



Simulation dynamique spatialisée de l'évolution de la structure de surface des sols cultivés sous l'action de la pluie

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 20 octobre 2008

pour l'obtention du

Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne (URCA) (Spécialité Informatique)

par

Gilles VALETTE

Composition du jury

<i>Président</i> :	M. Djamchid GHAZANFARPOUR	Professeur, XLIM Université de Limoges
Rapporteurs :	M ^{me} Édith Perrier M. Éric Galin	Directrice de recherche, UR GEODES Professeur, Université Lyon 2
Examinateurs :	M. Jean BOIFFIN M. Sylvain MICHELIN M ^{me} Stéphanie Prévost M. Joël Léonard	Directeur de recherche, INRA Professeur, Université de Marne-La-Vallée Maître de conférences, URCA (encadrant) Chargé de recherche, INRA (encadrant)
Directeur :	M. Laurent LUCAS	Professeur, URCA

INRA, US 1158 Agro-Impact

Remerciements

J'ai entendu un jour quelqu'un pour qui j'ai la plus grande estime définir une thèse comme étant à la fois une aventure scientifique et une aventure humaine. Faisant fi de la chronologie, je voudrais commencer par remercier chaleureusement les personnes qui ont aidé à bien terminer cette aventure : Édith PERRIER et Éric GALIN, en acceptant d'être rapporteurs et qui le furent avec diligence et efficacité, Sylvain MICHELIN en acceptant de faire partie de mon jury et Djamchid GHAZANFARPOUR, en acceptant d'en assurer la présidence.

Je suis profondément reconnaissant à Sylvie RECOUS et Hubert BOIZARD de m'avoir permis de travailler au sein de l'unité INRA de Laon, même si ma présence n'y a été le plus souvent que virtuelle. Elle le fut beaucoup moins au sein du CRESTIC SIC, dont les directeurs successifs ont tenu un grand rôle dans mon histoire personnelle, et ce bien avant le début de cette thèse. Je remercie donc tout particulièrement à cet égard Yannick REMION et Laurent LUCAS, directeurs du LERI puis du groupe SIC, qui acceptèrent de m'accueillir dans leur licence professionnelle flambant neuve, avant d'en faire de même dans leur équipe de recherche quelques années plus tard. Laurent est devenu de plus à cette occasion mon directeur de thèse, un directeur disponible, enthousiaste, à tout moment ouvert à la discussion, toujours de bonne humeur autant que de bon conseil — je garde d'ailleurs gravé dans mon esprit son conseil éminemment précieux, valable en de multiples occasions, entre autres avant de faire une présentation dans une conférence internationale, quand le vidéoprojecteur se révèle incapable de lire les animations soigneusement préparées : *don't panic* !

Le prologue de mon aventure doctorale est une période au cours de laquelle la rencontre avec certains enseignants-chercheurs fut décisive à la fois dans ma formation et dans ma détermination de plus en plus grandissante à continuer en thèse. Parmi ceux-ci, j'éprouve une gratitude particulière envers Noël BONNET et Pascal MIGNOT, qui m'ont permis de découvrir puis d'affirmer mon goût pour le travail de recherche, tout en me permettant d'espérer que j'avais les capacités suffisantes pour m'aventurer dans cette voie difficile mais passionnante. Ce prologue s'est achevé avec mon stage de master, et je veux exprimer ma reconnaissance aux personnes qui, en l'encadrant avec efficacité, ont participé activement à assurer des bases solides à ma thèse et l'ont rendue possible : Carolyne DÜRR, Jean BOIFFIN, qui a eu de plus la gentillesse d'accepter la codirection de ma thèse, et Michel HERBIN, avec qui j'ai eu lors d'allers-retours Reims-Laon des discussions mémorables à plus d'un titre, et qui m'a fait le plaisir de continuer à montrer par la suite de l'intérêt pour mon travail. Hormis Laurent LUCAS, déjà présent à cette période et à ce titre bien évidemment associé au lancement réussi de ma thèse, je veux remercier également Joël LÉONARD qui a courageusement accepté lors de ce stage d'éclairer mes premiers pas en science du sol et a poursuivi pendant les trois années de thèse en m'orientant vers les articles les plus pertinents et en participant activement à

l'élaboration des modèles. Je lui en suis très reconnaissant. Ce ne fut pas le moindre de ses mérites que d'accepter de se mêler régulièrement à nos repas (et donc à nos discussions) d'informaticiens à la « cafét' » du LERI.

De la cafét' au café (viennois), il n'y a qu'un pas (de valse), ce qui m'amène naturellement (comprenne qui pourra) à la grande gratitude que je garde envers Stéphanie PRÉVOST, qui a accepté la lourde tâche de m'encadrer alors même qu'elle ignorait, en bonne informaticienne, la différence entre une croûte structurale et une croûte sédimentaire, lacune comblée au delà de ses espérances aujourd'hui... J'espère qu'elle excusera un jour les vacances d'été que je lui ai régulièrement gâchées (honte sur moi) à cause d'articles à relire ou compléter, de code à retrouver, voire de chapitres de thèse (toujours bien trop longs) à corriger. Je lui suis reconnaissant d'avoir surmonté son aversion des voyages pour partager avec moi quelquesunes des péripéties inévitables des déplacements en conférence, et, surtout, d'avoir été présente quotidiennement pour échanger sur tout et n'importe quoi (et parfois même sur mon travail de thèse, qui lui doit énormément), le plus souvent autour d'un café viennois (voir plus haut).

Je veux remercier ici tous les membres du LERI (que nous n'arrivons décidément pas à nommer SIC) pour l'ambiance toujours agréable qui y règne, dans un grand respect mutuel et une rafraîchissante convivialité qui mêle doctorants et enseignants-chercheurs. Je leur sais gré notamment d'avoir su me faire sourire en n'hésitant pas à surenchérir dans les comparaisons (au mieux) culinaires pour qualifier mes images de formation de croûte ou de fissures, avec une mention spéciale à Jérôme CUTRONA pour qui j'ai été et je resterai désormais sans doute, mais à mon corps défendant, le *cookie maker* du laboratoire. J'adresse également de vifs remerciements à la direction, en particulier Bernard HEMMER qui fut une aide efficace et un soutien précieux pour me permettre d'être enseignant vacataire, à l'équipe enseignante et aux techniciens du département Informatique de l'IUT de Reims pour leur accueil.

Enfin, j'ai bien sûr une grande reconnaissance envers les membres du cercle amical et familial qui m'ont permis de reprendre confiance dans les moments de questionnement que j'ai pu traverser. Je veux nommer ici Sophie, amie de la licence professionnelle, qui n'a jamais douté de me voir un jour docteur en informatique, et Patricia, amie des années de collège et aujourd'hui directrice de recherche, qui m'a conseillé de n'avoir aucune hésitation au moment d'opter pour le doctorat. Je me dois de remercier bien évidemment mon épouse Évelyne, qui ne m'a jamais empêché de prendre des risques dans ma vie professionnelle et m'a soutenu dans mes choix. Je remercie mes fils : Nicolas pour avoir eu l'élégance de me laisser (au moins jusqu'à maintenant) un diplôme d'avance, Maxime pour avoir su trouver un autre domaine que le mien pour laisser éclater ses talents précoces, et tous les deux pour avoir réussi à surmonter le terrible traumatisme d'avoir un père étudiant au moment de passer le bac. Pour clore ces remerciements, j'embrasse tendrement mon rayon de soleil de bientôt sept ans, ma petite Isabelle, qui a réussi à accepter sans me faire trop de reproches que je passe plus de temps à la maison à « dessiner de l'eau » (sic) qu'à jouer avec elle. J'espère du fond du cœur que ce ne fut pas du temps perdu.

La définition d'une thèse donnée en introduction de ces remerciements est celle d'une aventure à la fois scientifique et humaine. Je ne m'avancerai pas pour juger de la qualité de l'aventure scientifique que représente ma thèse, j'en laisse la responsabilité aux lecteurs de ce mémoire. En revanche, pour ce qui est de la qualité de l'aventure humaine, je peux affirmer que je n'aurais pas pu l'espérer plus belle ou plus enrichissante qu'elle ne le fut, et je veux remercier ici sincèrement, encore une fois, tous ceux, nommés ou non dans ces quelques lignes, qui y ont participé directement ou indirectement. À Isabelle, qui apprenait à lire quand moi j'apprenais à rédiger...

iv

« Numquam ponenda est pluralitas sine necessitate. » (« Thou shalt not seek an explanation based on more complex mechanisms, until you are satisfied that simpler mechanisms will not do! ») Guillaume d'Ockham (xiv^e siècle) cité par Tommaso Toffoli

> « La semplicità è l'ultima forma della sofisticazione. » Léonard de Vinci (xv^e siècle)

« Everything should be made as simple as possible, but not simpler. » Albert Einstein (xx e siècle) vi

Table des matières

Int	roc	lucti	ion générale	1
I	As	spect	ts théoriques de la modélisation	9
	1	\mathbf{Sys}	tèmes, modèles et simulation	11
		1.1	Introduction	11
		1.2	Principaux concepts	12
			1.2.1 Système et processus	12
			1.2.2 Modèle et cadre expérimental	15
			1.2.3 Simulation	17
			1.2.4 Paradigmes et formalismes	20
		1.3	Aspects méthodologiques	22
			1.3.1 Nouveau discours de la méthode	22
			1.3.2 Étapes de modélisation	23
		1.4	Conclusion	27
	2	Aut	tomates cellulaires	29
		2.1	Introduction	29
		2.2	Automates cellulaires classiques	30
			2.2.1 Description informelle	30
			2.2.2 Définition formelle	31
			2.2.3 Historique	32
			2.2.4 Variations et extensions	36
		2.3	Automates cellulaires étendus	37
			2.3.1 Description informelle	38
			2.3.2 Définition formelle	39
		2.4	Conclusion	41
	3	DE	VS	43
		3.1	Introduction	43
		3.2	Description formelle	44
			3.2.1 Modèle atomique	44
			3.2.2 Modèle couplé	46

		3.2.3 Parallel-DEVS	49
		3.2.4 Simulateurs abstraits et implémentations	50
	3.3	DEVS et les modèles cellulaires	51
		3.3.1 Cell-DEVS	51
		3.3.2 Espaces cellulaires non modulaires	53
		3.3.3 Relation avec les automates cellulaires étendus	55
	3.4	Conclusion	56
II \$	Simul	lation de la dégradation du sol	57
1	Cor	atorto scientificuo	50
4	4 1	Introduction	50
	4.1		- 59 - 60
	4.2	4.2.1 Épagion folienne	00 60
		4.2.1 Erosion concerne	00 61
		4.2.2 Erosion nyurique	62
		4.2.5 Degradation de la structure du sol	02 62
	12	4.2.4 Desagregation thermique	63
	4.0	4.2.1 Dréquisquire	00 62
		4.3.1 Flecuiseurs	05 65
		4.3.2 Generation directe de terrains	67
		4.3.5 Elosion de terrains virtuels	70
	1 1	4.5.4 Recapitulatil et allaryse de l'existant	70
	4.4	4.4.1 Modèles empiriques	71 71
		4.4.1 Modèles basés sur les processus	71 79
		4.4.2 Modeles bases sur les processus	77
	15	Conclusion	78
	4.0		10
5	\mathbf{Mo}	dèle de dégradation du sol	81
	5.1	Introduction	81
	5.2	Modèle fonctionnel	82
		5.2.1 Description informelle	82
		5.2.2 Description formelle	84
	5.3	Modèle structurel	87
		5.3.1 Premier modèle de sol	88
		5.3.2 Second modèle de sol	91
	5.4	Initialisation	93
		5.4.1 Définition du volume de sol	93
		5.4.2 Classes de particules	97
		5.4.3 État initial des cellules	97
		5.4.4 Génération d'agrégats	98
	5.5	Conclusion	101

6	Mo	délisation des processus	103
	6.1	Introduction	104
	6.2	Pluie, détachement, projection et tassement	104
		6.2.1 Pluie	104
		6.2.2 Détachement et projection par les gouttes de pluie	115
		6.2.3 Tassement	127
	6.3	Ruissellement, mobilisation, transport et dépôt	130
		6.3.1 Ruissellement	130
		6.3.2 Mobilisation, transport et dépôt de sédiments	137
	6.4	Infiltration	145
		6.4.1 Green & Ampt	145
		6.4.2 Automate cellulaire	146
		6.4.3 Modèle sol-croûte	149
	6.5	Conclusion	151
7	Inte	erprétation et résultats	153
	7.1	Introduction	154
	7.2	Interprétation	154
		7.2.1 Visualisation	154
		7.2.2 Définition des croûtes	160
	7.3	Choix et observations préliminaires	162
		7.3.1 Résolutions temporelle et spatiale	162
		7.3.2 Vérifications	165
		7.3.3 Temps d'exécution	165
	7.4	Exploration et tests par processus	169
		7.4.1 Pluie	169
		7.4.2 Détachement et projection	172
		7.4.3 Infiltration et ruissellement	175
		7.4.4 Contraintes et transport	178
	7.5	Simulation complète	181
		7.5.1 Description de l'expérience réelle	181
		7.5.2 Simulation virtuelle et comparaisons	184
	7.6	Conclusion	200
	-		
[]	Simu	lation de la fissuration du sol	203

III

8 Contexte scientifique				
	8.1	Introd	luction	206
	8.2	Observ	vation et caractérisation des fissures	206
		8.2.1	Techniques d'observation	207
		8.2.2	Caractérisation des fissures	209
	8.3	Modèl	es de fissuration	213
		8.3.1	Modèles basés sur les propriétés du sol	214
		8.3.2	Modèles géométriques	216
		8.3.3	Modèles à base physique	219
		8.3.4	Approches phénoménologiques	222

	8.4	Conclusion	225
9	Mod	dèle de fissuration	227
	9.1	Introduction	227
	9.2	Description formelle	229
		9.2.1 Modèle couplé P-DEVS	229
		9.2.2 Modèle atomique du sol	230
	9.3	Modèle structurel	231
		9.3.1 Terrain	231
		9.3.2 Fissures	233
	9.4	Modèle fonctionnel	236
		9.4.1 Évolution des fissures	236
		9.4.2 Calcul et propagation des volumes de retrait	242
	9.5	Conclusion	249
10	Into	rprétation graphique et résultats	251
10	10.1	Introduction	201 251
	10.1	Fiscuration de sol	251
	10.2	10.2.1 Maillago du torrain	252
		10.2.1 Maillage du terrain	255
		10.2.2 Mesuitats visuels	250
		10.2.4 Temps de celeul et accupation mémoire	209
		10.2.5 Example d'utilization	270
	10.9	Cárán lightion and mailleang 2D	271
	10.5	Generalisation aux mainages 5D	210
		10.3.1 Methode	273
	10.4	10.3.2 Resultats visuels \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	270
	10.4	Conclusion	279
Concl	usion	n générale	281
Anne	xes		287
٨	Мос	délisation du splach par un système flou	280
A		Principos du système flou	209
	A.1	Optimication du sustème fleu par algorithme génétique	209
	A.2	Optimisation du systeme nou par algorithme genetique	291
В	Don	nées d'initialisation de la dégradation des sols	295
\mathbf{C}	Don	nées d'initialisation de la fissuration des sols	299
Biblio	grap	hie	301
Public	catio	ns personnelles	319
Résun	né		321

Table des figures

1.1	Les concepts de la modélisation et de la simulation introduits par Zeigler (d'après Vangheluwe, 2000)	13
1.2	Le référentiel TEF (Temps, Espace, Forme) permettant de repérer la position des objets soumis à des processus (Le Moigne, 1977)	14
1.3	Représentation du cadre expérimental (d'après Vangheluwe, 2000)	17
1.4	Modélisation, simulation et compréhension des phénomènes (Tisseau et Parenthoën, 2005)	18
1.5	Classification des formalismes selon les aspects continus ou discrets des chan- gements d'état, du temps et de l'espace (Ramat et Preux, 2003)	21
1.6	Trois types de simulation, selon la prise en compte continue ou discrète des changements d'état et du temps.	21
1.7	Les connaissances tirées du modèle ne s'accroissent pas au-delà d'un certain nombre de variables, et les incertitudes cumulées font décroître l'intérêt de celui-ci (Coquillard et Hill, 1997)	25
1.8	Les concepts de vérification et de validation (d'après Vangheluwe, 2000)	26
2.1	Différents voisinages classiques d'un automate cellulaire bidimensionnel	31
2.2	Configuration d'une machine de Turing reproduite dans <i>Life</i> , conçue par Rendell (2002).	34
2.3	Des flocons de neige obtenus sur une grille hexagonale (Coxe et Reiter, 2003).	36
2.4	Ébullition (à gauche) et réaction-diffusion (à droite) simulé par un modèle CML (Harris et coll., 2005)	37
3.1	Fonctionnement du modèle atomique DEVS	45
3.2	Représentation d'un modèle atomique DEVS avec ports. Ici les ensembles des ports d'entrée et des ports de sortie sont $P_{in} = \{ p_{I1}, p_{I2} \}$ et $P_{out} = \{ p_{01}, p_{02} \}$	46
33	[$pO1, pO2$]	40 47
3.4	Les trois types de couplage (ou influence) dans un modèle DEVS couplé	48
3.5	Fonctionnement du modèle atomique P-DEVS.	49
3.6	Structure hiérarchique d'un modèle DEVS couplé sous forme d'un arbre	50

3.7	Un espace cellulaire 2D avec DEVS : chaque cellule est considérée comme un modèle atomique couplé avec ses voisines et avec l'espace cellulaire global.	52
3.8	Principe du passage d'un espace cellulaire à N^2 modèles atomiques à sa représentation non-modulaire à 4 modèles atomiques seulement (Shiginah, 2006)	54
4.1	Les trois phases d'une formation de croûte de battance (Le Bissonnais et	co
	Gascuel-Odoux, 1998, Le Bissonnais et coll., 2002)	62
4.2	Illustration de la reproduction des effets de la désagrégation thermique en synthèse d'images (Beneš et coll., 1997).	63
4.3	Deux exemples de terrains fractals : Fournier et coll. (1982) à gauche et Lewis (1987) à droite.	64
4.4	Mise en évidence du principal défaut d'une figure fractale \ldots	64
4.5	Application d'une érosion hydrique et thermique sur un terrain fractal (Mus- grave et coll., 1989).	65
4.6	Deux exemples de terrain incluant une rivière : à gauche le modèle de Kelley et coll. (1988), à droite, le modèle de Prusinkiewicz et Hammel (1993).	66
4.7	Trois exemples de terrains érodés générés par la méthode DMMC proposée par Belhadj (2007).	66
4.8	Exemple de simulation d'érosion par matrices d'après Marak et coll. (1997)	67
4.9	Érosion obtenue avec des couches géologiques d'après Chiba et coll. (1998).	67
4.10	Exemple de simulation d'érosion géologique d'après Roudier et coll. (1993) .	68
4.11	Dépôt de sédiment dans une cuvette d'après Beneš et Forsbach (2002)	69
4.12	Résultat produit par la méthode de Neidhold et coll. (2005)	69
4.13	Exemple d'érosion provoquée par un bras de rivière d'après Beneš et coll. (2006)	70
4.14	Illustration du modèle RILLGROW 2 (Favis-Mortlock, 2004)	75
4.15	Évolution d'un hypothétique canal martien par le programme LANDSAP (Luo, 2001).	75
4.16	Évolution d'une surface soumise aux processus d'érosion avec des agents « boule d'eau », (Servat, 2000)	77
5.1	Représentation de la modélisation de la succession des processus de transferts d'eau gouvernant l'évolution de la structure de la surface du sol	84
5.2	Le modèle couplé P-DEVS de la dégradation du sol par la pluie	84
5.3	Illustration du premier modèle structurel du sol $\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots$	88
5.4	Les sous-états d'une cellule de sol.	89
5.5	Classification des sols en trois états caractérisés notamment par la taille et la qualité des agrégats (Shepherd, 2000).	90
5.6	Illustration du second modèle structurel du sol $\ \ldots \ \ldots$	92
5.7	Illustration de la différence dans le nombre de cellules visualisées en profon- deur entre le premier et le second modèle de sol	93

5.8	Un échantillon de sol cultivé reconstitué au laboratoire, et sa visualisation volumique dans le simulateur	94
5.9	Un exemple de manipulation d'une carte de hauteur permettant d'ajouter l'empreinte d'un pneu de tracteur à un terrain virtuel	95
5.10	Comparaison des terrains virtuels obtenus par krigeage avec deux résolutions R et pour les modes point et bloc.	96
5.11	Illustration de la disparition de certaines zones de sol due à l'échantillonnage en deux dimensions	96
5.12	Comparaison entre un sol réel présentant des agrégats et un sol virtuel	99
5.13	Création de la forme d'un agrégat polyédrique par intersections successives d'une boîte englobante avec des plans aléatoires.	98
5.14	Exemple d'ajout d'agrégats sur un sol virtuel créé par l'algorithme de faille (<i>fault algorithm</i>)	100
5.15	Création d'agrégats en surface et en profondeur en respectant des distribu- tions réelles	101
6.1	Les deux possibilités de distribution de gouttes de pluie dans le simulateur .	106
6.2	Illustration des deux types de distributions des gouttes de pluie : distribution exponentielle et distribution gamma	107
6.3	Vitesses terminales de gouttes de pluie en fonction de leur diamètre, selon différents auteurs	109
6.4	Évolution de la vitesse des gouttes de différents diamètres, en fonction de la distance parcourue, d'après Van Boxel (1998)	11(
6.6	Pour décider de la zone touchée par la goutte de pluie, nous projetons la forme de la goutte sur le terrain.	112
6.7	Photographies de gouttes d'eau de différents diamètres ayant atteint leur vitesse terminale (Magono, 1954)	11:
6.8	Illustration du modèle de déformation des gouttes proposé par Beard et Chuang (1987)	11:
6.9	Illustration de la relation quasi-linéaire entre le diamètre maximal et le dia- mètre original d'une goutte.	114
6.10	Échantillonnage des épaisseurs inférieure et supérieure d'une goutte et interpolation de l'épaisseur totale correspondante	115
6.11	En haut : rendu d'une goutte de diamètre 6 mm à trois résolutions différentes. En bas : visualisation en intensité de bleu de la répartition des hauteurs sur les cellules, pour cette goutte et ces trois résolutions	11(
6.12	Distances moyennes de projection en fonction du diamètre moyen des frag- ments, pour quatre types de sol, selon le travail de Leguédois (2003)	120
6.13	Schématisation du comportement du transport par une goutte de pluie dans le simulateur	121
6.14	Expérience réelle d'un tas de sable soumis au simulateur de pluie	122
6.15	Expérience simulée d'un tas de sable soumis à la pluie	122

6.16	Étalement d'une goutte d'eau sur une surface hydrophobe, d'après Clanet et coll. (2004)	123
6.18	Notre système flou pour le calcul du détachement et du transport	125
6.20	Visualisation d'une simulation de détachement et projection par logique floue	126
6.21	Courbes de l'amélioration de la fonction d'évaluation du meilleur individu de la population, pour la simulation du détachement et de la projection.	127
6.22	Illustration de l'importance de l'ordre de traitement des cellules	131
6.23	Mise en évidence de l'anisotropie de l'algorithme de ruissellement	134
6.24	Illustration du principe du voisinage aléatoire pour une cellule	134
6.25	Correction de l'anisotropie apportée par la prise en compte d'un voisinage aléatoire	135
6.26	Illustration par de Gennes (1985) de la définition de l'angle de contact	136
6.27	Exemples de différents angles du front d'avancée de l'eau, comparés à l'angle de contact	137
6.28	Différence d'effet visuel produit par l'écoulement de gouttes de pluie sur une pente de 25° et imperméable, sans angle de contact et avec angles de contact.	137
6.29	Courbes de Paphitis (2001), de Julien (1998) et d'après Govers (1992).	139
6.30	Comparaison entre le facteur de correction que nous utilisons et deux autres, proposés par Govers (1987) et Ferro (1998).	140
6.31	Érosion d'un tas de sable fin sous simulateur de pluie en laboratoire. $\ .\ .$.	143
6.32	Reproduction dans le simulateur de l'érosion d'un tas de sable sous la pluie.	144
6.33	Illustration du problème posé par notre traitement du transport et corrigé par l'érosion latérale	144
6.34	Comparaison entre le pourcentage de cellules de surface concernées par l'éro- sion sous lame d'eau et celles concernées par l'érosion latérale	145
6.35	Schématisation de l'infiltration selon Green et Ampt (1911)	146
6.36	Évolution de l'eau en surface au cours d'une simulation virtuelle après arrêt de la pluie, avec une infiltration calculée selon le modèle de Green et Ampt.	146
6.37	Comparaison de l'influence du voisinage sur l'infiltration (modèle automate cellulaire) à partir d'une cellule source au centre du volume	148
6.38	Conductivité hydraulique de la croûte en fonction de la porosité structurale	151
7.1	Illustration du principe des plans de découpe pour la visualisation volumique	155
7.2	Principe de la transformation du contenu d'une cellule en propriétés de cou- leur et d'opacité du voxel	156
7.3	Histogrammes des différences entre l'épaisseur des cellules et l'épaisseur des voxels, pour un volume de $114 \times 112 \times 6$ cellules soumis à une pluie de 20 mm h^{-1} pendant $1 \text{ h} \dots $	157
7.4	Illustration du principe du maillage des surfaces respectives du sol et de l'eau	159
7.5	Exemples de rendu visuel de la surface de l'eau sur la surface du terrain	159
7.6	Illustration de l'utilisation des indices « d'humidité » sur chaque sommet	160

7.7	Illustration d'une amélioration simple du rendu visuel par l'utilisation d'une information sur le contenu des cellules	160
7.8	Comparaison des débits à l'exutoire pour différents pas de temps	163
7.9	Simulation de ruissellement sans infiltration sur le terrain en fin de simulation, à différents pas de temps et sous une pluie de $9 \mathrm{mm}\mathrm{h}^{-1}$	164
7.10	Comparaison de l'influence de la résolution sur le temps de parcours des particules sur une pente simple	164
7.11	Différences constatées lors de deux simulations, avec deux résolutions diffé- rentes, entre d'une part les quantités de pluie et d'eau infiltrée et ruisselée, et d'autre part la matière initiale et la matière présente dans le terrain virtue	el 165
7.12	Influence de la surface du terrain et de sa profondeur sur le temps de calcul nécessaire à une itération lors d'une simulation.	166
7.13	Influence de l'intensité de la pluie sur le temps de calcul nécessaire à une itération lors d'une simulation	167
7.14	Évolution du temps de calcul d'une itération durant une simulation	167
7.15	Évolution d'un terrain avec le modèle bi-résolution pendant une simulation d'une heure sous une pluie de $30 \mathrm{mm}\mathrm{h}^{-1}$.	169
7.16	Évolution d'une cuvette soumise pendant une heure à une pluie intensive $(300 \mathrm{mm} \mathrm{h}^{-1})$ avec le modèle bi-résolution.	169
7.17	Comparaison du pourcentage de cellules mouillées selon la distribution de tailles de gouttes	170
7.18	Étude de la couverture du terrain par la pluie aléatoire	170
7.19	Illustration de la dépendance du pourcentage de cellules mouillées à l'intensité de la pluie et à la taille des cellules	171
7.20	Vérification du respect d'un hyétogramme par le générateur de pluie	171
7.21	Images des expériences de Furbish et coll. (2007).	173
7.22	Comparaison des résultats de la deuxième série d'expériences de Furbish et coll., et de la simulation dans les mêmes conditions	174
7.23	Comparaison du nombre de grains projetés entre les expériences de Furbish et coll. et des simulations dans les mêmes conditions.	174
7.24	Comparaison des résultats de la troisième série d'expériences de Furbish et coll., et de la simulation dans les mêmes conditions	175
7.25	Visualisation volumique de l'infiltration, sous une pluie aléatoire, simulée par trois modèles	176
7.26	Visualisation volumique des 8 premières secondes d'infiltration modélisée par automate cellulaire 3D	176
7.27	Comparaison entre une solution de référence (équation de Richards) et notre algorithme de report 3D	176
7.28	Comparaison entre une solution de référence (équation de Saint-Venant) et notre algorithme de report	177
7.29	Représentation de trois instants de la phase d'équilibrage du ruissellement, pour deux pentes différentes, avec un flux constant en amont et une pluie aléatoire	178

7.30	Illustration de l'expérience virtuelle sur un terrain constitué de trois pentes, avec désactivation du splash et pluie limitée à la première pente	179
7.32	Émergence d'un comportement différent (apparition ou non de rigoles) selon la provenance de l'eau de ruissellement	180
7.33	Dispositif expérimental : dans la figure de gauche les points d'insertion des 10 mini-tensiomètres sont visibles (A), la figure de droite montre le bac de splash (B) et les deux gouttières chargées de récupérer l'eau de ruissellement à l'exutoire et l'eau infiltrée (C).	181
7.34	Évolution du terrain réel soumis au simulateur de pluie. Les temps indiqués sont les temps réels, incluant les interruptions (le terrain a été soumis à la pluie simulée pendant 2 heures au total).	182
7.35	Mesures de flux d'infiltration et de ruissellement et de tensions pendant la simulation de pluie.	183
7.36	Illustration de la reproduction du bac de recueil de splash dans le simulateur.	184
7.37	Découpage de l'image en 10 zones du bac réel et virtuel en fin de simulation	185
7.38	Pourcentages de fragments projetés dans le bac réel (pixels) et dans le bac virtuel (volumes).	185
7.39	Pourcentages de fragments projetés dans le bac réel (pixels) et dans le bac virtuel (pixels).	186
7.40	Comparaison entre les masses projetées dans le bac réel et le bac virtuel	187
7.41	Courbes relatives à la moyenne de la charge hydraulique sous la croûte sur le terrain pendant une simulation	188
7.42	Estimation de l'apparition du ruissellement.	188
7.43	Injection d'un colorant bleu lors d'une expérience sous simulateur de pluie pour mesurer la vitesse du ruissellement.	189
7.44	Reproduction de l'injection d'un colorant bleu dans le simulateur (temps simulé : $0, 3.3, 6, 8, 9$ et 12.3 s).	189
7.45	Vérification de l'indépendance du temps de parcours (révélé par le pic de concentration) par rapport à la masse des particules simulant le colorant injecté dans le flux	190
7.46	Mise en évidence du rôle limitant du pas de temps sur la vitesse d'écoulement	191
7.47	Temps de parcours des particules avec des pas de temps différents, avec une résolution de 2 mm et de 5 mm	191
7.48	Comparaison de la dimension des flaques sur un même terrain, sous des condi- tions de simulation identiques, avec deux coefficients de friction différents.	192
7.49	Temps de parcours des particules avec des pas de temps différents, avec une résolution de 5 mm et un coefficient de friction égal à 2	192
7.51	Les six zones carrées de la zone principale de ruissellement	193
7.52	Relevés des contraintes hydrauliques moyennes sur six zones, pendant $6\mathrm{s}$	194
7.53	Comparaison entre la distribution des tailles de particules issue du test de stabilité et les pourcentages des particules atteignant l'exutoire pour chaque classe	104
7.54	Évolution de la topographie du terrain pendant une simulation.	194

7.55	Comparaison entre l'aspect visuel du terrain après l'expérience réelle, et à deux moments de la simulation.	195
7.56	Influence du seuil d'énergie cinétique du détachement sur la topographie fi- nale pour 120 min de pluie simulée.	196
7.57	Évolution du volume de particules accumulé sur la surface du terrain	196
7.58	Repérage des cailloux présents sur le sol initial pour l'estimation du tassement global.	197
7.59	Évolution du volume de particules accumulé sur le terrain	198
7.60	Estimation de l'épaisseur de croûte et de la porosité structurale moyenne en chaque point de la surface à la fin d'une simulation.	198
7.61	Différentes discriminations des deux types de croûte selon la valeur donnée au seuil de signature granulométrique	199
7.62	Exemple de zones d'intérêt définies par l'utilisateur.	199
7.63	Étude de la croûte et de la granulométrie dans les zones	200
7.64	Étude du ruissellement et de l'énergie cinétique cumulée dans les zones. $\ . \ .$	200
8.1	Schéma d'organisation de l'espace por al du sol d'après Stengel (1979). $\ . \ .$	207
8.2	Exemples d'images de lames minces d'après Moreau et coll. (1999b) et Pagliai et coll. (2004)	208
8.3	Exemples d'images 3D d'après Moreau et coll. (1999a) et Delerue (2001). $\ .$	208
8.4	Exemple d'une photographie d'une surface de sol cultivé fissuré et du résultat de la détection des fissures par analyse d'images (Gallardo-Carrera, 2006).	209
8.5	Exemple de technique de mesure d'après Ringrose-Voase et Sanidad (1996).	210
8.6	Les différents types de fissures pour le calcul de la tortuosité et de la connec- tivité (Chertkov et Ravina, 1999)	211
8.7	Différentes images de fissures rangées par ordre décroissant de connectivité, d'après Chertkov et Ravina (1999).	211
8.8	Étude d'un réseau de fissures d'après Vogel et coll. (2005a)	212
8.9	Relation entre l'aire des fissures et la dimension fractale, d'après Velde (1999).	213
8.10	Quatre bols, avec une solidité décroissante, tombant d'une même hauteur, d'après O'Brien et Hodgins (1999).	214
8.11	Modèle morphologique de Hallaire (1988b).	215
8.12	Détail des trois étapes du modèle stochastique de Horgan et Young (2000) .	217
8.13	Construction du modèle fractal (ici sur un niveau) d'après Perrier et coll. (1995a).	218
8.14	Trois représentations d'une même fragmentation en 10^4 particules (cà-d. zones de niveau 4) d'après Perrier et coll. (1995a).	218
8.15	Modèle de Skjeltorp et Meakin (1988).	219
8.16	Modèle de Federl (2002)	220
8.17	Modèle de Hirota et coll. (1998, 2000). \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	221
8.18	Modèle de Vogel et coll. (2005b)	221

8.19	Différents paramétrages permettent de varier le degré de ductilité d'un ma- tériau, heurté ici par un projectile, d'après O'Brien et coll. (2002)	222
8.20	Surface de boue se desséchant, d'après Iben et O'Brien (2006).	222
8.21	Illustration de la méthode de Gobron et Chiba (2001)	223
8.22	Résultats de Gobron et Chiba (2001).	223
8.23	Écaillures de peinture synthétiques obtenues par Paquette et coll. (2002).	224
8.24	Fissures créées sur une coquille d'œuf et sur la statue d'Aphrodite par la méthode proposée par Desbenoit et coll. (2005).	225
9.1	Le modèle couplé P-DEVS de la fissuration du sol	229
9.2	Trois cas possibles pour le terrain : (a) la hauteur H et l'épaisseur de la couche de surface T sont constantes, (b) H est constante et T est variable, (c) H et T sont variables.	231
9.3	Un terrain découpé (dans cet exemple) en cellules élémentaires cubiques, avec le détail de la composition d'une cellule.	232
9.4	Chemins possibles de fissuration	233
9.5	Deux exemples de réseaux de fissures produits par le modèle de Horgan et Young.	234
9.6	Tessellations de Dirichlet	235
9.7	Deux exemples d'application de la méthode de la ligne de partage des eaux	236
9.8	Illustration du modèle fonctionnel de la fissuration du sol	237
9.9	Évolution de la carte des distances au fur et à mesure de la création de fissures (un pixel blanc représente la distance maximale de la carte)	238
9.10	Illustration de la création et de la progression d'une fissure en trois étapes .	239
9.11	Trois étapes différentes obtenues par le modèle de Horgan et Young. $\ .\ .\ .$	240
9.12	Exemple d'une carte de hauteur prise comme image originale et de cinq ni- veaux hiérarchiques de LPE	241
9.13	Une portion de fissure définie entre deux cellules de surface adjacentes, et le volume correspondant.	241
9.14	Illustration du concept de volume de retrait	243
9.15	Courbes ayant servi de base au calcul empirique du volume de retrait. $\ . \ .$	245
9.16	Modélisation de l'évaporation et courbes caractéristiques de retrait	246
9.17	Illustration du principe de la propagation des volumes de retrait.	247
9.18	Exemple des effets visuels produits par la propagation des volumes de retrait	248
9.19	Comparaison entre une fissuration sans retrait vertical et d'une fissuration avec retrait vertical	249
10.1	Illustration des six étapes d'un maillage de trois portions d'une fissure de section triangulaire	252
10.2	Volume d'une portion de fissure définie entre deux cellules de surface adjacentes	s253
10.3	Illustration du principe des polygones de surface pour représenter l'informa- tion de largeur des portions de fissure.	253

10.4	Résultats obtenus par la méthode de maillage des portions de fissure	254
10.5	Illustration de l'approximation tolérée dans le calcul des volumes de portion de fissure et leur rendu.	254
10.6	Fissures sur une surface plane, suivant des chemins non hiérarchiques et hié- rarchiques produits par la méthode de Horgan et Young	256
10.7	Un exemple de fissuration appliqué à un sol croûté par simulation	257
10.8	Exemple de dynamique de fissuration sur un terrain plat	257
10.9	Illustration d'une fissuration d'un terrain plat, basée sur une tessellation de Dirichlet, une couche de retrait uniforme, avec l'apport du retrait vertical et d'une texture photographique	258
10.10	Le simulateur de dégradation d'un sol sous l'action de la pluie produit, à partir de la topographie intitiale d'un sol réel, un sol virtuellement croûté, auquel nous appliquons notre méthode de fissuration.	258
10.11	Autre exemple de fissures produites sur un sol croûté par simulation	259
10.12	Cet exemple illustre comment les conditions initiales peuvent influer sur la fissuration du terrain	260
10.13	Exemples d'utilisation de cartes de hauteur initiales dessinées par l'utilisateur	261
10.14	Images binaires de fissures provenant de divers articles	262
10.15	Images binaires provenant de notre simulation de fissuration.	262
10.16	Images géométriques arbitraires.	262
10.17	Autres images de test.	262
10.18	Illustration du principe de la méthode du comptage de boîtes pour estimer la dimension fractale d'un réseau de fissures.	263
10.19	Comparaison des courbes donnant l'aire des fissures en fonction de la dimen- sion fractale	264
10.20	Comparaison de la dimension fractale à différentes dates de dessiccation du so	1264
10.21	Influence de la taille du filtre sur les estimations des densités de Minkowski	266
10.22	Densités de Minkowski obtenues par la méthode de Ohser et coll. $\left(1998\right)$	267
10.23	Illustration du principe des érosions morphologiques successives obtenues à partir de segmentations d'une carte des distances selon la valeur du seuil r .	268
10.24	Fonctions de Minkowski (r est en abscisse) calculées pour les images de fissures réelles : en haut, 10.14 (a, b, c, d ,j), en bas 10.14 (e, f, g, h, i)	268
10.25	Fonctions de Minkowski calculées pour les fissures produites par notre mé- thode (r est en abscisse)	269
10.26	Fonctions de Minkowski (r est en abscisse) calculées pour des images ne repré- sentant pas des fissures : en haut, des figures géométriques (voir figure 10.16), et en bas d'autres images (voir figure 10.17)	269
10.27	Études du temps de calcul et de l'occupation mémoire selon différents critères	.270
10.28	Illustration du principe de la prédiction de l'émergence des plantules	272
10.29	Visualisation des plantules ayant émergé à la surface grâce à la présence d'une fissure.	272

10.30	Le principe de la généralisation de notre méthode de fissuration aux maillages 3D	273
10.31	Généralisation de notre méthode de fissuration aux maillages 3D	274
10.32	Deux exemples de généralisation par projection plane	276
10.33	Exemple de généralisation par projection cylindrique, avec un chemin calculé par la méthode de Horgan et Young	277
10.34	Exemple de généralisation par projection sphérique, avec un chemin calculé par la méthode de Horgan et Young (a,b) et par la méthode LPE appliquée sur une carte de hauteur aléatoire (c)	277
10.35	Fissuration du Moai basée sur la courbure gaussienne de la surface 3D utilisée comme carte de hauteur de la couche de retrait	278
10.36	Fissuration d'une zone complexe	278
10.37	Comparaison entre une fissuration réelle et une fissuration virtuelle, établie à partir d'une LPE hiérarchique basée sur la courbure gaussienne et une pa- ramétrisation triviale (surface de révolution).	279
A.1	Notre système flou pour le calcul du détachement et du transport	290
A.2	Fonctions d'appartenance trapézoïdales définissant un sous-ensemble flou, avec deux cas particuliers	290
A.3	Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.	292
A.4	Composition d'un chromosome	292
A.5	Sous-ensembles flous de l'indice de compacité, avant et après optimisation .	293
A.6	Illustration de l'opération de croisement à points multiples (5)	294
A.7	Illustration de l'opération de mutation.	294

Liste des tableaux

5.1	Les trois processus hydrauliques impliqués dans la dégradation de l'état de surface du sol et les sous-processus qui leur sont associés et qui ont un effet direct sur le sol.	83
5.2	Distribution des 64 bits d'une cellule de sol.	90
5.3	Définition par défaut des classes des particules.	97
5.4	Exemple de distributions réelles de tailles d'agrégats en surface et en profon- deur, utilisées pour produire les agrégats de la figure 5.15	100
6.1	Comparaison entre le diamètre original D_{or} des gouttes et leur diamètre maximal D_{max} à vitesse terminale	114
7.1	Répartition du temps de calcul entre les processus	166
7.2	Répartition des actions des processus entre les deux résolutions	168
7.3	Exemple de hyétogramme imposé à l'étape d'initialisation du simulateur	172
7.4	Comparaison de la vitesse à l'impact de gouttes de trois diamètres différents, mesurée expérimentalement par Furbish et coll. (2007) et estimée par le si- mulateur (en $m s^{-1}$)	172
7.5	Résultats de l'expérience de transport dans un canal rugueux.	179
7.6	Résultats du test de stabilité, et pourcentages pour le processus de détache- ment qui en sont déduits.	182
7.7	Observations effectuées pendant l'expérience	183
7.8	Caractéristiques des différences d'altitude dans les zones des cailloux (va- leurs en mm) entre le MNT du terrain initial et le MNT du terrain en fin de simulation réelle.	197
10.1	Comparaison de la dimension fractale théorique et de la dimension fractale estimée par la méthode du comptage de boîtes pour différentes figures connues.	263
10.2	Exemples de temps de calcul et d'occupation mémoire pour 12 itérations et les différents modèles de précalcul des chemins de fissures	271
10.3	Exemples de temps de calcul (de la génération des fissures à l'interprétation graphique) et d'occupation mémoire, sur un Pentium IV cadencé à 3 GHz avec 1 GB de RAM	278

Introduction générale

Contexte et problématique

Dans les sols cultivés¹, la structure de la surface est en évolution constante, sous l'action des opérations de travail du sol et des facteurs climatiques, en particulier des pluies. La phase la plus critique de cette évolution est celle qui succède à une opération de semis : partant d'un état très fragmentaire et fragile, la surface du sol subit l'action des pluies ce qui, par le jeu de différents processus de détachement et déplacement de particules solides, aboutit à une disparition progressive et plus ou moins rapide du caractère fragmentaire initial, et à la formation, à la surface du sol, de structures appelés « croûtes de battance ». La présence de ces croûtes entraîne une diminution de l'infiltrabilité (Mac Intyre, 1958), cause de l'apparition du ruissellement et de l'érosion, avec des conséquences importantes, autant économiques qu'environnementales : creusement de ravines, perte nette d'éléments nutritifs, diminution de l'épaisseur du sol, dégradation de la qualité des eaux (Leguédois, 2003). Les croûtes de battance provoquent également une augmentation de la réflexion de l'énergie solaire incidente sur la surface du sol (Ben-Dor et coll., 2003), et donc une décroissance de la température du lit de semence. Elles sont aussi la cause d'une réduction de l'alimentation en oxygène des semences et un obstacle mécanique à l'émergence des plantules (Dürr et coll., 2001). Il est donc important d'être en mesure de pouvoir prédire, en fonction d'un état initial du sol et d'un scénario climatique, si une croûte va se développer, quelles seront ses propriétés, et selon quelle dynamique se fera ce développement. Un autre phénomène d'évolution de la structure de la surface du sol, qui a des effets correcteurs sur ces conséquences de la battance, apparaît avec la dessiccation : il s'agit de la fissuration. En effet, l'apparition de fissures va d'une part avoir un effet positif sur l'infiltrabilité, et d'autre part offrir un passage à travers la croûte à certaines plantules (Gallardo-Carrera, 2006).

L'analyse des conséquences agronomiques et environnementales de l'encroûtement du sol a fait l'objet de nombreux travaux au cours des deux dernières décennies, qui ont été accompagnés du développement d'approches permettant une caractérisation et un suivi de la dynamique d'évolution de l'état de surface du sol (Casenave et Valentin, 1989, Valentin et

^{1.} Comme le souligne Stengel (Stengel et Gelin, 1998), le mot sol est polysémique : le juriste, l'ingénieur en travaux publics, l'agriculteur, le géologue en ont une définition différente. Nous retenons dans ce travail de thèse la définition du sol qu'utilisent les pédologues et les agronomes, c'est-à-dire la mince (de quelques décimètres à quelques mètres) couche supérieure de la croûte terrestre (la pédosphère) où s'interpénètrent la roche (la lithosphère), l'air (l'atmosphère), l'eau (l'hydrosphère) et les organismes vivants (la biosphère).

Bresson, 1992, West et coll., 1992, Léonard et coll., 2006). L'analyse des mécanismes de formation des croûtes, de leur déterminisme, a également fait l'objet de travaux variés (Boiffin, 1984, Bradford et Huang, 1992), mais peu d'études ont été consacrées à la synthèse de ces travaux et au développement d'une approche intégrée et prédictive du développement des croûtes de surface. Parmi celles-ci, les modèles d'érosion à large échelle (WEPP, Lane et Nearing, 1989, EUROSEM, Morgan et coll., 1998, LISEM, De Roo et coll., 1996a,b) ne prennent pas en compte deux aspects importants : l'évolution de la topographie, et les différentes tailles de particules. Des modèles plus locaux s'intéressent à l'un ou l'autre de ces aspects (Hairsine et Rose, 1991, pour la taille des particules, Favis-Mortlock et coll., 2000 et Nord, 2006, pour la topographie) mais ne furent pas développés en vue d'une prédiction de la formation des croûtes.

L'étude, la caractérisation et la modélisation des réseaux de fissures sont des sujets de grand intérêt, et la littérature qui leur est consacrée est abondante. Il existe notamment beaucoup de modèles de fissuration, qu'ils soient basés sur la seule géométrie (MacVeigh, 1995, Perrier et coll., 1995a, Horgan et Young, 2000), sur les propriétés structurelles ou hydriques du sol (Hallaire, 1988a,b, Voltz et Cabidoche, 1995, Chertkov et Ravina, 1998, Chertkov, 2002), ou encore sur des lois physiques (Skjeltorp et Meakin, 1988, Hoffmann, 2000, Federl, 2002, Vogel et coll., 2005b). Aucun de ces modèles ne permet cependant de faire un lien entre l'apparition des fissures et la présence ou l'absence d'une croûte à la surface du sol, sa nature ou son importance. Le couplage d'un modèle de fissuration avec un modèle de formation de croûte semble donc une piste nouvelle et intéressante, puisque ces phénomènes affectent successivement la même structure, et qu'il est donc possible qu'ils s'influencent mutuellement.

Cette description du contexte du travail entrepris au cours de ma thèse peut conduire tout naturellement à la conclusion qu'il s'agit d'une thèse en science du sol. Or il s'agit bien d'une thèse en informatique, plus précisément d'une thèse menée, certes, en collaboration avec l'unité INRA « Agro-Impact » de Laon, mais également au sein d'une équipe spécialisée dans la synthèse d'images (l'équipe « Modélisation et Animation Dynamique pour la Simulation » du groupe « Signal, Image, Connaissance » du CReSTIC de l'Université de Reims Champagne-Ardenne). Il est donc légitime de se demander ce que l'informatique peut apporter dans une telle problématique, et également comment ce travail s'inscrit dans le cadre général de la recherche en informatique, et dans le cadre particulier de l'informatique graphique. Les prochains paragraphes apportent quelques éléments de réponse à ces questions.

Notamment grâce à l'accroissement de la puissance de calcul et de la capacité de mémoire des machines, l'informatique est devenue indispensable, si ce n'est à la modélisation, au moins à la simulation, la simulation numérique passant d'un statut de « mal nécessaire » (Servat, 2000) à celui d'un véritable moyen d'investigation en modélisation, appuyé sur une démarche exploratoire d'un milieu virtuel et des phénomènes que l'expérimentateur peut y provoquer. La simulation informatique peut servir de support au raisonnement pour le modélisateur, de la même façon qu'un dessin peut aider à élaborer une démonstration en géométrie (Perrier, 2002). Cette analogie est d'autant plus vraie lorsque la simulation produit une image, ou une animation, et c'est là que se situe l'une des justifications de ce travail de thèse en informatique, dans un laboratoire où l'image numérique occupe une des premières places : le souci constant de produire des images à partir des simulations. Ces images sont à la fois un outil de communication de résultats, un outil d'observation du comportement du simulateur, et un outil de première validation, avec l'hypothèse, somme toute raisonnable, qu'une simulation reproduisant le comportement d'un système doit pouvoir produire une image « réaliste » (condition nécessaire mais évidemment non suffisante). C'est pourquoi la visualisation a servi de véritable moteur tout au long du travail de thèse, autant que de premier moyen de validation des simulateurs en cours de développement. Dans le contexte particulier de cette thèse, il faut souligner que la caractérisation de la dégradation de l'état de surface du sol *in situ* repose en grande partie sur l'observation visuelle. Le fait de pouvoir visualiser des résultats de simulation ouvre des perspectives intéressantes pour la réutilisation de la démarche de caractérisation visuelle mise en œuvre par un observateur sur le terrain. Il nous a semblé également qu'il pouvait être fructueux de tenter un rapprochement entre les domaines de recherche de la science du sol et de la synthèse d'image, en mêlant les objectifs d'une simulation de la dynamique d'évolution du sol la plus exacte possible et ceux d'une représentation réaliste ou, pour reprendre la terminologie de Musgrave (Ebert et coll., 2002), mêler physical modeling et ontogenetic modeling (nous reviendrons sur cette terminologie dans le premier chapitre de ce mémoire, section 1.2.3). Cela s'est traduit au final autant par la réutilisation d'algorithmes ou de procédés spécifiques que par un réinvestissement plus général de concepts ou de modèles venant de l'informatique ou de l'imagerie numérique : automates cellulaires, logique floue, algorithmes génétiques, méthode de la ligne de partage des eaux, paramétrisation de surface, etc.

