuivie. En particulier on a envisagé ici le cas d'une surface dont l'amplitude des oscillations A reste forte par rapport aux hauteurs d'eau. Dans l'exemple qui suit on a cherché au contraire à rendre compte du comportement du modèle lorsque les accumulations d'eau sont de l'ordre de A en étudiant le cas d'un flux amont sur une surface présentant des sillons perpendiculaires à la pente.

Surface de type Y.

Nous présentons ici des résultats de simulation sur une surface de type Y, générée à partir des paramètres suivants : $A = 2cm$, $\lambda = 30cm$ et $\theta = 0.1$ (cf. figure 4.9). Les dimensions de la surface sont choisies pour observer 3 sillons perpendiculaires à la plus grande pente $90cm * 90cm$.

Il s'agit ici de tester le cas où les hauteurs d'eau sont de l'ordre de grandeur de l'amplitude A des oscillations de la surface, situation qui se produit lors du débordement de dépressions. On veut chercher à observer le remplissage successif des sillons de la surface d'étude.

Pour cela, on simule un flux amont de débit $Q = 0.25cm^3/s$ constant. La durée de la simulation est fixée à 400s. La longueur d'onde de la surface conditionne de même que précédemment une valeur maximale pour la longueur du noyau $\eta = 3.6cm$: c'est la valeur que l'on a choisie. Par ailleurs, en imaginant que l'on obtienne des hauteurs d'eau moyennes de l'ordre de $A/2 = 1cm$ (demi-amplitude des oscillations), on peut alors choisir un volume ω maximal défini par $\omega \leq 0.64\bar{h}\eta^2 = 2.3cm^3$ (cf. relation 4.13), soit un diamètre de boule maximal $\phi = 1.6cm$.

On présente les résultats obtenus pour un diamètre $\phi = 1.1cm$, inférieur à cette borne maximale.

Un pas de temps de 1s est choisi après essais successifs : les vitesses, élevées (de l'ordre de $9cm/s$) exigent de prendre un pas de temps plus petit ; néanmoins il semble que cela n'affecte pas de façon significative le résultat obtenu, sinon de réduire les fluctuations au niveau du débit de sortie à l'exutoire.

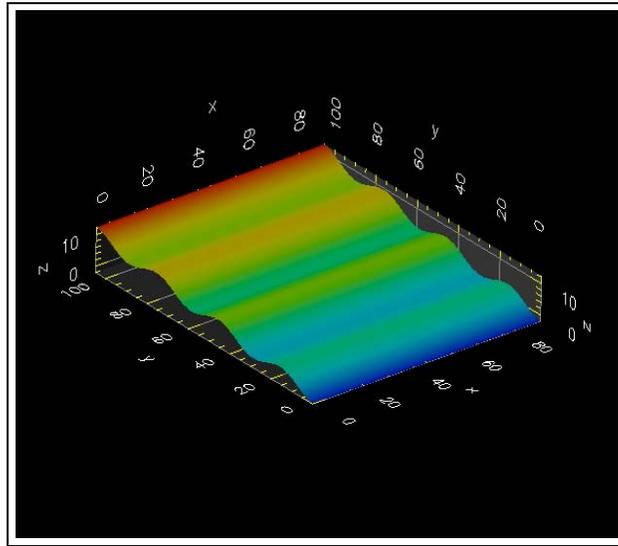


FIGURE 4.9 – Surface topographique de type Y : $A \cos(\pi + \frac{2\pi y}{\lambda}) + \theta y$, avec $A = 2cm$, $\lambda = 30cm$, $\theta = 0.1$.

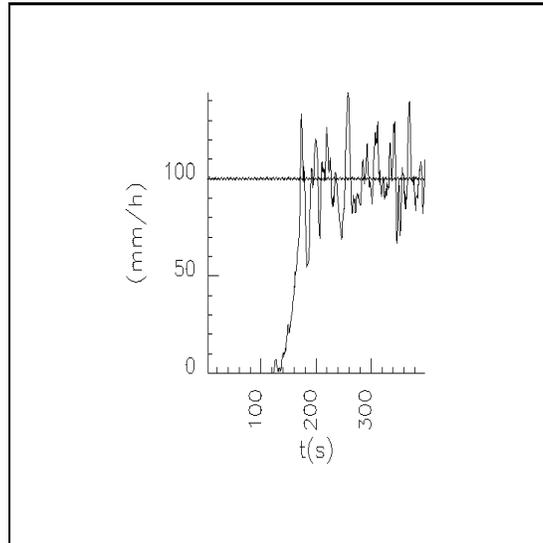


FIGURE 4.10 – Débits de sortie en mm/h pour le cas de la surface de type Y, présentant des sillons perpendiculaires à la pente. On peut noter le temps supérieur à $2min$, nécessaire pour atteindre le bas de la surface, après remplissage des sillons successifs. Les fluctuations sont dues au choix d'un pas de temps un peu grand.

La courbe de débit de sortie à l'exutoire reflète le temps nécessaire pour que des boules d'eau atteignent le bas de la surface (cf. figure 4.10). On peut comparer cette courbe à celles obtenues dans le cas de sillons parallèles à la plus grande pente (cf. figure 4.8).

L'évolution des hauteurs d'eau et des positions des boules d'eau sont présentées à la figure 4.11 au bout de $1min$ puis de $2min$. On observe le remplissage successif des sillons. La hauteur d'eau moyenne dans chaque sillon est relativement proche du résultat attendu, demi-amplitude

des oscillations, autour de 1cm .

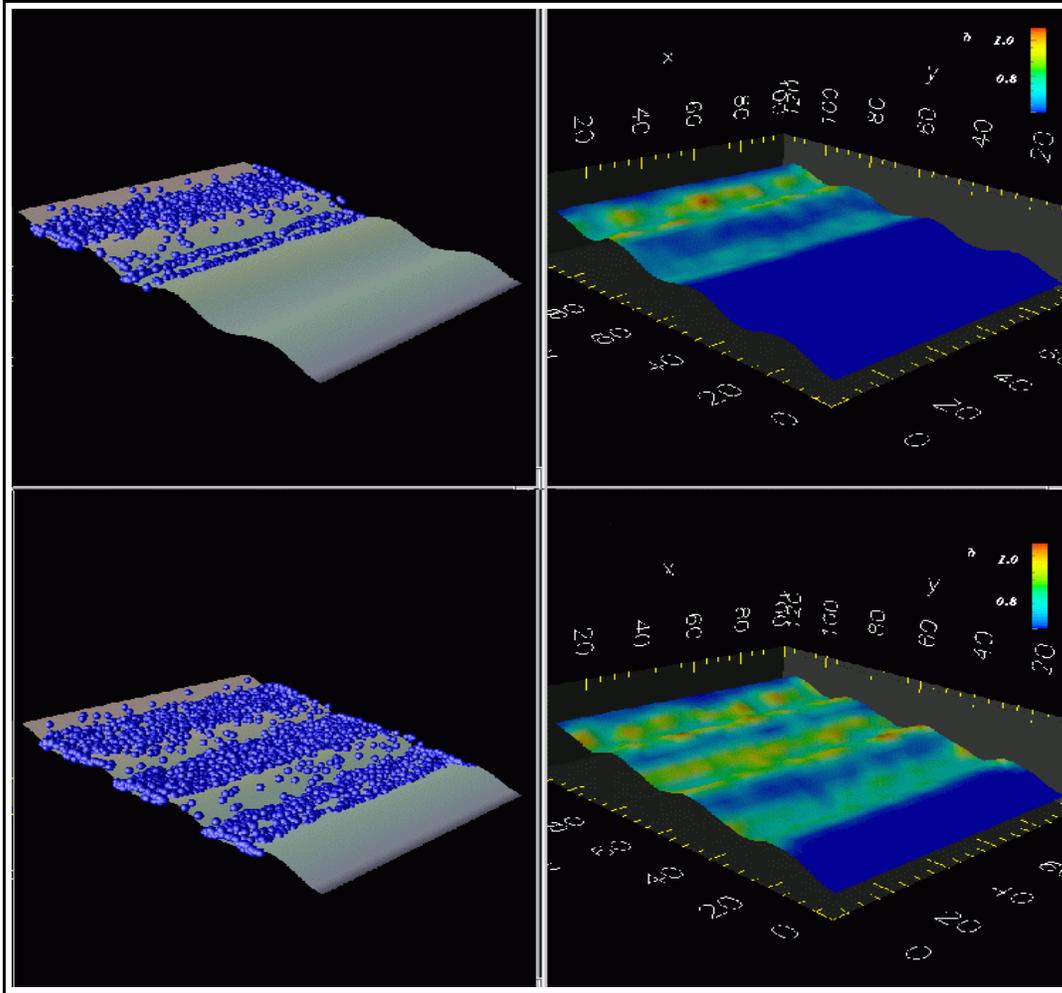


FIGURE 4.11 – Remplissage successif des sillons (en haut au bout d’une minute, en bas au bout de 2 minutes). Les discontinuités de couleur s’estompent avec une plus grande résolution en nombre de boules et un maillage plus fin sur lequel le champ continu de hauteur d’eau est calculé.

4.2.3 Synthèse.

Quels enseignements peut-on tirer de ces diverses simulations ?

La convergence du modèle vers une solution d’écoulement permanent est acquise. On la constate notamment au niveau des débits de sortie à l’exutoire. On a pu, à l’aide des relations définies en 4.2.1, définir un certain nombre d’indicateurs pour guider le choix des paramètres, η , longueur du noyau, ω volume ou ϕ diamètre des boules et pas de temps Δt , en liaison avec les paramètres des surfaces d’étude λ longueur d’onde, A amplitude des fluctuations et éventuellement des données concernant hauteur d’eau et vitesse moyenne atteintes en régime permanent.

4.3. Comparaison avec un modèle EDP.

On rappelle notamment :

$$\begin{aligned}\frac{\eta}{\lambda} &< \frac{1}{8} \\ \frac{d_{inter}}{\eta} &< 0.8 \\ \bar{v}\Delta t &\leq \eta \\ \omega &\leq 0.64\bar{h}\eta^2\end{aligned}$$

A défaut, on doit réaliser des essais successifs.

Le travail sur des surfaces générées à partir d'un jeu de paramètres doit être approfondi. Par ailleurs, on n'a pas mené d'analyse sur l'influence de la fonction de noyau elle-même. Cependant ces résultats préliminaires sont intéressants et montrent une certaine robustesse du modèle.

Dans la partie suivante, on va chercher à comparer les solutions obtenues par le modèle RIVAGE avec un modèle classique par EDP.

4.3 Comparaison avec un modèle EDP.

4.3.1 Le modèle analytique.

On se propose de comparer les solutions obtenues avec RIVAGE à celles obtenues par un modèle basé sur la résolution des équations aux dérivées partielles de Saint-Venant en deux dimensions (connues aussi sous le nom de Shallow Water Equations dans la communauté anglophone) (cf. 3.1).

Ce modèle analytique repose sur une intégration des équations de Navier-Stokes pour des écoulements peu profonds. Cette intégration s'appuie sur deux approximations : négliger l'effet de l'accélération sur l'axe vertical, en principe dû à la courbure de la surface libre, et faire l'hypothèse que la distribution des pressions est hydrostatique [Vreugdenhil, 1994].

Les équations sans puits (sans infiltration) sont les suivantes :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = r \quad (4.17)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial x} + g\frac{\partial z}{\partial x} + gS_{f_x} = 0 \quad (4.18)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + g\frac{\partial h}{\partial y} + g\frac{\partial z}{\partial y} + gS_{f_y} = 0 \quad (4.19)$$

où h est la hauteur d'eau, t le temps, u et v respectivement les composantes en x et en y de la vitesse U moyennée sur la hauteur, r l'intensité de la pluie, g l'accélération de pesanteur, S_{f_x} et S_{f_y} respectivement les composantes en x et en y de la pente de friction S_f .

Les valeurs de S_{f_x} et S_{f_y} sont des inconnues et doivent être données sous forme paramé-

trique, dont une forme généralement admise [Lane, 1998] est :

$$S_{f_x} = \frac{fu\sqrt{u^2 + v^2}}{8gh} \quad (4.20)$$

$$S_{f_y} = \frac{fv\sqrt{u^2 + v^2}}{8gh} \quad (4.21)$$

où f est le même coefficient de frottement (Darcy-Weisbach) que l'on utilise dans le modèle RIVAGE (cf. équation 4.8).

Les résultats de simulation auxquels sont comparées les solutions obtenues par RIVAGE, sont réalisés par Joël Léonard, étudiant en thèse d'hydrologie au sein du LIA, à partir du code numérique développé par [Estèves et al., 2000] qu'il a utilisé et adapté aux besoins de ses recherches⁸.

4.3.2 Cadre des simulations.

Les conditions de simulation identiques dans les deux cas sont les suivantes :

- surface imperméable de $1m^2$ définie à une résolution de $4cm$ (figure 4.12), soit 626 points,
- épisode pluvieux d'intensité constante $r = 40mm/h$ pendant une durée de $400s$,
- coefficient de frottement fixé à $f = 10$.

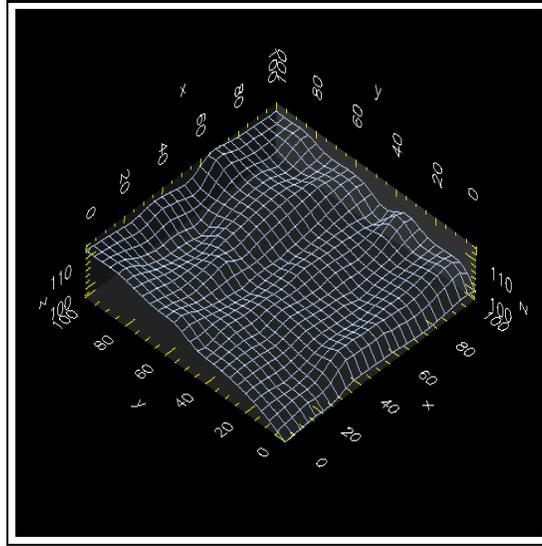


FIGURE 4.12 – Surface topographique utilisée pour la comparaison avec le modèle de St-Venant.

Le modèle de St-Venant fournit une solution de référence, obtenue sur le maillage à $4cm$ d'échantillonnage de la topographie avec un pas de temps $\Delta t = 0.002s$, une perte de masse due aux problèmes de frottements de 0.95% . La hauteur d'eau moyenne obtenue, stable en régime permanent est de $1.21mm$. Le temps nécessaire au calcul de cette solution est de $13min$.

Les simulations produites par le modèle RIVAGE sont organisées selon les deux paramètres définis à la section précédente 4.2.3, à savoir les deux rapports $\alpha = \eta/\lambda$ et $\beta = d_{inter}/\eta$.

⁸Pour le lecteur familier, ce code repose sur un schéma de McCormack [MacCormack, 1971].

4.3. Comparaison avec un modèle EDP.

L'analyse spectrale de la surface topographie fournit une longueur d'onde λ caractéristique minimale de $33cm$. Le rayon de sondage η maximal admissible est donc d'après la relation 4.11 de $4.2cm$, pour un rapport $\alpha = 0.125$. On a choisi d'effectuer des simulations pour des valeurs décroissantes de $\alpha = 0.12; 0.09; 0.06$ correspondant à des valeurs de $\eta = 4cm; 3cm; 2cm$ - qui représente une résolution croissante du calcul de convolution (cf. 4.2.1).

Il reste à expliciter le choix du paramètre ω volume des boules d'eau ou alternativement ϕ , diamètre des boules. Pour cela, on utilise ici la connaissance de la valeur moyenne de hauteur d'eau atteinte en régime permanent dans le cas du modèle de St-Venant, afin d'éviter de procéder par essais successifs. La relation 4.13 peut s'exprimer pour ϕ en fonction du paramètre β , de \bar{h} et du rayon de sondage η :

$$\phi \leq \sqrt[3]{\frac{6\bar{h}}{\pi}(\beta\eta)^2}$$

η étant fixé, on obtient une série de valeurs pour ϕ comme fonction de β . Nous avons choisi de présenter ici des résultats de simulation pour des valeurs décroissantes de $\beta = 0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.4; 0.3$.

Le pas de temps Δt est choisi par essais successifs, de façon à ce que $\bar{v}\Delta t \leq \eta$, généralement un pas de temps de $1s$ convient, ou de $0.5s$ dans le cas des plus petites valeurs de η .

La correspondance entre les différents paramètres est résumée dans le tableau 4.4. Certains couples n'ont pas été testés car demandant un temps de calcul trop long par rapport au temps de calcul utilisé avec le modèle de St-Venant ($13min$). Il y a toutefois suffisamment de couples testés pour pouvoir en dégager des propriétés intéressantes.

α	β					
	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
0.12	(4;1.3)	(4;1.2)	(4;1.1)	(4;1.0)	(4;0.8)	(4;0.7)
0.09	(3;1.1)	(3;1.0)	(3;0.9)	(3;0.8)	(3;0.7)	-
0.06	(2;0.8)	(2;0.7)	-	-	-	-

TABLEAU 4.4 – Organisation des simulations de comparaison avec le modèle de St-Venant, selon les deux rapports $\alpha = \eta/\lambda$ et $\beta = d_{inter}/\eta$. Chaque case (i, j) comporte les valeurs respectivement de η et ϕ (en cm) utilisées dans la simulation pour le couple (α_i, β_j) . Les volumes unitaires des particules correspondant sont compris entre $1.2cm^3$ pour $\phi = 1.3cm$ et $0.2cm^3$ pour $\phi = 0.7cm$.

4.3.3 Résultats.

Toutes les simulations effectuées avec RIVAGE exhibent une vitesse moyenne comprise entre $0.8 - 1\text{cm/s}$, une vitesse maximale autour de 2.5cm/s . Le nombre de boules d'eau présentes sur la surface en fin de simulation et les temps de calcul associés à chaque simulation réalisée sont synthétisés au tableau 4.5.

α	β					
	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3
0.12	(939 ; <1)	(1204 ; <2)	(1584 ; <2)	(2115 ; <3)	(4137 ; 8)	(6193 ; 19)
0.09	(1560 ; <2)	(2092 ; 3)	(2821 ; 4)	(4058 ; 8)	(6083 ; 16)	-
0.06	(4035 ; 6)	(5976 ; 9)	-	-	-	-

TABLEAU 4.5 – Synthèse des simulations. Chaque case (i, j) comporte les valeurs respectivement de : N nombre de boules d'eau final sur la surface et temps de calcul en min . Le pas de temps utilisé est dans tous les cas $\Delta t = 1s$ sauf pour la dernière ligne correspondant à une valeur de $\eta = 2\text{cm}$ pour laquelle le pas de temps est de $0.5s$. Toutes les simulations exhibent en régime permanent une hauteur d'eau moyenne d'environ 1.1mm pour une vitesse moyenne comprise entre $0.8 - 1\text{cm/s}$. La vitesse maximale étant par ailleurs comprise entre $2.5 - 3\text{cm/s}$.

Les solutions obtenues avec le modèle RIVAGE sont toutes qualitativement très proches de la solution de St-Venant. Nous montrons à la figure 4.13 les champs de hauteur d'eau obtenus dans le cas de la simulation la plus rapide, $(\alpha = 0.12, \beta = 0.8)$, en regard du champ de hauteur d'eau de référence. A part quelques fluctuations locales, le champ de hauteur d'eau est visuellement reproduit.

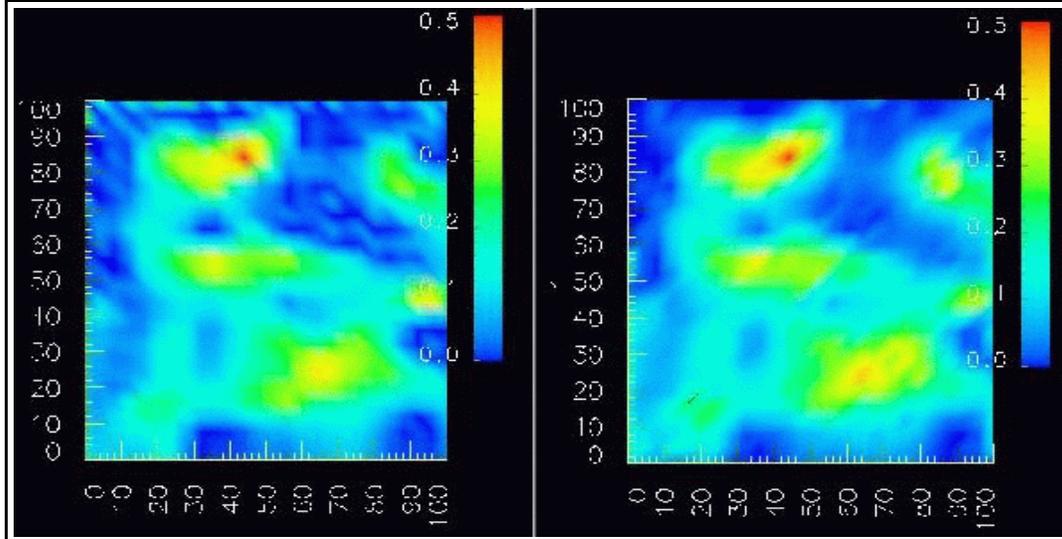


FIGURE 4.13 – Champ des hauteurs d'eau obtenu en fin de simulation ($t = 400s$) par le modèle de référence de St-Venant (à gauche) et avec RIVAGE (à droite). Paramètres synthétiques $(\alpha = 0.12, \beta = 0.8)$.

Toutes les simulations présentent par ailleurs une sortie à l'exutoire très proche de celle obtenue par le modèle de St-Venant. On peut s'en rendre compte sur la figure 4.14 où est

4.3. Comparaison avec un modèle EDP.

figuré le faisceau de courbes obtenues pour les meilleures simulations, à partir de données enregistrées toutes les secondes au cours de la simulation. Les courbes obtenues par RIVAGE présentent toutefois des fluctuations (même moyennées ici sur 10s).

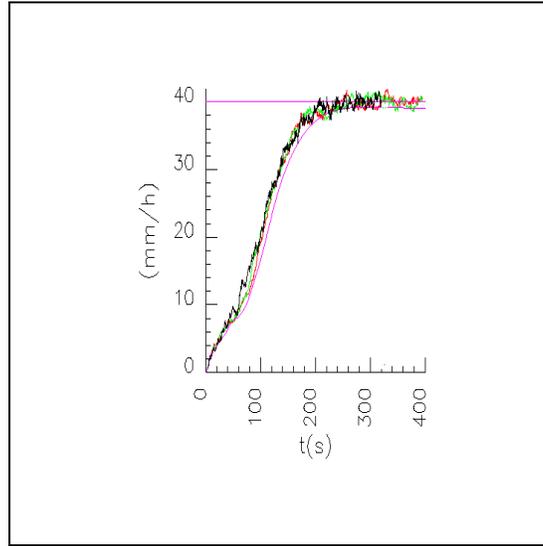


FIGURE 4.14 – Faisceau de courbes de débit à l’exutoire obtenu pour les meilleures simulations, la courbe “lisse” en mauve est la courbe du modèle de St-Venant, celles obtenues par RIVAGE présentent des fluctuations : en noir ($\alpha = 0.06; \beta = 0.7$), en vert ($\alpha = 0.09; \beta = 0.4$), et en rouge ($\alpha = 0.12; \beta = 0.3$).

Vu la qualité des solutions, on s’est contenté, dans le cas de la sortie à l’exutoire, de cette comparaison par juxtaposition de courbes. En revanche, on a comparé quantitativement les champs de hauteur d’eau calculés sur un même maillage de 626 points et enregistrés toutes les 10s en suivant l’évolution au cours du temps de l’écart relatif entre les deux modèles en calculant :

$$diff = \frac{\sqrt{\sum_i (h_i - \hat{h}_i)^2}}{\sqrt{\sum_i h_i^2}} \quad (4.22)$$

où h et \hat{h} désignent respectivement les hauteurs d’eau pour le modèle de St-Venant et le modèle RIVAGE, i indiquant les positions sur le maillage commun.

Globalement, on observe dans tous les cas une décroissance de l’écart relatif entre les deux modèles au cours du temps et une convergence nette, stable autour de 20%, ceci pour toute la gamme des paramètres (cf. figure 4.15). Pour se persuader de la stabilité de cette convergence, on a réalisé quelques simulations sur près d’une demi-heure de pluie. La convergence est vérifiée (cf. figure 4.16). Il faudrait approfondir cette étude pour mieux comprendre pourquoi cet écart de 20% semble résister à une augmentation de la résolution des calculs.

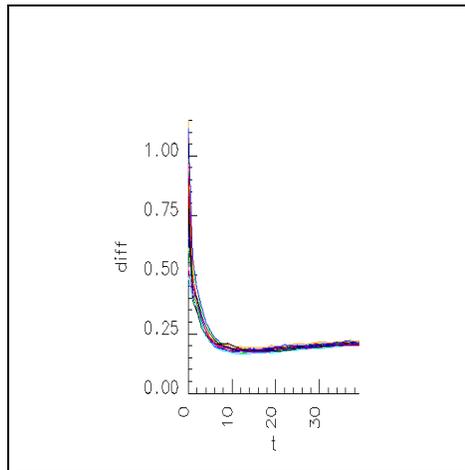


FIGURE 4.15 – Faisceau de courbes d'écart relatif $diff$ (cf. équation 4.22) au cours du temps entre les champs de hauteur d'eau obtenus respectivement par St-Venant et RIVAGE. On observe une décroissance puis une convergence autour d'un écart relatif de 20%.

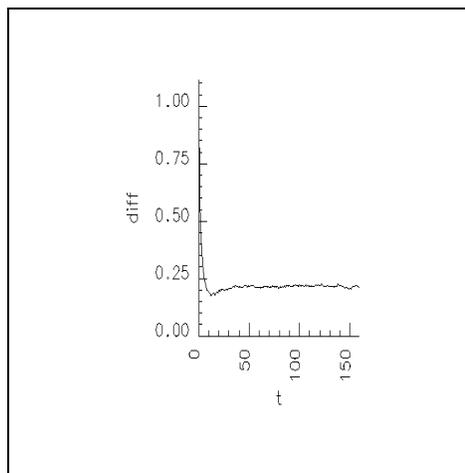


FIGURE 4.16 – Evolution de l'écart relatif $diff$ (cf. équation 4.22) sur le champ des hauteurs d'eau pour une simulation étendue à 1600s (quatre fois la durée initiale).

4.3. Comparaison avec un modèle EDP.

Si l'on détaille les solutions obtenues, on s'aperçoit que la qualité, à la fois en terme d'écart sur la champ de hauteur d'eau mais aussi en terme de stabilité de la sortie à l'exutoire, reflète les valeurs des paramètres α et β . A savoir :

- pour un même α , la qualité des solutions croît lorsque β diminue (cf. figures 4.17 pour $\alpha = 0.12$),
- pour un même β , la qualité des solutions croît lorsque α diminue (cf. figure 4.18 pour $\beta = 0.8$).

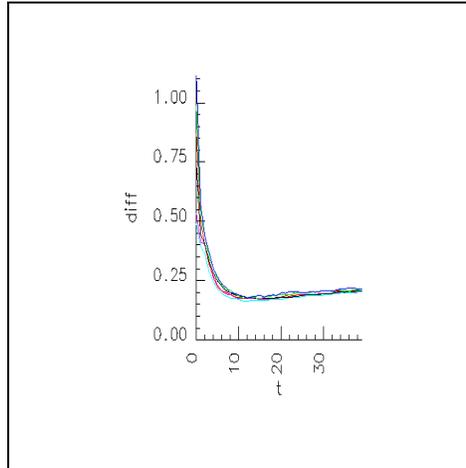


FIGURE 4.17 – Evolution de l'écart relatif *diff* sur le champ des hauteurs d'eau pour $\alpha = 0.12$ et $\beta = 0.8; 0.7; 0.6; 0.5; 0.4; 0.3$ (resp. bleu, vert, rouge, blanc, mauve, bleu ciel). L'écart diminue avec la décroissance de β .

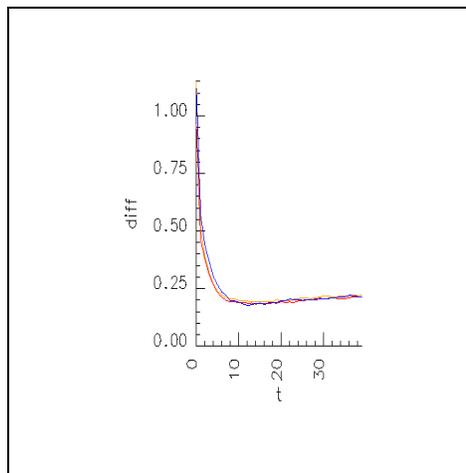


FIGURE 4.18 – Evolution de l'écart relatif *diff* sur le champ des hauteurs d'eau pour $\beta = 0.8$ et $\alpha = 0.12; 0.09; 0.06$ (resp. bleu, orange, rouge). L'écart diminue avec la décroissance de α .

Si l'on compare les champs de vitesse obtenus (cf. figure 4.19) dans le cas de la meilleure simulation ($\alpha = 0.12; \beta = 0.3$), on peut remarquer certaines irrégularités au niveau des dépressions par rapport au modèle EDP.

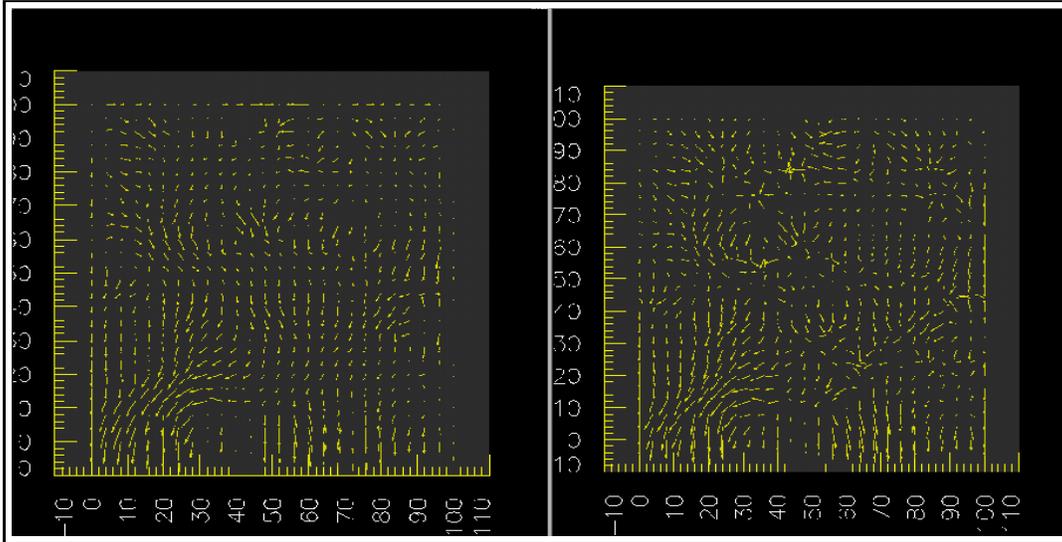


FIGURE 4.19 – Champ des vitesses obtenu en fin de simulation ($t = 400s$) par le modèle de référence de St-Venant (à gauche) et avec RIVAGE (à droite). Paramètres synthétiques : ($\alpha = 0.12$; $\beta = 0.3$).

4.3.4 Synthèse.

Si l'on exprime les équations de St-Venant sous forme lagrangienne (cf. équations définies en 4.3.1), en faisant intervenir une dérivée particulière D/Dt , on obtient les équations suivantes :

$$\frac{Dh}{Dt} = -h\nabla \cdot v \quad (4.23)$$

$$\frac{Dv}{Dt} = -g\nabla(h+z) + \frac{f}{8h}v\|v\| \quad (4.24)$$

Par rapport aux équations de ce système, le modèle de RIVAGE consiste en deux approximations :

- on fait un calcul direct de h et non une intégration dans le temps de l'équation 4.23 de conservation de masse,
- on considère que Dv/Dt est petit devant les autres termes de l'équation 4.24, qui se réduit alors à l'équation 4.8 que l'on utilise pour calculer la vitesse des boules d'eau.

Ces approximations sont sans doute responsables des fluctuations que l'on observe par rapport au modèle EDP. Il serait possible de remettre en question de telles approximations, ce qui rapprocherait le modèle d'une résolution numérique d'équations du type SPH. Toutefois cette faiblesse est à apprécier en regard de la simplicité du modèle actuel qui permet d'obtenir une solution qualitativement et quantitativement proche de la solution de St-Venant et ce, pour un temps de calcul 10 fois inférieur, dans le cas le plus favorable de l'exemple ($\eta = 4cm$ et $\phi = 1.3cm$).

4.4 Temps de transfert.

Après ces résultats qui semblent valider le modèle particulaire mis en œuvre dans RIVAGE, on cherche dans cette section à apprécier l’avantage que l’on peut tirer de la nature particulière du modèle de circulation de boules d’eau. Les temps de séjour ou temps de transfert de l’eau sur une surface sont en effet directement disponibles au niveau des informations stockées dans les boules d’eau.

On se propose de montrer les temps de transfert associés en régime permanent à différents types de surfaces topographiques. Ils correspondent aux temps mis par des boules d’eau pour atteindre l’exutoire du domaine.

Les surfaces topographiques de $1m^2$ utilisées présentent la même pente moyenne $\theta = 0.025$ et ne diffèrent que par leur rugosité (fluctuations de l’altitude). Plus précisément, on a choisi un plan incliné, un plan incliné présentant des micro-dépressions (bruit blanc ajouté), et deux autres surfaces qui sont des exemples de parcelles rencontrées sur le terrain (cf. figure 4.20) : notamment la troisième surface présente des dépressions importantes et la quatrième un chemin d’écoulement préférentiel.

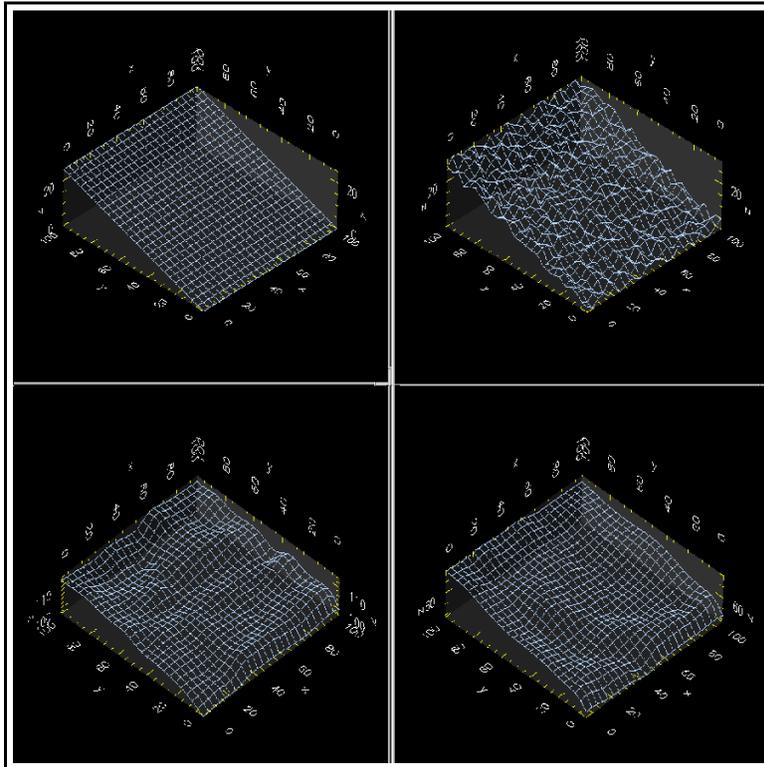


FIGURE 4.20 – Surfaces de $1m^2$, utilisées pour l’expérience des temps de transfert, même pente moyenne de 0.025. En haut à gauche plan “lisse”, en haut à droite plan présentant une rugosité aléatoire, en bas à gauche surface avec dépressions et en bas à droite surface présentant une dépression et un chemin d’écoulement préférentiel.

L’expérience consiste à soumettre ces surfaces à un épisode pluvieux d’intensité constante égale à $30mm/h$ sur une durée de $300s$ suffisante pour que s’établisse un régime permanent.

Les paramètres du modèle $\eta = 4cm$, $\omega = 0.52cm^3$ et $\Delta t = 1s$ sont gardés identiques d'une expérience à l'autre.

Les vitesses moyennes obtenues sont dans les quatre cas d'environ $1cm/s$: c'est la pente moyenne, identique dans les quatre surfaces, qui conditionne globalement cette vitesse.

Les résultats sont présentés sous forme d'histogrammes des temps de transfert sur la surface de l'ensemble des boules d'eau qui sont sorties de la surface depuis le début de la simulation (cf. figure 4.21).

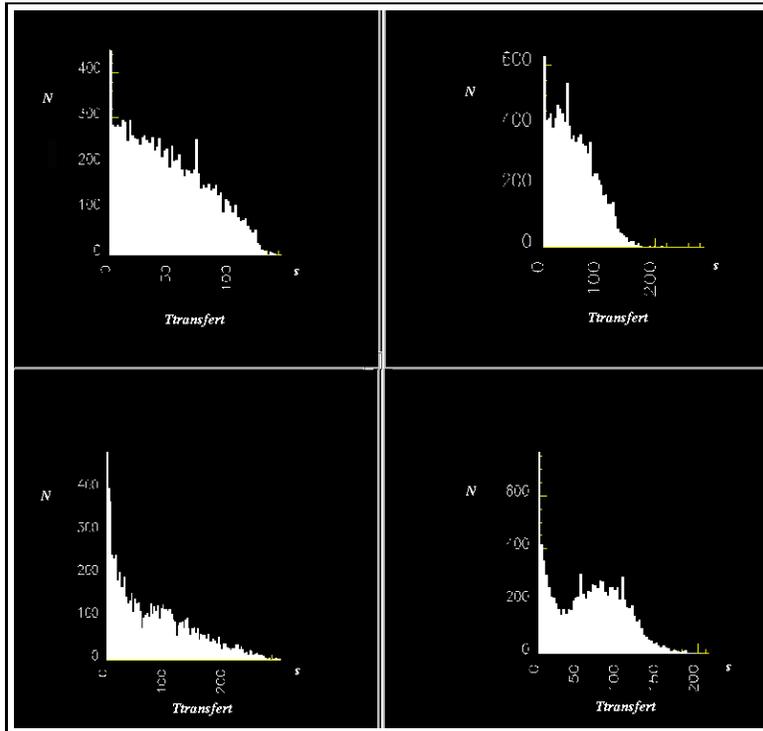


FIGURE 4.21 – Histogrammes des temps de transfert obtenus en fin de simulation. La disposition correspond à celle de la figure 4.20 : en haut à gauche, plan incliné, en haut à droite plan avec rugosité aléatoire, en bas à gauche surface avec dépressions et en bas à gauche surface avec dépressions et un chemin d'écoulement préférentiel.

Les formes des histogrammes obtenus diffèrent :

1. plan incliné lisse : une forme caractéristique présentant un temps de transfert maximal de $100s$, et une répartition linéaire des effectifs vers les temps les plus longs,
2. plan avec microtopographie : on remarque un allongement du temps de transfert maximal. La détention superficielle est augmentée par la présence de microdépressions,
3. surface avec dépressions : le phénomène d'allongement du temps de transfert est amplifié par la présence de grandes dépressions. La forme globale a totalement changé (plutôt en exponentielle négative).
4. surface présentant un chemin d'écoulement préférentiel : c'est la forme la plus intéressante mais aussi la plus difficile à interpréter. On observe deux parties dans l'histo-

4.4. Temps de transfert.

gramme : une courbe assez semblable à celle de la parcelle précédente, qualifiée d'exponentielle négative, et la superposition d'un pic autour d'un temps de transfert de 100s.

Il semble clair que les observations des histogrammes seuls ne permettent pas d'avancer une explication concernant les différences présentées par les deux dernières surfaces. On peut tout au plus suggérer des hypothèses : la forme en cloche obtenue pour la dernière surface est-elle caractéristique de la présence d'un chemin d'écoulement préférentiel, ou au contraire traduit-elle seulement un décalage temporel dû aux dépressions. Dans ce cas, comment interpréter l'absence d'une telle forme sur la troisième surface ?

On va chercher à se donner des informations supplémentaires en tirant parti d'une autre visualisation, rendue possible par RIVAGE : le suivi dans le temps des isochrones (sous la forme ici d'une surface de couleur cf. figure 4.22). Chaque boule d'eau, en tombant sur la surface, mémorise sa position initiale, il est alors très simple d'associer à toute position de la surface, le temps de transfert mis par une boule d'eau tombant en cette position pour atteindre l'exutoire. On montre cette évolution dans le cas des deux dernières surfaces au milieu et en fin de simulation.

Ces isochrones permettent de se rendre compte que pour la troisième surface, ne présentant pas de chemin préférentiel mais uniquement des dépressions, il reste une zone qui n'a, du moins dans une durée de 300s, permit à aucune boule d'eau d'atteindre l'exutoire de la surface. Cette zone correspond en fait à une dépression qui a mis le temps complet de la simulation pour se remplir, ou qui n'est pas encore totalement remplie. Dans le cas de la surface numéro 4 au contraire, au bout des 300s tout point de la surface a reçu au moins une boule qui a atteint la sortie du domaine.

C'est peut-être là une source d'explication possible des différences observées entre les histogrammes des temps de transferts de ces deux surfaces. La forme en cloche qui se superpose à une forme en exponentielle négative dans le cas de la surface 4 ne semblerait pas alors caractériser un chemin préférentiel, mais plutôt le temps mis (autour de 100s) pour remplir l'ensemble des dépressions permettant à tout un flux d'eau (tout un paquet de boules d'eau) d'atteindre l'exutoire. Dans le cas de la surface 3 au contraire, une dépression trop importante ralentit ce processus (forme en exponentielle négative). En attendant suffisamment longtemps, ou pour une pluie submergeant toute la surface, une même forme en cloche apparaîtrait peut-être.