L'informatique a une place privilégiée au sein des problématiques de modélisation et de simulation, et semble à même de pouvoir apporter des moyens nouveaux et puissants aux autres sciences, que ce soit en multi-modélisation (voir le travail sur le Virtual Laboratory Environment, Ramat et Preux, 2003) ou en réalité virtuelle (avec l'apparition de l'expérimentation in virtuo, Tisseau et Parenthoën, 2005). Inversement, l'informatique graphique s'est depuis ses débuts nourrie de connaissances venant d'autres domaines scientifiques pour produire des images réalistes. Ainsi, la création de modèles numériques de terrains est depuis plus de vingt ans un champ d'investigation très actif dans la communauté de l'informatique graphique. Que ce soit pour obtenir des paysages virtuels réalistes ou pour permettre à des joueurs de se déplacer dans un monde aux aspects naturels, la quête d'un réalisme visuel a poussé ces chercheurs à inclure dans leurs systèmes de génération de terrain des algorithmes d'érosion reproduisant plus ou moins fidèlement les évolutions de paysages observées dans la nature. Il n'est donc pas impossible qu'un travail de réflexion sur la modélisation de la dégradation de la surface des sols sous l'action de la pluie puisse ouvrir de nouvelles pistes ou apporter des idées originales pour ajouter du réalisme à des scènes naturelles. Il est d'ailleurs significatif que deux articles très récents d'informatique graphique, traitant de la reproduction visuelle des effets de l'érosion hydrique (Beneš, 2007, Mei et coll., 2007), fassent explicitement référence à des publications en agriculture et en science du sol (Langendoen, 2000, Julien et Simons, 1985).

De la même façon qu'une simulation d'érosion ajoute un certain réalisme aux images produites par synthèse, la reproduction de phénomènes de fissuration est un moyen très utilisé pour rendre visuellement plus plausible un objet virtuel ou une scène naturelle en image de synthèse (Hirota et coll., 2000, Gobron et Chiba, 2001, Desbenoit et coll., 2005, Iben et O'Brien, 2006). Dans ce contexte, l'apport de données et de connaissances venant de la science du sol est une démarche originale qui peut amener à des voies nouvelles pour obtenir des images de sol plus réalistes, voire même pour ajouter des fissures à d'autres objets virtuels. Enfin, pour conclure sur les intérêts convergents entre simulation et informatique, rappelons que le premier langage à utiliser les concepts de la programmation objet fut Simula 67, successeur de Simula I qui, comme son nom l'indique (*simulation language*), avait pour objectif premier de permettre de décrire, programmer et donc simuler des systèmes complexes comportant des activités parallèles.

Objectifs poursuivis

L'objectif premier de ce travail de thèse est de mettre au point un modèle local d'érosion capable de prévoir l'évolution de la surface du sol, dans sa structure et sa topographie, et l'évolution des propriétés de ce sol, en tenant compte de l'interaction entre les phénomènes érosifs et ces évolutions. Pour cela, le modèle doit se baser sur trois idées fondamentales.

La première idée clé, afin de permettre de simuler l'évolution de la surface du sol par la redistribution de matériaux et le tassement, est la nécessité de représenter les différents processus de transfert d'eau (infiltration, ruissellement), ainsi que les processus de transfert de sédiments (détachement et projection par les gouttes de pluie, transport et dépôt par le ruissellement), ainsi que les interactions entre ces processus (le tassement et l'évolution de la granulométrie déterminant l'état du sol et notamment ses propriétés hydrodynamiques).

La deuxième notion fondamentale, compte tenu de l'importance du développement des croûtes qui va conditionner l'évolution des processus et des propriétés du sol, est d'offrir les éléments essentiels permettant une prise de décision relative à la présence ou non d'une croûte et à sa nature. Cela implique en particulier de disposer d'une description tridimensionnelle du sol, compatible à la fois avec des observations en 2D horizontal (du type état de surface du sol, incluant la topographie), et en 2D vertical (du type micro-profils). La définition de certains types de croûtes étant liée pour partie à leur granulométrie et sa comparaison avec la granulométrie du matériau sous-jacent, le modèle doit gérer la granulométrie issue des processus de fragmentation et en tenir compte dans les processus de transport afin de permettre d'analyser l'évolution de la composition granulométrique de la couche superficielle du sol.

Enfin, la gamme des processus à modéliser étant large et les connaissances actuelles en ce domaine n'étant pas définitives, le troisième principe de base est de développer à partir du modèle un simulateur qui soit également un outil d'intégration et de test de connaissances, permettant notamment de traiter des aspects des processus parfois négligés (effet du relief local sur le transport, traitement discret de la pluie,...). Cela implique que le modèle doit avoir une structure ouverte permettant le choix entre différents formalismes, et que le simulateur doit donner la possibilité à l'utilisateur de modifier certaines caractéristiques de la simulation, de sorte à être un outil de recherche pour tester de nouvelles hypothèses et leurs conséquences.

Le second objectif de ce travail de thèse est de proposer un modèle de formation d'un réseau de fissures verticales à la surface d'un sol soumis à dessiccation, en privilégiant la cohérence avec le modèle de la dégradation des sols de manière à faciliter le couplage entre les deux modèles. En effet, dans le cadre de cette étude, une justification de la mise au point d'un nouveau modèle de fissuration, alors que beaucoup de modèles existent déjà, est que l'opportunité est donnée de faire, de manière originale, un lien explicite entre la présence d'une croûte de battance et la dynamique de formation d'un réseau de fissures et ses caractéristiques. Un sol modifié selon les résultats d'une simulation de dégradation de sol doit pouvoir être passé comme un sol initial au simulateur de fissuration. À cause de la complexité des phénomènes mis en jeu, l'ambition de parvenir à un modèle complètement prédictif et déterministe de la localisation des fissures semble irréaliste. En revanche, le modèle doit aboutir à des fissures qui respectent certaines caractéristiques globales, notamment géométriques, et qui forment au final un réseau réaliste dans son apparence et son étendue. De plus, il est important que le modèle prenne en compte l'aspect temporel du phénomène et permette une reproduction correcte de la dynamique de création et d'évolution des fissures, leur propagation comme leur élargissement. Enfin, comme pour la simulation de la dégradation des sols, les résultats produits par la simulation doivent être traduits visuellement, à la fois comme moyen de validation (il est difficile de faire plus efficace que l'œil humain pour distinguer des fissures sur une image de sol) et comme preuve que le modèle peut également offrir une alternative valide pour obtenir des images de sol fissuré réalistes, en utilisant des connaissances et des données de science du sol, approche originale dans le contexte de l'informatique graphique.

Choix de modélisation

Les modèles d'érosion hydrique, lorsqu'ils sont spatialisés, partagent l'espace soit en polygones, soit, et c'est le plus fréquent, en grille régulière. La plupart de ces derniers modèles peuvent se rattacher à la famille des automates cellulaires, et certains le font explicitement (Chase, 1992, Favis-Mortlock et coll., 2000, Haff, 2001, Luo, 2001, Bursik et coll., 2003). Les automates cellulaires ont prouvé leur capacité à reproduire des phénomènes naturels (voir l'état de l'art établi par Ganguly et coll., 2003), et notamment à faire émerger un comportement macroscopique à partir de règles intervenant à une échelle microscopique, c'est-à-dire celle de la cellule (dans le contexte de cette thèse, le travail de Favis-Mortlock et coll. est à cet égard très significatif, puisque le phénomène émergent est dans ce cas l'apparition de chemins préférentiels d'écoulement sur une pente). Les automates cellulaires offrent un cadre souple et homogène à la modélisation dans un espace discrétisé. Les travaux menés par Di Gregorio et Serra (1999) puis Avolio et coll. (2003), qui ont introduit le modèle des automates cellulaires étendus, sont particulièrement intéressants, puisque leur problématique présente des points communs avec celle de ce travail de thèse (échelle macroscopique, reproduction de processus naturels et notamment le ruissellement). Ces travaux ont notamment ajouté au modèle classique d'automate cellulaire le concept d'influences extérieures à l'espace cellulaire, concept correspondant de façon évidente à la pluie qui doit être reproduite dans le simulateur. L'utilisation de ce modèle nous a menés au développement d'une première version du simulateur de dégradation des sols, qui évoluera vers une seconde version, à cause justement de la prise en compte de la pluie en tant qu'influence externe.

Cette seconde version n'abandonnera pas complètement les automates cellulaires étendus, mais les encapsulera en quelque sorte au sein d'un modèle à évènements discrets, basé sur DEVS (*Discrete EV ents system Specification*), dans lequel les gouttes de pluie sont considérées explicitement comme des évènements discrets externes. Pour respecter l'objectif de cohérence entre le modèle de dégradation et celui de fissuration, nous nous sommes également appuyés pour ce dernier sur un espace cellulaire tridimensionnel et sur le formalisme DEVS. La question peut se poser de l'intérêt de se rattacher à un modèle générique comme celui des automates cellulaires, tant il est vrai qu'il est possible de concevoir et d'implémenter un modèle ayant les caractéristiques d'un modèle générique sans avoir forcément besoin de recourir explicitement à cet héritage. Pour ma part, j'y vois un double apport : premièrement, celui de profiter du travail énorme effectué dans la thématique concernée, en l'occurrence celle des automates cellulaires, pendant ces dernières décennies (j'ai par exemple utilisé des résultats sur l'anisotropie des automates cellulaires de Schönfisch, 1997), et deuxièmement, celui de faciliter la présentation du modèle, en ayant recours au moins à un vocabulaire établi, si ce n'est à un formalisme rigoureux. Cette rigueur dans le formalisme sera justement confortée par l'emploi de DEVS, qui est avant toute chose une spécification formelle.

Nous avons décidé d'une démarche de modélisation qui s'éloigne d'une démarche classique consistant à récupérer des données d'observation puis à concevoir et à calibrer un modèle jusqu'à reproduire ces données. En ce qui concerne la simulation de la dégradation des sols, nous avons voulu pouvoir disposer, dès le début du travail de thèse, d'un modèle ouvert et évolutif sur lequel tester des idées et intégrer des connaissances au fur et à mesure des besoins. Dans un second temps, la comparaison avec des expériences réelles a permis de faire des choix dans les idées utilisées ou d'imposer directement des modifications au modèle. Pour la simulation de la fissuration des sols, la démarche fut encore plus drastique, puisque nous avons proposé un modèle permettant d'obtenir soit un réseau de fissures « générique », en l'absence de toute information sur le contexte de fissuration, ce qui est généralement le cas en synthèse d'images, soit un réseau de fissures particulier dépendant d'un certain nombre d'informations dans le cas où l'utilisateur peut en disposer.

Organisation du mémoire

Ce mémoire s'organise en trois parties. La première partie est un exposé des outils théoriques qui ont été utilisés pendant le travail de thèse, la deuxième partie et la troisième partie sont respectivement consacrées aux deux aspects abordés pendant ce travail : la simulation de la dégradation des sols d'une part, et la simulation de leur fissuration d'autre part. Une conclusion générale, accompagnée d'un exposé des pespectives qui s'ouvrent à l'issue de cette thèse, termine ce document.

Le travail du chercheur scientifique est pour une grande part un travail de communication. Quoique l'image, et singulièrement l'image obtenue par synthèse, soit devenue à juste titre un élément important de toute communication, celle-ci reste basée essentiellement sur des mots. Il m'a donc semblé nécessaire de faire le point sur quelques définitions de notions importantes telles que modèle, système ou simulation, rencontrées souvent dans des publications dans de nombreux domaines, mais pas toujours avec un sens rigoureusement identique. C'est l'objet du chapitre 1, dans lequel je fais appel également à la pensée de certains théoriciens de la méthode scientifique pour éclairer la démarche de modélisation qui a été suivie pendant cette thèse. Les chapitres 2 et 3 dans cette première partie sont une présentation détaillée des deux modèles qui ont servi lors de cette thèse, à savoir les automates cellulaires et DEVS. Le recours à un formalisme précis et rigoureux tel celui offert par DEVS, du point de vue du résultat, n'est sans doute pas indispensable, bien qu'il aide souvent à clarifier la pensée, mais il est un outil précieux et sans égal, du point de vue de la communication, lorsqu'il s'agit de pouvoir décrire sans ambiguïté un modèle, surtout entre communautés scientifiques différentes. C'est pourquoi un effort particulier a été fait dans ce sens.

La deuxième partie de ce mémoire est dédiée à la simulation de la dégradation des sols sous l'action de la pluie, et se divise en quatre chapitres. Le premier chapitre de cette partie (chapitre 4) me permet de présenter le contexte général de cette étude, à savoir l'érosion des sols, à travers un double état de l'art, à la fois en informatique graphique et en science du sol. Les deux chapitres suivants exposent en détail la structure et le fonctionnement de notre simulateur, tout d'abord, dans le chapitre 5, par la présentation du modèle à évènements discrets qui a été utilisé, et ensuite, dans le chapitre 6, par la description des diverses modélisations des processus impliqués. Puisque la démarche de modélisation suivie impliquait des allers-retours fréquents entre expérience et développement du simulateur, ce dernier chapitre contient également quelques descriptions de ces expériences et des résultats qui ont aidé à améliorer le modèle. Néanmoins, le chapitre 7, qui clôt cette deuxième partie, présente la majeure partie des résultats obtenus jusqu'à présent, notamment par comparaison avec une expérience de simulation de pluie menée en laboratoire lors de la dernière année de thèse. Ces résultats sont cependant plus à considérer comme les fruits de nos premières démarches exploratoires du simulateur que comme le bilan d'une tentative systématique de validation. Avant l'exposé de ces résultats, ce chapitre 7 s'ouvre par les réponses que nous avons apportées à une partie importante de notre travail : d'une part comment tranformer les données obtenues par simulation en images, et d'autre part comment extraire de ces données une information sur la présence de croûtes de battance sur le sol et sur la nature de ces croûtes.

Le plan de la troisième partie, consacrée à la simulation de la fissuration d'un sol sous l'effet de la dessiccation, est sensiblement identique à celui de la deuxième partie. Le premier chapitre de cette partie (chapitre 8) permet de montrer, à travers un travail bibliographique, combien la fissuration est un thème qui intéresse autant l'informatique graphique que la science du sol, et également combien ce phénomène très fréquent peut se révéler complexe à appréhender. Le chapitre 9 est consacré à la présentation du modèle que nous avons développé, modèle d'évidence fortement corrélé avec le modèle de dégradation des sols, au moins dans sa structure. Le chapitre 10, dernier chapitre de cette troisième partie, débute par un exposé de la méthode de génération d'images à partir des résultats de simulation de fissuration, avec la présentation de quelques résultats et un début de validation, pour se terminer par la présentation d'une proposition de généralisation de la méthode à un maillage tridimensionnel.

Comme il a été souligné au début de cette introduction, ce travail est le produit d'une thèse en interface entre deux laboratoires, l'un en science du sol, l'autre en informatique. Ce mémoire est donc destiné *a priori* à un double public. Malgré des efforts soutenus en ce sens, il n'a sans doute pas toujours été possible de tenir suffisamment compte de cette particularité, et je prie le lecteur de bien vouloir m'excuser si certaines pages paraissent plus destinées à un public plutôt qu'à l'autre. Première partie

Aspects théoriques de la modélisation

Chapitre

Systèmes, modèles et simulation

Sommaire

1.2	Prin	cipaux d	concepts		
	1.2.1	Système	et processus		
	1.2.2	Modèle	et cadre expérimental		
	1.2.3	Simulati	on		
	1.2.4	Paradigmes et formalismes			
1.3	\mathbf{Asp}	ects mét	hodologiques		
	1.3.1	Nouveau	discours de la méthode		
	1.3.2	Étapes o	le modélisation		
		1.3.2.1	Analyse de la situation et du problème		
		1.3.2.2	Détermination des variables		
		1.3.2.3	Choix ou construction du modèle		
		1.3.2.4	Vérification et validation		
		1.3.2.5	Utilisation du modèle		
1.4	Con	1.3.2.5 clusion	Utilisation du modèle		

1.1 Introduction

Bien que la simulation ait connu un grand succès et de multiples applications depuis l'apparition d'ordinateurs assez performants, elle reste avant tout le fruit d'une démarche scientifique fondée sur la modélisation. En ce sens, et avant d'entrer dans une description plus technique de nos modèles, il nous semble indispensable de replacer les concepts de modélisation et simulation dans un contexte plus général d'une réflexion sur la méthode scientifique, de poser les définitions les plus importantes et de donner certains repères méthodologiques. C'est l'objet de ce chapitre.

Deux attitudes opposées émergent de l'histoire de la science : le réductionnisme et le holisme. Longtemps fondement unique de la méthode scientifique, le réductionnisme cherche à expliquer un phénomène macroscopique en le décomposant en phénomènes élémentaires. Cette méthode analytique a rendu de grands services et permis d'importantes découvertes, mais ne peut s'appliquer avec succès qu'à des systèmes simples et isolés, et échoue notamment devant la complexité des phénomènes naturels. À l'opposé, le holisme (du grec *holos* : tout, totalité) se base sur « la tendance dans la nature à constituer des ensembles qui sont supérieurs à la somme de leurs parties, au travers de l'évolution créatrice » ¹ (Smuts, 1926), c'est-à-dire des unités structurales de complexité croissante mais formant chacune un tout. Le holisme, ne retenant que des structures et des dynamiques globales, ignore donc les phénomènes sousjacents et leurs interactions, et ne peut répondre que partiellement au défi de la modélisation.

Une troisième voie a été ouverte au xx^e siècle par un biologiste (Von Bertalanffy, 1973), la voie *systémique*, qui met en avant la notion de système et qui permet une attitude nouvelle, à la fois analytique et globaliste, consistant à rechercher des lois de l'organisation et les lois d'évolution qui en sont les corollaires, ne relevant ni du réductionnisme ni du holisme, sans en être non plus un intermédiaire (Coquillard et Hill, 1997). Il s'agit d'une démarche de pensée qui cherche à concevoir structures et fonctionnements macroscopiques comme issus d'une organisation de phénomènes interagissant à l'intérieur d'un système se trouvant plongé également dans un environnement et en interaction avec lui. Nous verrons, au travers de la description des principaux concepts de modélisation et simulation qui nourrissent la section suivante, que notre travail s'inscrit dans cette démarche.

1.2 Principaux concepts

L'activité de modélisation se base sur la réalité, et selon les concepts fondamentaux de modélisation et simulation introduits par Zeigler (1984), il est possible d'établir une correspondance entre les notions d'objet (ou *entité*) du monde réel et de modèle fondamental, de système et de modèle, d'expérimentation et de simulation (figure 1.1).

Une entité du monde réel correspond à un objet dont le comportement varie selon le contexte d'étude et selon certains aspects de ce comportement, aspects qui sont également étudiés. Le modèle fondamental (*base model*) est lui une représentation abstraite de toutes les propriétés de l'objet du monde réel étudié, dont en particulier son comportement. Cette représentation doit être valide dans tous les contextes possibles et décrire tous les aspects de l'objet. Il est clair que l'existence de ce modèle fondamental n'est qu'une hypothèse, tant il semblerait difficile en pratique de construire un tel modèle « total » (Vangheluwe, 2000) et il est donc difficile de le décrire plus précisément. En revanche, nous décrivons dans la suite de cette partie les autres notions de système, de modèle, d'expérimentation et de simulation, qui sont également représentées dans la figure 1.1.

1.2.1 Système et processus

La notion de système semble naturelle à l'esprit humain. Système métrique, système solaire, système respiratoire, système politique... voire système D : le langage humain rend

^{1.} The tendency in nature to form wholes that are greater than the sum of the parts through creative evolution.


FIGURE 1.1 – Les concepts de la modélisation et de la simulation introduits par Zeigler (d'après Vangheluwe, 2000).

compte d'un même mode de représentation en nommant par ce même substantif des objets qu'il reconnaît pourtant comme différents (Le Moigne, 1977, p. 75). Le système est évidemment au cœur de la systémique, dont l'un des principaux théoriciens, Le Moigne, fait apparaître les systèmes, non comme étant une propriété intrinsèque de l'objet étudié, mais comme une représentation plus simple et donc utilisable comme objet de modélisation. Le système est plus dans l'esprit du modélisateur que dans la réalité qu'il modélise : le système est un produit artificiel de l'esprit des hommes, il est une abstraction (d'une partie) du monde réel.

Malgré la mise en garde de Le Moigne (« Un système est un système, pas un ensemble! », 1977, p. 18), nous retenons dans un premier temps la définition de (Coquillard et Hill, 1997, p. 3) : « un système est une collection d'objets en interaction ». Cette courte définition apporte un élément important à la notion de système, celle d'interaction entre des éléments constitutifs du système, mais ce n'est pas suffisant. En effet, un des apports fondamentaux de la systémique a été l'introduction dans la pensée scientifique de la notion de système ouvert, par opposition au système *fermé* utilisé notamment par la thermodynamique (Von Bertalanffy, 1973, p. 37). Le système ouvert doit être considéré dans un environnement, avec lequel il peut échanger matière, énergie ou information. Cet échange apparaît clairement dans la définition proposée par Fishwick (1995) : « Un système est une partie de réalité où opèrent le temps et l'espace et des relations causales entre les différentes parties de ce système. Nous posons nécessairement des frontières en fabriquant un monde fermé et en identifiant clairement les éléments qui font partie du système et ceux qui l'affectent de l'extérieur ». Dès lors, il est clair que peut se mettre en place une hiérarchie de systèmes, chaque système pouvant être considéré comme un environnement englobant des sous-systèmes. Par conséquent, la première tâche du modélisateur est de fixer un niveau hiérarchique qui permette de rendre compte du comportement global du système étudié.

Il reste ensuite à définir les constituants du système, et leur interaction. Dans sa thèse, Vangheluwe (2000), reprenant les concepts de la modélisation et de la simulation introduits par Zeigler (1976, 1984), donne cette définition : « un système est un objet bien défini du monde réel, sous des conditions spécifiques, et en ne considérant seulement que des aspects spécifiques de sa structure et de son comportement² ». La description d'un système se divise donc en une structure et un comportement. La structure comprend non seulement les objets qui peuvent constituer le système, mais également une définition des états possibles du système. Le comportement comprend les activités de l'environnement, exogènes, et les activités internes au système, endogènes, qui toutes peuvent affecter l'état du système.

Dans le cadre de notre étude, le système à modéliser est donc le sol, plus précisément sa couche de surface. Nous mettrons à profit lors de la présentation de nos modèles la séparation entre la structure et le comportement. Nous verrons ainsi dans les chapitres qui sont consacrés à cette présentation, que le modèle structurel ne reprend effectivement que certains aspects spécifiques du système, déterminés par nos objectifs : soit l'étude de la dégradation de l'état de surface, soit l'étude de la fissuration. Même si la structure globale est identique, les informations qu'elle contient et qui sont traitées lors d'une simulation sont différentes. Il en est évidemment de même pour le comportement : nous ne nous intéresserons pas aux mêmes activités, ni exogènes (la pluie ne sera pas présente dans le système soumis à la dessiccation) ni endogènes (par exemple le ruissellement et l'infiltration pour l'érosion, l'évaporation et le retrait pour la fissuration).



FIGURE 1.2 – Le référentiel TEF (Temps, Espace, Forme) permettant de repérer la position des objets soumis à des processus (Le Moigne, 1977).

Ces activités endogènes et exogènes sont appelées processus, et font intervenir explicitement la dimension temporelle. Le Moigne (1977) demande à la notion de processus de représenter, et communiquer des représentations, sans devoir accorder la suprématie au temps. Il oppose à la définition donnée en automatique (Boudarel et coll., 1967) : « nous appellerons processus (...) un ensemble physique susceptible d'évoluer en fonction d'une variable indépendante appelée temps », qu'il juge trop restrictive, strictement causaliste et réversible, celle donnée par un biologiste (Miller, 1965) : « tout changement dans le temps de matière, d'énergie ou d'information est un processus ». Le temps ne doit plus être l'explication du changement, le processus ne doit plus être réversible. Pour définir le processus de façon « quasi

^{2.} A system is a well defined object in the real world under specific conditions, only considering specific aspects of its structure and behaviour.

concrète », Le Moigne introduit le référentiel temps-espace-forme, et propose que le processus se définisse par l'ensemble ordonné des changements affectant la position dans le temps, dans l'espace (transport ou transmission), ou dans leur forme (transformation), d'une famille au moins d'objets identifiés (figure 1.2). Nous voyons que ce que nous avons appelé processus dès l'introduction générale de ce mémoire répond à cette définition, puisqu'il s'agit avant tout de transferts, d'eau ou de particules, et que le retrait du sol, qui intervient dans la fissuration, en est une transformation (que nous traduirons d'ailleurs par le *transport* d'une quantité particulière).

Le Moigne (1990) différencie les « systèmes compliqués », complètement décomposables, des « systèmes complexes », à la fois indécomposables et potentiellement imprévisibles. La complexité n'est (peut-être) pas une propriété naturelle des phénomènes, mais elle existe en tant que propriété attribuée, délibérément, par le modélisateur aux représentations qu'il se construit des phénomènes qu'il *perçoit* complexes. Que la complexité soit ou non dans la nature des choses n'affectera pas la pertinence de ses raisonnements. La notion de système peut être adoptée pour décrire la complexité, qui est à la fois, étymologiquement, un enchevêtrement et une connexion, car elle permet d'exprimer la conjonction de deux perceptions antagonistes : un phénomène que l'on perçoit d'une part dans son unité et d'autre part dans ses interactions internes entre composants actifs dont il constitue la composition résultante. Un système *compliqué* peut s'expliquer après une simplification, mais en simplifiant un système *complexe*, on le mutile et on détruit *a priori* son intelligibilité. Pour parvenir à comprendre (non à expliquer) un système complexe, on doit le *modéliser* (Le Moigne, 1990, p. 11), donc construire un modèle. Nous allons définir cette notion dans la section suivante, puisque nous nous situons bien dans le cadre de l'étude d'un système, la surface du sol, que nous percevons comme complexe, qui ne peut se réduire en ses composants et qui présente de nombreuses interactions entre les processus qui l'affectent.

1.2.2 Modèle et cadre expérimental

Dans ses *Cahiers*, Paul Valery a écrit que nous ne raisonnons que sur des modèles. Autrement dit, sans modèle, point de pensée rationnelle, point de science. Cette assertion ne paraît devoir souffrir aucune contestation, tellement la notion de modèle semble d'évidence très présente dans la pensée scientifique. L'histoire des sciences peut même se voir comme une succession de modèles, représentant chacun, à un certain moment, l'avancée des connaissances d'un domaine particulier. Pourtant, d'après Le Moigne (1977, p. 13), ce n'est que depuis le début du xx^e siècle que le concept de modèle a droit de cité dans la pratique scientifique, et sans doute considérons-nous aujourd'hui, dans l'histoire des sciences, comme modèle ce qui relève (relevait) plus de la théorie que du modèle. La différence novatrice, mise en avant par la systémique, tient à ce que la modélisation postule *a priori* non seulement la pluralité des modèles concevables d'un même phénomène, mais surtout la pluralité des méthodes de modélisation. Cela implique également un changement plus subtil des finalités de la connaissance : là où il fallait hier expliquer l'objet pour le connaître, il faut aujourd'hui le connaître assez, l'interpréter donc, pour anticiper son comportement par la modélisation.

Avant d'entrer plus précisément dans la définition d'un modèle, nous empruntons à Fishwick (2007) l'idée de donner un éclairage différent à ce mot grâce à un détour par l'étymologie. Modèle vient du latin *modulus* (diminutif de *modus* : mesure) qui a donné également en français module et moule. D'une part, le module est en architecture une mesure servant à donner les proportions d'un bâtiment. D'autre part, le moule sert à donner une forme à une matière liquide ou pâteuse : il rend cohérent, par agrégation, ce qui ne l'était pas. Il nous semble intéressant de trouver, dans ces cousins étymologiques de modèle, les notions de mesure de référence et d'agrégation : le modélisateur fait à nos yeux un travail d'agrégation de connaissances en un outil qui à terme sera un moyen d'évaluation, sinon de mesure, du monde réel.

Une des définitions les plus concises de modèle que l'on puisse trouver est sans doute celle de Minsky (1965) : « pour un observateur B, un objet A* est un modèle d'un objet A si B peut utiliser A* pour répondre à des questions qui l'intéressent à propos de A³ ». Cette définition simple a le grand mérite de poser d'emblée la définition du côté de l'utilisateur du modèle, et donc de son intérêt comme outil de connaissance. Dès lors qu'il permet de « répondre à des questions », le modèle peut s'affranchir de toute autre condition pour exister en tant que tel : ce n'est pas parce qu'il ne reflètera pas quantitativement, d'une manière exacte, des résultats expérimentaux, qu'un modèle ne pourra pas apprendre quelque chose, par son comportement, sur le comportement du système réel. Un modèle, même mis en échec lors d'une phase de validation quantitative (nous y reviendrons), aura au moins cette réponse, minimale mais non négligeable, à nous apporter, celle que nos connaissances du système à modéliser sont encore insuffisantes. En cela, nous autorisons une plus grande souplesse au modèle que cette définition opérationnelle donnée en automatique : « un modèle d'un phénomène ou d'un processus est essentiellement un mode de représentation tel qu'il permette, d'une part, de rendre compte de toutes les observations faites et, d'autre part, de prévoir le comportement du système considéré dans des conditions plus variées que celles qui ont donné naissance aux observations » (Naslin, 1974, p. 164). Si l'ambition d'une telle définition est louable, il nous semble qu'elle écarte des modèles qui, même sans rendre compte de toutes les observations, même sans être exactement prédictif, ont un rôle à jouer dans l'étude et la compréhension d'un phénomène.

Dans son introduction au livre de Coquillard et Hill (1997), Serge Frontier propose cette définition : « 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 ». Se trouvent ainsi mises en avant, comme bases d'une modélisation, les notions primordiales de simplification, de données et d'hypothèses. Il est clair aussi qu'intervient dans le processus de sélection des données et des hypothèses, la vision propre, subjective, du système qu'a le modélisateur. Frontier précise que le modèle doit avoir deux qualités : la maniabilité, qui doit être supérieure à celle de la réalité brute, et la pertinence, c'est-à-dire que les conclusions et décisions d'actions déduites du comportement du modèle doivent être celles que l'on déduirait d'un examen de la réalité. Coquillard et Hill ajoutent que la dernière caractéristique fondamentale d'un modèle réside dans le fait qu'il est construit en fonction d'un ensemble d'objectifs. La notion d'objectifs va être reprise et formalisée dans cette autre définition : « le modèle donne une description fidèle d'un système dans le contexte d'un cadre expérimental ⁴ (Vangheluwe, 2000) », qui fait apparaître, en plus de la notion de système, celle de *cadre expérimental*.

Le cadre expérimental (Zeigler et coll., 2000) se définit aussi bien dans le monde réel que dans le contexte d'une simulation. Dans ces deux cas, le cadre expérimental permet de décrire les conditions expérimentales dans lesquelles le système (ou le modèle dans le cas de la

^{3.} 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.

^{4.} A model gives an accurate description of a system within the context of a given experimental frame.

simulation) est utilisé. En cela, il reflète donc les *objectifs* de l'expérimentateur. De manière basique, le cadre expérimental consiste en deux jeux de variables, les entrées et les sorties (figure 1.3). Les entrées sont fournies par un « générateur » (generator) qui décrit les stimulus appliqués au système ou au modèle pendant l'expérience, y compris les données d'initialisation. Le générateur permet donc d'introduire la notion d'environnement agissant ainsi que celle d'interactivité pour l'expérimentateur. Les données brutes issues de l'expérience (souvent des mesures) sont transformées par un « interpréteur » (transducer) qui permet leur exploitation. En plus du générateur et de l'interpréteur, le cadre expérimental peut comprendre un « accepteur » (acceptor) qui, par comparaison des entrées et des sorties correspondantes, peut décider si le système (réel ou modélisé) répond aux objectifs de l'expérimentateur.



FIGURE 1.3 – Représentation du cadre expérimental (d'après Vangheluwe, 2000).

Nous avons défini nos objectifs dans l'introduction générale et cette définition permettra de préciser le cadre expérimental pour les deux modélisations auxquelles nous nous intéressons. Ainsi, pour la dégradation de la structure du sol, le générateur devra, en plus de la transmission des données d'initialisation, être également responsable de la génération de la pluie, puisque c'est le principal stimulus qui sera appliqué au sol. Notons que ce cadre expérimental convient aussi pour les expériences réelles menées sous simulateur de pluie, qui tient alors le rôle de générateur. L'interpréteur nous permettra pour sa part de prendre en compte dans le cadre expérimental une part importante de notre travail : la visualisation, qui, au travers des images ou animations produites, se positionne non seulement comme un outil de présentation et de communication des résultats, mais se révèle également être un très bon outil de vérification et de validation des modèles (Coquillard et Hill, 1997). Comme nous venons de le voir, la définition du cadre expérimental fait appel la notion fondamentale de simulation que nous développons dans la section suivante.

1.2.3 Simulation

D'après Hill (1993), la simulation consiste à faire évoluer une abstraction d'un système au cours du temps afin d'aider à comprendre le fonctionnement de ce système et à appréhender certaines de ses caractéristiques dynamiques, dans l'objectif d'évaluer différentes décisions. La simulation associe donc étroitement modèle et temps, c'est « le modèle plongé dans le temps » (Coquillard et Hill, 1997, p 9). Le parallèle entre la réalité et le monde du modèle (figure 1.1) nous montre que la simulation est le pendant de l'expérimentation, qui est « l'acte physique de mener à bien une expérience ⁵ » (Vangheluwe, 2000). L'expérimentation implique l'observation, qui produit des mesures, et il en est de même pour la simulation.

^{5.} Experimentation is the physical act of carrying out an experiment.



FIGURE 1.4 – Modélisation, simulation et compréhension des phénomènes (Tisseau et Parenthoën, 2005).

Partant de quatre principaux types de modèles : les modèles perceptifs, formels, analogiques et numériques, Tisseau et Parenthoën (2005) distinguent cinq familles de simulation (figure 1.4).

- 1. Les premières observations d'un phénomène réel proviennent de nos perceptions sensorielles qui, confrontées à notre imaginaire, produisent les intuitions *in petto*, de manière non codifiée et non raisonnée. C'est par exemple en considérant la carte du globe (simple perception visuelle), qu'Alfred Wegener imaginera le principe de la dérive des continents.
- 2. Ces premières perceptions seront rationalisées, notamment dans une démarche scientifique, pour donner les raisonnements *in abstracto*. Ces raisonnements pourront amener à des prédictions sur le système étudié, prédictions qui pourront être confrontées à la réalité par des expérimentations *in vivo*. C'est ainsi que la découverte de la planète Neptune a été faite uniquement par le calcul, *in abstracto*⁶, par Adams et Le Verrier (et l'un indépendamment de l'autre), à partir de la trajectoire et des caractéristiques d'Uranus, le télescope de l'astronome allemand Galle ne servant, *in vivo*, qu'à la confirmation de la découverte.
- 3. L'approche formelle a cependant ses limites, notamment dans le cas des systèmes com-

^{6.} Ce qui fit dire à Arago, devant l'Académie des Sciences, la célèbre phrase : « M. Le Verrier vit le nouvel astre au bout de sa plume », ce qui pourrait donner une autre définition, plus poétique, du raisonnement *in abstracto*.

plexes, et l'expérimentateur peut alors recourir aux simulations analogiques *in vitro* : analogie d'échelle, grâce à un prototype ou une maquette (par exemple pour l'étude des contraintes mécaniques sur un barrage), ou analogie formelle, par substitution (par exemple par remplacement de l'homme par l'animal dans une expérimentation médicamenteuse)⁷.

- 4. Dernière famille de modélisation, la modélisation numérique conduit aux calculs *in silico*, lorsqu'il s'agit de résoudre des systèmes d'équations mathématiques (les exemples sont nombreux, des simulations bancaires à la caractérisation du rayonnement électromagnétique d'une antenne).
- 5. Depuis l'apparition de l'ordinateur, la modélisation numérique peut conduire aussi, lorsque l'humain est présent dans la boucle de simulation, à l'expérimentation *in virtuo*. Contrairement à ce que l'expression latine laisse à penser, nous ne réduisons pas la définition de ce type de simulation à la réalité virtuelle, considérant que l'interactivité, par la possibilité qu'elle offre à l'utilisateur d'intervenir et de modifier les paramètres d'une simulation, suffit à elle seule à le transformer en véritable acteur de l'expérimentation en cours.

La simulation numérique offre des avantages par rapport à l'expérimentation (et sans aucun doute aussi par rapport à la simulation analogique) : elle est souvent plus simple à mettre en œuvre, reproductible à l'infini avec exactement les mêmes conditions initiales, plus aisément configurable, source de mesures plus accessibles que dans le monde réel. Elle peut même permettre de réaliser des expérimentations impossibles autrement. Elle peut englober les simulations analogiques, puisqu'elle est *a priori* capable de les simuler à leur tour : nous avons ainsi simulé (virtuellement) un simulateur de pluie (réel), et à cette fin nous avons nourri d'observations *in vitro* notre simulateur *in virtuo*. Notons enfin qu'en plus d'interroger et d'étudier le comportement du système, la simulation permet en amont de vérifier et valider le modèle : elle peut mettre en évidence ses défauts de cohérence, l'importance relative des différentes variables, son domaine effectif de validité.

Nous terminerons cette partie par une remarque concernant plus particulièrement l'informatique graphique. Il semble que dans bien des cas, dans ce domaine, l'emploi de la notion de simulation soit en contradiction avec la définition de Hill : la synthèse d'image recourt à des simulations non pour comprendre un système mais pour reproduire son image. La notion de temps, d'évolution d'un modèle, est même parfois complètement absente de ce qui est décrit comme une simulation. Le terme de simulation (ou *simulating*, simulant) est fréquent dans les titres de la littérature, mais il nous semble qu'alors l'action de simuler est plus à prendre dans son sens premier : faire (res)semblant, rendre semblable⁸. Nous sommes bien en présence de ce que Ken Musgrave nomme *ontogenetic*⁹ modeling par opposition à *physical modeling* : « l'idée fondamentale de la modélisation ontogénétique est que, dans le domaine de l'image de synthèse, c'est une stratégie légitime d'ingénierie que de construire des modèles basés sur

^{7.} Le simulateur de pluie utilisé au cours de cette thèse est un autre exemple de simulateur analogique : il s'agit d'un dispositif (bien réel) permettant d'arroser une parcelle de terrain avec des caractéristiques de pluie (intensité, répartition, taille, vitesse et énergie cinétique des gouttes) comparables à celles d'une pluie naturelle.

^{8.} SEMBLER : du latin *simulare* ou *similare*, imiter, copier, représenter, reproduire. Le mot fait double emploi avec SIMULER (Dictionnaire d'étymologie française d'Auguste Sheler). SEMBLER : du latin *simulare*, imiter, feindre, qui est le dénominatif de *simul*, de *similis*; car *simul* et *similis* sont de même origine (Littré).

^{9.} D'après le Webster's Collegiate Dictionary, ontogenetic : based on visible morphological character.

une apparence subjective, morphologique (ou autre)¹⁰ » (Ebert et coll., 2002, p. 443). La simulation est donc bien dans ce cas l'expression de la recherche d'une ressemblance avec le réel, et non de l'étude d'un phénomène (au travers de son modèle) par son comportement au cours du temps. Nous nous situons pour notre part, et c'est en quoi notre démarche est originale, dans les deux acceptations de ce mot, puisque, si notre travail vise avant tout à cette étude d'un phénomène, la production d'images réalistes n'en est pas écartée, et nous verrons même que, partant de la *simulation* (au sens de Hill) de la fissuration du sol, nous sommes parvenus à la *simulation* (au sens de Musgrave) de la fissuration d'objets tridimensionnels.

1.2.4 Paradigmes et formalismes

Le mot paradigme tient son origine du mot grec ancien paradeigma qui signifie modèle ou exemple. Son arrivée dans le vocabulaire de la science est due à Thomas Kuhn, qui le popularisa dans son ouvrage « La structure des révolutions scientifiques » (Kuhn, 1962). Il est difficile d'en extraire une définition précise de paradigme, Masterman (1970) y a relevé en effet pas moins de 21 acceptions du terme paradigme... Néanmoins, une première définition très générale pourrait être : un cadre qui englobe les lois, les théories, les applications et les dispositifs expérimentaux permettant, à un moment donné, de développer la connaissance scientifique d'un domaine du réel. Cette définition globale correspond bien au concept de révolution scientifique vu par Kuhn et qui se traduit par un changement de paradigme (paradiqm shift). En réponse à la critique de Masterman, Kuhn, dans la postface de la troisième édition de son livre, a remplacé le terme paradigme par celui de « matrice disciplinaire », qui représente un ensemble de concepts, lois, techniques, méthodes, auquel se réfèrent les praticiens d'une discipline particulière. Un paradigme est donc un cadre de référence stable qui se constitue en tant qu'acquis scientifique reconnu et qui, pour un temps, fournit à une communauté des chercheurs des problèmes-types et des solutions. Autrement dit c'est, dans un domaine particulier, une manière de se représenter les problèmes et de réfléchir sur eux, aussi bien qu'une méthode de résolution. Il existe ainsi des paradigmes dans toutes les sciences. Un paradigme de modélisation peut donc être considéré comme l'ensemble des définitions et formalismes, des méthodes, des outils et des techniques qui caractérisent une activité de modélisation. Nous terminerons cet éclairage de la notion de paradigme par la définition qu'en donne Edgar Morin dans sa Méthode : « Un paradigme permet et oriente le discours explicatif (...) Il nous permet d'élaborer une théorie non mutilante, non unidimensionnelle (...) mais il ne produit pas automatiquement cette théorie. Au minimum c'est un pense-bête qui nous empêche d'oublier la complexité (...) Au maximum, c'est un pense-intelligent, qui nous aide à concevoir cette complexité » (cité par Fortin, 2000 p. 97).

Un paradigme comprend donc des outils opérationnels, et le formalisme en est un. Le formalisme apporte à un paradigme tous les avantages d'une écriture formelle, dans un système symbolique qui peut lui être propre. Ramat et Preux (2003) proposent une classification des formalismes disponibles en modélisation (et donc qui peut se comprendre aussi, par extension, comme une classification des paradigmes de modélisation), basée sur la façon de prendre en compte dans le modèle trois variables : les changements d'état, le temps et l'espace (figure 1.5). Chacune de ces variables peut être considérée comme évoluant de façon discrète ou continue (figure 1.6). La croissance d'une plante, une modification de la température sont des

^{10.} The underlying idea of ontogenetic modeling is that, in the field of image synthesis, it is a legitimate engineering strategy to construct models based on subjective morphological (or other) *semblance*.



FIGURE 1.5 – Classification des formalismes selon les aspects continus ou discrets des changements d'état, du temps et de l'espace (Ramat et Preux, 2003).

changements d'état continus. L'accroissement d'une population (dénombrable), la naissance ou la mort d'une cellule sont des changements d'état discrets. Discrétiser le temps revient à fixer un pas de temps Δt , une durée virtuelle qui divise le temps de la simulation en un certain nombre d'intervalles (figure 1.6(b)). Pendant la simulation, il faut déterminer quels évènements doivent se produire pendant chacun de ces intervalles. Ces évènements sont alors traités « en parallèle », c'est-à-dire à la même date de la simulation. Si le temps doit varier de manière continue, soit on a recours à certains outils mathématiques, soit ce sont les évènements (discrets, ordonnés chronologiquement) qui font avancer la simulation quand ils se produisent (figure 1.6(c)). Il est intéressant de remarquer que les simulations dirigées par évènements incluent les simulations dirigées par le temps : il suffit, pour considérer une simulation à temps discret comme une simulation à évènements discrets, d'interpréter les tops de l'horloge (autrement dit, chaque fois qu'un pas de temps est dépassé) comme des évènements en eux-mêmes. Il en découle qu'un formalisme basé sur les évènements discrets est un bon candidat (meilleur en tout cas qu'un formalisme à temps discret) à une certaine généricité. Enfin, les formalismes diffèrent selon qu'ils intègrent ou non l'effet de l'espace, et si cet espace est discrétisé ou non.



FIGURE 1.6 – Trois types de simulation, selon la prise en compte continue ou discrète des changements d'état et du temps.

Cette classification a le mérite d'exister et de permettre de guider simplement les choix du modélisateur mais elle n'est pas exempte de défauts. D'abord, les modèles à évènements dis-

crets et les automates cellulaires peuvent-ils réellement être considérés seulement comme des formalismes? Ils nous semblent plus proches de paradigmes, pouvant contenir en eux-mêmes plusieurs formalismes ¹¹. Ensuite, certains types de modélisation ne sont pas représentés dans les formalismes de ce tableau, tels les systèmes multi-agents et les systèmes flous. Enfin, une catégorisation supplémentaire des formalismes pourrait être ajoutée à partir du traitement des processus, selon qu'il est déterministe ou stochastique.

Nous avons besoin pour notre étude de représenter des processus continus dans le temps pour certains, et discrets pour d'autres, et continus dans un espace qui doit être tridimensionnel. Suivant en cela la grande majorité des modèles d'érosion existant, nous discrétisons cet espace en une grille régulière, et dans ce contexte d'espace discrétisé, notre choix s'est porté sur les automates cellulaires, non seulement parce qu'ils ont montré leur capacité à simuler des phénomènes naturels (Ganguly et coll., 2003) mais aussi parce qu'ils offrent un cadre souple et homogène à la modélisation, ce qui nous a permis d'utiliser et de tester justement divers formalismes, puisqu'aucun ne pouvait prétendre fournir une solution définitive. Le processus de la pluie, discret dans le temps et exogène, nous a amenés dans un second temps à une conception du modèle basée sur les évènements discrets, mais nous avons vu qu'il était possible de considérer le temps discret des automates cellulaires comme un cas particulier d'évènement discret. De plus, nous avons utilisé un modèle à évènements discrets DEVS qui, comme nous le verrons, permet d'établir une équivalence rigoureuse avec un automate cellulaire.

1.3 Aspects méthodologiques

1.3.1 Nouveau discours de la méthode

Puisque nous abordons les aspects méthodologiques de la modélisation, il nous semble intéressant de rappeler ici les préceptes énoncés par Le Moigne (1977) en écho au célèbre « Discours de la méthode » de René Descartes (1637).

- 1. Le précepte de pertinence : convenir que tout objet que nous considérerons se définit par rapport aux intentions implicites ou explicites du modélisateur. Ne jamais s'interdire de mettre en doute cette définition si, nos intentions se modifiant, la perception que nous avions de cet objet se modifie.
- 2. Le précepte du globalisme : considérer toujours l'objet à connaître par notre intelligence comme une partie immergée et active au sein d'un plus grand tout. Le percevoir d'abord globalement, dans sa relation fonctionnelle avec son environnement, sans se soucier outre mesure d'établir une image fidèle de sa structure interne, dont l'existence et l'unicité ne seront jamais tenues pour acquises.
- 3. Le précepte téléologique : interpréter l'objet non pas en lui-même, mais par son comportement, sans chercher à expliquer a priori ce comportement par quelque loi impliquée dans une éventuelle structure. Comprendre en revanche ce comportement et les ressources qu'il mobilise par rapport aux projets que, librement, le modélisateur attribue

^{11.} Le mérite de DEVS qui sera présenté dans le chapitre 3 est justement de proposer un formalisme unique et unificateur des systèmes à évènements discrets (et au-delà).

à l'objet. Tenir l'identification de ces hypothétiques projets pour un acte rationnel de l'intelligence et convenir que leur démonstration sera bien rarement possible.

4. Le précepte de l'agrégativité : convenir que toute représentation est partisane, non pas par oubli du modélisateur, mais délibérément. Chercher en conséquence quelques recettes susceptibles de guider la sélection d'agrégats tenus pour pertinents et exclure l'illusoire objectivité d'un recensement exhaustif des éléments à considérer.

Aux quatre préceptes énoncés par Descartes, Le Moigne oppose donc quatre nouveaux préceptes « systémiques ». Au précepte de l'évidence ¹², il oppose celui de pertinence ; au réductionnisme¹³, le globalisme; au causalisme¹⁴, le téléologisme, et à l'exhaustivité¹⁵, l'agrégativité. Ces préceptes constituent des règles sur une nouvelle façon de concevoir la réalité et de lui attribuer certaines propriétés, règles qu'il nous semble important de garder à l'esprit et qui sont même, pour la plupart, directement applicables lors d'une modélisation. Ainsi, le premier précepte nous dit qu'il n'y a pas de connaissances indiscutables, il n'y a que des connaissances relatives aux *intentions* du modélisateur, et que même la perception du réel, loin de pouvoir prétendre à l'objectivité, dépend de ces intentions. Le deuxième précepte reprend l'idée que le réductionnisme mène à une impasse, qu'il faut comprendre le système dans sa relation avec son environnement, sans faire de sa décomposition (qui n'est pas forcément unique) une priorité. Le troisième précepte oppose une explication cause-effet à une interprétation (ou une compréhension) comportement-finalité. Enfin le dernier précepte rejette le principe de l'inventaire, d'ailleurs souvent impossible à mettre en pratique, pour lui substituer une sélection, explicitement revendiquée par le modélisateur, d'ensembles qu'il ne cherche pas à dénombrer, sans plus prétendre tout expliquer de l'objet considéré, mais seulement interpréter ce à quoi il s'intéresse.

1.3.2 Étapes de modélisation

Pavé (1994) énumère sept étapes de modélisation d'un système :

- 1. analyse de la situation et du problème : il faut élaborer une vue synthétique de la situation, comprenant les données disponibles et les objectifs de la modélisation;
- caractérisation et analyse du système : il faut choisir entre un système fermé ou un système ouvert, classer les variables en variables d'état, variables d'action, variables d'observation, entrées et sorties du système, et enfin définir les relations entre ces variables;
- 3. choix ou construction du modèle;
- étude des propriétés du modèle : cette étape consiste à vérifier que les propriétés qualitatives du modèle sont en accord avec ce que l'expérience permet d'observer, afin d'aboutir à une validation qualitative;
- 5. identification (ou calibrage) : il faut attribuer des valeurs numériques aux paramètres du modèle à partir de données expérimentales;

^{12. « (...)} ce qui se présenterait si clairement et si distinctement à mon esprit, que je n'eusse aucune occasion de le mettre en doute. »

^{13. « (...)} de diviser chacune des difficultés que j'examinerais, en autant de parcelles qu'il se pourrait (...) »

^{14. « (...)} en commençant par les objets les plus simples et les plus aisés à connaître, pour monter peu à peu comme par degrés jusques à la connaissance des plus composés (...) »

^{15. « (...)} faire partout des dénombrements si entiers et des revues si générales, que je fusse assuré de ne rien omettre. »

- 6. validation : il s'agit cette fois d'une validation quantitative basée sur des tests et des comparaisons avec des données expérimentales;
- 7. utilisation du modèle.

Comme le souligne Pavé, ces étapes ne sont pas obligatoirement parcourues, et il peut y avoir des allers-retours : un échec de validation peut demander à revenir sur la construction du modèle, l'utilisation du modèle peut amener à reformuler les objectifs initiaux, etc. Nous apportons maintenant des précisions sur certains points de cette liste.

1.3.2.1 Analyse de la situation et du problème

L'étape d'analyse de la situation et du problème permet d'envisager la modélisation sous l'angle des informations accessibles pour les étapes suivantes, mais également des objectifs poursuivis, ce qui correspond parfaitement au concept de cadre expérimental introduit par Zeigler (1976, voir section 1.2.2). En ce qui concerne les motivations d'une activité de modélisation, Coquillard et Hill (1997) distinguent les deux cas suivants :

- 1. le modèle est construit dans le but de *fournir des prédictions* les plus précises possibles concernant le comportement du système réel;
- 2. le modèle est construit à la manière d'une théorie scientifique, afin d'augmenter la connaissance du fonctionnement interne du système réel et donc de faciliter sa compréhension.

Nous pouvons ajouter, particulièrement pour ce qui est de ce travail de thèse, une motivation d'agrégation et de test des connaissances sur les structures ou les processus qui sont simulés, qui transforme le modèle en une sorte « d'état de l'art » concret, voire même à un « banc d'essai » par le biais des simulations et de la validation.

Préalablement à la construction du modèle, l'abstraction de la réalité en un système impose de définir le niveau d'abstraction du système. Le niveau d'abstraction représente l'échelle d'étude du problème (par exemple, pour un phénomène spatialisé, la dimension de l'espace étudié fait partie du niveau d'abstraction). Son identification impose l'examen des données disponibles, mais dépend bien évidemment également des objectifs poursuivis. Dans le cadre de ce travail de thèse, nous nous intéressons à l'étude des sols, laquelle concerne des échelles très diverses, des échanges biochimiques microscopiques aux coulées de boue sur plusieurs hectares. Nous avons clairement identifié l'échelle spatiale de notre système, le mètre carré, qui est la plus adaptée à la description de l'évolution de la structure de surface du sol. Cette échelle permet en effet une description fine de la surface, de sa topographie aussi bien que de sa granulométrie, tout en restant suffisamment vaste pour tenir compte des variations à une échelle décimétrique de l'état de la surface du sol. L'échelle temporelle est elle aussi bien définie, elle est de quelques minutes à quelques heures (pour la dégradation sous l'action de la pluie), jusqu'à quelques jours (pour la fissuration).

1.3.2.2 Détermination des variables

La détermination des variables correspond à la sélection des paramètres qui doivent être pris en compte dans le système, ceux qui jouent un rôle significatif pour le niveau d'abstraction choisi. Cette sélection pose une question connexe, celle de la complexité du modèle. Il est acquis qu'au delà d'un certain point, l'augmentation du nombre de variables n'apporte rien, sinon augmenter la complexité du modèle et accumuler les incertitudes (figure 1.7). Un moyen efficace d'éviter la prolifération des variables élémentaires est d'appliquer le principe d'agrégation, en employant des variables *holistiques*, c'est-à-dire des variables qui soient la résultante d'actions d'un ensemble de variables agissant de manière conjointe et simultanée. Nous avons gardé à l'esprit, pendant l'étape de modélisation, le danger de la multiplication des variables, et si nous sommes parvenus à conserver pour la structure des modèles un nombre restreint d'informations quantitatives, il faut reconnaître que nous avons été souvent confrontés à une certaine prolifération des paramètres utilisés notamment par les formules empiriques de la science du sol.



FIGURE 1.7 – Les connaissances tirées du modèle ne s'accroissent pas au-delà d'un certain nombre de variables, et les incertitudes cumulées font décroître l'intérêt de celui-ci (Coquillard et Hill, 1997).

1.3.2.3 Choix ou construction du modèle

La figure 1.5 énumère les choix fondamentaux à opérer au début de la modélisation : les changements d'états sont-ils continus ou discrets, la simulation doit-elle être dirigée par le temps (temps discret) ou par les évènements (évènements discrets), l'espace doit-il être pris en compte, et si oui de manière continue ou discrète? Ces choix sont guidés par les connaissances du système, par les données disponibles et par les objectifs poursuivis. Un autre choix important est l'introduction ou non de l'aléatoire dans le modèle : sera-t-il complètement déterministe ou stochastique¹⁶? En général un système n'est jamais totalement déterministe ou stochastique, mais comporte une part des deux types d'activités (Coquillard et Hill, 1997, p. 6). Notons que tous ces choix se rapportent au modèle, et non au système : un système peut être continu et déterministe, et son modèle discret et stochastique, et nous avons déjà évoqué par exemple notre utilisation d'une grille discrète pour représenter le sol et ainsi spatialiser l'action de processus pourtant continus. Nous pouvons ajouter d'autre part que dans nos modèles, certains de ces processus ont été modélisés de manière déterministe, alors que d'autres ont fait appel à des fonctions de distribution et donc à des tirages aléatoires. Cette modélisation en partie stochastique n'est pas une prise de position contre le déterminisme du système, et de plus, une telle modélisation n'empêche pas un certain déterminisme « de transparaître »¹⁷, ainsi que l'ont montré Favis-Mortlock et coll. (2000).

^{16.} Dans le cas d'un modèle stochastique, une attention particulière doit être apportée à la génération de nombres pseudo-aléatoires utilisée.

^{17.} Despite the almost total dominance of random effects in the early stages of a simulation (...) determinism "shines through" and eventually dominates (Favis-Mortlock et coll., 2000).

1.3.2.4 Vérification et validation

Pavé distingue une validation qualitative et une validation quantitative, mais ne fait pas mention de la vérification, qui est le processus d'inspection de la cohérence du programme de simulation par rapport au modèle dont il est dérivé (Vangheluwe, 2000) : il s'agit de vérifier que le simulateur reflète correctement ce modèle dit conceptuel (figure 1.8), ce qui assure que le programme donnera une représentation fidèle du comportement implicitement défini par la spécification de ce modèle. Coquillard et Hill (1997) ajoutent deux étapes, qui peuvent être également considérées comme comprises dans la vérification. Il s'agit du contrôle de la *fiabilité logicielle*, qui permet de s'assurer que même lorsque les variables d'entrée sont poussées dans leurs valeurs extrêmes, aucun comportement aberrant n'apparaît, et du contrôle de la *robustesse logicielle*, qui doit révéler une trop grande sensibilité du comportement global du simulateur à des variations faibles des variables d'entrée du programme.



FIGURE 1.8 – Les concepts de vérification et de validation (d'après Vangheluwe, 2000).

Un modèle doit reproduire au mieux la réalité du système étudié : l'entrée de données initiales doit donner des sorties de simulation en adéquation avec les mesures expérimentales effectuées sur le système réel. C'est le rôle de la validation de confirmer cette capacité du simulateur. Toute validation doit se faire à l'intérieur d'un cadre expérimental bien défini; un modèle peut être valide pour un cadre expérimental et invalide pour un autre. C'est particulièrement important quand il s'agit de coupler plusieurs modèles dans une simulation : il faut que chaque modèle soit valide dans le cadre expérimental défini pour l'ensemble des modèles mis en jeu. Vangheluwe différencie trois types de validation (figure 1.8) : la validation conceptuelle (évaluation du réalisme du modèle conceptuel par rapport au système réel et aux buts de l'étude), la validation structurelle (évaluation de la structure du simulateur par rapport à la structure perçue du système réel), et enfin la validation comportementale (évaluation du comportement du simulateur, par comparaison des effets observés et des sorties recueillies). Coquillard et Hill (1997) insistent sur la différence entre validation et calibrage d'une part (un modèle calibré, même à l'aide d'un jeu de données de qualité, ne constitue pas un modèle validé), et entre validation et exploitabilité d'autre part (un modèle peut être déclaré non valide mais rester intéressant à explorer). À ce propos, nous verrons que, bien que nous ne prétendons pas avoir validé nos modèles, nous avons quand même abordé une démarche exploratoire qui a donné des résultats exploitables.

1.3.2.5 Utilisation du modèle

La dernière étape est l'utilisation du modèle, qui peut se différencier en *exploitation* et *exploration*. L'exploitation se base principalement sur le caractère prédictif du modèle (validé) : la simulation va permettre de savoir comment le système évolue selon certains scénarios, comment il réagit à différentes contraintes ou perturbations, et en général autoriser des expérimentations difficilement réalisables *in vivo* ou *in vitro*. Le modèle devient un véritable laboratoire *in virtuo*. L'exploration correspond plus à une démarche de recherche sur le comportement du système. Elle consiste à jouer avec les hypothèses du modèle, avec les valeurs de ses paramètres, et peut permettre au final d'apporter de nouvelles connaissances sur le système.

1.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de constater que la modélisation est au cœur d'une réflexion sur la méthode scientifique. Le réductionnisme postule que la séparation d'un tout en ses parties suffit à la compréhension des propriétés du tout, à partir des propriétés des différentes parties. La question fondamentale est dans ce cas : de quoi le système étudié est-il fait ? Autrement dit, quels sont les éléments constitutifs, les objets ou les organes dont la combinaison constitue ou peut constituer le phénomène ou le système à modéliser? Cette méthode ne peut s'appliquer avec succès aux systèmes complexes tels que les phénomènes naturels. La méthode systémique a ouvert une autre voie, en partant plutôt de la question : qu'est-ce que le système fait ? Quelles sont les fonctions et les transformations, les opérations assurées ou à assurer? Puisque nous considérons le sol, objet de notre étude, comme un système complexe, ce sont ces questions qui guident notre démarche. Pour en trouver les réponses, et pour aider à la conception aussi bien qu'à une présentation claire des modèles, nous avons utilisé le concept de cadre expérimental, cadre défini par nos objectifs qui sont ceux de la modélisation de la dégradation de la structure du sol sous l'action de la pluie d'une part, et ceux de la modélisation de la fissuration du sol soumis à dessiccation d'autre part : des objectifs distincts impliquent un cadre expérimental adapté, et des choix différents. Nous présenterons ces choix, et donc nos modèles, dans leurs aspects structurels et fonctionnels, en faisant appel à la notion de processus aussi bien dans les descriptions informelles que formelles des phénomènes d'érosion et de fissuration.

Nous retenons des préceptes systémiques que l'action de modéliser n'est pas neutre mais partisane au contraire, et que la représentation d'un phénomène n'est pas disjoignable de l'action du modélisateur. Ainsi en est-il de nos choix de structure du modèle ainsi que des processus que nous avons décidé de prendre en compte, de la discrétisation de l'espace et du temps aux échelles spatiale et temporelle que nous avons définies. Nous retenons également qu'un modèle peut être non validé sur le plan de sa qualité prédictive, mais néanmoins fournir un outil de recherche dont l'exploration peut aider à la connaissance ou à la compréhension du système étudié. Enfin, certaines notions rencontrées au sein de ce chapitre nous autorisent à avancer que notre approche peut être qualifiée de double. Tout d'abord parce qu'elle se situe entre simulation *in vitro* et *in vivo* d'une part, par la réalisation d'expériences de simulation de pluie analogique et l'utilisation de résultats publiés en science du sol et dont beaucoup proviennent d'observations sur le terrain, et simulation *in virtuo* d'autre part, par la reproduction de ces expériences (et également par la création d'expériences uniquement virtuelles) au moyen d'un simulateur informatique. Ensuite, notre approche est double parce que nous reprenons à notre compte les deux sens que nous avons pu trouver au mot simulation, puisque même si nous visons avant tout à l'étude du système par la *simulation*, nous nous intéressons également à la reproduction visuelle d'une certaine *similitude* avec ce système.

Nous avons déjà indiqué que nous basions nos modèles sur deux outils de modélisation différents mais qui ont chacun un intérêt particulier : les automates cellulaires, et le formalisme DEVS, dédié aux évènements discrets. Les deux prochains chapitres vont nous permettre de préciser les origines et les fondements de ces outils, avant de détailler leur application à nos deux problématiques.

Chapitre 2

Automates cellulaires

Sommaire

2.1 Introduction	
2.2 Automates cellulaires c	lassiques
2.2.1 Description informel	e
2.2.2 Définition formelle	
2.2.3 Historique	
2.2.3.1 Première p	ériode (1950–1970) : le problème de l'auto-
réplication	
2.2.3.2 Deuxième p	vériode (1970–1982) : le jeu de la vie
2.2.3.3 Troisième p	ériode : a new kind of science
2.2.4 Variations et extensi	ons
2.3 Automates cellulaires é	tendus
2.3.1 Description informel	e
2.3.2 Définition formelle	
2.4 Conclusion	

2.1 Introduction

Un automate cellulaire est avant tout un modèle de système cellulaire. Un tel système peut se définir comme un ensemble d'un grand nombre d'éléments simples et structurellement identiques, dans lequel ces éléments interagissent localement, sans aucun contrôle global. Cette définition peut s'appliquer à de nombreux systèmes, de la fourmilière aux téléphones mobiles. Les automates cellulaires représentent le modèle abstrait de système cellulaire qui a été le plus complètement étudié et le plus appliqué. Ce modèle est simple, il est défini rigoureusement, et il est en même temps capable de produire des comportements complexes et variés, ce qui fait qu'il a soulevé, dès sa première définition formelle par Von Neumann, un grand intérêt non seulement chez les mathématiciens et les informaticiens, mais aussi chez les scientifiques de nombreux autres domaines, notamment par ses capacités de modélisation et de simulation.

Ce chapitre va nous permettre de retracer brièvement l'histoire des automates cellulaires,

qui nous semble particulièrement intéressante parce qu'elle est, d'une part, atypique de l'évolution classique d'une démarche scientifique (quel autre exemple peut-on trouver d'un domaine de recherche complètement relancé grâce à son potentiel ludique ?), et, d'autre part, intimement liée à l'histoire de l'informatique. Nous donnerons ensuite la définition formelle d'un automate cellulaire et présenterons quelques exemples de variations du modèle original. Enfin, nous décrirons plus en détail un type d'automates cellulaires qui est dédié à la modélisation et la simulation de phénomènes macroscopiques naturels complexes et que nous avons utilisé dans notre travail, les automates cellulaires étendus.

2.2 Automates cellulaires classiques

2.2.1 Description informelle

Un automate cellulaire est décrit par la donnée d'un espace cellulaire discret, d'un voisinage, d'un alphabet fini (ou ensemble fini d'états) et d'une fonction de transition (ou règle). L'espace cellulaire est une grille régulière qui possède une dimension. Dans le cas de la modélisation de phénomènes naturels, les espaces 2D et 3D sont évidemment privilégiés. Néanmoins, l'étude théorique systématique des automates cellulaires s'est faite en une dimension, et il est également possible de bâtir des automates cellulaires de dimension quelconque. La structure topologique de cet espace conditionne le type de voisinage de l'automate cellulaire. Le voisinage de la cellule est l'ensemble des cellules qui vont influer sur l'état de cette cellule. Dans le cas classique d'une grille 2D à maille carrée (équivalent à un échiquier infini), les deux voisinages les plus courants sont les voisinages dits de Von Neumann et de Moore, qui incluent respectivement 4 et 8 voisins, plus la cellule centrale (ou *site*). Des voisinages étendus peuvent être également considérés (figure 2.1), on parle alors de voisinages R-axial et R-radial :

Voisinage R-axial de s = {
$$c \in C$$
, $|c_x - s_x| \leq R \land |c_y - s_y| \leq R$ }
Voisinage R-radial de s = { $c \in C$, $|c_x - s_x| + |c_y - s_y| \leq R$ } (2.1)

avec C l'espace cellulaire 2D, s le site (cellule centrale), et c_x , s_x (respectivement c_y , s_y) les coordonnées horizontales (respectivement verticales) de c et s. Il est à noter que le voisinage de Von Neumann peut être considéré comme le voisinage 1-axial, celui de Moore comme le voisinage 1-radial. À l'inverse, on peut rencontrer le cas extrême du voisinage restreint à la cellule elle-même (voisinage 0-axial ou 0-radial). Enfin, le voisinage peut être asymétrique, voire même aléatoirement défini.

Chaque cellule est caractérisée à un instant donné par son état, élément de l'ensemble fini d'états de l'automate cellulaire. L'ensemble d'état le plus simple contient deux éléments {0, 1} ou {noir, blanc} (la possibilité de représenter visuellement les automates cellulaires est un de leurs attraits majeurs, et les couleurs ou niveaux de gris ont été souvent utilisés pour coder les états). Comme le voisinage de Von Neumann, cet ensemble d'états, équivalent au bit de l'informatique, est à la base des premiers automates cellulaires (appelés parfois automates cellulaires élémentaires) et suffit à produire en une dimension les comportements les plus complexes et les moins prévisibles, comme l'a montré Wolfram (2002). Enfin, l'état courant de la cellule est donné par la fonction de transition, qui prend en compte le voisinage de la cellule pour calculer le nouvel état. L'automate cellulaire classique est discret spatialement,



FIGURE 2.1 – Différents voisinages classiques d'un automate cellulaire bidimensionnel.

mais aussi temporellement, et évolue de manière synchrone : le calcul des nouveaux états des cellules est fait à partir des états courants des cellules, qui sont mises à jour « simultanément » (ce parallélisme idéal n'étant souvent pas réalisable concrètement, une solution fréquemment utilisée est de faire la lecture de l'état courant à partir d'une copie des cellules, faite avant toute modification). Il est bien sûr nécessaire de définir un état initial des cellules afin de pouvoir amorcer l'évolution du système.

2.2.2 Définition formelle

De façon formelle, un automate cellulaire classique peut se représenter par un quadruplet :

 $AC = \langle C, Q, f V \rangle$

avec les définitions suivantes :

 $C \subseteq \mathbb{Z}^n$ $(n \in \mathbb{N}^*)$ définit l'espace cellulaire, correspondant à la discrétisation de l'espace à n dimensions étudié,

 $Q=\{\ q_i,\ i\in\mathbb{N}\}$ est un ensemble fini d'états, appelé également al phabet,

f est une fonction de Q^p dans Q, dite fonction de transition (ou règle locale),

 $V = (\overrightarrow{v_1}, \dots, \overrightarrow{v_p})$ est un ensemble ordonné de p vecteurs de \mathbb{Z}^n qui définit le voisinage de dimension p identique pour toutes les cellules et qui sert à la fonction de transition f; le voisinage d'une cellule $c \in C$ se définit alors par :

$$V(c) = (c + \overrightarrow{v_i})_{i \in [1..p]} \in C^p$$

Il est à noter que le vecteur nul peut faire partie de la définition du voisinage, autrement dit la cellule peut être sa propre voisine.

On appelle configuration de l'automate cellulaire, l'application $h : \mathbb{N} \times C \to Q$ qui donne à chaque instant $t \in \mathbb{N}$, correspondant à une itération, l'état des cellules $c \, \mathrm{de} \, C$; par commodité, nous noterons h(t, c) en indiçant l'application h par $t : h_t(c)$; h_0 définit alors un état particulier de l'automate cellulaire appelé état initial.

L'évolution globale du système entre les instants t et t + 1 se traduit avec ces définitions par la formule suivante :

$$\forall t \in \mathbb{N}, \ \forall c \in C, \ h_{t+1}(c) = f\left(h_t\left(c + \overrightarrow{v_1}\right), \dots, h_t\left(c + \overrightarrow{v_p}\right)\right)$$
(2.2)

Il est intéressant de relever que les caractéristiques de l'automate cellulaire peuvent se répartir de façon naturelle en sa partie structurelle, comprenant C et Q, et sa partie fonctionnelle, composée de V et f.

2.2.3 Historique

2.2.3.1 Première période (1950–1970) : le problème de l'autoréplication

John Von Neumann (1903–1957) fut l'un des pionniers de la science informatique, donnant notamment en 1945 une description du principe de l'architecture d'un ordinateur. Dans les années 1940, il s'intéresse au problème de l'autoréplication et cherche à construire un automate capable de se reproduire. Parallèlement à cette recherche, un autre génie précurseur, Stanislaw Ulam (1909-1984), qui étudiait la croissance des cristaux, s'amusait à utiliser les premiers ordinateurs du laboratoire de Los Alamos pour produire des « objets géométriques récursivement définis » (*recursively defined geometrical objects*) et étudier leur évolution. Ces objets étaient définis dans une grille régulière de cellules, dans un état passif ou un état actif, et changeant d'état en fonction de leur voisinage. Ulam simulait ainsi des systèmes proches d'automates cellulaires 2D et remarqua l'apparition de figures complexes (ces travaux furent publiés en 1970).

Von Neumann, après avoir envisagé des modèles basés sur des usines 3D décrites par des équations aux dérivées partielles, essayait de concevoir un système robotique capable de se reproduire à partir de pièces détachées. Il finit par penser qu'un système bidimensionnel pourrait être suffisant, et en 1951, Ulam lui suggéra d'utiliser le principe de ses « espaces cellulaires » pour tenter de construire son automate autoréplicant. Il simplifia donc son modèle et parvint vers 1952 à un automate cellulaire 2D à 29 couleurs pour chaque cellule, et des règles complexes reproduisant les opérations de composants électroniques et mécaniques. Il lui fut nécessaire de construire un système de 200 000 cellules afin de donner la preuve mathématique de la possibilité d'autoréplication de ce système. Ces travaux furent complétés et publiés en 1966, et il est remarquable de constater qu'il fallut attendre presque 50 ans pour en voir proposer une implémentation concrète (Pesavento, 1995).

Pendant les années suivantes, les automates cellulaires furent surtout étudiés sous l'angle de leurs propriétés mathématiques, et notamment leur capacité à l'autoréplication. Ainsi Codd (1968) proposa une nouvelle solution au problème de l'autoréplication, avec 8 états au lieu des 29 états de la solution de Von Neumann. Différents problèmes furent abordés, comme le jardin d'Éden (trouver une configuration qui ne puisse être qu'une configuration initiale) ou la synchronisation des fusiliers (trouver un automate cellulaire unidimensionnel, tel que, partant d'une configuration où toutes les cellules sont dans l'état de repos à l'exception d'une unique cellule, on arrive à une configuration où toutes les cellulaires sont dans un même état jamais apparu avant). Le travail sur les automates cellulaires était devenu relativement ésotérique, et l'intérêt qu'il avait suscité commençait à s'estomper. L'invention de trois règles simples allait changer cet état de fait.

2.2.3.2 Deuxième période (1970–1982) : le jeu de la vie

En 1968, le mathématicien John Conway, intéressé par la logique mathématique et les jeux de simulation, commença à expérimenter différentes règles applicables à un automate cellulaire 2D. En 1970 il proposa ce qu'il appela le jeu de la vie (*The Game of Life* ou plus simplement *Life*), basé sur un automate cellulaire 2D, muni d'un voisinage de Moore, à deux états {vivante, morte} et évoluant selon les trois règles suivantes :

- une cellule morte entourée de 3 cellules vivantes devient vivante;
- une cellule vivante entourée de 2 ou 3 cellules vivantes reste vivante;
- dans tous les autres cas, la cellule est morte.

Ces règles peuvent être interprétées comme des simplifications extrêmes des conditions nécessaires à la vie : une population nécessaire pour une naissance et suffisante pour éviter l'isolement, mais pas trop nombreuse de manière à prévenir la surpopulation. Il est à noter que ces règles n'impliquent aucune conservation de la matière (en l'occurrence le nombre de cellules vivantes) : la conservation de la matière n'est pas intrinsèque au modèle des automates cellulaires classiques, elle n'existe que comme conséquence des règles utilisées; ce point est fondamental si l'on désire reproduire un phénomène naturel.

Le jeu de Conway fut rapidement popularisé par un article du magazine Scientific American (1970) et dès lors il fut l'objet d'innombrables expériences. Le terme « expérience » est tout à fait approprié : il s'agit d'étudier le comportement d'un système à partir de conditions initiales données, de faire des hypothèses sur ces conditions initiales et renouveler l'expérience. Il ne s'agit pas de simulation puisque le système étudié est l'automate cellulaire en lui-même. Contrairement aux automates cellulaires précédents, avec des degrés de liberté plus nombreux (on pouvait décider du nombre d'états ou changer les règles en recherchant un but bien précis), Life est apparu comme un véritable monde virtuel à explorer, réservant bien des surprises par les comportements imprévisibles qu'il génère. Son succès fut tel qu'en 1974 Time Magazine a regretté qu'un tel temps de calcul soit gâché par « des hordes croissantes de fanatiques » (growing hordes of fanatics) passant leurs journées de bureau sur ce nouveau « jouet » (cité par Rennard). Néanmoins, l'étude des propriétés de *Life* a permis de mettre en évidence l'existence d'objets cellulaires bien particuliers : les objets stables (p. ex. le carré), les oscillateurs (p. ex. le clignotant), les objets périodiques (p. ex. le planeur, qui jouera un rôle essentiel par la suite), etc. Life s'est ainsi enrichi d'un catalogue de plus en plus vaste, véritable faune peuplant cet univers virtuel. De plus, au delà du côté récréatif indéniable qui fit son succès, cette quête a permis de répondre à des questions plus scientifiques.

La première question fut posée par Conway dès 1970 : pouvait-on trouver une figure à croissance illimitée? Faute de pouvoir établir une preuve mathématique, il a fallu que des informaticiens du MIT créent la figure du « lance planeur » (glider gun) pour montrer qu'une telle figure existait bel et bien, et que la croissance illimitée était bien possible dans *Life*. La deuxième question abordée n'était pas nouvelle : il s'agit de l'existence de jardins d'Éden, qui fut démontrée dans *Life* par le mathématicien Alvy Ray Smith en 1970. Cependant la question fondamentale de la calculabilité universelle de *Life* restait à aborder, et c'est en 1982



FIGURE 2.2 – Configuration d'une machine de Turing reproduite dans Life, conçue par Rendell (2002).

que cette étape importante allait être franchie par Berlekamp, Conway, et Guy, marquant ainsi la fin d'une période pleine d'enthousiasme pour les automates cellulaires. Le lecteur intéressé pourra trouver dans Rennard (2002) comment les fonctions logiques peuvent être reproduites par les figures de *Life*, et dans Rendell (2002) le détail d'une machine de Turing (figure 2.2).

2.2.3.3 Troisième période : a new kind of science

Même si l'ouvrage auquel cette section emprunte son titre n'est paru qu'en 2002, il semble approprié pour définir la période qui a succédé au formidable engouement suscité par Life. Tout d'abord par une coïncidence de dates, puisque son auteur, Stephen Wolfram, a écrit son premier article traitant des automates cellulaires exactement en 1982. Ensuite parce que dans cet article, les automates cellulaires sont donnés comme pouvant être utilisés comme des modèles mathématiques discrets de systèmes physiques, biologiques et informatiques : ils passent donc d'un domaine purement mathématique (où ils sont l'objet d'étude) à celui de la modélisation et de la simulation (où ils deviennent le modèle d'un autre système). Enfin, Wolfram va le premier entreprendre l'étude systématique d'une catégorie d'automates cellulaires unidimensionnels, donnant ainsi une rigueur nouvelle à ce champ d'investigation. Les automates cellulaires vont être dès lors à la fois objet d'étude et outil de modélisation, principalement dans quatre domaines : la théorie mathématique, les systèmes informatiques, la modélisation physique et la modélisation de systèmes biologiques ou sociaux. Comme souligné par les états de l'art proposés par Sarkar (2000) et Ganguly et coll. (2003), il existe d'une part les questions posées par les aspects mathématiques et informatiques des automates cellulaires, et d'autre part les questions posées par leur utilisation dans la modélisation de phénomènes naturels, autrement dit une frontière s'est clairement dessinée entre le champ théorique et le champ applicatif.

L'étude théorique des automates cellulaires va d'abord passer par la classification opérée par Wolfram (1984), inspiré par la théorie des systèmes dynamiques et qui a abouti à un système à quatre classes :

- 1. l'évolution de l'automate cellulaire conduit à des configurations homogènes (toutes les cellules sont dans le même état);
- 2. l'évolution conduit à des structures stables ou périodiques (à période courte);
- 3. l'évolution conduit à des configurations chaotiques;
- 4. l'évolution conduit à des structures locales complexes parfois persistantes (*Life* étant par exemple considéré par Wolfram comme un automate cellulaire typique de cette quatrième classe, qui aurait seule la propriété de calculabilité universelle).

Alors que Wolfram a mené son étude en partant de configurations aléatoires, Langton (1990) essaie de faire une analyse quantitative de la classification de Wolfram en introduisant le paramètre λ , une valeur statistique calculée à partir des règles de l'automate cellulaire. En étudiant un comportement moyen d'automates cellulaires unidimensionnels en fonction de ce paramètre, il aboutit également à quatre types de comportement qui se rapprochent des quatre classes de Wolfram. Outre la classification des automates cellulaires, qui reste un champ d'investigation ouvert, les problèmes théoriques abordés sont demeurés classiquement les questions d'autoréplication, de calculabilité et constructibilité universelles, ou encore de tessellation. Dans d'autres travaux, les automates cellulaires sont plutôt considérés comme des systèmes informatiques abstraits, et sont utilisés pour traiter les questions de complexité spatiale et temporelle, d'indécidabilité des problèmes ou de langages acceptables par les automates cellulaires. Life a continué aussi à fournir son lot d'études : généralisation dans un espace à trois dimensions, paramétrage des règles originelles, extension du rayon de voisinage.

Le champ applicatif des automates cellulaires est d'une grande diversité (l'état de l'art publié par Ganguly et coll. contient quelques 269 références dont la plupart sont des applications d'automates cellulaires). Toffoli (1984) a montré que les automates cellulaires peuvent être utilisés comme alternative aux équations différentielles, ce qui revient à dire que tout système physique obéissant à des équations différentielles peut être modélisé par un automate cellulaire, avec l'avantage de permettre de gérer facilement des états initiaux et des conditions aux limites complexes. Malheureusement, les équations régissant un système étudié sont rarement établies. Dans cette situation courante, les automates cellulaires ont prouvé leur intérêt grâce au principe d'émergence : plutôt que de tenter de comprendre un comportement global complexe, on tente d'en fixer des règles locales simples. Ces règles deviennent en quelque sorte les lois physiques (parfaitement connues) du monde virtuel défini par l'automate cellulaire, et il devient ainsi possible de tester et comparer le comportement global de cet univers. Toffoli (1994) va avancer et démontrer par l'exemple deux principes qui lui permettent de justifier la généralisation de cette méthodologie : (i) un comportement apparemment continu doit émerger à une échelle macroscopique de tout mécanisme microscopique discret; (ii) quasiment toutes les équations différentielles de la physique connues sont les comportements limites de simples mécanismes microscopiques discrets. Que la thèse de Toffoli soit avérée ou non, il reste établi que les automates cellulaires ont servi avec succès à la simulation du comportement d'un gaz ou de matériaux magnétiques, des processus de percolation, du développement urbain, des processus de cristallisation, de la propagation des feux de forêt, de la turbulence des fluides, du vieillissement, de la formation des nuages et des dunes de sable, etc. En dehors des applications de simulation, les automates cellulaires servent aussi à la conception d'ordinateurs massivement parallèles, à la reconnaissance de formes, à la cryptographie, à la génération de nombres aléatoires,... Soumis à un telle quantité et à une telle diversité d'emplois, il était inévitable que le modèle classique d'automates cellulaires soit l'objet de variations et d'extensions destinées à en spécialiser l'utilisation, au prix sans doute de la perte de sa simplicité et de sa généricité originelles. La section suivante énumère quelques-unes de ces variations et extensions.

2.2.4 Variations et extensions

Chacune des caractéristique de l'automate cellulaire peut être la source d'une variation à partir du modèle original : la forme des cellules, le synchronisme de la mise à jour, le caractère discret des états, l'uniformité et le déterminisme des règles. Nous allons brièvement les passer en revue.

La forme des cellules : la principale alternative aux cellules carrées est la grille hexagonale, qui peut permettre de mieux se rapprocher du comportement d'un phénomène naturel, comme la vision de la mouche ou la formation de flocons de neige (figure 2.3). Un autre exemple célèbre est le modèle de gaz sur réseau FHP, basé sur des cellules triangulaires, et capable de simuler un fluide obéissant aux équations de Navier-Stokes (Frisch et coll., 1986). Nous verrons cependant dans la section 6.3.1.4 que l'anisotropie de la propagation du contenu des cellules ne peut être complètement corrigée par le choix de la grille.



FIGURE 2.3 – Des flocons de neige obtenus sur une grille hexagonale (Coxe et Reiter, 2003).

Le synchronisme de la mise à jour par la fonction de transition : une des motivations pour s'affranchir de la règle du synchronisme est la lourdeur qu'elle impose au niveau de l'implémentation, qui peut par conséquent limiter la taille des espaces qui peuvent être simulés efficacement. Néanmoins, en général, le comportement des règles est différent selon la stratégie de mise à jour choisie, et le risque d'empêcher tout comportement émergent existe. Certains chercheurs ont d'ailleurs avancé l'hypothèse que les propriétés intéressantes des automates cellulaires ne seraient que la conséquence de l'évolution synchrone du système.

La continuité de l'espace des états : en remplaçant les états discrets de l'automate par une représentation continue et les règles de transition par une fonction, il est possible d'obtenir des comportements proches des fluides et des gaz, comme l'a montré le modèle de fluides de Boltzmann sur réseau. Des exemples de simulation en sont donnés par le modèle CML (*Coupled Map Lattices*) illustré par la figure 2.4.

L'uniformité des règles dans l'espace cellulaire : les automates cellulaires dits « hybrides » autorisent que les règles locales puissent différer d'une cellule (ou d'une région de cellules) à une autre (Sipper et coll., 1997). Ces règles peuvent également dépendre de données externes à l'automate cellulaire. Cette démarche permet de faciliter la recherche de





règles amenant à un comportement voulu de l'automate cellulaire, notamment par l'emploi d'algorithmes génétiques (Ganguly et coll., 2003).

Le déterminisme des règles locales : la fonction de transition (la définition des règles d'évolution) est en général déterministe, mais elle peut être stochastique et faire intervenir les probabilités d'un passage d'un état à un autre. Des automates cellulaires à règles floues ont également été étudiés. Enfin, alors que le modèle ordinaire des automates cellulaires ne fait dépendre l'état suivant d'une cellule que de l'état des cellules de son voisinage, il existe des automates cellulaires avec des règles dépendant du temps, par exemple utilisant deux jeux de règles, alternant selon la parité de l'itération.

Ces variations ou extensions du modèle classique de l'automate cellulaire ont apporté une grande souplesse dans les applications possibles de ce modèle, avec en contrepartie la question difficile de savoir parfois s'il s'agit toujours vraiment de véritables automates cellulaires (dans sa thèse, Capcarrère (2002) les qualifie d'ailleurs de « quasi automates cellulaires » et avance l'idée que l'utilisation d'un voisinage de Moore manifestait déjà d'une compréhension « hétérodoxe » du modèle originel). Néanmoins, pour modéliser et simuler certains phénomènes naturels, des chercheurs ont dû aller encore plus loin, notamment en remplaçant l'échelle microscopique de l'espace des cellules, induite depuis les débuts par les automates cellulaires, par une vision macroscopique.

2.3 Automates cellulaires étendus

À la fin des années 1990, Salvatore Di Gregorio et Roberto Serra se sont intéressés à la simulation de phénomènes naturels complexes et à grande échelle, comme les écoulements de lave, de débris et de boue, les glissements de terrain ou encore les processus de bioremédiation de sols contaminés. Pour ces travaux (Di Gregorio et Serra 1999, Di Gregorio, Serra, et Villani 1999), ils se sont orientés vers les automates cellulaires. Ils justifient cette alternative à une modélisation classique par un système d'équations aux dérivées partielles, par le fait que, dans leur cas d'étude, les lois fondamentales de la mécanique ne pourraient s'appliquer sans recourir à des hypothèses phénoménologiques supplémentaires, et que, de plus, le système

d'équations obtenu n'aurait aucune solution analytique. Pour peu que les systèmes à simuler aient un comportement qui puisse se décrire en termes d'interactions locales de leurs parties constitutives, les automates cellulaires semblent un choix judicieux. Néanmoins, le modèle classique d'automate cellulaire, tel que décrit dans la section précédente, ne suffit pas à modéliser les phénomènes étudiés, et Di Gregorio et Serra se sont donc employés à en étendre les fonctionnalités, parfois en reprenant des variations déjà usitées dans d'autres domaines.

2.3.1 Description informelle

Les automates cellulaires étendus ont quatre caractéristiques qui les différencient des automates cellulaires classiques.

Un modèle macroscopique : le modèle classique d'automate cellulaire est le plus souvent par essence microscopique, dans le sens où l'état des cellules représente la présence ou l'absence d'une particule, et que l'évolution du système fait émerger une loi macroscopique qui est en quelque sorte une moyenne des comportements de ces particules. Di Gregorio et Serra se sont éloignés de cette particularité du modèle initial en adoptant une échelle macroscopique. La cellule de leur modèle va correspondre à une portion mesurable du domaine étudié (existant dans l'espace physique, donc au plus tridimensionnel), portion dans lesquelles les variables d'intérêt peuvent être considérées comme constantes. Il en découle que le choix de la dimension des cellules est crucial pour la qualité du modèle.

Un ensemble d'états complexe : l'état d'une cellule correspond à un ensemble de sous-états, aussi nombreux que nécessaire pour décrire pleinement le contenu de la portion du domaine correspondant à une cellule. Le nombre d'états possibles reste dénombrable mais est illimité, et les sous-états, généralement des grandeurs physiques, peuvent être des variables continues. Di Gregorio et Serra prennent des précautions en indiquant que la nature discrète des états est quand même préservée, puisqu'au final toutes les valeurs sont discrétisées. Les auteurs définissent un type de sous-état « écoulement » (*outflow*) qui permet de prendre en compte les transferts entre cellules voisines.

Une fonction de transition composée : une des nouveautés les plus intéressantes de ce modèle est la conception élargie de la fonction de transition, qui devient une composition de *plusieurs* fonctions de transition. Cette nouvelle définition permet de modéliser l'évolution du système par une succession, à chaque itération, de différents processus élémentaires, affectant chacun l'état des cellules. Cette souplesse de conception est étendue au voisinage de la cellule, qui peut être différent pour chaque fonction de transition. Les fonctions de transition sont réparties en deux familles. La première correspond aux transformations internes, pour lesquelles le voisinage est réduit au site seul : ces transformations sont définies comme les changements dus, soit à l'écoulement du temps (p. ex. l'évaporation de l'eau), soit aux interactions entre les sous-états de la cellule (les auteurs donnent l'exemple du refroidissement de la lave, dû à l'interaction entre le sous-état « température de la lave » et le sous-état « épaisseur de la lave »). La seconde famille correspond aux interactions locales, qui sont décrites en termes d'écoulement et de recherche d'un état d'équilibre entre la cellule et ses voisines.

Des influences externes : quelques années après ces premiers travaux, pour modéliser le même genre de phénomène (coulées de lave, coulées pyroclastiques), Avolio et coll. (2003) ont

développé cette approche empirique en y ajoutant une importante fonctionnalité, la capacité de prendre en compte des influences externes à l'automate cellulaire, non réductibles à des influences intra- ou inter-cellulaires. L'exemple donné en est la lave surgissant de cratères, changeant le sous-état « épaisseur de la lave » dans certaines cellules.

Di Gregorio et Serra soulignent que cette modélisation par automates cellulaires étendus repose sur l'hypothèse que le phénomène dans sa globalité peut être décrit par un calcul séquentiel de telles transformations internes et interactions locales. Cette hypothèse critique est difficilement démontrable a priori et la justification du modèle doit souvent attendre l'étape de validation par la simulation. Dans leur conclusion, ils mettent cependant en avant deux avantages importants. D'abord, la décomposition d'un phénomène macroscopique en processus élémentaires, transformations internes ou interactions locales, permet (ou impose) la coopération entre plusieurs disciplines et l'échange d'informations, ce qui enrichit au final le modèle. Ensuite, cette méthode de modélisation permet de partir d'un modèle simple qui peut être raffiné de manière incrémentale, en lui ajoutant d'autres fonctions de transition, et au besoin en le validant à chaque étape si des données expérimentales existent. Nous avons jugé que la démarche de ces chercheurs se rapprochait suffisamment de la nôtre pour baser notre modélisation sur un automate cellulaire étendu, en remarquant de plus des convergences importantes entre les particularités de ce modèle et celles du système que nous étudions : échelle macroscopique, différentes grandeurs physiques continues à considérer dans les cellules comme autant de sous-états, plusieurs processus à prendre en compte dont certains peuvent être considérés comme des transformations internes aux cellules, et enfin une influence à reproduire, externe à l'espace cellulaire et de première importance pour la modélisation de la dégradation du sol, la pluie. Nous allons donc dans la prochaine section présenter formellement les automates cellulaires étendus.

2.3.2 Définition formelle

Les automates cellulaires étendus peut être formalisés à partir d'un septuplet :

$$ACE = \langle C, E, Q, V, f, g, P \rangle$$

répondant aux définitions suivantes :

 $C \subseteq \mathbb{Z}^d$, avec $d \in \{1, 2, 3\}$ correspond à la discrétisation dans un espace à d dimensions de l'espace physique considéré,

 $E = E_1 \cup \ldots \cup E_x \subseteq C$ est l'ensemble des cellules qui sont soumises à une influence du monde extérieur, chaque E_i définissant une région de C correspondant à l'influence g_i définie plus loin,

 $Q = Q_1 \times \cdots \times Q_p$ est le produit cartésien des ensembles Q_i de sous-états, qui permet de considérer indépendamment les diverses caractéristiques d'une cellule,

 $V = V_1 \cup \ldots \cup V_q$ est la réunion des voisinages V_i correspondant à chaque processus élémentaire, équivalent à la fonction f_i ,

 $f: Q^{|V|} \to Q$ est la fonction de transition, composée par la succession des fonctions chargées de représenter chaque processus élémentaire f_i ,

 $g: \mathbb{N} \times E \to Q$ est la fonction faisant se succéder les phénomènes externes g_i influençant les régions E_i , pour les sous-états Q_i , \mathbb{N} représentant le temps, c.-à-d. l'itération de l'automate cellulaire,

P est l'ensemble des paramètres globaux affectant la fonction de transition, dont le pas de temps d'une itération Δt et la dimension d'une cellule, ou pas spatial, Δx , paramètres qui lient le complexe cellulaire au monde réel.

La définition de la configuration $h : \mathbb{N} \times C \to Q$ de l'automate cellulaire classique reste valide. L'évolution globale du système entre les instants t et t+1 se formalise finalement ainsi, en introduisant des configurations intermédiaires h^i obtenues par la succession des fonctions élémentaires :

$$\forall t \in \mathbb{N}, \forall c \in C,$$

$$h_{t+1}^1(c) = f_1 \left(h_t \left(c + \overrightarrow{v_1} \right), \dots, h_t \left(c + \overrightarrow{v_p} \right) \right)$$

$$h_{t+1}^2(c) = f_2 \left(h_{t+1}^1 \left(c + \overrightarrow{v_1} \right), \dots, h_{t+1}^1 \left(c + \overrightarrow{v_p} \right) \right)$$

$$\vdots$$

$$h_{t+1}(c) = f_q \left(\left(h_{t+1}^{q-1} \left(c + \overrightarrow{v_1} \right), \dots, h_{t+1}^{q-1} \left(c + \overrightarrow{v_p} \right) \right) \right)$$
(2.3)

Il est nécessaire de procéder avant cette évolution à la mise à jour des états q_1, \ldots, q_x due aux influences externes, qui peut se formaliser de la façon suivante :

$$\forall t \in \mathbb{N}, \forall c \in C,$$

si $c \in E_1$ alors $q_1(t+1,c) = g_1(t+1,c)$ sinon $q_1(t+1,c) = q_1(t,c)$
:
si $c \in E_x$ alors $q_x(t+1,c) = g_x(t+1,c)$ sinon $q_x(t+1,c) = q_x(t,c)$
(2.4)

Il est évident à l'énoncé de cette formalisation que l'introduction des influences externes rompt l'homogénéité du modèle formel, en ce sens que ces influences sont exprimées en fonction, non plus (ou plus seulement) de l'état de la cellule, mais de sa position, ce qui rend impossible toute composition avec la fonction de transition. De plus, il est à noter que ces influences externes restent soumises au principe de temps discret de l'automate cellulaire et à la mise à jour synchrone de l'état de toutes les cellules, ce qui risque de restreindre l'intérêt du modèle pour certains champs d'application, puisque ce peut être contraire à la nature même de l'influence externe que l'on veut reproduire. C'est le cas par exemple s'il s'agit d'évènements discrets localisés sur des voisinages avec des intersections non vides ; ainsi dans le cas de la pluie, il faut assurer qu'une cellule soit dans la zone d'impact d'au maximum une goutte de pluie lors d'une itération, puisque son état ne peut être modifié qu'une seule fois.

2.4 Conclusion

Les automates cellulaires ont montré qu'un comportement complexe pouvait émerger d'une structure répétitive et d'une dynamique simple. Il se sont révélés capables, en modélisant des phénomènes à une échelle microscopique, de reproduire des lois macroscopiques, poussant certains scientifiques comme Wolfram à avancer l'idée que l'univers pourrait être considéré comme un automate cellulaire, basé sur certaines règles simples dont nous ne percevons que les conséquences macroscopiques. Même si cette thèse est très discutée, il n'en reste pas moins que la propriété des simulations par automates cellulaires de permettre l'émergence de structures complexes et qui ne peuvent pas être définies *a priori*, a pour conséquence que de multiples disciplines s'adonnent à leur étude et à leur utilisation, notamment la biologie, la physique, la chimie et l'économie.

Néanmoins, il est difficile de modéliser les phénomènes naturels macroscopiques à l'aide d'automates cellulaires microscopiques, ne serait-ce qu'à cause de leur échelle spatiale qui imposerait un nombre de cellules encore inenvisageable pour la mémoire d'un ordinateur et ses capacités de calcul. C'est pourquoi des chercheurs ont créé des automates cellulaires macroscopiques, permettant de conserver certaines des propriétés intéressantes des automates cellulaires en termes de modélisation et de simulation, tout en utilisant une échelle et des règles de transition plus grossières. Ce type d'automates cellulaires, dits étendus, apporte un cadre qui correspond bien à notre problématique. Nous avons vu cependant que la formalisation des automates cellulaires étendus perdait en rigueur, à cause de l'introduction des influences externes. De plus, en règle générale, les automates cellulaires conviennent parfaitement à la modélisation de phénomènes qui peuvent être considérés comme locaux et parallèles (synchrones), mais dès lors que des évènements discrets sont appelés à intervenir dans la dynamique du système (ce qui peut être le cas des influences externes au système étudié, comme la pluie dans notre cas d'étude), le modèle atteint une limite. Le prochain chapitre va nous permettre de franchir cette limite, tout en conservant l'approche par automate cellulaire étendu, par l'introduction d'un formalisme dédié aux évènements discrets.