On peut discuter cette explication. Ce que l'on a cherché à montrer dans cet exemple en présentant sous forme d'histogrammes puis d'isochrones les temps de transfert sur la surface des écoulements, est la facilité avec laquelle RIVAGE peut se prêter à ce genre d'étude. En disposant d'informations tenant aux positions initiales et aux trajectoires des boules d'eau, dont on peut rendre compte sous la forme de différents indicateurs, on dispose d'un certain nombre d'atouts pour mener des expériences sur des caractérisations de surface.

On peut imaginer par exemple étudier l'influence de la rugosité sur les temps de transfert et la détention superficielle (dans une démarche proche de celle de [Darboux, 1999] mais en disposant cette fois des vitesses d'écoulements). On peut aussi imaginer utiliser le type de visualisation que l'on vient de présenter dans le cadre d'étude d'aménagement de parcelles agricoles, où l'on s'intéresserait à la mise en place de réseaux de fossés ou de pièges à ruissellement pour réguler et contraindre le ruissellement. Enfin une autre piste concerne le traçage de solutés.

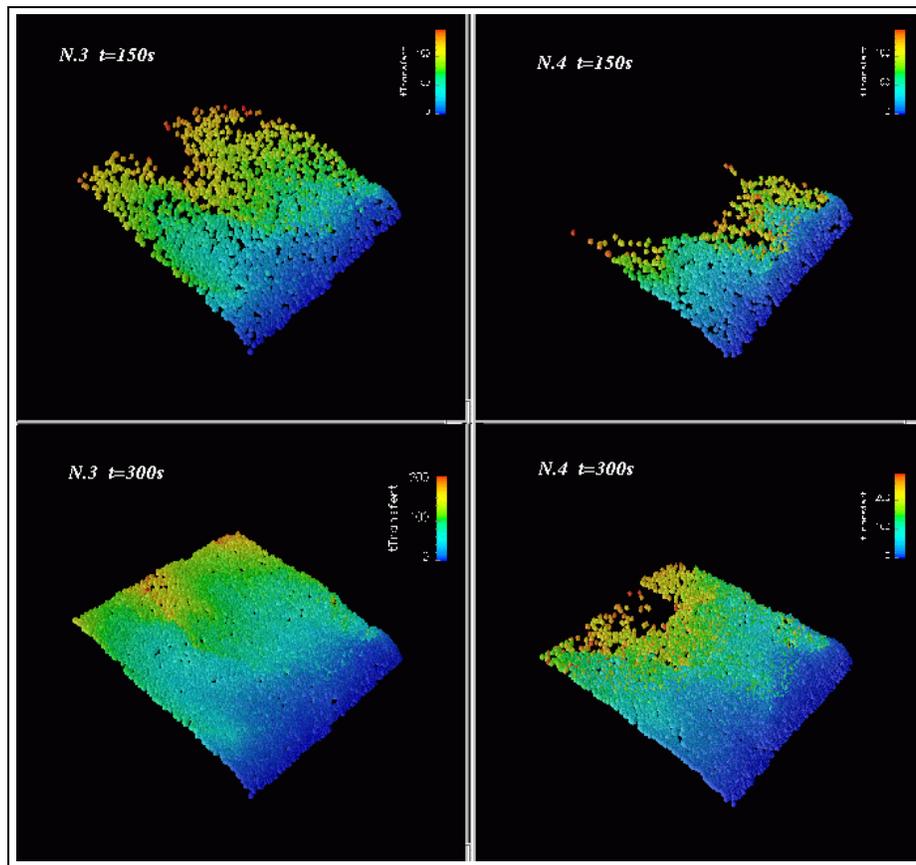


FIGURE 4.22 – Isochrones obtenus en milieu (en haut) et en fin de simulation (en bas) pour les surfaces 3 (à gauche) et 4 (à droite). Les points de couleur représentent les positions initiales des boules d'eau qui ont pu atteindre l'exutoire du domaine, les couleurs étant fonction du temps de séjour de ces boules sur la surface. En milieu de simulation, seules les boules tombées dans la partie basse des surfaces ont eu le temps d'atteindre l'exutoire, ce qui explique que seules ces régions des surfaces soient visibles.

Après avoir étudié les processus de ruissellement seuls et avoir, d'une certaine façon, validé le modèle mis en œuvre dans RIVAGE, on va s'intéresser à partir du chapitre suivant à tester l'ouverture de ce modèle particulière à la prise en compte de différents types de couplage avec des objets naturels contraignant l'écoulement des boules d'eau et avec des processus d'infiltration.

Chapitre 5

Interaction avec d'autres modèles.

RÉSUMÉ :

Après avoir exposé le modèle de ruissellement au chapitre précédent, on cherche maintenant à évaluer l'ouverture de ce modèle à la prise en compte de différents scénarios de couplage.

Les situations que l'on étudie reposent sur une mise en interaction des agents boules d'eau avec différents agents représentant des objets existant dans le milieu naturel.

Un premier exemple concerne l'interaction avec un agent de type barrage qui vient contraindre la circulation de l'eau : il s'agit de tester des solutions permettant de prendre en compte des conditions aux limites complexes.

On envisage ensuite deux modes de couplage entre processus de ruissellement et d'infiltration, en s'appuyant sur des modèles existant :

- prise en compte de zones de sol hétérogènes dotées de propriété d'infiltration dont les lois d'évolution sont régies par le modèle classique de Green et Ampt [Neuman, 1976],
- interception des transferts d'eau par des macropores d'origine biologique (trous de termites) sur la base du travail de [Léonard et al., 1999].

Dans chaque cas, les solutions adoptées sont décrites et des résultats de simulation sont exposés.

5.1 Problématique générale.

Les questions de recherche qui sont abordées en hydrologie montrent une grande variété d'interactions entre des processus de flux (transferts d'eau en surface, infiltration d'eau dans le sol, transports de soluté, interception par le couvert végétal, etc.) et des objets naturels (réseaux de fossés, aménagements de parcelles, etc.).

Dans ce chapitre, on cherche à montrer que le modèle général défini au chapitre précédent est ouvert à la prise en compte de telles situations d'interaction par la nature distribuée de son architecture.

Le principe général est de définir pour chaque couplage une ou plusieurs règles d'interaction entre agents boules d'eau représentant les écoulements d'eau et d'autres agents représentant des objets naturels (fossé, mur, zones de sol, etc.). De tels agents peuvent alors être dotés de comportements complexes, reposant sur d'autres modèles.

La mise en œuvre de ces lois d'interaction s'effectue lors de co-occurrences spatiales (et temporelles) d'agents. Ce principe est en fait celui que l'on a adopté précédemment : une boule d'eau *isolée* ne prend en compte que la direction de plus grande pente donnée par l'agent topographie ; en revanche elle calcule un gradient de hauteur d'eau lorsqu'elle se trouve en présence d'autres agents boules d'eau. La relation de co-occurrence reposant sur la construction d'une liste d'agents se trouvant dans un voisinage de longueur donnée (par exemple celle définie par le rayon du noyau d'interpolation η - cf. chapitre précédent) peut être généralisée à tout autre agent agissant dans l'environnement, qu'il soit ponctuel ou spatialement étendu.

Une question demeure ouverte quant au choix de privilégier une expression de telles lois d'interaction au niveau individuel des agents boules d'eau ou au niveau des agents agissant sur les boules d'eau. Par exemple, pour prendre en compte un processus d'infiltration sur une zone de sol, on peut :

- soit décider que c'est la boule d'eau qui va "agir" différemment si elle se trouve sur une telle zone d'infiltration, par exemple en définissant une probabilité d'infiltration par zone,
- soit décider que chaque zone de sol infiltre un certain nombre de boules d'eau selon une loi spécifiée.

A priori, les deux formulations peuvent être équivalentes. Toutefois dans certains cas, il peut apparaître plus pratique ou conceptuellement plus satisfaisant d'adopter l'une ou l'autre selon les cas à traiter. Par exemple dans le cas d'un mur qui ferait obstacle aux mouvements des boules d'eau, il semble plus pratique de raisonner du point de vue de la boule d'eau, qui "s'aperçoit" qu'elle risque traverser un mur et ajuste sa vitesse en conséquence, plutôt que d'imaginer ce même mur recherchant parmi l'ensemble des boules d'eau présents dans son voisinage quelles sont celles qui sont susceptibles de le traverser. Cependant, si le mur est un barrage chargé de réguler un flux de boules d'eau, des calculs sont à prévoir au niveau de cet agent barrage, et dans ce cas, la question est ouverte.

Ces quelques réflexions préliminaires permettent de donner un éclairage aux exemples qui vont suivre. On va présenter quelques cas d'interaction pour lesquels des solutions ont été adoptées. Elles valent surtout comme illustrations des principes que l'on vient d'évoquer. Si l'on entreprenait une étude précise sur un type de couplage donné, il conviendrait certainement d'approfondir de tels choix.

5.2. Conditions aux limites complexes.

Trois exemples sont présentés :

- une situation virtuelle de régulation de crue par barrage (cf. 5.2),
- une prise en compte de processus d’infiltration sur des zones de sol hétérogènes (cf. 5.3),
- une prise en compte de processus d’infiltration par des macropores d’origine biologique (trous de termites) (cf. 5.4).

Ces deux derniers exemples pourront être lus en regard de la discussion que l’on vient d’initier concernant le choix en matière de répartition de “l’initiative” de l’action dans une situation d’interaction assez similaire.

5.2 Conditions aux limites complexes.

Dans cette partie on donne un exemple d’interaction qui apparaît relever de conditions aux limites sur l’écoulement des boules d’eau. Il s’agit d’arriver à mettre en œuvre une situation virtuelle d’un barrage régulant une crue.

La première partie expose les principes d’interaction que l’on a adoptés dans ce cas et présente leurs mises en œuvre sur un exemple. Enfin, l’exposé se termine en replaçant ces choix dans une discussion plus large.

5.2.1 Principes.

Le problème auquel on s’intéresse est d’interposer un objet de type mur sur le passage d’agents boules d’eau. On cherche un mécanisme simple permettant aux agents boules d’eau de percevoir ce mur et d’éviter de le traverser.

Au chapitre précédent, lorsque l’on a exposé le modèle de ruissellement (cf. 4.1.3), on a rapidement évoqué le cas du destin de boules d’eau qui arrivent à un bord fermé du domaine. On a précisé que cette situation entraînait le calcul d’une nouvelle direction, en annulant la composante de la vitesse normale au bord considéré. Ce principe peut être généralisé à n’importe quelle contrainte de type obstacle s’exerçant sur le déplacement des agents boules d’eau.

Il suffit de considérer un obstacle comme constitué d’un ensemble d’arêtes, définies par une liste de points, eux-même situés dans le même référentiel d’espace que les agents boules d’eau (cf. 4.1.4). L’opération consistant à annuler la composante normale de la vitesse peut être appliquée successivement sur chaque arête tant que le déplacement de la boule d’eau l’entraîne à traverser une quelconque des arêtes de l’obstacle. Un algorithme possible est le suivant, pour lequel M est la position courante de la boule d’eau, M' sa nouvelle position, prévue après calcul de sa vitesse :

- la boule d’eau considère successivement les couples d’arêtes de l’obstacle (a_i, a_{i+1}) ,
- tant qu’il existe une intersection non vide entre $[MM']$ et une des deux arêtes d’un tel couple :
 - annuler par projection la composante normale à cette arête du vecteur vitesse.
 - calculer la nouvelle position M'
- incrémenter i .

Un premier exemple d’application de cet algorithme est donné à la figure 5.1 dans lequel

un mur à deux arêtes est interposé sur le parcours des boules d'eau.

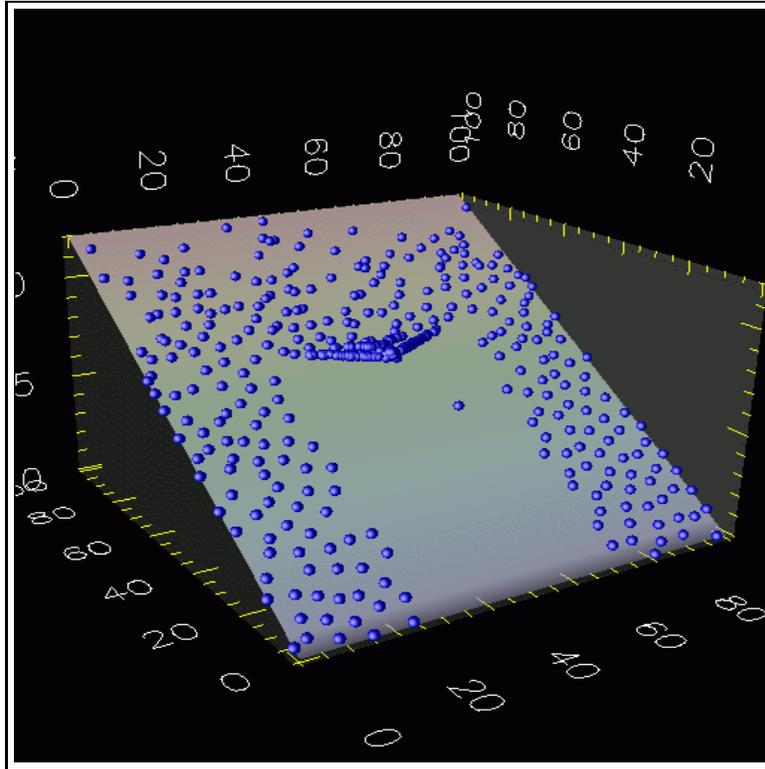


FIGURE 5.1 – Mouvements de boules d'eau contraints par un mur à deux arêtes sur plan incliné.

Il peut exister des cas complexes pour lesquels une telle formulation ne donne pas de bons résultats. La méthode est toutefois très simple, et l'algorithme se termine avec certitude pour un nombre quelconque d'arêtes, dans le pire des cas, la boule d'eau voit sa vitesse s'annuler complètement.

On peut se demander ce que peut apporter une telle formulation en termes d'interaction. En effet, une solution encore plus simple consiste tout simplement à modifier localement la surface topographique pour y inclure la forme du mur. Dans ce cas, les règles de mouvement des boules d'eau n'ont pas besoin d'être modifiées : de façon naturelle, elles vont être arrêtées par l'obstacle.

L'avantage de la méthode que l'on propose, qui est de définir un agent particulier représentant l'obstacle, est d'obtenir une architecture ouverte à l'ajout de comportements plus complexes au niveau de ces obstacles. Tout ne peut se représenter sous la forme d'une modification de la topographie, de plus de telles modifications reposent nécessairement sur la représentation interne de cette topographie, ce qui laisse peu de marge de manœuvre.

En encapsulant des comportements complexes dans un agent mur, on s'autorise à imaginer un obstacle mobile, dont la hauteur varie, ou un mur régulant un flux d'eau comme un barrage.

Pour adapter l'algorithme précédent à la prise en compte de hauteurs d'eau il suffit d'associer à chaque arête une hauteur d'eau au-dessus de laquelle elle ne sera pas "vue" par un agent

5.2. Conditions aux limites complexes.

boule d'eau. Dans le cas d'un obstacle mobile, on peut imaginer prendre en compte selon le même principe la vitesse *relative* de l'agent boule d'eau par rapport à l'obstacle, et d'annuler la composante normale de cette vitesse relative.

Enfin dans le cas d'un barrage régulant un flux d'eau, il suffit que l'agent barrage compatibilise le nombre de boules d'eau qui le traverse et qu'il n'impose ses contraintes, donc le calcul par la boule d'eau d'intersection avec ses arêtes, uniquement dans le cas où le nombre de boules d'eau ayant traversé a atteint une limite déterminée.

C'est la solution que l'on a implémentée et que l'on présente sur un exemple.

5.2.2 Régulation de crue par barrage.

Dans cette partie, on illustre l'application du modèle d'interception par un agent barrage défini précédemment.

On s'intéresse au scénario suivant : une pluie suivie d'une crue (flux amont). Le barrage que l'on interposera sur ce plan incliné sera chargé de laisser passer le flux d'eau généré par la pluie (situation considérée comme normale) mais réglera le flux provenant de la crue amont (événement catastrophique).

L'expérience est menée dans un premier temps sans barrage. Une surface (plan incliné) est soumise à une pluie de 30mm/h pendant 3min , puis un flux de 100mm/h est introduit en amont du plan sur une durée d'une minute, enfin la pluie reprend dans les mêmes conditions pendant 2 minutes.

La figure 5.2 représente le hétérogramme associé ainsi que le débit obtenu à l'exutoire. On observe successivement l'établissement d'un régime permanent correspondant à la pluviométrie normale, puis une augmentation de la sortie à l'exutoire consécutif à la crue et retardée par rapport à celle-ci d'environ 1 minute. Enfin le régime permanent normal s'établit à nouveau.

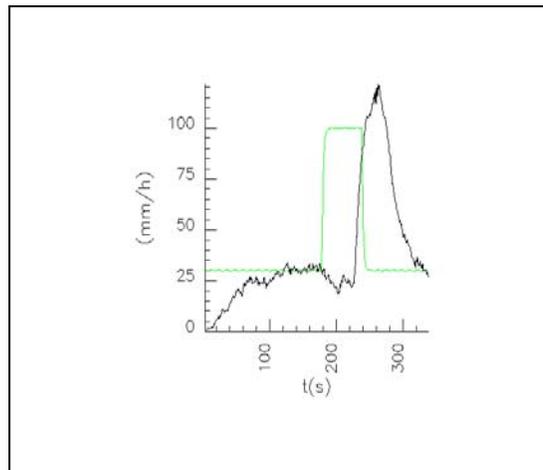


FIGURE 5.2 – Hétérogramme de pluie (en vert) et sortie à l'exutoire (en noir). Un débit permanent s'établit puis décroît légèrement pendant le temps mis par la crue pour atteindre le barrage, enfin le débit reflète la crue avec un retard de 60s environ.

La figure 5.3 montre l'évolution du champ des hauteurs d'eau au passage de la crue.

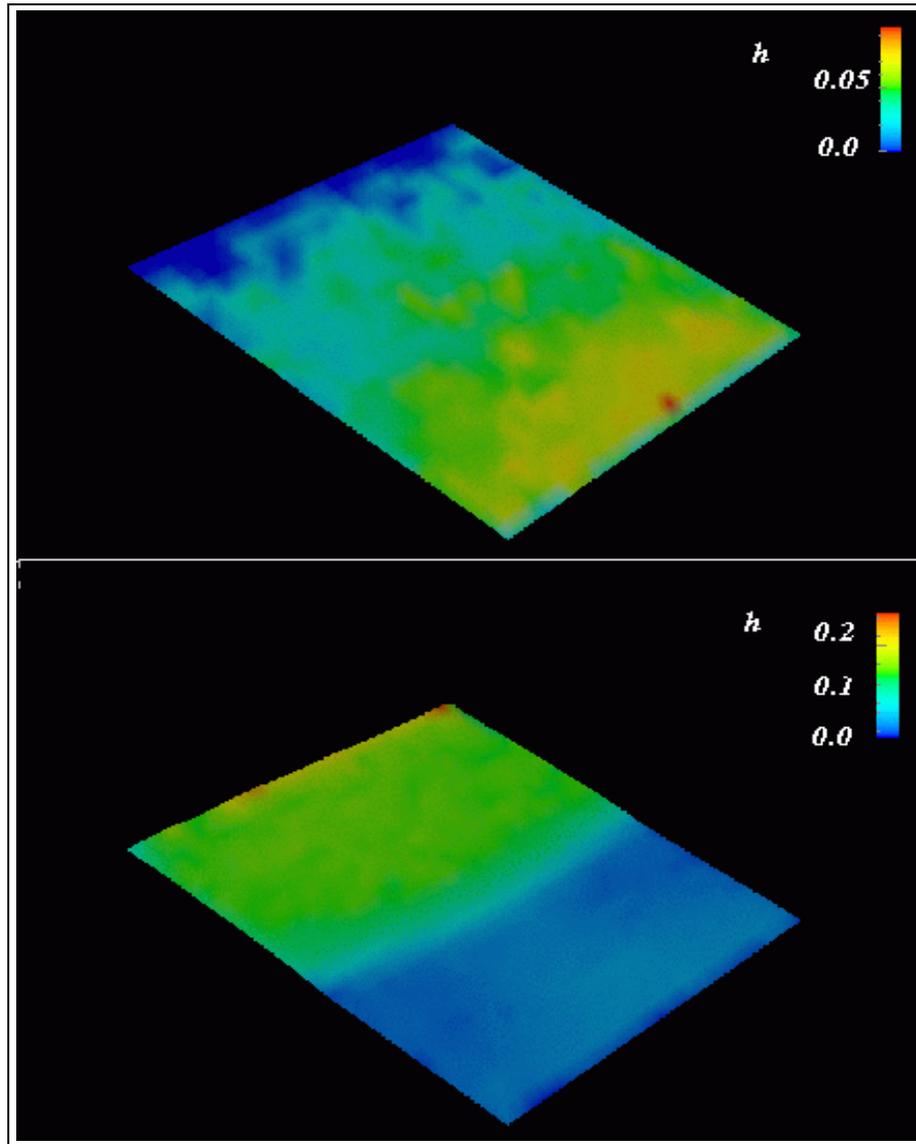


FIGURE 5.3 – Champ des hauteurs d'eau avant (en haut : $0.08cm$) et au passage de la crue (en bas : $0.2cm$).

On simule à nouveau le même scénario mais en introduisant un agent barrage chargé de réguler le débit passant à mi-pente. Cet agent laisse passer un débit de $0.084cm^2/s$ correspondant au flux généré par la pluie de $30mm/h$, il retient toutes les boules d'eau dès qu'un tel flux est dépassé au cours d'un pas de temps.

Les résultats sont exposés aux figures 5.4 et 5.5.

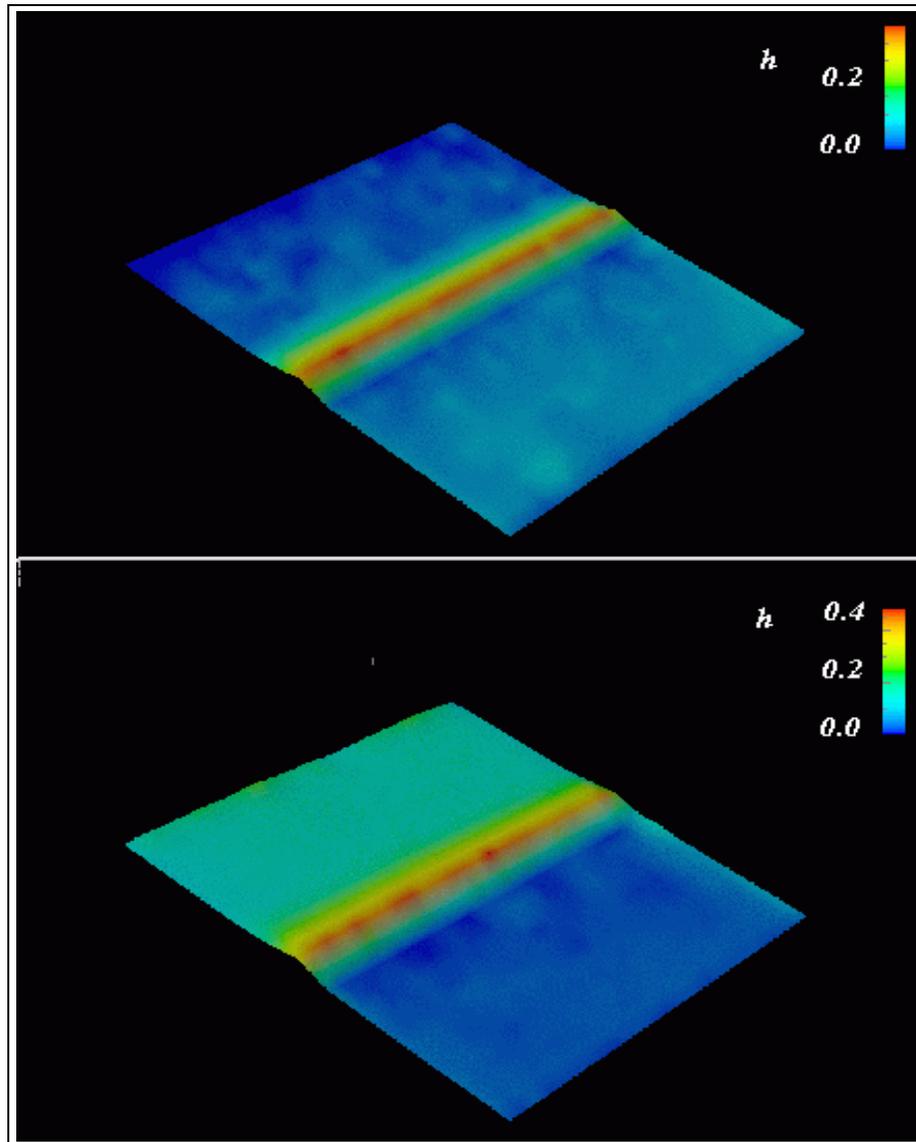


FIGURE 5.4 – Champ de hauteur d'eau dans le cas d'une régulation par barrage. En régime de pluie simple (en haut), le barrage ralentit un peu le flux (en raison des approximations de calcul), d'où l'augmentation de la hauteur d'eau à son niveau. Au passage la crue (en bas), on peut observer la différence nette de hauteur en amont et en aval du barrage.

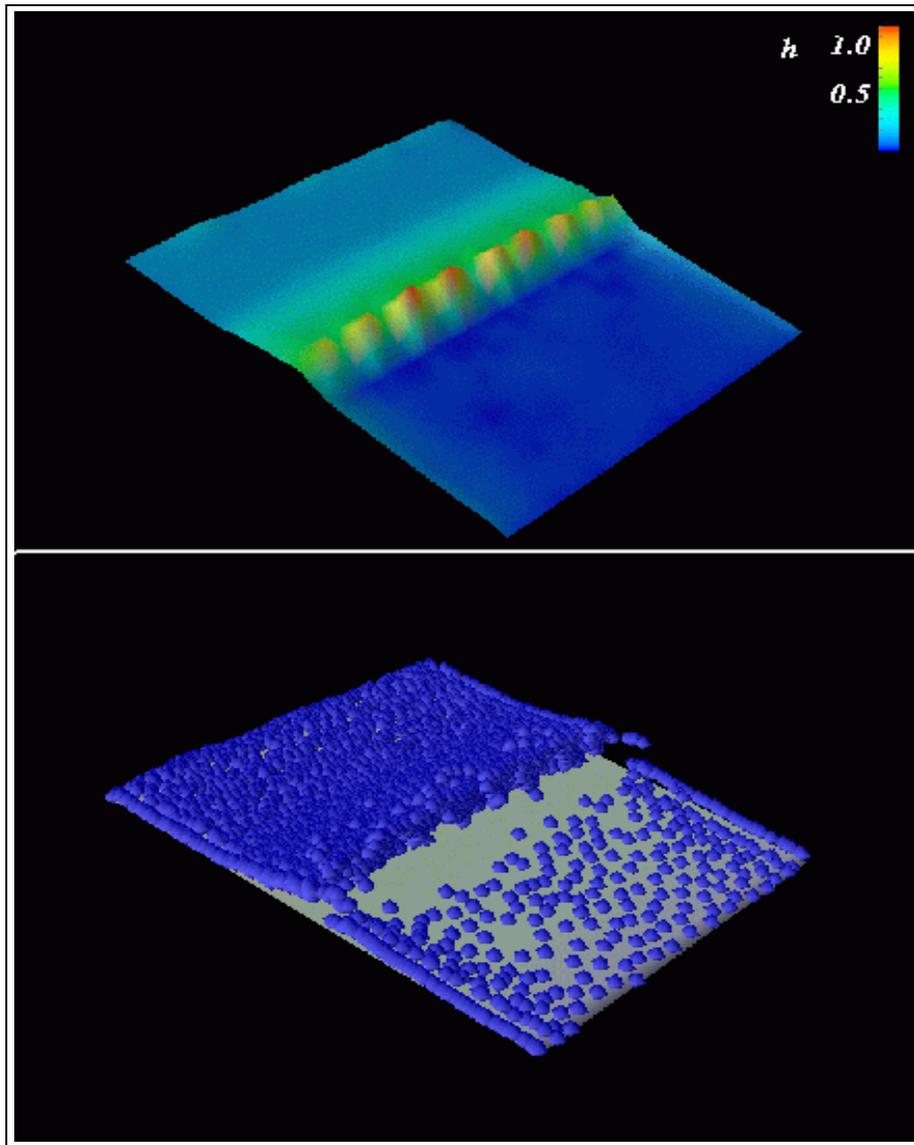


FIGURE 5.5 – Champ de hauteur d'eau au plus fort de la crue (en haut) et positions des boules d'eau correspondantes (en bas). Les boules d'eau sont positionnées à leur altitude $(z + h)$. Les discontinuités au niveau des hauteurs d'eau et les positions aberrantes des boules d'eau qui paraissent flotter en l'air proviennent des problèmes de calcul d'interpolation sur la discontinuité matérialisée par le barrage (cf. 5.2.3).

5.2. Conditions aux limites complexes.

On peut remarquer l'effet régulateur du barrage au niveau du champ des hauteurs d'eau. Cet effet est encore plus manifeste sur la courbe de débit à l'exutoire (figure 5.6), que l'on peut comparer avec celle obtenue précédemment sans barrage (cf. 5.2). L'augmentation de débit au passage de la crue est beaucoup moins marqué.

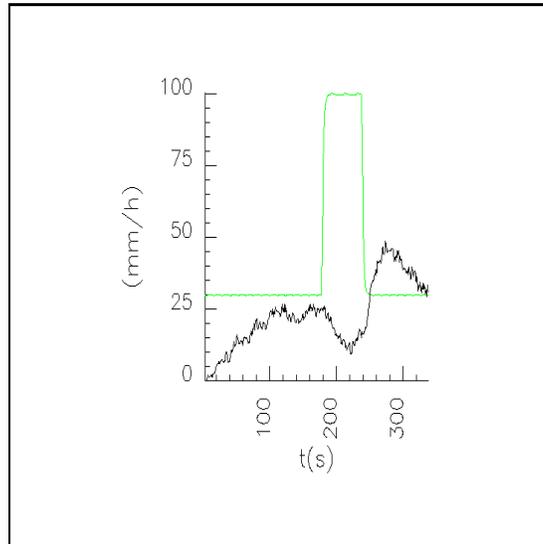


FIGURE 5.6 – Courbe de sortie à l'exutoire dans le cas d'une régulation par barrage (courbe noire) et pluie (courbe verte). L'effet de la crue est beaucoup moins important que dans le cas sans barrage (figure 5.2).

Cette expérience sur un exemple "jouet" ouvre des perspectives intéressantes pour utiliser RIVAGE comme outil permettant de tester qualitativement des aménagements de parcelles ou de bassin versant en introduisant de la même manière que pour l'agent barrage d'autres agents représentant des réseaux de haies, des pièges à ruissellement, etc.

Il convient de remarquer que la solution très simplificatrice que l'on a adoptée dans cet exemple, présente certains problèmes en générant des fluctuations dans les champs de hauteur d'eau au niveau de discontinuités. C'est l'objet de la discussion qui suit.

5.2.3 Discussion.

On a cherché dans les exemples précédents à illustrer une approche assez simple de gestion d'obstacle et de régulation de flux. Toutefois, comme on a pu le constater, la solution adoptée entraîne des fluctuations.

En réalité ce problème provient du fait que l'on a géré les conditions aux limites uniquement du point de vue de leur aspect contrainte sur le mouvement des boules d'eau : en décrivant une règle simple d'annulation de la composante normale à l'obstacle de la vitesse d'une boule d'eau.

Il faut aussi prendre en compte de telles discontinuités dues à la présence d'obstacles dans le calcul par interpolation du champ des hauteurs d'eau. Ce n'est pas le cas dans la version actuelle de RIVAGE, ce qui explique que l'on observe au niveau du barrage (cf. figure 5.5) :

- d'une part des boules d'eau qui semblent "flotter" en l'air à leur passage au niveau du barrage,
- d'autre part des fluctuations de hauteurs d'eau.

Dans les deux cas, il faudrait introduire un test supplémentaire pour ne pas comptabiliser les boules d'eau situées en amont du barrage dans le calcul des hauteurs d'eau en aval du barrage et réciproquement. Mais il reste toujours le problème que l'interpolation sur un voisinage de rayon η ne tient pas compte de la discontinuité et l'estimation peut être erronée.

Ce problème concerne en fait toutes les méthodes particulières développant des calculs d'interpolation sur des nuages de particules ("meshless methods"), notamment les méthodes SPH [Belytschko et al., 1996]. On a déjà signalé (cf. 2.1.2) que ces méthodes étaient sensibles au problème de conditions aux limites. A la lumière des exemples précédents, on peut mieux apprécier cette difficulté.

De telles méthodes sont relativement souples pour permettre de prendre en compte des contraintes portant sur le mouvement des particules : en utilisant des ensembles de particules fictives ("boundary particles") il est assez facile de contraindre des particules à suivre des discontinuités complexes. Avec une solution différente, les exemples que l'on a présentés parviennent au même résultat. Cependant, les formules d'interpolation elles-mêmes ont du mal à prendre en compte de telles discontinuités. Des méthodes existent, elles reposent généralement sur la définition d'un critère de visibilité inspiré par la diffraction optique : ce critère permet de dire si une particule est "vue" par une autre, donc prise en compte dans les sommations ; il est parfois nécessaire de prendre en compte des couples de particules situées de part et d'autre de la discontinuité lorsqu'elles se trouvent suffisamment proches des extrémités d'une discontinuité. Ces méthodes doivent être étudiées analytiquement pour apprécier les instabilités qu'elles peuvent engendrer [Belytschko et al., 1996]. C'est un problème mathématique difficile.

Le problème est donc loin d'être aussi simple que l'exposé des exemples précédents pourrait le laisser croire. Tout dépend en fait de ce que l'on cherche à obtenir. Si l'on veut observer qualitativement l'effet de l'ajout d'obstacles pour contraindre les écoulements, une solution du type de celle décrite précédemment répond au problème ; si l'on veut calculer de façon relativement précise le champ des hauteurs d'eau obtenus (comme au chapitre précédent), il convient d'approfondir la question de cette gestion.

Une autre remarque concerne les limites de la discrétisation : par exemple, dans le cas où l'obstacle est "petit" par rapport à la taille des agents boules d'eau, ou dans le cas où la régulation de flux (telle que dans l'exemple du barrage précédent) concerne des débits inférieurs au volume unitaire d'une boule d'eau.

Dans le premier cas, il y a peu de chance que l'obstacle soit vu par les boules d'eau, c'est-à-dire qu'une intersection existe entre $[MM']$ et l'une quelconque des arêtes, de petites dimensions, de l'obstacle. Dans le deuxième cas, on ne peut plus compter simplement le nombre de boules d'eau qui passent.

Dans les deux cas, l'interception de quantités d'eau discrètes peut devenir gênante. Il peut s'avérer utile de raisonner en terme de flux et d'estimer le flux susceptible de passer à travers le barrage, c'est-à-dire le produit hv^1 . Une question se pose alors : comment répercuter

¹cette estimation réalisée par interpolation s'expose aux mêmes problèmes de discontinuités que l'on vient

5.3. Infiltration sur une zone de sol.

l'interception de faibles quantités d'eau sur le reste de l'écoulement. Une manière d'envisager ce problème est de permettre aux volumes portés par les boules d'eau de *varier*. Dans ce cas par exemple, le barrage pourrait créer de nouveaux agents boules d'eau en aval et répartir la perte de volume sur les boules d'eau retenues en amont.

On va retrouver de semblables considérations dans la section suivante (5.3) pour prendre en compte des processus d'infiltration.

5.3 Infiltration sur une zone de sol.

On aborde ici une nouvelle déclinaison de RIVAGE permettant la prise en compte d'objets zones de sol, puis à la section suivante, d'objets macropores d'origine biologique (trous de termites), qui agissent tous en interceptant de quantités d'eau dans une zone spatiale plus ou moins étendue.

5.3.1 Modèle.

Un modèle d'infiltration très répandu en hydrologie est le modèle de Green et Ampt [Neuman, 1976] qui est une approximation des EDP classiques de Darcy-Richards pour les écoulements en milieux non saturés [Vreugdenhil, 1994]. Ce modèle définit une vitesse d'infiltration potentielle f de la manière suivante :

$$f = K_s \frac{h + L + \psi}{L} \quad (5.1)$$

où K_s est la conductivité hydraulique du sol à saturation (homogène à une vitesse), h est la hauteur d'eau locale, L est la profondeur du front d'humectation et ψ exprime la pression des forces de succion au niveau de ce front.

Plus précisément, $L = I/(\theta_s - \theta_i)$, où I est la hauteur d'eau infiltrée, θ_s et θ_i respectivement, teneur en eau du sol à saturation et initiale. ψ peut être obtenu par intégration de la courbe de conductivité hydraulique du sol $K(p)$ fonction de la pression [Neuman, 1976].

On a illustré l'évolution de f en fonction de la quantité d'eau infiltrée L (cf. figure 5.7). Cette courbe permet de représenter le fait que l'infiltration est de moins en moins rapide à mesure que la teneur en eau augmente. Par ailleurs, il faut souligner que f est une vitesse d'infiltration *potentielle* : si elle est égale à 20mm/h cela ne signifie pas qu'il s'infiltrerait nécessairement 20mm d'eau en 1 heure, la quantité d'eau infiltrée est naturellement limitée par la quantité d'eau disponible en surface.

Le modèle de Green et Ampt est simple dans sa formulation, il induit la vision d'une zone de sol caractérisée par quelques paramètres $(K_s, \theta_i, \theta_s, \psi)$, accumulant de l'eau dans un réservoir de taille L variable. On a donc choisi de mettre en œuvre un couplage entre les agents boules d'eau et différents agents sols dont le comportement d'infiltration est régi par ce modèle.

La question soulevée précédemment par la discrétisation des écoulements se pose à nouveau. En effet un agent sol peut très bien infiltrer au cours d'un pas de temps une partie seulement du volume présent sur sa zone.

d'évoquer.

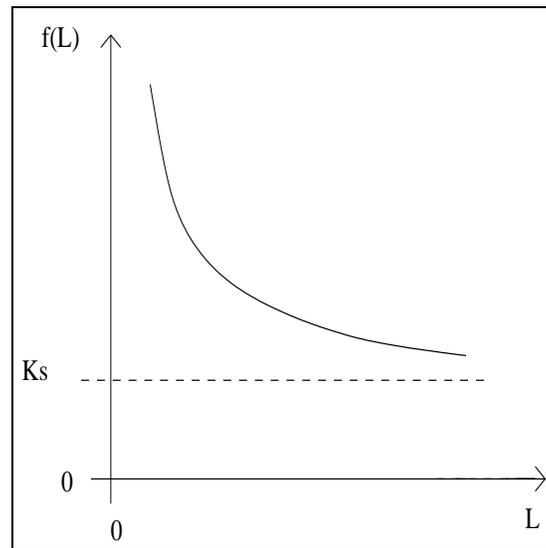


FIGURE 5.7 – Evolution schématique de la vitesse d'infiltration f en fonction de la profondeur du front d'humectation L . K_s est la conductivité à saturation du sol.

Une solution à ce problème peut être de permettre au volume porté par les boules d'eau de *varier*. Un agent sol calcule selon le modèle de Green et Ampt la quantité d'eau qu'il peut infiltrer au cours du pas de temps - en tenant compte de sa teneur en eau actuelle - et estime le volume d'eau disponible sur sa zone spatiale - en sommant les volumes des agents boules d'eau en circulation - puis en "capte" tout ou partie. Cette perte de volume en surface est répercutée sur chaque boule d'eau en proportion de son volume actuel.

Le principe est donc très simple à mettre en œuvre. L'action est ici à l'initiative des agents sols, les agents boules d'eau subissant passivement une perte de volume lorsqu'ils traversent une zone de sol infiltrante. Si cette perte atteint le volume actuel d'une boule d'eau, elle est détruite. La localisation des boules d'eau sur une zone de sol peut se faire assez facilement en utilisant un module général d'interpolation Map (cf. annexe), les différentes zones étant vues comme des polygones que l'on peut indexer et dont les frontières sont données par une liste de points.

L'algorithme est le suivant :

1. chaque agent sol détermine la liste des boules d'eau circulant sur sa zone, puis successivement :
 - (a) calcule la hauteur d'eau moyenne h sur l'ensemble de sa zone, en sommant les volumes des boules d'eau et en divisant par l'aire S de la zone,
 - (b) calcule la vitesse d'infiltration f , en donnant comme valeur initiale pour I , une teneur initiale en eau (par exemple $\epsilon \neq 0$ dans le cas d'un sol sec) avec l'équation 5.1,
 - (c) calcule la perte de volume de chaque boule d'eau i , $\omega'_i = \min(\omega_i, \omega_i f \Delta t / h)$, ω_i représentant le volume de la boule d'eau i ,
 - (d) accumule les quantités d'eau effectivement infiltrées, $I \leftarrow I + 1/S \sum_i \omega'_i$

5.3. Infiltration sur une zone de sol.

Cette approche donne des résultats corrects par rapport à des données d'infiltration et de pluie (cf. section suivante). On peut se rendre compte sur la figure 5.8 de la variation de volume des boules d'eau circulant sur une surface présentant plusieurs zones de sol hétérogènes.