Chapitre 3

DEVS

Sommaire

3.1 Ir	troduction
3.2 D	escription formelle
3.2	1 Modèle atomique
3.2	2 Modèle couplé
3.2	3 Parallel-DEVS
3.2	4 Simulateurs abstraits et implémentations
3.3 D	EVS et les modèles cellulaires
3.3	1 Cell-DEVS
3.3	2 Espaces cellulaires non modulaires
3.3	3 Relation avec les automates cellulaires étendus
3.4 C	onclusion

3.1 Introduction

Issu de la théorie des systèmes, le formalisme DEVS (*Discrete EV ents system S pecification*) a été proposé par Zeigler (1976). DEVS se différencie d'autres formalismes à événements discrets (réseaux de Pétri, Grafcet, Statecharts,...) par une grande flexibilité qui lui donne la capacité à modéliser un grand nombre de types de systèmes différents. Il offre de nombreux avantages : il permet de spécifier des modèles qui n'ont pas nécessairement un nombre fini d'états, il offre une représentation explicite du temps, il permet de coupler des modèles hétérogènes, enfin il sépare modélisation et simulation tout en offrant une sémantique opératoire qui permet une spécification rigoureuse de l'implémentation des simulateurs. Bien que basé sur les évènements discrets, DEVS peut être adapté à des systèmes continus ou hybrides, il est aussi capable d'encapsuler d'autres formalismes comme les équations différentielles ou les réseaux de Pétri. Outre les modifications et améliorations apportées par Zeigler lui-même (Zeigler, 1984, Zeigler et coll., 2000), ce formalisme a fait l'objet d'un développement enthousiaste dans la communauté modélisation et simulation, et nombre de plate-formes logicielles sont disponibles. Ce formalisme d'une grande richesse repose seulement sur deux modèles de base, simples à décrire, mais qui permettent néanmoins une modélisation modulaire et

hiérarchique de nombreux types de systèmes. Ce chapitre va nous permettre de décrire ce formalisme, puis de voir comment il a été utilisé dans le contexte des automates cellulaires, avant d'aboutir à un modèle qui, comme nous le montrerons, peut parfaitement servir à la spécification d'un automate cellulaire étendu dont les influences externes doivent s'exprimer sous forme d'évènements discrets.

3.2 Description formelle

3.2.1 Modèle atomique

Les éléments de base d'un modèle DEVS sont les modèles atomiques. Un modèle atomique DEVS M se définit formellement par l'ensemble suivant :

 $M = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta \rangle$

où :

X est l'ensemble des évènements d'entrée (dits aussi externes),

Y est l'ensemble des évènements de sortie,

S est l'ensemble des états, éventuellement infini,

 δ_{int} est la fonction de transition interne,

 δ_{ext} est la fonction de transition externe,

 $\lambda: S \to Y$ est la fonction de sortie,

ta est la fonction d'avance du temps.

S est l'ensemble des états du système : typiquement, un état va correspondre au n-uplet s des valeurs prises par les différentes variables d'état du système. Ces variables peuvent être de type très différent : à valeur dans \mathbb{R} pour représenter une caractéristique continue du système, à valeur dans \mathbb{Z} pour représenter une caractéristique discrète, ou encore un élément pris dans un ensemble quelconque, fini ou infini (p. ex. une couleur). Q est l'ensemble des états totaux (total states) du système : un état total correspond à la donnée d'un état s du système plus la durée e pendant laquelle le système s'est trouvé dans cet état, ce qui permet au modélisateur de spécifier un changement d'état non seulement en fonction de l'état courant du système, mais aussi en fonction du temps passé dans cet état. Le temps devient ainsi explicitement une partie intégrante de l'état du système. L'ensemble des états totaux se définit ainsi :

 $Q = \{ \ (s,e) \ | \ s \in S, \ 0 \ \le \ e \ \le \ ta(s) \ \}$

Le formalisme DEVS décompose la fonction de transition du système en deux fonctions distinctes et indépendantes, l'une chargée de répondre aux influences de l'environnement, qui se manifestent par les évènements externes, l'autre chargée de l'évolution interne, autonome, du système. Ce principe simple se révèle être un atout majeur du formalisme DEVS, puisqu'il permet de modéliser un système ouvert sur l'extérieur mais qui possède également ses propres règles de changement internes.



FIGURE 3.1 – Fonctionnement du modèle atomique DEVS.

La figure 3.1 représente de façon schématique le fonctionnement d'un modèle atomique DEVS que nous allons détailler. La fonction de transition externe $\delta_{ext} : Q \times X \to S$ est déclenchée par l'arrivée d'un évènement externe x, et elle fait passer le système dans un état $s' = \delta_{ext}(s, e, x)$ en fonction de cet évènement externe et de l'état total du système (donc du temps e écoulé dans l'état courant s), ce qui permet de décrire une large classe de comportements existants dans les modèles à évènements discrets : synchronisation, préemption, suspension, réactivation (Vangheluwe, 2000, p. 71).

Lorsqu'aucun évènement externe ne survient, c'est la fonction d'avancement du temps $ta : S \to \mathbb{R}^+$ qui décide de la durée $\Delta t = ta(s)$ que doit passer le système dans l'état s. Cette fonction est évaluée à l'entrée du système dans un nouvel état s. Deux cas particuliers sont envisageables : une durée infinie, dans ce cas l'état s tel que $ta(s) = \infty$ est dit passif (le système ne va évoluer que si un évènement externe survient); ou bien une durée nulle, et dans ce cas l'état s tel que ta(s) = 0 est dit transitoire (le système évolue tout de suite). Notons que cette fonction définit une base de temps réelle et que donc le temps simulé est continu. En prenant ta à valeurs dans \mathbb{N} on peut se ramener à un temps discret sans rien enlever aux autres caractéristiques du formalisme. La seule condition pour la base de temps est qu'elle soit un ensemble muni d'une relation d'ordre strict total.

La durée $\Delta t = ta(s)$ étant écoulée, deux fonctions sont appelées successivement. Tout d'abord est appelée la fonction de sortie $\lambda : S \to Y \cup \{\emptyset\}$ qui va déterminer l'évènement de sortie $y = \lambda(s)$ à générer selon l'état courant s du système. Cette fonction peut permettre l'observation du système, et une fonction triviale de sortie est l'identité : $\lambda(s) = s$, qui transmet directement à l'environnement du système son état courant. Ensuite est appelée la fonction de transition interne $\delta_{int} : S \to S$ qui va faire passer le système dans un état $s' = \delta_{int}(s)$ en fonction de son état courant s. Les sorties du système ne sont donc possibles que lors de l'occurrence de transitions internes, elles-mêmes déclenchées par les durées pendant lesquelles le système reste dans un même état et en l'absence d'évènement externe. Cette contrainte peut sembler être une limitation au modèle, puisqu'il semble impossible de provoquer une sortie en réponse à l'arrivée d'un évènement externe. En fait, pour obtenir ce résultat il suffit de faire passer le système dans un état transitoire lors de l'arrivée de l'évènement externe, et de définir la valeur de la fonction de sortie désirée pour cet état. L'état transitoire va déclencher une transition interne, synonyme de sortie, aussitôt l'arrivée de l'évènement externe.

3.2.2 Modèle couplé

Nous disposons donc avec le modèle atomique DEVS d'un système capable d'évolution autonome et de réponse à des stimulus externes. Le couplage des modèles atomiques, apport fait par Zeigler en 1984 au modèle classique datant de 1976, va ajouter deux notions fondamentales pour la modélisation : la modularité et la construction hiérarchique. Un système va pouvoir être décomposé en sous-systèmes plus simples qui seront couplés de manière à reconstituer le comportement du système original, et qui au besoin pourront être à leur tour décomposés en sous-systèmes.

Le couplage des modèles atomiques impose une communication entre modèles, c'est pourquoi le modèle atomique subit une légère transformation : l'ajout de ports d'entrée et de sortie, associés respectivement aux évènements d'entrée et de sortie (figure 3.2). Un port d'entrée prend une valeur lors de l'émission d'un évènement attaché à ce port. Un port de sortie prend une valeur lorsque la fonction de sortie prend une valeur pour ce port.

 $X = \{ (p, v) \mid p \in P_{in}, v \in V_p \}$ est à présent l'ensemble des évènements d'entrée, à port p dans l'ensemble des ports d'entrée P_{in} et à valeur v dans l'ensemble V_p des valeurs d'entrée possibles sur le port p.

 $Y = \{ (p, v) \mid p \in P_{out}, v \in V_p \}$ est à présent l'ensemble des évènements de sortie, à port p dans l'ensemble des ports de sortie P_{out} et à valeur dans l'ensemble V_p des valeurs de sortie possibles sur le port p.



FIGURE 3.2 – Représentation d'un modèle atomique DEVS avec ports. Ici les ensembles des ports d'entrée et des ports de sortie sont $P_{in} = \{ p_{I1}, p_{I2} \}$ et $P_{out} = \{ p_{O1}, p_{O2} \}$.

Cette nouvelle définition des modèles atomiques DEVS avec ports autorise le couplage, c'est-à-dire la connexion de deux modèles atomiques, lesquels deviennent alors des composants du modèle couplé. Une propriété fondamentale des modèles DEVS est la fermeture par couplage, démontrée par Zeigler (1984) : un modèle couplé peut être considéré comme un modèle atomique (une démonstration peut en être trouvée dans la thèse de Vangheluwe, 2000, p. 75). Dès lors, le couplage de modèles couplés devient possible, ainsi que le couplage d'un modèle couplé avec un modèle atomique, ce qui autorise une vue hiérarchique d'un système, et sa décomposition en sous-systèmes en interaction (figure 3.3).



FIGURE 3.3 – Illustration du couplage et de la hiérarchisation d'un modèle rendus possibles par la propriété de fermeture par couplage : un modèle couplé peut être considéré comme un modèle atomique.

Un modèle couplé DEVS MC se définit formellement par cet ensemble :

 $MC = \langle X_{\text{self}}, Y_{\text{self}}, D, \{M_d\}, \{I_d\}, \{Z_{i,d}\}, \text{select} \rangle$

où :

 X_{self} est l'ensemble des évènements d'entrée,

 Y_{self} est l'ensemble des évènements de sortie,

D est l'ensemble des identifiants des composants du modèle couplé,

 $\{M_d\}$ est l'ensemble de ces composants,

 $\{I_d\}$ est l'ensemble des influences entre composants,

 $\{Z_{i,d}\}$ est l'ensemble des fonctions d'interprétation sortie-entrée entre i et d,

select est la fonction de sélection.

Dans cette définition, *self* représente le modèle couplé lui-même. Comme pour un modèle atomique, X_{self} (respectivement Y_{self}) est l'ensemble des valeurs d'entrée (respectivement de sortie) possibles du modèle couplé, chacune étant attachée à un port d'entrée (respectivement de sortie). D est l'ensemble des identifiants des composants du modèle couplé, *self* ne pouvant pas être élément de D. L'ensembles des composants est { $M_d \mid d \in D$ }, chaque composant devant être un modèle atomique DEVS :

$$M_d = \langle X_d, Y_d, S_d, \delta_{int,d}, \delta_{ext,d}, \lambda_d, ta_d \rangle$$

 I_d est l'ensemble des composants *influencés* par le composant d'identifiant $d \in D \cup \{self\}$. L'ensemble de toutes les influences $\{I_d \mid d \in D \cup \{self\}\}$ représente la structure du modèle couplé. Les influences correspondent à trois types de couplage qui sont explicités dans la figure 3.4. Pour respecter le principe de modularité, un composant du modèle couplé ne peut influencer un composant extérieur au modèle couplé, cependant il peut influencer le modèle couplé, c'est dans ce cas un couplage externe de sortie (voir figure 3.4) :

$$\forall d \in D \cup \{self\} \mid I_d \subseteq D \cup \{self\}$$

Une deuxième restriction est ajoutée, de manière à éviter toute boucle infinie, un composant ne peut s'influencer lui-même :

$$\forall d \in D \cup \{self\} \quad d \notin I_d$$



FIGURE 3.4 – Les trois types de couplage (ou influence) dans un modèle DEVS couplé.

Pour pouvoir traduire un évènement de sortie provenant d'un composant M_i , en un évènement d'entrée du composant M_j qu'il influence $(M_j \in I_i)$, pour chaque j de I_i , on définit la fonction $Z_{i,j}$ qui est chargée de cette interprétation entre M_i et M_j . La donnée des I_d et des $Z_{i,j}$ permet ainsi de spécifier complètement la structure et le comportement du modèle couplé. Comme le montre la figure 3.4, les couplages peuvent être internes au modèle couplé, c'est-à-dire entre deux composants, mais il peut exister également des couplages externes d'entrée (le modèle couplé influence un de ses composants) et des couplages externes de sortie (un des composants influence le modèle couplé). Il est nécessaire de prévoir des fonctions spécifiques pour les composants influencés par le modèle couplé, ou qui influencent le modèle couplé, ainsi qu'il est montré dans le détail de l'ensemble { $Z_{i,j} | i \in D \cup {self}, j \in I_i$ } :

$$\begin{aligned} \forall i, j \in D \mid j \in I_i, \quad Z_{i,j} &: \quad Y_i \to X_j \\ \forall j \in I_{\text{self}}, \quad Z_{\text{self},j} : \quad X_{\text{self}} \to X_j \\ \forall i \in D \mid self \in I_i, \quad Z_{i,\text{self}} : \quad Y_i \to Y_{\text{self}} \end{aligned}$$

Lors d'une simulation, à cause du couplage des composants, il peut arriver que des transitions doivent intervenir à un instant t identique. Pour résoudre ces problèmes de collision, il est nécessaire d'opérer un choix parmi les composants en concurrence. C'est le rôle de la fonction *select* du modèle couplé, qui doit donc pouvoir s'appliquer à tout sous-ensemble non vide E de D:

select:
$$2^D \setminus \emptyset \to D$$

Si E correspond au sous-ensemble de D des composants qui ont à opérer une transition simultanément, la fonction *select* doit permettre de choisir lequel parmi ces composants doit appliquer sa transition :

$$select(E) \in E$$

Ce choix opéré par la fonction *select* introduit un biais par la séquentialisation entre évènements à l'origine simultanés. Ce défaut sera supprimé par le formalisme Parallel-DEVS qui est décrit dans la section suivante.
3.2.3 Parallel-DEVS

Afin d'étendre les capacités de modélisation de DEVS, le formalisme original a été étendu en un formalisme appelé Parallel-DEVS (ou P-DEVS) par Chow et Zeigler (1994). Les objectifs poursuivis étaient de rendre possible le contrôle des collisions entre transitions par le modélisateur ainsi que d'autoriser le parallélisme en éliminant toute trace de séquentialisation des évènements produite par le choix opéré par la fonction *select* dans le modèle couplé DEVS. Le modèle atomique P-DEVS MP se définit ainsi :

$$MP = \langle X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda, ta \rangle$$

Le comportement d'un modèle atomique P-DEVS (voir figure 3.5) est très semblable à celui du modèle atomique DEVS. La différence majeure provient de l'apparition d'une nouvelle fonction : la fonction de conflit (*confluent transition function*) qui est chargée de résoudre *localement* l'ambiguïté générée par l'occurrence simultanée d'une transition interne et d'une transition externe (autrement dit lorsque le temps écoulé e dans l'état s marquant l'arrivée de l'évènement externe, est égal à la durée $ta(s) = \Delta t$ impartie avant la transition interne).

$$\delta_{con}: S \times X^b \to S$$

On note que cette fonction utilise le concept de sac (*bag*) d'évènements, un sac étant un ensemble d'événements non triés provenant d'une ou plusieurs sources différentes. Cette fonction peut avoir un comportement par défaut qui choisit d'abord la transition interne, ou l'inverse :

$$\delta_{con}(s, e, x^b) = \delta_{ext} (\delta_{int}(s), 0, x^b)$$

ou $\delta_{con}(s, e, x^b) = \delta_{int} (\delta_{ext}(s, ta(s), x^b))$



FIGURE 3.5 – Fonctionnement du modèle atomique P-DEVS.

La fonction de transition externe, devant pouvoir gérer un nombre d'évènements externes quelconque, fait appel aussi à ce concept de sac :

$$\delta_{ext}: Q \times X^b \to S$$

Enfin, dernière différence avec le modèle atomique DEVS, la fonction de sortie peut générer un sac d'évènements :

$$\lambda: S \to Y^b \cup \{\emptyset\}$$

Les modèles atomiques P-DEVS respectent la propriété de fermeture par couplage, la modélisation modulaire et hiérarchique est donc toujours possible. Le modèle couplé P-DEVS est identique au modèle couplé DEVS, à la seule différence que la fonction *select* n'est plus nécessaire :

$$MCP = \langle X_{\text{self}}, Y_{\text{self}}, D, \{M_d\}, \{I_d\}, \{Z_{i,d}\} \rangle$$

Bien évidemment, les composants M_d de ce modèle couplé doivent être des modèles atomiques P-DEVS.

3.2.4 Simulateurs abstraits et implémentations

DEVS est un formalisme qui permet de spécifier rigoureusement une modélisation d'un système, tirant parti de la modularité et de la décomposition hiérarchique, mais il offre également une sémantique opérationnelle, par le biais de simulateurs abstraits fournis par Zeigler et coll. (2000). Ces simulateurs abstraits peuvent être considérés comme des algorithmes, indépendants de tout langage de programmation, qui permettent une formalisation sans ambiguïté de la dynamique du simulateur associé au modèle DEVS. Comme il existe deux types de modèles, il existe deux types de simulateurs abstraits : les *simulateurs*, correspondant aux modèles atomiques, et les *coordinateurs*, correspondant aux modèles couplés (voir figure 3.6). Pour chaque extension de DEVS, Parallel-DEVS par exemple, il existe des simulateurs abstraits correspondants.



FIGURE 3.6 – Structure hiérarchique d'un modèle DEVS couplé sous forme d'un arbre, avec la correspondance entre les modèles atomiques et couplés d'une part, et les simulateurs et coordinateurs d'autre part. Le coordinateur racine est responsable de la boucle générale de simulation (d'après Zeigler et coll., 2000).

L'existence de ces simulateurs a facilité l'apparition de nombreuses implémentations DEVS, qui ont bénéficié également de l'approche objet de ce formalisme. Ainsi, le concept de modèle hiérarchique se traduit par celui de composition (un modèle couplé est composé – au sens objet – d'autres modèles), les modèles atomiques et couplés se traduisent aisément en classes en utilisant héritage et polymorphisme. Parmi bien d'autres, il existe des implémentations DEVS basées sur C++ : ADEVS (*A Discrete EVent System simulator*, J. Nutaro, université d'Arizona), DEVS-C++ (Hyup. J. Cho et Young K. Cho, ACIMS, université d'Arizona), ainsi que sur Java : DEVSJAVA (H. Sarjoughian et B. Zeigler, ACIMS, université d'Arizona), JDEVS (J. B. Filippi, université de Corse). Comme nous n'utiliserons DEVS que comme outil de modélisation et non de simulation, nous n'entrerons pas plus dans le détail des simulateurs abstraits DEVS.

3.3 DEVS et les modèles cellulaires

Comme nous l'avons vu au chapitre précédent consacré aux automates cellulaires, les modèles cellulaires sont une solution intéressante lorsque l'espace doit être pris en compte de manière discrète dans le modèle. Il était donc inévitable, puisque c'est un formalisme à vocation universelle, que parmi les nombreuses extensions de DEVS, certaines soient dédiées aux modèles cellulaires, la plus aboutie d'entre elles étant certainement Cell-DEVS.

3.3.1 Cell-DEVS

L'approche naïve de la formalisation DEVS d'un automate cellulaire est de considérer chaque cellule comme un modèle atomique DEVS, de coupler ce modèle avec les cellules de son voisinage et avec l'espace cellulaire global (figure 3.7). Chaque cellule possède donc ses propres fonctions de transition. Le synchronisme des transitions peut être simplement assurée en ayant une fonction d'avance du temps identique pour toutes les cellules (la formalisation rigoureuse d'une transposition d'un automate cellulaire en P-DEVS est donnée par Vangheluwe, 2000, p. 87–88). Néanmoins, cette transposition ne tire pas avantage des possibilités de la gestion par évènements : toutes les cellules calculent un changement d'état même lorsque ce n'est pas nécessaire, le choix d'un pas de temps unique est crucial (et en général souffre de la nécessité d'équilibre entre précision et temps de calcul). Pour éviter ces inconvénients, Wainer et Giambiasi (2001b) ont proposé l'extension Cell-DEVS.

Le modèle Cell-DEVS correspond à celui de la figure 3.7, c'est-à-dire un espace cellulaire considéré comme un modèle couplé de cellules considérées comme des modèles atomiques. Cependant les cellules sont des modèles atomiques non standards, puisque leur dynamique est temporisée (d'où l'appellation complète originale de *Timed* Cell-DEVS) : l'état d'une cellule est modifié en fonction de l'état de son voisinage mais il ne sera connu des cellules voisines qu'après un certain délai. Le modèle atomique Cell-DEVS d'une cellule est défini par la structure suivante :

$$C = \langle X, Y, I, S, N, \text{delay}, d, \delta_{int}, \delta_{ext}, \tau, \lambda, ta \rangle$$

où :

X, Y, S, δ_{int} , δ_{ext} , λ et ta ont la même signification que pour le modèle atomique standard avec ports,

delay définit le type de délai utilisé par la cellule,



FIGURE 3.7 – Un espace cellulaire 2D avec DEVS : chaque cellule est considérée comme un modèle atomique couplé avec ses voisines et avec l'espace cellulaire global.

d est la durée de ce délai,

I est l'interface de la cellule,

N est l'ensemble des états des cellules voisines,

 τ est une fonction locale de calcul.

L'interface I de la cellule définit le voisinage de la cellule ainsi que les connexions en terme de ports d'entrée et de sortie entre la cellule et ses voisines. La fonction de calcul τ permet de déterminer le nouvel état de la cellule en fonction de l'état du voisinage transmis par I et conservé dans N. L'état de la cellule n'est effective pour ses cellules voisines qu'au bout du délai d'attente d. Autrement dit un délai est respecté entre l'arrivée d'un évènement externe qui provoque un changement d'état et l'activation de la fonction de transition interne qui appelle la fonction de sortie chargée de transmettre ce nouvel état. Ce délai peut être de deux types (les deux valeurs possibles de delay) : soit c'est un délai de transport (le délai représente alors tout le temps de propagation du signal dans la cellule, et tous les évènements sont transmis), soit c'est un délai *inertiel* (la sémantique est alors préemptive, tous les évènements ne sont pas obligatoirement transmis).

Une fois les cellules définies, il faut pouvoir les connecter et les inclure dans l'espace cellulaire. C'est le rôle du modèle couplé cellulaire qui se définit par la structure :

$$MCC = \langle X, Y, X_{\text{list}}, Y_{\text{list}}, I, n, \{t_1 \dots t_n\}, N, C, B, Z \rangle$$

où :

X et Y ont la même signification que pour le modèle couplé DEVS : ce sont les évènements externes d'entrée et de sortie avec ports,

 $X_{\text{list}}, Y_{\text{list}}$ sont les listes de cellules disponibles pour une connexion avec un autre modèle, respectivement en entrée ou en sortie,

I est l'interface du modèle cellulaire avec l'extérieur,

 $n \in \mathbb{N}$ définit la dimension de l'espace,

 $\forall i \in [1:n] \ t_i \in \mathbb{N}$ donne la taille de l'espace pour chaque dimension i,

N définit la forme du voisinage des cellules,

C représente les cellules contenues dans l'espace cellulaire,

 $B \subseteq C$ représente les cellules des bords, qui peut être l'ensemble vide (cas du tore en 2D),

Z est la fonction de traduction sortie-entrée entre ports de sortie et ports d'entrée.

Un modèle couplé Cell-DEVS est compatible avec un modèle couplé DEVS, ce qui permet de réaliser des modèles intégrant un automate cellulaire spécifié dans le formalisme Cell-DEVS et d'autres modèles compatibles DEVS (Wainer et Giambiasi, 2001a). Comme pour les autres extensions DEVS, Wainer et Giambiasi fournissent les simulateurs abstraits de leur modèle Cell-DEVS. De plus, Wainer (2002) a développé CD++ un ensemble de bibliothèques qui permet la définition de modèles DEVS et Cell-DEVS en utilisant un langage de spécification de haut niveau.

3.3.2 Espaces cellulaires non modulaires

Le formalisme Cell-DEVS présente deux inconvénients. Le premier est une modélisation qui peut être considérée comme plus complexe que celle d'un automate cellulaire classique, et qui n'est pas toujours aisée à mener à bien, notamment en ce qui concerne la question du choix du type de délai, et de la valeur de ce délai. Le deuxième inconvénient, inhérent au type de communication par port du modèle DEVS original, est le nombre de messages transmis lors d'une simulation. Pour une grille 2D carrée de dimension N, en supposant que chaque cellule envoie V messages à ses 4 voisines (voisinage de Von Neumann) durant une itération, on obtient dans le pire des cas $4N^2V - 4NV - 4V$ messages par itération, soit pour une grille de 200×200 et un seul message par cellule (V = 1), presque 160 000 messages par itération. Si l'on se place dans un espace cellulaire 3D, le nombre de messages devient vite un handicap insurmontable en termes de temps d'exécution, sauf si l'on peut garantir que peu de cellules aient à communiquer une information à chaque itération.

Pour pallier cet inconvénient, différentes solutions ont été proposées : Wainer et Giambiasi (2001a) mettent à plat la hiérarchie des coordinateurs du simulateur, Muzy et Nutaro (2005) éliminent les coordinateurs superflus et ne prennent en compte dans les algorithmes d'ordonnancement que les cellules actives, approche déjà envisagée par Hu et Zeigler (2004). Néanmoins, ces solutions restent au niveau de l'implémentation et continuent de traiter les cellules comme autant de modèles atomiques. Dans sa thèse, Shiginah (2006) adopte une démarche plus radicale qui lui permet de tirer avantage de ces améliorations en appliquant des méthodes comparables, mais cette fois au niveau de la modélisation.

L'idée principale de Shiginah est de diviser l'espace cellulaire en un nombre réduit de



FIGURE 3.8 – Principe du passage d'un espace cellulaire à N^2 modèles atomiques à sa représentation non-modulaire à 4 modèles atomiques seulement (Shiginah, 2006).

sous-espaces (nombre pouvant être égal à 1) qu'il rend équivalents à des modèles atomiques P-DEVS (figure 3.8), en utilisant la propriété de fermeture par couplage des modèles P-DEVS, qui garantit qu'un modèle couplé est *aussi* un modèle atomique. Ainsi, il peut éliminer les communications inter-cellules en les traitant de manière globale dans chaque sous-espace : les ports sont supprimés et les cellules ont un accès direct aux variables d'état des autres cellules. Il crée de cette façon un modèle atomique qu'il nomme *CellSpace* et qu'il formalise de la façon suivante ¹ :

 $CellSpace = \langle X, Y, S, n, \{t_1 \dots t_n\}, C, B, \{Cell_{id}\}, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda, Events \rangle$

où :

 $X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda$ ont la même signification que pour un modèle atomique P-DEVS,

 $n \in \mathbb{N}$ définit la dimension de l'espace,

 $\forall i \in [1:n] \ t_i \in \mathbb{N}$ donne la taille de l'espace pour chaque dimension i,

C représente les cellules contenues dans l'espace cellulaire,

 $B \subseteq C$ représente les cellules des bords,

 $\forall id \in C, Cell_{id} = \langle N, S^* \rangle, N$ étant le voisinage de id et S^* le tableau des variables d'états des cellules de ce voisinage,

 $Events = \{ (time, id) | time \in \mathbb{R}^+, id \in C \}$ est la liste des évènements à venir (*next events list*) qui remplace en quelque sorte la fonction d'avance du temps ta du modèle classique, avec la convention suivante :

 $ta(s) = \min(time)_{(time,id) \in Events}$

^{1.} Dans un souci de clarté, pour les concepts communs au modèle couplé Cell-DEVS, nous conservons les notations utilisées par Wainer et Giambiasi plutôt que celles proposées par Shiginah.

Cette liste d'évènements est la partie la plus complexe de ce modèle, puisqu'elle doit permettre de remplacer la fonction d'avance du temps globale du modèle atomique ainsi que toutes les fonctions d'avance du temps *locales* aux cellules, en y ajoutant de plus, le principe de scanner l'activité des cellules afin de ne traiter que les cellules actives ou susceptibles de le devenir.

Shiginah démontre de façon formelle que le modèle atomique ainsi obtenu est bien équivalent au modèle atomique P-DEVS, la seule différence étant que *CellSpace* comporte plus de détails et de paramètres, mais qui pourraient être inclus dans le comportement interne de tout modèle P-DEVS. Lorsque l'espace cellulaire a été divisé en quelques sous-espaces, Shiginah en obtient ainsi une représentation non-modulaire, équivalent à un modèle couplé P-DEVS, ce qui, outre le gain de temps de traitement, offre également l'avantage de simplifier dans certains cas la modélisation et donc de répondre ainsi à l'inconvénient de la complexité qu'implique parfois l'emploi du formalisme Cell-DEVS. Comme illustration de son modèle, Shiginah propose une modélisation de *Life* (voir section 2.2.3.2, page 33).

3.3.3 Relation avec les automates cellulaires étendus

Les résultats de Shiginah permettent de considérer un automate cellulaire, même en faisant l'économie d'une décomposition complète en modèles atomiques, comme un modèle P-DEVS, pour peu que soient respectées les sémantiques de communication avec l'environnement et de dynamique d'évolution. Si nous considérons un automate cellulaire étendu (voir section 2.3, page 37) :

$$ACE = (C, E, Q, V, f, g, P)$$
 avec $P = \{\Delta t, \Delta x, \ldots\}$

nous allons constater qu'il peut être décrit avec un modèle *CellSpace* défini dans la section précédente :

$$CellSpace = \langle X, Y, S, n, \{t_1 \dots t_n\}, C, B, \{Cell_{id}\}, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda, Events \rangle$$

En effet, en ce qui concerne la structure du modèle, la description de l'espace cellulaire n-dimensionnel est inclus dans les deux définitions (C d'une part, $C, B, n, \{t_1 \dots t_n\}$ d'autre part), et dans les deux cas nous avons un ensemble d'états du système (Q et S). L'information de voisinage V est contenue dans l'ensemble $\{Cell_{id}\}$.

Le système change d'état soit selon l'avancée du temps ($\Delta t \in P$ et ta défini grâce à Events) en respectant une fonction de transition interne (f et δ_{int}), soit selon l'arrivée d'évènements discrets (correspondant aux influences extérieures de l'automate cellulaire étendu) en respectant une fonction de transition externe (g et δ_{ext}). L'apport important de DEVS se situe justement dans la formalisation de cette fonction de transition externe, qui, comme nous l'avons vu au chapitre précédent, n'était pas assez rigoureuse dans le cas de l'automate cellulaire étendu. Nous disposons maintenant d'un modèle qui peut explicitement gérer des influences externes au système en tant qu'évènements discrets, non soumis à une mise à jour selon un pas de temps constant. Ces influences externes se traduisent également de façon précise en termes de ports d'entrée ou de sortie dans les ensembles X et Y, qui peuvent permettre par exemple de spécifier quelles sont les cellules concernées (ce qui correspond aux régions E_i de l'automate cellulaire étendu). De plus, les collusions entre une transition interne et une transition externe sont explicitement gérées par la fonction de conflit δ_{con} . Enfin, la fonction de sortie λ permet de donner une information supplémentaire sur ce que l'espace cellulaire transmet à son environnement. Le comportement de l'automate cellulaire étendu se trouve donc entièrement (et mieux) décrit par le modèle *CellSpace*. Les seules caractéristiques non prises en compte explicitement correspondent aux paramètres globaux contenus dans P, notamment le pas spatial. Comme il s'agit de simples attributs n'affectant pas la dynamique du modèle, ces caractéristiques peuvent être ajoutées à la définition de *CellSpace* sans perdre la conformité avec le formalisme P-DEVS.

3.4 Conclusion

Le formalisme DEVS décrit dans ce chapitre offre de nombreux avantages. C'est un outil de modélisation mais il permet également l'implémentation, en offrant une sémantique opérationnelle par le biais des simulateurs abstraits. L'utilisation d'un des nombreux logiciels ou bibliothèques dédiés à ce formalisme peut permettre de réduire le temps de développement d'un modèle, ainsi que sa vérification. La structure et la dynamique d'un modèle peuvent être décrits rigoureusement, en mettant à profit une vision modulaire et hiérarchique du système, grâce à la propriété de fermeture par couplage. Il est théoriquement possible de coupler des modèles DEVS existants et donc de définir ainsi des modèles de plus haut niveau d'une grande complexité en réutilisant des travaux antérieurs, d'où un gain de temps. Une grande qualité de DEVS est sa capacité à intégrer des formalismes et des paradigmes de nature différente, soit par *mapping* (traduction complète de l'existant vers DEVS), soit par *wrapping* (encapsulation de l'existant dans des fonctions permettant de faire la transition avec DEVS).

La modélisation des espaces cellulaires est également incluse dans DEVS, notamment grâce à Cell-DEVS qui ajoute au paradigme des automates cellulaires la notion de temps de transfert. La communication par ports de DEVS a cependant l'inconvénient de multiplier les messages inter-cellules, ce qui peut augmenter considérablement les temps de calculs lors d'une simulation. Parmi les solutions proposées pour pallier cet inconvénient, le modèle CellSpace permet de considérer un espace cellulaire de façon non-modulaire, ce qui élimine les communications inter-cellules et donc entraîne une économie en temps d'exécution, ainsi que dans certains cas une modélisation moins complexe. Le modèle atomique CellSpace est équivalent à un modèle atomique P-DEVS, et nous avons montré dans ce chapitre que ce modèle est parfaitement adapté pour la spécification rigoureuse d'un automate cellulaire étendu, ce qui établit par conséquent l'équivalence entre un automate cellulaire étendu et un modèle atomique P-DEVS. Il devient donc possible de construire un modèle couplé P-DEVS comprenant un automate cellulaire étendu, et nous exploiterons cette opportunité dans la définition de nos deux modèles d'évolution du sol qui seront décrits dans les deux parties suivantes de ce mémoire : le modèle de dégradation de la surface du sol sous l'action de la pluie, et le modèle de fissuration du sol par dessiccation.

Deuxième partie

Simulation de la dégradation du sol

Chapitre 4

Contexte scientifique

Sommaire

4.1	Introduction			
4.2	Défi	nitions	60	
	4.2.1	Érosion éolienne	60	
	4.2.2	Érosion hydrique	61	
	4.2.3	Dégradation de la structure du sol	62	
	4.2.4	Désagrégation thermique	63	
4.3	Mod	èles issus de l'informatique graphique	63	
	4.3.1	Précurseurs	63	
	4.3.2	Génération directe de terrains	65	
	4.3.3	Érosion de terrains virtuels	67	
	4.3.4	Récapitulatif et analyse de l'existant	70	
4.4 Modèles d'érosion				
	4.4.1	Modèles empiriques	71	
	4.4.2	Modèles basés sur les processus	72	
		4.4.2.1 Modèles standards	73	
		4.4.2.2 Automates cellulaires	74	
		$4.4.2.3 \text{Autres modèles} \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $	76	
	4.4.3	Récapitulatif et analyse de l'existant	77	
4.5	Cone	clusion	78	

4.1 Introduction

Le travail sur la dégradation de la surface du sol sous l'action des pluies décrit dans cette thèse peut légitimement s'inscrire dans le contexte plus large de l'érosion des sols, cette dégradation étant à la fois une conséquence de l'action d'agents érosifs (les gouttes de pluie et le ruissellement) et une cause d'aggravation de l'érosion, par formation des croûtes qui, réduisant la capacité d'infiltration de la surface du sol, augmentent le ruissellement et donc son action érosive (Le Bissonnais et Gascuel-Odoux, 1998).

En science du sol, l'érosion hydrique est avant tout un transfert irréversible de matière solide entre des zones de départ et des zones de dépôt, que ce soit par un processus relativement discret, en emportant les éléments fertiles du sol, ou de façon plus brutale, en creusant de profondes ravines. Ce phénomène représente un danger réel pour les terres agricoles car le sol est une ressource naturelle non renouvelable à l'échelle de temps historique : la formation du sol est un processus dont la durée caractéristique est le millénaire (Stengel et Gelin, 1998). De plus, l'érosion a des conséquences au-delà du sol lui-même, puisqu'elle entraîne une dégradation de la qualité des eaux, le déplacement de sédiments qu'il faut ensuite gérer, voire des coulées boueuses aux conséquences économiques importantes (Le Bissonnais et coll., 2002). C'est pourquoi le besoin de modèles d'érosion s'est fait ressentir dès le milieu du xx^e siècle, d'abord comme outil de prédiction afin de corriger et améliorer les techniques anti-érosives, mais également comme outil de compréhension et de recherche sur les processus impliqués.

En informatique graphique, la reproduction visuelle de scènes naturelles réalistes, et donc en particulier de paysages, est un champ de recherche qui existe depuis plus de 20 ans, et dont les champs d'application sont nombreux, notamment pour la création de décors naturels virtuels, au cinéma, dans les jeux vidéo, ou encore pour les simulateurs de vol. Assez rapidement, pour réussir à rendre les images de synthèse plus crédibles, une technique particulière a été employée : la simulation de processus érosifs sur un terrain virtuel, de manière à reproduire automatiquement les caractéristiques visuelles principales des terrains naturellement érodés.

La première partie de ce chapitre donnera quelques définitions relatives à l'érosion du sol. Nous consacrerons la deuxième partie aux modèles issus de l'informatique graphique, avant de donner, dans une troisième partie, une sélection de modèles d'érosion hydrique, venant principalement de la science du sol. Cet état de l'art nous permettra d'inscrire notre travail dans le contexte existant et en même temps d'en montrer l'originalité et l'intérêt.

4.2 Définitions

D'après la définition du « Dictionnaire des sciences de la terre » (Moureau et Brace, 2000), l'érosion est la lente détérioration du relief, par enlèvement des matériaux sous l'influence de facteurs extérieurs. Ces facteurs extérieurs sont l'eau, le vent, la glace ou la gravité. Nous ne traiterons pas de l'érosion par la glace, qui intéresse principalement les zones de montagnes où des glaciers sont en mouvement, et nous évoquerons brièvement l'érosion par le vent. Ensuite, après avoir détaillé les différentes formes d'érosion hydrique, nous définirons le phénomène de dégradation des sols et nous décrirons brièvement les croûtes de surface. Pour terminer, nous définirons un autre type de transformation du sol qui apparaît souvent dans les publications d'informatique graphique, il s'agit de la désagrégation thermique (*thermal weathering*), qui fait intervenir directement la gravité.

4.2.1 Érosion éolienne

Le vent peut mettre en suspension de très fines particules et les transporter sur de grandes distances (suspension). Les particules moyennes et fines peuvent être soulevées et redéposées sur de courtes distances (saltation) alors que les grosses particules peuvent être soufflées en surface (traction). L'abrasion qui en résulte peut réduire la dimension des particules de sol et augmenter d'autant sa susceptibilité à l'érosion. Les sols nus, secs et exposés sont les plus susceptibles d'être victimes de l'érosion éolienne. Ce type d'érosion n'est pas pris en compte dans notre étude parce que le climat assez humide prévalant en Europe de l'ouest et la nature des tempêtes, souvent associées à des pluies issues de dépressions océaniques, y réduisent les risques d'érosion éolienne qui devient dès lors négligeable par rapport à l'érosion hydrique. Il existe une équation empirique permettant de calculer l'érosion éolienne, WEQ (Wind erosion equation, Woodruff et Siddoway, 1965) basée sur cinq facteurs dépendant du sol, du climat et de la végétation. Cette approche rappelle fortement celle de l'équation universelle des pertes en terre (USLE, dont nous parlerons section 4.4.1), et il est d'ailleurs intéressant de remarquer que, de la même façon que USLE a été concurrencé par WEPP (Water Erosion Prediction Project, Lane et Nearing, 1989, voir section 4.4.2.1), le modèle empirique WEQ a été concurrencé par un modèle basé sur les processus, WEPS (Wind Erosion Prediction System, Wagner, 1996). Enfin, l'érosion éolienne a été également envisagée en synthèse d'images, pour générer des paysages de désert réalistes (voir par exemple Onoue et Nishita, 2000, Beneš et Roa, 2004).

4.2.2 Érosion hydrique

L'érosion par l'eau, ou érosion hydrique, recouvre l'érosion marine littorale, l'érosion fluviatile, l'érosion liée à des activités de génie civil, et l'érosion pluviale, qui est la plus importante en zone rurale et sous climat tempéré (Le Bissonnais et Gascuel-Odoux, 1998), ce qui est le cadre de cette thèse (nous verrons que certains modèles s'intéressent également à l'érosion fluviatile).

L'érosion pluviale, qui est donc le processus qui concerne directement notre travail, comprend deux agents actifs, les gouttes de pluie et le ruissellement :

- les gouttes de pluie exercent deux types d'action à la surface du sol : le détachement, qui produit des fragments à partir des agrégats ¹ par différents mécanismes, et le rejaillissement, qui projette certains de ces fragments; on emploie pour ce processus érosif le terme anglais de splash (de *splash erosion*, érosion par éclaboussement);
- le ruissellement est également un agent de transport de particules et de fragments de sol, mais il peut être également un agent de détachement, qui survient lorsque la concentration du ruissellement est possible, ce qui est causé souvent par des motifs agraires linéaires (traces de roues, sillons); la force tractrice du ruissellement est alors suffisante pour provoquer le creusement de rigoles (incisions centimétriques à décimétriques, ce processus est nommé *rill erosion*, érosion en rigole) ou de ravines (incisions décimétriques à métriques, ce processus est nommé *gully erosion*, érosion en ravine).

Spatialement, ces formes de détachement et de déplacement peuvent s'associer de façon très diverse, donnant naissance à des formes variées d'érosion dont nous retiendrons les deux principales :

^{1.} Définition donnée par le « Petit lexique de pédologie » (Baize, 2004) : l'agrégat est un agglomérat de particules élémentaires dont la cohésion interne est assuré par divers ciments (argiles, oxydes de fer, matières organiques, eau). Les agrégats peuvent être de taille très variée (de millimétrique à décimétrique), et les mottes peuvent se définir comme des agrégats de grande taille.

- l'érosion diffuse ou en nappe (sheet erosion) : dans les endroits où le ruissellement ne peut pas être suffisamment concentré pour former des rigoles (pente douce par exemple), il se produit quand même un déplacement de terre non négligeable, l'agent de détachement principal étant la pluie, et le ruissellement n'intervenant que pour tranporter;
- l'érosion rigole-interrigole (*rill-interrill erosion*) : elle se caractérise par la juxtaposition de rigoles parallèles, nombreuses et assez peu profondes; il est généralement admis que dans les zones de rigoles, c'est l'énergie du ruissellement qui est prépondérante, alors que dans les zones interrigoles, le détachement est principalement causé par l'énergie des gouttes de pluie, le ruissellement n'étant qu'un agent de transport (ce qui est aussi la caractérisation de l'érosion diffuse, d'où l'assimilation trouvée parfois entre érosion diffuse et érosion interrigole).

4.2.3 Dégradation de la structure du sol

Différents processus de réorganisation structurale (illuviation ², effondrement, compactage sous l'impact des gouttes et de la succion exercée par la couche de subsurface, sédimentation dans les microdépressions) viennent s'ajouter à la désagrégation et au déplacement de fragments ou de particules fines par les gouttes de pluie (Cerdan, 2001). Ces processus conduisent à la fermeture de la surface du sol et à la réduction de son infiltrabilité en formant une « croûte de battance » (figure 4.1).



- et meuble, l'infiltration possible va de 30 à 60 mm h^{-1} .
- b) Croûte structurale (certains (fragments restent distincts), l'infiltration possible va de 2 à 6 mm h^{-1} .
- c) Croûte sédimentaire (la surface est lissée), l'infiltration possible est de 1 mm h^{-1} .

FIGURE 4.1 – Les trois phases d'une formation de croûte de battance (Le Bissonnais et Gascuel-Odoux, 1998, Le Bissonnais et coll., 2002).

Les croûtes de battance peuvent se répartir en deux catégories (Bresson et Boiffin, 1990) :

- les croûtes structurales (*structural crusts*), qui résultent de la réorganisation des particules, sans déplacement important ni tri granulométrique;
- les croûtes sédimentaires (depositional crusts), qui sont liées à la présence d'un excès d'eau en surface (flaquage ou ruissellement), ce qui entraîne un déplacement et un tri granulométrique des particules. lors de leur dépôt.

^{2.} Processus d'accumulation et d'enrichissement d'un horizon pédologique par apport de matériaux provenant d'horizons sus-jacents; c'est le contraire du *lessivage* ou *éluviation* (Moureau et Brace, 2000).

L'observation montre que les croûtes sédimentaires se trouvent dans les dépressions et les croûtes structurales sur les reliefs. La conséquence majeure de la formation des croûtes est la réduction de la capacité d'infiltration à la surface du sol ce qui facilite l'apparition du ruissellement. Ainsi, sur des terrains nus ou peu couverts imperméabilisés par une croûte de battance, une pluie, même faible, déclenche un ruissellement important (Le Bissonnais et coll., 2002). La formation des croûtes est donc un processus aux interactions complexes, et qui a même un effet ambivalent sur les bilans de perte en terre (Cerdan, 2001) : d'un côté il tend à réduire l'infiltration et donc à favoriser le ruissellement, mais, d'un autre côté, il augmente la résistance à l'entraînement en renforçant la cohésion de la surface du sol.

4.2.4 Désagrégation thermique

La désagrégation thermique est due au choc provoqué par les différences de température entre le jour et la nuit (thermoclastie), ou, sur une échelle de temps qui peut être soit saisonnière, soit quotidienne, par la succession de périodes de gel et de dégel (cryoclastie) : le gel transforme l'eau contenue dans le matériau en glace, plus volumineuse, et la succession de variation de pression ainsi engendrée finit par fragiliser le matériau (rocheux particulièrement). Ce phénomène intervient aussi bien à l'échelle microscopique que macroscopique. La désagrégation thermique est plutôt bénéfique pour les sols cultivés, après les labours par exemple, et n'est pas à proprement parler un phénomène érosif puisqu'il ne provoque pas de transfert de matière. Cependant ce phénomène influe sur le relief du sol et donc, comme nous le verrons dans la section 4.3, il a souvent été modélisé en synthèse d'images, pour les simulations visuelles des terrains, sous la forme d'algorithmes assez simples et efficaces faisant intervenir des principes d'éboulement et de respect d'un angle de talus (Musgrave et coll., 1989, Beneš et Forsbach, 2001). Un exemple typique de résultat visuel d'un algorithme de désagrégation thermique est reproduit figure 4.2.



FIGURE 4.2 – Illustration de la reproduction des effets de la désagrégation thermique en synthèse d'images (Beneš et coll., 1997).

4.3 Modèles issus de l'informatique graphique

4.3.1 Précurseurs

Les terrains naturels sont composés de structures visuelles complexes : vallées, collines, crêtes, lits de rivière, etc. qui sont autant de défis à leur génération par la synthèse d'images. L'utilisation d'algorithmes fractals (Fournier et coll., 1982, Lewis, 1987) a été une première solution employée dans ce contexte, et a donné des résultats à première vue convaincants

(figure 4.3). Cependant, comme l'ont fait remarquer Musgrave et coll. (1989), un paysage ainsi généré présente une caractéristique révélatrice de son origine artificielle : une fois retourné verticalement, il est identique (statistiquement parlant). Cela est démontré par la figure 4.4 qui présente côte à côte un mouvement fractionnaire brownien (ou fBm, *fractional Brownian motion*, base couramment employée pour la génération d'un terrain fractal, Mandelbrot 2001) et son image inversée : ils ont des apparences équivalentes. Or, dans la nature, ce n'est presque jamais le cas, les dépressions ayant tendance à être comblées par des dépôts de matière.



FIGURE 4.3 – Deux exemples de terrains fractals : Fournier et coll. (1982) à gauche et Lewis (1987) à droite.



FIGURE 4.4 – Mise en évidence du principal défaut d'une figure fractale (ici un mouvement fractionnaire brownien) : une fois inversée verticalement, elle présente la même apparence que la figure initiale.

Ayant fait cette constatation, Musgrave et coll. (1989) ont proposé une amélioration en deux points : tout d'abord en introduisant l'utilisation de bruits de Perlin (Perlin, 2002), permettant un contrôle local de la dimension fractale et des caractéristiques de différentes zones du terrain, et surtout en altérant la surface ainsi générée au moyen d'algorithmes d'érosion : l'érosion hydrique par le ruissellement et la désagrégation thermique qui provoque l'adoucissement des fortes pentes par éboulement.

L'algorithme d'érosion hydrique se base sur trois actions de l'eau ruisselante sur la matière : dissolution, transport et dépôt. L'eau circule dans la direction du plus fort gradient, et le transport de la matière obéit à une diffusion basée sur le gradient. Cet algorithme ignore l'évaporation et l'infiltration, et nécessite des constantes qui ne sont pas toujours bien définies. Pour l'érosion thermique ce sont les changements de température qui provoquent la désagrégation de la matière. À cause de ces chocs thermiques de petites parties de sol sont détachées et tombent, ce processus s'effectuant d'une manière plus ou moins rapide selon la consistance du matériau. Comme pour le ruissellement, ces particules détachées suivent la plus forte pente. Cet algorithme thermique est simple et efficace, et donne des résultats visuellement réalistes (voir figure 4.5).



(a) Terrain fractal initial.

(b) Terrain après érosion (2000 itérations).

FIGURE 4.5 – Application d'une érosion hydrique et thermique sur un terrain fractal (Musgrave et coll., 1989).

Le principe d'améliorer l'apparence naturelle d'un terrain synthétique en essayant de lui appliquer des phénomènes érosifs sera repris par de nombreux travaux par la suite, donnant une famille de méthodes auxquelles nous consacrons la section 4.3.3. Cette famille, qui produit une séquence d'état successifs d'un terrain, s'oppose à celle engendrée par les travaux de Fournier et coll. (1982) et Lewis (1987), dans le sens où ceux-ci génèrent un terrain, par l'utilisation d'algorithmes fractals, qui n'évolue pas. Il est généré directement sous sa forme finale, celle-ci étant néanmoins souvent érodée (à la conception) afin d'être plus réaliste. La prochaine section est un état de l'art de modèles de cette famille.

4.3.2 Génération directe de terrains

Un autre article précurseur (Kelley et coll., 1988) va présenter un type de procédé qui sera lui aussi souvent utilisé : il s'agit de modifier le relief du terrain par une érosion fluviatile. Kelley et coll. ont ainsi proposé de produire des terrains réalistes avec un algorithme en deux étapes. La première étape reproduit la création d'un réseau hydrographique en respectant des données géologiques connues à partir des données saisies par l'utilisateur sur les exutoires des cours d'eau. Dans la seconde étape, le terrain est modifié comme un ensemble de surfaces sous tension cherchant à s'adapter aux données précédemment générées par un système de drainage, créant au final un paysage de rivières, vallées et montagnes (figure 4.6).

Dans cette classe de techniques de génération directe d'un terrain érodé, Prusinkiewicz et Hammel (1993) ont proposé d'éviter le recours à des données initiales et incluent directement la génération de rivières dans un algorithme fractal (*midpoint displacement*, ou déplacement des milieux). Leurs paysages atteignent un certain degré de réalisme avec toutefois trois défauts assez rédhibitoires : les rivières ne peuvent suivre une pente, les vallées qu'elles « creusent » sont souvent asymétriques (avec un côté vertical sur le flanc des montagnes) et par construction, elles ne peuvent pas avoir d'affluents (figure 4.6(c)).



(a) Vue filaire du terrain modélisé et du réseau hydrographique.



(b) Rendu du paysage obtenu à partir du terrain de gauche.



(c) Paysage fractal avec une rivière.

FIGURE 4.6 – Deux exemples de terrain incluant une rivière : à gauche le modèle de Kelley et coll. (1988), à droite, le modèle de Prusinkiewicz et Hammel (1993).

Le travail récent de Belhadj (2007) a donné un nouveau souffle à la génération fractale de terrains, en utilisant une version étendue du déplacement des milieux. La méthode proposée, nommée DMMC (Déplacement des Milieux Morphologiquement Contraint), gère aussi bien les contraintes locales serrées, données comme altitudes imposées au relief à générer, que les contraintes globales modifiant l'allure de ce même relief. Ces contraintes sont générées de trois façons différentes : par un dessin de l'utilisateur (figure 4.7a), par un modèle-squelette généré selon un algorithme original « d'écoulement » (figure 4.7b), ou encore à partir d'un squelette de lignes de crêtes décrit par un L-système (figure 4.7c).



FIGURE 4.7 – Trois exemples de terrains érodés générés par la méthode DMMC proposée par Belhadj (2007).

Enfin, pour compléter cet état de l'art, il faut signaler que des procédés plus originaux et sans base physique ont été proposés pour générer des terrains virtuels érodés. Ainsi, Marak et coll. (1997) ont tenté de formaliser certains des algorithmes utilisés pour la simulation de l'érosion en les réunissant dans un seul algorithme basé sur la réécriture de matrices. Une carte de hauteur représentant le terrain est considéré comme une matrice, et le processus d'érosion est traduit par une réécriture sensible au contexte de cette matrice. Les auteurs définissent des classes de matrices utilisables pour les différents algorithmes d'érosion et montrent leur capacité à simuler ainsi les techniques existantes, en donnant malheureusement peu de résultats visuels (figure 4.8). Plus récemment, Ong et coll. (2005) ont utilisé les algorithmes génétiques en découpant le processus en deux phases : tout d'abord, partant d'un découpage polygonal du terrain dessiné par l'utilisateur ou généré aléatoirement, un premier algorithme génétique produit une carte 2D avec des zones aux contours plus naturels et correspondant chacune à un type de terrain; ensuite, un second algorithme génétique est appliqué pour générer la carte de hauteur finale, en se basant sur une base de données d'échantillons de cartes de hauteur réelles représentatifs des types de terrain présents sur la carte.



FIGURE 4.8 – Exemple de simulation d'érosion par matrices d'après Marak et coll. (1997)

4.3.3 Érosion de terrains virtuels

Même s'ils se basent aussi sur l'écoulement de l'eau, Nagashima (1997) et Chiba et coll. (1998) s'opposent à Kelley et coll. et Prusinkiewicz et Hammel, dans le sens où ils proposent des méthodes de type évolutif. Nagashima (1997) mêle érosion hydrique et thermique, en ayant recours à un réseau fluvial prégénéré par une fonction fractale 2D indépendamment de la surface, puis en créant des vallées érodées et des terrains montagneux laissant apparaître des couches de sol différentes grâce à des paramètres géologiques, et en simulant l'érosion physique provoquée par le courant des rivières, les précipitations et la désagrégation thermique. Chiba et coll. (1998) présentent pour leur part une méthode simple et « quasi physique » pour simuler la topographie de montagnes érodées, basée sur les champs de vélocité des flux d'eau. L'écoulement de l'eau est simulé par le mouvement de « particules d'eau » sur lesquelles sont appliquées des forces causées par les gradients locaux. À partir d'un algorithme de détection de collision entre les particules et le sol, le flux arrache et transporte une certaine quantité de matériau, qui est déposé lorsque la capacité de transport du flux est excédée. Les résultats visuels sont de bonne qualité et certains peuvent présenter différents types de couches correspondants à diverses strates géologiques (figure 4.9).



(a) Surface initiale

(b) Après 50 itérations

(c) Après 100 itérations

FIGURE 4.9 – Érosion obtenue avec des couches géologiques d'après Chiba et coll. (1998).

Kelley et coll. (1988) s'appuyaient sur des données géologiques pour produire leur terrain (en donnant même dans leur article un lexique de termes de cette spécialité). Roudier et coll. (1993) ont repris cette idée en utilisant des paramètres géologiques et des lois issues de théories géomorphologiques simplifiées. Ces lois déterminent les effets de l'érosion mécanique, de la dissolution chimique ainsi que du dépôt de sédiments, effets qui sont liés en tout point de la surface aux paramètres géologiques des terrains. Roudier et coll. peuvent ainsi simuler l'érosion de différents types de couches géologiques. N'importe quelle carte de hauteur peut être choisie comme surface initiale, et un modèle 3D détermine les paramètres géologiques de chaque point d'après sa hauteur. Cette méthode est itérative : à chaque itération, l'enlèvement de roches et le dépôt d'alluvions sont calculés en chaque point de la surface du terrain. Ce modèle permet aux auteurs de créer des paysages de régions montagneuses avec des profils géologiques et des réseaux fluviaux (voir figure 4.10). Le résultat dépend fortement de la sufface du la sufface du



FIGURE 4.10 – Exemple de simulation d'érosion géologique d'après Roudier et coll. (1993)

Beneš et coll. (1997) ont repris le principe de l'algorithme d'érosion thermique de Musgrave et coll. (1989), en lui ajoutant une notion de hiérarchie, dans le sens où ils optimisent le temps de calcul en diminuant la résolution de la grille 2D par un simple moyennage, avant de répartir le matériau entre sommets, puis en appliquant un lissage par convolution sur la grille de résolution initiale pour réduire l'erreur introduite par la diminution de résolution. Leurs résultats sont focalisés sur le gain en temps de calcul et non sur des critères physiques tels que la conservation de la matière. Alors que la représentation en mémoire des terrains était quasi exclusivement assurée par des cartes de hauteur, Beneš et Forsbach (2001) introduisent une nouvelle structure de données dans ce contexte : inspirée des carottes géologiques, la représentation du terrain est basée sur des couches stratifiées horizontales composées d'un matériau unique. Ils appliquent à cette représentation l'algorithme d'érosion thermique précédemment évoqué. (Beneš et Forsbach, 2002) présentent une extension de ce travail, basée sur un algorithme d'érosion plus complet. Ils utilisent une érosion hydrique divisée en quatre étapes indépendantes et séparées, ce qui permet d'obtenir un meilleur réalisme et une accélération du temps de calcul (au dépends de la justesse physique) : apparition d'eau à partir de sources réparties sur le terrain ou de pluie répartie fractalement, dissolution et capture de matière par l'eau, ruissellement et transport de la matière en suspens et finalement, à cause de l'évaporation, dépôt de matière à un autre endroit. Cette simulation du ruissellement, de l'évaporation et du dépôt donne des images convaincantes (figure 4.11), mais l'étape de capture de matière est très simplifiée.

Une série d'articles récents met l'accent sur l'érosion provoquée par l'arrachage et le transport de sédiments par l'écoulement d'eau. Neidhold et coll. (2005) proposent une méthode en temps interactif (4 images par seconde pour une grille de 256×256 cellules) reposant d'une part sur une version 2D discrète d'une approximation de la dynamique des fluides (*stable fluids*, Stam, 1999) qui permet de gérer efficacement à la fois l'eau ruisselante et l'eau stag-



FIGURE 4.11 – Dépôt de sédiment dans une cuvette d'après Beneš et Forsbach (2002).

nante, et d'autre part sur un algorithme d'érosion qui utilise trois constantes qui définissent la capacité de sédimentation, la vitesse de dépôt et la vitesse de sédimentation. L'utilisateur peut jouer sur ces constantes et également ajouter des sources d'eau locales pour modifier le résultat (et même *peindre* directement de l'eau sur le terrain). La pluie peut également être simulée, avec une répartition temporelle constante ou aléatoire, et une distribution spatiale aléatoire (ensemble de points de Hammersley). Enfin l'évaporation est reproduite par l'utilisation d'une simple fonction exponentielle déjà proposée par (Beneš et Forsbach, 2002) et faisant intervenir une autre constante. Un résultat de cette méthode est reproduit figure 4.12.



FIGURE 4.12 - Résultat produit par la méthode de Neidhold et coll. (2005). Les sédiments transportés et déposés sont colorés en gris.

Beneš et coll. (2006) ont introduit l'utilisation de voxels afin d'obtenir une érosion hydrique véritablement 3D. Leur méthode couple les équations de Navier-Stokes (résolues selon la méthode aux différences finies proposée par Foster et Metaxas, 1996) avec un algorithme de dissolution et transport de sédiments sur une grille 3D, en utilisant deux types de matériaux, cohésifs et non-cohésifs. Cette méthode est capable de reproduire des phénomènes variés : chutes d'eau, érosion d'un lit de rivière, méandres, etc. (figure 4.13). Les temps de calculs interdisent cependant son utilisation en temps interactif. Deux articles assez proches, Beneš (2007) et Mei et coll. (2007), sont parus quasiment en parallèle, visant particulièrement à améliorer ce dernier point et à parvenir à une érosion hydrique de terrain virtuel en temps réel, en utilisant, pour la première fois dans ce contexte, des équations d'écoulement de lame d'eau peu profonde (2D Shallow Water Equations), Mei et coll. (2007) les ayant même implémentées sur GPU. Ces méthodes utilisent de nouveau des grilles 2D régulières de hauteur et restent comparables, pour ce qui est des principes de calculs relatifs à l'érosion hydrique, aux travaux précédents. Il est cependant intéressant de noter que ces articles d'informatique graphique font référence pour l'un à une publication en agriculture (Langendoen, 2000), et pour l'autre à une publication en science du sol (Julien et Simons, 1985).



FIGURE 4.13 – Exemple d'érosion provoquée par un bras de rivière d'après Beneš et coll. (2006). L'aliasage très visible révèle l'utilisation de voxels.

4.3.4 Récapitulatif et analyse de l'existant

De prime abord, seules des méthodes permettant une cinétique d'érosion, donc de la deuxième classe, sont à retenir pour le simulateur. Cependant, le terrain initial doit exister avant d'être soumis à l'érosion, et dans le cas où il devrait être créé *ex nihilo*, une méthode de génération peut s'avérer intéressante pour obtenir un premier terrain, comme nous le verrons au chapitre suivant, section 5.4.4.

Toutes les méthodes présentées se basent sur une discrétisation du terrain, le plus souvent sous forme de grille régulière 2D de hauteurs, avec parfois une notion de couches horizontales, ce qui peut se traduire par la notion de grille $2D\frac{1}{2}$. Le fait de pouvoir disposer, sur une même colonne de sol, d'informations différentes selon l'altitude du point considéré, semble être une propriété plus indispensable que celle de pouvoir gérer des particularités topologiques comme des arches ou des cavités enterrées. Les méthodes d'érosion, aussi bien thermique qu'hydrique, sont en grande majorité fondées sur des algorithmes de reports entre cellules. Il est à remarquer que les algorithmes d'écoulement de l'eau sont ceux qui ont fait l'objet de la plus grande sophistication, ce qui est une conséquence directe de leur intérêt immédiat pour la synthèse d'images animées. Les calculs de transports de sédiments sont eux toujours basés sur la notion de capacité de transport, calculée de manières diverses, et dépendent directement des calculs d'écoulement.

Certains des modèles cités font appel à la pluie comme élément érosif, mais la distribution des tailles de gouttes n'est pas une question abordée, et la distribution spatio-temporelle des gouttes de pluie reste le plus souvent très simplifiée. Par exemple Musgrave et coll. (1989) utilisent pour les évènements pluvieux l'approximation d'un processus adiabatique³ en considérant la hauteur de pluie comme une fonction linéaire de l'altitude, et ajoutent sur chaque sommet, à intervalles réguliers (toutes les 60 à 100 itérations), une hauteur d'eau équivalente à un millième de l'altitude du point considéré (par exemple cette quantité d'eau a été déposée toutes les 65 itérations pour obtenir l'image représentée figure 4.5(b)). Neidhold et coll. (2005) ont repris la même technique à la différence que l'altitude est élevée au carré, en revanche ils diversifient la distribution spatiale en utilisant une séquence quasi-aléatoire de Hammersley (Wong et coll., 1997), qui assure une bonne équirépartition de l'eau de pluie (mais sans montrer que cette répartition est plus proche de la réalité). Autre exemple, Beneš et Forsbach (2002) optent pour une distribution gaussienne de l'intensité de la pluie dans le temps, et pour une localisation sous forme d'une fonction fractale (sans autre précision).

^{3.} Dans un processus adiabatique, la compression s'accompagne toujours d'un réchauffement tandis que l'ascendance de l'air produit un refroidissement.

Cette approche est trop restrictive : d'une part elle donne pour une itération donnée la même hauteur d'eau à ajouter en tout point touché par la pluie, et d'autre part elle ne permet pas de reproduire des périodes de pluie qui ne respecteraient pas le type de distribution choisi par les auteurs. L'évaporation est parfois présente dans les modèles, simulée de façon empirique (Beneš et Forsbach, 2002, Neidhold et coll., 2005), de manière à provoquer la sédimentation. En revanche, l'infiltration n'est jamais reproduite, sauf dans le travail de Roudier et coll. (1993), alors que c'est une composante importante des transferts d'eau.

Enfin, il est bien sûr évident que les échelles considérées dans ces travaux sont très différentes de celle de notre étude, puisque les images à produire sont en général celles de paysage, et non d'une portion de sol. Cela explique pourquoi il n'est pas étonnant que la projection de fragments de sol par les gouttes de pluie ne soit jamais prise en compte. De même, les fragments détachés et transportés par l'écoulement ne sont jamais différenciés selon leur taille.

4.4 Modèles d'érosion

Les modèles d'érosion peuvent se répartir selon l'objectif poursuivi : soit ils sont à but prédictif, la prédiction concernant généralement la perte de sol provoquée par l'érosion, soit ils sont à but de recherche, c'est-à-dire fournissant une aide à l'étude et à la compréhension du phénomène. Cette distinction n'est en pratique pas évidente à faire, les modèles prédictifs étant améliorés continuellement grâce à la recherche les concernant. Si on se réfère à un historique des modèles d'érosion, une autre distinction s'impose, celle entre d'une part les modèles empiriques, qui furent les premiers à être utilisés, et d'autre part les modèles à base physique, c'est-à-dire basés sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques, qui sont apparus comme une alternative prometteuse aux modèles empiriques, dès que leurs limites commencèrent à apparaître.

4.4.1 Modèles empiriques

Le modèle sans doute le plus connu des modèles empiriques a été mis au point par le département américain de l'agriculture à partir d'un grand nombre de données sur l'érosion exploitées par un traitement statistique établi par Wischmeier et Smith (1958, 1978). Il a été baptisé USLE (*Universal Soil Loss Equation*, équation universelle des pertes en terre). L'objectif de ce modèle était de prédire quantitativement l'érosion par année au niveau de la parcelle cultivée, de manière à être comparée aux limites de pertes de terre tolérables et d'adapter en conséquence les mesures préventives. Le modèle peut se résumer à cette simple formule qui permet de calculer la perte en terre par unité de surface A:

$$A = R K SL C P$$

Dans ce modèle, l'érosion est donc le produit d'une fonction multiplicative dont les facteurs sont un ensemble de cinq sous-modèles qui donnent chacun une estimation numérique d'une composante précise qui affecte la gravité de l'érosion du sol à un endroit donné. Il est clair que si un facteur tend vers zéro, l'érosion tend vers zéro. R est l'érosivité de la pluie et du ruissellement. Plus les précipitations sont intenses et plus elles durent longtemps, plus grands sont les risques d'érosion.

K est l'érodibilité du sol, exprimée en perte de terre moyenne par unité de superficie pour un sol particulier. Ce facteur est fonction de la texture des sols, des matières organiques, de la perméabilité et de la structure du profil. Il se mesure sur des parcelles nues de référence de 22.2 m de long sur des pentes de 9%.

SL est le facteur topographique, qui dépend à la fois de la longueur et de l'inclinaison de la pente. Il représente le rapport des pertes de terre sous des conditions données, aux pertes de terre sur une parcelle de référence. Plus la pente est forte et longue, plus élevé est le risque d'érosion.

C est l'effet du couvert végétal, qui est un simple rapport entre les pertes de terre sur sol nu et les pertes de terre provenant d'une terre faisant l'objet d'une culture et d'un système de gestion spécifiques. Ce facteur sert donc à déterminer l'efficacité relative des systèmes de gestion du sol et des cultures en termes de prévention des pertes de terre.

P est l'effet des pratiques culturales, qui est le rapport entre les pertes de terre associées à une pratique de conservation, aux pertes de terre associées à la culture en lignes dans le sens de la pente. Il reflète donc les effets des pratiques qui réduisent la quantité d'eau de ruissellement et la vitesse de ruissellement et qui limitent de ce fait l'importance de l'érosion.

Les valeurs d'érosion obtenues par l'application de ces facteurs peuvent varier considérablement en raison des différentes conditions météorologiques. Par conséquent, les valeurs obtenues par le modèle USLE ne peuvent représenter avec une certaine précision que des moyennes sur plusieurs années. Il s'agit cependant du modèle empirique le plus utilisé pour prévoir l'érosion hydrique. Justifiant son qualificatif « universel », il a été nourri dans différents pays ou continents par de nombreuses collectes de données afin de l'adapter aux conditions locales. Il a également été modifié et amélioré dans une version révisée, RUSLE, mise au point par Renard et coll. (1997), notamment pour pouvoir rendre compte d'une topographie variable. Il reste que ce modèle présente des limites, dont la plus évidente est son incapacité à refléter les conséquences de précipitations sur une courte durée et à rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle des paramètres d'érodibilité. De plus, alors que les modèles empiriques peuvent servir efficacement à répondre à des questions relativement simples sur des pertes moyennes en terre, et à aider à lutter contre les effets de l'érosion sur la productivité et la durabilité de l'activité agricole, l'intérêt porté aux problèmes de qualité de l'eau, apparu dans les années 1970 surtout en Amérique du Nord et en Europe de l'Ouest, va provoquer l'apparition d'une nouvelle génération de modèles, destinés à pouvoir traiter, de façon plus détaillée, des événements érosifs plus localisés dans le temps et dans l'espace (Morgan et Quinton, 2001).

4.4.2 Modèles basés sur les processus

Cette nouvelle génération de modèles a une une approche plus déterministe et basée sur la description des processus physiques au travers de modèles mathématiques. Leur ambition est de parvenir à décrire et simuler le comportement physique des processus impliqués en se libérant de tout empirisme, et ainsi de gagner en universalité. Il s'avère que la complexité des phénomènes et l'état des connaissances contraignent souvent à utiliser dans ces modèles des équations dont la base est empirique, c'est pourquoi nous les dénommons ici « basés sur les processus » plutôt que « à base physique ». D'ailleurs, un modèle intégralement physique est peut-être un objectif inatteignable, comme le souligne Bryan (2000) : il n'est pas du tout évident que tous les processus et interactions impliqués dans l'érodibilité des sols puissent être modélisés physiquement ⁴.

Dès 1947, Ellison avait distingué quatre processus qui sont restés la base de tous les modèles développés par la suite : le détachement de particules par l'impact des gouttes de pluie, le détachement de particules par le ruissellement, le transport de particules par les gouttes de pluie, le transport de particules par le ruissellement.

4.4.2.1 Modèles standards

De très nombreux modèles basés sur les processus existent (voir par exemple les états de l'art proposés par Boardman et Favis-Mortlock, 1998, et Morgan et Quinton, 2001), parmi lesquels nous citerons trois modèles qui peuvent être qualifiés de « standards » : WEPP (Water Erosion Prediction Project, Lane et Nearing, 1989), EUROSEM (European Soil Erosion Model, Morgan et coll., 1998) et LISEM (LImburg⁵ Soil Erosion Model, De Roo et coll., 1996b,a). Certaines différences entre ces modèles sont révélatrices des choix auxquels sont confrontés les modélisateurs. Première différence, si WEPP opère sur un pas de temps d'une journée, en revanche, des modèles comme EUROSEM et LISEM (pour cette raison, qualifiés de dynamiques) utilisent un pas de temps beaucoup plus court, de l'ordre de la minute. Dans WEPP, le détachement par les gouttes de pluie est une fonction de l'intensité de la pluie. EUROSEM et LISEM se basent sur son énergie cinétique (qui est cependant souvent estimée sur la base de son intensité). Pour estimer le rôle de la canopée, WEPP considère la fraction de sol exposée directement à la pluie, en supposant que les gouttes interceptées n'ont aucun effet érosif. EU-ROSEM et LISEM partagent également la pluie en une fraction qui impacte directement le sol, et une autre fraction qui est interceptée par la végétation, mais ajoutent à l'énergie cinétique de la première fraction l'énergie cinétique des gouttes tombant des feuilles (et qui dépend donc de leur hauteur). Le détachement des particules par le ruissellement est déterminée par le déficit de la capacité de transport, défini par la différence entre la capacité de transport du flux et par la quantité de sédiments qu'il transporte déjà. Ce déficit peut être négatif et donc indiquer la nécessité d'un dépôt de sédiments. Quand l'écoulement peut détacher des particules, la quantité détachée dans WEPP est déterminée par la contrainte de cisaillement et la détachabilité du sol. EUROSEM et LISEM utilisent le déficit de la capacité de transport, déterminée non par la contrainte de cisaillement mais par l'énergie unitaire du courant (unit stream power) et la détachabilité du sol comme facteurs favorisant le détachement, et la vitesse de sédimentation comme facteur favorisant le dépôt.

Une autre différence rencontrée entre les modèles d'érosion est la gestion de l'espace. WEPP différencie les zones d'érosion de rigoles (*rills*) et les zones d'interrigoles (*interrills*),

^{4. «} In any case, it is not yet clear that all the processes and interactions involved in soil erodibility can be physically modelled. >

^{5.} Ce modèle a été établi à l'origine pour le gouvernement de la province de Limburg aux Pays-Bas, province soumise à d'intenses phénomènes d'érosion.

calculant un détachement différent selon le type de zone et sommant le tout pour obtenir un taux de détachement total, en faisant l'hypothèse que tous les sédiments détachés en zone d'inter-rigoles aboutit en zone de rigoles pour être transporté⁶. Ce n'est pas le cas de EUROSEM, qui calcule aussi explicitement une érosion différente selon le type de zone, mais en plus détermine le transfert de l'eau et des sédiments des zones d'inter-rigoles aux zones de rigoles. Enfin LISEM ne fait *a priori* aucune distinction entre l'érosion de rigoles et interrigoles, mais permet leur gestion de façon explicite par l'utilisateur. Une autre différence entre les modèles est le choix opéré entre le découpage de l'espace en grille régulière (qui pose la question de la taille des cellules), comme WEPP et LISEM, ou en zones polygonales, comme EUROSEM (chaque polygone représentant soit une pente plane et uniforme, soit un canal d'écoulement). Tous ces modèles opèrent à l'échelle du champ ou plus, et au minimum à l'échelle du bassin versant.

4.4.2.2 Automates cellulaires

À une toute autre échelle (millimétrique), Favis-Mortlock et coll. (2000) ont développé le modèle à automate cellulaire RILLGROW 2 qui applique des règles simples afin de gérer l'interaction entre la microtopographie, le ruissellement et la perte de sol. Dans ce modèle, l'accent est mis sur l'évolution de la surface plutôt que sur le transport de sédiment. Aucune distinction n'est faite *a priori* entre les zones de rigoles et les zones inter-rigoles : ces zones doivent apparaître spontanément lors des simulations, comme un phénomène émergent de l'automate cellulaire. Le sol est décomposé en une grille régulière de cellules et le ruissellement est discrétisé en paquets qui se déplacent de cellule en cellule, avec un pas de temps de l'ordre de 0.05 s. Les gouttes de pluie sont déposées sur la grille de manière aléatoire, le splash et l'infiltration ne sont pas modélisés. Le dépôt utilise une fonction linéaire du déficit de la capacité de transport, sans distinction de tailles des particules. Les motifs d'écoulement érosifs générés par ce modèle (figure 4.14) supportent bien la comparaison avec les observations d'expérimentations réelles et montrent la formation de rigoles en tant que propriété émergente de l'automate cellulaire, ce qui était un des buts poursuivis dans ce travail, en opposition aux modèles d'érosion rigoles-interrigoles qui nécessitent un partage préalable de l'espace.

Chase (1992) a utilisé un automate cellulaire pour étudier l'évolution de paysages érodés par des fleuves, sur de longues périodes de temps. Chase a introduit le concept de *precipitons* qui représentent des pluies (et non de simples gouttes). Après avoir été déposé aléatoirement sur une cellule de la grille représentant le paysage, le precipiton suit la plus grande pente et provoque une érosion, un transport et un dépôt, en suivant des règles communes, en fonction de quelques paramètres et des conditions locales. Le détachement des sédiments dépend ainsi de la pente locale et de l'érodibilité du sol, la capacité de transport dépend de la pente locale et de la vélocité du flot. Au fil des itérations, un paysage fluvial complexe finit par se créer, comme le montrent les résultats du programme LANDSAP de Luo (2001), basé sur les precipitons, résultats qui sont reproduits figure 4.15 et qui représentent l'évolution d'un canal martien. Ce programme gère l'infiltration et Luo introduit une innovation en permettant à l'eau infiltrée, sous certaines conditions, de saper le terrain, phénomène géré

^{6.} Les zones d'interrigoles sont en effet définies comme étant dominées par les processus de détachement dus à l'impact des gouttes de pluie et le transport par le ruissellement en nappe de faible profondeur. Les zones de rigoles sont en revanche définies comme étant dominées par les processus de détachement et de transport par ruissellement concentré.



FIGURE 4.14 – Illustration du modèle RILLGROW 2 (Favis-Mortlock, 2004). La figure (a) montre le résultat d'un écoulement sur une pente réelle de 10°, et la figure (b) le résultat de la simulation par RILLGROW 2. Les figures (c) et (d) montrent la formation de rigoles sur une pente par le même modèle.

par l'intermédiaire de *sappatons*, équivalent des precipitons pour la pluie. Les precipitons sont également à la base du projet WILSIM (*Web-based Interactive Landform Simulation Model*, Luo et coll., 2004), qui permet de simuler l'évolution d'un paysage provoquée par l'érosion hydrique. Bursik et coll. (2003) ont repris aussi le concept de precipitons, en ajoutant quelques fonctionnalités, notamment une possible interaction entre les precipitons en couplant l'automate cellulaire à une méthode SPH (*Smooth Particles Hydrodynamics*).



FIGURE 4.15 – Évolution d'un hypothétique canal martien par le programme LANDSAP (Luo, 2001).

Haff (2001) a également utilisé un automate cellulaire où des quantités d'eau individualisées, appelées *waterbots* se déplacent de manière autonome et asynchrone à travers le paysage à éroder, en étant capables d'arracher et de transporter des sédiments pour reproduire une érosion fluviatile. Contrairement à un precipiton, un waterbot ne représente pas obligatoirement un évènement pluvieux, mais une unité abstraite d'eau ruisselante provenant soit de plusieurs pluies, soit d'une seule pluie. Une interaction directe entre waterbots n'est pas permise, mais elle est simulée par des changements dans les propriétés des cellules qui peuvent être affectées par le passage d'un waterbot. Haff donne deux règles les plus simples que peuvent suivre les waterbots : bouger vers la cellule voisine la plus basse, toujours transporter la quantité de sédiments proportionnelle à la pente locale (ce qui provoque détachement ou dépôt, selon cette pente). Il indique comment ces règles peuvent se complexifier, et notamment comment le modèle peut gérer l'infiltration ou un transport de sédiments non linéaire. De plus, le concept de waterbot est étendu à celui de *geobot*, c'est-à-dire d'autres agents d'érosion, comme les *diffusionbots*, les *weatherbots* et les *debrisbots*, chargés respectivement de la gestion de l'érosion diffuse, de la désagrégation par augmentation du régolithe⁷, et du transport de débris. Un exemple d'application est étudié en détails, concernant l'érosion de la Death Valley, en Californie, montrant cependant des différences sensibles entre simulation et réalité. Le concept prometteur de geobot semble malheureusement être resté à l'état de théorie, aucune publication n'étant venue apporter d'autres résultats de simulation.

Nous avons déjà présenté les travaux de Di Gregorio et Serra (1999) au chapitre précédent, section 2.3, et leur modèle d'automate cellulaire étendu. D'Ambrosio et coll. (2001) ont repris ce modèle pour l'appliquer à l'érosion hydrique sous le nom de SCAVATU⁸ (*Simulation by Cellular Automata for the Erosion of VAst Territorial Units*). Le modèle gère l'infiltration sous une forme simplifiée (la conductivité hydraulique est constante), et le ruissellement par un algorithme de report entre cellules. La capacité érosive de la lame d'eau est calculée par une formule empirique tenant compte du couvert végétal, et le dépôt et la mobilisation par le ruissellement sont gérés par la capacité de transport. Les variations d'altitudes sont considérées comme négligeables par rapport à l'échelle considérée, le terrain n'évolue donc pas. Les premières applications sur le petit bassin de Fiumara Armaconi, au sud de l'Italie, ont donné des résultats encourageants en reproduisant le motif du réseau hydrique et en parvenant à donner des valeurs prédictives d'érosion convaincantes, correspondant à un épisode pluvieux intense.

4.4.2.3 Autres modèles

Une démarche originale a été présentée dans la thèse de Servat (2000), qui a proposé une description du ruissellement au moyen d'agents hétérogènes (les « boules d'eau ») qui interagissent dans un espace continu, et dont les diverses lois d'interaction permettent de prendre en compte le couplage de processus simultanés. Cette recherche a conduit au développement du simulateur de ruissellement et d'infiltration RIVAGE (Ruissellement et Infiltration Vus par des AGEnts). Les résultats numériques obtenus par ce modèle pour la simulation du ruissellement sont comparables à ceux obtenus en utilisant une solution aux différences finies des équations classiques de Saint-Venant. Même si ce n'était pas son but premier, le simulateur RIVAGE a pu incorporer des processus d'érosion par splash et d'érosion linéaire (figure 4.16), par l'introduction d'agents représentant les transferts de matière arrachée par l'érosion (les « boules de sol »). L'intégration d'un modèle d'infiltration a permis de tenter de rendre compte de la modification des propriétés hydriques du sol par ajout d'un indicateur de formation de croûte de battance, croissant avec la matière apportée par le splash, et décroissant avec la matière emportée par l'écoulement, la surface étant considérée comme imperméable dès que cet indicateur dépasse un seuil. Malgré la simplification extrême de l'évolution de l'infiltrabilité imposée par cet indicateur, les simulations permettent de retrouver des comportements réalistes, notamment l'influence de la pente sur les quantités de matière transportée, et l'apparition de zones imperméables à partir d'un sol initial hétérogène.

La thèse de Nord (2006) présente un nouveau modèle à base physique PSEM 2D (*Plot Soil Erosion Model 2D*) à l'échelle du versant, qui couple les mécanismes d'infiltration, de ruissellement et d'érosion liée à l'action de la pluie et de l'écoulement. La topographie du

^{7.} Le régolithe, ou « proche sous-sol », est la matière comprise entre le sol enrichi en matière organique (sol cultivé) et la roche saine (*bedrock*).

^{8.} Mot signifiant « érodé » dans les dialectes sicilien et calabrais.



FIGURE 4.16 – Évolution d'une surface soumise aux processus d'érosion avec des agents « boule d'eau », (Servat, 2000).

terrain évolue au cours de la simulation, mais une seule taille de particules est gérée. Le modèle ne représente pas explicitement le transport de sédiments par splash mais intègre la description de la cohésion et la présence d'une couche de sédiments lâches à la surface du sol, résultant de l'action de désagrégation par l'impact des gouttes de pluie et de la sédimentation. Le modèle travaille à l'échelle de l'évènement pluvieux, avec des intensités de pluie variables.

Comme une des finalités possibles d'un modèle prédictif d'érosion est d'aboutir un système d'aide à la décision pour la gestion agronomique ou environnementale, une approche classique dans ce domaine est de développer un système expert. Dans le contexte des modèles d'érosion, on peut définir les systèmes experts comme une démarche intermédiaire entre les modèles empiriques et les modèles à base physique : ils reposent sur une certaine connaissance des processus physiques, en essayant d'en utiliser les facteurs dominants, quantifiés sur la base de références expérimentales. STREAM (Sealing and Transfer by Runoff and Erosion in relation with Agricultural Management) est un système expert qui est un modèle de ruissellement, spatialisé, fonctionnant à l'échelle du bassin versant et de l'événement pluvieux (Cerdan, 2001). Une de ses principales caractéristiques est la prise en compte des états de surface de chaque parcelle et notamment des croûtes de battance dans les processus d'infiltration et ruissellement. Il permet de quantifier le ruissellement et les pertes en terre, tout en localisant les zones où ces phénomènes se produisent. Une démarche de type système expert n'est possible que grâce à l'existence d'une importante base de données de référence regroupant des expérimentations au laboratoire et au champ, et par conséquent, le modèle n'est a priori valide que pour la région correspondant à ces données.

4.4.3 Récapitulatif et analyse de l'existant

Dans la classification que nous avons utilisée, les modèles empiriques ne peuvent guère nous être utiles, puisque nous sommes dans une démarche résolument basée sur les processus. Ils pourraient toutefois servir de sources de données à fin de comparaison avec des simulations, mais le problème de l'échelle (spatiale mais aussi temporelle) semble rédhibitoire.

Une première constatation découle de l'étude des modèles basés sur les processus, c'est que les processus élémentaires à modéliser sont clairement identifiés : par exemple le détachement par les gouttes de pluie et par le ruissellement, le transport par la pluie et le ruissellement (en ajoutant le dépôt au transport par le ruissellement). Au delà de cette identification, malheureusement, les modélisations de ces processus sont très diverses, la complexité des interactions rendant semble-t-il impossible l'établissement de formalismes uniques et admis sans restrictions. Malgré tout, quelques points récurrents émergent : rôle de l'énergie cinétique de la pluie ou de son intensité, notion de capacité de transport, algorithmes de report (d'eau ou de sédiments). Beaucoup de modèles ne prennent pas explicitement en compte une évolution du relief car elle est peu importante à l'échelle considérée. La pluie n'est pas représentée par des gouttes individuelles, ce qui ne permet pas une distinction entre l'effet de l'intensité de la pluie et l'effet des tailles de gouttes, sauf pour le modèle de Favis-Mortlock et coll. (2000), qui utilise cependant une distribution normale des tailles de gouttes. Enfin, même pour les modèles les plus locaux, le développement des croûtes de surface n'est pas modélisé, et les différentes tailles d'agrégats ou de particules détachées ou transportées ne sont pas prises en compte.

Alors que les modèles d'informatique graphique sont focalisés sur l'évolution du relief à une large échelle spatiale et temporelle, les modèles d'érosion s'intéressent en majorité plus aux pertes en terre, à une échelle de temps réduite et à une échelle spatiale moyenne, et ne font pas intervenir une évolution du relief. Notre modèle se situe entre ces deux approches, puisqu'il fait intervenir une interaction entre l'érosion et l'évolution de la surface, à la fois dans sa structure et sa topographie, sur une échelle spatiale fine et une échelle temporelle plus proche de celle utilisée par les modèles d'érosion.

4.5 Conclusion

Ce double état de l'art sur les modèles d'érosion révèle des similitudes entre les domaines de l'informatique graphique et de la science du sol, similitudes qui soulignent par contraste l'originalité de notre approche. Une première similitude est que l'intérêt des chercheurs se porte en priorité sur des échelles beaucoup plus grandes que celle de notre étude, ce qui est montré par le petit nombre de travaux concernant des surfaces égales ou inférieures au mètre carré, échelles spatiales qui sont pourtant utilisées pour les études expérimentales, avec lesquelles notre modèle est donc plus cohérent. Une deuxième similitude est le manque de précision sur la modélisation de la pluie, notamment, pour les modèles locaux, sur la distribution des tailles de gouttes, alors que notre modèle gère explicitement des gouttes de pluie discrètes. Une troisième similitude est la gestion des sédiments sous forme d'un matériau homogène, sans distinction de tailles de fragments (ou au mieux comme ayant une dimension moyenne homogène – une exception est donnée par le modèle CHILD, Channel-Hillslope Integrated Landscape Development, Tucker et coll., 2001, qui simule le tri granulométrique en utilisant deux classes de taille, le sable et le gravier). Enfin, nous relevons une dernière similitude qui est l'absence de tentative de reproduire la formation de croûtes de battance, si ce n'est, exceptionnellement et de façon indirecte, dans son effet sur l'infiltrabilité du sol. Notre démarche se distingue donc de la plupart des modèles existants, avant tout par la prise en compte d'un couplage entre l'évolution de la surface du sol (sa structure, sa topographie, ses propriétés hydrodynamiques) et les processus d'érosion, qui en fait son originalité. Cette démarche implique que nous prenions en compte la granulométrie de manière fine, et plus généralement les conséquences de l'impact des gouttes de pluie et de la redistribution des sédiments sur la structure du sol et son évolution, notamment la formation de croûtes.

En revanche, nous ne nous écartons pas des modèles à base physique en ce qui concerne la liste des processus élémentaires à modéliser, même si cet état de l'art montre bien qu'ils sont difficiles à quantifier et que le recours à des équations empiriques est dans la majorité des cas inévitable. Tout aussi fondamentalement, le choix d'un automate cellulaire comme base du modèle nous rapproche de travaux qui ont montré l'intérêt de ce type de représentation dans la modélisation de l'érosion. En particulier Favis-Mortlock (2004), après avoir donné comme exemple son modèle RILLGROW 2, souligne que des systèmes auto-organisés peuvent produire des motifs et des relations complexes qui ne sont pas forcément le résultat de processus complexes, et que des approches par automate cellulaire peuvent être utilisées pour modéliser de tels systèmes, ces modèles n'ayant nul besoin d'être eux-mêmes complexes ⁹. Nous suivons notamment l'approche de ces travaux en ce qui concerne l'absence de nécessité de l'existence préalable de zones avec des types d'érosion différenciés, comme les zones de rigoles, pour parvenir néanmoins à reproduire des topographies proches de celles observées dans la réalité.

Enfin, il nous faut bien reconnaître que, sur le plan des objectifs poursuivis, ceux de l'informatique graphique nous semblent plus facilement satisfaits, mais aussi plus modestes, que ceux de la science du sol. Dans le premier cas, les images, qui sont la finalité poursuivie, atteignent souvent une grande qualité de réalisme, même si celui-ci est toujours perfectible. Le seul critère limitant reste le temps de calcul, qui oblige pour l'instant à faire un choix entre un réalisme accru et une vitesse d'exécution en temps réel. En ce qui concerne la science du sol, l'objectif de prédiction est autrement ambitieux et les modèles empiriques ont démontré leur validité dans leurs versions les mieux adaptées localement. Les modèles à base physique (dont une bonne part reste, comme nous l'avons souligné, empirique) gardent le plus souvent un objectif de prédiction (objectif qui ne semble pas atteint de façon satisfaisante, voir par exemple Jetten et coll. 1999, 2003), mais ont l'avantage de pouvoir être également des modèles de recherche, ce qui est souligné par Parsons et coll. (1997) : il n'est pas forcément réaliste de considérer la modélisation basée sur les processus comme un outil de prédiction de l'érosion des sols, mais elle est utile pour identifier nos lacunes actuelles dans la compréhension des processus d'érosion et pour aider à déterminer les sujets de recherche dans l'étude de l'érosion¹⁰. Pessimiste ou réaliste, cette opinion peut laisser cependant espérer que notre simulateur, dont le modèle, dans son aspect structurel aussi bien que fonctionnel, sera décrit dans le prochain chapitre, pourra être, à défaut d'être prédicteur, révélateur des questions les plus importantes à résoudre autant que de pistes de solutions pertinentes dans le cadre de modélisation fixé.

^{9.} Self organizing sytems can give rise to complex patterns and relationships which are not necessarily the result of complex processes. CA approaches can be used to model such systems, and these models need not themselves be complex.

^{10.} It is concluded that process-based modelling of interrill runoff may not be a realistic tool for predicting soil erosion, but is one that may be useful for identification of our present poor understanding of erosion processes. Such models help to define the research agenda for soil erosion studies.

Chapitre 5

Modèle de dégradation du sol

Sommaire

5.1 Int	roduction
5.2 Mo	dèle fonctionnel
5.2.1	Description informelle
5.2.2	Description formelle
	5.2.2.1 Modèle couplé P-DEVS
	5.2.2.2 Modèle atomique de terrain $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots $ 86
5.3 Mo	dèle structurel
5.3.1	Premier modèle de sol
5.3.2	Second modèle de sol
5.4 Init	ialisation
5.4.1	Définition du volume de sol
	5.4.1.1 Génération de la carte de hauteur
	5.4.1.2 Modification de la carte de hauteur
	5.4.1.3 Interpolation de la carte de hauteur
	5.4.1.4 Limitation $\dots \dots \dots$
5.4.2	Classes de particules
5.4.3	État initial des cellules
5.4.4	Génération d'agrégats
	5.4.4.1 Création d'un agrégat $\dots \dots 98$
	5.4.4.2 Intégration des agrégats
5.5 Cor	nclusion

5.1 Introduction

Notre objectif est de modéliser et visualiser l'évolution de la structure de la surface du sol sous l'action de la pluie. Nous présentons dans ce chapitre notre modèle de dégradation du sol, à la fois dans son aspect structurel, basé sur un espace cellulaire, et dans son aspect fonctionnel, basé sur le formalisme P-DEVS. Comme nous l'avons montré dans la première partie, le formalisme P-DEVS va nous permettre de décrire formellement l'aspect fonctionnel

de ce modèle et le cadre expérimental dans lequel il s'inscrit, et qui définit complètement une simulation (voir chapitre 1). Un même cadre expérimental peut être utilisé pour tester différents modèles, et un même modèle peut être testé au sein de différents cadres expérimentaux. Nous utiliserons ces deux possibilités puisque nous voulons à la fois que le simulateur puisse fournir des résultats réalistes, mais également pouvoir tester des idées nouvelles sur les processus impliqués.

Comme nous l'avons vu au chapitre 4, l'évolution de la structure de la surface du sol est la conséquence de l'action de plusieurs processus qui interagissent de manière complexe, processus gouvernés soit par les gouttes de pluie, soit par le ruissellement. Le ruissellement étant tributaire de la capacité du sol à infiltrer l'eau de pluie, capacité évoluant dynamiquement, nous prenons aussi en compte l'infiltration comme processus à modéliser explicitement. Nous obtenons donc trois familles de processus : pluie, ruissellement, infiltration, qui seront modélisées sous la forme de fonctions de transition DEVS et pourront donc être traitées séparément par l'algorithme de notre simulateur.

Après une première partie consacrée à la description formelle du modèle couplé P-DEVS de la dégradation du sol, et du modèle atomique du terrain lui-même, nous donnerons les détails de la structure de notre modèle dans une deuxième partie¹. La troisième partie sera consacrée à l'étape d'initialisation, notamment la création d'agrégats virtuels. Une description détaillée de la modélisation des différents processus intervenant dans l'évolution de la structure de la surface du sol et donc dans le fonctionnement de notre simulateur sera donnée dans le chapitre suivant.

5.2 Modèle fonctionnel

5.2.1 Description informelle

Nous étudions l'évolution de la surface d'une portion de sol d'aire inférieure au mètre carré, soumise à une pluie naturelle ou artificielle. Cette évolution est gouvernée par trois processus de transferts d'eau, la pluie, l'infiltration, le ruissellement, dont certains peuvent influer sur l'état du sol par l'intermédiaire du déclenchement d'autres processus. En effet, ces trois processus sont évidemment directement responsables de transferts d'eau, mais les gouttes de pluie peuvent de plus provoquer le détachement et le transport de particules²,

^{1.} Notre modèle P-DEVS de dégradation de la structure d'un sol par la pluie a fait l'objet d'une publication au sein de la communauté Modélisation et Simulation (Valette et coll., 2008c).

^{2.} Contrairement à Leguédois (2003), nous ne faisons pas de distinction dans notre modèle entre détachement et désagrégation : nous considérons que les gouttes de pluie produisent une certaine quantité de fragments de tailles diverses que nous ne différencions que par cette taille (et que nous identifions dans le modèle par le terme générique de « particules »).

alors que le ruissellement ³ peut lui entraîner ⁴ (ou, inversement, déposer) puis transporter ces particules détachées par les gouttes (tableau 5.1). À l'échelle de notre étude (longueur de pente de $0.5 \,\mathrm{m}$ au plus), nous considérons que le ruissellement n'est pas suffisamment concentré pour être capable de détachement (Leguédois, 2003). Nous avons donc à modéliser l'action de ces différents processus sur l'espace cellulaire qui représente le terrain.



TABLEAU 5.1 – Les trois processus hydrauliques impliqués dans la dégradation de l'état de surface du sol et les sous-processus qui leur sont associés et qui ont un effet direct sur le sol.

Ces processus sont très comparables dans leurs effets sur cet espace cellulaire, mais ils sont différents par nature : quand ils se produisent, l'infiltration et le ruissellement sont des phénomènes continus, alors que la pluie est une succession d'arrivées de gouttes, chacune étant localisée précisément dans le temps et dans l'espace. Il est donc naturel de modéliser les deux premiers processus en tant que processus à temps discret, et le troisième comme un processus à évènements discrets. Les sous-processus (affectant le sol) qu'ils déclenchent, sont bien sûr modélisés de la même façon. La figure 5.1 présente comment la succession de ces processus peut se représenter dans un schéma informel, cette succession étant répétée pendant une simulation et constituant une itération. Nous considérons que les gouttes de pluie sont des évènements discrets, extérieurs à l'espace cellulaire, pouvant être prises en compte pendant une certaine période, correspondant au pas de temps Δt du modèle, cette période étant qualifiée de « phase passive » pour l'espace cellulaire. Cette période étant achevée, l'espace cellulaire entre dans sa « phase active » qui va faire se succéder l'infiltration puis le ruissellement, de façon instantanée, cette succession des deux processus à chaque itération étant l'approximation de leur action parallèle dans la réalité. Nous verrons dans la section 5.2.2.2 que le formalisme P-DEVS permet de décrire exactement ce comportement au sein du modèle atomique de sol. La section suivante va tout d'abord replacer ce modèle atomique, c'est-à-dire l'espace cellulaire, dans le modèle parallèle couplé qui constitue le cadre expérimental.

^{3.} Nous parlerons dorénavant de ruissellement dans un sens plus large que celui généralement admis en science du sol, à savoir le processus d'équilibrage d'un volume d'eau, même petit (une goutte de pluie par exemple), sur une surface, même très réduite (par exemple, deux cellules, soit quelques mm²), alors qu'en science du sol on considère qu'il n'y a ruissellement qu'à partir d'un certain volume d'eau déplacé sur une surface suffisamment grande. Étant donné que nous traitons le processus à une échelle millimétrique, il n'y avait pas lieu d'établir une telle distinction basée sur un seuil quantitatif.

^{4.} Nous emploierons indifféremment les termes d'entraînement ou de mobilisation pour cette action du ruissellement sur les particules (déjà détachées).



FIGURE 5.1 – Représentation de la modélisation de la succession des processus de transferts d'eau gouvernant l'évolution de la structure de la surface du sol. Cette succession correspond à une itération.

5.2.2 Description formelle

5.2.2.1 Modèle couplé P-DEVS

Notre modèle de dégradation du sol est basé sur l'évolution d'un espace cellulaire qui sera décrit en détails dans la section 5.3. Sa description formelle s'appuie donc sur la correspondance entre le modèle *CellSpace* et le modèle P-DEVS (voir la section 3.3.2), et notre modèle couplé P-DEVS reprend le concept de cadre expérimental défini par Zeigler et coll. (2000) (voir section 1.2.2) qui comprend le modèle atomique cellulaire, et se décompose en un générateur, un interpréteur et un accepteur (figure 5.2).