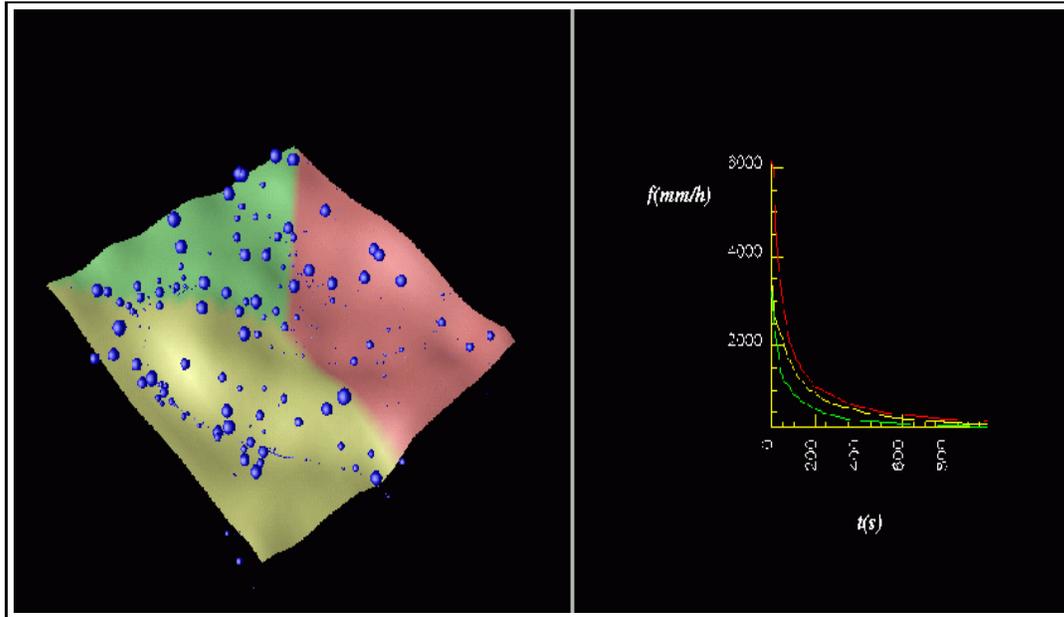


FIGURE 5.8 – Infiltration sur des zones de sol hétérogènes. À gauche trois zones de sol de couleur différente sur lesquelles circulent des boules d'eau, la taille des boules d'eau reflète leur variation de volume sous l'action des processus d'infiltration. À droite, on a représenté l'évolution des vitesses d'infiltration sur les trois zones avec des couleurs correspondantes.

Les couplages ruissellement-infiltration dans les modèles EDP reposent généralement sur l'introduction de terme puits en plus du terme source représentant la pluie, en chaque nœud du maillage de résolution. Cette façon de distribuer l'infiltration sur le domaine, en prenant en compte la hauteur d'eau locale permet d'observer une répartition hétérogène des quantités d'eau infiltrées : sur les nœuds où la hauteur d'eau locale est importante, l'infiltration est plus importante, mais peut être plus faible deux mailles plus loin.

Le modèle que l'on vient de décrire ne prend pas en compte de telles hétérogénéités, du moins pas directement, les calculs étant moyennés sur l'ensemble de la zone. En revanche, si l'on mémorisait à chaque instant les quantités d'eau infiltrées aux points occupés par les agents boules d'eau, on pourrait retrouver cette information. Alternativement, on pourrait utiliser des zones de sol plus petites, ce qui rapprocherait le modèle du niveau de discrétisation réalisé dans les modèles EDP.

En pratique, l'hétérogénéité des processus d'infiltration est de toute façon plutôt conditionnée par les hétérogénéités de structure du sol lui-même.

5.3.2 Comparaison à des données expérimentales.

En travaillant en collaboration avec Joël Léonard, j'ai pu disposer de données expérimentales concernant un épisode pluvieux sur une parcelle de $1m^2$ (figure 5.9), pour lequel des courbes d'évolution de l'infiltration et de débit de sortie à l'exutoire ont été calculées après mesure sur le terrain [Léonard et Rajot, 1997].

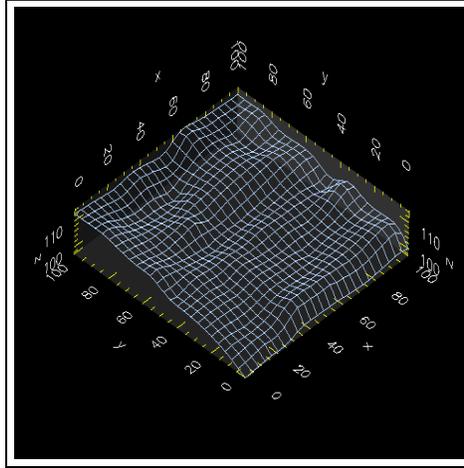


FIGURE 5.9 – Parcelle d'étude de $1m^2$.

L'épisode pluvieux sur une durée de 1 heure présente les variations suivantes : $22.2mm/h$ sur $5min$, un pic à $106.8mm/h$ pendant $1min$, puis $82.8mm/h$ sur $4min$, $66.6mm/h$ pendant $5min$, $42.6mm/h$ pendant $5min$, $37.2mm/h$ pendant $15min$, et à nouveau $22.2mm/h$ sur les 25 dernières minutes (cf. hyétogramme figure 5.10). A partir d'échantillons de sol, les constantes $K_s = 2mm/h$, $\theta_s = 0.34cm$ et $\theta_i = 0.04cm$ ont été elles-aussi estimées. Par méthode inverse (en intégrant la courbe de conduction hydraulique fonction de la pression du sol [Neuman, 1976]), le paramètre ψ peut être calculé, $6.4cm$. La parcelle est supposée homogène. Une courbe d'infiltration a pu ainsi être calculée à partir de ces données expérimentales.

On cherche à simuler le même épisode pluvieux. On choisit comme paramètres ($\eta = 4cm$, $\phi = 1.3cm$) (cf. chapitre précédent pour le choix des paramètres). On instancie un agent sol doté des caractéristiques mesurées et l'on met en œuvre le modèle précédent. Le temps de calcul est de $15min$ pour $1h$ de pluie, avec un pas de temps de $1s$.

Les résultats sont présentés à la figure 5.10. On peut constater que le modèle reproduit fidèlement les courbes d'infiltration et de débit à l'exutoire, mises à part quelques fluctuations. Le comportement du modèle est donc tout à fait satisfaisant et permet d'envisager des études plus approfondies sur des situations plus complexes de couplage entre ruissellement et infiltration.

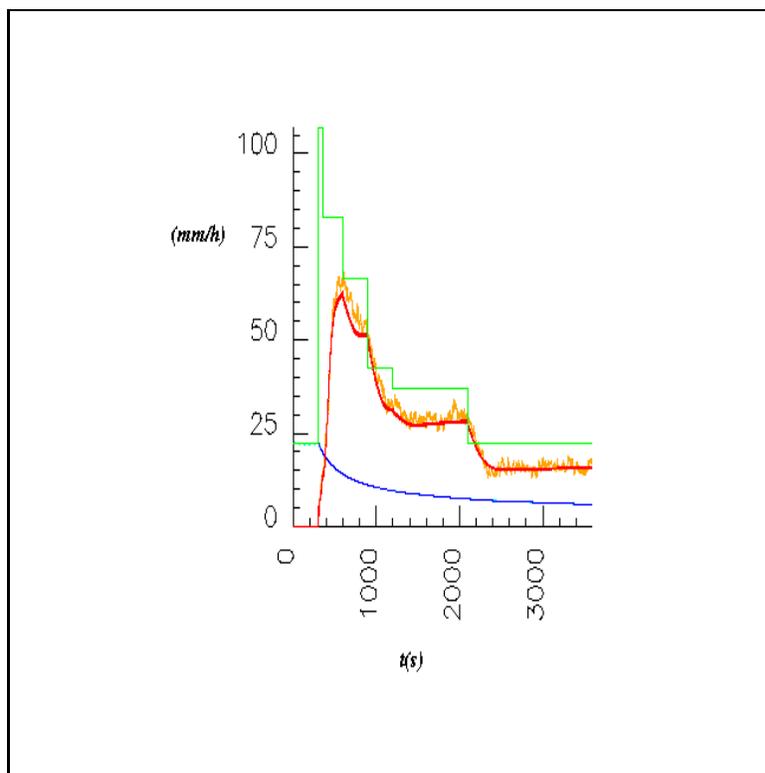


FIGURE 5.10 – Comparaison des courbes d'évolution du débit à l'exutoire (en rouge données expérimentales, en orange simulée) et de l'infiltration (en bleu données, en bleu ciel simulée) sur un épisode pluvieux complexe (en vert). Les courbes simulées reproduisent les courbes expérimentales avec quelques fluctuations. On peut noter le temps mis pour que l'eau commence à ruisseler : $5min$ (time to ponding).

5.4 Infiltration dans des macropores.

Dans cette section on cherche à traduire un modèle d'interception du ruissellement par des macropores biologiques (travaux de [Léonard et al., 1999]) en modèle d'interaction entre agents boules d'eau et agents macropores.

5.4.1 Modèle.

Tout au long de ce travail de thèse, j'ai été amené à travailler en étroite collaboration avec Joël Léonard, étudiant en thèse d'hydrologie au LIA, qui s'intéresse à l'influence sur le ruissellement de la présence de macropores biologiques (trous de termite) sur un sol encroûté. Ses travaux reposent sur un modèle de résolution d'équations aux dérivées partielles du ruissellement et de l'infiltration dans lequel a été intégré un terme de puits correspondant à la présence sur une maille d'un ou plusieurs macropores [Léonard et al., 1999].

J'ai donc été naturellement amené à me demander comment un tel modèle pouvait être introduit dans RIVAGE.

Le terme de puits introduit dans le modèle EDP peut être interprété comme une interception du ruissellement par un macropore circulaire [Léonard et al., 1999] :

$$q_m = R \oint_C (h\vec{v}^* \cdot \vec{n}) d\theta \quad (5.2)$$

où R est le rayon du trou et la notation $*$ indique que le vecteur vitesse \vec{v} n'est pris en compte que lorsque sa composante radiale est dirigée vers le centre du trou (flux entrant).

L'équation se réduit à $q_m = 2R.hv$ pour un flux uni-directionnel. q_m correspond à un flux *potentiel* comme f pour l'infiltration (cf. section précédente) - le macropore a par ailleurs une capacité maximale d'absorption. Par ailleurs, dans le modèle EDP, il n'y a pas de différence conceptuelle entre les termes de puits correspondant à une infiltration "spatiale" sur l'ensemble du zone de sol et le terme de puits représentant l'infiltration dans les macropores. Les quantités d'eau infiltrées s'ajoutent sur chaque maille.

On a cherché à traduire ce modèle dans RIVAGE.

On introduit un nouvel agent, macropore, défini par sa position, son rayon et sa capacité maximale d'absorption. A priori, la manière la plus simple de calculer la quantité d'eau interceptée par un tel macropore semble être de compter le nombre de boules d'eau passant sur le trou dans un intervalle de temps Δt . Une telle approche s'avère en réalité inappropriée : les macropores dont le diamètre n'excède pas $2cm$ sont trop "petits" par rapport à la taille des boules d'eau et il y a de fortes chances pour que très peu de boules d'eau passent effectivement *sur* le trou. Il faut donc estimer un *flux* moyen et trouver une formulation équivalente dans le cas des boules d'eau à l'équation donnant q_m .

Le macropore étant de petite taille, une solution consiste à négliger la géométrie du trou, et calculer le flux apparent sur la position du trou². En utilisant le même type de calcul que

²Ne pas négliger la géométrie du trou consisterait à sommer les flux sur un ensemble de points échantillonnés sur sa circonférence.

5.4. Infiltration dans des macropores.

pour la hauteur d'eau, on obtient :

$$q_m(\vec{r}) = \sum_i \omega_i W(\vec{r} - \vec{r}_i, \eta) (v_i^* \cdot \vec{n}) \pi d_m \quad (5.3)$$

où ω_i et v_i^* sont respectivement le volume et la vitesse d'une boule d'eau i et la notation $*$ indique que le vecteur vitesse v_i^* n'est pris en compte que lorsque sa composante radiale est dirigée vers le centre du trou (flux entrant) (cf. supra). d_m est le diamètre du trou.

Comme dans le cas de l'infiltration, la perte de volume doit être répartie sur l'ensemble des boules contribuant au flux entrant dans le macropore. De façon assez naturelle, on peut rendre cette perte de volume proportionnelle à la contribution de chaque boule rapportée à la perte de volume totale :

$$\omega'_i = \min(\omega_i, \omega_i \frac{q_i}{q_m}) \quad (5.4)$$

où q_i désigne la contribution de la boule d'eau i au flux entrant (terme dans la somme de l'équation 5.3).

5.4.2 Expériences.

On présente ici des résultats préliminaires quant à la mise en œuvre du modèle précédent, dans le cas d'un macropore situé sur un plan incliné soumis à un épisode pluvieux d'intensité constante.

Le flux moyen entrant dans le trou est dans ce cas égal, avec une bonne approximation, à $q_m = 2R \cdot \bar{h} \bar{v}$, où \bar{h} et \bar{v} désignent les hauteur d'eau et vitesse moyenne au niveau du trou (cf. supra). Ce flux s'interprète comme une interception de l'eau de ruissellement sur une longueur correspondant au diamètre du trou.

On simule un tel écoulement sous pluie constante de $100mm/h$ sur un plan incliné sur lequel est instancié un agent macropore avec un diamètre de $1.2cm$. On observe les variations de flux estimé par rapport au flux attendu. La hauteur d'eau moyenne obtenue est de $0.07cm$ et la vitesse moyenne de $2.5cm/s$. Le flux moyen attendu est donc de $0.20cm^3/s$.

Les résultats sont présentés pour une résolution croissante ($\eta = 4cm$ et $\phi = 1.3; 1; 0.8cm$, diamètre des boules d'eau) (cf. figure 5.11).

Les résultats présentent d'importantes fluctuations même pour la résolution la plus fine. La valeur moyenne estimée semble être inférieure à $0.15cm^3/s$, soit un écart relatif de 20%.

Ce travail devra être approfondi. En particulier, on peut penser que la taille du noyau η ici de $4cm$ peut avoir une influence par rapport à la taille du trou (diamètre de $1.2cm$).

On peut aussi penser s'inspirer des équations de conservation de masse établies dans la littérature SPH [Morris, 1996], et utiliser un calcul plus complexe du flux, faisant intervenir un calcul de divergence (cf. 4.23 au chapitre précédent), du type :

$$\frac{dh(\vec{r})}{dt} = -h \nabla_{\vec{r}} \cdot \vec{v}(\vec{r}) + p(\vec{r}) + s(\vec{r})$$

où h désigne la hauteur d'eau, $p(\vec{r})$ et $s(\vec{r})$ désignent respectivement des puits et sources locaux.

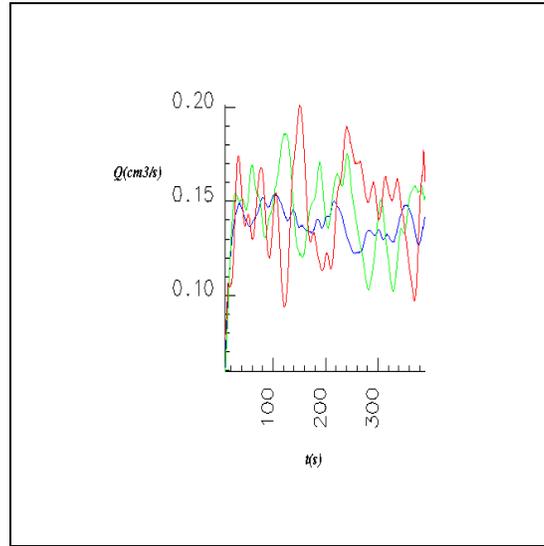


FIGURE 5.11 – Evolution du flux estimé dans un macropore situé au centre d'un plan incliné soumis à une pluie constante. Les courbes montrent différents résultats suivant un diamètre de boule d'eau décroissant $\phi = 1.3\text{cm}$ (rouge) ; 1.0cm (vert) ; 0.8cm (bleu) : on peut observer une réduction des fluctuations avec la décroissance de ϕ autour d'une valeur moyenne inférieure à $0.15\text{cm}^3/\text{s}$, soit un écart relatif de 20% avec la valeur attendue.

Equation que l'on pourrait traduire par :

$$\frac{dh_j}{dt} = \sum_i \omega_i \vec{v}_i \cdot \nabla_j W_{ji} + \sum_i \frac{\omega_i}{h_i} p_i W_{ji} + \sum_i \frac{\omega_i}{h_i} s_i W_{ji}$$

Cette formulation peut être intéressante, elle n'a pour le moment pas été testée, car elle propulse le modèle dans une toute autre classe, où intervient nécessairement une intégration au cours du temps plus complexe, demandant l'utilisation de schéma de résolution du type Runge-Kutta ou Leap-Frog [Benz, 1990].

On n'a pas cherché ici à coupler directement le modèle de ruissellement de RIVAGE avec un modèle de calcul de flux, ce qui serait tout à fait faisable. Comme dans le cas de l'infiltration, avec le couplage à un modèle de Green et Ampt, le modèle du macropore pourrait fournir une loi d'évolution du débit en fonction des données de hauteur d'eau et de vitesse produites par la circulation des boules d'eau sur la surface.

Les exemples que l'on a présentés montrent que la gestion de conditions aux limites complexes n'est pas un problème facile à résoudre, mais que d'une certaine manière le fait de découpler les difficultés en mettant en interaction différents types de modèles, conçus de façon indépendante, avec le modèle central du ruissellement fournit des solutions intéressantes.

Par ailleurs, comme on l'a vu, on peut être tenté devant la simplicité des principes définis dans le modèle de ruissellement de construire sur les mêmes idées de distribution de l'action des traductions de modèles existant ou de chercher à inventer de nouveaux modèles. C'est en ce sens que RIVAGE peut devenir progressivement un outil d'investigation sur des questions de recherche thématique.

5.4. Infiltration dans des macropores.

Dans cette même perspective, on aborde au chapitre suivant une construction exploratoire d'un modèle de processus d'érosion, dans lequel de nouveaux agents sont introduits et de nouveaux comportements donnés aux agents boules d'eau.

Chapitre 6

Simulation exploratoire des processus d'érosion.

RÉSUMÉ :

Dans ce chapitre on présente un travail exploratoire de modélisation des processus d'érosion sur une surface de sol.

Ces travaux diffèrent de ceux exposés au chapitre précédent où il s'agissait principalement de mettre en interaction le modèle de ruissellement avec des modèles externes supposés connus.

La démarche adoptée consiste ici à traduire en modèle opératoire un certain nombre de descriptions de terrain concernant les processus d'érosion.

Cette traduction a conduit à formuler de nouvelles hypothèses de fonctionnement du modèle de ruissellement pour prendre en compte deux types de processus : érosion due à l'impact de gouttes de pluie (phénomène de splash) et érosion linéaire due à la circulation d'eau sur la surface.

Les solutions présentées reposent sur l'ajout de nouveaux comportements au niveau des agents boules d'eau et l'introduction de nouveaux types d'agents représentant les transferts de matière arrachée par l'érosion. Par ailleurs, pour rendre compte du couplage entre érosion et infiltration, on a cherché à introduire un indicateur spatialisé d'altération des états de surface, qui traduit l'apparition de zones de sol imperméables qui viennent se superposer aux zones d'infiltration initiales.

Le travail réalisé en simulation tente d'expliquer certaines relations observées sur le terrain : influence de la pente de la surface sur les quantités de matière transportées et les quantités d'eau infiltrées.

6.1 Elaboration d'un modèle.

Dans ce chapitre, on expose des pistes de modélisation autour de la question du couplage entre processus d'érosion, ruissellement et infiltration. Ce travail est avant tout exploratoire. Contrairement aux exemples présentés aux chapitres précédents, pour lesquels les solutions retenues ont surtout consisté en une agentification de modèles existants, j'ai tenté ici de *traduire* en modèle opératoire un certain nombre d'observations de terrain qui s'attachent à préciser les interactions complexes entre différents processus en jeu.

6.1.1 Description des processus dans leur contexte naturel.

En lisant un certain nombre d'exposés portant sur des travaux de modélisation et de description de terrain réalisés dans le domaine, j'ai pu me familiariser avec la thématique de recherche sur l'évolution des états de surface d'un sol sous l'action des processus d'érosion et ses conséquences sur l'infiltration et le ruissellement [Valentin, 1981] [Planchon et al., 1987].

Les études expérimentales réalisées sur le terrain (par exemple, [Bradford et Foster, 1996], [Fox et Bryan, 1999] [Fox et al., 1997] [Planchon et al., 1999a] [Planchon et al., 1999b]) permettent de se faire une image relativement précise des interactions entre les différents processus en jeu.

Au cours d'une pluie, un sol est soumis à l'impact de gouttes de pluie. Les impacts des gouttes d'une part arrachent et projettent des particules de terre, créant bosses et creux sur la surface, d'autre part compactent localement le sol, ce qui modifie sa structure poreuse et diminue sa capacité d'infiltration : c'est le processus de "splash". Après assèchement du sol, une croûte de "battance" se forme modifiant à long terme les états de surface [Valentin, 1981]. Cet effet est difficile à mesurer et dépend de la cohésion du sol, qui résiste plus ou moins bien aux impacts des gouttes.

Le splash a une conséquence importante. En limitant l'infiltration, il permet l'initiation du ruissellement sur une surface. De l'eau peut ainsi s'accumuler localement et couler en suivant les aspérités du sol. La présence d'eau produit deux conséquences majeures : le sol, protégé par une pellicule d'eau, résiste mieux aux impacts - ce qui limite le splash -, par ailleurs le fluide, soumis à ces impacts, acquiert des conditions nécessaires à l'apparition d'une érosion *linéaire* le long de petites rigoles (en raison des turbulences créées par les impacts), et, lorsque hauteur d'eau et vitesse sont suffisantes, la surface est érodée. Les particules de terre arrachées par les écoulements sont transportées avec celles projetées encore par endroits par le splash. Les conditions de vitesse et de hauteur d'eau sont de façon générale désignées sous le terme de *capacité de transport* de l'eau¹. Cette capacité peut localement diminuer, et les particules transportées se déposer, poursuivant la modification du profil de la surface.

Par ailleurs, l'érosion linéaire peut localement cisailer la croûte qui se forme sur le sol après tassement (splash) et qui limite localement l'infiltration. Ces cisaillements entraînent alors localement un rétablissement des propriétés d'infiltration du sol. Et donc l'infiltration d'augmenter par érosion. De telles conditions de cisaillement sont très dépendantes, d'une part de la nature et de la résistance du sol, d'autre part de la vitesse de l'eau, qui est elle-même

¹"Il s'agit fondamentalement de la concentration maximale en particules que l'eau, dans des conditions données, peut potentiellement transporter" [Darboux, 1999].

6.1. Elaboration d'un modèle.

largement dépendente de la pente locale.

Dès que l'on examine les processus dans leur contexte naturel, on est donc confronté à des boucles de rétroaction complexes qui rendent plus difficile l'examen d'une composante indépendamment d'une autre : les transferts d'eau sont un moteur des transferts particulaires, mais ceux-ci rétroagissent sur le ruissellement (initiation et propagation du ruissellement, différenciation des états de surface).

Ces rétroactions incitent à construire des modèles qui lient de façon étroite les écoulements d'eau et l'érosion. Ainsi, [Favis-Mortlock et al., 1998], [Murray et Paola, 1994] et [Crave, 1995] par exemple, développent des approches, qui mettent en œuvre des automates cellulaires dans lesquels le déplacement de quantités d'eau de case en case arrache des quantités de terre qui sont transportées le long des chemins d'écoulement et éventuellement déposées plus loin. Les conséquences sur la topographie sont prises en compte sous la forme d'une diminution de l'altitude aux endroits où de la terre est arrachée. Ces modèles permettent ainsi d'observer la formation de patterns d'érosion réalistes.

En m'inspirant de telles approches, j'ai construit un modèle qui tente de traduire de manière opératoire certaines boucles de rétroaction qui apparaissent dans les descriptions des processus que je viens d'exposer.

6.1.2 Modèle.

Processus de splash.

Le splash est pris en compte de la façon suivante.

Si la hauteur d'eau au point d'impact d'une boule d'eau "tombant" sur la surface est inférieure à un seuil h_{splash} , deux boules d'un nouveau type sont créées :

- une boule de splash de volume ω est créée au point d'impact,
- une boule de sol de même volume est créée en une position aléatoire autour du point d'impact.

Les impacts des boules d'eau sont pris en compte par l'agent topographie en calculant, en chaque point de son maillage, la densité des boules de splash (selon le même calcul d'interpolation que pour les hauteurs d'eau, équation 4.5); les boules de splahs ne jouent aucun autre rôle après ce calcul. Cette densité s'interprète comme une "hauteur" qui est soustraite à l'altitude z de chaque point. Ceci provoque l'apparition de creux.

Plus précisément, pour rendre compte de l'influence de la pente sur l'impact des boules d'eau, le volume ω des boules de splash et des boules de sol correspondantes est calculé de la manière suivante :

$$\omega = \omega_{splash} \exp -k \|\nabla z\| \quad (6.1)$$

ω_{splash} et k sont des paramètres constants. Le volume ω attribué à la boule de splash et à la boule de sol diminue ainsi avec la pente.

Par ailleurs, la position des boules de sol projetées lors des impacts tient elle-aussi compte de la pente locale :

$$\vec{r}^i = \vec{r} + \vec{u}.r_{splash} \exp -k\|\nabla z\| \quad (6.2)$$

où \vec{r} est la position du point d'impact, r_{splash} est un paramètre constant, k le même paramètre intervenant dans l'équation 6.1, et \vec{u} est un vecteur unitaire dont la direction est tirée aléatoirement. La distance à laquelle est projetée la boule de sol par rapport au point d'impact diminue ainsi avec la pente.

Les boules de sol ainsi créées sont transportées par convection, tant que les conditions locales (h, v) dépassent un certain seuil² $(h_{transport}, v_{transport})$. Plus précisément, on interpole les valeurs de (h, v) en leur position à chaque pas de temps, à partir du champ de hauteur d'eau-vitesse obtenu au pas de temps précédent et si les conditions sur le seuil le permettent, les boules de sol se déplacent à la vitesse \vec{v} . Dès que (h, v) est en-dessous de $(h_{transport}, v_{transport})$, les boules de sol se déposent.

Le dépôt des boules de sol est pris en compte de la même manière que l'impact des boules d'eau : l'agent topographie évalue en chaque point de son maillage la densité des boules de sol s'étant déposé et *additionne* cette "hauteur" à l'altitude z locale. Ceci provoque l'apparition de bosses.

Le comportement des boules d'eau est par ailleurs inchangé.

Erosion linéaire.

Le processus d'érosion linéaire est pris en compte de la façon suivante.

On dote les boules d'eau de la capacité de transporter une quantité de sol, exprimée comme un volume, $\omega_{transport}$, dès lors que (h_i, v_i) dépasse un certain seuil $(h_{érosion}, v_{érosion})$. A chaque pas de temps, une boule d'eau i peut éroder localement la surface le long de sa trajectoire et augmenter la quantité de sol qu'elle transporte, Cette érosion est prise en compte par l'agent topographie de la même manière que pour le splash.

Plus précisément, tant que (h_i, v_i) est supérieur à $(h_{érosion}, v_{érosion})$, chaque boule d'eau accumule au cours du temps un volume $\omega_{transport}^i$ de sol transporté :

$$\omega_{transport}^i + = \omega_{érosion} \exp -\omega_{transport}^i \quad (6.3)$$

$\omega_{érosion}$ étant une constante. Cette relation rend compte de la saturation de la capacité de transport d'une boule d'eau.

Dès que (h_i, v_i) tombe en-deçà du seuil $(h_{érosion}, v_{érosion})$, la quantité de sol totale transportée par la boule d'eau, $\omega_{transport}^i$ est déposée sur la surface.

Les deux modèles splash et érosion linéaire sont a priori indépendants. On peut observer soit les quantités de matière arrachées par le splash soit celles arrachées par les écoulements d'eau, ou les deux.

En jouant sur les paramètres on peut suivre différentes évolutions d'une surface topographique. La figure 6.1 illustre cette évolution dans le cas d'un plan incliné initialement lisse.

²qui représente la capacité de transport de l'eau.

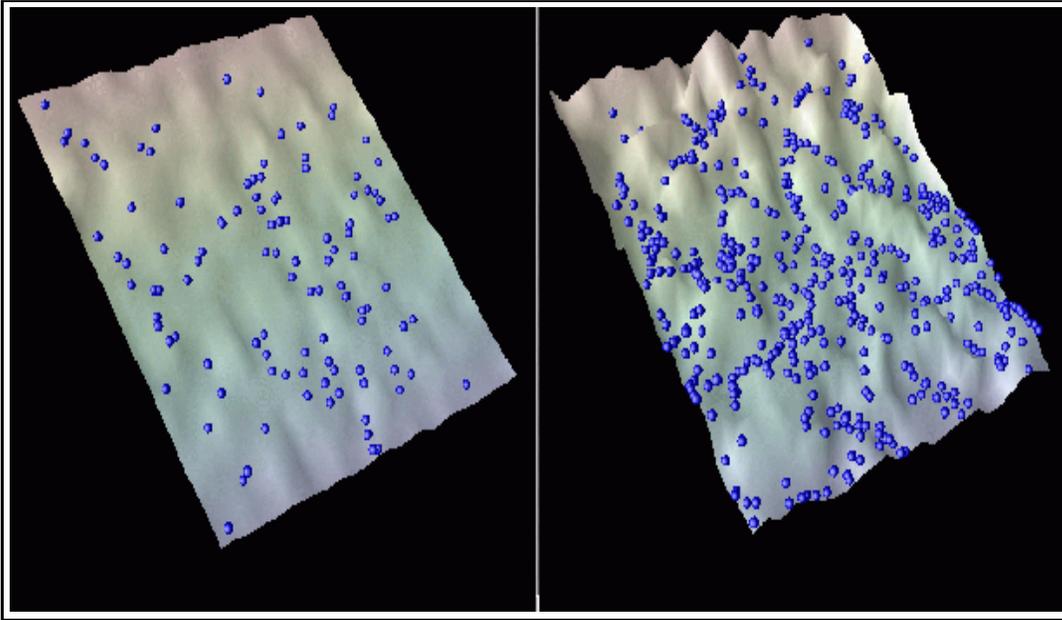


FIGURE 6.1 – Evolution d'une surface topographique (plan incliné) soumise aux processus d'érosion .

Couplage avec l'infiltration.

Comme on l'a dit plus haut, les processus d'érosion ont une influence déterminante sur les processus d'infiltration car ils entraînent une modification des états de surface du sol et donc de ses propriétés hydriques.

J'ai cherché à rendre compte de ce couplage en introduisant le calcul d'un indicateur spatialisé de formation de croûte de battance $I_{battance}$. Cet indicateur évolue en fonction de l'action combinée des processus de splash et d'érosion linéaire. Il vise à rendre compte des modifications des propriétés hydriques du sol. Ainsi, lorsque $I_{battance}$ dépasse un certain seuil I_{imper} , le sol devient localement imperméable.

Cet indicateur est calculé en tout point du maillage de la topographie. Il doit augmenter avec le splash (qui tasse le sol et le rend moins infiltrant) et diminuer avec l'érosion linéaire (qui fissure la croûte de surface et rétablit les propriétés d'infiltration initiale).

J'ai adopté une solution très simple. Soit z l'altitude en un point de la topographie, Δz_{splash} la diminution de cette altitude par effet splash et $\Delta z_{érosion}$ sa diminution par érosion linéaire, la valeur locale de $I_{battance}$ est réactualisée comme suit :

$$I_{battance} \leftarrow I_{battance} + F(\Delta z_{splash} - \Delta z_{érosion}) \quad (6.4)$$

dans laquelle F est une fonction, pour le moment égale à la fonction identité.

On s'intéresse à une surface présentant une ou plusieurs zones de sol hétérogènes, dotées de propriétés d'infiltration (cf. chapitre précédent). Lors du calcul de la quantité d'eau disponible en surface, seules les boules d'eau situées en des positions où $I_{battance}$ est inférieur au seuil I_{imper} sont comptabilisées. A mesure que le splash fait augmenter localement $I_{battance}$, tout se passe donc comme si les zones de sol devenaient localement imperméables, et se morcelaient

en différentes zones. Lorsque au contraire l'érosion linéaire vient diminuer cet indicateur, les zones de sol se rétablissent progressivement.

On peut se rendre compte de ce couplage sur la figure 6.2 sur laquelle est montrée l'évolution d'une surface présentant trois zones de sol hétérogènes soumise aux processus d'érosion. On voit l'initiation du ruissellement sur la zone la moins infiltrante (K_s le plus petit) et peu à peu une modification du relief et l'apparition de zones imperméables qui viennent morceler les différentes zones de sol initiales.

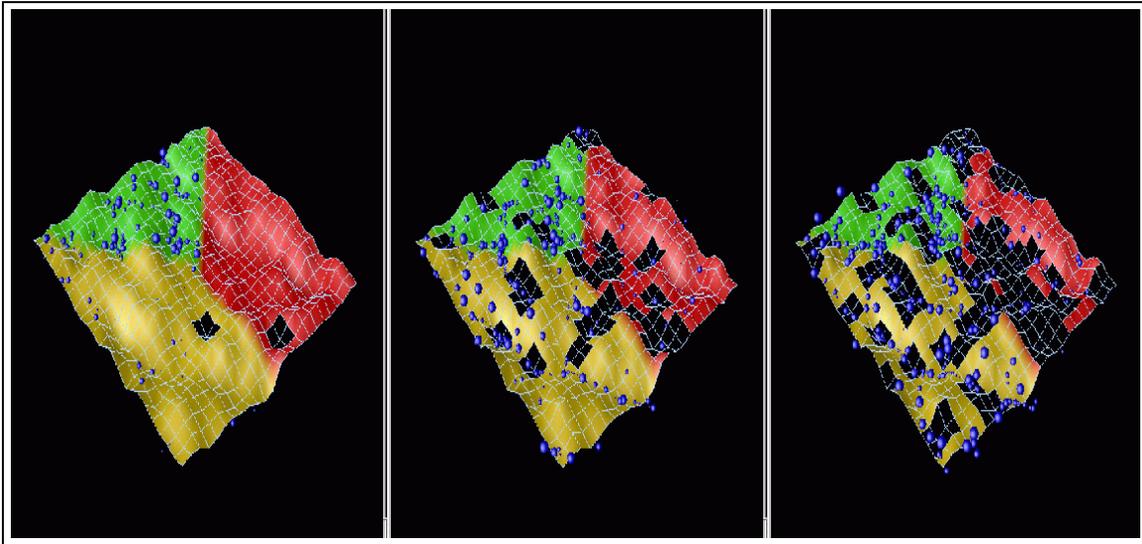


FIGURE 6.2 – Couplage érosion-infiltration. La surface est constituée de trois zones de sol hétérogènes, en vert, jaune et rouge dans l'ordre décroissant de leur capacité d'infiltration. A gauche, initiation du ruissellement sur la zone verte, la moins infiltrante, qui se sature plus vite. Au milieu, la zone jaune reçoit les écoulements amont et commence à se saturer elle aussi, pendant que dans le même temps les zones se morcellent, rendues localement imperméables par le tassement dû au splash (zones en noir). A droite la zone rouge en infiltrant presque toute l'eau sur sa surface, est la moins protégée du splash, elle devient majoritairement imperméable.

L'indicateur que j'ai défini simplifie à l'extrême le couplage entre érosion et infiltration. Toutefois, c'est une tentative pour rendre compte de l'apparition au cours du temps de zones imperméables correspondant à différents états de surface sous l'action du ruissellement et de l'érosion. Ce travail doit être approfondi, notamment concernant les lois que l'on a définies et qui ne constituent qu'une première traduction de ces processus complexes. Certaines relations, notamment pour l'érosion linéaire, ne sont pas satisfaisantes conceptuellement (on ne tient pas compte de la force du flux) et les seuils sont embarrassants car ils varient nécessairement d'une surface à une autre (notamment lorsque la pente varie) et sans doute selon la pluie.

Ce travail a cherché aussi à montrer que l'on pouvait d'une façon relativement souple inclure de nouvelles règles de comportements au niveau des boules d'eau ou des agents sols de façon à rendre compte de phénomènes que l'on décrit à des échelles locales.

6.2 Expériences.

Dans cette section on présente un certain nombre de résultats de simulations visant à retrouver l'influence de la pente sur les quantités de matière transportées et les quantités d'eau infiltrées - influence que l'on a pris en compte dans les équations 6.1 et 6.2.

On s'intéresse à des plans inclinés de pente décroissante 0.1, 0.05 et 0.01 initialement lisses soumis à une pluie constante de $100\text{mm}/h$. L'infiltration est représentée par une seule zone de sol de $K_s = 20\text{mm}/h$. L'expérience dure 800s .

Les paramètres pour l'érosion sont :

- hauteur d'eau protégeant du splash $h_{\text{splash}} = 0.1\text{cm}$,
- pour le splash : $\omega_{\text{splash}} = 4\text{cm}^3$, $r_{\text{splash}} = 8\text{cm}$ et $k = 5$. Respectivement volume et rayon maximal de projection des boules de sol et coefficient de prise en compte de la pente locale,
- seuil sur l'indicateur de battance à partir duquel le sol est considéré comme localement imperméable, $I_{\text{imper}} = 0.3\text{cm}$, i.e. ce qui signifie que dès que I_{battance} dépasse ce seuil, la topographie perd localement ses propriétés d'infiltration.
- seuils pour le transport de matière $h_{\text{transport}} = 0.1\text{cm}$, $v_{\text{transport}} = 2\text{cm}/s$,
- enfin pour l'érosion linéaire : $\omega_{\text{érosion}} = 0.3\text{cm}^3$, $h_{\text{érosion}} = 0.15\text{cm}$ et $v_{\text{érosion}} = 2.5\text{cm}/s$.

Ces valeurs sont arbitraires, leur choix a été guidé par essais successifs au vu des hauteurs d'eau et vitesse sur la surface.

On observe les courbes de sortie sur les figures 6.3, 6.4 et 6.5.

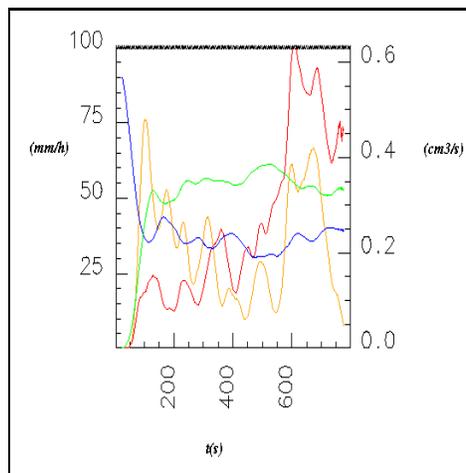


FIGURE 6.3 – Plan incliné de pente 0.1 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s (rouge).

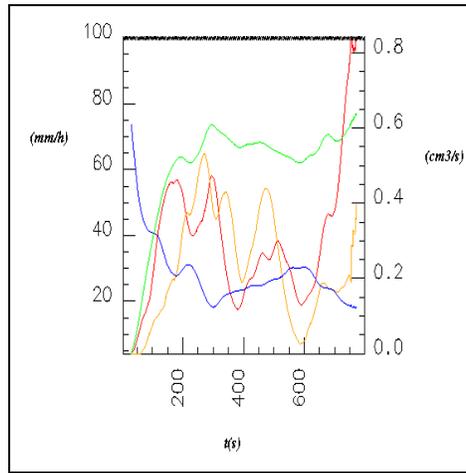


FIGURE 6.4 – Plan incliné de pente 0.05 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s .

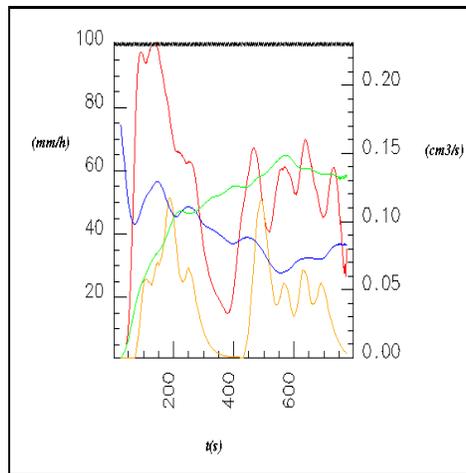


FIGURE 6.5 – Plan incliné de pente 0.01 : en vert débit d'eau à l'exutoire en mm/h , en bleu infiltration en mm/h ; en orange quantité de sédiment à l'exutoire amenée par le splash en cm^3/s et en rouge quantité de sédiment à l'exutoire causée par érosion linéaire en cm^3/s .

6.2. Expériences.

On peut constater l'effet limitant du splash sur l'infiltration qui décroît beaucoup plus vite que dans une situation normale. De plus elle présente des fluctuations : diminution due au splash qui crée localement une croûte imperméable, augmentation dès que l'érosion fissure cette croûte, rétablissant localement les propriétés hydriques du sol.

La figure 6.6 synthétise l'évolution des quantités de matière obtenues à l'exutoire (par splash et érosion linéaire) en fonction de la pente, on obtient :

- une augmentation pour $p = 0.05$ par rapport à $p = 0.01$. Le splash est aussi fort que l'érosion linéaire dans les deux cas ; cependant sans doute en raison de l'augmentation des vitesses, l'érosion est globalement plus forte pour $p = 0.05$ que pour $p = 0.01$,
- une diminution pour $p = 0.1$ par rapport à $p = 0.05$. Le splash devient avec l'augmentation de la pente limité, et on observe effectivement que pour $p = 0.1$ la courbe de débit du à l'érosion linéaire devient supérieure à celle due au splash.

Il convient toutefois de nuancer ces commentaires car les seuils inchangés d'une expérience à l'autre peuvent être responsables des résultats obtenus. Cette relation par rapport à la pente semble en accord avec les relations observées sur le terrain (cf. supra), pour lesquelles l'érosion est d'abord limitée par la capacité de transport du flux (notamment vitesse), puis par la résistance au détachement par splash.

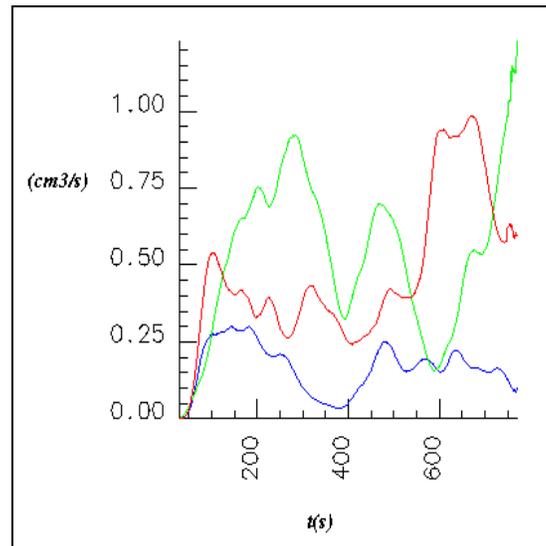


FIGURE 6.6 – Quantités de sédiment à l'exutoire (splash et érosion linéaire sommés) pour une pente variable : en rouge 0.1, en vert 0.05 et en bleu 0.01. Il semble qu'ici l'augmentation de la pente procure d'abord une augmentation de l'érosion, assez logique car les vitesses sont plus fortes, puis une diminution, corrélée à celle du splash.