FIGURE 5.2 – Le modèle couplé P-DEVS de la dégradation du sol par la pluie.

L'accepteur a pour fonction d'autoriser ou non la poursuite de la simulation en cours. Le critère d'arrêt est décidé lors de l'initialisation; par défaut, il s'agit de l'épuisement de la liste des épisodes pluvieux demandés au générateur, mais un autre critère peut être employé (par exemple le dépassement d'une certaine quantité de sol détaché). Un critère qualitatif est possible : par comparaison avec certains résultats numériques de référence, l'accepteur peut décider d'interrompre la simulation si celle-ci s'écarte trop de ces résultats. Enfin, l'accepteur peut également simplement traduire la volonté de l'utilisateur d'interrompre la simulation.

L'interpréteur reçoit du modèle cellulaire l'état du sol et doit le transformer pour en permettre une meilleure interprétation par l'utilisateur (voire l'accepteur). Dans notre cas,
l'une des tâches essentielles de l'interpréteur est de produire des images à partir de l'état de l'espace cellulaire qu'il reçoit, cela afin de permettre une observation visuelle de l'expérience virtuelle. Nous verrons dans le chapitre 7 comment l'interpréteur produit ces images, mais également comment il assure une autre fonction importante, celle de déduire des variables disponibles dans les cellules leur appartenance ou non à une croûte (cette information étant retournée à l'espace cellulaire qui peut l'utiliser pour certaines fonctions de transition, notamment l'infiltration).

Le générateur décrit les entrées fournies au modèle pendant la simulation. Nous séparons ces entrées en trois catégories, qui correspondent aux trois ports de la figure 5.2 : initialisation, interaction et génération de pluie (ou, de manière plus générale, d'eau). L'initialisation permet de définir toutes les conditions de l'expérience virtuelle, notamment le pas de temps, les valeurs des paramètres utilisés dans les équations reprises par les fonctions de transition, les caractéristiques du sol, etc. Cette étape d'initialisation, qui sera décrite dans la section 5.4, permet à l'utilisateur de changer le modèle lui-même, en modifiant le comportement des fonctions de transition. Il peut par exemple inhiber l'infiltration afin de simuler un sol imperméable, ou bien choisir parmi différentes méthodes pour calculer la masse détachée par une goutte de pluie. L'interaction permet à l'utilisateur d'envoyer au modèle des données pendant une simulation, par exemple en ajoutant des particules sur une cellule du terrain, ou en changeant le débit fourni par une source d'eau, ce qui étend les possibilités de l'expérimentation virtuelle. Enfin, le générateur est responsable de l'ajout programmé d'eau sur le terrain, par l'intermédiaire ou non de gouttes de pluie. Cela se traduit par deux indications : les coordonnées de la cellule de surface qui reçoit l'eau, et la quantité d'eau reçue, c'est-à-dire le diamètre de la goutte de pluie considérée comme sphérique, ou directement la hauteur d'eau à ajouter en cette cellule. La génération des gouttes de pluie sera détaillée au chapitre suivant, dans la section 6.2.1.

Formellement, le modèle couplé P-DEVS de la dégradation du sol SD se définit donc par la structure suivante, illustrée par la figure 5.2 :

$$SD = \langle X, Y, D, \{M_d\}, \{I_d\}, \{Z_{id}\} \rangle$$

X est l'ensemble des évènements d'entrée, c'est-à-dire les indications vers le générateur provenant du monde extérieur, autrement dit les choix de l'utilisateur.

Y est l'ensemble des évènements de sortie, venant soit de l'interpréteur (dans notre cas des images, des courbes) ou de l'accepteur (la décision « oui » ou « non »).

 $D = \{g, i, a, c\}$ est l'ensemble des identifiants des composants du modèle couplé.

Pour tout $d \, \mathrm{de} \, D$, M_d est un composant, donc un modèle P-DEVS : M_g est le générateur, M_i est l'interpréteur, M_a est l'accepteur et M_c est l'espace cellulaire.

Pour tout d de $D \cup \{SF\}$, I_d est l'ensemble des influences entre composants, représentées par des flèches dans la figure 5.2 et qui ont été décrites ci-dessus : par exemple, l'espace cellulaire influence l'interpréteur en lui envoyant son état, et l'interpréteur influence l'espace cellulaire en lui envoyant une information sur les zones de croûte.

Pour tout i de I_d , Z_{id} est l'ensemble des fonctions d'interprétation sortie-entrée entre i et d,

qui sont dans notre cas simplement des fonctions identité, puisque les informations échangées entre composants sont directement identifiées et interprétables (valeurs de paramètres ou de variables).

La section suivante est consacrée à la description du modèle atomique du sol, correspondant au composant M_c .

5.2.2.2 Modèle atomique de terrain

Nous avons vu au chapitre 3 que Shiginah (2006) a démontré qu'un modèle cellulaire pouvait être considéré comme équivalent à un modèle atomique P-DEVS, ce dernier pouvant ajouter dans son comportement interne les détails et les paramètres qui sont explicitement décrits dans un modèle atomique *CellSpace*. Nous allons donc utiliser la structure classique d'un modèle atomique P-DEVS pour définir formellement notre modèle atomique de sol M_c soumis à la pluie :

$$M_c = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda, ta \rangle$$

où :

X est l'ensemble des évènements d'entrée, qui comprend les informations venant du générateur (initialisation, interaction, arrivée d'eau ou de gouttes de pluie), et également des informations venant de l'interpréteur (les cellules considérées comme croûtées).

Y est l'ensemble des évènements de sortie, c'est-à-dire l'état du terrain, transmis à l'interpréteur.

S est l'ensemble des états du modèle atomique, c'est-à-dire {{*"active"*, *"passive"*} × S^* }, S^* étant l'ensemble des valeurs s des variables contenues dans les cellules (voir section 5.2). Le modèle est dans la phase passive quand il est en attente d'évènements externes, et passe en phase active quand il doit prendre en compte l'infiltration et le ruissellement (figure 5.1).

 $\delta_{int} : S \to S$ est la fonction de transition interne, c'est-à-dire la succession des fonctions d'infiltration \mathcal{I} et de ruissellement \mathcal{R} (qui comprend les sous-processus de mobilisation-dépôt et de transport de particules). Cette succession se traduit formellement par le changement de phase et d'état opéré par la fonction de transition interne :

$$\delta_{int}("passive", s) = ("active", \mathcal{I}(s))$$

$$\delta_{int}("active", s) = ("passive", \mathcal{R}(s))$$

 $\delta_{ext} : Q \times X^b \to S$ est la fonction de transition externe, avec X^b un ensemble de sacs d'éléments de X, c'est-à-dire de l'eau ou des gouttes de pluie et leur cellule d'arrivée, et Q l'ensemble $\{(s,e) \mid s \in S, 0 < e < ta(s)\}$, e étant le temps écoulé depuis la dernière transition d'état. Cette fonction ne modifie pas la phase de l'espace cellulaire, qui reste passive, mais change bien évidemment son état par appel à la fonction qui doit prendre en compte l'arrivée d'une goutte de pluie, que nous nommons par conséquent la fonction de splash S_p :

$$\delta_{ext}("passive", s, e, x^b) = \left("passive", \mathcal{S}_p(s, x^b)\right)$$

 $\delta_{con}: S \times X^b \to S$ est la fonction de conflit, appelée lorsqu'une goutte de pluie arrive à Δt , c'est-à-dire au moment où doit être activé la transition interne. Cette fonction a le comportement standard des modèles P-DEVS :

$$\delta_{con} = \delta_{int} \circ \delta_{ext}$$

ce qui signifie dans notre cas que la phase de l'espace cellulaire passe de passive à active, et que la fonction de splash S_p est appelée avant l'infiltration \mathcal{I} (autrement dit, la goutte de pluie est traitée en priorité) :

$$\delta_{con}("passive", s, e, x^b) = \left("active", \mathcal{I} \circ \mathcal{S}_p(s, x^b)\right)$$

 $\lambda: S \to Y$ est la fonction de sortie, appelée juste avant la fonction de transition interne, et qui transmet simplement l'état du terrain (le contenu des cellules), quand la phase est passive, et ne fait rien sinon :

$$\begin{array}{l} \lambda(``passive",s) = s \\ \lambda(``active",s) = \emptyset \end{array}$$

 $ta: S \to \mathbb{R}^+$ est la fonction d'avance du temps, qui dans la phase passive, renvoie le pas de temps, constante indépendante de l'état de l'espace cellulaire, et dans la phase active, retourne 0 quel que soit l'état de l'espace cellulaire (il s'agit d'une phase transitoire) :

$$ta("passive", s) = \Delta t$$
$$ta("active", s) = 0$$

Maintenant que nous avons décrit formellement le modèle fonctionnel de notre terrain virtuel, avec les trois processus hydrauliques que nous avons besoin de simuler pour reproduire un évènement pluvieux, nous allons nous attacher à en décrire la structure, c'est-à-dire la manière dont sont représentées les informations définissant l'état s du sol.

5.3 Modèle structurel

Dans le phénomène que nous cherchons à simuler, la structure spatiale de l'état de surface du sol joue un rôle fondamental en déterminant les connexions entre différentes zones de production de ruissellement ainsi que leur connexion à l'exutoire de la parcelle. La topographie en interaction avec la nature et la localisation des croûtes détermine cette structure spatiale. Il est donc crucial de gérer des informations sur la topographie mais aussi sur l'épaisseur, la localisation, la nature des croûtes de surface, ce dernier point impliquant de considérer la granulométrie des sédiments détachés, transportés, déposés par la pluie ou le ruissellement et son évolution au cours des phénomènes de mobilisation, transport et dépôt. Par conséquent l'espace cellulaire que nous devons manipuler doit être tridimensionnel et permettre de gérer de façon explicite la granulométrie des sédiments. Comme la croûte est un volume qui va être créé et évoluer durant la simulation, nous avons choisi un découpage régulier de tout l'espace considéré en parallélépipèdes rectangles. En surface, ce découpage nous permet d'établir une bijection entre l'espace cellulaire et la carte de hauteur du terrain qui en définit les altitudes selon un échantillonnage régulier (voir la section 5.4.1). En ce qui concerne la représentation conceptuelle de l'espace cellulaire, et le type des cellules qui le composent, nous avons travaillé successivement avec deux modèles différents, qui vont être détaillés dans les deux sections suivantes.

Premier modèle de sol 5.3.1

Le premier modèle que nous avons utilisé correspond à un ensemble de cellules cubiques de $2 \,\mathrm{mm}$ de côté. La figure 5.3(a) montre comment l'espace cellulaire peut se représenter. Il comprend trois sortes de cellules :

- les cellules hors sol, qui ne représentent pas une partie du volume physique mais contiennent uniquement des informations locales de surface (altitude, hauteur d'eau, particules contenues dans l'écoulement);
- les cellules d'atmosphère, qui ne contiennent aucune information;
- les cellules de sol, qui contiennent les différentes variables quantitatives décrivant le sol, ou, pour reprendre le vocabulaire des automates cellulaires étendus, les différents sous-états (énumérés ci-après).



(b) Cellules visualisées.

FIGURE 5.3 – Illustration du premier modèle structurel du sol sur un volume de $8 \times 8 \times 7$ cellules. Lors de la visualisation, la place d'une cellule de sol correspond exactement à celle d'un voxel.

Les cellules d'atmosphère ont un double rôle : d'une part, elles permettent d'avoir une bijection parfaite entre la représentation en mémoire des cellules du sol et la visualisation du volume comme le montre la figure 5.3(b), chaque cellule pouvant être considérée comme un voxel au même emplacement, et d'autre part, elles constituent une réserve de cellules au dessus de la surface pouvant être transformées en cellules de sol (puisque l'altitude du terrain peut changer par accumulation de particules - et inversement, une cellule de sol peut disparaître par érosion et devenir une cellule d'atmosphère).

Les cellules de sol contiennent les variables quantitatives décrivant le sol. Le sol peut être considéré comme un complexe dynamique à trois phases qui s'interpénètrent et s'influencent réciproquement (Musy et Soutter, 1991) : la phase solide (matière, fragments, agrégats, particules...), la phase liquide (l'eau), la phase gazeuse (l'air). Ces phases peuvent être additionnées, en considérant leurs volumes. Ainsi, le volume total d'un échantillon de sol V_{cell} peut s'écrire :

$$V_{cell} = V_s + V_l + V_q \tag{5.1}$$

avec V_s le volume de sol, V_l le volume d'eau et V_g le volume d'air. Comme nous opérons sur une grille régulière, c'est-à-dire que toutes les cellules ont une section d'aire identique, la hauteur d'une phase est équivalente à son volume, nous pourrons donc calculer directement sur les hauteurs :

$$H_{cell} = H_s + H_l + H_q \tag{5.2}$$

avec H_s la hauteur de sol, H_l la hauteur d'eau et H_g la hauteur d'air. Comme dans ce modèle H_{cell} est une constante, H_g peut facilement se déduire de H_s et H_l , qui sont donc les premiers sous-états d'une cellule de sol.

Comme nous l'avons déjà indiqué, l'une des particularités les plus originales de notre simulateur est la prise en compte d'une information granulométrique variable dans l'espace et le temps. Il est important de préciser que le sol en début de simulation ne contient aucune particule : celles-ci sont uniquement le produit du détachement opéré par les gouttes de pluie, et donc n'existent pas avant le début d'un épisode pluvieux. Nous ajoutons aux hauteurs de matière et d'eau stockées dans une cellule, les nombres entiers de particules de certaines tailles (figure 5.4). Le volume total d'une cellule de sol s'écrit à présent :

$$V_{cell} = A_{cell} \left(H_s + H_l + H_g \right) + \sum_{i=1}^{N_c} N_i V_i$$
(5.3)

avec A_{cell} l'aire de la cellule (c.-à-d. 4 mm²), \mathcal{N}_c le nombre de classes de particules considérées, V_i le volume d'une particule de la classe i, $N_i \in \mathbb{N}$ le nombre de particules de cette classe contenues dans la cellule. Comme auparavant, il est inutile de conserver la valeur de H_g qui peut toujours être obtenue par différence avec le volume constant de la cellule. Ce premier modèle de sol prenait en compte cinq classes de particules, considérées comme des cubes, avec une dimension correspondant à des tailles de tamis standard, à savoir 50 µm, 100 µm, 250 µm, 500 µm et 1000 µm. Dans une cellule, nous considérons comme de la matière continue le volume solide qui n'est pas constitué de particules correspondant à ces tailles.



FIGURE 5.4 – Les sous-états d'une cellule de sol.

Les agrégats peuvent être définis comme des agglomérations de particules élémentaires du sol, formant des unités distinctes. Les agrégats peuvent avoir des diamètres variés, allant de la fine poussière à la motte. La présence d'agrégats, leur position, leur taille et leur forme sont d'importantes caractéristiques de la structure d'un sol, car elles sont révélatrices de son état et permettent d'établir un lien avec les opérations agricoles. La distribution des tailles d'agrégats est parfois utilisée comme indicateur de l'état d'un sol (Shepherd, 2000, figure 5.5).



FIGURE 5.5 – Classification des sols en trois états caractérisés notamment par la taille et la qualité des agrégats (Shepherd, 2000).

De manière à pouvoir représenter les agrégats dans notre espace cellulaire, nous ajoutons trois sous-états binaires à chaque cellule de sol, états correspondant chacun à un lien possible avec une cellule précise du voisinage, ce lien existant si cette cellule appartient à un même agrégat 5 (ces liens sont représentés par des flèches dans la figure 5.4). En considérant toutes les cellules voisines ayant une face commune, il y a en fait six liens possibles. Ces liens étant bi-directionnels, il est possible de supprimer les informations redondantes en n'en considérant que la moitié : lorsque deux cellules sont liées, une seule conserve cette information.

Bits	Nombre	Sous-état	Dimension (mm)
1 - 6	6	hauteur de matière	31.25×10^{-3}
7 - 12	6	hauteur d'eau	31.25×10^{-3}
13 - 15	3	\sharp particules de classe 5	1
16 - 21	6	\sharp particules de classe 4	0.5
22 - 30	9	\sharp particules de classe 3	0.25
31 - 32	2	non utilisés	_
33 - 45	13	\sharp particules de classe 2	0.1
46 - 61	16	\sharp particules de classe 1	0.05
62 - 64	3	X-lien, Y-lien and Z-lien	_

TABLEAU 5.2 – Distribution des 64 bits d'une cellule de sol.

Dans un souci d'économie de mémoire, nous avons pour ce premier modèle décidé de limiter la taille d'une cellule à 64 bits, et stocké les sous-états sous trois formes :

- un nombre de « couches unitaires » pour l'humidité et la matière continue,
- une quantité entière pour les particules de chaque classe de taille.
- un bit pour chaque lien.

^{5.} Dans notre modèle, nous appelons donc agrégat tout assemblage d'au moins deux cellules (ce qui impose de fait une limite de taille minimale).

Le tableau 5.2 donne la composition précise d'une cellule. La hauteur d'une couche est trainte par le nombre maximal qu'une cellule peut en contenir. Comme nous réservons

contrainte par le nombre maximal qu'une cellule peut en contenir. Comme nous réservons 6 bits pour les hauteurs de matière et d'eau, ce nombre ne peut dépasser 63. Considérant qu'une cellule de sol ne peut pas n'être composée entièrement que de matière continue ou d'eau, nous définissons la hauteur d'une couche à $1/64=31.25 \,\mu\text{m}$, ce qui correspond au volume d'une particule de classe 4.

Ce modèle a servi aux premiers essais de simulation et a fait l'objet de deux publications (Valette et coll., 2005, 2006b), mais a rapidement présenté des limitations et différents inconvénients. Le fait de n'utiliser qu'un seul modèle de cellule pour le sol est une perte de mémoire importante, puisqu'il peut exister des cellules sans particule, donc avec 47 bits inutiles. De même les cellules d'atmosphère, hormis leur rôle de cellules de sol potentielles, ne servent à rien sinon à simplifier l'étape de visualisation du volume, voire de possibles traitements impliquant un voisinage 3D (comme la gestion des agrégats par exemple). Le comptage des particules en nombres entiers a posé un problème récurrent dans toutes les opérations concernant des quantités de particules (création, transport), à savoir la définition du passage en valeur entière des quantités calculées en valeur réelle, problème crucial pour les plus grosses particules, où le choix entre 0 et 1, compte tenu de la taille de la cellule relativement proche de la taille des particules considérées, a des conséquences très différentes sur la simulation. La discrétisation des volumes de matière et d'eau en couches présente également deux inconvénients. Le premier inconvénient, lors du détachement, est que le minimum de matière à détacher est une couche de matière, à transformer en un nombre équivalent de particules (soit, par exemple, 1000 pour les particules les plus fines), qu'il n'est pas toujours évident de faire correspondre à la quantité calculée. Le second inconvénient, lors de l'infiltration, est que la quantité d'eau infiltrée dans une cellule doit être également un nombre entier de couches, ce qui risque d'introduire un biais dans les calculs. Pour toutes ces raisons, nous avons abandonné ce premier modèle et conçu un second modèle de sol, décrit dans la section suivante.

5.3.2 Second modèle de sol

Dans le second modèle structurel de sol, nous avons décidé d'abandonner la gestion de nombres entiers de particules, puisque cette gestion n'offrait au final que peu de compensation aux problèmes soulevés (le fait d'avoir un nombre entier est insuffisant en soi par exemple pour pouvoir tracer certaines particules, ce qui aurait été intéressant). Nous avons de fait privilégié la précision des résultats et la souplesse d'utilisation à l'occupation en mémoire, qui devient très importante pour une cellule, à cause de l'emploi de nombres à virgule flottante pour toutes les quantités. La figure 5.4 reste valide pour le contenu des cellules de sol, excepté que les particules sont considérées maintenant comme des sphères, que toutes les quantités sont réelles (plus de prise en compte d'un nombre de couches de matière ou d'eau) et que nous ajoutons à ces quantités l'énergie cinétique cumulée, provenant de l'impact des gouttes de pluie et propagée verticalement dans le sol (section 6.2.3). Les équations (5.2) et (5.3) restent néanmoins valides, avec pour cette dernière à présent la prise en compte d'un nombre réel de particules : $N_i \in \mathbb{R}^+$.

De manière à supprimer certains défauts du premier modèle, nous avons changé la conception de l'espace cellulaire (figure 5.6(a)), en suppriment les cellules d'atmosphère et en in-



FIGURE 5.6 – Illustration du second modèle structurel du sol sur un volume de $8 \times 8 \times 5$ cellules. Lors de la visualisation, un décalage des colonnes de voxels est nécessaire pour reproduire le relief.

troduisant une distinction dans les cellules de sol, ce qui nous donne au final trois sortes de cellules :

- les cellules hors sol, qui ne représentent pas une partie du volume physique mais contiennent uniquement des informations locales de surface (altitude, hauteur d'eau, particules contenues dans l'écoulement);
- les cellules de sol qui ne comportent pas de particules; elles sont alors nommées « non fragmentées » et elles ne conservent que les quantités d'eau et de matière continue ainsi que l'énergie cinétique cumulée et les liens d'agrégat;
- les cellules de sol qui comportent des particules (soit créées localement par le détachement, soit transportées par splash ou ruissellement), elles sont nommées « fragmentées » et contiennent bien évidemment les mêmes informations que les cellules non fragmentées, plus l'information sur les quantités de particules (non entières) de chaque classe.

La nouvelle catégorie de cellules de sol permet une relative économie de mémoire : pour un codage des réels en *float* (respectivement en *double*), les cellules non fragmentées occupent 16 octets (respectivement 28), et les cellules fragmentées 44 octets (respectivement 84). Nous ajoutons à ces types de cellules quatre exutoires latéraux, cellules adimensionnelles destinées à recueillir les quantités d'eau ou de particules sortant d'un côté du terrain, et un exutoire d'infiltration, destiné à recueillir l'eau infiltrée sortant de la dernière couche de cellules disponible (si le modèle d'infiltration génère cette information).

Bien évidemment, la suppression des cellules d'atmosphère a enlevé le bénéfice de la bijection entre les cellules et les voxels qu'offrait le premier modèle. Les colonnes de cellules comportant à présent toutes un même nombre de cellules, au moment de la visualisation il est nécessaire, pour reconstituer le relief, d'opérer un décalage de chaque colonne tenant compte de la hauteur du terrain à son sommet, comme le montre la figure 5.6(b). La visualisation avec ce modèle offre donc un volume moindre que celle possible avec le premier modèle, le terrain étant d'épaisseur constante en tout point (figure 5.7). Cela est compensé par un avantage conséquent : quelles que soient les différences d'altitude du terrain initial, l'épaisseur de l'espace cellulaire peut rester arbitrairement fixée sans perte d'information, alors que ces différences d'altitude imposaient au premier modèle une épaisseur minimale pour ne pas avoir des zones sans aucune cellule de sol. Il est à noter que dans ce modèle, le voisinage d'une cellule de sol en mémoire n'est plus le voisinage réel de la cellule dans le sol : il faut tenir

compte du décalage d'altitude déjà utilisé pour la visualisation. Cela doit être pris en compte pour tout processus 3D mais également pour la définition des agrégats, basée sur trois liens avec des cellules voisines.



(a) Premier modèle.

(b) Second modèle.

FIGURE 5.7 – Illustration de la différence dans le nombre de cellules visualisées en profondeur entre le premier (a) et le second (b) modèle de sol, sur un volume de $279 \times 279 \times 50$ cellules pour le premier modèle, et $279 \times 279 \times 20$ cellules pour le second.

Les cellules d'atmosphère permettaient de pouvoir créer de nouvelles cellules de sol, dès que nécessaire. Cela n'est plus possible avec le second modèle : pour conserver le même nombre de cellules dans chaque colonne, un ajout de cellule en haut d'une colonne provoque la disparition de la cellule du bas de cette colonne (et inversement, la disparition de la première cellule par érosion provoque l'apparition d'une nouvelle cellule en bas de la colonne). Pour ne pas perdre d'information sur l'évolution de la granulométrie, il faut donc prévoir un nombre suffisant de couches de cellules, c'est-à-dire un nombre qui ne sera jamais inférieur au nombre de cellules fragmentées dans une colonne (ce qui doit correspondre en théorie à une épaisseur maximale de croûte).

5.4 Initialisation

L'initialisation du simulateur peut se partager en deux parties : l'initialisation du modèle structurel, et l'initialisation du modèle fonctionnel. La partie fonctionnelle de l'initialisation sera traitée dans le prochain chapitre : à chaque description de la modélisation d'un processus, les paramètres d'initialisation correspondants seront précisés. Nous nous intéressons dans cette section à la partie structurelle de l'initialisation et développons les points suivants : la définition du volume de sol, l'état initial des cellules, la génération d'agrégats.

5.4.1 Définition du volume de sol

5.4.1.1 Génération de la carte de hauteur

La géométrie de l'espace cellulaire est basée sur une carte de hauteur représentant la topographie du terrain. Les techniques pouvant générer des terrains virtuels peuvent se répartir en trois catégories : le dessin direct par l'utilisateur, la génération aléatoire, ou encore l'utilisation d'un modèle numérique de terrain (MNT). Dans la première catégorie, outre la possibilité de fournir une carte de hauteur sous forme d'une image en niveaux de gris, nous

offrons à l'utilisateur un moyen de définir une succession de pentes régulières, de même largeur paramétrable et de longueurs différentes. Le terrain le plus simple ainsi généré est un carré plan. Cette génération de cartes de hauteur nous est utile pour reproduire des expériences simples de laboratoire (gouttière, plan incliné, voir par exemple la section 6.3.2.3) ou pour créer des expériences virtuelles avec un terrain de caractéristiques données (comme celui présenté section 7.4.4.2). Nous n'avons pas utilisé de génération aléatoire de terrain (à l'exception de son emploi conjointement avec la génération d'agrégats, présentée ci-après, section 5.4.4). La seconde source de carte de hauteur a été les modèles numériques de terrain, réalisés par rugosimétrie laser à l'unité INRA de Laon. La figure 5.8 présente un échantillon de lit de semence reconstitué dans un bac, et la visualisation volumique produite par le simulateur à partir du MNT obtenu de cet échantillon.



FIGURE 5.8 – Un échantillon de sol cultivé reconstitué au laboratoire, et sa visualisation volumique dans le simulateur obtenue à partir du MNT correspondant. Les emplacements de trois agrégats sont signalés dans les deux images.

Une fois la carte de hauteur établie, de manière classique, chaque point ayant une information d'altitude est considéré comme le centre d'un carré possédant sur toute sa surface cette même altitude (ce carré étant en bijection avec un pixel d'une image en niveaux de gris). Dans notre modèle, chacun de ces carrés ou pixels correspond à une colonne verticale de cellules de l'espace cellulaire, ce qui impose les dimensions de cet espace sur le plan horizontal. Le nombre de cellules sur l'axe vertical est laissé en tant que paramètre d'initialisation (sa valeur correspondant typiquement à quelques centimètres).

5.4.1.2 Modification de la carte de hauteur

L'utilisation d'une carte de hauteur en entrée du simulateur pour définir la topographie du sol permet beaucoup de modifications, notamment celles offertes par la manipulation des images en niveaux de gris. Nous n'avons pas exploré les possibilités de cette manière particulière d'initialiser le terrain. Pour illustrer simplement ce point par un exemple, la figure 5.9 montre comment par simple soustraction entre la carte de hauteur obtenue par rugosimétrie laser et une photographie en niveaux de gris d'un pneu de tracteur, il est possible d'ajouter une empreinte de pneu au terrain virtuel, et donc de faire interagir cette empreinte avec la pluie et l'écoulement de l'eau. Cet exemple sommaire permet néanmoins de souligner un autre aspect des possibilités de l'initialisation du terrain : en définissant des propriétés particulières liées à la carte de hauteur de l'empreinte de pneu (par exemple une densité plus forte du sol dans les hauts niveaux de gris correspondant aux trous les plus profonds), il est possible non seulement de jouer aisément sur la topographie du terrain, mais aussi sur certaines de ses propriétés qui vont influer sur son évolution sous l'action de la pluie.



pneu.

obtenu par rugosimétrie laser.

pneu par modification de la carte de hauteur.

tion de l'empreinte du pneu virtuelle et de

l'écoulement de l'eau.

FIGURE 5.9 – Un exemple de manipulation d'une carte de hauteur permettant d'ajouter l'empreinte d'un pneu de tracteur à un terrain virtuel.

5.4.1.3Interpolation de la carte de hauteur

Pour un MNT, dans le cas où la dimension horizontale des cellules choisie est différente de la résolution initiale, il faut passer par une étape d'interpolation de la carte de hauteur. C'est ce que nous avons fait notamment pour différentes simulations de l'expérimentation sous simulateur de pluie (voir section 7.5.1), où nous avons utilisé des dimensions de cellule de 5 mm et 10 mm à partir d'une résolution initiale de 2 mm. La méthode d'interpolation choisie est le krigeage ou kriging, du nom de son précurseur Krige (Gratton, 2002), telle qu'elle est proposée par le logiciel Surfer. D'abord développé pour la prospection minière, le krigeage est devenu par la suite une méthode de grille géostatistique très utilisée dans différents domaines (géophysique, géologie, traitement d'images, conception et fabrication assistées par ordinateur,...). Il utilise des variogrammes, c'est-à-dire des courbes donnant le poids à affecter aux points de données en fonction de leur distance au point à interpoler. Cette méthode permet donc de respecter la structure spatiale de l'information considérée dans la zone à étudier (dans notre cas l'altitude). Le krigeage autorise par ailleurs deux types d'interpolation : ponctuelle (similaire à un rééchantillonnage) ou par blocs (estimation de l'altitude moyenne de blocs). La figure 5.10 montre une comparaison des terrains virtuels obtenus par krigeage à partir d'une carte de hauteur initiale d'une résolution de 2 mm, pour des résolutions de 5 mm et 10 mm et pour les modes point et bloc. Visuellement, le mode bloc lisse plus la surface initiale et nous semble de ce point de vue moins intéressant. Nous avons donc plutôt utilisé les cartes de hauteur obtenues avec le mode point.

Limitation 5.4.1.4

L'utilisation d'une carte de hauteur pour représenter un terrain offre les avantages de la simplicité et de l'économie, puisque un volume tridimensionnel est représenté par un ensemble de données bidimensionnelles. Cette propriété fondamentale est également la limitation principale du procédé : certaines zones du terrain échappent à cet échantillonnage de la surface, comme le montre la figure 5.11(a), et, aussi fine que soit la résolution de la carte de hauteur,



(a) Carte de hauteur originale R = 2 mm



(b) R = 5 mm mode point (c) R = 5 mm mode bloc (d) R = 10 mm mode point (e) R = 10 mm mode bloc

FIGURE 5.10 – Comparaison des terrains virtuels obtenus par krigeage avec deux résolutions R et pour les modes point et bloc.

ces zones auront disparu du terrain virtuel (figure 5.11(b)). Cette perte d'information est notamment mise en évidence lorsque le terrain est soumis à une pluie verticale, puisque les zones abritées peuvent rester sèches pendant un moment (figure 5.11(c)), alors que ce phénomène ne peut pas être reproduit par le terrain virtuel dont tous les points, correspondant chacun à un pixel de la carte de hauteur, sont par définition atteignables par une goutte de pluie tombant verticalement (figure 5.11(d)). Il est difficile d'estimer les conséquences de cette limitation sur les résultats d'une simulation, cependant, en ce qui concerne l'effet de la pluie, l'observation montre que très vite même les faces abritées des agrégats d'un terrain sont mouillées à cause de la diffusion rapide de l'eau ajoutée à la projection de gouttelettes à partir du point d'impact d'une goutte de pluie.



FIGURE 5.11 – Illustration de la disparition entre (a) et (b) de certaines zones de sol (ajoutées en rouge dans le profil du terrain virtuel) due à l'échantillonnage en deux dimensions. Ces zones sont mises en évidence notamment sous une pluie verticale, puisqu'elles restent sèches pendant un moment (c), propriété que ne peut reproduire le terrain virtuel pour lequel tous les points sont soumis à la pluie de manière identique (d).

5.4.2 Classes de particules

Contrairement au premier modèle de sol, où leurs dimensions étaient fixées, nous avons laissé dans le second modèle la possibilité à l'utilisateur de choisir les dimensions des particules. Elles sont réparties dans ce modèle en sept classes définissant chacune une gamme de tailles et ayant un diamètre moyen servant à calculer le volume d'une particule de la classe, considérée comme sphérique. Les choix par défaut du simulateur sont donnés dans le tableau 5.3. Nous justifions le choix d'une répartition globale entre 20 μ m et 2000 μ m parce que d'une part, en dessous de la première taille, toutes les particules sont toujours transportées (Beuselinck, 2000, Leguédois, 2003), et que d'autre part, 1000 μ m-2000 μ m constitue la limite de compétence du ruissellement (à cette échelle) et du splash (Leguédois, 2003). Toutes les tailles de particules présentant un intérêt pour le bilan granulométrique du sol sont ainsi représentées.

Classe	Gamme d (mn	e tailles n)	Diamètre moyen (mm)
1	$0.002 \rightarrow$	0.02	0.006
2	$0.02 \rightarrow$	0.05	0.032
3	$0.05 \rightarrow$	0.1	0.071
4	$0.1 \longrightarrow$	0.2	0.141
5	$0.2 \rightarrow$	0.5	0.316
6	$0.5 \rightarrow$	1	0.707
7	$1 \longrightarrow$	2	1.414

TABLEAU 5.3 – Définition par défaut des classes des particules.

L'utilisateur doit définir une masse volumique pour chaque classe de particules ⁶ (valeur par défaut : $2000 \,\mathrm{g}\,\mathrm{cm}^{-3}$ pour toutes les classes). D'autres caractéristiques des particules intéressant la dynamique du simulateur (distances moyennes de projection, angle de repos,...) doivent être déterminées à l'initialisation, elles seront indiquées lors de l'exposé de la modé-lisation de chaque processus dans le prochain chapitre.

5.4.3 État initial des cellules

Les MNT dont nous avons disposé provenaient d'un rugosimètre laser avec une résolution horizontale de 2 mm, ce qui a fixé dans un premier temps la dimension de la section horizontale (carrée) des cellules, dimension qui a été reportée sur la profondeur dans notre premier modèle de sol (section 5.3.1). Nous avons dans un deuxième temps tenté d'utiliser un modèle birésolution (qui sera présenté section 7.3.3.2), avant d'opter pour des dimensions laissées au choix de l'utilisateur lors de l'initialisation. Le volume des cellules est donc défini par la

^{6.} La matière non fragmentée du sol doit également disposer d'une masse volumique initiale et d'une masse volumique maximale (valeurs par défaut : $950 \,\mathrm{g \, cm^{-3}}$ et $1600 \,\mathrm{g \, cm^{-3}}$).

dimension du côté de leur section horizontale carrée, et par leur épaisseur ⁷; ces dimensions doivent donner un parallélépipède d'un volume suffisant pour contenir une particule de la plus grosse taille, soit pour nos valeurs par défaut, une cellule minimale de $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$, ce qui était la dimension utilisée pour notre premier modèle de sol.

Les cellules ne contiennent aucune particule au début d'une simulation (les particules correspondent uniquement au produit de la désagrégation par la pluie), elles sont donc toutes de type cellule non fragmentée. Une porosité et une teneur en eau initiales homogènes sont utilisées pour les sous-états des cellules, l'énergie cinétique étant bien évidemment nulle avant tout épisode pluvieux. Si les informations existent, la discrétisation du sol en cellules peut permettre de distinguer des zones spatiales avec différents états poreux ou hydriques initiaux, et ainsi d'étudier leur influence sur l'évolution d'une simulation.

La dernière information nécessaire aux cellules correspond aux trois liens définissant les agrégats. Alors que visuellement, la discrimination des agrégats, à partir d'une certaine taille, ne pose pas de problème (la figure 5.8 le montre, il est aisé de reconnaître les agrégats de plus grande taille en surface, et ce aussi bien sur une photographie du sol original que sur sa visualisation dans le simulateur), une segmentation de l'espace cellulaire en agrégats différenciés et en cellules non agrégées demande une plus grande précision et pose de grandes difficultés. Notamment, la question se pose de trouver comment segmenter un agrégat dans sa partie enfouie. Nous avons donc plutôt cherché à générer des agrégats directement dans l'espace cellulaire, en tentant de leur donner une forme réaliste et en respectant une distribution statistique donnée.

5.4.4 Génération d'agrégats

5.4.4.1 Création d'un agrégat

La littérature est pauvre sur le sujet précis de la génération de formes réalistes d'agrégats. Un programme tel SIMPLE (*SIMulation of PLant Emergence*, Dürr et coll., 2001), qui crée des lits de semence tridimensionnels à partir de variables d'entrée décrivant la forme des agrégats, leur nombre et leur organisation spatiale, se base sur l'hypothèse simplificatrice que les agrégats sont de forme ellipsoïdale parfaite. Nous avons cherché à approcher une forme plus réaliste, à savoir celle des agrégats polyédriques, représentés en majorité dans les photographies de sol avec lesquelles nous avons travaillé, comme celle reproduite figure 5.12(a). La figure 5.12(b) montre un résultat auquel nous sommes parvenus.

La méthode employée pour générer un agrégat comme un ensemble de cellules liées entre elles est la suivante. L'agrégat est défini par deux paramètres : une boîte englobante, représentant ses dimensions maximales, et un nombre de plans de coupe. Tant que ce nombre n'est pas atteint, la procédure suivante est réitérée :

^{7.} Nous verrons dans la section 6.2.3 que nous faisons évoluer dynamiquement la densité des cellules, selon leur composition granulométrique et l'énergie cinétique due à l'impact des gouttes de pluie, ce qui implique que leur porosité, et donc leur épaisseur, varient également. Cette épaisseur initiale sert d'une part à définir l'épaisseur maximale d'une cellule pour provoquer la création d'autres cellules en surface lorsque des particules sont ajoutées, et d'autre part à donner la dimension verticale d'un voxel pour la visualisation volumique, qui sera décrite section 7.2.1.



FIGURE 5.12 – Comparaison entre un sol réel présentant des agrégats et un sol virtuel. Des effets d'aliasage sont visibles et sont dus à la relative grande dimension des cellules (2 mm de côté).

- 1. une direction est tirée au hasard à partir du centre de la boîte englobante;
- 2. cette direction définit une intersection avec l'ellipse inscrite dans la boîte englobante;
- 3. un point est tiré au hasard sur le segment défini par le centre et cette intersection, à partir d'une distance minimale (par défaut 70 % de la longueur du segment);
- 4. le plan orthogonal au segment passant par ce point vient intersecter la boîte englobante, et seules les cellules situées du même côté que le centre de la boîte sont conservées dans l'agrégat.

Des étapes successives de ce procédé sont reproduites dans la figure 5.13.



 $\label{eq:FIGURE 5.13} FIGURE \ 5.13 - Création de la forme d'un agrégat polyédrique par intersections successives d'une boîte englobante avec des plans aléatoires.$

5.4.4.2 Intégration des agrégats

Les agrégats étant créés, l'espace cellulaire a besoin également de la définition d'une surface. Plutôt que d'inclure simplement les agrégats dans un parallélépipède rectangle, produisant ainsi un sol plat, nous avons utilisé un algorithme classique de génération de terrain (*fault algorithm*, algorithme de faille) pour définir une surface et par conséquent un soussol. Les agrégats sont définis avec un pourcentage d'enfouissement, et au moment de leur placement, une recherche d'intersection avec les agrégats déjà placés permet d'éviter toute anomalie dans le terrain final. Le placement de l'agrégat se traduit simplement par la substitution, dans l'espace cellulaire, des cellules sans lien par les cellules de l'agrégat. Un résultat de cette méthode est reproduit figure 5.14.



FIGURE 5.14 – Exemple d'ajout d'agrégats sur un sol virtuel créé par l'algorithme de faille (*fault algorithm*).

Des relevés au champ permettent de disposer des distributions de tailles d'agrégats en surface et en profondeur (un exemple est donné par le tableau 5.4). Les classes de taille des agrégats sont définies par une seule dimension L, correspondant à leur plus grande longueur. Un agrégat peut être décrit par cette dimension, plus une longueur intermédiaire l et un petit axe h. Nous utilisons les rapports théoriques l/L = 0.79 et h/L = 0.63 calculés par Dexter (1985) et repris dans SIMPLE pour obtenir h et l, que nous assimilons, avec L, aux trois dimensions de la boîte englobante de l'agrégat.

Classe	Gamme de tailles (mm)	% surface	% profondeur
1	$0 \rightarrow 2$	22.9	33.7
2	$2 \rightarrow 5$	15.0	25.5
3	$5 \rightarrow 10$	14.6	17.7
4	$10 \rightarrow 20$	18.3	14.0
5	$20 \rightarrow 30$	9.0	6.8
6	$30 \rightarrow 40$	8.0	2.4
7	$40 \rightarrow 70$	12.2	0.0

TABLEAU 5.4 – Exemple de distributions réelles de tailles d'agrégats en surface et en profondeur, utilisées pour produire les agrégats de la figure 5.15.

En créant les agrégats de surface séparément des agrégats enfouis, il n'est pas difficile de respecter ces distributions lors de la définition des boîtes englobantes déterminant les tailles des agrégats, et donc au final d'obtenir un terrain virtuel aux propriétés statistiques équivalentes à celles du terrain réel, comme le montre l'exemple de la figure 5.15. Il est à noter que la définition que nous avons donnée aux agrégats empêche de créer des agrégats d'une dimension inférieure à deux cellules, soit ici 4 mm (donc la première classe du tableau 5.4 sera créée avec des cellules individuelles), et avec une précision correspondant à la dimension d'une cellule, soit ici 2 mm (un agrégat de la deuxième classe comprendra forcément deux cellules). Malgré ces limitations, nous obtenons un effet d'ensemble visuellement réaliste, et par exemple la surface du résultat final de la figure 5.15(c), utilisant les données du tableau 5.4, présente de fortes similitudes avec la photographie reproduite par la figure 5.5(a).

ment.



FIGURE 5.15 – Création d'agrégats en surface (a), ajout d'agrégats en profondeur (b), en respectant les distributions réelles du tableau 5.4, et intégration d'une surface plane (c). Il est intéressant de comparer la surface finale obtenue par notre méthode avec la photographie reproduite figure 5.5(a).

5.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre notre modèle de dégradation des sols sous l'action de la pluie, dans son aspect structurel et dans son aspect fonctionnel. Grâce au formalisme P-DEVS que nous utilisons, la pluie est modélisée comme un processus à évènements discrets, alors que le ruissellement et l'infiltration sont modélisés comme des processus à temps discret, dans le but d'avoir un déroulement de simulation proche de la réalité d'un épisode pluvieux. Le sol est décrit comme un espace cellulaire tridimensionnel, chaque cellule contenant des informations sur son contenu physique : eau, matière, particules détachées par le splash, ces dernières étant réparties en différentes classes de taille dont les valeurs par défaut permettent de prendre en compte les particules soumises au transport. Les cellules cumulent aussi l'énergie cinétique des impacts de gouttes de pluie, et sont capables de se lier pour former des agrégats. Une carte de hauteur, soit créée par l'utilisateur, soit provenant d'un échantillonnage de sol réel, sert à définir la topographie du sol. Nous avons développé une génération d'agrégats de forme réaliste, pouvant respecter une distribution de tailles donnée, aussi bien pour des agrégats en surface qu'en profondeur.

Nous n'avons pas détaillé, dans la partie fonctionnelle du modèle, l'implémentation des fonctions de transition qui font appel au splash, à l'infiltration et au ruissellement. De même, la génération de la pluie, dévolue au générateur, n'a pas été précisée. La modélisation de tous ces processus est le sujet du chapitre suivant.

Chapitre 6

Modélisation des processus

Sommaire

6.1	Intro	oduction	1.
6.2	Plui	e, détacl	nement, projection et tassement 104
	6.2.1	Pluie .	
		6.2.1.1	Distribution spatio-temporelle
		6.2.1.2	Distribution des tailles de gouttes
		6.2.1.3	Vitesse d'une goutte 108
		6.2.1.4	Forme d'une goutte
	6.2.2	Détache	ment et projection par les gouttes de pluie 115
		6.2.2.1	Description
		6.2.2.2	Modèle de détachement et projection
		6.2.2.3	Système flou
	6.2.3	Tasseme	nt
		6.2.3.1	Énergie cinétique cumulée
		6.2.3.2	Densité 128
		6.2.3.3	Épaisseur d'une cellule
6.3	\mathbf{Ruis}	sellemer	nt, mobilisation, transport et dépôt $\ldots \ldots \ldots 130$
	6.3.1	Ruisselle	ement $\ldots \ldots 130$
		6.3.1.1	Direction de transfert
		6.3.1.2	Quantité d'eau à transférer
		6.3.1.3	Équilibrage des débits 132
		6.3.1.4	Correction de l'anisotropie
		6.3.1.5	Angle de contact
	6.3.2	Mobilisa	tion, transport et dépôt de sédiments $\dots \dots \dots$
		6.3.2.1	Mobilisation et dépôt
		6.3.2.2	Transport
		6.3.2.3	Érosion latérale
6.4	Infil	tration	$\ldots \ldots 145$
	6.4.1	Green &	$: Ampt \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $
	6.4.2	Automa	te cellulaire
	6.4.3	Modèle s	sol-croûte
		6.4.3.1	Flux d'infiltration
		6.4.3.2	Conductivité hydraulique de la croûte 150
6.5	Con	clusion	

6.1 Introduction

Pour compléter la description du modèle fonctionnel du simulateur de dégradation des sols sous l'action de la pluie, nous avons à détailler comment nous modélisons les processus fondamentaux intervenant dans l'érosion hydrique. Dans notre modèle, nous avons regroupé ces processus en deux familles : ceux qui sont dépendants de la pluie (les gouttes de pluie, le détachement, la projection des particules), et ceux qui sont dépendants du ruissellement (le transfert d'eau à la surface du sol, la mobilisation, le dépôt et le transport des particules). Nous ajoutons à ces processus l'infiltration, qui ne provoque qu'un transfert d'eau de la surface au sous-sol, mais qui dépend de l'état du sol et est par conséquent un facteur important du couplage entre le processus d'érosion et l'évolution de la surface du sol.

La première partie de ce chapitre est consacrée à la pluie, qui est le processus le moins détaillé dans les publications concernant les modèles d'érosion hydrique. Pour tirer avantage de notre modèle cellulaire à petite échelle, nous choisissons de générer des gouttes de pluie discrètes qui vont impacter des cellules précises. Ce choix impose une réflexion sur la distribution de tailles de gouttes, sur leur répartition sur la surface du sol et sur le calcul de leur vitesse. Nous expliquons également dans cette partie comment nous déduisons le tassement des cellules à partir de l'impact des gouttes de pluie sur le sol. Nous donnons enfin des détails sur la modélisation du détachement et du transport des particules.

Nous décrivons dans la deuxième partie comment nous modélisons le ruissellement, en détaillant notre algorithme de report d'eau de cellule en cellule, et en donnant notamment des précisions sur une correction de l'anisotropie qui est un problème rencontré classiquement dans les processus de propagation simulés sur des grilles régulières. Les choix que nous avons faits pour la mobilisation, le transport et le dépôt, sont ensuite exposés et justifiés à la lumière de travaux antérieurs. Nous terminons cette partie par un exemple d'évolution du modèle venant directement d'une expérimentation, à savoir l'ajout d'un processus « d'érosion latérale », exemple qui nous semble révélateur de la méthode suivie pendant toute cette thèse.

La dernière partie de ce chapitre revient au seul processus qui n'a d'influence que sur les quantités d'eau, l'infiltration. Nous montrons là aussi comment notre modèle a évolué, à travers la succession de trois modélisations différentes de l'infiltration, évolution rendue nécessaire pour répondre aux objectifs du simulateur.

6.2 Pluie, détachement, projection et tassement

6.2.1 Pluie

Le générateur de notre modèle a pour rôle principal de fournir un volume d'eau au modèle cellulaire, selon des conditions définies par l'utilisateur. Nous différencions deux types de conditions. Le premier type correspond à un transfert d'eau particulier (ajout régulier d'eau provenant de certaines cellules sources avec un débit constant, par exemple en haut d'une pente), auquel cas il suffit de préciser le volume d'eau à apporter par itération, et à quelles cellules. Le second type correspond à la reproduction d'un évènement pluvieux, soit naturel,

soit produit par un simulateur de pluie. Ce cas est évidemment plus délicat à traiter, puisqu'il s'agit de simuler un processus réel en respectant ses caractéristiques.

Dans le simulateur, nous définissons la pluie comme un ensemble dénombrable de gouttes d'eau, caractérisées par leur volume et leur vitesse. Dans un intervalle de temps donné, les gouttes peuvent être de tailles variées, et par conséquent, pour une même intensité et deux intervalles de temps identiques, le nombre des gouttes peut être différent. Cette représentation discrète permet de distinguer explicitement les effets respectifs de l'intensité de la pluie et de la taille des gouttes de pluie¹. Ces gouttes d'eau impactent le sol à un temps et à un endroit précis, et nous devons déduire de cette dernière information quelles cellules de la surface reçoivent de l'eau. Nous utiliserons pour cela la projection sur le sol, selon l'axe vertical, de la forme de la goutte dans l'air. Il nous faut donc trouver le moyen de préciser :

- la distribution spatio-temporelle des gouttes,
- la distribution des tailles de goutte,
- la vitesse d'une goutte impactant le sol,
- la forme d'une goutte dans l'air.

6.2.1.1 Distribution spatio-temporelle

La solution que nous adoptons possède les caractéristiques suivantes :

- 1. caractérisation d'une pluie par un hyétogramme² qui permet de découper une pluie en différents épisodes, en nombre illimité, d'intensité constante et de durée fixée; un épisode pluvieux pour notre simulateur est donc caractérisé par une durée en minutes et une intensité en mm h^{-1} ;
- 2. répartition spatiale aléatoire uniforme des gouttes de pluie avec possibilité d'imposer au générateur de pluie une restriction de la zone soumise à la pluie, par exemple en limitant ses effets à un disque d'un diamètre donné, au centre du terrain (ce qui nous permet de reproduire des expériences particulières, par exemple comme celles concernant le splash de Legout et coll., 2005, voir la section 6.2.2.3);
- 3. respect d'une distribution des tailles de gouttes, point qui est détaillé dans la section suivante.

Nous négligeons l'effet du vent sur une pluie naturelle, car le vent varie trop souvent au cours d'un épisode pluvieux pour avoir une influence respectant une direction unique, et pour la même raison nous ne tenons donc pas compte par exemple d'éventuelles zones abritées par de grosses mottes. Le troisième point précise la représentation discrète des événements pluvieux : le générateur produit des gouttes de pluie dont le nombre et la taille varient au cours du temps

^{1.} Nous avons rencontré dans le chapitre 4 plusieurs modèles qui tiennent compte de la présence d'une végétation, dont la couverture a deux conséquences principales : une réduction de la quantité d'eau arrivant au sol, et une diminution de l'effet érosif des gouttes de pluie (Cerdan, 2001). Bien que notre hypothèse de travail soit celle d'un sol nu, notons qu'il serait possible, grâce à la gestion discrète de l'espace et des gouttes de pluie, de prévoir de rendre compte de la présence d'une canopée de plantes par exemple par un calcul de diminution de diamètre de la goutte, par la prise en compte d'une hauteur de chute alternative, ou encore par une altération directe de la vitesse des gouttes de pluie ou de l'énergie cinétique, sur certaines zones de la surface du terrain sensées être couvertes.

^{2.} Le hyétogramme est la représentation, sous la forme d'un histogramme, de l'intensité de la pluie en fonction du temps. Il représente la dérivée en un point donné, par rapport au temps, de la courbe des précipitations cumulées (voir la figure 7.20).

et dans l'espace. C'est un point fort du simulateur qui autorise ainsi la différenciation entre les effets de l'intensité de la pluie et ceux de la taille des gouttes.

6.2.1.2 Distribution des tailles de gouttes

La distribution des tailles de gouttes de pluie est, avec l'intensité, une propriété importante d'un épisode pluvieux. Notre simulateur peut se trouver dans deux configurations distinctes : soit la distribution des tailles de gouttes est donnée (ce qui inclut le cas limite d'une taille unique de goutte), soit il doit reproduire une distribution semblable à celle d'une pluie naturelle. Le premier cas ne pose pas de problème, il suffit de procéder à un tirage aléatoire respectant la distribution donnée sous forme d'histogramme (voir figure 6.1(a) qui montre une distribution de gouttes obtenue sous le simulateur de pluie de l'unité d'agronomie INRA de Laon). La suite de cette section est consacrée à l'étude du second cas, c'est-à-dire la reproduction d'une pluie naturelle, à la lumière de travaux antérieurs.





(a) Comparaison entre la distribution d'un simulateur de pluie de laboratoire et sa reproduction dans le simulateur virtuel (pour 30 mm de pluie cumulée).

(b) Histogramme des diamètres des gouttes de pluie fournies par le simulateur en respectant une distribution gamma pour 3 intensités de pluie différentes.

FIGURE 6.1 – Les deux possibilités de distribution de gouttes de pluie dans le simulateur : soit une distribution donnée (a), soit une distribution gamma reproduisant une pluie naturelle (b).

La distribution des gouttes de pluie, notée $N_V(D)$, permet de trouver la quantité $N_V(D)\delta D$ qui représente le nombre moyen de gouttes d'un diamètre ³ compris entre D et $D + \delta D$ par unité de volume d'air. Si le diamètre est exprimé en mm et le volume en m³, $N_V(D)$ s'exprime donc en mm⁻¹ m⁻³. Cette notion recouvre deux concepts : la distribution spatiale des gouttes dans l'air (autrement dit leur concentration) et la distribution de probabilité des différentes tailles de gouttes. Elle se base également sur l'hypothèse qu'elle est indépendante du volume d'air étudié.

Les données servant de base aux études de cette distribution proviennent de divers instruments, parmi lesquels le radar Doppler, le spectromètre optique, le disdromètre optique. Un des modèles analytiques les plus utilisés est la distribution exponentielle négative de Marshall

^{3.} Les gouttes n'étant pas des sphères parfaites, le diamètre considéré est celui d'une sphère de même volume.



a) ronctions de densité de probabilité des gouttes présentes dans l'air, par unité de volume et pour différentes intensités de pluie.

(b) Fonctions de densité de probabilité des gouttes arrivant au sol, par unité de surface et par unité de temps, pour différentes intensités de pluie.

FIGURE 6.2 - Illustration des deux types de distributions des gouttes de pluie : distribution exponentielle pour la distribution des gouttes dans un volume d'air, et distribution gamma pour la distribution des gouttes impactant le sol.

et Palmer (1948) qui leur a permis de retrouver des données obtenues par des mesures sur papier filtre durant deux épisodes pluvieux. Elle s'exprime ainsi :

$$N_V(D) = N_0 \exp(-\Lambda D) \tag{6.1}$$

avec $N_0 = 8000 \,\mathrm{mm^{-1}\,m^{-3}}$ et $\Lambda = 4.1 I^{0.21}$, I étant l'intensité de la pluie (mm h⁻¹). De nombreux travaux ont repris cette formulation en l'améliorant ou en l'adaptant (se reporter par exemple au travail de Ulbrich, 1983). Plus récemment, Uijlenhoet et Stricker (1999) en ont proposé une interprétation probabiliste et ont ainsi obtenu l'expression d'une fonction de densité de probabilité de la forme :

$$f_{D_V}(D) = \Lambda \, \exp(-\Lambda D) \tag{6.2}$$

avec une valeur légèrement adaptée du coefficient $\Lambda = 4.23 I^{0.214}$. Cette fonction de densité de probabilité est reproduite figure 6.2(a) pour trois intensités de pluie différentes. Uijlenhoet et Stricker ont également mis en évidence l'existence de deux distributions différentes. La première que nous venons de définir, permet de trouver le nombre de gouttes d'un certain diamètre par unité de volume d'air. La seconde, notée $N_A(D)$, permet elle de trouver le nombre de gouttes arrivant au sol par unité d'aire et par unité de temps. Elle s'exprime donc en mm⁻¹ m⁻² s⁻¹. Alors que $N_V(D)$ fait intervenir la concentration et la distribution des tailles, $N_A(D)$ ajoute à ces propriétés statiques une propriété dynamique, la vitesse terminale des gouttes $V_t(D)$ (m s⁻¹) qui permet d'écrire la relation :

$$N_A(D) = V_t(D) N_V(D) \tag{6.3}$$

Il est à noter que les chercheurs en météorologie et en télécommunications, plus concernés par les phénomènes atmosphériques, préfèrent utiliser $N_V(D)$ alors que les hydrologues, étudiant les flux pluvieux sur le sol, sont plus intéressés par $N_A(D)$. Cette dernière distribution est également celle qui est le plus souvent mesurée et c'est celle qui nous permettra de reproduire une pluie naturelle sur notre terrain virtuel. Elle est obtenue par Uijlenhoet et Stricker en exprimant la vitesse terminale des gouttes sous la forme suivante, classiquement rencontrée dans la littérature depuis plusieurs décennies (voir par exemple Sekhon et Srivastava 1971, Atlas et Ulbrich 1977), avec des valeurs différentes pour les coefficients α et β :

$$V_t(D) = \alpha D^\beta \tag{6.4}$$

En utilisant cette expression de la vitesse dans l'équation (6.3), Uijlenhoet et Stricker parviennent à exprimer la fonction de densité de probabilité des tailles de gouttes arrivant au sol :

$$f_{D_A}(D) = \frac{\Lambda^{(1+\beta)}}{\Gamma(1+\beta)} D^\beta \exp(-\Lambda D)$$
(6.5)

avec $\beta = 0.67$, et Γ la fonction gamma ($\Gamma(1 + \beta) = 0.9033$). Cette fonction f_{D_A} , reproduite figure 6.2(b) pour trois intensités de pluie différentes, est la fonction de densité de probabilité d'une distribution gamma de paramètres (1 + β) et 1/ Λ et c'est donc elle qui définit la distribution des tailles de gouttes de pluie dans notre simulateur (figure 6.1(b)), en l'absence d'une distribution donnée.

6.2.1.3 Vitesse d'une goutte

a) Vitesse terminale

Chow et coll. (1988) proposent la formule analytique suivante pour calculer la vitesse terminale en fonction du diamètre D, d'un coefficient de friction C dépendant de D, des densités de l'eau ρ_w et de l'air ρ_a :

$$V_t(D) = \left[\frac{4gD}{3C(D)} \left(\frac{\rho_w}{\rho_a} - 1\right)\right]^{\frac{1}{2}}$$
(6.6)

De nombreuses observations de pluies naturelles ont également amené à exprimer la vitesse terminale en fonction du diamètre à l'aide de différentes formules empiriques qui peuvent se ramener à deux groupes, les formules du type « puissance » et les formules du type « exponentielle » :

$V_t(D) = 14.20 (D/2)^{0.5}$	(Sekhon et Srivastava, 1971)
$V_t(D) = 17.67 (D/2)^{0.67}$	(Atlas et Ulbrich, 1977)
$V_t(D) = 10.30 - 9.65 \exp(-0.6 D)$	(Best, 1950)
$V_t(D) = 4.854 D \exp(-0.195 D)$	(Uplinger, 1981)

Dans ces formules, dont les courbes respectives sont représentées figure 6.3, le diamètre D en mm donne une vitesse en ms⁻¹. Notre simulateur offre le choix entre ces formules et la possibilité d'imposer une autre formule de calcul de la vitesse terminale. Cependant, un problème se pose : les expérimentations sont le plus souvent menées sous un simulateur de pluie, d'une hauteur obligatoirement limitée, et donc possiblement insuffisante pour que des gouttes d'un certain diamètre atteignent leur vitesse terminale. Il faudrait donc trouver un moyen d'estimer les vitesses intermédiaires des gouttes au cours de leur chute.



FIGURE 6.3 – Vitesses terminales de gouttes de pluie en fonction de leur diamètre, selon différents auteurs.

b) Vitesses pour une hauteur de chute donnée

Van Boxel (1998) propose un modèle numérique permettant de calculer la vitesse d'une goutte de pluie en fonction de son diamètre et de la distance verticale parcourue, connaissant sa vitesse initiale. Ce modèle repose sur le calcul des forces appliquées à la goutte, d'un volume équivalent à celui d'une sphère de diamètre D. Ces forces sont d'une part la force de gravité F_g (formule 6.7) et d'autre part la force de friction F_f dont la formule originale est modifiée par l'ajout de deux termes C_t et C_d traduisant respectivement l'effet de la turbulence et l'effet de la déformation de la goutte :

$$F_g = g \rho_w \pi \frac{D^3}{6} \tag{6.7}$$

$$F_f = 3\pi D \,\mu_a \, V \, C_t \, C_d \tag{6.8}$$

avec μ_a la viscosité dynamique de l'air ($\mu_a = 18.10 \times 10^{-6}$ Pas à 20 °C). En effet, les gouttes d'un diamètre supérieur à 0.1 mm, tombant plus vite, provoquent des turbulences dont il faut tenir compte. Le régime d'un flux turbulent est caractérisé par le nombre de Reynolds (adimensionnel) :

$$Re = \frac{\rho_a \, V \, D}{\mu_a} \tag{6.9}$$

où ρ_a est la masse volumique de l'air. La turbulence augmente la friction d'un facteur C_t donné par l'équation :

$$C_t = 1 + 0.16 \, Re^{2/3} \tag{6.10}$$

D'autre part, les gouttes d'un diamètre supérieur à 1 mm, soumises à des pressions plus importantes que leur tension superficielle, vont se déformer et s'aplatir, ce qui au final donne une vitesse terminale inférieure à celle qu'aurait une sphère de même volume. Le rapport entre la tension superficielle ($\sigma = 0.073 \,\mathrm{N \, m^{-1}}$ à 20 °C) et la pression aérodynamique s'exprime par le nombre de Weber (adimensionnel) :

$$We = \frac{\rho_a V^2 D}{\sigma} \tag{6.11}$$

Le second coefficient de correction C_d de la force de friction F_f s'écrit alors sous la forme :

$$C_d = 1 + a \left(We + b \right)^c - a b^c \tag{6.12}$$

Van Boxel a ajusté son modèle à des mesures de vitesse de gouttes de la littérature, et en a tiré les valeurs a = 0.013, b = 2.28, c = 2.12.

D'après la relation fondamentale de la dynamique, en considérant que la masse de la goutte m est constante, il est possible d'exprimer l'accélération de la goutte à l'aide des forces qui lui sont appliquées :

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{m} \left(F_g - F_f(V) \right) \tag{6.13}$$

Cette expression autorise une intégration itérative, en partant d'une vitesse initiale nulle, avec un pas suffisamment petit (0.001 s). La vitesse est calculée et estimée constante sur ce pas de temps, ce qui permet la mise à jour de la distance parcourue, et le calcul est réitéré jusqu'à une stabilisation de la vitesse qui tend asymptotiquement vers la vitesse terminale. Ce calcul a été intégré au simulateur, et il suffit à l'utilisateur d'indiquer une hauteur de chute (autrement dit la hauteur du simulateur de pluie) pour que la vitesse des gouttes à l'impact corresponde à cette hauteur. Nous donnons dans la figure figure 6.4 l'évolution de la vitesse d'une goutte donnée en fonction de la distance parcourue, pour dix diamètres différents. Une hauteur suffisante permet également de retrouver la vitesse terminale pour tous les diamètres de gouttes, sans avoir besoin d'utiliser une autre formule (voir la dernière courbe de la figure 6.3, qui est quasiment confondue avec celle obtenue par la formule de Chow et coll. 1988).



FIGURE 6.4 – Évolution de la vitesse des gouttes de différents diamètres, en fonction de la distance parcourue, d'après Van Boxel (1998). Cette figure permet de constater que pour la hauteur de 4.60 m, qui est celle du simulateur de pluie de Laon, la vitesse terminale n'est atteinte que pour les gouttes d'un diamètre inférieur à 1.5 mm.

c) Amortissement par une lame d'eau

L'énergie cinétique Ke de la goutte de pluie est une quantité qui sera utilisée pour déterminer la masse de sol détachée à l'impact (voir section 6.2.2.1) et pour évaluer le tassement du sol (voir section 6.2.3). L'observation montre que le détachement par une goutte de pluie décroît quand l'épaisseur de la lame d'eau augmente : il y a un phénomène d'amortissement de l'énergie cinétique par la lame d'eau. Dans certains modèles d'érosion (par exemple EUROSEM et LISEM, voir section 4.4.2.1), cet amortissement est décrit par une fonction exponentielle donnant un coefficient F_h dépendant uniquement de la hauteur d'eau H_w dans laquelle la goutte arrive. Ainsi nous trouvons dans le modèle EUROSEM (Morgan et coll., 1998) cette expression :

$$F_h = \exp(-bH_w)$$
 avec $0.9 < b < 3.1$ (6.14)

La hauteur d'eau n'est cependant pas le seul facteur à prendre en compte. Hartley et Julien (1992) citent des travaux montrant notamment qu'à partir d'une épaisseur de lame d'eau égale à trois fois le diamètre de la goutte, l'effet de l'impact de cette goutte devient négligeable, ce qui montre que le diamètre de la goutte joue également un rôle qu'il reste à quantifier. Hartley et Julien ont développé un modèle de simulation capable d'estimer la contrainte de l'impact d'une goutte de pluie sur le sol en présence (ou pas) d'une lame d'eau. Les résultats fournis par ce modèle ont été validés à partir de mesures de contraintes de cisaillement en laboratoire. Se basant sur l'analyse de ces résultats, Hartley et Julien ont établi une équation empirique simple permettant de calculer le facteur d'atténuation de la contrainte F_h lié à l'épaisseur de la lame d'eau H_w et au diamètre des gouttes D:

$$F_h = \left(\frac{H_w}{D/2} + 1\right)^{-3.16} \tag{6.15}$$



FIGURE 6.5 – Comparaison entre les coefficients calculés à l'aide de la formule du modèle EUROSEM, avec les deux valeurs extrêmes de paramètre, et la formule de Hartley et Julien (1992), à partir de diamètres et de hauteurs d'eau tirés aléatoirement.

La figure 6.5 montre de façon assez remarquable que les deux équations (6.14) et (6.15), bien qu'obtenues de manière très différente, donnent au final des solutions très comparables.

6.2.1.4 Forme d'une goutte

Le générateur de pluie est responsable du respect d'une distribution imposée ou naturelle des tailles de gouttes de pluie, de leur répartition temporelle respectant un hyétogramme, et enfin de leur répartition spatiale. Ce dernier point consiste en un tirage aléatoire uniforme d'une position sur le terrain virtuel : la probabilité d'impact d'une goutte de pluie est identique en tout point du terrain, nous ne tenons pas compte de l'influence du vent ni de zones abritées. Néanmoins, afin de permettre la reproduction d'expérimentations de laboratoire, il est possible de restreindre la zone de pluie à un rectangle ou un disque de taille paramétrable. Une fois le point d'impact de la goutte déterminé, il reste à discrétiser la zone correspondante, afin de déterminer à quelles cellules de surface ajouter l'eau et l'énergie cinétique apportées par la goutte.



FIGURE 6.6 – Pour décider de la zone touchée par la goutte de pluie, nous projetons la forme de la goutte sur le terrain.

L'étalement d'une goutte de liquide à l'impact d'une surface a fait l'objet de nombreux travaux en physique, mais ils concernent généralement des surfaces planes et hydrophobes. Comme le simulateur doit gérer des impacts sur des zones de types très différents (poreuses, sèches ou humides, voire même flaquées, avec possibilité de présence de pentes), nous avons fait le choix de prendre comme zone d'impact la projection verticale de la forme de la goutte dans l'atmosphère (figure 6.6), l'étalement proprement dit de l'eau étant résolu dans un second temps par l'algorithme de ruissellement.

La persistance rétinienne est principalement responsable de la représentation sous forme d'une larme des gouttes de pluie, généralement admise comme représentative de la réalité (notamment dans les films d'animation). En fait la forme de la goutte est déterminée principalement par la pression aérodynamique, qui tend à étirer la goutte horizontalement, et par la tension superficielle, qui tend à minimiser la surface de contact entre eau et air. Pour les diamètres inférieurs à 1 mm environ, cette tension donne une forme sphérique à la goutte. L'augmentation de la taille provoque l'augmentation de la vitesse et donc un accroissement des forces de pression, ce qui donne une forme aplatie sur la base, comme le montrent les photos de la figure 6.7. De plus, au delà de 9 mm approximativement, les gouttes deviennent instables et se brisent en plus petites gouttes (Van Boxel, 1998) – il est à noter qu'il est donc légitime d'imposer un diamètre maximal de goutte, ce qui fait partie des paramètres d'initialisation du simulateur.

Pour déterminer la forme des gouttes, nous avons choisi de nous baser sur le travail de Beard et Chuang (1987) qui proposent un modèle de calcul du rayon de la goutte r basé sur une somme de cosinus pondérés (voir figure 6.8(a)) :

$$r(a,\theta) = a\left(1 + \sum_{n=0}^{10} c_n(a)\cos(n\theta)\right)$$
 (6.16)

avec a le rayon de la sphère de même volume, θ l'angle polaire ($\theta = 0$ indique la verticale dans



(a) Diamètres de gauche à droite et de haut en bas : 6.5 mm, 6 mm, 4.8 mm, 2.8 mm.



(b) Différentes gouttes d'un même diamètre de 5.9 mm, à vitesse terminale. Les flèches indiquent des gouttes déformées verticalement par la procédure expérimentale.

FIGURE 6.7 – Photographies de gouttes d'eau de différents diamètres ayant atteint leur vitesse terminale (Magono, 1954).



(a) Section des gouttes de différents diamètres.



(b) Courbes du rayon en fonction de l'angle polaire pour différents diamètres de gouttes. Le rayon original est indiqué au centre de la figure pour chaque courbe. Le maximum des courbes est atteint pour un angle proche de 80° en valeur absolue.

FIGURE 6.8 – Illustration du modèle de déformation des gouttes proposé par Beard et Chuang (1987).

le sens de la chute), et $c_n(a)$ un coefficient donné par les auteurs pour un échantillonnage de valeurs de a. À partir des dérivées de ces fonctions paramétriques (figure 6.8(b)), nous déterminons les angles critiques et donc les diamètres maximaux des gouttes déformées. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 6.1 et nous permettent de constater qu'il existe une relation quasi-linéaire entre les diamètres maximaux et les diamètres originaux des gouttes (voir figure 6.9) pour les diamètres supérieurs à 0.5 mm.

Lorsque le générateur de pluie crée une goutte d'un certain diamètre, nous utilisons cette relation linéaire pour en déduire le diamètre maximal qui nous donne le disque de projection de la goutte sur le terrain (figure 6.6). Les cellules recouvertes totalement ou partiellement par ce disque reçoivent donc une partie du volume d'eau de la goutte et accumulent une certaine

$D_{ori} (mm)$	$D_{max} \ (\mathrm{mm})$	différence (mm)	angle critique (°)
2.0	2.05106	0.05106	80.47
2.5	2.59811	0.09811	80.50
3.0	3.16460	0.16460	80.65
3.5	3.75106	0.25106	80.89
4.0	4.35329	0.35329	81.32
4.5	4.97446	0.47446	81.72
5.0	5.61547	0.61547	82.15
5.5	6.28057	0.78057	82.44
6.0	6.95419	0.95419	82.96

TABLEAU 6.1 – Comparaison entre le diamètre original D_{or} des gouttes et leur diamètre maximal D_{max} à vitesse terminale.



FIGURE 6.9 – Illustration de la relation quasi-linéaire entre le diamètre maximal et le diamètre original d'une goutte.

quantité d'énergie cinétique. Pour calculer la proportion d'eau et d'énergie cinétique reçue par chaque cellule, nous calculons un coefficient basé sur une estimation du volume d'eau projeté sur cette cellule, coefficient que nous appellerons le « coefficient de répartition de volume » de la cellule. Pour calculer ce volume, nous déterminons l'épaisseur de la goutte sur cette cellule, en fonction de la distance de son centre au centre de la goutte. Pour cela, nous disposons d'un échantillonnage des épaisseurs réalisé grâce aux formules de Beard et Chuang (1987) par pas de 10° (figure 6.10), ce qui nous donne deux séries de couples (x_i^-, h_i^-) et (x_i^+, h_i^+) , les x_i représentant la distance au centre, et les h_i^- (respectivement h_i^+) la hauteur inférieure (respectivement supérieure) de la goutte en partant du plan horizontal passant par le centre. La goutte n'étant pas symétrique par rapport à ce plan, les x_i^- et les x_i^+ ne coïncident pas forcément : nous obtenons donc l'épaisseur de la goutte pour une distance xpar deux interpolations linéaires qui nous donnent une épaisseur inférieure et une épaisseur supérieure qu'il suffit ensuite de sommer. Cette opération est répétée pour toutes les cellules concernées, et les coefficients sont finalement calculés en divisant ces épaisseurs locales par leur somme afin de les normaliser.

La hauteur d'eau ajoutée à chaque cellule est donc obtenue par la multiplication du



FIGURE 6.10 – En trait bleu continu : échantillonnage des épaisseurs inférieure et supérieure d'une goutte par pas de 10° pour différents diamètres de gouttes. En trait rouge pointillé : interpolation de l'épaisseur totale correspondante.

coefficient de répartition de volume de la cellule et du volume de la goutte divisé par l'aire d'une cellule. Cette discrétisation dépend bien évidemment directement de la résolution du terrain, ce qui est montré figure 6.11.

Notons que la forme des gouttes décrite correspond à un état d'équilibre atteint à la vitesse terminale. Or nous avons vu que cette vitesse peut ne pas être atteinte sous un simulateur de pluie. Cependant nous négligeons la différence entre la forme des gouttes atteinte avant ou après la vitesse terminale – cette hypothèse reste raisonnable puisque l'influence de l'écart possible entre le diamètre terminal de la goutte et un diamètre intermédiaire peut être négligée dans la répartition de l'eau entre des cellules d'une taille millimétrique.

6.2.2 Détachement et projection par les gouttes de pluie

6.2.2.1 Description

Le point central du modèle de dégradation de la surface du sol est la fragmentation du sol en particules de différentes tailles, et la sélection qui s'opère selon la taille lors du transport, aboutissant à une sélection granulométrique dans l'espace et au cours du temps et à une évolution de la structure du sol. Les moteurs de la fragmentation et de la redistribution du sol sont la pluie et le ruissellement. Dans le simulateur, initialement, le sol est représenté comme un matériau homogène, sans distinction de taille. La distinction de classes de taille de particules ne concerne ensuite que les cellules définies comme fragmentées, c'est-à-dire ayant subi un impact de goutte où ayant été modifiées par un transfert de matière, soit par le splash, soit par le ruissellement. Dans cette section nous développons notre approche du splash, aussi



FIGURE 6.11 – En haut : rendu d'une goutte de diamètre 6 mm à trois résolutions différentes. En bas : visualisation en intensité de bleu de la répartition des hauteurs sur les cellules, pour cette goutte et ces trois résolutions.

bien pour le détachement que pour la projection, traitée avec autant d'importance que le transport par le ruissellement, car la quantité de matière et les distances concernées par ce processus sont loin d'être négligeables, contrairement à l'effet visuel produit (Legout et coll., 2004).

Le Bissonnais et Le Souder (1995) distinguent quatre mécanismes différents lors de la désagrégation du sol :

- la désagrégation mécanique : elle correspond à la fragmentation des agrégats et à l'arrachement de particules en périphérie sous l'effet des impacts des gouttes de pluie; la masse détachée est fonction de l'humidité et de la compacité du sol ainsi que de l'énergie cinétique de la pluie;
- l'éclatement : il survient lorsqu'un agrégat initialement sec est humecté rapidement sur toute sa périphérie, l'eau comprimant l'air emprisonné à l'intérieur; la masse détachée est fonction de l'humidité et de la composition du sol.
- la désagrégation par gonflement différentiel : les phénomènes de gonflement-retrait provoquent une micro-fissuration des agrégats et contribuent à réduire leur diamètre;
- la dispersion physico-chimique : elle résulte de la réduction des forces d'attraction entre les particules colloïdales lors de l'humectation; elle produit des particules élémentaires en renforçant les effets des autres mécanismes.

Les interactions entre ces mécanismes sont diverses et complexes, et rendent difficile une description théorique de la physique de la désagrégation. D'après Leguédois (2003), au cours de l'événement pluvieux, au moins deux mécanismes successifs assurent la désagrégation : tout d'abord la microfissuration due à une combinaison d'éclatement et de gonflement différentiel puis la désagrégation mécanique provoquée par l'impact des gouttes de pluie. Comme nous gérons des gouttes de pluie discrètes, nous pouvons tenter de simuler directement la désagrégation mécanique.

L'impact d'une goutte de pluie est non seulement capable de détacher des fragments de sol de différentes tailles (représentés par les particules de notre modèle), mais il peut en plus être à l'origine de la mise en mouvement de ces particules, et de leur déplacement si l'énergie cinétique initiale est suffisante (Legout et coll., 2004). En conséquence, nous avons à décider, pour chaque cellule de surface touchée par une goutte de pluie, comment opérer le détachement : quelle quantité de sol est détachée, comment la répartir dans les différentes classes de taille de particules. Dans un deuxième temps, il nous faut calculer la projection : quelle quantité projeter, c'est-à-dire combien de particules de chaque classe projeter, et vers quelle(s) cellule(s) cible(s). Il est à noter que la conception du simulateur fait que pour une goutte de pluie donnée, son impact, le détachement et la projection qu'elle produit sont traités comme des phénomènes instantanés. Notamment, quelle que soit la distance de projection d'une particule, tout se passe dans le simulateur comme si celle-ci arrivait à destination au moment même où la goutte de pluie impacte le sol.

Nous avons utilisé successivement dans le simulateur deux modélisations très différentes du splash, la première ayant fait l'objet d'une publication dans la communauté de la logique floue et des systèmes intelligents (Valette et coll., 2006a). Nous présentons brièvement dans la section 6.2.2.3 ce modèle et les résultats obtenus, le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe A pour trouver le descriptif complet de la méthode employée. Les pistes de travail ouvertes par cette modélisation floue n'ont pas été explorées pour l'instant, car nous nous sommes orientés vers une autre modélisation du splash, plus basée sur des résultats expérimentaux extraits de publications en science du sol. En effet, nous avons décidé de ne pas faire porter nos efforts sur une tentative de reproduction de l'évolution au cours du temps de la granulométrie produite par le détachement par les gouttes de pluie, sachant, grâce au travail de Leguédois (2003), que celle-ci ne varie presque plus après 5 mm de pluie cumulée, alors que notre simulateur vise à obtenir des résultats sur des durées plus longues. De plus, un article récent (Furbish et coll., 2007) nous a apporté d'autres connaissances sur le transport par splash et donc d'autres pistes sur sa possible modélisation. Nous allons développer ces points dans la prochaine section.

6.2.2.2 Modèle de détachement et projection

a) Détachement

Il est admis que le détachement et le transport de fragments de sol sont la conséquence de la dissipation de l'énergie mécanique de la goutte de pluie au moment de l'impact. Les travaux s'intéressant au détachement par des gouttes de pluie individuelles sont peu nombreux, le paramètre le plus souvent pris en compte étant l'énergie cinétique globale de la pluie. Sharma et Gupta (1989) ont étudié le détachement causé par des gouttes de différents diamètres tombant de hauteurs diverses, et obtiennent une expression linéaire de la masse détachée en fonction de l'énergie cinétique d'une goutte, en faisant intervenir un seuil minimal Ke_0 en dessous duquel aucun détachement ne se produit :

$$M_d = K_d (Ke - Ke_0) \tag{6.17}$$

avec M_d la masse de sol détachée et K_d un coefficient de détachabilité dépendant du type de sol. Sharma et Gupta (1989) proposent également une relation en fonction de la quantité de mouvement, mais l'énergie cinétique est jugée meilleure que la quantité de mouvement car elle provoque, lorsque le diamètre des gouttes change, moins de variation dans le coefficient de proportionnalité de la formule. Le seuil de stress Ke_0 , paramètre couramment employé en sciences des matériaux, est une traduction de la cohésion interne du sol, cohésion qui doit être brisée par une énergie suffisante pour arracher des fragments à la matrice. Sharma et coll. obtiennent pour ce seuil des valeurs allant de 0.1 mJ (faible cohésion de sols sableux ou limoneux) à 0.6 mJ (forte cohésion de sols argileux). Il est intéressant de noter que ces seuils correspondent respectivement à l'énergie cinétique à vitesse terminale de gouttes de diamètre 2.1 mm et 3.2 mm : les gouttes de diamètre inférieur ou égal à ces seuils n'ont donc aucun impact sur le détachement des fragments, ce qui est loin d'être un résultat négligeable, mais qui est assez cohérent avec les observations, du moins en ce qui concerne la limite basse (Leguédois, 2003).

Sharma et coll. (1991) ont procédé au même type d'expériences sur des sols différents, et ont obtenu des paramètres K_d et Ke_0 pour chaque sol. L'analyse de ces résultats montre qu'un lien existe entre ces deux paramètres, lien qui peut se traduire par l'équation :

$$K_d = a - b \, K e_0$$
 avec $a = 24.8 \text{ et } b = 59.46$ (6.18)

Cette relation permet donc l'économie d'un paramètre dans la formule (6.17), ce qui signifie que nous déduisons M_d de l'énergie cinétique de la goutte de pluie, avec la donnée du seuil Ke_0 , paramètre d'initialisation du simulateur. Rappelons que la quantité de sol détachée décroît par ailleurs de façon exponentielle avec l'épaisseur de la lame d'eau présente à la surface du sol et en fonction du diamètre de la goutte de pluie, et que cette influence est prise en compte par l'application d'un coefficient dans le calcul de son énergie cinétique, coefficient donné par l'équation (6.15).

Une fois la quantité de sol à détacher calculée, il reste à la répartir selon les différentes classes de particules disponibles. Dans sa thèse, Leguédois (2003) montre, à travers des tests et des expérimentations sur des limons moyens sableux et des sols argileux, que la distribution des tailles issue des tests de stabilité structurale proposés par Le Bissonnais (1996) est similaire à la distribution de tailles issue de la désagrégation. De plus, cette distribution se stabilise très rapidement, quelle que soit la stabilité structurale du sol considéré : au bout de 5 mm de pluie cumulée, la distribution finale des fragments détachés est atteinte. En conséquence, dès le début d'une simulation, nous nous appuyons sur un test de stabilité structurale pour répartir la masse détachée en différentes classes granulométriques, en admettant que l'erreur commise sur les premières minutes de pluie est négligeable. Cependant, comme ces tests sont au nombre de trois⁴, il reste à choisir comment en déduire un jeu de pourcentages unique. Leguédois (2003) donne pour ses conditions expérimentales la préférence au test de désagrégation mécanique. Il semble que ce choix doive se faire au cas par cas. Par exemple, pour la simulation d'une expérience réelle de dégradation sous simulateur de pluie (voir section 7.5.1), nous avons choisi d'utiliser plutôt les résultats du test d'humectation lente, qui semblait le plus approprié étant donné la taille des fragments produits et recueillis pendant l'expérience.

b) Projection

Furbish et coll. (2007) ont étudié la projection de grains de sable par des gouttes d'eau d'un diamètre déterminé unique et tombant en nombre limité sur une surface horizontale ou inclinée, ce qui a permis d'établir des fonctions de distribution de la distance et de l'angle

^{4.} Un test d'humectation lente par capillarité, un test d'humectation rapide par immersion, un test d'agitation mécanique après préhumectation (Le Bissonnais et Le Souder, 1995).

de projection en fonction de la pente locale. Cette influence de la pente est traduite par un « facteur de concentration » qui permet de retrouver le fait que les grains sont plus nombreux à être projetés vers le bas de la pente et qu'ils parcourent également une plus grande distance. D'après Furbish et coll., ce facteur de concentration Γ peut être estimé empiriquement en fonction de la pente d'angle β :

$$\Gamma \approx 1.11 \, \tan \beta \tag{6.19}$$

Au moyen de ce facteur de concentration, Furbish et coll. proposent comme fonction de répartition de l'angle de projection θ (avec, par convention, $\theta = 0$ pour la direction de l'aval) :

$$f_{\theta}(\theta) = \frac{\Gamma^2}{2\pi} (\cos^2 \theta - \sin^2 \theta) + \frac{\Gamma}{\pi} \cos \theta \sqrt{1 - \Gamma^2 \sin^2 \theta} + \frac{1}{2\pi} \qquad \text{avec} \ -\pi \le \theta \le \pi \quad (6.20)$$

Il est clair que cette fonction vérifie que pour une pente nulle, autrement dit une surface horizontale, $\Gamma = 0$ ce qui signifie que l'angle de projection, comme il se doit, est dans ce cas uniformément distribué autour du point d'impact de la goutte.

Pour une surface horizontale, la distribution de masse des fragments projetés est exponentielle (Van Dijk et coll., 2002). La fonction de répartition de la distance radiale de projection rpeut s'écrire :

$$f_R(r) = \frac{1}{\lambda_0} \exp\left(\frac{-(r-r_0)}{\lambda_0}\right) \qquad \text{avec } r \ge r_0 \tag{6.21}$$

où λ_0 est la distance moyenne pour la taille de particules considérées, et r_0 est une distance d'exclusion, qui peut être interprétée comme la limite du moyen de mesure employé, ou comme le rayon de la goutte impactant le sol. Les particules projetées à une distance inférieure à cette limite sont considérées comme immobiles. Il est à noter que la distance de projection semble donc ne pas dépendre de la taille de la goutte, ce qui est confirmé par (Furbish et coll., 2007).

Il existe peu de données sur les distances moyennes de projection pour différentes tailles de fragment dans la littérature. Pour le simulateur, nous nous sommes basés sur les valeurs mesurées par Leguédois (2003, voir figure 6.12), qui sont établies pour une surface plane (il est à noter que les valeurs indiquées par Furbish et coll. pour les grains de sable sont très inférieures, entre 2 cm et 4 cm environ, ce que nous avons également observé lors d'expérimentations).

Finalement, les résultats de Furbish et coll. permettent de prendre en compte l'influence de la pente, toujours à travers le facteur de concentration Γ , dans la valeur de la distance moyenne $\lambda(\theta)$ qui remplace donc λ_0 dans la formule (6.21) :

$$\lambda(\theta) = \lambda_0 \left(\Gamma \cos \theta + \sqrt{1 - \Gamma^2 \sin^2 \theta} \right) \qquad \text{avec} \ -\pi \le \theta \le \pi$$
(6.22)

c) Application au simulateur

Comme nous l'avons vu section 6.2.1.4, il peut arriver que le volume d'eau d'une goutte de pluie soit réparti sur plusieurs cellules, qui sont alors affectées d'un coefficient normalisé. Le



FIGURE 6.12 – Distances moyennes de projection en fonction du diamètre moyen des fragments, pour quatre types de sol, selon le travail de Leguédois (2003).

calcul de la masse de matière à détacher (c'est-à-dire dans le cas du simulateur, à transformer en particules d'un diamètre à déterminer) est effectué pour la goutte entière, puis, pour chaque cellule recevant une portion de goutte, le coefficient de répartition de volume de chaque cellule est utilisé pour calculer localement la masse de matière à détacher. Cette masse est ensuite transformée en nombre de particules de chaque classe, grâce aux pourcentages produits par les tests de stabilité, avec, en option, la possibilité de ne rien détacher si la goutte est inférieure à la taille d'une particule de la classe considérée. Compte tenu de la discrétisation verticale du modèle de sol, et comme les particules ne peuvent être créées dans notre modèle qu'à partir de matière continue, il peut arriver que la quantité de matière disponible dans la cellule de surface soit insuffisante à produire le nombre de particules demandé. C'est pourquoi une option autorise le détachement à aller chercher dans les cellules inférieures la matière continue manquante, dans la limite d'une profondeur à fixer à l'initialisation (4 mm par défaut).

Pour la projection des particules par une goutte, nous considérons que doit être mobilisé, sur chaque cellule de surface concernée, le nombre de particules établi par le calcul de détachement effectué pour cette goutte. Autrement dit, la mobilisation des particules venant d'être détachées est totale. Il est à noter que, si le nombre de particules demandé par le détachement n'a pas été satisfait, alors des particules déjà présentes dans la cellule peuvent être également projetées pour respecter la quantité initialement calculée. Leguédois (2003) a effectué un bilan des stocks de fragments de sol produits par la désagrégation et mobilisés par le splash, ce qui lui a permis de constater que la sélectivité de la mise en mouvement agit en faveur des fractions moyennes comprises entre 50 μ m et 1000 μ m, ce qui correspond à nos classes de taille par défaut, sauf les deux plus fines et la plus grossière. Deux paramètres peuvent tempérer la mise en mouvement totale, notamment pour ces trois classes : tout d'abord la dimension d'une cellule, qui agit comme distance d'exclusion de la projection, et ensuite la distance moyenne de projection pour une classe, définie à l'initialisation.

Par défaut, une quantité inférieure à une particule n'est jamais projetée, mais ce comportement peut être forcé. La projection pour une cellule et une classe de particules peut s'opérer en plusieurs passes, ce qui permet de définir plusieurs points de chute pour les particules. Le nombre de ces points de chute est compris entre un seul et le nombre de particules projetées. Il sont définis par un angle et une distance, calculés selon les procédures détaillées à la


FIGURE 6.13 – Schématisation du comportement du transport par une goutte de pluie dans le simulateur. Les particules projetées peuvent arriver sur le sol (1), être soumises à un éboulement (2), arriver dans la lame d'eau (3) ou encore en dehors du terrain virtuel (4). Cette figure montre que la projection par le splash peut affecter les cellules dans une zone plus grande que celle définie par la forme de la goutte d'eau (voir le paragraphe d) de cette section).

section précédente. La pente est évaluée localement : le centre de la cellule considérée forme avec les centres des huit cellules voisines huit facettes triangulaires 3D, dont la normale est calculée ; la moyenne de ces huit normales permet d'établir une estimation de la pente pour la cellule centrale. La figure 6.13 représente les quatre possibilités pour le point d'arrivée des particules :

- 1. les particules peuvent arriver sur le sol (donc être ajoutées au contenu de la cellule correspondante);
- 2. les particules arrivant sur le sol sont éventuellement soumises à un algorithme d'éboulement dans le cas où leur arrivée induit une pente supérieure à l'angle de talus (également appelé angle de repos) défini, à l'initialisation, pour cette classe de particules;
- 3. les particules peuvent arriver dans la lame d'eau de surface (si son épaisseur est suffisante, c'est-à-dire supérieure au diamètre de la particule, et si l'option est sélectionnée); elles seront alors prises en compte par l'algorithme de transport par ruissellement;
- 4. enfin, il peut arriver qu'un point de chute soit en dehors du terrain : le choix est alors laissé à l'utilisateur, par le biais d'une option, de considérer que les particules arrivent dans un exutoire, ou bien de traiter le terrain comme un tore (ce qui peut se justifier, si l'on juge que d'autres terrains avec un comportement identique entourent complètement le terrain virtuel et subissent également l'évènement pluvieux).

En plus de la zone de splash définie par la projection de la forme de la goutte sur le terrain, la figure 6.13 montre une zone d'action du splash qui est plus étendue. Nous donnons dans le paragraphe suivant la raison de son existence et la façon dont elle est évaluée.

d) Étalement du splash

En plaçant sur une plaque horizontale imperméable un tas de sable circulaire et en le soumettant à une pluie simulée, nous avons observé que le splash réel avait beaucoup plus d'effet que le splash simulé, les grains parvenant à être reprojetés dans toutes les zones de la plaque, même dans celles où la densité de grains est faible. Les grains de sable se retrouvent ainsi très dispersés (figure 6.14).



FIGURE 6.14 – Expérience réelle d'un tas de sable soumis au simulateur de pluie. De gauche à droite : état initial, résultat avec du sable grossier, résultat avec du sable fin.

En revanche, la première rangée d'images de la figure 6.15 montre que, dans le simulateur, les grains de sable sont bien projetés en dehors du tas central, mais subissent peu de reprojection, ce qui fait que le motif global reste circulaire, avec une plus forte concentration vers le centre du tas. Le résultat est très comparable à celui de la deuxième rangée d'images, qui correspond à la même expérience simulée, mais en limitant la pluie à l'aire correspondant au tas de sable, donc sans aucune reprojection des grains à l'extérieur du tas, ce qui montre bien que l'effet de reprojection est trop limité.



FIGURE 6.15 – Expérience simulée d'un tas de sable soumis à la pluie. De gauche à droite : à 30 s, $1 \min 30 \text{ s}$, $2 \min 30 \text{ s}$, $6 \min$. De haut en bas : pluie sur la totalité de la surface sans étalement du splash, pluie limitée au tas de sable, pluie sur la totalité de la surface avec étalement du splash.

Nous avons fait l'hypothèse que dans ce cas précis (cellules de 2 mm de côté), l'effet de projection des gouttes d'eau, limité aux cellules sur lesquelles se projette la forme à vitesse

terminale de cette goutte, concernait une surface trop petite pour reprojeter autant de grains de sable que dans la réalité, ceux-ci étant localement en relativement petit nombre. Nous avons donc modifié l'algorithme de projection de manière à ce que, lorsque la quantité à projeter calculée n'est pas atteinte pour une goutte, les cellules voisines soient soumises elles aussi à la projection, en augmentant le rayon de l'aire circulaire d'action du splash jusqu'à atteindre la quantité demandée ou un rayon maximal.



FIGURE 6.16 – Étalement d'une goutte d'eau sur une surface hydrophobe, d'après Clanet et coll. (2004). Diamètre 2.5 mm, vitesse 0.83 m s^{-1} . Les photos sont prises à un intervalle de 2.7 ms.

Pour déterminer cette aire maximale d'action du splash, nous avons trouvé dans les travaux des physiciens des résultats concernant l'étalement des gouttes sur une surface hydrophobe. Clanet et coll. (2004) notamment proposent une formule donnant le diamètre maximal D_{max} que peut atteindre une goutte arrivant sur une surface solide (figure 6.16), en fonction du diamètre initial D_{ori} et du nombre de Weber We, paramètre sans dimension exprimant le rapport des forces d'inertie aux forces de tension superficielle :

$$D_{max} = D_{ori} W e^{1/4} ag{6.23}$$

$$We = \frac{\rho_w V^2 D_{ori}}{\tau} \tag{6.24}$$

avec V la vitesse à l'impact, ρ_w la masse volumique du liquide, σ sa tension superficielle (respectivement 998 kg m⁻³ et 0.073 N m⁻¹ pour l'eau à 20 °C).



FIGURE 6.17 – Comparaison visuelle entre à gauche, le résultat (passé en négatif pour faciliter la comparaison) de la simulation de la projection de sable avec étalement du splash, et à droite, le contenu d'un bac destiné à recueillir les fragments projetés pendant une expérience sous simulateur de pluie et également soumis à l'impact des gouttes.

La troisième rangée d'images de la figure 6.15 montre l'effet produit par cette amélioration : les grains de sable sont cette fois bien dispersés sur toute la surface de la plaque, de plus on retrouve visuellement, comme sur la photographie du tas de sable fin de la figure 6.14, des zones grossièrement circulaires qui correspondent aux endroits « nettoyés » par les gouttes d'eau. La résolution des cellules de 2 mm empêche la reproduction de motifs visuels très fins, néanmoins la figure 6.17 montre que des motifs assez proches de ceux obtenus par simulation se retrouvent dans un bac destiné à recueillir les particules projetées pendant une expérience réelle de simulation de pluie (voir la section 7.5.2.1).

L'effet de cet étalement du splash est évidemment beaucoup moins sensible sur une surface qui est soumise au détachement, puisqu'une cellule recevant une goutte d'eau est susceptible dans ce cas de produire des particules à projeter, et donc de satisfaire à la quantité demandée. De plus, pour respecter un certain réalisme dans le cas d'une surface non plane, nous ajoutons au respect du rayon maximal la condition que la hauteur du terrain sur une cellule potentiellement soumise au splash ne soit pas supérieure aux hauteurs cumulées du terrain, de la lame d'eau et de la goutte d'eau sur la cellule ayant reçu la goutte d'eau.

6.2.2.3 Système flou

La théorie mathématique des ensembles flous, et, par extension, la logique floue, ont été introduites par Zadeh en 1965. Les systèmes à base de règles floues ont prouvé par la suite leur intérêt dans la modélisation de systèmes complexes, et ils ont été notamment utilisés avec succès en science du sol (McBratney et Odeh, 1997). Ce sont des approximateurs universels, ce qui signifie qu'il est possible de trouver un ensemble de règles floues qui soit capable de simuler n'importe quel système continu, avec une précision arbitraire (Wang, 1992). Le manque de connaissances sur la sélectivité des processus de détachement et de projection nous a conduits dans une première approche à tenter d'utiliser la logique floue pour estimer les tailles et les nombres de particules concernées par ces processus. Nous présentons dans cette section les principes de base de notre modèle et les résultats obtenus. Une description complète du modèle est donnée en annexe A

a) Principes

La figure 6.18 présente notre système flou, dont le principe est identique pour le détachement et le transport. Nous avons choisi de nous concentrer sur la façon dont l'énergie cinétique de la pluie, la taille des gouttes et la granulométrie du sol influent sur le détachement et la projection. Pour déterminer la masse détachée (ou projetée), les variables d'entrée sont par conséquent l'énergie cinétique de la pluie et la taille de goutte (partie gauche de la figure 6.18), et pour déterminer quels pourcentages de chaque classe de particules sont concernés par le processus, les variables d'entrée sont la taille de goutte et un indice de compacité du sol (partie droite de la figure 6.18).

Pour aboutir à une paramétrisation acceptable du système, nous avons eu recours à une méthode d'optimisation globale, les algorithmes génétiques, procédés itératifs qui combinent l'utilisation de tirages aléatoires et la mise à profit des informations venant des itérations précédentes afin d'évaluer et d'améliorer une population entière de solutions potentielles, plutôt qu'une solution unique à la fois. Ils constituent une approche systématique et logique de l'optimisation (Cordón et coll., 2001). De plus, dans le contexte des systèmes flous, il a été établi qu'ils sont un outil robuste et puissant pour optimiser à la fois les paramètres et la structure d'un système (Bäck et Kursawe, 1994).