Les relations sur l'infiltration sont beaucoup moins nettes, même si encore une fois il semble que l'on obtienne une diminution pour $p = 0.01$ par rapport à $p = 0.05$ (en raison de la diminution de la détention superficielle), puis une augmentation pour $p = 0.1$ par rapport à $p = 0.05$, car l'érosion linéaire plus forte que le splash érode la croûte formée par le splash qui limite l'infiltration (cf. figure 6.7).

Ces résultats sont encore une fois à nuancer. Toutefois il semblerait que l'introduction d'une relation simple de prise en compte de la pente locale puisse permettre d'observer un certain

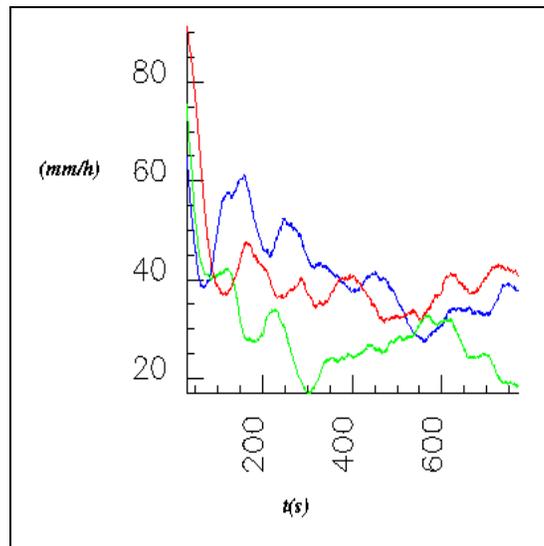


FIGURE 6.7 – Courbes d’infiltration obtenues pour une pente variable : en rouge 0.1, en vert 0.05 et en bleu 0.01. Il semble qu’ici l’augmentation de la pente procure d’abord une diminution de l’infiltration, car l’eau stagne moins sur la surface, puis une augmentation, corrélée à celle de l’érosion linéaire qui compense l’effet limitant du splash.

nombre de boucles de rétroaction entre les différents processus. En tous cas, c’est encourageant et cela ouvre des perspectives de travail réjouissantes.

On vient de voir l’importance de certains indicateurs permettant de prendre en compte des couplages entre processus (par différenciation des états de surface). Dans le chapitre suivant on va s’intéresser à la prise en compte de la structuration des écoulements à des niveaux intermédiaires en introduisant de nouveaux agents, macroscopiques, mares et chemins d’eau, qui sont créés lors de regroupement de boules d’eau.

Chapitre 7

Appréhender une dynamique à différents niveaux d'agrégation.

RÉSUMÉ :

Après l'exposé successif des modèles mis au point pour rendre compte des phénomènes hydrologiques et de leur couplages, ce chapitre expose une recherche plus conceptuelle sur le repérage et l'agentification d'objets intermédiaires identifiant des modes particuliers de dynamiques d'interaction des agents boules d'eau.

Les méthodes permettant de créer des regroupements d'agents instanciant des objets hydrologiques macroscopiques (mares et chemins d'eau) sont présentées.

L'intérêt d'une telle approche est de fournir des niveaux intermédiaires de représentation d'une dynamique complexe, un peu comme si des observateurs suivaient l'évolution des interactions de milliers de boules d'eau qui se déplacent sur une surface et en donnaient un compte-rendu structuré.

On présente un certain nombre d'exemples montrant que de tels agents fournissent des informations complémentaires au simple suivi des trajectoires des boules d'eau et permettent d'ouvrir des pistes pour la définition d'indicateurs de structuration d'un réseau hydrographique.

Le chapitre se termine par une discussion sur les comportements spécifiques dont on peut penser doter ces agents macroscopiques pour imposer des rétroactions sur les comportements des agents individuels les constituant, ouvrant de nouvelles perspectives pour le couplage de modèles.

7.1 Reconnaissance et agentification de modes d'organisation émergents.

Au chapitre 2, notamment en 2.3, la nécessité de pouvoir prendre en compte des structures qui émergent de l'interaction entre milieux et processus de flux a été soulignée. De telles structures se superposent à l'organisation des milieux dans lesquels se produisent ces processus et viennent contraindre en retour leur dynamique. La reconnaissance de l'émergence de ces structures conditionne par ailleurs la manière avec laquelle on peut appréhender une dynamique à différents niveaux d'agrégation, dans la perspective de coupler les résultats obtenus par différents modèles reposant sur différents niveaux d'analyse.

Dans ce chapitre, on se propose de prendre en compte une certaine classe de structures émergentes, correspondant à différents régimes d'écoulements de l'eau : accumulation dans des dépressions, écoulements le long de chemins préférentiels. La méthode que l'on met en œuvre consiste à considérer ces différents régimes d'écoulement comme différents modes d'organisation des agents boules d'eau.

La reconnaissance de leurs modes d'organisation aboutit à l'agentification de regroupements d'agents en interaction stable et durable, sous la forme d'agents macroscopiques, mares et chemins d'eau. Le rôle que peuvent jouer ces agents groupes est discuté dans la deuxième partie de ce chapitre.

7.1.1 Principes.

Le modèle de ruissellement que nous avons présenté au chapitre 4 permet d'observer la formation de zones d'eau stagnante et de chemins d'eau préférentiels au cours d'une pluie (par exemple figure 4.2).

Si l'on observe la *dynamique* de mouvement des agents boules d'eau sur la surface, on peut remarquer que ces mares et chemins d'eau sont constitués de boules d'eau dont les trajectoires diffèrent. Au niveau des mares, les boules d'eau ont des mouvements erratiques limités à la zone d'extension spatiale de la mare (autour d'un minimum topographique). Au niveau des chemins tracés par la topographie, les boules d'eau suivent des trajectoires plutôt rectilignes et ont un déplacement effectif beaucoup plus grand sur un intervalle de temps donné (cf. figure 7.1).

Mares et chemins d'eau peuvent donc être vus comme différents *modes d'organisation* des agents boules d'eau, ces modes apparaissant à la faveur de contraintes spatiales sur leurs mouvements : contrainte topographique et contrainte d'encombrement (prises en compte, lors du mouvement, dans le calcul du gradient de densité locale d'agents).

En conservant au niveau des agents boules d'eau des informations concernant la trajectoire empruntée, on peut leur permettre de se "rendre compte" de corrélations locales entre leurs trajectoires. Admettant ce problème résolu (on détaille une solution implémentée plus loin), il apparaît alors naturel d'appréhender les objets hydrologiques macroscopiques, mares et chemins d'eau, comme des groupes d'agents boules d'eau partageant un même mode d'organisation. La reconnaissance de ce mode d'organisation stable peut alors se concrétiser dans la

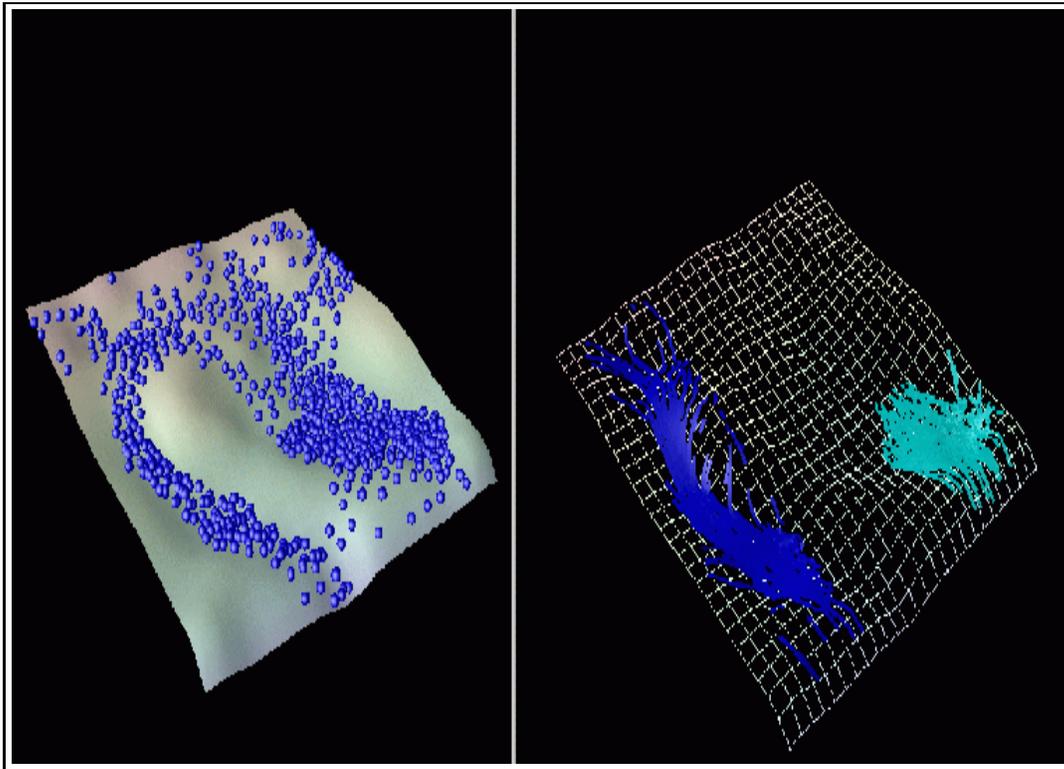


FIGURE 7.1 – A gauche on a figuré les positions des boules d'eau au cours du ruissellement. A droite, on a isolé les trajectoires des boules d'eau le long d'un chemin préférentiel exhibé par la topographie et dans une dépression. Les trajectoires représentent les chemins suivis sur quelques pas de temps.

création d'un agent macroscopique, mare ou ravine¹, représentant le groupe de boules d'eau.

Pour réaliser cette reconnaissance locale des modes d'organisation la solution suivante a été développée.

A chaque pas de temps, les agents boules d'eau actualisent un historique de leurs positions sur une fenêtre temporelle de taille paramétrable. A partir de ces informations, chaque boule d'eau i calcule un indicateur I_i caractérisant sa trajectoire au cours de cet intervalle de temps :

$$I_i = \frac{\sum_{t=1}^{t=n-1} d_{t,t+1} - d_{1,n}}{\sum_{t=1}^{n-1} d_{t,t+1}} \quad (7.1)$$

où $d_{t,t+1}$ représente la distance parcourue entre les instants t et $t + 1$, n est la taille de la fenêtre temporelle. I vaut 0 dans le cas d'une trajectoire strictement rectiligne, et tend vers 1 pour une trajectoire resserrée autour d'une position donnée.

On se souvient du caractère général des formules d'interpolation utilisées pour le calcul des hauteurs d'eau (équation 4.9). Les agents boules d'eau peuvent donc calculer un deuxième

¹On utilise ici le terme de ravine, qui est employé plutôt dans un contexte de phénomènes érosifs. Ce terme a été adopté historiquement, lorsque l'on se proposait de repérer de telles rigoles d'eau pour modéliser l'érosion. Comme on l'a vu au chapitre précédent, d'autres choix ont été finalement adoptés, mais le terme de ravine est resté.

indicateur J_i qui correspond à l'interpolation de I_i :

$$J_i = \sum_j m_j \frac{I_j}{h_j} W(\vec{r}_i - \vec{r}_j, \eta) \quad (7.2)$$

Ce calcul est fait après le calcul des hauteurs d'eau, puisque faisant intervenir h_j , comme densité de boules voisines.

Cet indicateur J caractérise le type de trajectoires des agents boules d'eau dans un voisinage local. Autrement dit, si I_i et J_i sont proche de 1, cela signifie que la boule d'eau i stagne ainsi que ses voisines, donc qu'elle est candidate à former une mare. Si au contraire I_i et J_i sont proche de 0, cela signifie que la boule d'eau i suit une trajectoire "rectiligne" ainsi que ses voisines, donc qu'elle est candidate à former une ravine. Si les indicateurs I et J ne sont pas en phase, c'est qu'aucun mode d'organisation n'apparaît comme stable ou que l'on est dans une phase de transition, par exemple entre un état "mare" et un état "ravine".

Une illustration de ce principe est donné à la figure 7.2. Les boules d'eau dont on pouvait voir les différences de trajectoires à la figure 7.1, exhibent sur cette figure leurs indicateurs I respectifs. On voit que I reflète bien la distinction de nature entre trajectoires. La même figure avec J produirait une image gommant les hétérogénéités locales.

Moyennant des seuils sur ces indicateurs, on peut donc discriminer les boules candidates au regroupement en mares (ex. $I, J > 0.7$) et ravines (ex. $I, J < 0.3$). Sur la base de ces indicateurs, les agents boules d'eau peuvent se regrouper de proche en proche.

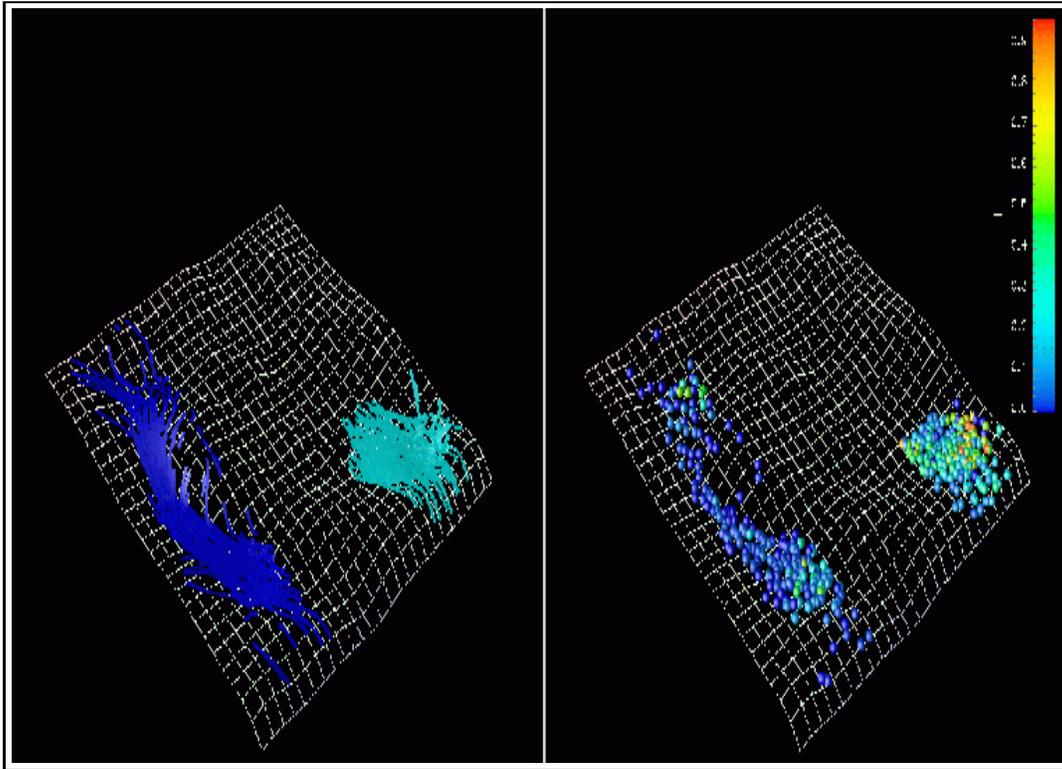


FIGURE 7.2 – On a isolé deux ensembles de boules d'eau présentant des trajectoires différentes (à gauche), et on a représenté à droite ces mêmes boules d'eau avec une couleur reflétant leur indicateur de trajectoire I . Les valeurs les plus élevées sont atteintes au niveau de la dépression et les valeurs les plus faibles, proche de 0 le long du chemin d'eau. C'est sur la base de cet indicateur et de son interpolation locale J que les boules d'eau vont former des regroupements de proche en proche.

7.1.2 Regroupement d'agents et création d'agents groupes.

Deux cas se présentent suivant qu'il existe ou non des boules déjà regroupées.

Lors du premier regroupement, les boules d'eau dont les indicateurs I et J sont en phase forment de proche en proche des regroupements. Plus précisément, chaque boule d'eau candidate à un regroupement initie une recherche récursive à partir de la liste de ses voisines. Toute boule d'eau présentant des indicateurs I et J de même nature est associé au regroupement et poursuit la même recherche sur sa propre liste de voisines. Ainsi des regroupements locaux de boules partageant le même type de trajectoire sont constitués.

Chaque regroupement est indicé par un numéro unique ($nombre_{mares} + 1$ ou $nombre_{ravines} + 1$) et un agent groupe, mare ou ravine, est instancié. Les boules d'eau mémorisent le numéro du groupe auquel elles appartiennent. Ce numéro est conservé tant que la boule d'eau conserve les mêmes propriétés de trajectoire. Plus exactement, si une boule d'eau voit son indicateur I changer, elle se sépare du groupe et "oublie" son numéro, en revanche elle reste membre du groupe si seul son indicateur J change de valeur (cette distinction de traitement entre I et J a été introduite en pratique pour limiter les fluctuations).

Lors de regroupements ultérieurs, le même processus est initié localement, soit par des nouvelles boules candidates (I et J en phase), soit par des boules déjà regroupées qui ont conservé la "même" valeur de I . De nouvelles associations d'agents boules d'eau sont réalisées. Dans ce cas cependant, un nouvel agent groupe n'est pas instancié. C'est le groupe le plus ancien qui est conservé - i.e. d'indice le plus petit -, les autres groupes fusionnant avec celui-ci.

De cette manière l'identité des groupes est préservée au cours du temps et les fusions entre groupes de même nature s'opèrent naturellement.

Un agent groupe disparaît automatiquement si les boules qui lui appartiennent changent de type de trajectoire et qu'il n'existe pas de nouvelles boules candidates dans le voisinage.

7.1.3 Algorithme.

Des seuils $Seuil_{mare}$ et $Seuil_{ravine}$ sont définis sur $[0; 1]$. Soit $IndMare(i)$ et $IndRavine(i)$, l'indice de la mare et de la ravine à laquelle appartient éventuellement la boule d'eau i . Ces deux indices s'excluent mutuellement et valent tous deux -1 dans le cas d'une boule isolée :

- la condition d'adhésion de la boule i à une mare s'écrit :

$$CondMare(i) = (I_i \geq Seuil_{mare}) \& \{(J_i \geq Seuil_{mare}) | (IndMare(i) \neq -1)\} \quad (7.3)$$

- la condition d'adhésion de la boule i à une ravine s'écrit :

$$CondRavine(i) = (I_i \leq Seuil_{ravine}) \& \{(J_i \leq Seuil_{ravine}) | (IndRavine(i) \neq -1)\} \quad (7.4)$$

A chaque pas de temps, les boules d'eau calculent I_i et J_i . Soient $Liste_i$, la liste des boules voisines d'une boule i , $Regroupement_i$, la liste initialement vide d'agents boules d'eau regroupées à partir de la boule i , la procédure $RechercheMare(Regroupement_i)$ est initiée par une boule i :

- si $CondMare(i)$ est vérifiée, alors :

7.1. Reconnaissance et agencification de modes d'organisation émergents.

1. si $IndRavine(i) \neq -1$, la ravine $IndRavine(i)$ élimine la boule i de sa liste et $IndRavine(i)$ est mis à -1 ,
2. $Regroupement_i \leftarrow Regroupement_i \cup \{i\}$.
3. puis séquentiellement, chaque agent j appartenant à $\{Liste_i \setminus Regroupement_i\}$ exécute $RechercheMare(Regroupement_i)$

– $Regroupement_i$ est renvoyé.

Dans le même temps, l'indice de la mare la plus ancienne à laquelle appartiennent éventuellement les boules j est déterminé. Si cet indice vaut -1 , une nouvelle mare est créée, sinon les indices sont réactualisés et les boules retirées de leur ancien groupe. Un groupe ne possédant plus de boules est détruit.

Une méthode de recherche similaire est employée pour regrouper des boules dans une ravine.

Les limites de cet algorithme sont les suivantes :

- aucune restriction sur le nombre de boules nécessaire au regroupement n'est spécifié, donc des groupes peuvent se former avec un très petit nombre d'agents,
- la recherche fondée uniquement sur la liste des voisins peut éventuellement n'entraîner que des fusions *partielles* entre groupes, lorsque certains agents sont momentanément isolés.

Le premier cas peut être traité en imposant un nombre minimal d'agents pour la création d'un groupe. Le second cas peut être traité en incluant, outre une recherche portant sur les agents voisins, une recherche sur les agents appartenant aux groupes rencontrés en cours de construction. Toutefois dans ce cas, la construction n'est plus strictement locale.

Ces problèmes ne constituent pas de réels handicaps au vu des résultats que l'on a pu observer.

7.1.4 Exemple.

On peut suivre un petit exemple sur la planche suivante (figure 7.3) suivantes où nous avons isolé les boules appartenant à des groupes, mares et ravines, de celles qui n'appartiennent à aucun groupe :

1. premiers groupes en formation : une petite mare et trois ravines,
2. extension des deux ravines principales suite à une première fusion,
3. de nouvelles mares se forment,
4. la mare la plus importante déborde,
5. un train de boules venant d'une des ravines "découvre" un chemin vers la deuxième ravine, annonçant la fusion,
6. fusion des ravines, etc..

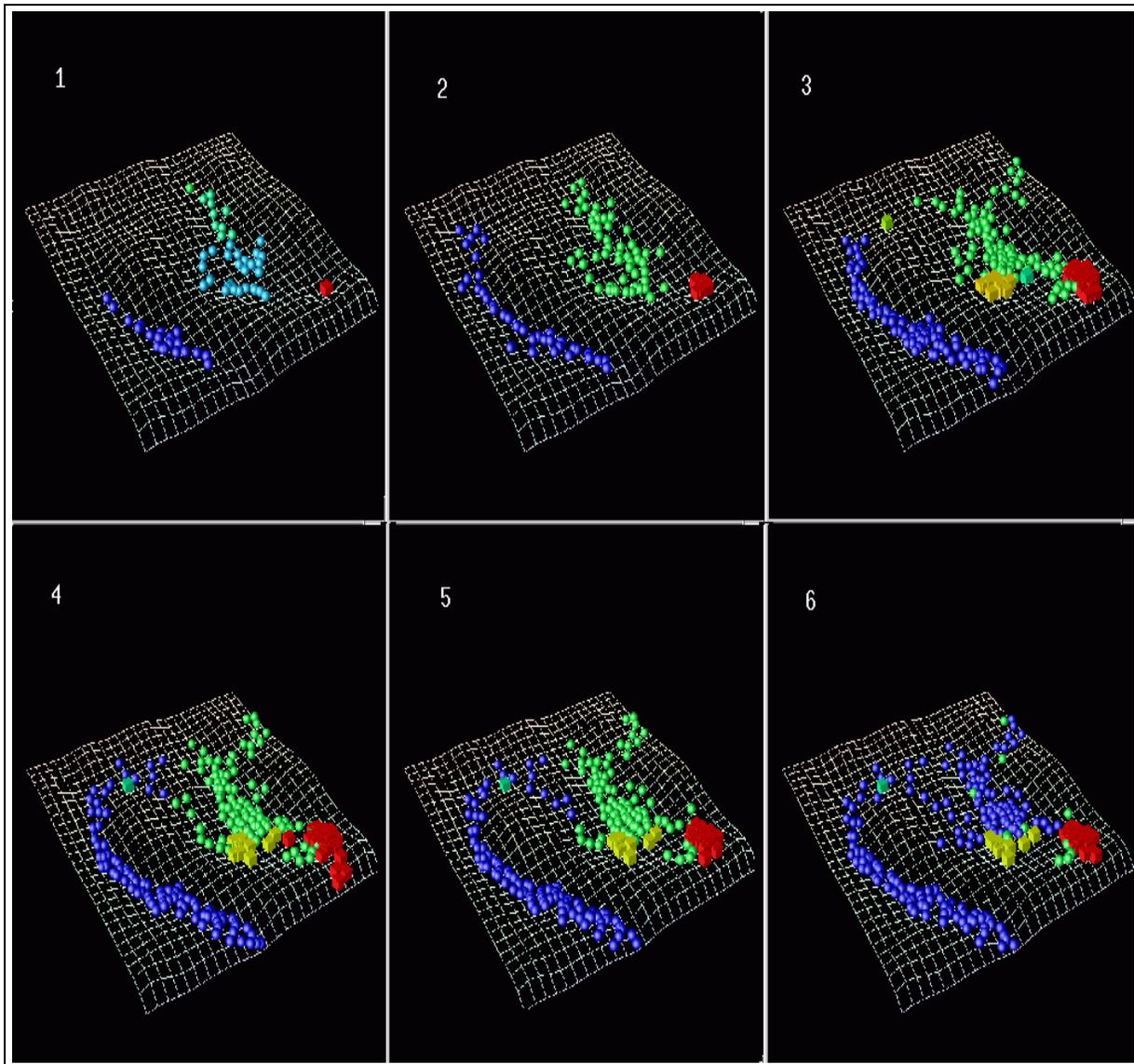


FIGURE 7.3 – Image 1 : trois ravines dans des tons de bleu et vert (sphères) et une petite mare (cubes rouge). Les boules d'eau non regroupées ne sont pas représentées. Image 2 : les deux petites ravines ont fusionné (à droite), l'autre (à gauche) s'étend. La mare n'a pas trop évolué. Image 3 : de nouvelles mares apparaissent. Les deux ravines s'étendent. Image 4 : la mare la plus importante (à droite) déborde à l'exutoire. Image 5 : un train de boules venant de la ravine de gauche se fraye un chemin vers celle de droite, annonçant une prochaine fusion. Image 6 : la fusion est effective, mais elle n'est que partielle, certaines boules (en vert) ayant été isolées des autres lors de l'actualisation des groupes.

7.1.5 Paramètres du modèle.

Pour ne pas surcharger la présentation, un certain nombre de points concernant l'algorithme de regroupement n'ont pas été évoqués.

En effet, on peut faire un certain nombre de choix :

- quant à la taille de la fenêtre temporelle de suivi de trajectoires. Elle doit être suffisamment grande : égale à 2 pas de temps, toutes les trajectoires seraient vues comme rectilignes ; trop grande, elle ne permettrait vraisemblablement pas d'observer des trajectoires rectilignes. Comment choisir ce paramètre ? Sans doute en fonction de la dynamique : cela suppose une certaine connaissance des vitesses de déplacement des boules d'eau. La plupart des exemples que l'on présente sont réalisés avec une fenêtre de 10 pas de temps.
- quant aux seuils sur $Seuil_{mare}$ et $Seuil_{ravine}$ portant sur les indicateurs I et J . Si l'on impose que $Seuil_{mare} = Seuil_{ravine}$, dans ce cas, il ne peut y avoir d'agent boule d'eau isolé. Si on laisse au contraire un écart entre ces deux seuils, des agents pourront par exemple appartenir à une mare, puis s'en dissocier sans appartenir à aucun groupe bien défini, et plus tard former une ravine. Comme on a pu l'observer à la figure 7.2 les frontières ne sont pas nettes entre les différents types de trajectoires, lorsque la topographie n'a pas un relief très marqué. On peut procéder par essais successifs ou imaginer un ajustement dynamique de ces seuils.
- quant au rythme auquel le regroupement est initié. Si l'on établit une période de quelques pas de temps entre deux regroupements successifs, on risque observer de grandes fluctuations, notamment pour les ravines : création d'une ravine, puis les boules d'eau poursuivant leur chemin changent complètement d'environnement local, ou atteignent l'exutoire, et la continuité existentielle d'une ravine a du mal à être observée. Ceci est surtout valable en régime transitoire, pour lequel les écoulements ne sont pas encore complètement constitués.
- quant au pas de temps initial pour le regroupement. Il est clair que si le regroupement s'opère assez tard, on perd l'historique des créations et fusions successives qui résume la structuration du réseau de drainage qui s'établit. Par contre cela accélère l'obtention de groupes importants, plus stables.

Sur ces deux derniers points, rythme et initiation du regroupement, il semble que les regroupements convergent de toute façon vers une même situation stable lorsqu'un régime permanent s'établit - ce qui s'est révélé la règle pour les dynamiques que l'on a étudiées en ruissellement. Seuls les indices des groupes obtenus à la fin sont variables. Ces choix sont donc surtout importants en début de simulation.

Une véritable analyse reste à mener. Une voie intéressante mais difficile consisterait à réfléchir à un apprentissage de tels paramètres par rapport à des critères de stabilité, de taille et de séparabilité des groupes obtenus.

Enfin un dernier point concerne la définition des indicateurs de trajectoires que l'on a utilisés. Ils sont très simples mais présentent certaines limites. Ainsi, ils ne tiennent pas compte des directions relatives des agents boules d'eau les uns par rapport aux autres : si deux trains de boules se forment sur une même ligne, en sens opposé, lorsqu'ils se rejoignent, leurs groupes fusionnent, ce qui ne correspond peut-être pas à la vision que l'on s'en fait. De même lorsque des ravines divergent d'un même point, elles fusionnent nécessairement. Il est clair qu'un

travail sur les types d'indicateurs pertinents est à faire en fonction du type d'organisation que l'on souhaite repérer. Les principes que l'on vient de présenter ainsi que l'algorithme de regroupement et d'instanciation d'agents groupes sont par contre complètement génériques. La question reste de savoir dans quelle mesure on peut toujours repérer un objet macroscopique à partir de propriétés locales.

7.2 Enjeux pour l'explicitation de dynamiques.

Le modèle d'instanciation d'agents groupes que l'on vient d'exposer permet de repérer des objets macroscopiques, mares et ravines, qui apparaissent au cours des écoulements d'eau sur une surface.

Cette construction est partie d'une démarche assez naturelle en informatique qui consiste à réifier en objets du système des structures ou organisations observables. Toutefois les enjeux d'une telle construction n'ont jusqu'à présent pas été explicités de façon précise. Autrement dit, la question que l'on peut se poser est de savoir quels rôles on peut attribuer à de tels agents qui incarnent des modes d'organisation émergents au cours d'une dynamique.

Dans cette section, on cherche à préciser la nature des informations que peuvent représenter ces groupes et le suivi de leur évolution au cours du temps. Quelle peut-être leur place à côté des informations que l'on a jusqu'à présent manipulées (champs de hauteur d'eau, débits à l'exutoire, suivi des temps de transfert, etc.) ? Comment appréhender de telles informations ?

A travers un certain nombre d'exemples, on cherche à explorer certaines pistes de réflexion.

7.2.1 Des niveaux intermédiaires de description.

On considère les deux surfaces présentées à la figure 7.4.

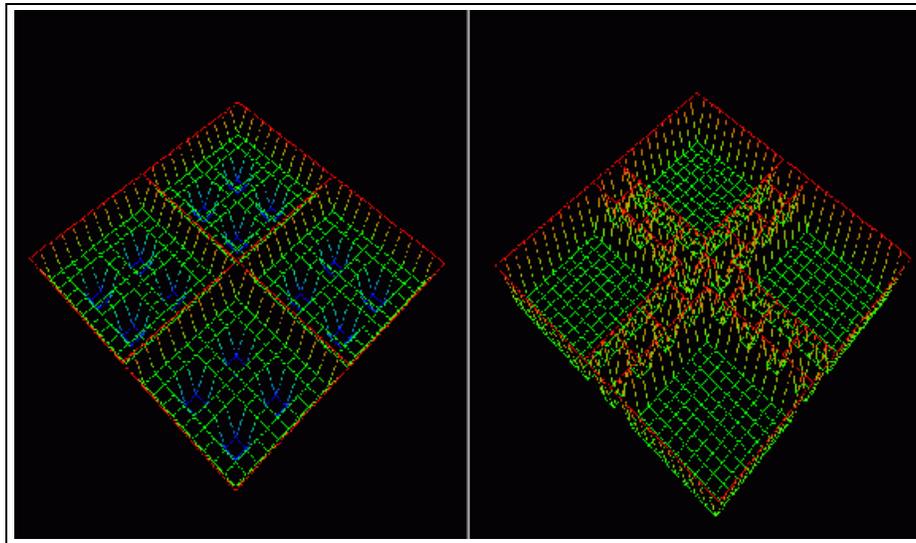


FIGURE 7.4 – Surfaces présentant différentes configuration de dépressions.

7.2. Enjeux pour l'explicitation de dynamiques.

La première topographie est constituée d'un emboîtement successif de cuvettes (4 grandes puis 4 petites dans chacune des grandes cuvettes). La seconde surface présente les mêmes dépressions mais non emboîtées (4 grandes cuvettes et 16 plus petites autour des grandes).

On soumet ces deux surfaces à une pluie constante pendant un temps suffisant pour que toutes les dépressions se remplissent. Les résultats sont présentés sur les planches 7.5 et 7.6.

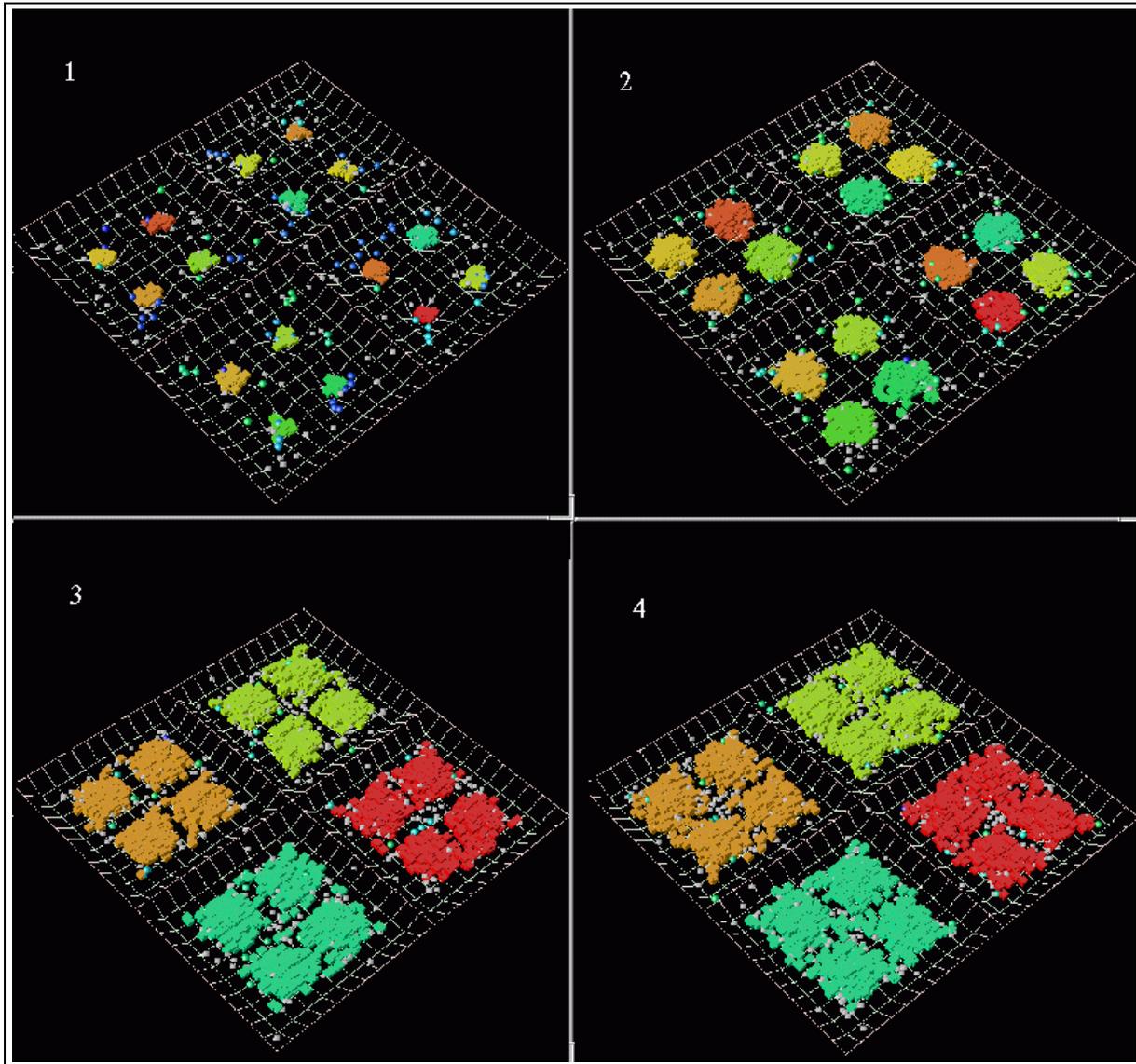


FIGURE 7.5 – Image 1 : formation de 16 mares (cubes dans des tons de rouge au vert). Image 2 : les mares grossissent et débordent des petites dépressions de la topographie. Image 3 : les 16 mares fusionnent en 4 mares de taille moyenne. Image 4 : les 4 nouvelles mares s'étendent et recouvrent entièrement les cuvettes de la topographie.

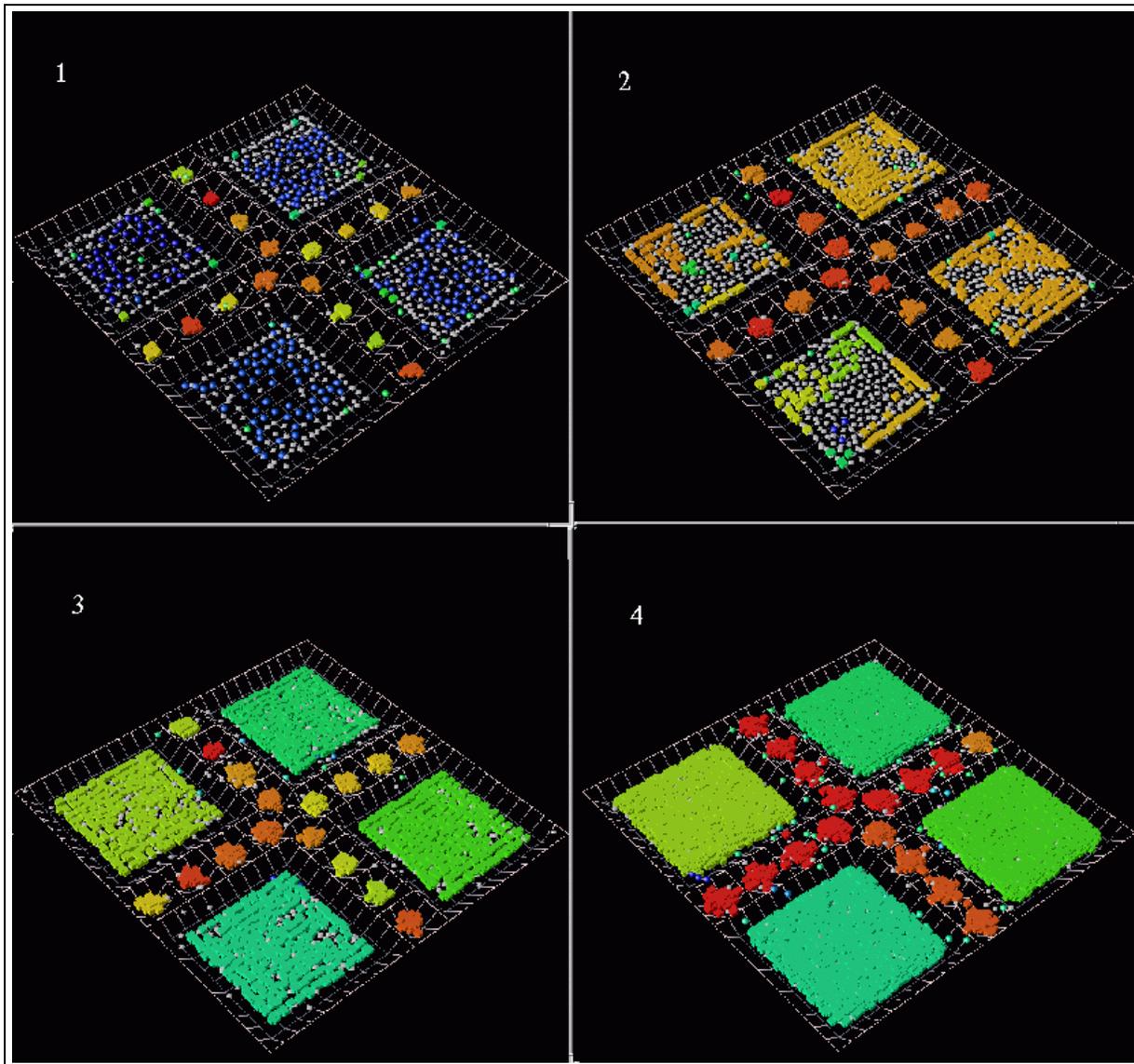


FIGURE 7.6 – Image 1 : formation de 16 petites mares. Image 2 : les 16 petites mares débordent tandis que 4 mares de taille moyenne se forment. Image 3 : toutes les dépressions sont maintenant remplies par les différentes mares. Image 4 : fusion en cours des petites mares.

Ces séquences d'images montrent la formation de petites mares qui, dans le premier cas débordent puis fusionnent pour donner de plus grosses mares, et dans le deuxième cas coexistent avec des mares plus grosses.

Alors même qu'aucune donnée n'a été explicitée concernant l'intensité de la pluie, les paramètres du modèle ni même l'échelle de temps à laquelle était effectuée l'expérience, on serait prêt à donner une certaine "validité" à ces résultats de simulation, car ils donnent une image immédiatement interprétable et conceptuellement satisfaisante. Tel n'aurait pas été le cas si dans le premier cas, on avait observé l'apparition d'une grosse mare avant celle des petites mares par exemple.

7.2. Enjeux pour l'explicitation de dynamiques.

Il me semble que si l'on avait présenté les mêmes résultats de simulation sous la forme de l'évolution du champ des hauteurs d'eau sur chacune des surfaces, on aurait de même cherché à voir si les dépressions se remplissaient dans le bon ordre, et on aurait donc cherché à appréhender la dynamique en termes de création de mares et de remplissage de dépressions.

D'une certaine manière, le modèle, en identifiant des mares et en exhibant leur évolution, a permis de faciliter la reconnaissance d'objets dont l'évolution est caractéristique dans le scénario que l'on vient de présenter. Une incohérence au niveau du suivi de ces objets aurait été immédiatement manifeste.

De même en 4.3, lorsque l'on a montré une comparaison entre les résultats de RIVAGE et ceux du modèle EDP basé sur les équations de St-Venant, l'image 4.13 qui présentait les champs de hauteur d'eau obtenus dans les deux méthodes a donné visuellement l'impression que les résultats étaient proche car on a pu retrouver d'une image à l'autre à peu près les mêmes dépressions remplies d'eau.

La possibilité qu'offre RIVAGE d'identifier des objets hydrologiques à des niveaux intermédiaires peut donc apparaître comme une source d'information intéressante car elle procède de la même manière avec laquelle on est amené à interpréter des données de simulation ou des observations de terrain, i.e. en isolant certains traits caractéristiques. En proposant de suivre ces objets au cours du temps, le modèle donne une vision schématique de l'évolution de la dynamique en termes d'événements singuliers (formation de mares ou de ravines, fusions, etc.) que l'on peut confronter à des observations de terrain : par exemple, à l'aide de photographies de suivi de l'extension spatiale de mares ou d'un compte-rendu d'observations des écoulements au cours d'une pluie, on pourrait apprécier dans quelle mesure le modèle permet de rendre compte de l'historique de ces événements, et le cas échéant, de se poser des questions sur la cause possible de tel ou tel événement, en le "rejouant" en simulation.

Sur ce point il semble intéressant de pouvoir disposer d'une vision plus synthétique de l'historique de ces événements au cours du temps. Une courbe de débit à l'exutoire par exemple, bien qu'elle ne rende pas compte de l'hétérogénéité spatiale des écoulements qui se sont produits, renvoie une image condensée de l'évolution au cours du temps des écoulements dans leur ensemble : les variations de la courbe donnent une idée du temps qu'il a fallu pour que les dépressions se remplissent et qu'un régime permanent s'établisse sur la surface.

Il faut chercher à condenser qualitativement et quantitativement les informations que chaque agent groupe peut stocker au cours du temps concernant les caractéristiques de la mare ou de la ravine qu'il représente : volume, nombre de boules d'eau, extension spatiale, "date" de création, etc.

Cette question demande une recherche d'indicateurs pertinents de suivi de ces objets et de représentation des données qu'ils constituent. C'est une tâche difficile, on donne ici quelques pistes de recherche.

7.2.2 Des indicateurs de suivi de dynamiques.

On se propose de discuter autour d'une visualisation possible présentant l'évolution au cours du temps des effectifs de chaque groupe créé. La figure 7.7 explique la lecture des figures qui vont suivre.

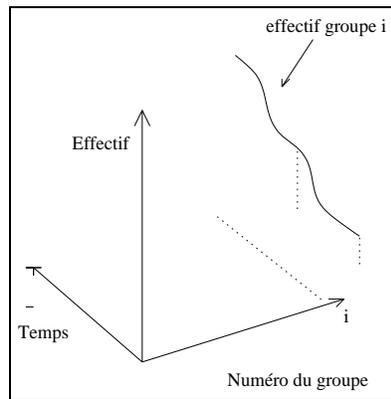


FIGURE 7.7 – Schéma de lecture des indicateurs de suivi des groupes. En abscisse : numéro et temps. En ordonnée : effectif des groupes. Chaque groupe est représenté par une courbe dont la couleur dépend du groupe.

Le cas de la figure 7.5 est repris à la figure 7.8. Le deuxième cas (cf. figure 7.6) est repris à la figure 7.9.

Ces visualisations sont relativement complexes, elles présentent une information très dense qui contient le résumé de toute la dynamique du ruissellement, au niveau agrégé des mares qui se sont formées. On peut y retrouver un certain nombre d' "événements" que l'on a montrés précédemment sous forme d'une successions d'images bien choisies.

Pa exemple dans la figure 7.8, la similarité des courbes reflètent le destin parallèle des mares, notamment l'initiation au même moment des 16 petites mares, leur extension en volume, puis la disparition de 12 d'entre elles et simultanément l'augmentation des effectifs des 4 autres suite à la fusion. Au contraire la figure 7.6 montre la coexistence de mares de tailles différentes.

Ces informations ne permettent pas de se faire une idée précise de la surface sur laquelle se sont formées ces mares. Toutefois, elles peuvent permettre de formuler un certain nombre d'hypothèses :

- le nombre de courbes est corrélé aux nombres de dépressions que présente la surface pour un épisode pluvieux donné, ce qui peut donner une idée qualitative de sa rugosité,
- les effectifs respectifs en boules d'eau des mares donnent aussi une idée de l'importance de ces dépressions, notamment on peut retrouver le volume d'eau détenu en surface et une certaine image de la fragmentation de ce volume en différents endroits de la surface,
- des similarités entre courbes peuvent conduire à supposer que la surface présente une certaine régularité de structure,
- une courbe qui s'interrompt au bout d'un certain temps indique une disparition d'une mare. C'est un événement que l'on peut situer dans le temps sur ces graphiques. On peut ensuite se référer à d'autres modes de visualisation pour retrouver cet événement au niveau de l'évolution des mares sur la topographie.

Ces résumés de la dynamique à un niveau agrégé fournissent une information qui apparaît intermédiaire entre :

- l'information donnée par une courbe de débit à l'exutoire qui est très synthétique mais qui ne permet de donner aucune indication quant à la spatialisaiton des processus d'écoulements,

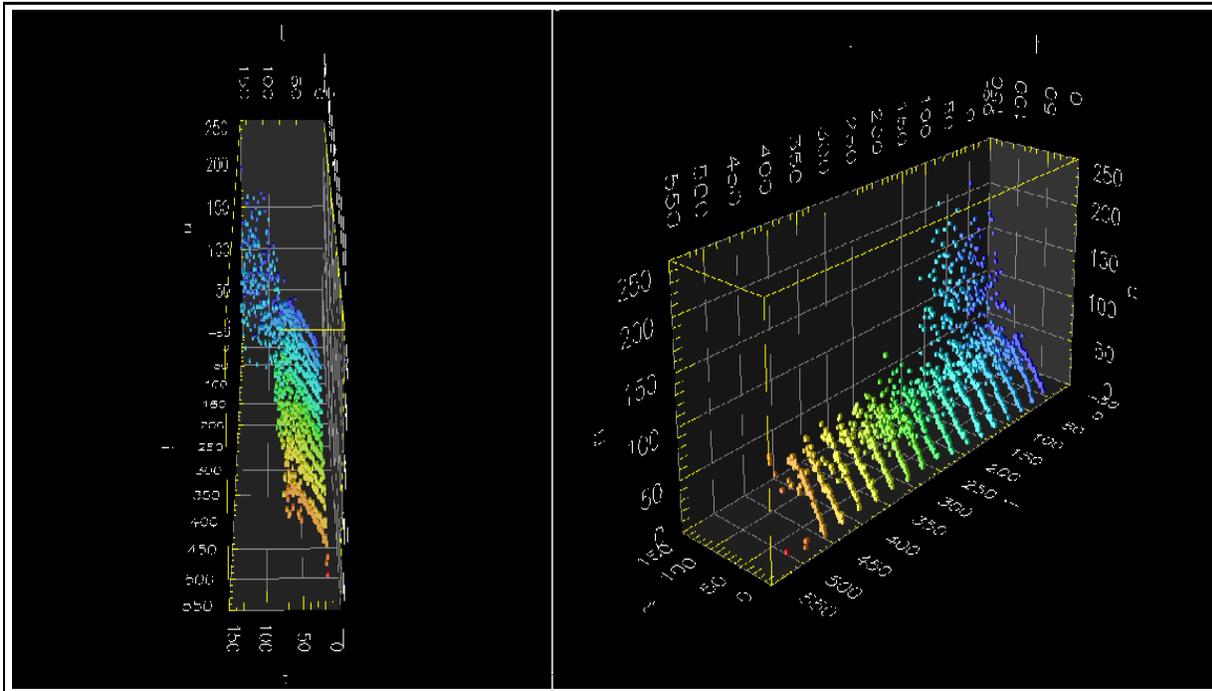


FIGURE 7.8 – Suivi des mares qui se sont formées dans l'expérience de la figure 7.5. La figure représente les courbes d'évolution dans le temps des effectifs de chaque mare. Un des axes représente le numéro de chaque mare : ce numéro est repris dans les couleurs attribuées à chaque courbe. Un deuxième axe, gradué de 0 à 150, figure le temps. Le troisième axe, gradué de 0 à 250, représente le nombre de boules d'eau dans chaque mare. On observe 16 courbes correspondant aux 16 mares qui se forment au départ. Les effectifs de chacune de ces mares augmente au cours du temps. Puis, environ au milieu de la simulation, certaines courbes disparaissent (figure à gauche). C'est le moment de la fusion des 16 mares en 4 mares moyennes. Seules les 4 courbes du fond (tons de bleu) sont présentes à partir de ce moment : elles correspondent aux 4 mares moyennes qui sont apparues. Leurs effectifs continuent d'augmenter au cours du temps. On peut remarquer que les courbes se superposent relativement bien, ce qui montre que chaque mare a connu la même évolution au cours du temps (initiation, augmentation de l'effectif, puis dissolution éventuelle).

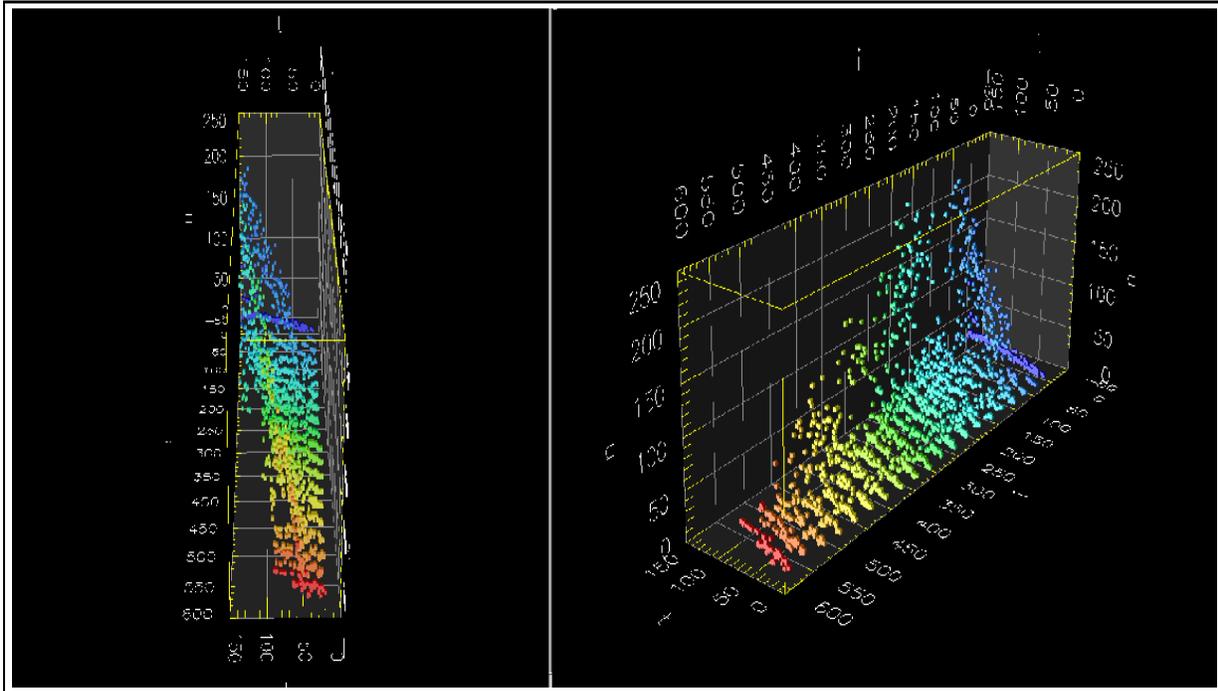


FIGURE 7.9 – Suivi des mares qui se sont formées dans l'expérience de la figure 7.6. La figure représente les courbes d'évolution dans le temps des effectifs de chaque mare. Un des axes représente le numéro de chaque mare : ce numéro est repris dans les couleurs attribuées à chaque courbe. Un deuxième axe, gradué de 0 à 150, figure le temps. Le troisième axe, gradué de 0 à 250, représente le nombre de boules d'eau dans chaque mare. On observe 20 courbes correspondant aux 20 mares qui se sont formées dans des temps voisins. Les effectifs de chacune de ces mares augmente au cours du temps, de façon similaire. Puis, seules quelques courbes correspondant aux mares plus importantes voient leur effectif augmenter : d'une part les mares de taille moyenne (tons de bleu au fond) et les mares qui résultent de la fusion des 16 mares de taille plus petite (tons jaune et vert).

7.2. Enjeux pour l'explicitation de dynamiques.

- l'information donnée par l'évolution au cours du temps du champ des hauteurs d'eau qui est exhaustive mais indifférenciée et ne permet pas d'obtenir rapidement une vision synthétique de certains événements clés de la dynamique.

Toutefois un certain nombre de questions restent ouvertes. Si de telles courbes de suivi d'objets intermédiaires se révélaient des indicateurs originaux de caractérisation de surface par exemple, on serait amené à se demander dans quelle mesure de tels indicateurs peuvent être mesurés expérimentalement - ce qui est le cas d'un débit à l'exutoire et de champ de hauteur d'eau, même si dans ce dernier cas une mesure point à point est relativement coûteuse et pas toujours envisageable.

Ces questions me semblent être au cœur du problème de la validation des modèles spatialisés en général. Si l'aspect spatial des processus apparaît souvent fondamental et demande de plus en plus que l'on mette en œuvre des modèles qui prennent explicitement en compte les hétérogénéités de l'espace, l'information que fournissent ces modèles ne peut généralement être confrontée que partiellement à des données expérimentales : si en dernier ressort, seules des données de débits de sortie à l'exutoire sont accessibles, l'utilisation même d'un modèle spatialisé du ruissellement soulève la question de sa pertinence.

Un modèle comme RIVAGE n'échappe pas à cette question, mais propose pour l'aborder une voie de recherche originale : travailler à l'aide de simulations autour de niveaux intermédiaires de représentation de dynamiques spatio-temporelles. Le repérage d'événements de création et disparition d'objets intermédiaires peut être plus facilement repérable. Il doit sûrement exister une relation entre les événements identifiés en termes de créations d'objets macroscopiques et les variations enregistrées au niveau du débit de sortie à l'exutoire. La mise en rapport temporel de ces événements et variations peut être une source d'explication de ces variations.

7.2.3 Un rôle actif dans les dynamiques simulées.

L'instanciation d'agents comme *observateurs privilégiés* de certains éléments structurant d'une dynamique est une voie de recherche intéressante que l'on vient d'évoquer. Les agents groupes offrent par ailleurs une autre piste de recherche.

En les dotant d'un rôle plus actif dans la dynamique simulée elle-même, on peut se donner une grande liberté de construction de modèles à différents niveaux d'agrégation : par exemple pour adapter les règles d'interaction et les modèles de fonctionnement à l'apparition de modes d'organisation spécifiques ou pour coupler des modèles à différents niveaux d'analyse.

D'une certaine manière, les agents groupes permettent de revisiter la plupart des modèles que l'on a présentés précédemment.

Ainsi, au niveau du modèle de ruissellement, les règles de mouvement des boules d'eau pourraient être modifiées localement en fonction de leur appartenance à des groupes identifiés. Par exemple, on peut imaginer que des boules d'eau appartenant à une mare n'aient plus à se déplacer, et que des boules d'eau appartenant à une ravine ou passant à proximité d'une ravine se déplacent en suivant les trajectoires établies de ses écoulements (par convection comme dans le cas de particules de terre arrachée par splash cf. 6.1).

Par ailleurs, on a jusqu'à présent envisagé des situations de ruissellement sur des surfaces à l'échelle du m^2 initialement sans eau. Si l'on étudie un bassin versant, dans lequel des cours d'eau et des mares préexistent, la possibilité d'introduire de tels objets, mares ou cours d'eau, décrits à un niveau agrégé pourrait permettre de travailler à des échelles plus grandes pour lesquelles il semble irréaliste d'imaginer représenter tous les objets comme des ensembles de boules d'eau. Les agents mares et ravines pourraient être vus dans ce cas comme des zones d'information spécifiant un champ de hauteur-vitesse local, défini à partir de données mesurées.

La construction de couplage entre modèles peut aussi bénéficier de cette approche. Par exemple concernant la modélisation des processus d'érosion, on peut penser expliciter des règles d'interaction eau-sol plus complexes que celles que l'on a définies au chapitre 6, au niveau agrégé de mares et de ravines.

En confiant à ces agents macroscopiques un rôle actif dans la simulation, on s'autorise un découplage temporel entre des processus décrits à l'échelle du mouvement des boules d'eau et des phénomènes qui se produiraient sur des rythmes temporels plus longs. Ainsi, les processus de dépôt et d'érosion complexes qui se produisent au niveau des méandres d'un cours d'eau pourraient être mieux décrits au niveau agrégé d'un agent "ravine" : par exemple pour calculer les variations du rayon de courbure du lit en formation et déposer ou éroder alternativement le long de ce lit. De même appréhender le dépôt de sédiments au niveau d'une mare peut permettre d'adapter le rythme de sédimentation en donnant le contrôle des particules de terre déplacées par convection à l'agent mare.

La discussion que j'ai cherché à mener dans ce chapitre ouvre un travail de longue haleine. A travers les exemples que l'on a présentés, on aura pu apprécier l'intérêt que représente la coexistence de niveaux d'information intermédiaires dans la simulation de dynamiques, mais aussi les questions que suscitent l'exploitation de telles informations, notamment la question de leur confrontation à des données expérimentales et de leur représentation sous la forme d'indicateurs pertinents.

Ainsi s'achève avec ce chapitre le volet concernant les modèles que j'ai développés dans la thématique de l'hydrologie. Les chapitres suivants se proposent d'une part d'apprécier dans quelle mesure les modèles construits pour cette thématique peuvent être appliqués à d'autres contextes de prise en compte de flux, d'autre part d'extraire un certain nombre d'idées et de principes méthodologiques que ce travail de recherche a suscités.

Chapitre 8

Transposition à d'autres contextes d'application.

RÉSUMÉ :

Dans ce chapitre, on cherche à transposer les modèles développés dans le cadre de la modélisation des processus hydrologiques, à la prise en compte de flux dans d'autres contextes d'application.

Un premier domaine concerne la modélisation de mouvements de piétons dans une foule, qui fournit un domaine d'application relativement direct des modèles que l'on a construits précédemment. La transposition de modèles hydrodynamiques à ce contexte n'est pas nouvelle. Cependant, la possibilité de repérer des situations critiques émergentes, comme des engorgements de voies de circulation, par instantiation d'agents "mares" et "ravines", fournit ici un élément original pour l'étude de telles dynamiques. Cette utilisation est illustrée sur quelques exemples.

Dans un contexte relativement plus éloigné de la modélisation, on se propose de montrer que les modèles que l'on a construits peuvent se révéler des métaphores intéressantes dans la problématique de conception de systèmes de représentation spatiale de flux d'informations complexes. Cet exposé est illustré en revisitant dans les termes de RIVAGE une application en cours de développement au sein de l'équipe MIRIAD (travail de thèse de Valérie Renault [Renault et Hutzler, 2000]) construite autour des Jardins de données, un système multi-agents pour la visualisation de systèmes complexes.

Ces quelques exemples doivent être pris comme des points de départ d'une recherche à mener, dans laquelle le simulateur RIVAGE peut se révéler un outil d'exploration intéressant et peut espérer s'enrichir en retour de telles applications dans des contextes variés.

8.1 Application à la dynamique de foules.

8.1.1 Des modèles hydrodynamiques pour la modélisation de foules.

L'intérêt suscité par la modélisation de dynamiques de piétons dans une foule a été grandissant depuis une dizaine d'années, dans une large communauté de chercheurs de diverses disciplines. En premier lieu des architectes et urbanistes ont ressenti le besoin d'outils de modélisation pour guider la conception de zones piétonnières, stations de métro, centres commerciaux, notamment dans des situations critiques (incendies, émeutes, etc.). Par ailleurs, la description des interactions entre piétons et l'effet de la géométrie des infrastructures s'est posé comme un défi et a intéressé des chercheurs en physique pour lesquels les observations de mouvements de foule présentaient d'étonnantes analogies avec le comportement de gaz et fluides en hydrodynamique. Parallèlement, l'accès à des données observées comme les vitesses, positions et flux, a rendu possible une confrontation entre modèles et réalité.

Les premiers modèles sont essentiellement basés sur des analyses de données observées (à l'aide de régressions) ou de modèle de files d'attente, pour lesquels la description de foule est faite en terme de flux. Cependant, comme le souligne [Helbing, 1992] ces modèles sont généralement extrêmement peu généralisables et sont pauvres quant à leur description des interactions entre espace de circulation et piétons. A partir des travaux de [Henderson, 1974] qui a imaginé utiliser des modèles d'hydrodynamique pour prédire des "écoulements" de piétons, un courant s'est intéressé à développer de tels modèles inspirés de la dynamique des fluides mais permettant une plus grande souplesse dans la prise en compte des interactions (direction poursuivie par chaque piéton par exemple) et ne nécessitant pas une résolution complète d'équations différentielles [Helbing, 1992] ou [Helbing et Molnár, 1995].

Sur la trace de ces travaux, il semble intéressant de présenter une illustration de l'application du modèle RIVAGE à ce type de problèmes.

8.1.2 Exemples d'application de RIVAGE.

Un premier exemple inspiré par [Helbing et al., 1997] permet de présenter la démarche de transposition du modèle des boules d'eau à des individus dans une foule. Enfin un deuxième exemple donne une illustration d'une situation plus complexe, qui donne une idée de l'utilisation que l'on pourrait envisager de faire de RIVAGE pour la simulation de dynamiques de foules dans un environnement réaliste.

Passage par un sas étroit.

Une expérience classique [Helbing et al., 1997] consiste à introduire deux populations d'agents de part et d'autre d'une cloison séparant deux pièces. Chaque population cherche à se rendre dans l'autre pièce. Les deux pièces sont reliées par un sas étroit qui contraint le flux d'individus qui peuvent passer d'un côté à l'autre. On observe les dynamiques résultantes.

Cet exemple simple permet de préciser un certain nombre de points concernant l'application des modèles de RIVAGE. Les agents boules d'eau sont considérés comme des individus qui se déplacent dans un environnement, présentant éventuellement une topographie (murs, couloirs,

8.1. Application à la dynamique de foules.

etc.). Comme dans le cas du ruissellement, les agents boules d'eau se déplacent en suivant des gradients de hauteur d'eau et de topographie. Ici, les hauteurs d'eau s'interprètent comme des densités locales d'agents. Ces mécanismes permettent aux agents de se déplacer le long de couloirs en se repoussant les uns les autres.

Les agents sont dotés d'une position vers laquelle ils souhaitent se rendre, fixée initialement. A chaque pas de temps, ils réactualisent un vecteur donnant la direction à suivre pour se rendre vers la position souhaitée et ce vecteur se rajoute aux gradients de densité et de topographie dans le déplacement des agents. De cette manière, en équilibrant les différentes contraintes - densité, topographie, direction souhaitée - , les agents boules d'eau se déplacent à l'image de piétons dans une foule.

Une vitesse arbitraire est calculée et un pas de temps fixé après essais. La difficulté réside dans l'équilibre à trouver entre les différentes composantes intervenant dans la direction des agents : si le vecteur de direction souhaitée a un poids trop fort les agents seront moins sensibles aux densités locales et auront davantage tendance à s'agglutiner les uns sur les autres.

Un exemple de résultats est donné à la figure 8.1.

On observe le croisement d'agents venant de gauche et de droite, et la formation au bout de quelques pas de temps de deux files de "piétons" dans chaque direction. On peut noter qu'une des conséquences du modèle dans lequel chaque individu se repousse de façon indifférenciée, est que les individus d'un même groupe sont à la fois gênés par les individus arrivant en sens contraire et "soucieux" de respecter un intervalle de sécurité avec leurs congénères. Ces pressions conjointes font émerger un système organisé de passage à travers le sas.

Dans un deuxième temps, on a cherché à utiliser l'instanciation de "mares" et de "ravines" pour représenter des structures qui émergent des interactions entre agents individuels, notamment des situations d'engorgement, lorsque des agents se gênent mutuellement et sont obligés d'attendre que les individus situés devant eux leur laissent le passage.

Les mêmes règles utilisées pour le repérage de mares et de ravines sont utilisées ici (cf. chapitre précédent) : les agents calculent le même indicateur de trajectoire et estiment par interpolation l'indicateur des agents situés dans leur voisinage. Sur la base de ces indicateurs, des regroupements s'opèrent en cours de dynamique.

On a représenté à la figure 8.2 le résultat obtenu dans la même expérience de passage par un sas étroit. On peut remarquer la formation d'une "mare" au niveau du passage qui signale une situation d'engorgement.

Après avoir obtenu ces quelques résultats, on s'est intéressé à mettre au point un exemple plus complexe qui soit plus suggestif de l'utilisation que l'on pourrait faire de RIVAGE pour l'étude de dynamiques de foules. Les mêmes lois sont utilisées mais la visualisation des agents s'écarte un peu plus du cadre de l'hydrologie et l'environnement dans lequel se déplacent les agents est plus complexe.

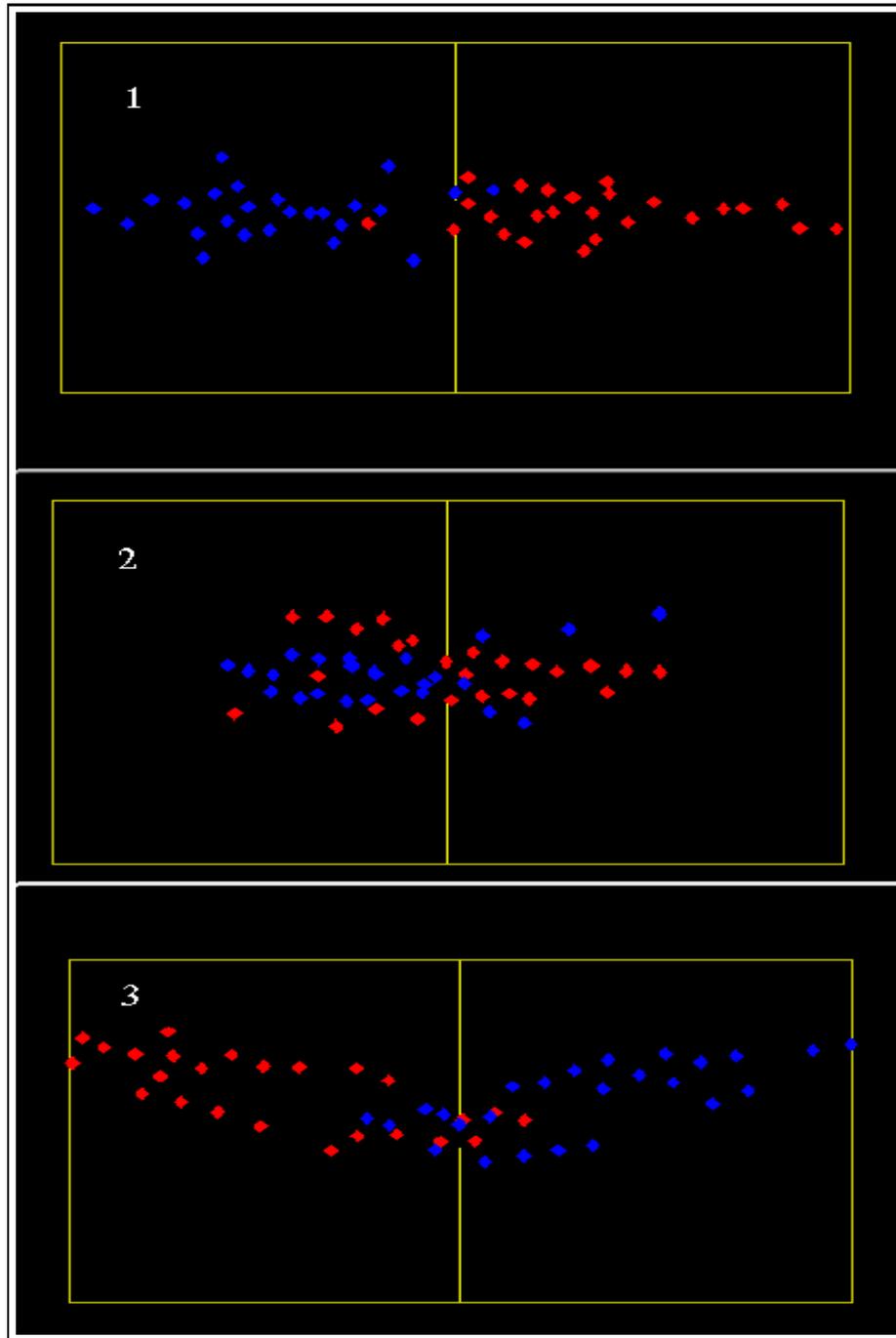


FIGURE 8.1 – Deux groupes d’agents se croisent dans le passage d’un sas étroit.

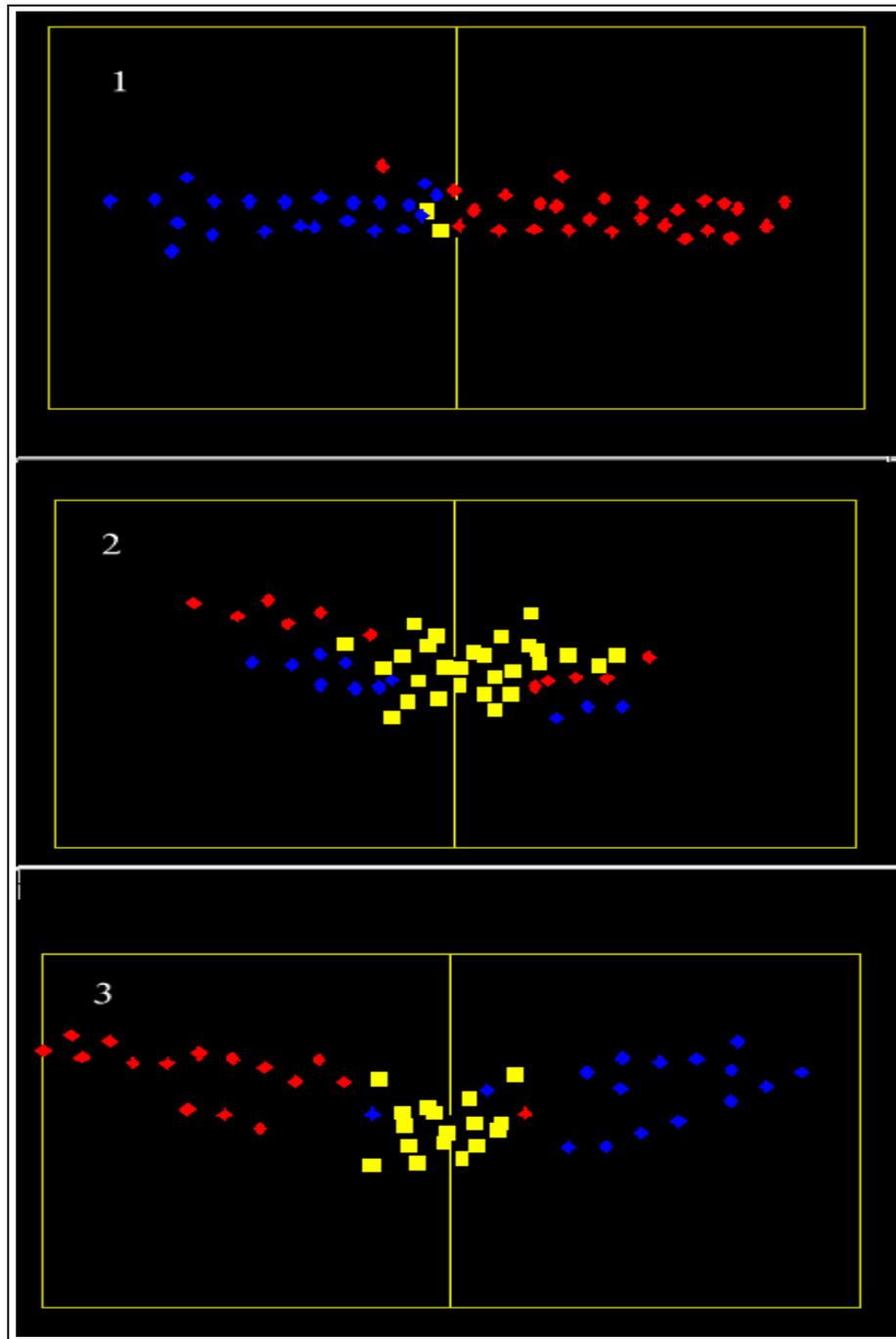


FIGURE 8.2 – Même situation que précédemment. Une “mare” se forme puis se résorbe (en jaune) indiquant une situation d’engorgement.

Visite d'un musée.

Quatre groupes d'individus sont introduits au quatre coins d'un environnement complexe. Les individus de chaque groupe sont dotés d'une direction souhaitée vers une des sorties situées à l'opposé de leur point d'arrivée. On observe les mouvements de ces agents à la figure 8.3. On peut imaginer une salle de musée dans laquelle plusieurs groupes de touristes se déplaceraient à travers le dédale des pièces.

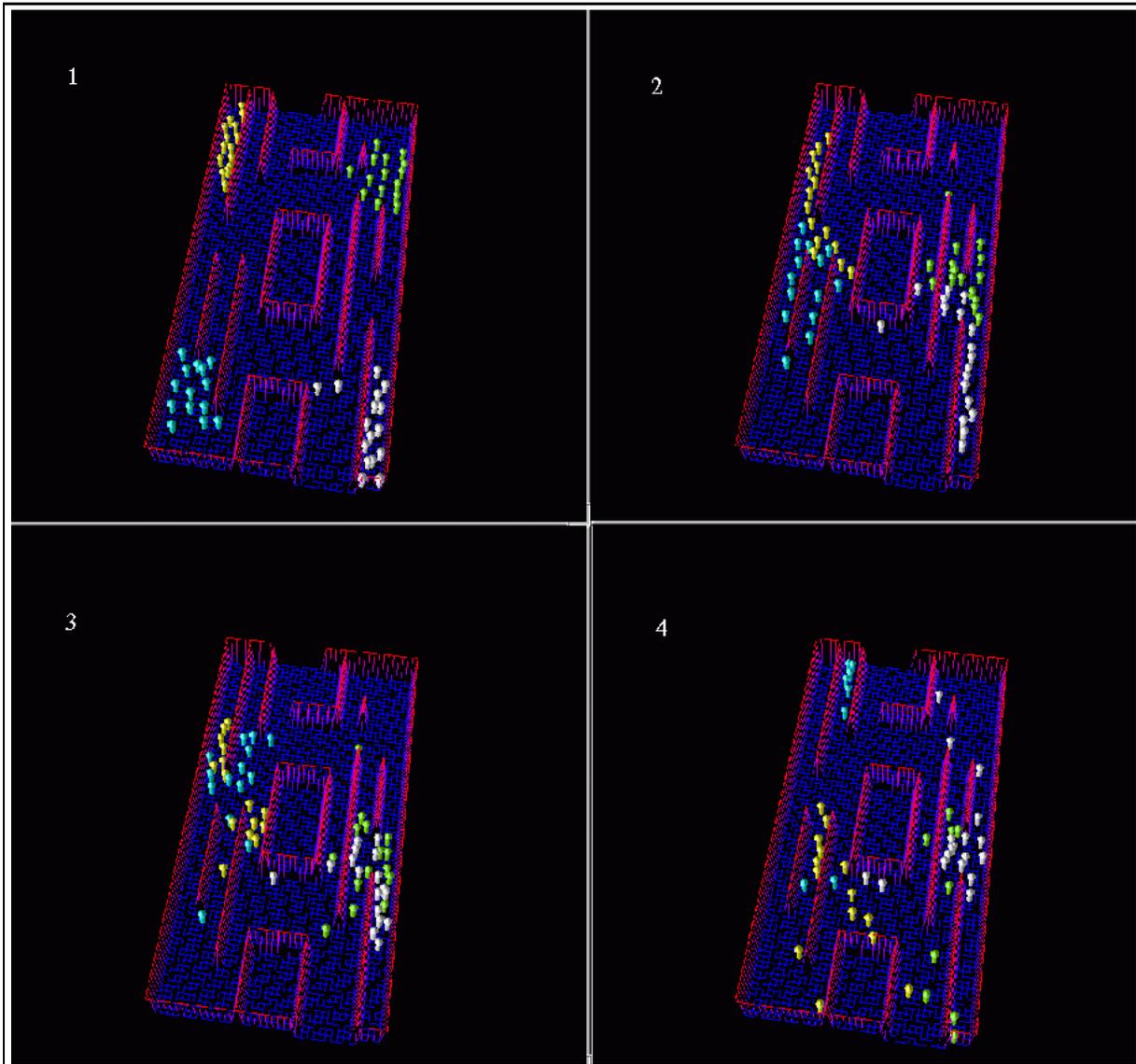


FIGURE 8.3 – Image 1 : une centaine d'agents répartis en quatre groupes arrivent en même temps dans une salle complexe (à l'image de groupes de touristes effectuant une visite d'un musée). Chaque groupe d'individus est doté d'une direction souhaitée (située à l'opposé de leur point d'arrivée). Image 2 : rencontre des deux groupes venant de chaque côté. Image 3 : les piétons se bousculent. Image 4 : certains individus ont été complètement coupés de leur groupe, en particulier deux individus en bleu.

8.1. Application à la dynamique de foules.

Cette première séquence permet d'observer que certains individus se retrouvent complètement coupés du reste de leur groupe du fait de l'encombrement des couloirs. Toutefois, on ne se rend pas bien compte des situations critiques. La figure 8.4 reprend la même séquence dans laquelle on voit clairement les situations d'engorgement par la visualisation des individus appartenant à une "mare".

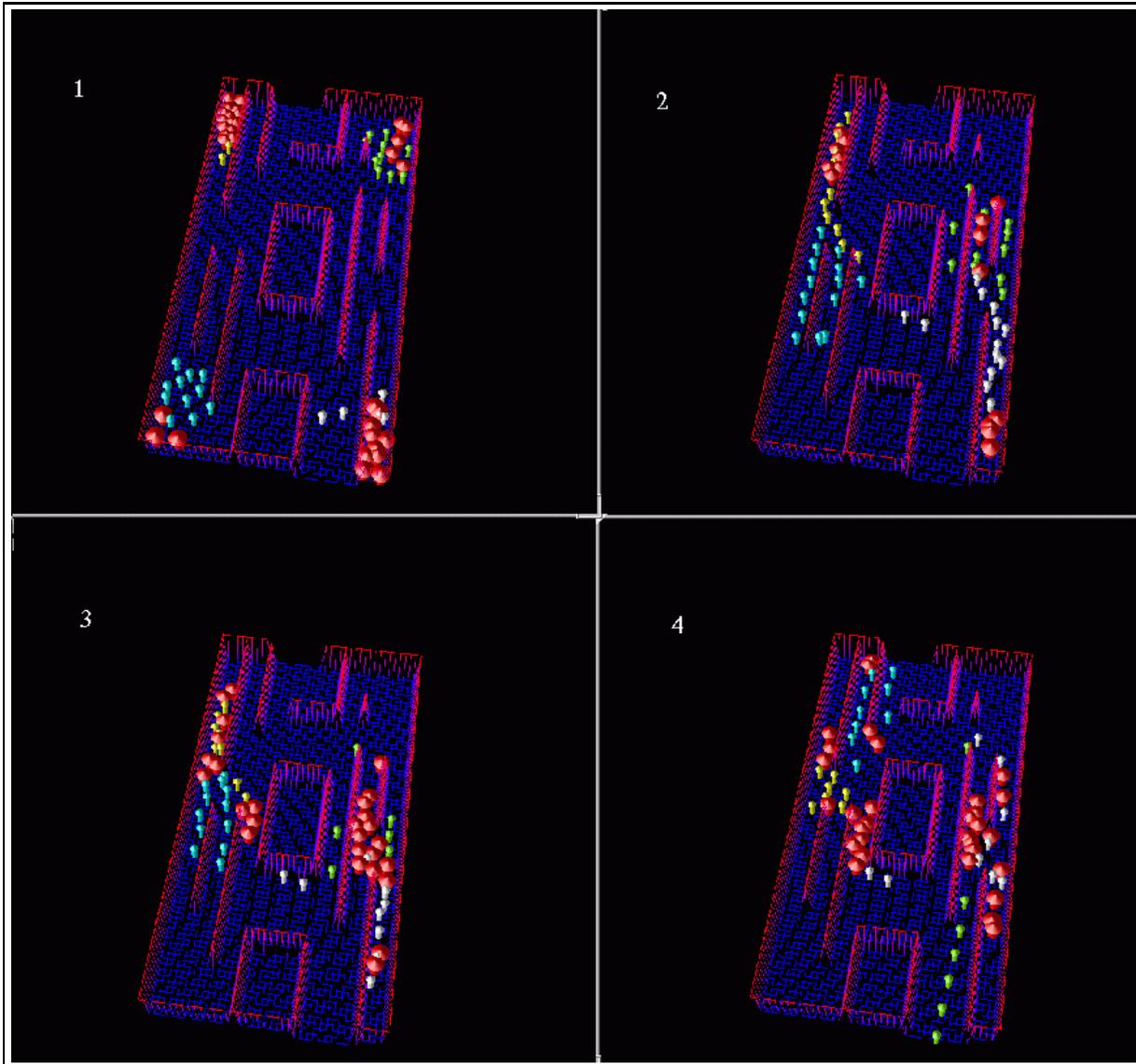


FIGURE 8.4 – Utilisation des “mares” pour visualiser les situations d’engorgement. On a repris la même succession d’images que précédemment. Les individus plus gros en rouge signalent des situations de blocage dans la circulation.

La même séquence est reprise une nouvelle fois en représentant aussi la formation de “ravines”, c'est-à-dire de flux d'agents suivant à peu près une trajectoire rectiligne (cf. figure 8.5).

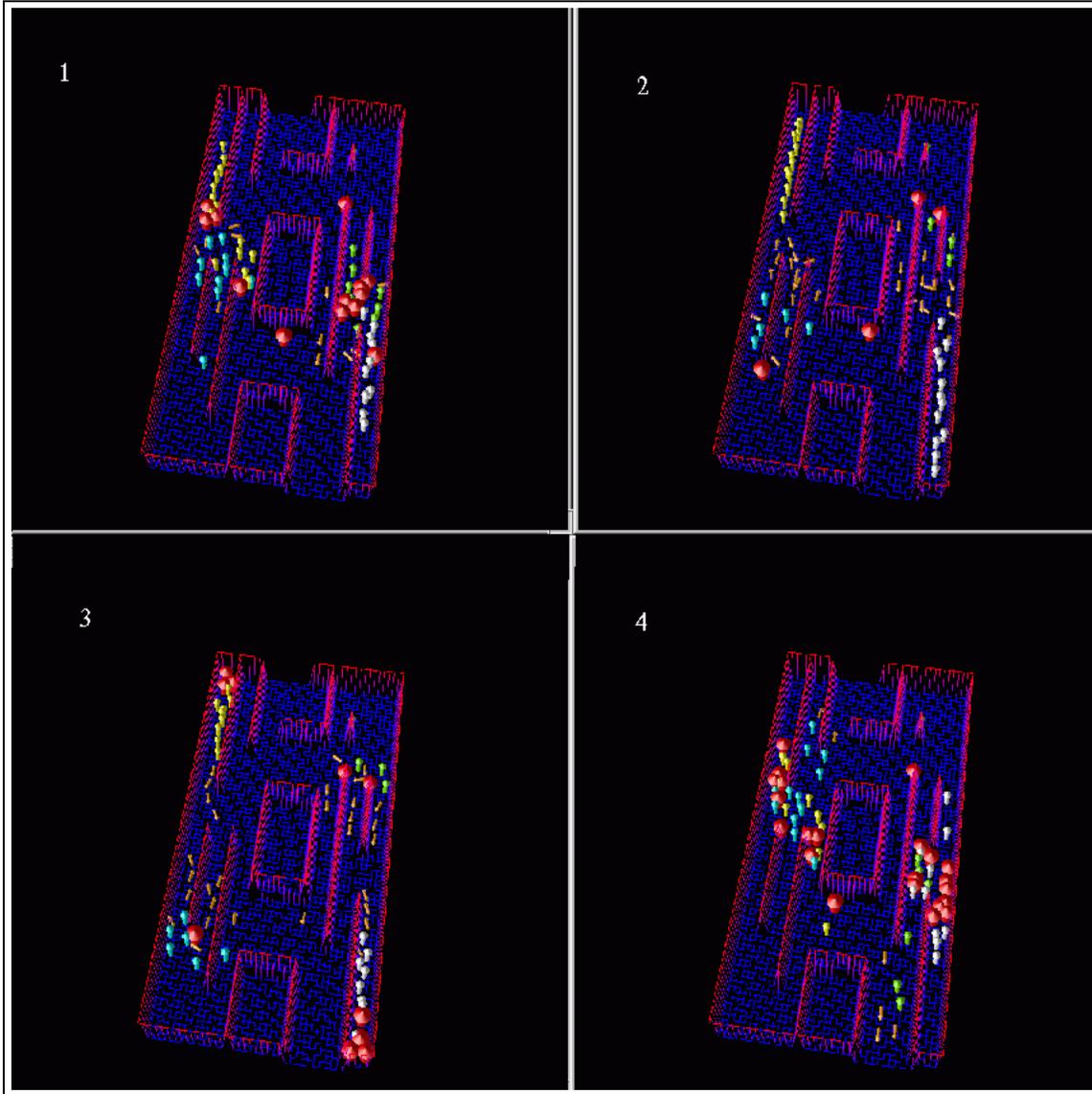


FIGURE 8.5 – Même séquence que précédemment, mais cette fois des “ravines” sont identifiées (flèches marron).

Dans cet exemple, on voit certaines limites d'une transposition “directe” de RIVAGE. En effet, ici la définition donnée en 7.2.2 des indicateurs utilisés pour discriminer des types de trajectoires différentes ne sont pas tout à fait adaptés à l'application. Ils permettent relativement bien de repérer des situation d'engorgement (à l'image des “mares”), mais ils ne permettent pas bien de retrouver des flux d'individus, notamment parce qu'ils négligent de prendre en compte des écarts entre les trajectoires individuelles dans un même voisinage, et conduisent donc au regroupement d'individus ayant chacun des directions à peu près rectilignes mais non

parallèles.

Il faudrait étudier plus précisément des indicateurs de corrélations entre trajectoires¹.

Les principes d'instanciation d'agents groupes montrent ici leur intérêt. On peut imaginer utiliser l'information stockée par ces agents pour étudier différents aménagements de locaux en testant différentes configurations d'une même pièce et diverses situations de flux de personnes, les agents groupes jouant le rôle d'observateurs de situations critiques : bousculade, mouvement de panique, etc.

8.2 Représentation de flux d'information.

8.2.1 Des systèmes multi-agents pour la visualisation de systèmes complexes.

Un certain nombre d'applications ont vu le jour dont l'objectif est d'offrir de nouveaux moyens d'appréhender la complexité des systèmes d'informations. Ces applications font un usage de plus en plus développé des techniques issues de la Vie Artificielle et des systèmes multi-agents, notamment l'utilisation de règles d'attraction-répulsion au sein d'une population d'agents en déplacement sur un espace.

Ces techniques sont utilisées dans deux types d'application :

- exploration de données spatialisées complexes : extraire des informations pertinentes (par exemple à l'aide de SIG) d'une masse de données spatialisées demande de plus en plus d'outils pour automatiser certaines tâches, notamment pour repérer des structures intéressantes dans des échantillons.

Dans ce cadre, un certain nombre de travaux dont [MacGill et Openshaw, 1998] proposent de confier l'exploration de ces ensembles de données à une population d'agents se déplaçant dans l'espace des données et interagissant selon différentes règles d'interaction. Chaque agent est doté d'une couleur indiquant dans quelle situation il se trouve : schématiquement bleu si l'agent a découvert un ensemble de données intéressant, rouge dans le cas où les données ne correspondent pas au type d'informations recherché, vert dans tous les autres cas. On obtient donc trois populations d'agents. Tous les agents se déplacent de façon aléatoire sur l'espace des données (par exemple une carte de SIG). Lorsque des agents se retrouvent localement proches, ils s'attirent ou se repoussent en fonction de leur couleur : un agent bleu attire les autres permettant à d'autres d'exploiter avec lui une zone intéressante, un agent rouge au contraire tend à repousser les autres de façon à éviter de perdre du temps dans une zone ne présentant pas d'intérêt.

- structuration spatiale d'informations complexes : dans ce type d'application la situation est inversée. Des agents représentant des éléments d'informations se déplacent dans un espace abstrait. L'idée consiste à utiliser des règles d'interaction entre ces agents pour que leurs déplacements dans l'espace rendent compte de corrélations entre les données qu'ils représentent et permettent d'obtenir une visualisation structurée spatialement d'un ensemble de données complexes.

Un exemple de cette recherche est donné par l'application des Jardins de Données, déve-

¹On pourra se référer à la discussion concernant les paramètres d'instanciation des groupes en 7.1.5.

loppée par Valérie Renault dans l'équipe MIRIAD du LIP6 [Renault et Hutzler, 2000], à partir du travail de thèse de Guillaume Hutzler [Hutzler, 2000]. Dans cette application, des agents habitent un monde virtuel dans lequel ils interagissent selon des types de comportement définis par un utilisateur. La réalisation dynamique de ces comportements est directement conditionnée par des flux d'informations arrivant en temps réel dans le système : par exemple des données météorologiques. La dynamique d'interaction, les changements de forme, de couleur, l'apparition de nouveaux agents dans ce "Jardin", permet de donner une image synthétique d'un ensemble de données complexes. Les "Jardins de données" font l'objet d'applications dans le cadre d'un système de visualisation de trafic routier et dans le cadre du développement d'une interface dynamique de filtrage de messages électroniques.

Dans ces deux types d'application il peut s'avérer intéressant de transposer les modèles développés dans RIVAGE, et chercher à trouver la signification que pourraient prendre dans ce cadre, des processus de ruissellement, d'infiltration ou d'érosion.

8.2.2 Métaphores hydrologiques pour la structuration de flux d'information.

On se place dans le cadre du travail de [Renault et Hutzler, 2000] que l'on vient d'évoquer, appliqué à la structuration d'un flux de dépêches d'information parvenant en temps réel à un utilisateur. L'idée consiste à obtenir une visualisation de la structure de ce flux d'information, plus riche qu'une simple liste chronologique des dépêches de façon à permettre à l'utilisateur de repérer les informations qui l'intéressent.

Chaque dépêche qui arrive est représentée par la création d'un agent sur l'écran de contrôle du système. Un certain nombre de mots clés parmi une liste définie par l'utilisateur est associé à chaque dépêche en fonction de leur contenu (à l'image de l'indexation des pages de sites web sur internet). Un poids est associé aux différents mots clés en fonction de critères définis par l'utilisateur, selon le type d'information qui l'intéresse, et de leur fréquence dans le texte des dépêches.

Les agents se déplacent sur l'écran en cherchant à se mettre en des positions stratégiques qui permettront à l'utilisateur de mieux les repérer : par exemple au centre ou en haut à gauche de l'écran. Une proximité sémantique peut être calculée sur la base des mots clés entre les différentes dépêches. Les règles d'interaction, attraction et répulsion, entre agents sont basées sur cette proximité sémantique : des agents représentant des dépêches qui traitent d'un même sujet ont tendance à s'attirer les uns les autres, tandis que des agents dont les dépêches ne présentent pas de liens se repoussent. Les règles peuvent être modifiées à tout moment par l'utilisateur, notamment en baissant l'importance de tel ou tel mot clé. La dynamique résultant du mouvement des agents permet ainsi de rendre compte de façon structurée d'une certaine organisation du flux d'information.

On voit bien le lien qui peut exister entre cette démarche et la construction des modèles que l'on a réalisés dans le cadre de cette thèse. On peut très bien imaginer que les agents boules d'eau représentent les différentes dépêches d'information, le flux de ces dépêches figurant une "pluie". Il est intéressant de voir comment peuvent s'interpréter sur ce mode métaphorique les différents modèles implémentés dans RIVAGE (une illustration est donné sur le schéma 8.6).

8.2. Représentation de flux d'information.

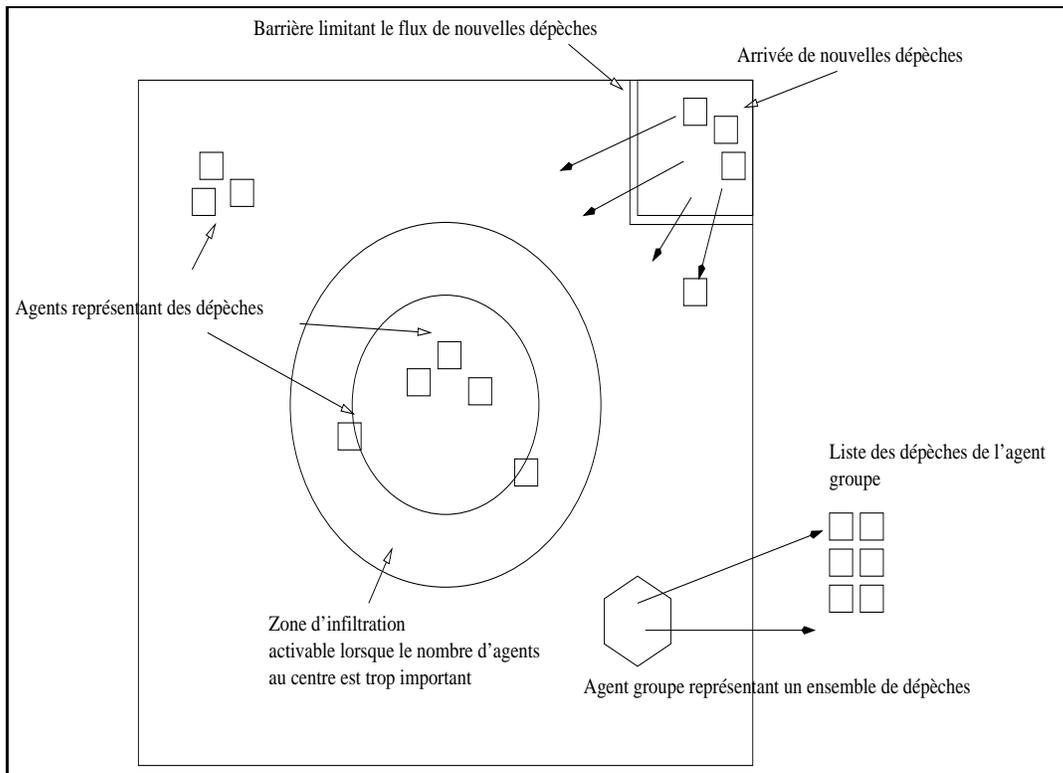


FIGURE 8.6 – Illustration des métaphores hydrologiques pour la gestion d'un flux d'informations.

Les zones d'attraction (centre, en haut à gauche, etc.) de l'écran peuvent être interprétées comme des dépressions d'une surface topographique. Sur cette surface topographique on peut imaginer que l'utilisateur puisse introduire des objets structurant les déplacements, ou écoulements d'agents : par exemple, introduire un "barrage" qui vienne réguler le rythme selon lequel les agents arrivent dans l'environnement de façon à ne pas trop encombrer l'écran, et à laisser du temps pour qu'une certaine organisation, un régime permanent, s'établisse.

Lorsque des agents ont un poids particulièrement important, par exemple dans le cas où les dépêches qu'ils représentent sont d'un intérêt particulier pour l'utilisateur, on aimerait leur permettre de s'imposer durablement dans une position clé et ne pas risquer être dispersés par l'arrivée d'autres dépêches. On peut imaginer que ces agents érodent dans ce cas la surface de l'écran de façon à créer leur propre zone d'accumulation.

Par ailleurs si l'on imagine qu'un grand nombre d'agents sont présents sur le même écran, il peut s'avérer utile de disposer de différentes couches d'information hiérarchisées. Dans ce cadre on peut penser définir autour de la position centrale de l'écran une zone d'infiltration chargée de faire disparaître des agents repoussés du centre donc représentant des informations de moindre importance. Ces agents pourraient ensuite évoluer sur différents écrans parallèles, à l'image d'écoulements souterrains. L'utilisateur pourrait alors passer d'un espace de visualisation à un autre, représentant différents niveaux de priorité dans les dépêches.

Enfin, comme l'évoque [Renault et Hutzler, 2000], il semble nécessaire de pouvoir synthétiser l'information représentée par des regroupements spatiaux d'agents. Dans ce cadre

on peut penser utiliser le même type d'indicateurs de trajectoires que ceux utilisés pour les agents boules d'eau. Sur la base de ces indicateurs, des regroupements d'agents pourraient se former : ainsi une mare représenterait une accumulation de dépêches traitant d'un sujet commun. L'instanciation automatique d'agents groupes, représentant de tels ensembles, permettrait dans ce cas de remplacer la visualisation d'un grand nombre d'agents par un agent macroscopique, signalé d'une façon différente. Ce système fournirait un moyen de synthétiser une grande partie de l'information présente sur l'écran en la hiérarchisant, tout en laissant la possibilité à l'utilisateur de regarder le contenu de ces agents macroscopiques en obtenant la liste des dépêches qui ont été ainsi regroupées, et le cas échéant décider de leur dissolution.

Les exemples que l'on vient d'évoquer que ce soit dans le cadre de la dynamique de foules ou dans le cadre de l'organisation d'un flux d'informations donnent des pistes de recherche intéressantes. J'ai cherché dans ce chapitre à montrer que les modèles que j'ai conçus dans le cadre de la modélisation de processus hydrologiques pouvaient être transposés à d'autres contextes. De cette transposition peuvent naître de nouvelles idées dont pourrait bénéficier en retour le simulateur RIVAGE, notamment concernant la recherche d'indicateurs de corrélation de trajectoires. Au passage, ces illustrations ont montré que si la métaphore de l'agent pouvait permettre de fournir des heuristiques intéressantes, des métaphores nouvelles, fondées sur des processus physiques pouvaient à leur tour se révéler comme heuristiques possibles dans la conception de systèmes informatiques. C'est dans cet esprit que je me suis attaché à construire mes modèles. Il semble bien que les choix d'une représentation d'un espace continu et d'une description particulière des flux dont on a débattu au début de cet exposé montrent ici leur versatilité, permettant de considérer l'espace tantôt comme un milieu physique ou comme un espace abstrait de visualisation, et les agents tantôt comme des particules de fluide, des individus dans une foule, ou des informations.

Le chapitre suivant s'attache à extraire un certain nombre de réflexions d'ordre méthodologiques que ce travail a suscité concernant la représentation de l'espace et la gestion de l'organisation dans les systèmes multi-agents.

Chapitre 9

Espace et organisation dans les systèmes multi-agents.

RÉSUMÉ :

Mon travail de thèse, en confrontant le paradigme des systèmes multi-agents au contexte de la modélisation de dynamiques de flux, m'a amené à me poser un certain nombre de questions de nature méthodologique autour des systèmes multi-agents, qui sont regroupées dans ce chapitre.

Une première partie expose des pistes de recherche sur la représentation d'objets spatialement étendus et la construction d'une structure adaptée de réseaux d'agents médiateurs pour la gestion de l'espace d'interaction entre agents. Ces propositions ont pour but de montrer l'utilité d'une discussion autour des modèles d'espace mis en œuvre dans les systèmes multi-agents.

Enfin, dans une deuxième partie, un certain nombre de points sont abordés qui cherchent à préciser l'éclairage que ce travail de thèse permet d'apporter sur les concepts de groupe et d'organisation dans une perspective de recherche méthodologique sur la conception de systèmes multi-agents.

En particulier on s'intéresse aux liens que peut représenter l'instanciation automatique de groupes d'agents par rapport à une méthodologie de conception telle que Cassiopée [Collinot et Drogoul, 1998] qui repose sur la définition hiérarchique de schémas d'interaction entre agents.

9.1 Représentation de l'espace.

Les techniques développées dans RIVAGE pour le mouvement des agents boules d'eau peuvent permettre de construire une représentation particulière d'objets spatialement étendus, sous la forme d'un ensemble pondéré de points et d'une fonction d'interpolation.

Ces techniques ouvrent une voie possible pour un formalisme de représentation, alternatif à la vision classique d'un espace discrétisé en cellules, qui met en avant au contraire, une vision d'un espace *continu* dans lequel les interactions entre agents sont perçues comme des co-occurrences spatio-temporelles qu'il s'agit de repérer et de gérer.

En suivant un tel cheminement, une réflexion méthodologique plus profonde autour des modèles d'espace semble nécessaire.

9.1.1 Vers un formalisme de représentation d'objets spatiaux.

Les algorithmes que l'on a présentés au chapitre 4, notamment à la section 4.1.3, permettent de représenter la dynamique de ruissellement de l'eau sur une surface topographique, sous la forme de mouvements d'agents portant une quantité d'eau discrète. Ces mouvements sont contraints par la pente locale de la surface d'une part et par la hauteur d'eau locale d'autre part.

Fondamentalement, le modèle repose sur un déplacement de points dans un espace continu sous la contrainte conjointe de :

- minimisation d'une variable continue exogène (altitude),
- minimisation d'une variable continue endogène (densité).

Le volume porté par les agents boules d'eau conditionne la force des interactions, donc impose des déplacements relatifs plus ou moins importants entre agents. Le modèle de ruissellement peut donc apparaître comme la résolution distribuée d'un problème d'optimisation sous contraintes.

A partir de cette réflexion préliminaire, on se propose d'étudier les dynamiques résultant de ces différentes contraintes et leurs extensions à la prise en compte de contraintes plus complexes.

Contraintes de densité.

Dans un premier temps, il est intéressant d'observer les dynamiques résultant de la seule contrainte de densité inter-agents.

Cela revient à considérer une surface topographique plane, qui n'impose aucune contrainte sur le déplacement des agents. A partir d'une distribution aléatoire uniforme (figure 9.1), un résultat typique obtenu au bout de quelques pas de temps est montré à la figure 9.2.

On observe que par déplacements relatifs successifs les agents parviennent à occuper de façon uniforme l'espace en minimisant leurs interactions. Une configuration stable est obtenue dès lors que la distance inter-agents est supérieure à 2η pour laquelle W et ∇W s'annulent. Plus le volume porté par les agents est grand, plus l'espace occupé est important et plus

9.1. Représentation de l'espace.

les déplacements relatifs entre agents sont importants, et la configuration d'équilibre obtenue rapidement.

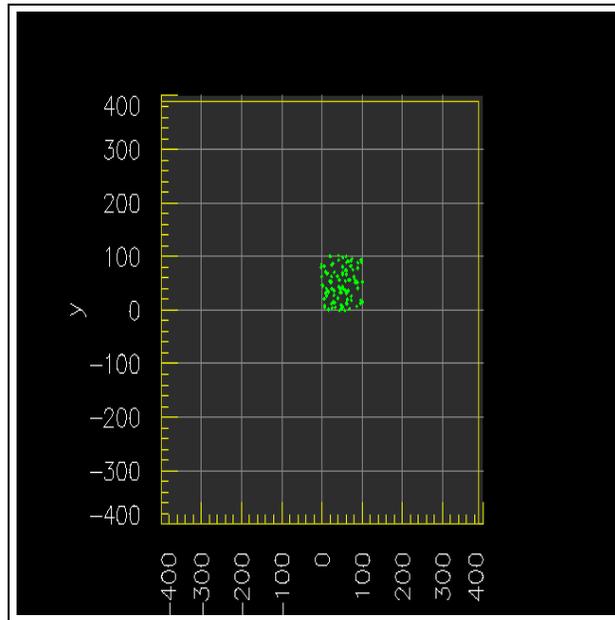


FIGURE 9.1 – Distribution initiale d'agents (aléatoire uniforme sur un carré de côté 100).

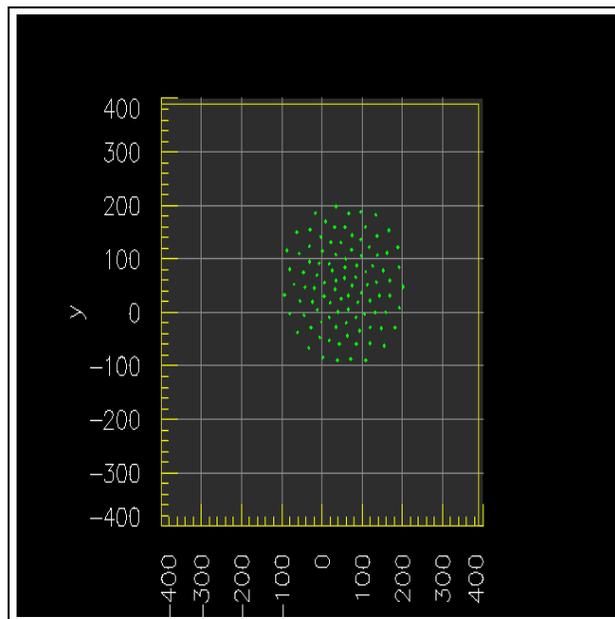


FIGURE 9.2 – Distribution d'agents obtenue au bout de quelques pas de temps sous la contrainte de minimisation de densité. Les agents se répartissent de façon uniforme sur l'espace à une distance inter-agents supérieure ou égale à 2η (ici 50).

Que se passe-t-il lorsque l'on contraint les agents à rester dans un espace fermé en introduisant des conditions aux limites de flux nul? On observe que les agents ne peuvent plus dans ce cas se répartir de façon uniforme avec des positions distinctes mais s'agglutinent en groupes plus ou moins de même effectif en des positions qui minimisent les interactions inter-groupes (soit à des distances inter-groupes supérieures ou égales à 2η).

Ce type de configuration peut être obtenu en imposant cette fois aux agents de *maximiser* leur densité en inversant le signe de ∇W dans les relations définies en 4.1.3 - c'est-à-dire que les agents s'attirent au lieu de se repousser les uns les autres. Dans ce cas, les agents distants de moins de 2η s'attirent et forment des "amas" de points plus ou moins stables, ces amas restant distincts les uns des autres. Toutefois si η est suffisamment grand, par exemple s'il couvre l'ensemble de l'extension spatiale de la population, un seul groupe se forme.

On peut envisager d'imposer des contraintes de densité plus complexes. Par exemple si l'on combine minimisation de densité au-delà d'un seuil d et maximisation en-deçà de ce même seuil, on peut contraindre les agents à former une structure de densité voisine de d . A partir d'une distribution aléatoire uniforme de points, on obtient dans ce cas un cercle d'agents (figure 9.3).

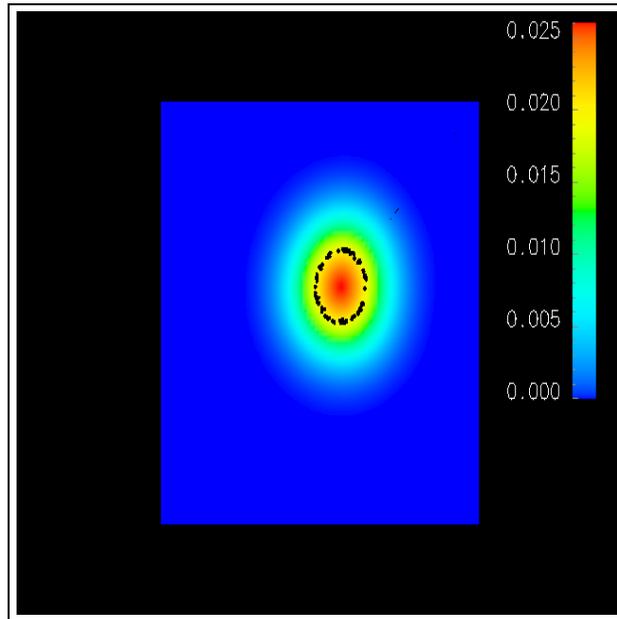


FIGURE 9.3 – Au-delà d'un seuil de densité $d = 0.02$, les agents se repoussent et s'attirent en-deçà de ce même seuil. Une configuration stable en cercle est obtenue au bout de quelques pas de temps. La figure montre les agents (points noirs) et le champ de densité correspondant.

Ces quelques expériences apportent un éclairage nouveau sur le fonctionnement du modèle de ruissellement : les agents boules d'eau cherchent bien, par leurs déplacements relatifs, à occuper le maximum d'espace disponible en s'éloignant les uns des autres. Ce mouvement d'expansion est contraint par les variations de la surface topographique qui définit sur l'espace une densité maximale permise d'agents.

9.1. Représentation de l'espace.

Contraintes exogènes.

Lorsque les mouvements des agents sont contraints par les variations d'une surface topographique, tout se passe comme si la surface $z = f(x, y)$ imposait une densité limite de points de volume ω en chaque point de l'espace. En prenant en compte cette limite dans le calcul de leur mouvement (gradient $\nabla(h + z)$), les agents couvrent de façon hétérogène l'espace : une zone dense reflète un minimum local, inversement une zone faiblement dense reflète un maximum local.

En "renversant" la surface topographique, ou en changeant le signe des équations de mouvement, on peut obtenir au contraire une distribution d'agents dont la densité locale reproduit les variations de la surface $z = f(x, y)$: une zone dense d'agents correspondant dans ce cas à un maximum local. On peut penser ainsi obtenir une reconstruction d'une surface topographique à l'aide d'un nuage de points.

A partir de la donnée d'un z moyen, on peut estimer le volume représenté par les variations de la surface. Par exemple, sur l'une des parcelles de $1m^2$ que l'on a déjà eu l'occasion d'utiliser plusieurs fois, on obtient : $\bar{z} = 1cm$, soit un volume moyen de $10^4 cm^3$. On cherche à représenter cette surface à l'aide d'une distribution de 1000 agents de volume $\omega = 10cm^3$. Cet ensemble d'agents est introduit selon une distribution aléatoire uniforme et l'on observe les déplacements des agents en utilisant les mêmes règles de déplacement que pour le ruissellement mais en inversant le signe du gradient ∇z : les boules d'eau remontent les pentes locales. Un pas de temps arbitraire est fixé, la surface topographique est fermée aux bords, et le rayon de sondage η est choisi de façon à être compatible avec les variations de pente.

Le champ de densité obtenu reproduit les variations de la surface topographique de façon assez satisfaisante (cf. figure 9.4). La distribution des agents est montrée à la figure 9.5.

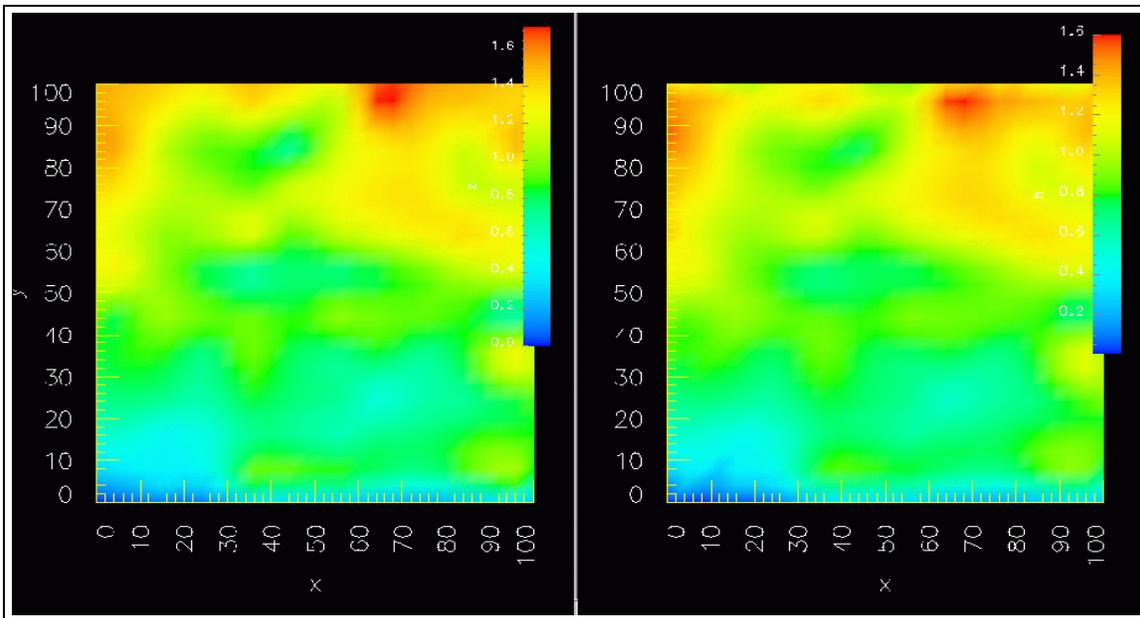


FIGURE 9.4 – Reproduction d'une surface topographique par une distribution d'agents. A gauche variations de la topographie, à droite champ de densité d'agents.

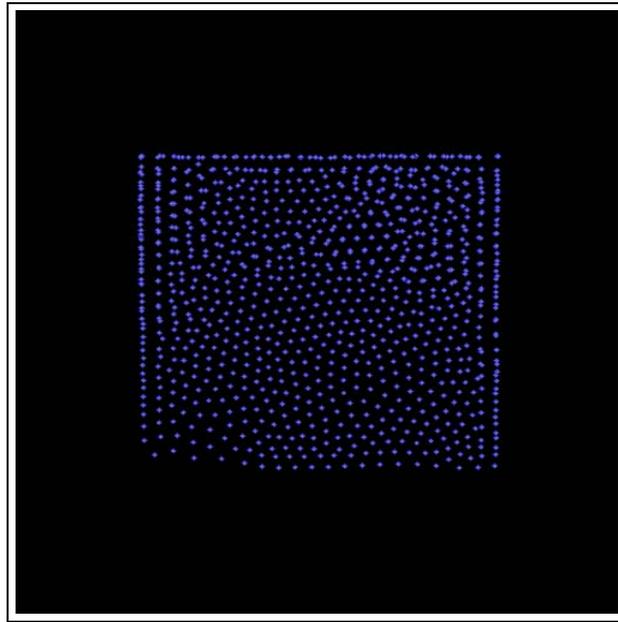


FIGURE 9.5 – Distribution d’agents représentant la surface topographique précédente.

De la même façon qu’un nombre plus important de boules d’eau permettait d’obtenir une meilleure représentation du champ des hauteurs d’eau au cours d’une pluie, il existe un seuil de nombre d’agents en-deçà duquel la représentation des variations de la surface topographique se dégrade. Si l’on diminue ce nombre, il faut augmenter le rayon de sondage η , sinon le champ de densité devient discontinu. Cette augmentation de η conduit toutefois à une moins bonne approximation, notamment en “écrasant” globalement les densités.

On peut envisager d’imposer des contraintes de densité plus complexes. Par exemple, on peut combiner une maximisation de z en-deçà d’un certain seuil, par exemple $0.9cm$, avec une minimisation de z au-delà de $1.1cm$. De ce fait, les agents sont confinés dans les régions de la surface topographique pour lesquelles z est voisin de $1cm$. La figure 9.6 montre le résultat d’une telle configuration. Il est donc possible de contraindre les agents à représenter tout ou partie d’une surface, en introduisant des contraintes supplémentaires.

Application à la représentation d’objets spatiaux.

Les modes de représentation d’objets spatiaux utilisés classiquement dans les systèmes multi-agents offrent peu de souplesse. Ils reposent la plupart du temps sur un espace discrétisé en mailles régulières dont la résolution est critique car elle entraîne nécessairement une perte d’information lorsque l’on veut intégrer des informations de nature géométrique ou définies à des échelles différentes. Ainsi généralement les objets spatialement étendus sont-ils :

1. “dissous” dans les attributs des cellules d’une grille spatiale,
2. définis par les cellules qu’ils occupent,
3. plus rarement, définis par les points de leurs contours.

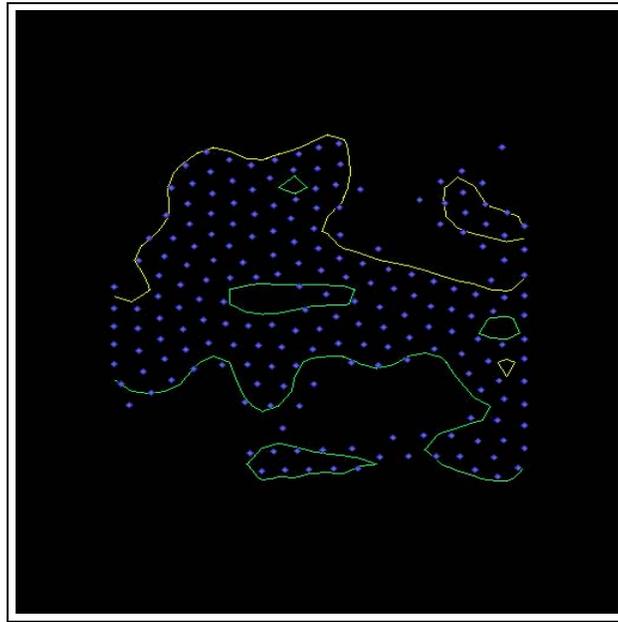


FIGURE 9.6 – La distribution d’agents reproduit les variations de la surface topographique autour des zones comprises entre 0.9cm (isocourbe verte) et 1.1cm (isocourbe jaune).

Les expériences précédentes donnent des pistes pour un mode de représentation alternatif dans lequel un objet de forme quelconque peut être donné comme un nuage pondéré de points et une fonction d’interpolation. Cette fonction permet à tout moment d’établir à partir d’une information discrète une représentation continue des caractéristiques d’un objet ou d’une population.

Il s’agit là d’un mode de représentation extrêmement souple : en effet, on dispose d’un grand nombre de degrés de libertés sur lesquels on peut agir (volumes, positions, densités, fonction de noyau). De plus, il permet de rendre compte de façon naturelle de contours flous, de co-occurrences spatiales d’objets différents, ou de changements de forme de ces objets au cours du temps (en définissant des règles de déplacement des points d’interpolation). Enfin il préserve une information riche, indépendante d’un quelconque maillage, permettant le calcul de propriétés géométriques (surfaces, courbures, etc.), qui seraient perdues dans un maillage régulier.

Appliqué dans RIVAGE, ce mode de représentation permettrait en donnant une nature particulière à la topographie de donner une plus grande liberté pour la prise en compte de phénomènes d’érosion : par exemple on pourrait modifier la *distribution* des points de topographie plutôt que leur altitude sur un maillage fixe, ainsi l’altération du sol sous l’action de l’eau ne serait plus contrainte par la résolution à laquelle la topographie est connue ; de même on pourrait envisager d’ajouter un certain nombre de couches de particules représentant différentes propriétés de structure d’un sol (croûte, porosité, etc.) se recouvrant plus ou moins.

A titre d’illustration, on présente un exemple de représentation sous forme particulière d’un objet défini par une image (logo de l’IRD). Les résultats obtenus sont présentés aux figures 9.7 (points) et 9.8 (reconstruction continue).

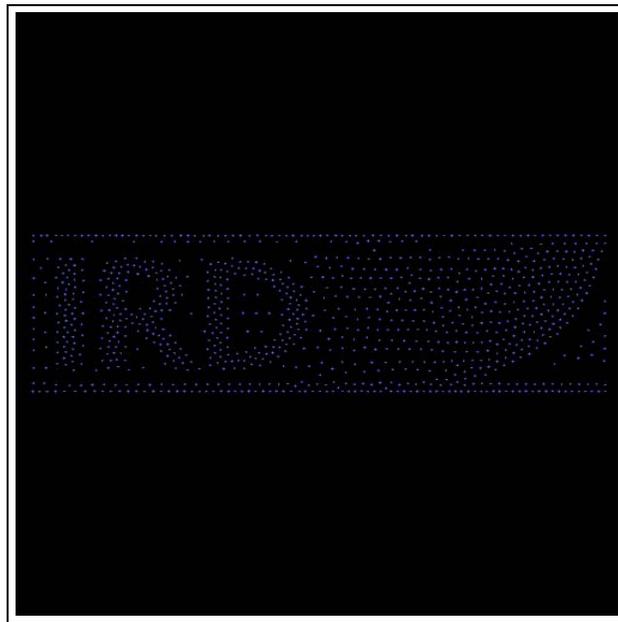


FIGURE 9.7 – Distribution d’agents figurant le logo de l’IRD.

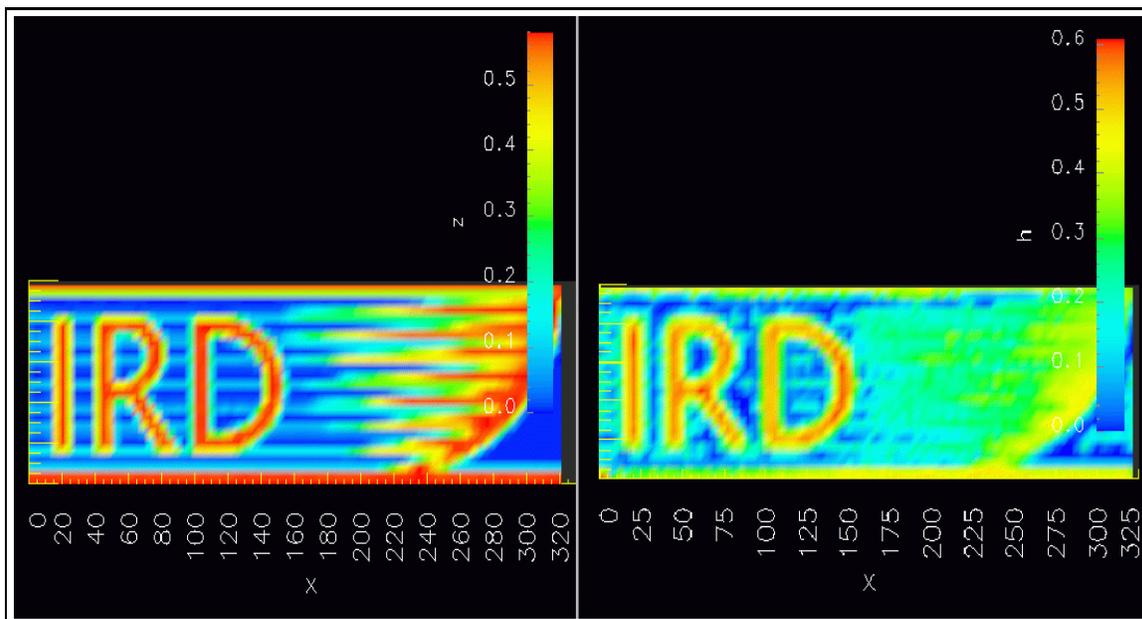


FIGURE 9.8 – Reconstruction d’un objet spatial (image du logo IRD à gauche) par un champ de densité de particules (à droite).

9.1.2 Pour une réflexion autour des modèles d'espace.

Si l'on fait la synthèse des éléments apportés sur le plan méthodologique par l'expérience de développement du projet RIVAGE, il semble que l'on ait établi une distinction entre ce que l'on pourrait définir comme *l'environnement*, par exemple le milieu naturel et les objets qui le constituent, et *l'espace* abstrait d'interaction entre agents.

Dans tout l'exposé on s'est surtout intéressé à la définition des règles d'interaction entre agents permettant de reproduire différentes situations rencontrées dans l'environnement. Cette démarche de construction entraîne inévitablement une augmentation de la complexité de l'espace d'interactions : on imagine par exemple la difficulté de gérer un grand nombre d'agents, de repérer leurs interactions, etc.

La question de la gestion de cet espace d'interaction demande la construction de structures de contrôle adaptées. J'aimerais présenter sur ce point des idées concernant la construction d'une structure d'agents médiateurs, organisés en réseau et assurant de manière distribuée la mise en interaction d'agents se trouvant dans leur zone de contrôle. C'est à ces agents que pourraient être confiées les tâches de repérage et de construction de listes de voisinages (sur le modèle de 4.1.4).

Ce système a fait l'objet d'une première implémentation indépendamment du contexte propre au projet RIVAGE. J'ai développé un algorithme de Voronoï basé sur une méthode incrémentale classique (cf. [George et Borouchaki, 1997]). La méthode étant incrémentale (et réversible), elle permet l'ajout ou le retrait de germes, et donc la gestion d'un réseau *dynamique* d'agents médiateurs représentés par les germes de Voronoï. Les agents voisins sont liés les uns aux autres, et globalement, l'ensemble des agents assure une couverture totale de l'espace. Le pavage évolue en fonction d'un nombre de requêtes adressées à chaque agent médiateur : lorsque ce nombre dépasse un certain seuil, l'agent seul n'arrive plus à faire face et se multiplie, créant de nouveaux agents médiateurs dans son voisinage et donc fragmentant sa zone. Inversement, si un agent n'est que rarement sollicité, il disparaît, les agents voisins se partageant le contrôle sur sa zone (cf. figure 9.9). Les tests que l'on a envisagés se sont pour l'instant limités au cas de requêtes aléatoires, ce qui ne permet pas de constater l'émergence d'une structure relativement stable.

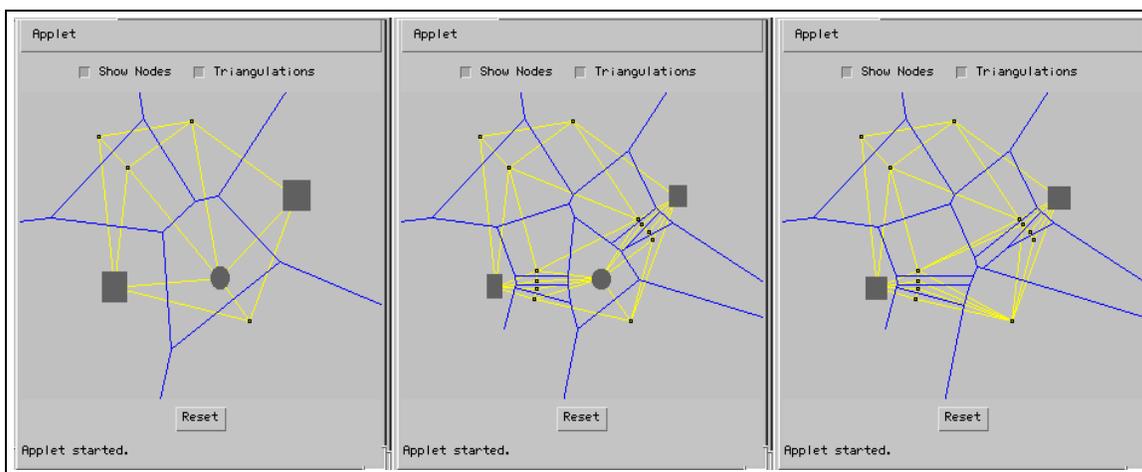


FIGURE 9.9 – Recombinaison de zones de voronoï, entre trois “agents” (carrés et rond gris).

A partir de cette base, on peut imaginer tester les idées suivantes. Si les requêtes sont faites par des objets en mouvement et que chaque agent médiateur mémorise les flux d'objets avec ses voisins, on induit naturellement une valuation des côtés des triangles liant deux agents médiateurs. Cette valuation peut jouer le rôle d'une pondération de la recombinaison des zones lors de la disparition d'un agent : ainsi, c'est l'agent qui était le plus lié à l'agent qui disparaît, qui se verrait attribuer le contrôle de la zone laissée vacante. Ainsi, on verrait émerger une pondération du réseau des agents médiateurs qui reflèterait la dynamique des phénomènes simulés : lors de l'émergence d'une ravine, le nombre d'interactions entre agents - et donc de requêtes - augmente, provoquant la multiplication des agents médiateurs dans la zone ; puis les boules empruntent un chemin privilégié, entraînant un resserrement des liens entre agents médiateurs le long du lit de la ravine en formation. La structure émergente du réseau des agents médiateurs se fait alors le reflet de la réalité simulée (voir illustration figure 9.10).

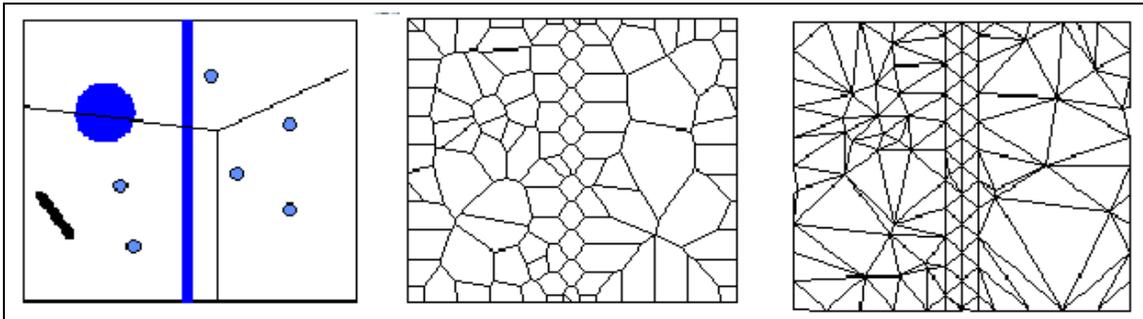


FIGURE 9.10 – Illustration des idées exposées en 9.1.2. Objets spatiaux présents dans l'espace d'interaction (à gauche). Zones de couverture des agents médiateurs (polygones de Voronoi) (centre). Réseau d'agents médiateurs correspondant (triangulation de Delaunay, à droite).

Ces idées demandent à être précisées et évaluées en regard de la complexité des structures qu'elles demandent : réaliser une triangulation contrainte ou anisotrope reste un problème difficile [George et Borouchaki, 1997].

Une telle proposition peut toutefois permettre de lancer des pistes de réflexion autour des "modèles d'espace" dans les univers multi-agents.

Un modèle d'espace est une structure générique de représentation et de contrôle de l'information spatiale associée à un univers multi-agents, qui doit permettre :

- de caractériser les rapports spatiaux d'un ensemble quelconque d'agents, et d'en suivre les évolutions.
- de rechercher les ensembles d'agents satisfaisant une propriété spatiale donnée, par exemple le fait d'être au voisinage d'un agent donné.
- de visualiser ces rapports spatiaux et leurs évolutions.

Voir les choses sous cet angle général permet de bien spécifier le champ des choix possibles :

- choix quant à la structure de la couverture spatiale mise en œuvre : depuis des partitions de l'espace formant un pavage régulier jusqu'à des recouvrements partiels constitués d'assemblages de zones d'aire et de forme quelconque.
- choix quant à la permanence temporelle du réseau des médiateurs. Depuis un réseau spatialement fixe jusqu'à un réseau variable par sa topologie et par le nombre de ses nœuds.

9.2. Modèles d'organisation d'agents.

- choix quant au contenu informationnel : nature de l'information spatiale (référentiels de localisation et de mouvements continus ou discrets, intégration ou non de l'information proprement environnementale), répartition de cette information entre agents médiateurs et agents ordinaires.
- choix quant à la répartition du contrôle entre agents médiateurs et agents ordinaires (agents médiateurs fonctionnant comme simples “balises de transmission de messages” ou jouant un rôle plus actif - synchronisation, contrôle d'intégrité).

Ce sont là des pistes d'un travail à venir.

9.2 Modèles d'organisation d'agents.

Cette section cherche à faire le point sur les concepts et idées que l'on a mis en œuvre dans ce travail de thèse par rapport à une problématique générale de conception de systèmes multi-agents.

9.2.1 Pistes pour un cadre de conception générique.

A travers les différents modèles que j'ai présentés se dessine un certain cadre pratique de conception de systèmes multi-agents :

- donner une représentation agent aux entités d'analyse sur lesquelles repose chaque modèle intervenant,
- définir les règles d'interaction entre ces différents agents en s'appuyant sur les modèles,
- si des agents appartenant à différents modèles représentent deux niveaux d'analyse d'un même phénomène ou d'un même objet, concevoir les agents de plus haut niveau comme résultant de regroupements d'agents de niveau inférieur :
 - introduire des agents de haut niveau si et seulement si ils préexistent,
 - définir des règles de regroupement (sur la base du repérage de corrélations dans l'espace d'état des agents individuels) et de réification des interactions stables d'agents de niveau inférieur en agents de niveau supérieur. Les agents appartenant aux deux niveaux sont a priori conservés.
- si les interactions stables atteignent des régimes permanents, on peut imaginer conserver uniquement les agents collectifs (cas similaire à la préexistence d'agents collectifs),
- le cas échéant, définir les rétroactions sur les comportements adoptés par les individus appartenant à une telle interaction stable.

Différents “types” d'agents sont intervenus dans les modèles que l'on a présentés :

- agents médiateurs,
- agents “ponctuels” situés,
- agents étendus spatialement, qui peuvent consister en l'encapsulation d'un ensemble d'agents ponctuels et d'une fonction générique d'interpolation,
- agents pouvant se regrouper

Certains algorithmes développés dans ce travail de thèse peuvent servir de briques de base à l'élaboration de méthodes prédéfinies données à de tels agents (repérage d'un ensemble d'agents dans un voisinage, détection de corrélations d'états, regroupements, calculs de champ

de gradient, etc.).

Les comportements des agents dépendent des interactions qu'ils entretiennent entre eux. On peut imaginer un cadre général permettant de rendre compte de telles correspondances entre situations d'interaction (schémas d'interaction) et comportements. Les schémas d'interaction peuvent prendre la forme de liste de *types* d'agents avec lesquels l'agent considéré est en interaction, par exemple dans RIVAGE :

- (topo, boules d'eau) : déplacement en fonction des gradients de hauteur d'eau et d'altitude,
- (topo) : déplacement uniquement en fonction de l'altitude ;
- () : déplacement aléatoire.

Ces types correspondent au typage de classes dans les langages objet.

En fonction de son état, chaque agent peut alors repérer une *sous-liste* de schémas d'interaction parmi la liste des agents avec lesquels il est en interaction. Un changement de comportement dû par exemple à l'appartenance à un groupe peut se traduire par un changement dans la liste des schémas d'interaction repérables par l'agent.

Le moteur de la simulation d'un point de vue abstrait devient alors :

1. mettre à jour la liste des agents en interaction pour chaque agent actif,
2. chaque agent actif repère les schémas d'interaction de sa liste,
3. et exécute l'action correspondante,
4. suivant l'historique des interactions, des regroupements se produisent qui, le cas échéant, modifient la liste des schémas repérables.

Ces idées doivent être approfondies mais donnent des points de départ intéressants pour la construction d'un prototypage de classes d'agents et d'un moteur générique de simulateur. Cette vision me semble en phase avec une certaine démarche de conception des systèmes multi-agents qui propose de concevoir un système d'agents comme l'organisation de hiérarchies de comportements dépendant les uns des autres et s'interprétant comme des schémas fonctionnels d'interaction.

9.2.2 Méthodologie et concepts.

Au terme de cet exposé on peut revenir sur la complémentarité entre la démarche de modélisation et la tâche de conception de systèmes multi-agents que l'on évoquait dans les premiers chapitres.

Le modélisateur cherche à comprendre comment et pourquoi des propriétés globales émergent de telle ou telle situation. Le concepteur s'attache à construire un système qui présente des propriétés globales intéressantes, ce faisant il se pose la question de la définition de règles de comportements individuels permettant d'obtenir de l'organisation collective toute entière un comportement adapté. La démarche de construction, comme celle de modélisation, consiste alors en un certain nombre de va-et-vient entre différents niveaux d'analyse, individuel et organisation, local ou global.

Ainsi la méthodologie Cassiopée [Collinot et Drogoul, 1998] propose une progression en cinq étapes autour de la notion de *rôle* (cf. figure 9.2.2) :

9.2. Modèles d'organisation d'agents.

- définition des rôles individuels, c'est-à-dire l'ensemble des compétences individuelles dont peuvent être dotés les agents,
- explicitation des dépendances entre les différents rôles individuels (conflit, inhibition, activation, etc.),
- définition des rôles relationnels, autrement dit les différentes manières de gérer pour les agents ces situations de dépendance (jouer le rôle de facilitateur par exemple),
- explicitation des dépendances entre les différents rôles relationnels (par exemple le lien entre un rôle d'activateur et un rôle d'inhibiteur), donc d'une certaine manière explicitation des différents modes d'organisation pouvant apparaître,
- définition des rôles organisationnels, autrement dit les différentes manières pour les agents de gérer les dissolutions et formations de groupe : initiateur d'un groupe, participant, etc.

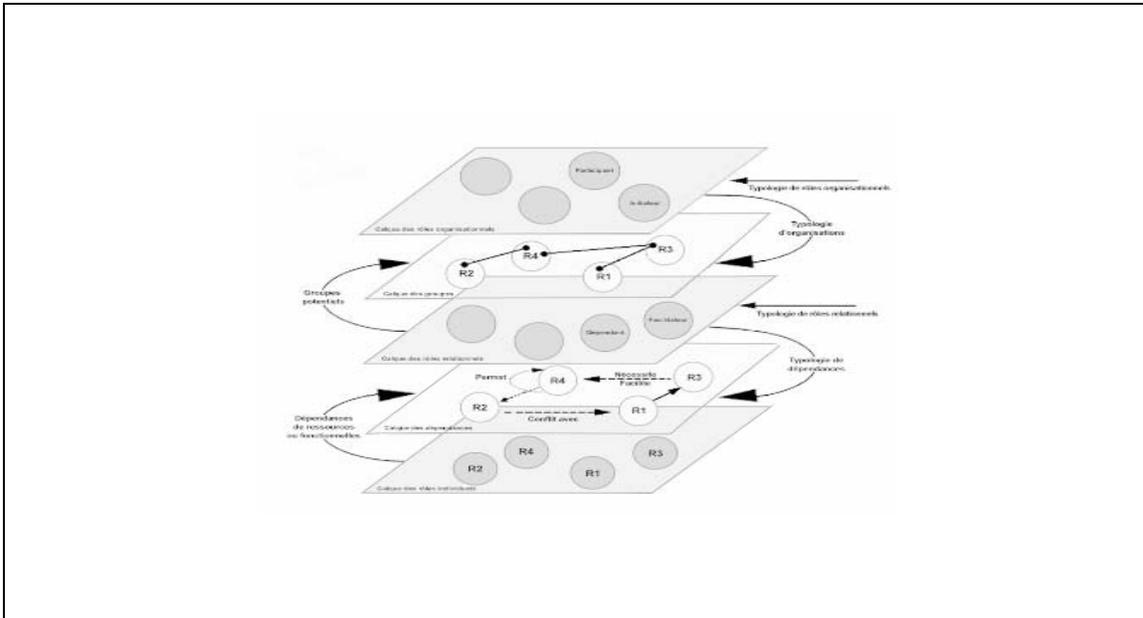


FIGURE 9.11 – Méthodologie Cassiopée.

Par rapport à une méthodologie comme Cassiopée, mon travail a mis l'accent sur l'étude de l'environnement et sa topologie dans la construction des règles d'interaction entre agents, ce qui m'a conduit à donner un éclairage original à certains concepts clés :

- le concept d'agent fournit une métaphore conceptuelle riche permettant de réunir sous un même terme les acteurs d'une dynamique, les processus de calcul la concernant, et les structures de contrôle qui en assurent le suivi. Les modèles que j'ai développés ont tour à tour fait référence à ces différents aspects du concept agent.
- la notion d'interaction a été considérée comme une relation temporaire entre différents agents lors de co-occurrences spatio-temporelles. Dans cette notion où l'on peut retrouver aussi bien l'idée de couplage que l'idée de forces de répulsion ou d'attraction, on a vu une clé permettant de schématiser des situations dans lesquelles plusieurs processus se trouvaient concurrents dans une dynamique,
- sur cette base, j'ai fondé la notion de groupe sur une certaine vision d'une interaction stable entre agents dont la structure singulière et repérable, rend son identification sous la forme d'un agent pertinente : il s'agit d'un phénomène conceptuellement proche de

notre capacité à pouvoir percevoir une unité dans une diversité d'objets.

- de façon assez naturelle, la notion d'organisation apparaît dans ce cas être l'étape suivante qui consiste à donner un sens à ce groupe formé d'agents en interaction stable et faire correspondre leur mode d'interaction particulier à une fonction propre. Cette fonction peut se traduire par un comportement donné à l'agent groupe représentant l'ensemble des agents, ou par un ensemble de règles de coordination entre agents appartenant à cet ensemble. Cette étape n'a pas été abordée dans cette thèse.

Dans ce cadre, la notion d'agent est avant tout conceptuelle et polymorphe : elle sous-tend une certaine idée d'une action persistante, d'un comportement mettant en relation perceptions et actions, mais peut tout aussi bien représenter un regard sur le monde.

En considérant un environnement à modéliser ou une fonction globale à atteindre, on recherche des correspondances entre actions et perceptions, auxquelles on prêterait une existence agent. Cette recherche est guidée par des contraintes ou des métaphores qui permettent de cerner un niveau pertinent de représentation agent, ce qui induit une certaine façon de construire des systèmes informatiques.

La notion d'agent ne semble pas bien différente d'une approche systémique, elle relève d'une démarche de modélisation, dans la manière avec laquelle elle guide le processus de construction d'un système informatique. Elle véhicule néanmoins une certaine idée d'opérabilité, c'est-à-dire que l'agent (concept) s'inscrit dans une réalité opérationnelle informatique, pour laquelle il joue un rôle de construction d'abstractions informatiques.

Dans le travail que j'ai mené, cette notion a servi avant tout de filtre pour chercher à construire des modèles informatiques qui puissent se révéler des outils d'aide dans l'étude de questions thématiques. Après avoir montré la pertinence d'une telle approche, il reste à développer un important travail sur la construction d'une architecture de systèmes multi-agents dédiée à de telles applications, sur la base du travail qui vient d'être exposé.

Chapitre 10

Conclusion.

RÉSUMÉ :

En cherchant à construire un certain cadre pratique et méthodologique pour la modélisation de dynamiques de flux à l'aide de systèmes multi-agents, la recherche que j'ai menée a montré une certaine pertinence du choix d'un espace continu et d'une description particulière de processus complexes. En trouvant des moyens pratiques de prendre en compte des situations d'interaction stables au sein d'une dynamique, j'ai pu montrer que l'on pouvait disposer d'outils de simulation permettant de mieux appréhender l'écheveau complexe des milieux naturels, physiques et sociaux.

Ce travail autour de la complexité se retrouve dans l'apparition d'une voie nouvelle, systémique, centrée sur l'étude des mécanismes d'auto-organisation et d'émergence, qui propose de concevoir les systèmes complexes comme des ensembles d'entités hétérogènes en interaction et se donne pour objectif d'explorer leurs modes d'organisation, en menant conjointement des études théoriques et des simulations informatiques.

Mon travail de thèse fournit un certain nombre de pistes de recherche qui montrent que la simulation multi-agents propose un cadre fécond pour mener une telle entreprise de recherche.

10.1 Synthèse et perspectives.

La recherche menée à l'IRD par l'unité GEODES a montré que plusieurs domaines thématiques (hydrologie, épidémiologie, dynamiques des populations) pouvaient être fédérés autour d'une question de recherche commune, l'étude de dynamiques de flux dans des milieux naturels, physiques et sociaux.

Au cours de mon travail de thèse, j'ai mené une recherche méthodologique et pratique sur la modélisation informatique de telles dynamiques, en cherchant à montrer que les concepts développés en informatique dans les systèmes multi-agents offrent un cadre original de conception de modèles pour cette question de recherche.

L'idée centrale de mon travail a consisté à décrire de telles dynamiques en termes d'agents hétérogènes interagissant dans un espace continu, l'introduction de couplages entre différents processus s'interprétant comme l'identification de règles d'interaction entre ces agents. En dotant les agents de moyens de reconnaissance de situations d'interaction remarquables, j'ai mis au point des mécanismes génériques de réification en objets actifs du simulateur, des organisations qui émergent en cours de simulation. Cette agentification de modes d'organisation donne des pistes intéressantes pour concevoir des outils d'analyse et d'interprétation de systèmes complexes. Ces idées se sont concrétisées dans une thématique particulière d'étude de dynamiques de flux : les processus de ruissellement, d'infiltration et d'érosion en hydrologie, à travers la construction du simulateur RIVAGE.

Ce travail a permis d'évaluer un certain nombre d'hypothèses concernant l'apport du choix méthodologique d'une description particulière sous la forme d'entités en mouvement dans un espace continu, pour la représentation de la dynamique de circulation de l'eau. En identifiant un certain nombre de pistes et en construisant un certain nombre de modèles, on a montré que ce choix pouvait présenter certaines qualités : possibilité de conduire des analyses de trajectoires individuelles, souplesse de gestion de conditions aux limites complexes, ouverture à la prise en compte de différentes situations de couplages entre processus, prise en compte de différents niveaux d'agrégation de ces dynamiques.

Une base méthodologique et pratique a pu être construite sur laquelle on peut envisager de développer un environnement de simulation original et ouvert pour l'étude de questions de recherche dans cette thématique. Quelques grands axes de travail à venir peuvent être identifiés :

- une démarche d'exploration d'hypothèses de fonctionnement sur l'impact des couplages entre processus d'érosion, d'infiltration et de ruissellement dans l'évolution des états de surface d'un sol et de la végétation, en développant une approche rigoureuse confrontant données expérimentales et résultats de simulation.
- un développement des outils et architectures nécessaires pour construire un simulateur permettant d'exploiter des flux de données réelles : interfaçage avec des systèmes d'information géographique, gestion de conditions aux limites de fonctionnement, notamment gestion des couplage avec d'autres simulateurs ou modèles (par exemple pour l'intégration de structures de sol et la gestion des écoulements de sub-surface), suivi d'indicateurs graphiques de dynamiques et de niveaux de structuration.
- un travail de réflexion sur la question du changement d'échelle, en particulier : les conditions d'application du modèle RIVAGE à des échelles plus grandes d'un bassin versant

par exemple, et comment tirer profit des concepts multi-agents pour prendre en compte des niveaux d'agrégation dynamiques et hétérogènes. Ces niveaux intermédiaires (par exemple le suivi de l'extension spatiale d'une mare, ou le débit d'un cours d'eau) pourront se révéler des moyens pertinents pour la validation d'hypothèses de fonctionnement : par exemple, si l'on possède des données expérimentales de suivi de tels objets hydrologiques (photos de terrain, relevés de débit).

- une campagne de développement de modèles pour l'évaluation des stratégies d'aménagement des terres : notamment, l'impact de la gestion des mises en culture, du développement de parcellaires, dans la perspective de fournir un système capable de travailler sur des questions de risque d'inondation ou de dégradation des sols par exemple.

Par ailleurs, j'ai proposé un certain nombre de pistes pour une recherche à plus long terme qui en s'appuyant sur les modèles et méthodes éprouvés dans le cadre de l'hydropédologie doit s'attacher à étudier leur transposition à d'autres thématiques. La modélisation de dynamiques de foules, la représentation spatiale et hiérarchique de flux d'information ont servi d'exemples dans ce travail. Un autre exemple d'application tout à fait intéressant est celui de la modélisation de migrations de populations en sciences sociales, pour laquelle un certain nombre de travaux de recherche [Bura et al., 1996] [Benenson, 1998] [Schweitzer, 1998] ont montré la pertinence d'une description sous la forme d'interactions entre acteurs humains et institutionnels, et de suivi des comportements raisonnés d'individus.

Enfin, ce travail montre que les systèmes multi-agents, en fédérant approches particulières et individus-centrées, constituent dans ce cadre un outil de fond tout à fait intéressant. En mettant en avant un certain nombre de concepts clés, les systèmes multi-agents proposent un cadre de conception sur lequel peut s'appuyer la construction de modèles informatiques qui deviennent des outils de recherche et de réflexion :

- la notion d'agent fournit une métaphore conceptuelle riche permettant de réunir sous un même terme les acteurs d'une dynamique, les processus de calcul la concernant, et les structures de contrôle qui en assurent le suivi.
- la notion d'interaction donne une clé permettant de schématiser des situations dans lesquelles plusieurs processus se trouvent concurrents, dans laquelle on peut retrouver aussi bien l'idée de couplage que l'idée de forces de répulsion ou d'attraction.
- la notion de groupe offre des pistes pour fonder des outils d'aide à l'interprétation et, à plus long terme, en s'appuyant sur la notion d'organisation, ouvre une voie pour la définition d'opérateurs de changement d'échelle et de contrôle de l'apprentissage de groupes d'agents.

En proposant de réifier en objets actifs du système les modes d'organisation de tels agents on envisage une construction dans laquelle des organisations sont tantôt perçues comme des ensembles d'entités microscopiques, tantôt comme des unités macroscopiques émergentes.

Cette vision trouve un écho dans un domaine aujourd'hui en plein essor de la recherche : l'étude des systèmes complexes, autour des notions d'émergence et d'auto-organisation. Ce mémoire se termine en cherchant à replacer dans ce contexte plus large la recherche qui vient d'être exposée.

10.2 Un courant de réflexion autour de la complexité.

Dans des domaines très divers, en mathématiques et en informatique, en physique et en biologie, dans les sciences sociales et en économie, un courant de réflexion nouveau, transdisciplinaire, se cristallise autour de la notion de *complexité*. De nombreuses revues se font l'écho de ce courant¹ en consacrant régulièrement des éditions spéciales sur ce thème et en offrant un espace de communication ouvert sur plusieurs champs de recherche scientifique.

Des ouvrages synthétiques, parmi lesquels [Auyang, 1999], [Delaye, 1994] ou [Nicolis et Prigogine, 1989], s'attachent à rapprocher des questions de recherche et des théories scientifiques étudiées et construites dans différentes disciplines. De semblables rapprochements s'opèrent aussi au niveau des chercheurs, avec la constitution d'équipes réunies autour de projets transdisciplinaires².

Ce courant s'enracine dans la conviction forte que certaines questions de recherche difficiles transcendent les disciplines et appellent des traitements conjoints. Une réflexion conceptuelle et méthodologique naît de ces associations. Elle cherche à construire un cadre général dans lequel pourrait se déployer ce champ nouveau des "sciences de la complexité". Une question apparaît centrale dans les difficultés rencontrées par un grand nombre de chercheurs : "concevoir, comprendre et à plus forte raison maîtriser, la synthèse d'une foule d'événements interactifs en un événement macroscopique émergent, reconnaissable, durable et *structurellement stable*" [Coquillard et Hill, 1997].

Cette question se retrouve par exemple dans l'apparition de structures auto-organisées en physique et en biologie [Prigogine et Stengers, 1979], dans les fluctuations à grande échelle de phénomènes économiques [Auyang, 1999], ou encore dans les interactions qu'entretiennent processus physiques et espèces animales dans l'évolution d'un écosystème [Shorrocks et Swingland, 1990].

La complexité générée par ces mécanismes d'auto-organisation regroupe deux sources de difficulté [Pavé, 1994] :

- appréhender la complexité structurelle qui résulte des interactions entre un grand nombre d'éléments, souvent hétérogènes. En termes topologiques, cette difficulté provient de la complexité du graphe des relations entre éléments et de la structure spatiale dans laquelle ils évoluent.
- caractériser les propriétés globales de tels systèmes qui se manifestent, dans la dynamique de ce réseau d'interactions, par des trajectoires complexes des variables d'état et des modifications de structures, topologique et spatiale.

On peut considérer que cette reconnaissance du caractère *auto-organisé* des milieux naturels, physiques ou sociaux, a permis une avancée conceptuelle importante en offrant un schéma de compréhension intéressant et original pour l'étude de dynamiques complexes [Bonabeau et

¹Journal of complex systems, Computational and mathematical organization theory, Journal of artificial societies and social simulation, International journal of agent and multi-agent systems, Environmental modeling and assessment, Advances in complex systems, etc.

²L'unité GREEN créée en 1994 au CIRAD, le LISC laboratoire d'ingénierie des systèmes complexes créé en 1995 au CEMAGREF, le LIAMA créé en 1994 en Chine, le Complex Systems Laboratory de l'Université de Californie à San Diego, ou des institutions plus anciennes telles que le MIT, le Santa Fe Institute aux États-Unis, ou la School of Geography de Leeds et la School of Computing and Cognitive Science de l'Université du Sussex en Grande-Bretagne, etc.

Theraulaz, 1994] : identifier des lois d'organisation émergentes. Dans le même temps elle pose néanmoins un formidable défi aux méthodes de modélisation : comment représenter de telles lois.

10.3 Une voie d'étude systémique fondée sur l'auto-organisation.

Les postures traditionnelles, réductionnisme et holisme, qui sous-tendent traditionnellement la démarche scientifique, ne répondent que partiellement à un tel défi [Coquillard et Hill, 1997].

Le réductionnisme propose la vision d'un système éclaté en processus identifiés à un niveau microscopique. Toutefois cette attitude a du mal à rendre compte de l'apparition de propriétés macroscopiques émergentes, générées par le jeu de tels processus décrits à une échelle inférieure. Une étude analytique de tels systèmes n'aboutit généralement que dans des cas relativement simples en regard des systèmes réels. Notamment le caractère fortement hétérogène des processus microscopiques, qui apparaît au sein d'un ensemble d'entités de même nature (comportements d'individus dans une population) oblige à prendre en compte un transfert d'échelle complexe, qui ne peut se réduire à une intégration mathématique. Une approche statistique, consistant à moyenniser les réponses d'un grand nombre d'individus, permet de prendre en compte une telle hétérogénéité. Cependant, comme les théories statistique et probabiliste reposent sur l'indépendance entre processus individuels, elles n'apportent actuellement que des solutions partielles pour rendre compte du caractère fortement organisé des comportements individuels dans les systèmes réels.

La posture complémentaire, holiste, parce qu'elle choisit de ne considérer que les phénomènes observables à une échelle donnée, fournit des résultats qui ne peuvent être que partiels en regard de la variété des échelles mises en jeu dans les processus des milieux naturels.

Une démarche alternative propose une voie de recherche nouvelle [Coquillard et Hill, 1997] [Bonabeau et Theraulaz, 1994]. Elle relève d'une approche *systémique*, et s'attaque au cœur du problème : la compréhension du processus d'auto-organisation des milieux naturels. Elle propose d'explorer les modes d'organisation des phénomènes élémentaires qui conduisent à l'émergence d'une entité macroscopique, perçue comme "pilotée", de l'intérieur à son échelle propre, et de l'extérieur par un environnement qui la "perçoit" comme un tout. Cette posture consiste à considérer de la même façon, structures et fonctionnements macroscopiques, comme issus d'une organisation de processus en interaction.

Le travail que j'ai mené au cours de cette thèse s'inscrit dans cette démarche de recherche et en adopte la posture. La construction que je propose de réification automatique d'agents présentant des interactions stables concrétise dans une réalité informatique cette double perception de phénomènes, relevant à la fois d'une entité à part entière et d'un collectif d'entités.

En menant un travail de recherche en informatique autour de la modélisation, on peut ainsi espérer donner des moyens d'étude concrets par la simulation, qui fournissent un support de réflexion et de questionnement scientifique, en vue d'aider à la définition d'outils théoriques, mathématiques et informatiques, permettant de répondre aux enjeux d'une telle entreprise. Dans ce sens, la simulation multi-agents me semble offrir un cadre fécond permettant de capitaliser idées, concepts et techniques développées dans différents domaines, et d'ouvrir ainsi de nouvelles pistes de recherche.

Références bibliographiques

- Abbot, M., Bathurst, J.-C., O'Connell, P. et Rasmussen, J. (1986). 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.
- Anderson, R. et May, R. (1991). *Infectious diseases of human. Dynamics and control*. Oxford Science Publication.
- Arkin, R. (1990). Integrating behavioral, perceptual and world knowledge in reactive navigation. *Robotics and Autonomous Systems*, 6 :105–122.
- Ashby, W. (1962). *Principles of Self-Organization*, chapitre Principles of the self-organizing system, pages 255–278. Pergamon Press.
- Atlan, H. (1972). *L'organisation biologique et la théorie de l'information*. Hermann.
- Auyang, S. (1999). *Foundations of complex systems theories : in economics, evolutionnary biology and statistical physics*. Cambridge University Press.
- Baeijs, C. et Demazeau, Y. (1996). Les organisations dans les systèmes mutli-agents. Dans Gleizes et Chevrier, éditeurs, *Actes de la 4ème journée Systèmes Multi-agents du PRC-GDR Intelligence Artificielle, Toulouse*.
- Barndorff-Nielsen, O., Jensen, J. et Kendall, W. (1993). *Networks and chaos. Statistical and probabilistic aspect*. Chapman and Hall.
- Barraquand, J. et Latombe, J.-C. (1989). Robor motion planning : A distributed representation approach. Research Report 89-1257, Department of Computer Science Stanford University.
- Barreteau, O. et Bousquet, F. (1999). Jeux de rôles et validation de systèmes multi-agents. Dans *JFIADSMA '99*.
- Batty, M. et Longley, P. (1994). *Fractal cities : a geometry of form and function*. San Diego Academic Press.
- Baxter, B. (1992). *The interpolation theory of radial basis functions*. Thèse de doctorat, Cambridge University.
- Beckers, R. (1992). *L'auto-organisation : une réponse alternative à la complexité individuelle ? Le cas de la récolte alimentaire chez Lasius Niger (L.)*. Thèse de doctorat, Université de Paris 13.
- Belytschko, T., Krongauz, Y., Organ, D., Fleming, M. et Krysl, P. (1996). Meshless methods : an overview and recent developments. *Computer methods in applied mechanics and engineering*, 139 :3–47.

- Benenson, I. (1998). Multi-agent simulations of residential dynamics in the city. *Comput. Envir. and Urban Systems*, 22 :25–42.
- Benz, W. (1990). Smoothed particles hydrodynamics : a review. Dans Buchler, éditeur, *The numerical modelling of non-linear stellar pulsation*, pages 269–288. Kluwer Academic Press.
- Bienenstock, E., Fogelman-Soulié, F. et Weisbuch, G., éditeurs (1990). *Disordered systems and biological organization*. Springer.
- Birtwistle, G., Dahl, O., Myhrhaug, B. et Nygaard, K. (1973). *SIMULA begin*. Petrocelli Charter.
- Boissonnat, J. et Yvinec, M. (1995). *Géométrie algorithmique*. Ediscience.
- Bonabeau, E. et Theraulaz, G., éditeurs (1994). *Intelligence collective*. Hermès.
- Bond, A. et Gasser, L., éditeurs (1988). *Readings in Distributed Artificial Intelligence*. Morgan Kaufman.
- Boon, J. (1992). Lattice gas automata : theory, implementation, simulation. *Journal of statistical physics*.
- Bounds, D. (1987). New optimization methods from physics and biology. *Nature*, 329 :215–219.
- Bousquet, F. (1994). Distributed artificial intelligence and object-oriented modelling of a fishery. *Mathematical and computer modelling*, 2018 :97–107.
- Bousquet, F., Cambier, C., Mullon, C., Morand, P. et Quensiere, J. (1992). Simulating fishermen society. Dans N.Gilbert et J.Doran, éditeurs, *Simulating Societies : the computer simulation of social phenomena*. UCL Press.
- Brachman, R. (1977). What's in a concept : structural foundations for semantic networks. *International journal of man-machine studies*, 9 :125–152.
- Bradford, J. et Foster, G. (1996). Interrill soil erosion and slope steepness factors. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60 :909–915.
- Bura, S., Guerin-Pace, F., Mathian, H., Pumain, D. et Sanders, L. (1996). Multi-agent systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical analysis*, 28 :161–178.
- Cambier, C. (1994). *SIMDELTA. Un système multi-agents pour simuler la pêche sur le Delta Central du Niger*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.
- Cambier, C., Bousquet, F. et Dansoko, D. (1992). Un univers multi-agent pour la modélisation du système de la pêche du delta central du niger. Dans *CARI Yaoundé 1992*.
- Cambier, C., Perrier, E., Treuil, J.-P. et Preux, P. (1997). Action physique et espace géométrique, contribution à une réflexion sur l'utilisation des modèles multi-agents pour la simulation de processus physiques, application rivage. Dans *5èmes journées JFIAD-SMA '97*.
- Castelfranchi, C. (1998). Modeling social action for ai agents. *Artificial Intelligence*, 103 :157–182.
- Caswell, H. et Cohen, J. (1991). Communities in patchy environments : a model of disturbance, competition and heterogeneity. Dans Kolasa et al, éditeurs, *Ecological heterogeneity*, pages 97–122. Springer.
- Chaib-Draa, B. (1992). Distributed intelligence : an annotated bibliography. *SIGART Bulletin*, 3(3).

- Chalvet-Montfray, K., Artzouni, M. et al, J. G. (1998). A two-patch model of gambian sleeping sickness : application to vector control strategy in a village and plantations. *Acta Biotheoretica*, 46 :207–222.
- Clarke, Hoppen, Gaydos, White, R., Engelen, G. et Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high resolution modeling of urban land-use patterns. *Environment and planning serie B*, pages 323–343.
- Collinot, A. et Drogoul, A. (1998). La méthode de conception multi-agent cassiopee : application à la robotique collective. *Revue d'Intelligence Artificielle*, 12(1) :125–147.
- Colonna, A., di Stephano, V., Lombardo, S., Papini, L. et Rabino, G. (1998). Learning cellular automata : modelling urban modelling. Dans *3rd Int. Conf. on GeoComputation*, volume 1, pages 17–19.
- Coquillard, P. et Hill, D. (1997). *Modélisation et simulation d'écosystèmes*. Masson.
- Crave, A. (1995). *Quantification de l'organisation des réseaux hydrographiques*. Thèse de doctorat, Université de Géosciences de Rennes.
- Crave, A. et Gascuel-Odoux, C. (1997). The influence of the topography on time and space distribution of soil surface water content. *Hydrological Processes*, 11 :203–210.
- Czaran, T. (1998). *Spatio-temporal models of population and community dynamics. Population and community biology series 21*. Chapman and Hall.
- Dahl, O. et Nygaard, K. (1966). Simula an algol-based simulation language. *Communications of the ACM*, 9(9) :671–678.
- Darboux, F. (1999). *Modélisations numérique et expérimentale du ruissellement. Effet de la rugosité sur les distances de transfert*. Thèse de doctorat, Université de Rennes 1.
- DeAngelis, D. et Gross, L., éditeurs (1992). *Individual based models and approaches in ecology*. Chapman and Hall.
- Delayhe, J.-P. (1994). *Information, complexité et hasard*. Hermès.
- Demazeau, Y., éditeur (1998). *Proceedings of the 3rd International Conference on Multi-Agent Systems*. IEEE Press.
- Demazeau, Y. et Müller, J.-P., éditeurs (1989). *Decentralized AI*. North-Holland.
- Drogoul, A. (1993). *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 doctorat, Université de Paris 6.
- Drogoul, A. (2000). *Systèmes multi-agents*. Dossier d'habilitation à diriger des recherches.
- Drogoul, A., Corbara, B. et Fresneau, D. (1993). Manta : New experimental results on the emergence of (artificial) ant societies. Dans C.Castefranchi, éditeur, *Simulating Societies Symposium*.
- Drogoul, A. et Picault, S. (1999). Microbes : vers des collectivités de robots socialement situés. Dans Gleizes et Marcenac, éditeurs, *Actes des JFIADSMA '99*, pages 265–278. Hermès.
- Dumouchel, P. et Dupuy, J.-P. (1983). *Colloque de Cerisy : l'Auto-organisation, de la Physique au Politique*. Seuil.
- Durrett, R. et Levin, S. (1994). The importance of being discrete (and spatial). *Theor. Popul. Biol.*, 46 :363–394.

- el Fallah-Seghrouchni, A. (2000). Coordination d'agent : modèles, algorithmes et protocoles. Dossier d'habilitation à diriger des recherches.
- Epstein, J. et Axtell, R. (1996). *Growing artificial societies*. Brookings.
- Erceau, J. et Ferber, J. (1991). L'intelligence artificielle distribuée. *La recherche*, 233 :750–758.
- Estèves, M., Faucher, X., Galle, S. et Vauclin, M. (2000). Overland flow and infiltration modelling for small plots during unsteady rain : numerical results versus observed values. *Journal of hydrology*, 228 :265–282.
- Favis-Mortlock, D., Boardman, J., Parsons, T. et Lascelles, B. (1998). Emergence and erosion : a model for rill initiation and development. Dans Abraham, R., éditeur, *Proc. of the 3rd Int. Conf. on GeoComputation, Bristol*.
- Ferber, J. (1995). *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. InterEditions.
- Ferrand, N., éditeur (1998). *Colloque SMAGET*. Cemagref.
- Fianyo, E., Perrier, E., Treuil, J.-P. et Demazeau, Y. (1998). Multi-agent architecture integrating heterogeneous models of dynamical processes : the representation of time. Dans Sichman, C. et Gilbert, éditeurs, *LNAI Series Multi-agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1434. Springer-Verlag.
- Fogelman-Soulié, F. (1985). Contribution à une théorie du calcul sur les réseaux. Thèse d'Etat.
- Foisel, R. (1998a). Construire des systèmes multi-agents à partir de schémas d'interaction. Dans *Actes des 6èmes Journées Francophones IAD et SMA, Pont-à-Mousson*. Hermès.
- Foisel, R. (1998b). *Modèle de réorganisation de systèmes multi-agents : une approche descriptive et opérationnelle*. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré de Nancy 1.
- Fox, D. et Bryan, R. (1999). The relationship of soil loss by interrill erosion to slope gradient. *Catena*, 38 :211–222.
- Fox, D., Bryan, R. et Price, A. (1997). The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma*, 80 :181–194.
- Frisch, U., Hasslacher, B. et Pomeau, Y. (1986). Lattice gas automata for the navier-stokes equation. *Physical reviews and letters*, 56 :1505–1508.
- Garcia-Sanchez, L., Pietro, L. D. et Germann, P. (1996). Lattice-gas approach to surface runoff after rain. *Eur. J. Soil Science*, 47-4 :453–462.
- Gasser, L. et Huhns, M., éditeurs (1989). *Distributed Artificial Intelligence*, volume 2. Pitman Publishing-Morgan Kaufman.
- GEODES (1999). Geodes : Géométrie des espaces organisés, dynamiques environnementales et simulations. Rapport interne IRD.
- George, P. et Borouchaki, H. (1997). *Triangulation de Delaunay et maillage*. Hermes.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison-Wesley.
- Greening, D. (1990). Parallel simulated annealing techniques. *Physica D*, 42 :293–306.
- Grimm, V. (1999). Ten years of individual-based modelling in ecology : what have we learned and what could be learned in the future. *Ecological modelling*, 115 :129–148.
- Guessoum, Z. (1996). *Un environnement opérationnel de conception et de réalisation de systèmes multi-agents*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.

- Helbing, D. (1992). A fluid-dynamic model for the behaviour of pedestrians. *Complex Systems*, 6 :391–415.
- Helbing, D. et Molnár, P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev. E*, 51/5 :4282–4286.
- Helbing, D., Schweitzer, F., Keltsch, J. et Molnár, P. (1997). Active walker model for the formation of human and animal trail systems. *Phys. Rev. E*, 56 :2527–2539.
- Henderson, L. (1974). On the fluid mechanics of human crowd motion. *Transportation research*, 8 :509–515.
- Hockney, R. et Eastwood, J. (1988). *Computer simulation using particles*. Institute of Physics Publishing.
- Holland, J. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control and artificial intelligence*. University of Michigan Press.
- Holland, J. (1986). Escaping brittleness : the possibilities of general purpose learning algorithms applied to parallel rule-based systems. Dans Michalsky, C. et Mitchell, éditeurs, *Machine learning II*, pages 593–623. Kaufman.
- Hopfield, J. (1982). Neural networks and physical systems with emergent collective computational abilities. *Proc. Nat. Acad. Sc. USA*, 79 :2554–2558.
- Huberman, B. (1988). *The ecology of computation*. Elsevier Science Publisher.
- Huhns, M., éditeur (1987). *Distributed Artificial Intelligence*. Pitman Publishing-Morgan Kaufman.
- Huston, M., DeAngelis, D. et Post, W. (1988). New computer models unify ecological theory. *Bioscience*, 38 :682–691.
- Hutzler, G. (2000). *Du jardin des hasards aux jardins de données, une approche artistique et multi-agent des interfaces homme/systèmes complexes*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.
- Jennings, N. (1993). Specification and implementation of a belief desire joint-intention architecture for collaborative solving problems. *Journal of intelligent and cooperative information systems*, 2(3) :289–318.
- Jolivet, M., éditeur (1992). *Sciences de la nature, Sciences de la société, les passeurs de frontières*. Editions CNRS.
- Kampen, N. V. (1992). *Stochastic processes in physics and chemistry*. North-Holland.
- Kiss, G. (1996). *Foundations of distributed artificial Intelligence*, chapitre Agents dynamics. John Wiley Sons G.M.P.Hoare and N.R.Jennings.
- Koza, J. (1991). Genetic evolution and co-evolution of computer programs. Dans Langton, Taylor, F. et Rasmussen, éditeurs, *Artificial Life II*, pages 603–630.
- Lane, S. (1998). Hydraulic modelling in hydrology and geomorphology : a review of high resolution approaches. *Hydrological Processes*, 12 :1131–1150.
- Langlois, A. et Phipps, M. (1997). *Automates cellulaires, applications à la simulation urbaine*. Hermès.
- Langton, C. (1990). Computation at the edge of chaos : phase transition and emergent computation. *Physica D*, 42 :12–37.

- LeMaître, C. et el Fallah-Seghrouchni, A. (2000). A comprehensive theory of meaning for communication acts in multi-agent systems. Dans *Proceedings of ICMA'S'2000 Boston*. AAAI Press.
- Léonard, J., Estèves, M., Perrier, E. et de Marsily, G. (1999). A spatialized oiverland flow approach for the modelling of large marcopores influence on water infiltration. Dans J.Feyen et K.Wiyo, éditeurs, *Modelling of transport processes in soils*, volume 1434. Wageningen.
- Léonard, J. et Rajot, J. (1997). Restoration of infiltration properties of crusted soils by mulching. Dans Renard, Neef, Becker et van Oppen, éditeurs, *Soil fertillty management in West African land use systems*, pages 191–195. Margraf Verlag.
- LePage, C. et Cury, P. (1996). How spatial heterogeneity influences population dynamics : Simulation in sealab. *Adaptive Behavior*, 4(3/4) :249–274.
- Lhuillier, M. (1998). *Une approche à base de composants logiciels pour la conception d'agents : principes et mise en œuvre à travers la plate-forme Maleva*. Thèse de doctorat, Université de Paris 6.
- Lippman, R. (1987). An introduction to computing with neural nets. *IEEE ASSP Magazine*, pages 4–22.
- Lomnicki, A. (1999). Individual based models and the individual based approach in ecology. *Ecological modelling*, 115 :191–198.
- Lorenz, K. (1984). *Les fondements de l'Ethologie*. Flammarion.
- MacArthur, R. et Wilson, E. (1967). *The theory of island biogeography*. Princeton University Press.
- MacCormack, R. (1971). Numerical solution of the interaction of a shock wave with a laminar boundary layer. *Lecture notes in Physics*, 8 :151–163.
- MacGill, J. et Openshaw, S. (1998). The use offlocks to drive a goeographic analysis machine. Dans *GeoComputation'98*.
- Marcenac, P., Calderoni, S., Courdier, R. et Leman, S. (1997). Construction expérimentale d'un modèle multi-agents. Dans *5èmes journées JFIADSMA '97*.
- Masini, G., Napoli, A., Colner, D., Léonard, D. et Tombre, K. (1989). *Les langages à objets*. InterEditions.
- Meyer, B. (1989). *Conception et programmation par objets, pour du logiciel de qualité*. InterEditions.
- Meyer, J., Roitblat, H. et Wilson, S., éditeurs (1993). *Simulation of adaptive behavior : from animals to animats II*. MIT Press.
- Minsky, M. (1965). Matter, minds and models. Dans *International Federation of Information Processing Congress*, volume 1, pages 45–49.
- Minsky, M. (1990). A framework for representing knowledge. Dans *The psychology of computer vision*, pages 211–281. Mc Graw-Hill.
- Monaghan, J. (1992). Smoothed particle hydrodynamics. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 30 :543–574.
- Morris, J. (1996). *Analysis of Smoothed Particle Hydrodynamics with Applications*. Thèse de doctorat, Monash University Department of Mathematics.

- Murray, A. et Paola, C. (1994). A cellular model of braided rivers. *Letters to Nature*, 371 :54–57.
- Murray, J. (1993). *Mathematical biology*. Springer-Verlag.
- Murray, J., Stanley, E. et Brown, D. (1986). On the spatial spread of ravies among foxes. *Proc. R. Soc. London*, 229 :111–151.
- Naur, P. (1963). Revised report on the algorithmic language algol. *Communications of the ACM*, 6(1) :1–17.
- Neuman, S. (1976). Wetting front pressure head in the infiltration model of green and ampt. *Water Resources Research*, 12 :564–566.
- Neumann, J. V. (1966). *Theory of self-reproducing automata*. University of Illinois Press.
- Nicolis, G. et Prigogine, I. (1989). *Exploring complexity*. W.H. Freeman and Co.
- Nygaard, K. (1986). Basic concepts in object oriented programming. *ACM SIGPLAN Notices*, 23 :92–104.
- Pavé, A. (1994). *Modélisation en biologie et en écologie*. Ed.Aleas.
- Paz-Betancourt, B. (1997). *Un modèle multi-agents pour simuler les accords de réciprocité dans les andes boliviennes*. Thèse de doctorat, Université de Lyon 1.
- Perrier, E. (1992). 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.
- Perrier, E. et Cambier, C. (1996). Une approche multi-agents pour simuler les interactions entre acteurs hétérogènes de l'infiltration et du ruissellement d'eau sur une surface de sol. Dans *Journées du programme Environnement, Vie et Sociétés, Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Cité des Sciences et de l'Industrie*.
- Perrier, E., Rieu, M., Sposito, G. et de Marsily, G. (1995). Models of the water retention curve for soils with fractal pore-size distribution. *Water Resources Research*, 32 :10 :3025–3031.
- Pichon, G., Mullon, C. et Remy, D. (1991). Simulation du cycle des filaires. Dans *L'utilisation de l'informatique dans l'enseignement de la biologie et de la géologie, ENS/CNRP*.
- Planchon, O., Estèves, M. et Silvera, N. (1999a). Micro-relief induced by tillage : Measurement, modelling, and consequences on overland flow and erosion. soumis à *Catena*.
- Planchon, O., Estèves, M., Silvera, N. et Lapetite, J.-M. (1999b). Raindrop erosion of a tillage induced microrelief. soumis à *Soil and Tillage Research*.
- Planchon, O., Fritsch, E. et Valentin, C. (1987). Rill development in a wet savannah. *Catena*.
- Prigogine, I. et Stengers, I. (1979). *La nouvelle alliance*. Gallimard.
- Rao, A. et Georgeff, M. (1991). Modeling rational agents within a bdi-architecture. Dans Fikes et Sandewall, éditeurs, *Proceedings of Knowledge Representation and Reasoning*, pages 473–484. Morgan Kaufmann.
- Renault, V. et Hutzler, G. (2000). Data gardens : agent societies for visualization of complex systems. Dans *IC-AI'2000*.
- Reynolds, C. (1987). Flocks, herds and schools : a distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21(4) :25–34.
- Rosenblatt, F. (1962). *Principles of neurodynamics*. New York Spartan.

- Schweitzer, F. (1997). Active brownian particles : Artificial agents in physics. *Lecture Notes in Physics : Stochastic Dynamics*, 484 :358–371.
- Schweitzer, F. (1998). Modelling migration and economic agglomeration with active brownian particles. *Advances in Complex Systems*, 1 :11–37.
- Servat, D. (2000). Distribution du contrôle de l'action et de l'espace dans les simulations multi-agents de processus physiques. Dans *Actes des JFIADSMA '2000*. A paraître.
- Servat, D., Perrier, E., Treuil, J.-P. et Drogoul, A. (1998). When agents emerge from agents : Introducing multi-scale viewpoints in multi-agent simulations. Dans Sichman, C. et Gilbert, éditeurs, *LNAI Series Multi-agent Systems and Agent-Based Simulation*, volume 1434. Springer-Verlag.
- Shin, Y. et Cury, P. (1999). Les zones refuges permettent-elles d'accroître la viabilité des pêcheries. simulations sur le modèle multi-spécifique osmose. Dans *Les espaces de l'halieutique, 4ème forum halieumétrique, Rennes*.
- Shorrocks, B. et Swingland, I., éditeurs (1990). *Living in a patchy environment*. Oxford Science Publication.
- Sichman, Conte, R. et Gilbert, N., éditeurs (1998). *Multi-agent systems and agent-based simulation*, volume 1534. LNAI Series Springer-Verlag.
- Skellam, J. (1973). The formulation and interpretation of mathematical models of diffusionary processes in population biology. Dans Barlett et Hiorns, éditeurs, *The mathematical theory of the dynamics of biological populations*. Academic Press.
- Slothower, R., Schwarz, P. et Johnston, K. (1998). Some guidelines for implementing spatially explicit individual-based ecological models within location-based raster. [http :// www.ncgia.ucsb.edu/ conf/ SANTA_FE_CD_ROM/ sf_papers/ slothower_roger/ sf23.html](http://www.ncgia.ucsb.edu/conf/SANTA_FE_CD_ROM/sf_papers/slothower_roger/sf23.html).
- Smith, R. et Davis, R. (1980). The contract net protocol : high-level communication and control in a distributed problem-solver. *IEEE Transactions on computers*, C29(12).
- Solignac, C. (1996). Projet rivage (ruissellement et infiltration vu par des agents). Rapport de DEA IARFA.
- Stroustrup, B. (1986). *The C++ programming language*. Addison-Wesley.
- SwarmTeam (1994). *An Overview of the Swarm Simulation Systems*. Santa Fe Institute.
- Sycara, K. (1998). Multiagent systems. *AI Magazine*, pages 79–92.
- Teles, V., Perrier, E. et de Marsily, G. (1998). Sur une nouvelle approche de modélisation de la mise en place des sédiments dans une plaine alluviale pour en représenter l'hétérogénéité. *Comptes rendus de l'académie des sciences, CRAS 327* :597–606.
- Theraulaz, G. (1991). *Morphogénèse et auto-organisation des comportements dans les colonies de guêpes polistes dominilus (Christ)*. Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille 1.
- Thiéry, J., d'Herbès, J. et Valentin, C. (1995). A model simulating the genesis of abnded vegetation patterns in niger. *Journal of hydrology*, 83 :497–507.
- Treuil, J.-P. (1998). Space models and agent-based universe architectures. Dans *IEA-AIE'98*.
- Treuil, J.-P., Perrier, E. et Cambier, C. (1997). Directions pour une approche multi-agents de la simulation de processus physiques. Dans *5èmes journées JFIADSMA '97*.

- Valentin, C. (1981). *Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région sub-désertique. Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en eau*. Thèse de doctorat, Université de Paris 7.
- Valentin, C., d'Herbès, J. et Poesen, J. (1999). Soil and water components of banded vegetation patterns. *Catena*, 37 :1–24.
- von Foester, H. (1960). *Self-Organizing Systems*, chapitre On self-organizing systems and their environment, pages 31–50. Pergamon Press.
- Vreugdenhil, C. (1994). *Numerical methods for shallow water flow*. Kluwer Academic Publisher.
- Werner, E. et Demazeau, Y., éditeurs (1992). *Decentralized AI*, volume 3. North-Holland.
- Wilson, S. (1991). Knowledge growth in an artificial animal. Dans Press, C.-M. U., éditeur, *First international conference on genetic algorithms and their applications*, pages 16–23.
- Wirth, N. (1971). The programming language pascal. *Acta Informatica*, 1(1) :25–68.
- Wolfram, S. (1986). *Theory and application of cellular automata*. World Scientific Publishing.
- Zhang, W. et Cundy, T. (1989). Modelling of two-dimensional overland flow. *Water Resources Research*, 25(9) :2019–2035.
- Zhu, Y. et al (1997). Smoothed particle hydrodynamic model for flow through porous media. *Computer methods and advances in geomechanics*, pages 1041–1046.

Annexe A

Environnement de programmation.

J'ai regroupé dans cette annexe un certain nombre de points concernant l'implémentation du simulateur RIVAGE. On trouvera :

1. un historique des choix en matière de langages et environnements de programmation lors de la construction du simulateur,
2. une présentation de l'environnement OpenDX, utilisé actuellement,
3. quelques points sur l'utilisation de modules spécifiques à cet environnement,
4. une analyse critique de ces choix dans la perspective d'un travail futur.

A.1 Historique du simulateur RIVAGE.

Le simulateur RIVAGE a fait l'objet de nombreuses implémentations tout au long de mon travail de thèse. En vue de construire les bases d'un environnement de simulation ouvert pour l'étude de questions de modélisation en hydrologie, mes choix ont été guidés par :

- l'envie de développer un simulateur à partir d'environnements de programmation non propriétaires, gratuits et relativement bien répandus,
- la nécessité d'outils puissants pour la visualisation des résultats en cours de simulation, notamment pour un rendu 3D,
- l'envie de développer un outil multi-plateforme, interfaçable à terme avec d'autres applications, notamment SIG,
- la nécessité d'obtenir des temps de calcul raisonnables pour les simulations, et ce d'autant plus que la démarche exploratoire que j'ai menée ne permettait pas de longue phase d'optimisation du code.

Je me suis tout d'abord intéressé aux plate-formes développées pour les systèmes multi-agents. Elles permettent de faciliter la construction d'architectures de classes d'agents et offrent des moyens de visualiser les attributs des agents instanciés dans le système. Toutefois elles offrent pour l'instant peu de souplesse quant à la visualisation de résultats de simulation. En effet elles reposent la plupart du temps (comme Swarm [SwarmTeam, 1994] ou Cormas) sur une représentation de l'espace héritée des automates cellulaires qui impose une vision d'un espace comme un ensemble de cases et ne se prêtent donc pas facilement à la visualisation de trajectoires dans un espace continu, de surfaces topographiques en 3 dimensions, etc.

Vu les nombreuses questions soulevées dans RIVAGE par l'hétérogénéité des milieux physiques et leurs représentations spatiales, et les choix méthodologiques qui ont été adoptés (espace continu, description particulière des processus de flux), une grande souplesse était nécessaire pour la représentation graphique des résultats. On aurait pu envisager de découpler modèles agents et interface de visualisation. Cependant l'interfaçage des plate-formes SMA avec des outils externes de visualisation demande beaucoup de temps, du fait de leur non-standardisation. De plus, la démarche que j'ai menée qui a consisté à faire de nombreuses explorations demandait une visualisation directe des résultats pour pouvoir guider la construction de modèles.

Aussi j'ai décidé de développer un simulateur complet offrant ses propres méthodes de visualisation. Le choix initial s'est porté sur le langage Java. C'est un langage orienté objet très complet, offrant de nombreuses bibliothèques de classes de haut niveau, de surcroît permettant un interfaçage aisé avec d'autres applications (via des objets CORBA par exemple). Au début de la thèse, l'API Java 3D¹ venait d'être mise au point par Sun, ouvrant de larges perspectives pour la visualisation des résultats de simulation.

Toutefois l'API Java 3D s'est avérée assez difficile d'accès. Elle n'offre que des briques de très bas niveau pour la visualisation et oblige à considérer une hiérarchie de scènes, héritée des principes de conception en synthèse d'images, ce qui demande un temps d'apprentissage très important, et finalement se révèle trop contraignant pour un utilisateur voulant "simplement" obtenir une surface en 3D manipulable à la souris.

J'ai alors entrepris une recherche sur les nombreuses bibliothèques développées en marge des distributions officielles, afin de trouver des classes de plus haut niveau utilisant les briques de bases de l'API 3D. J'ai trouvé le package VisAD que l'on peut se procurer gratuitement sur le site : <http://www.ssec.wisc.edu/billh/visad.html>. Cette librairie est très bien réalisée et documentée, et permet de mettre facilement au point des interfaces de visualisation sophistiquées. Elle m'a permis d'implémenter une première version de RIVAGE dont la figure A.1 donne une illustration.

Cependant, le développement de cette version s'est heurté à d'importants problèmes de temps de calcul, en raison des problèmes de gestion mémoire de la machine virtuelle Java, notamment pour le calcul des mouvements des boules d'eau. J'ai réalisé alors une implémentation en langage C du noyau du simulateur, interfacé avec les classes Java du package VisAD pour l'interface graphique, mais cette solution souffre elle-aussi des problèmes de mémoire concernant la visualisation : assez rapidement une séquence d'images représentant le mouvement de centaines de points dans l'espace sature la machine (dotée de 256 Mo tout de même).

Ces problèmes ont longtemps peinalisé mon travail, car ils m'empêchaient de réaliser des simulations portant sur de grands nombres de boules d'eau et pour des temps de simulation important. Au début 2000, Jean-François Delerue, étudiant en thèse au LIA, travaillant à partir d'images 3D d'échantillons de sol à l'extraction de réseaux de pores, et donc familier de problèmes de traitement d'images, s'est intéressé à un environnement de visualisation et de traitement de données développé initialement par IBM et récemment passé à l'époque dans le domaine public : OpenDX.

¹disponible ainsi que les classes Java de base sur le site de sun <http://java.sun.com/>.

A.1. Historique du simulateur RIVAGE.

Cet environnement permet de fournir au programmeur un ensemble d'outils très puissants pour la visualisation de données, ainsi que la possibilité de concevoir des programmes sous la forme de modules que l'on peut rendre directement accessibles dans l'environnement. J'ai pu me familiariser assez rapidement avec cet environnement, à l'aide de Delerue qui avait déjà travaillé sur ce type d'environnement (notamment la plate-forme Khoros).

En remarquant qu'un certain nombre de modules proposés par OpenDX me permettaient de réaliser certains traitements (par exemple l'interpolation à partir d'un fichier de points de topographie), j'ai choisi d'utiliser cet environnement pour l'ensemble de la programmation, même si cela m'a contraint à ne pas pouvoir développer une architecture générique de classes d'agents comme je l'avais entrepris avec Java.

A court terme, cette solution s'est révélée profitable, dans une perspective à plus long terme ce choix doit être discuté. C'est l'objet de la dernière partie de cette présentation.

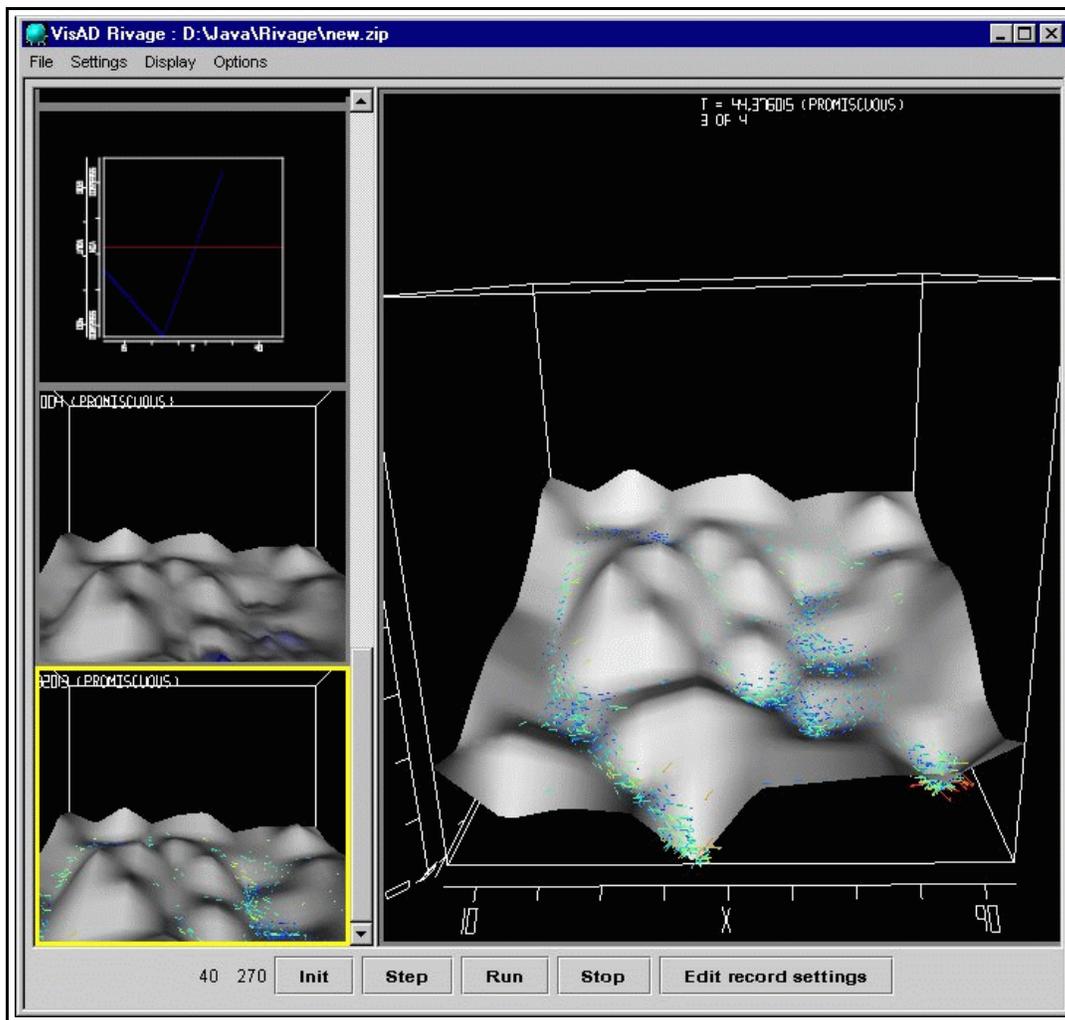


FIGURE A.1 – Copie d'écran de la version Java de RIVAGE utilisant le package VisAD.

A.2 Présentation de OpenDX.

OpenDX² est un environnement multi-plateforme. Initialement développé pour Unix (et Linux), une version existe aussi pour Windows, moyennant l'installation d'un serveur X (tel que Exceed). Il peut être utilisé à différents niveaux suivant les objectifs et compétences de l'utilisateur.

Dans son utilisation la plus simple, c'est un outil de visualisation et de traitement de données, qui propose un ensemble important de modules qu'un utilisateur peut connecter les uns aux autres pour réaliser différents types de représentations graphiques et d'opérations sur des données. Ainsi, des modules comme IsoSurface, StreamLine ou Autocolor permettent respectivement de créer des surfaces de valeur constante, suivre des trajectoires de particules dans un champ de vitesse et colorier des objets en fonction de la valeur des données.

Par ailleurs, il existe des outils pour réaliser des opérations de traitements génériques. Le module Map par exemple est un module général qui permet d'interpoler un champ de données sur n'importe quel objet - trajectoires, isosurface, ou tout simplement sur un autre ensemble de points d'échantillonnage. Le module Compute permet de réaliser des opérations arithmétiques et trigonométriques sur des données ou sur des grilles. Ainsi construire une grille de points torique nécessite seulement d'entrer une expression en paramètre. Par ailleurs il existe un grand nombre d'outils permettant de réaliser des animations fluides et leur exportation sous des formats variés.

Cette interopérabilité entre modules et la puissance qui en résulte est rendue possible par le modèle de données sous-jacent permettant de rendre compte d'une grande variété de types de données : échantillonnage régulier de points, irrégulier, avec ou sans maillage, données dépendant des positions ou constantes sur des "pavés" de l'espace, quelle que soit leur dimensionnalité.

A.2.1 Exemple.

Cet exemple est tiré du tutoriel fourni avec OpenDX (cf. figure A.2).

Dans un premier temps, des données sont importées via le module Import. Il s'agit ici du champ de densité en électron d'une molécule d'eau. Le module Sequencer produit une série d'entiers de 0 à 15. Le module Compute convertit cette série d'entiers en une série d'isovaleurs, utilisées par le module IsoSurface.

Par ailleurs le module Gradient calcule le gradient du champ densité et le résultat est "mappé" sur la sortie de IsoSurface. Le module ColorMap est utilisé pour colorer l'isosurface en fonction de la norme du gradient en chaque point de la surface.

L'interface du module Sequencer permet de passer d'une isosurface à une autre, ou de produire une animation. Le résultat est rendu en 3D par le module Image (cf. figure A.3).

²On peut se procurer gratuitement tout l'environnement ainsi qu'une documentation complète sur le site <http://www.opendx.org/>.

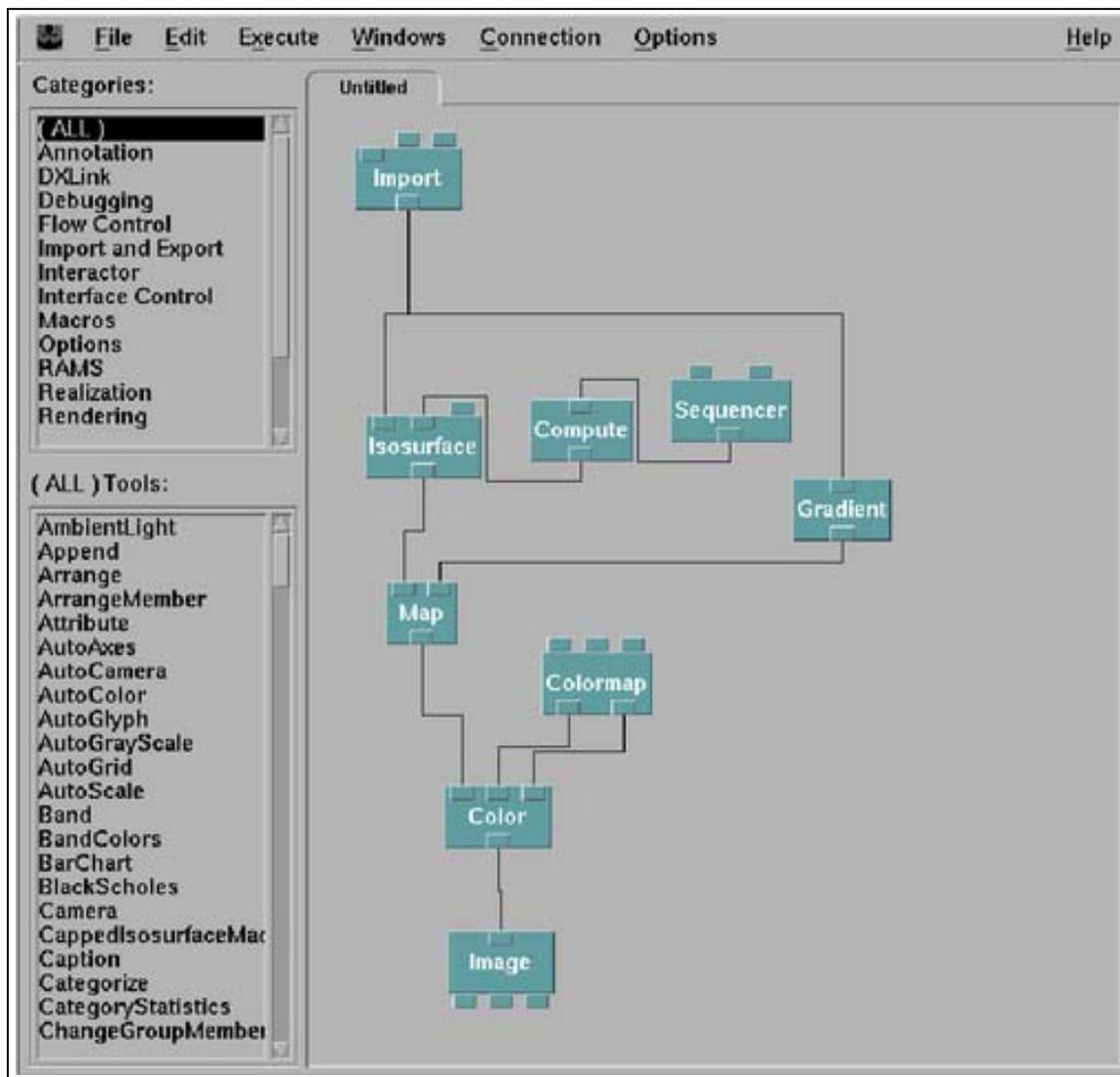


FIGURE A.2 – Fenêtre d’édition de programmes de OpenDX. Cette fenêtre consiste en deux palettes et d’un “canvas”. Les palettes listent des catégories d’outils ou modules (à gauche) et des modules individuels (en bas à gauche). Le “canvas” est une aire permettant la création et l’édition de programmes visuels sous la forme de réseau de modules interconnectés.

A.2.2 Programmation modulaire.

Avec des modules permettant de recevoir, via des sockets, des données provenant d’autres applications, DX est un outil de visualisation intéressant, car déchargeant le programmeur de la tâche ardue de construire une interface graphique et des outils de base (construction d’une perspective, gestion des couleurs, des événements souris, etc.) qui ne font pas partie du programme lui-même.

Par ailleurs, DX intègre la possibilité de distribuer l’exécution d’un programme sur plusieurs machines en réseau, en associant chaque module à un groupe d’exécution et en assignant à

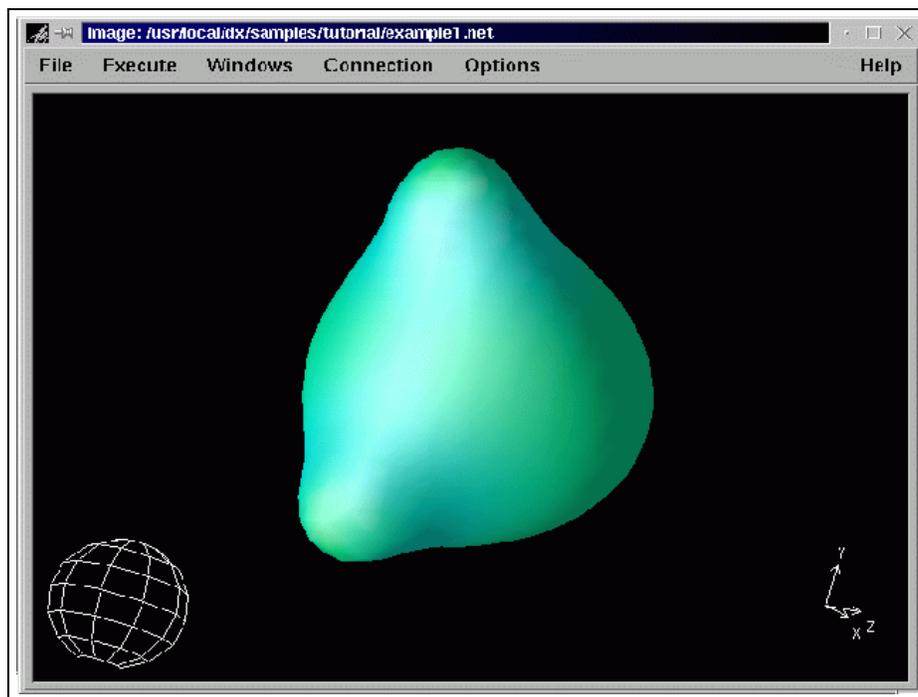


FIGURE A.3 – Exemple d’image générée par le programme donné en exemple. Il s’agit du champ de densité en électron d’une molécule d’eau. Plusieurs modes permettent de contrôler la visualisation, comme ici par rotation (globe et axes).

une machine locale ou distante un ou plusieurs groupes d’exécution³.

A un niveau d’utilisation plus élevée - c’est-à-dire demandant de véritables connaissances en programmation -, l’utilisateur peut développer sa propre bibliothèque de modules en langage C, à partir d’une importante librairie de fonctions. Dans ce cas, on peut construire des programmes spécifiques en interfaçant de façon transparente modules prédéfinis et modules utilisateurs. Cette option est assez séduisante lorsque l’on est en phase de développement et d’exploration, car elle permet une programmation modulaire, visuelle et souple, qui permet de décliner en plusieurs versions plus ou moins complexes une même application. Elle peut permettre à terme la définition de modules relativement génériques pouvant être utilisés par d’autres utilisateurs, pour des application variées.

C’est de cette manière que le simulateur RIVAGE est actuellement implémenté. On peut voir une image du programme RIVAGE sous DX à la figure A.4.

A.3 Quelques points techniques.

Les types de données manipulées par DX s’articulent autour de la notion de “field” (champ ou fonction) : c’est-à-dire un ensemble de positions, par exemple (x, y) , en deux dimensions auxquelles sont associées un certain nombre de données, par exemple une altitude z , un vecteur

³L’exécution tire aussi partie en principe des machines multi-processeurs, mais je n’ai pour l’instant pu tester cette fonctionnalité.

A.3. Quelques points techniques.

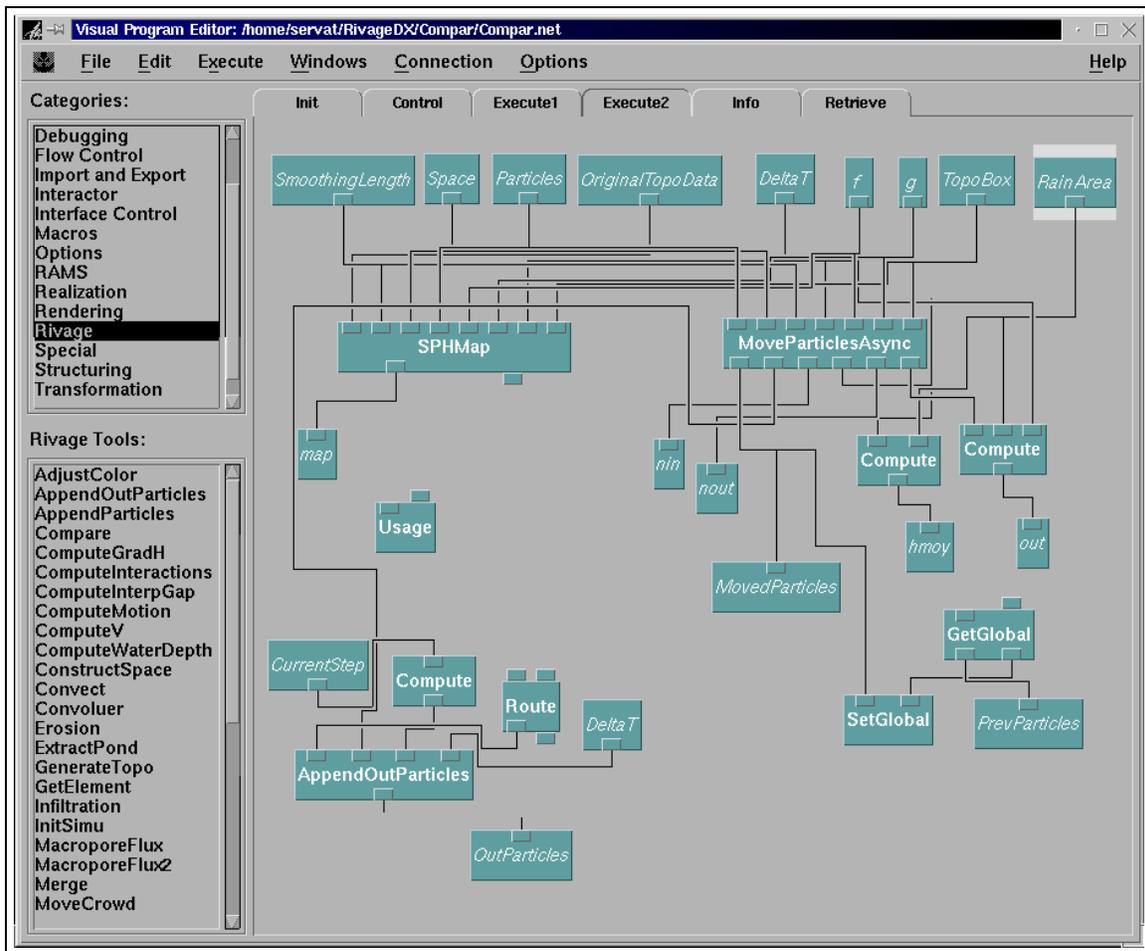


FIGURE A.4 – Fenêtre d’édition du programme RIVAGE. On peut voir à gauche la catégorie (sélectionnée) regroupant les modules implémentés (en bas à gauche). Le programme se présente donc sous la forme de “boîtes” interconnectées, que l’on peut organiser sur plusieurs pages, et réutiliser dans d’autres applications. Chaque module possède une interface de configuration.

vitesse \vec{v} , une liste de valeurs, etc. C’est sous cette forme qu’est représenté dans RIVAGE l’ensemble des boules d’eau.

Les groupes de boules d’eau sont représentés sous la forme de champs d’information ajoutés à la structure représentant les boules d’eau : par exemple un champ mare définissant une liste de références sur les positions des boules d’eau appartenant à la mare.

Les positions peuvent être reliées les unes aux autres selon des connexités variables, principalement selon des maillages rectangulaires ou triangulaires. Des données peuvent être assignées aux connexions elles-même (à chaque triangle par exemple), ou à des polygones définis par un ensemble de positions. C’est sous cette forme que sont représentées les zones de sol : on définit une liste de positions et on associe à ce polygone les valeurs caractéristiques du sol (teneur en eau initiale, teneur en eau à saturation, conductivité hydraulique, etc.).

Ces structures de données peuvent être sauveées sous la forme de fichiers textes lisibles,

facilement exportables vers d'autres applications.

Le module Gradient permet de calculer la pente locale définie par les données du fichier topographique et le module Map permet d'estimer par interpolation la valeur de cette pente en n'importe quelle position.

Pour la visualisation, le module Glyph permet de représenter sous diverses formes les informations portées par les boules d'eau (cube, sphère, flèche, etc.). Le module RubberSheet permet de visualiser un champ de variables (x, y, z) sous la forme d'une surface en 3D.

Les images obtenues peuvent être ensuite sauvées sous divers formats et éventuellement accumulées dans des fichiers d'animation (MIFF que l'on peut convertir ensuite en MPEG).

L'exécution d'un pas de temps de simulation correspond à l'exécution d'un cycle de flux de données passant d'un module à un autre. Un système de cache permet d'exécuter uniquement les modules dont les données d'entrée ont été modifiées. Un certain nombre de modules ont été implémentés réalisant différentes étapes : ajout de nouvelles boules d'eau, calcul des listes de voisins, calcul des hauteurs d'eau, des vitesses, déplacements des boules d'eau, auxquels se rajoutent d'autres modules gérant l'infiltration, l'érosion, etc.

A.4 Discussion.

Le choix de OpenDX comme environnement de programmation s'est révélé très intéressant car il m'a permis de développer assez vite différentes versions du simulateur RIVAGE. La possibilité de visualiser directement les résultats en cours de simulation sans perte de temps de calcul a été un atout important lors des essais exploratoires pour la construction du modèle d'érosion par exemple. La construction de programmes modulaires sous forme visuelle offre de même une grande souplesse pour le développement.

L'expérience que je tire de cette programmation est la nécessité de disposer d'outils puissants et souples pour la visualisation. Pouvoir changer de type de visualisation m'a permis par exemple de représenter facilement les groupes mares et chemins d'eau formés par les boules d'eau, et réfléchir à des indicateurs de suivi de ces objets, etc.

Cependant, une fois les programmes conçus, il reste qu'un environnement comme DX contraint la programmation et ne permet pas de construire une architecture générique de classes d'agents, comme un langage objet du type Java. A terme, la solution est sans doute de développer une telle architecture à l'aide d'un langage objet et d'interfacer les différents modèles avec un environnement comme DX pour la visualisation des résultats.

La possibilité de connecter via des sockets une application externe à un ensemble de modules de visualisation me semble être une bonne piste de travail à venir.