FIGURE 6.18 – Notre système flou pour le calcul du détachement et du transport, avec la mise en évidence des trois étapes de son fonctionnement. La partie gauche correspond au calcul de la quantité, la partie droite au calcul des pourcentages de classes de particules.

b) Résultats

Pour la simulation du détachement, nous avons tenté de reproduire la distribution des tailles de fragments produits par des agrégats de 3–5 mm d'un limon argileux fin (*silt loam*) soumis à une pluie cumulée de 1.9 mm ayant une énergie cinétique de $16.2 \,\mathrm{J}\,\mathrm{mm}^{-1}$ (expérience décrite par Legout et coll. 2004). Nous avons utilisé également une intensité de pluie de $30 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ pendant 4 min, avec une taille de gouttes variant de 0.8 mm à 2 mm tirée aléatoirement selon une distribution gaussienne, en limitant la pluie à un disque de 5 cm de diamètre au centre d'un terrain plat. Comme pour cette simulation notre modèle de sol était limité à cinq tailles de particules, il a été nécessaire de réduire le nombre original de pourcentages présentés dans les résultats : pour cela nous avons ajouté tous les pourcentages des fragments dont la taille était comprise entre deux tailles disponibles dans notre modèle, et la somme nous a donné le pourcentage pour la taille supérieure de l'intervalle considéré (équation 6.25). De plus, comme nous ne pouvions pas prendre en compte les fragments de taille strictement supérieure à 1 mm, nous avons ajouté les pourcentages proportionnellement (équation 6.26).

$$\forall i \quad \mathcal{P}(i) = \sum_{t \in \left[T[i-1]:T[i]\right]} p(t) \tag{6.25}$$

$$\forall i \quad \mathcal{P}(i) = \frac{\mathcal{P}(i)}{\sum_{t \le T[\mathcal{N}_c]} p(t)} \tag{6.26}$$

avec $\mathcal{P}(i)$ le pourcentage pour la classe *i* de particules, p(t) pourcentage réel de la taille *t*, T[i] la taille de la classe *i*, \mathcal{N}_c le nombre de classes dans notre modèle (c'est-à-dire 5). La fonction d'évaluation de l'algorithme génétique étant basée sur les résultats de l'expérience réelle, nous avons obtenu une amélioration sensible des résultats de la simulation (figure 6.19(a)), en partant d'une solution aléatoire, après 34 générations (soit environ 3 heures de calcul). La moyenne des différences absolues entre les pourcentages réels et simulés était de 9.44 % pour



FIGURE 6.19 – Comparaison entre les résultats d'une expérience réelle et de la simulation, pour le détachement et la projection.



FIGURE 6.20 – Visualisation d'une simulation de détachement et projection par logique floue, la pluie étant circonscrite à un disque de 5 cm de diamètre au centre du terrain virtuel.

la solution initiale, et de 0.29% pour la solution optimisée.

Pour la simulation de la projection, l'expérience est relativement semblable à la précédente et reprend les conditions d'une expérience décrite par Legout et coll. (2005) : pluie limitée à un disque de 5 cm de diamètre sur un sol plat, d'une intensité de 29 mm h^{-1} , ayant une énergie cinétique de 17 J mm^{-1} , pendant 20 min (figure 6.20). La taille des gouttes varie de 0.5 mm à 3 mm, avec un diamètre moyen de 1.4 mm. Nous ne nous sommes intéressés qu'au taux de mobilisation des particules détachées par la pluie, taux défini par :

$$M_i = \frac{m_{proj}(i)}{m_{disag}(i)} \tag{6.27}$$

avec $m_{disag}(i)$ la masse de fragments de la classe *i* produite par le détachement et $m_{proj}(i)$ la masse de fragments de la classe *i* projetée par le splash. La comparaison des résultats de l'expérience réelle et de la simulation est montrée figure 6.19(b). La moyenne des différences absolues entre les pourcentages réels et simulés était de 41.55 % pour la solution initiale, et de 0.98 % pour la solution optimisée, soit après 57 générations (environ 20 heures de calcul). La figure 6.21 montre comment la fonction d'évaluation a été améliorée, en fonction du nombre de générations, aussi bien pour le détachement que pour la mobilisation.

c) Conclusion

Nous avons montré par ce travail qu'il était possible d'avoir recours à un système flou, optimisé par algorithme génétique, pour retrouver par simulation les résultats, en termes de



FIGURE 6.21 – Courbes de l'amélioration de la fonction d'évaluation du meilleur individu de la population, pour la simulation du détachement et de la projection.

pourcentage et avec les limitations de notre premier modèle de sol (cinq classes de particules), d'expériences réelles de détachement et de projection par les gouttes de pluie. Même si le risque existe que les bons résultats obtenus soient uniquement le produit d'une surparamétrisation, cela nous autorise à penser qu'il serait envisageable de modéliser ces processus au moyen d'un tel système flou. Néanmoins, il faudrait dans cette optique poursuivre le travail entamé, qui reste incomplet sur plusieurs points, par exemple des essais de prise en compte de variables différentes disponibles dans le (second) modèle, et, bien évidemment, la reproduction d'autres expériences, avec d'autres conditions, afin, dans un premier temps, de caler le système, et, dans un second temps, de le valider. D'autre part, comme nous avons veillé à toujours maintenir l'interprétabilité des règles d'inférence, il serait possible et intéressant, et sans doute indispensable, d'ajouter de la connaissance en contraignant les possibilités de leurs modifications lors de la phase d'optimisation, voire même de fixer certaines règles.

6.2.3 Tassement

Outre le détachement et transport de fragments, l'énergie mécanique de l'impact des gouttes de pluie a un effet de tassement sur le sol, qui est fonction de l'énergie cinétique cumulée (Fiès et Castelao-Gegunde, 1996). Nous stockons donc dans toutes les cellules, en surface et en profondeur, l'énergie cinétique cumulée au cours de l'épisode pluvieux afin de l'utiliser en combinaison avec la composition granulométrique des cellules pour prévoir l'évolution de la densité.

6.2.3.1 Énergie cinétique cumulée

L'énergie cinétique Ke reçue par chaque cellule de surface à l'impact de la goutte de pluie est égale au produit de l'énergie cinétique de la goutte, corrigée par l'amortissement de la lame d'eau, et du coefficient de répartition volumique de la cellule (défini section 6.2.1.4). Cette énergie cinétique affecte également les cellules sous la surface : en profondeur, il y a une propagation verticale de la contrainte qui est donnée par Craig (2004) :

$$Ke_z = Ke \left[1 - \left(\frac{1}{1 + \left(\frac{D/2}{3z} \right)^2} \right)^{\frac{3}{2}} \right]$$
(6.28)

avec Ke_z l'énergie cinétique reçue par une cellule à la profondeur z sous l'impact d'une goutte de diamètre D et d'énergie cinétique Ke. Cette propagation ne dépend que de (D/2)/z et pas des propriétés du sol. Il est à noter que le (D/2)/z de la formule initiale est remplacé par (D/2)/3z de manière à être plus cohérent avec le profil de densité de sol croûté. En effet, le tassement obtenu par la formule initiale, vérifié par simulation et calcul, est trop étalé en profondeur, alors que l'épaisseur moyenne d'une croûte est en général de 5 mm et qu'il n'y a plus de croûte au delà de 10 mm (Fox et coll., 2004). La multiplication de la profondeur par un facteur 3 permet de retrouver une atténuation corespondant à ces données expérimentales.

L'énergie cinétique cumulée au temps t et à la profondeur z s'écrit donc :

$$Kec_z = \sum_0^t Ke_z \tag{6.29}$$

6.2.3.2 Densité

Fiès et Castelao-Gegunde (1996) ont montré que l'évolution de la densité ρ de la surface du sol sous l'impact des gouttes pouvait être reliée à l'énergie cinétique cumulée par une fonction exponentielle de la forme :

$$\rho = \rho_{ini} + (\rho_{tex} - \rho_{ini}) \left(1 - \exp(-\alpha \, Kec_z) \right)$$
(6.30)

avec ρ_{tex} la densité texturale du sol, qui peut être considérée comme la limite supérieure de la densité pour un sol donné.

Nous avons utilisé le logiciel RENÉ-LCPC (Sedran et De Larrard, 1994) qui permet de calculer la compacité d'un mélange granulaire quelconque pour différents niveaux de contrainte, pour établir une fonction empirique liant les pourcentages de classes de particules et la densité texturale (considérée comme correspondant à un niveau de contrainte maximal) :

$$\rho_{tex} = k + \sum_{i=1}^{6} a_i P_i + \sum_{i=1}^{6} b_i P_i^2 + c \sigma_p$$
(6.31)

avec P_i le pourcentage de la classe i, σ_p l'écart-type des pourcentages, et les constantes :

$$k = 2212$$

$$(a_i) = (7.392, -1.572, -2.531, -2.431, -1.605, -1.004)$$

$$(b_i) = (-0.08567, 0, 0, 0, 0, 0)$$

$$c = -15.06$$

Dans un second temps, ce logiciel nous a servi à analyser le lien entre la densité texturale et la densité correspondant à un niveau de contrainte minimal, soit un simple versement, et considérée comme équivalente à ρ_{ini} , ce qui a abouti à la relation, cohérente avec les mesures de Fiès et Castelao-Gegunde (1996) :

$$\frac{\rho_{tex}}{\rho_{ini}} \approx 0.88\tag{6.32}$$

Cette relation nous permet de réécrire l'équation (6.30) en fonction de la densité texturale seulement :

$$\rho = 0.88 \,\rho_{tex} + (\rho_{tex} - 0.88 \,\rho_{tex}) \left(1 - \exp(-\alpha \, Kec_z) \right) \tag{6.33}$$

Finalement, le paramètre α a été calé à partir des données de Fiès et Castelao-Gegunde (1996), ce qui a donné la valeur $\alpha = 0.015$.

Ce calcul de densité est applicable à une cellule ne contenant que des particules. Or les cellules peuvent contenir également de la matière continue. Le calcul de la densité de la matière ρ_m en fonction de l'énergie cinétique cumulée se fait directement à partir de l'équation (6.30) :

$$\rho_m = \rho_{m0} + (\rho_{m,tex} - \rho_{m0}) \left(1 - \exp(-\alpha \, Kec_z) \right)$$
(6.34)

avec $\alpha = 0.015$ comme pour (6.33), ρ_{m0} la densité initiale et $\rho_{m,tex}$ la densité texturale de la matière qui sont des données d'initialisation dépendant du sol.

La densité ρ_c ainsi que la densité texturale $\rho_{c,tex}$ de la cellule sont ensuite calculées proportionnellement aux volumes respectifs de la matière V_m et des particules V_p :

$$\rho_c = \frac{V_m \rho_m + V_p \rho}{V_m + V_p} \tag{6.35}$$

$$\rho_{c,tex} = \frac{V_m \,\rho_{m,tex} + V_p \,\rho_{tex}}{V_m + V_p} \tag{6.36}$$

6.2.3.3 Épaisseur d'une cellule

L'épaisseur H d'une cellule de côté Δx dépend du volume de matière V_m et de particules V_p qu'elle contient, mais également de sa porosité P. Elle est donnée par :

$$H = \frac{V_m + V_p}{\Delta x^2 (1 - P)}$$
(6.37)

La porosité peut être déterminée grâce à partir de la densité de la cellule et de la densité des particules solides ρ_s (Gerrard, 2000) :

$$P = 1 - \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad \text{avec } \rho_s = 2.650 \tag{6.38}$$

6.3 Ruissellement, mobilisation, transport et dépôt

Il s'agit d'une part, pour le ruissellement, de déterminer comment effectuer le transfert d'eau de cellule en cellule, et d'autre part, pour la mobilisation, le transport et le dépôt, d'évaluer la quantité de particules transportée par l'eau en mouvement et leur distribution granulométrique⁵.

6.3.1 Ruissellement

Pour modéliser le ruissellement, nous nous appuyons sur un algorithme de report de l'eau suivant la direction de la charge hydraulique la plus faible, en ne considérant que la grille 2D formée par les cellules de surface. Pour définir cette charge, nous nous basons sur des données directement disponibles dans le simulateur, à savoir l'épaisseur de la lame d'eau et l'altitude du terrain, dont la somme définit la charge hydraulique (nous négligeons la composante cinétique de la charge qui est égale à $v^2/2g$, compte tenu des faibles vitesses mises en jeu). À chaque itération, nous avons à déterminer, pour chaque cellule de surface, dans quelles cellules l'eau est transportée, et quelle quantité d'eau est transférée.

6.3.1.1 Direction de transfert

Nous simplifions le problème de la destination en imposant au plus une cellule cible, et en la choisissant dans la direction du plus fort gradient de charge hydraulique. Cette simplification se justifie dans la mesure où le gradient est recalculé après chaque transfert d'eau, ce qui permet en quelques itérations de retrouver une distribution de l'eau sur toutes les cellules avec une charge hydraulique moins élevée que la cellule source (voir par exemple la figure 6.25 qui montre bien que toutes les cellules du voisinage finissent par être atteintes par la redistribution de l'eau). Nous suivons le comportement d'un automate cellulaire standard, à savoir que la quantité d'eau des cellules n'est actualisée que lorsque tous les transferts ont été calculés. Les transferts prennent donc tous en compte l'état des cellules de l'itération courante pour évaluer l'état des cellules de l'itération suivante.

Au lieu de calculer le transfert d'eau en considérant les cellules comme des sources, nous inversons le point de vue et considérons chaque cellule comme une réceptrice potentielle. Si une cellule de son voisinage lui transfère de l'eau, cette cellule est marquée et ne pourra plus transférer d'eau dans l'itération courante, cela pour respecter la limitation d'une seule cellule cible. Le traitement des cellules doit se faire dans l'ordre de charge hydraulique croissante, de manière à assurer qu'une cellule ne risque pas de transférer de l'eau à une cellule qui ne serait pas celle ayant la plus faible charge hydraulique de son voisinage. Un exemple d'une telle situation illicite est reproduite figure 6.22(a) et l'application de la solution de l'ordonnancement des cellules est illustrée par la figure 6.22(b).

Une solution alternative à cet ordonnancement des cellules consiste à examiner le propre

^{5.} La modélisation du ruissellement mise en œuvre dans le simulateur et décrite dans cette section a fait l'objet d'une publication (Valette et coll., 2008a).



FIGURE 6.22 – Illustration de l'importance de l'ordre de traitement des cellules. Dans ce cas de figure, les cellules 1, 3, 5 ne peuvent recevoir d'eau car leurs voisines ont une charge hydraulique plus faible, et l'algorithme de report d'eau les ignorera, quel que soit l'ordre de traitement. Les cellules réceptrices possibles sont uniquement les cellules 2 et 4. En (a) nous considérons un ordre arbitraire, allant de la cellule 1 à la cellule 5; dans ce cas la cellule 2 est traitée avant la cellule 4 (opération A), ce qui fait que la cellule 3 donne de l'eau à la cellule 2 alors qu'elle n'est pas la cellule de son voisinage ayant la plus faible charge hydraulique. L'opération B est faussée. En (b) nous appliquons une première solution : les cellule 2 (opération A), ce qui fait que la cellule 3 donne de l'eau à la cellule 4, ce qui est correct. En (c) nous appliquons une deuxième solution : l'ordre est arbitraire, la cellule 2 est traitée avant la cellule 4 (opération A), mais au moment du transfert entre la cellule 3 et la cellule 2, l'examen du voisinage de la cellule 3 montre que la cellule 4 a une charge hydraulique plus faible, donc le transfert est annulé (flèche rouge), et l'opération B qui va suivre sera alors complète.

voisinage de la cellule source candidate afin de s'assurer qu'aucune de ses voisines n'a une charge hydraulique plus faible que la cellule en cours de traitement, comme montré figure 6.22(c). Cette solution présente l'avantage de supporter la découpe du terrain en plusieurs zones, et donc d'être pleinement parallélisable, contrairement à la précédente qui pose le problème du respect de l'ordre des cellules aux frontières. Nous l'avions écartée par supposition d'un coût en temps de calcul plus important (au lieu d'examiner au pire n cellules à chaque fois, on risque de devoir en examiner n^2), mais des tests ont montré qu'il n'en était rien, et que les temps d'exécution étaient comparables. La raison en est que, sur un terrain au relief accidenté comparable à un terrain réel, très peu de cellules sont en fait candidates à donner de l'eau (leur nombre arrive rarement à trois pour un 8-voisinage), et que donc le gain de temps produit par l'économie du tri des cellules suffit à compenser la plus grande complexité de l'algorithme.

Avec cette méthode partant de la cellule réceptrice, les bords sont faciles à traiter. Ils peuvent être de quatre types (et chacun des quatre bords peut être d'un type différent) :

- un mur : l'eau ne parvient jamais à l'exutoire, il n'y a donc rien à faire, pour l'algorithme l'exutoire n'existe pas;
- un passage vers l'autre bord (tore ou cylindre) : les cellules « voisines » du bord opposé sont simplement ajoutées aux voisines de la cellule considérée, en tant que cellules sources potentielles;
- un prolongement : l'exutoire considéré est traité en priorité comme une cellule adimensionnelle pouvant recevoir de l'eau des cellules du bord correspondant; pour permettre

le calcul du flux, nous prolongeons la pente hydraulique que celles-ci font avec leur voisine dans la direction perpendiculaire au bord considéré ; si cette pente est montante et non descendante, il n'y a pas de transfert ;

 - un puits : l'exutoire considéré est traité en priorité comme une cellule recevant toute l'eau disponible de ses voisines (c'est-à-dire les cellules du bord correspondant).

6.3.1.2 Quantité d'eau à transférer

La définition du débit q, que nous voulons calculer entre une cellule émettrice i et une cellule réceptrice c, est la suivante :

$$q = v H_{wi} \Delta x \tag{6.39}$$

où v est la vitesse de l'eau, H_{wi} est l'épaisseur de la lame d'eau, Δx est la dimension du côté d'une cellule. La vitesse v peut être estimée grâce à l'équation de Darcy-Weisbach (Chow et coll., 1988) :

$$v = \sqrt{\frac{8 g S(c,i) H_{wi}}{f}} \tag{6.40}$$

où S(c, i) est le gradient hydraulique, g est l'accélération de la gravité, et f est le coefficient de friction de Darcy-Weisbach, qui dépend essentiellement de la rugosité du sol et de l'épaisseur de la lame d'eau pour de très faibles flux, et détermine fortement la vitesse de l'écoulement ; c'est un des paramètres d'initialisation du simulateur, et nous verrons dans le chapitre 7 comment il nous a été possible de l'estimer, pour un sol particulier, à partir de la comparaison entre des résultats d'une expérience réelle et des tests effectués avec le simulateur.

6.3.1.3 Équilibrage des débits

L'une des conditions au bon fonctionnement de l'algorithme de report est que la hauteur d'eau transférée à une cellule ne doit pas excéder la différence de charge hydraulique entre la cellule émettrice et la cellule réceptrice. Si cela se produit, la cellule réceptrice risque de devenir à son tour, à l'itération suivante, une cellule émettrice vers l'autre cellule, provoquant ainsi des fluctuations. Pour cette raison, nous devons calculer quelle quantité d'eau maximale une cellule peut recevoir de chacune de ses voisines (une cellule ne peut transférer de l'eau vers plus d'une cellule, en revanche elle peut en recevoir de plusieurs).

Nous avons pour effectuer ce calcul écrit un algorithme de minimisation qui utilise les définitions suivantes :

$$\begin{split} H^t_{wi} \text{ est l'épaisseur de la lame d'eau sur la cellule } i \text{ à l'itération } t;\\ h_i \text{ est l'altitude de la cellule } i, que nous considérons comme constante;}\\ \varphi^t_i &= h_i + H^t_{wi} \text{ est la charge hydraulique de la cellule } i;\\ \delta_i &= H^t_{wi} - H^{t+1}_{wi}, \ \delta_i \geq 0 \text{ est l'eau émise de la cellule } i;\\ \delta_c &= H^{t+1}_{wc} - H^t_{wc}, \ \delta_c \geq 0 \text{ est l'eau reçue par la cellule } c; \end{split}$$

 ${\cal A}$ est l'ensemble des cellules non marquées, voisines de la cellule centrale $c\,;$

n est le cardinal de A, c'est-à-dire le nombre de cellules devant donner de l'eau à c.

Afin d'éviter tout risque d'oscillation, la cellule réceptrice c (c'est-à-dire la cellule centrale) doit toujours avoir une charge hydraulique inférieure à celle de toutes les cellules émettrices de son voisinage i:

$$\forall i \in A \quad \varphi_c^t \le \varphi_i^t \tag{6.41}$$

Si nous considérons cette condition à l'itération t + 1, et en utilisant les définitions de φ_i^{t+1} , φ_c^{t+1} , δ_i , δ_c , il vient :

$$\forall i \in A \quad \varphi_c^t + \delta_c \le \varphi_i^t - \delta_i \tag{6.42}$$

D'autre part la conservation de la masse implique que la quantité d'eau reçue doit être égale à la quantité d'eau émise :

$$\sum_{i \in A} \delta_i = \delta_c \tag{6.43}$$

(6.42) et (6.43) permettent d'écrire la condition de stabilité :

$$\forall i \in A \quad 2\delta_i + \sum_{j \in A - \{i\}} \delta_j \le \varphi_i^t - \varphi_c^t \tag{6.44}$$

Si nous considérons la limite, c'est-à-dire l'équivalence entre ces quantités, nous obtenons l'équation matricielle :

$$\begin{pmatrix} 2 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & 2 & \dots & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \dots \\ \delta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varphi_1^t - \varphi_c^t \\ \varphi_2^t - \varphi_c^t \\ \dots \\ \varphi_n^t - \varphi_c^t \end{pmatrix}$$
(6.45)

La première matrice s'inverse facilement, ce qui donne une formulation de la solution cherchée :

$$\delta_{i} = \frac{n}{(n+1)} (\varphi_{i}^{t} - \varphi_{c}^{t}) - \sum_{j \in A - \{i\}} \frac{\varphi_{j}^{t} - \varphi_{c}^{t}}{(n+1)}$$
(6.46)

Pour obtenir un comportement physiquement correct, il faut que cette valeur δ_i soit positive pour toutes les cellules émettrices. Par conséquent, nous éliminons du voisinage Ales cellules pour lesquelles cette valeur est négative avant de recalculer toutes les quantités pour ce nouveau voisinage. Au final, la quantité d'eau δ_i réellement transférée d'une cellule ide A est le minimum entre δ_i , calculé par cet algorithme, et le débit q, calculé par l'équation de Darcy-Weisbach, par conséquent l'inégalité (6.44) est toujours vérifiée et tout risque de fluctuation est éliminé.



FIGURE 6.23 – Mise en évidence de l'anisotropie de l'algorithme de ruissellement appliqué sur un voisinage de Von Neumann (4-voisinage) en haut, et à un voisinage de Moore (8-voisinage) en bas. Les quatre cellules centrales sont alimentées en eau à chaque itération.

6.3.1.4 Correction de l'anisotropie

Comme nous traitons le ruissellement au moyen d'un automate cellulaire 2D, nous pouvons prendre en compte soit le voisinage de Von Neumann, soit celui de Moore. Quel que soit le choix du voisinage, un inconvénient de l'utilisation d'une grille régulière est l'anisotropie qui affecte la propagation du contenu des cellules, alors que le phénomène physique simulé, ici l'écoulement de l'eau, est isotropique sur une surface plane (voir l'illustration de cet effet anisotropique figure 6.23). Schönfisch (1997) a étudié de manière systématique différentes solutions possibles pour éviter l'anisotropie au sein d'un automate cellulaire. Une des conclusions de son travail est que la forme des cellules ne peut qu'au mieux retarder l'apparition de l'anisotropie : ainsi, une grille de cellules hexagonales, qui semblent être une meilleure solution que les cellules carrées puisque les centres des cellules sont équidistants, finit par produire un motif hexagonal. Schönfisch conclut également que l'utilisation d'un voisinage aléatoire est une des solutions les plus efficaces.



FIGURE 6.24 – Illustration du principe du voisinage aléatoire pour une cellule. Les voisins (cellules bleues) de la cellule centrale (cellule jaune) sont les cellules dont le centre (point tiré aléatoirement dans chaque cellule) est à l'intérieur du cercle de rayon R.

Dans le domaine de la modélisation d'un phénomène naturel par automate cellulaire, nous n'avons trouvé qu'un exemple de l'utilisation d'un voisinage aléatoire. Vicari et coll. (2007) l'utilisent sur une grille à cellules carrées pour reproduire l'écoulement de la lave d'un volcan. Le principe du voisinage aléatoire est le suivant : un point est tiré aléatoirement dans chaque cellule de la grille, définissant son « centre », et une cellule est considérée dans le voisinage d'une autre cellule si son centre est à l'intérieur d'un cercle d'un rayon défini par l'utilisateur ⁶ et entourant la cellule considérée (voir figure 6.24). Vicari et coll. appliquent un principe de Monte-Carlo, procédant à un tirage de voisinage pour une simulation et faisant une moyenne sur les résultats de plusieurs simulations (sans préciser combien leur sont nécessaires pour aboutir à un résultat satisfaisant). Ce principe est peu applicable pour notre simulateur, étant donné qu'une seule simulation peut demander un temps important de calcul. Nous l'avons donc adapté, et, au lieu de faire une moyenne sur plusieurs simulations conservant le même voisinage, nous ne faisons qu'une seule simulation en procédant à un nouveau tirage de voisinage à chaque itération ⁷.



FIGURE 6.25 – Correction de l'anisotropie apportée par la prise en compte d'un voisinage aléatoire (voisinage de Von Neumann en haut et voisinage de Moore en bas).

La figure 6.25 montre le résultat de la prise en compte d'un voisinage aléatoire pour notre algorithme de ruissellement. Notons que nous retrouvons une des caractéristiques les plus intéressantes des automates cellulaires, à savoir une conséquence à l'échelle macroscopique d'une règle appliquée à l'échelle cellulaire, propriété qu'avait déjà soulignée Toffoli (1994, p. 3) à propos de la propagation *circulaire* d'une onde sonore simulée par un gaz sur réseau HPP⁸, basé sur une grille *orthogonale*. La comparaison (figure 6.25) entre le résultat obtenu par le voisinage de Von Neumann et celui de Moore montre que ce dernier est plus efficace pour reproduire l'isotropie de l'écoulement de l'eau, nous le privilégierons donc *a priori* comme voisinage par défaut du simulateur.

6.3.1.5 Angle de contact

L'exemple précédent d'écoulement simulé par notre algorithme (figures 6.23 et 6.25) est basé sur un ajout régulier d'eau dans les quatre cellules centrales du terrain. Si nous nous contentons d'une quantité d'eau initiale sur ces cellules, sans la renouveler, le résultat est identique : recherchant un équilibre entre la charge hydraulique des cellules, l'algorithme peut

7. En fait, pour économiser du temps, nous opérons un tirage d'un nombre suffisant de voisinages à l'initialisation du simulateur que nous stockons en mémoire dans un tableau dans lequel nous tirons aléatoirement le voisinage courant à chaque itération.

^{6.} Il s'agit d'une option d'initialisation dans notre simulateur, pour nos tests ce rayon était fixé à 1.5.

^{8.} Du nom de ses inventeurs : Hardy, de Pazzis, et Pomeau (1976).

amener la flaque d'eau à s'étendre jusqu'aux limites du terrain, quelle que soit sa dimension, jusqu'à atteindre une épaisseur infinitésimale. Ce comportement n'étant pas réaliste, il a fallu trouver comment le corriger.

Dans le domaine de l'informatique graphique, ce problème a été précisément traité par Wang et coll. (2005) pour reproduire notamment le comportement de gouttes d'eau sur une surface. La base de ce comportement est l'existence d'un angle de contact, angle caractéristique formé par le liquide au contact avec la surface et déterminé par les trois tensions superficielles du système physique (liquide-solide, solide-gaz, gaz-liquide) via la relation de Young (de Gennes, 1985). Cet angle peut être très inférieur à 90° dans le cas d'une surface hydrophile, et au contraire, très supérieur à ce seuil, dans le cas d'une surface hydrophobe (figure 6.26). Lorsque l'angle du liquide avec la surface dépasse l'angle de contact, le liquide s'étale jusqu'à retrouver l'angle de contact. En fait le phénomène est bien plus complexe : il existe un angle lorsque le liquide avance, dit *angle de mouillage*, et un angle lorsque le liquide recule, dit *angle de retrait*, qui ne sont ni égaux ni complémentaires (Musy et Soutter, 1991). De plus lorsque le liquide s'étale, l'interaction avec la surface peut être caractérisée par un angle de contact qui varie en fonction du temps.



FIGURE 6.26 – Illustration par de Gennes (1985) de la définition de l'angle de contact θ_e , qui peut prendre toutes les valeurs entre 0° et 180°. Dans le cas de l'eau, (a) correspond à une surface hydrophobe, (b) correspond à une surface hydrophile. Il est à noter que ces cas correspondent également à une surface plus ou moins mouillée, une surface parfaitement mouillée présentant un angle de contact idéal de 0°.

Pour améliorer notre algorithme de ruissellement, nous nous contentons d'utiliser le principe de l'angle de contact sans chercher à reproduire toute la complexité du comportement d'un liquide sur une surface. Nous considérons que le liquide est soit en équilibre, soit en avancée, et nous ignorons donc l'angle de retrait. En revanche, reprenant un principe utilisé par Wang et coll., nous définissons deux angles de mouillage, l'un pour une surface sèche, l'autre pour une surface déjà mouillée. Ce dernier étant inférieur au premier, l'eau suivra de préférence un parcours déjà emprunté par une goutte d'eau (voir l'exemple figure 6.28).

Le dernier point à préciser est la manière de calculer l'angle du front d'avancée de l'eau à comparer avec l'angle de contact pour décider de son étalement. Celui-ci n'est pris en compte qu'entre une cellule ayant de l'eau en surface et une cellule n'en ayant pas (entre deux cellules ayant de l'eau, l'angle de contact est nul), et cet angle est calculé simplement entre les deux centres des cellules, en tenant compte de la hauteur de la lame d'eau de la cellule émettrice. Si l'angle calculé est supérieur à l'angle de contact correspondant à l'état de la cellule réceptrice (sèche ou mouillée), le transfert d'eau a lieu, sinon il est annulé (figure 6.27). Il est clair qu'il est impossible dans ce cadre de chercher un respect total de la physique mise en jeu, avec des valeurs d'angle de contact réelles, puisque ce calcul d'angle interdit évidemment



FIGURE 6.27 – Exemples de différents angles du front d'avancée de l'eau, comparés à l'angle de contact (pointillés rouges). Dans les cas (a), (b), (d) le transfert d'eau est possible.

d'approcher les 90°. Il s'agit d'une solution empirique, les valeurs d'angle idoines devant être déterminées par des tests, qui furent uniquement visuels dans notre cas, mais qui pourraient être plus approfondis et en relation avec des expériences d'écoulement. Notons pour conclure que cet aspect de l'algorithme est surtout important pour une surface imperméable, puisque dans le cas de présence d'infiltration, l'eau se sera généralement infiltrée avant d'arriver à un étalement irréaliste, et s'il y a du ruissellement par suite d'une réduction de l'infiltrabilité due à la pluie, le sol peut sans doute à ce moment être considéré comme parfaitement mouillé et donc avec un angle de contact nul.



FIGURE 6.28 – Différence d'effet visuel produit par l'écoulement de gouttes de pluie sur une pente de 25° et imperméable, sans angle de contact (en haut) et avec angles de contact (en bas). Dans ce dernier cas, l'eau suit préférentiellement les cellules où une goutte est déjà passée, ce qui provoque la naissance de traces linéaires dans le sens de la pente, proches par exemple de l'écoulement sur un pare-brise, plus réalistes que l'éparpillement des premières images.

6.3.2 Mobilisation, transport et dépôt de sédiments

Nous considérons qu'à l'échelle du simulateur le ruissellement n'a pas assez d'énergie pour arracher des particules qui sont contenues dans la matrice cohésive et qu'il est uniquement un agent de transport des particules libres, présentes à la surface du sol. La mobilisation et le transport par le ruissellement diffèrent selon la taille des particules concernées. Comme nous assurons dans le simulateur un suivi de la granulométrie, nous devons donc décider de la mobilisation pour chacune des classes de particules. Il faut ensuite définir le mode de transport, et enfin estimer la quantité de particules qui va être soit transportée vers la cellule réceptrice du transfert d'eau, soit ajoutée par dépôt à la cellule émettrice.

6.3.2.1 Mobilisation et dépôt

a) Contrainte de cisaillement critique

Il a été montré que la mobilisation et le transport sont des processus à seuil (Beuselinck, 2000). La définition de ce seuil peut se faire de différentes manières. Parmi celles-ci, la contrainte critique est souvent utilisée et donne de bons résultats (Govers, 1992, Beuselinck, 2000). De plus, elle est basée sur des variables primaires de notre simulateur, à savoir l'épaisseur de la lame d'eau et le gradient hydraulique. Cette contrainte se calcule pour une taille de particules et permet de déterminer quand les conditions hydrauliques locales sont suffisantes pour mobiliser les particules de cette classe. Il existe de nombreuses expressions plus ou moins complexes, plus ou moins physiques, pour calculer la contrainte critique, et trois sont disponibles dans le simulateur (voir figure 6.29), avec la possibilité pour l'utilisateur de saisir au besoin sa propre formulation. La première expression est un ajustement à des données de contrainte critique de Govers (1992) :

$$\tau_c(p) = a \log D_p + b \tag{6.47}$$

avec D_p le diamètre de la particule p exprimé en μ m, a = 0.049709 et b = 0.002429.

Les deux autres expressions que nous utilisons sont basées sur la courbe de Shields (1936). Julien (1998) propose une fonction continue par morceaux pour représenter la courbe de Shields moyenne. Il utilise le diamètre adimensionnel D^* et la contrainte adimensionnelle critique τ_c^* (nommée encore paramètre de Shields critique) définis respectivement par rapport au diamètre D_p et à la contrainte critique $\tau_c(p)$ par les équations :

$$D_p^* = D_p \sqrt[3]{\frac{g\,G}{\nu^2}} \tag{6.48}$$

$$\tau_c^*(p) = \frac{\tau_c(p)}{g\,\rho_w\,G\,D_p}\tag{6.49}$$

avec D_p en m, ν la viscosité cinématique de l'eau (10⁻⁶ m² s⁻¹ à 20 °C), et G la densité spécifique des sédiments immergés, définie par :

$$G = \frac{\rho_p - \rho_w}{\rho_w} \tag{6.50}$$

avec ρ_p et ρ_w les densités respectives des particules et de l'eau. La contrainte adimensionnelle critique est alors donnée par :

$$\tau_c^*(p) = \begin{cases} 0.5 S_r(p) & \text{si } D_p^* < 0.3, \\ 0.25 D_p^{*-0.6} S_r(p) & \text{si } D_p^* < 19, \\ 0.013 D_p^{*0.4} S_r(p) & \text{si } D_p^* < 50, \\ 0.06 S_r(p) & \text{sinon.} \end{cases}$$
(6.51)

avec $S_r(p)$ la pente de repos pour la classe de particules considérée. Ces valeurs et l'équation (6.49) permettent d'estimer $\tau_c(p)$.

Paphitis (2001), à partir d'une synthèse bibliographique, propose également une estimation de la contrainte adimensionnelle critique, par trois fonctions continues servant à représenter la courbe de Shields et la dispersion des valeurs, et répondant à une même équation :

$$\tau_c^*(p) = \frac{a_i}{b_i + 1.2 D_p^*} + c_i \left(1 - 0.576 \exp(-0.02 D_p^*) \right)$$
(6.52)

avec les trois jeux de paramètres suivants :

$$a_1 = 0.165$$
 $b_1 = 0.7$ $c_1 = 0.03$ (6.53a)

$$a_2 = 0.273$$
 $b_2 = 1.0$ $c_2 = 0.046$ (6.53b)

$$a_3 = 0.380 \quad b_3 = 1.2 \quad c_3 = 0.07 \tag{6.53c}$$



FIGURE 6.29 – Courbes de Paphitis (2001), de Julien (1998) et d'après Govers (1992).

À l'initialisation du simulateur, nous permettons donc à l'utilisateur de choisir entre les trois formulations (6.47), (6.51) ou (6.52) et dans le cas de cette dernière (Paphitis, 2001), de définir en plus un coefficient permettant d'obtenir une courbe interpolée entre les trois expressions calculées avec les jeux de paramètres détaillés en (6.53).

b) Influence de la pente

Certaines observations (Lamb et coll., 2007) font apparaître que la contrainte critique a tendance à augmenter avec la pente, ce qui signifierait que les particules d'une même taille seraient plus stables sur des pentes plus fortes. Or les modèles théoriques standards prédisent plutôt une mobilité plus grande pour une pente qui s'accentue, à cause de la force gravitationnelle induite par la pente. Lamb et coll. (2007) ont cherché à expliquer cette contradiction par un modèle mécaniste. Ils ont mis en évidence notamment un effet négatif sur la mobilité, lié au fait que lorsque la pente augmente, la hauteur d'eau diminue à cause de l'augmentation de vitesse. En conséquence, la turbulence diminue avec cette décroissance de la hauteur d'eau, ce qui limite la mobilisation, puis l'éventuelle émergence de grains la rend plus difficile encore.

L'effet de la gravité peut se traduire par un facteur F^- , si la pente est dans le sens de l'écoulement et d'angle ω inférieur à l'angle de repos ω_r pour la classe de particules (Dey et Debnath, 2000) :

$$F^{-} = \frac{\sin(\omega_r - \omega)}{\sin(\omega_r)} \tag{6.54}$$

En revanche, plus la pente est forte, moins la lame d'eau est épaisse, et la mobilisation est limitée d'abord par la diminution de la turbulence, puis plus nettement par l'émergence des grains. Nous prenons en compte ces effets à travers un facteur F^+ , que nous calculons de façon différente, selon que la particule est immergée ou non.

Shvidchenko et Pender (2000) ont effectué des mesures de contrainte critique pour différents état de submergence $(H_w/D > 1)$ obtenus en faisant varier la pente. Nous en avons extrait une courbe moyenne, après avoir corrigé l'effet de la gravité due à la pente, qui nous donne le facteur de correction suivant si la particule est immergée :

$$F^+ = 1 + 1.492 \exp\left(-0.136 \frac{H_w}{D}\right)$$
 à noter que $F^+(1) = 2.3023$ (6.55)

Lorsque $H_w/D < 1$ nous calculons F^+ par la formule proposée par Lamb et coll. (2007) :

$$F^{+} = a \frac{D}{H_w} \frac{\rho_w}{\rho_p - \rho_w} \left(\frac{\rho_p}{\rho_w} - \frac{H_w}{D}\right)$$
(6.56)

Le coefficient a = 2.3023 assure la continuité de F^+ pour le cas limite $H_w = D$. Cette valeur signifie que dans ce cas limite, la contrainte critique est déjà 2.3 fois plus importante que pour H_w très grand. Finalement, la contrainte critique $\tau_c(p)$ est modifiée par une multiplication à l'aide de ces deux facteurs :

$$\tau_c(p) = F^+ F^- \tau_c(p) \tag{6.57}$$



FIGURE 6.30 – Comparaison entre le facteur de correction que nous utilisons et deux autres, proposés par Govers (1987) et Ferro (1998).

Il y a mobilisation pour une classe de particules p si la contrainte de cisaillement locale τ est supérieure à cette contrainte critique $\tau_c(p)$. De plus, nous reproduisons un effet d'agitation de l'eau par les gouttes de pluie : une goutte tombant sur une cellule, si elle a une énergie suffisante pour détacher des particules de certaines classes, empêche le dépôt pour ces classes dans cette cellule pour une itération.

c) Contrainte de cisaillement locale

La contrainte de cisaillement est calculée localement à partir de S(i, j), la pente hydraulique entre la cellule émettrice i et la cellule réceptrice j, et l'épaisseur de la lame d'eau H_{wi} , selon l'équation suivante (Chow et coll., 1988) :

$$\tau = \rho_w \, g \, H_{wi} \, S(i,j) \tag{6.58}$$

6.3.2.2 Transport

a) Choix du mode de transport

L'effet des forces hydrodynamiques exercées par l'écoulement d'eau peut se traduire de trois façons différentes sur les particules. Elles peuvent rester au repos, ou être transportées par charriage (*bed load*) en se déplaçant sur le fond par un mouvement de roulement, de glissement ou de saltation⁹, ou bien encore être transportées par le courant en suspension (*wash load*). Ces trois situations peuvent se retrouver simultanément, pour des particules de tailles différentes.

Trier les modes de transport est important dans nos conditions d'étude à cause de la nature chaotique de la topographie : les particules transportées par charriage sont susceptibles d'être affectées fortement par les contre-pentes locales, au contraire des particules en suspension. Pour des particules en mouvement, le choix du mode de transport est évalué à partir du nombre adimensionnel de Rouse, c'est-à-dire le rapport entre la vitesse de cisaillement V_c et la vitesse de sédimentation V_s (vitesse de chute des sédiments obtenue par la loi de Stokes) :

$$V_c = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_p}} \tag{6.59}$$

$$V_s(p) = \frac{g D(p)^2 (\rho_p - \rho_w)}{18 \,\mu_w} \tag{6.60}$$

avec D(p) en m et μ_w la viscosité dynamique de l'eau (10⁻³ Pas à 20 °C).

L'interprétation du nombre de Rouse diffère selon les auteurs. Pour van Rijn (1984), il y a suspension si la vitesse de sédimentation est inférieure à la vitesse de cisaillement (nombre de Rouse supérieur à 1). Julien (1998) place la limite de la suspension à 2.5, et en dessous, répartit les modes de transport entre un transport mixte si le nombre de Rouse est supérieur à 0.4, un transport par charriage s'il est supérieur à 0.2. et aucun transport en dessous de 0.2.

^{9.} Mode de transport des particules sédimentaires grossières qui se déplacent par sauts successifs (Moureau et Brace, 2000).

D'après Nord (2006), le fait que Julien n'envisage pas de mouvement dans ce dernier cas n'est probablement pas valable pour le ruissellement à cause du transport par RIFT (*rainfall-induced flow transport*, transport par l'écoulement agité par les gouttes de pluie). Merten et coll. (2001) appliquent des limites différentes : suspension si le nombre de Rouse est supérieur à 5/3, ensuite saltation au-dessus de 0.5 et roulement-glissement en-dessous. La limite qui nous intéresse est celle entre suspension et charriage, qui est donc, selon ces auteurs, 1, entre 2.5 et 0.4, ou encore 1.67. La limite que nous utilisons par défaut est 1, mais une autre peut être choisie à l'initialisation.

Le simulateur offre la possibilité, pour chaque classe de particules lors de l'initialisation : d'interdire le transport par charriage, d'interdire le dépôt, ou encore d'interdire toute mobilisation par le ruissellement. Par exemple, d'après Leguédois (2003), les particules de taille inférieure à $20 \,\mu\text{m}$ sont transportées uniquement par suspension et ne se déposent jamais. Un tel comportement peut donc au besoin être forcé et il l'est par défaut pour cette classe de particules. Enfin, il faut signaler une limitation du modèle : à chaque itération, dans une cellule, un seul type de transport est possible pour une classe de particules.

b) Calcul de la capacité de transport

La capacité de transport de sédiments s'exprime souvent sous une forme adimensionnelle par le paramètre d'Einstein Q^* , qui correspond au flux de sédiments en conditions non limitantes pour des conditions hydrauliques données, soit, pour la classe de taille p (Kleinhans et Grasmeijer, 2006) :

$$Q^*(p) = \frac{Q_s(p)}{D(p)^{3/2} (g G)^{1/2}}$$
(6.61)

avec $Q_s(p)$ le taux de transport (m³ m⁻¹ s⁻¹). Il est à noter que la capacité de transport ne semble pas affectée par le mode de transport, c'est pourquoi il est possible de n'utiliser qu'une seule équation. Le paramètre d'Einstein se calcule de façon empirique, et Kleinhans et Grasmeijer en ont listé de nombreuses expressions disponibles dans la littérature, issues de très nombreuses expérimentations. Nous reprenons dans le simulateur la formule de Wiberg et Smith (1989), obtenue à partir d'une compilation importante de résultats :

$$Q^*(p) = \alpha \left(\tau^* - \tau_c^*(p)\right)^{\beta} \quad \text{avec } \alpha = 1.6 \, \log(\tau^*) + 9.8, \quad \beta = 1.5 \tag{6.62}$$

À partir de cette valeur, le taux de transport se déduit de (6.61). Nous le multiplions par la densité des particules de la classe considérée pour obtenir un taux massique de transport $Q_m(p)$:

$$Q_m(p) = \rho_p Q_s(p) \tag{6.63}$$

Govers (1992) propose un calcul direct de ce taux massique, également disponible dans le simulateur :

$$\log_{10}(Q_m(p)) = 2.457 \log_{10}\left(\frac{\tau - \tau_c(p)}{D(p)^{1/3}}\right) - 4.348$$
(6.64)

c) Masse transportée par charriage

Pour estimer la masse transportée par charriage, nous divisons Q_m par la densité locale du terrain puis nous déterminons la proportion de la classe en cours dans les classes soumises au transport. La masse obtenue est multipliée par la largeur de la cellule pondérée par cette proportion. Nous tenons compte également de la topographie locale : si la pente est opposée au sens de l'écoulement, il n'y a pas de transport, et, en revanche, un algorithme d'éboulement est appliqué dans la cellule d'arrivée, afin de respecter l'angle de talus défini pour la classe de particules considérée.

d) Masse transportée en suspension

L'estimation de la masse transportée en suspension est basée sur la notion de capacité de transport solide. Si le débit solide excède la capacité de transport, il y a dépôt, et inversement, il y a érosion du fond si le débit solide est inférieur à la capacité de transport. Pour calculer la concentration maximale, nous divisons Q_m par le débit unitaire de ruissellement. Cette concentration est de plus limitée par un seuil empirique (1200 kg m^{-3}) . Nous obtenons ainsi une concentration maximale pour chaque classe concernée par la suspension. Pour obtenir une seule valeur permettant le calcul de la masse totale de particules transportée, nous nous basons sur le diamètre médian D_{50} de ces classes. S'il y a dépôt, nous retirons le nombre de particules nécessaire des particules en suspension, et nous les ajoutons à la cellule de surface. S'il y a érosion du fond, nous retirons de la cellule de surface le nombre de particules nécessaire, avec la possibilité d'en retirer également d'une cellule inférieure, les particules retirées étant alors remplacées par de la matière et des particules (en ordre de taille aléatoire) de la première cellule. Enfin, la dernière étape consiste à transférer les particules en suspension de la cellule émettrice vers la cellule réceptrice de l'écoulement : le calcul est basé simplement sur le respect de la proportion d'eau transférée, proportion qui est appliquée aux quantités de particules en suspension pour évaluer le transfert solide entre les cellules.

6.3.2.3 Érosion latérale

Nous nous sommes aperçus lors d'une expérimentation sous simulateur de pluie que l'érosion d'un tas de sable, placé sur une surface imperméable plane et en pente, était beaucoup plus conséquente que celle reproduite dans le simulateur virtuel (ce qui est illustré par la comparaison entre la figure 6.31 et les images de la première rangée de la figure 6.32).



FIGURE 6.31 – Érosion d'un tas de sable fin sous simulateur de pluie en laboratoire.

Le problème vient du fait que notre algorithme de transport ne peut éroder que les cellules submergées. Or, comme illustré par la figure 6.33, il est probable que des cellules n'ayant pas



FIGURE 6.32 – Reproduction dans le simulateur de l'érosion d'un tas de sable sous la pluie. La première rangée d'images présente le résultat sans activation de l'érosion latérale, il y a moins de transport que dans la réalité. La deuxième rangée d'images présente le résultat avec activation de l'érosion latérale et montre que l'ajout de cette correction augmente visiblement, pour une période de temps simulé identique, la quantité de grains de sable transportés, rapprochant le résultat visuel de la réalité. Les motifs sont moins précis dans le cas de la simulation à cause de la résolution limitée à celle des cellules, dans ce cas 2mm, alors que les grains de sable sont beaucoup plus fins.

d'eau en surface soient elles aussi érodées (comme dans le cas d'un tas de sable en contact avec l'eau uniquement sur le côté). Nous avons donc ajouté une « érosion latérale » qui prend en compte les deux cellules voisines de la cellule réceptrice (voir figures 6.33 (c) et (d)).



FIGURE 6.33 – Les figures (a) et (b) illustrent en deux itérations le problème posé par notre traitement du transport : sur ces deux itérations, seules les cellules de surface des colonnes C et D seront érodées car elles se trouvent (successivement) avec une quantité d'eau à transférer. En revanche, les parties du sol plus hautes et n'ayant pas d'eau ne sont pas érodées, or dans la réalité il est probable qu'un peu de matière soit emportée par l'eau, « latéralement ». Notre correction fait que dans ce cas de figure, les cellules des colonnes B puis A pourront en fait perdre aussi des particules. Comme il est montré dans les figures (c) et (d), lorsque de l'eau passe d'une cellule à l'autre, notre algorithme « d'érosion latérale » a la possibilité d'éroder, sous certaines conditions, les deux cellules voisines de la cellule réceptrice, indiquées par les flèches noires.

Lorsqu'une cellule doit transférer de l'eau à une cellule réceptrice, nous étudions successivement ses deux voisines. Si celles-ci n'ont pas d'eau en surface, si leur altitude est supérieure à celle de la cellule émettrice et si elles n'ont pas déjà subi d'érosion latérale pendant l'itération courante, elles vont céder à la cellule réceptrice une quantité de particules calculée comme pour la quantité transportée par charriage, avec deux corrections : la contrainte de cisaillement est multipliée par 0.75 (valeur couramment employée dans le cas similaire de l'érosion des lits de rivière, et représentant le rapport entre la contrainte sur la berge et la contrainte au fond) et la quantité de particules est multipliée par le rapport entre la surface latérale mouillée de la cellule et l'aire d'une cellule. Un résultat de l'application de cette érosion latérale est reproduit par la deuxième rangée d'images de la figure 6.32. L'effet visuel et quantitatif important de cette érosion s'explique par le grand nombre de cellules qu'elle concerne, nombre représentant, à chaque itération, environ la moitié du nombre de cellules concernées par l'érosion sous lame d'eau (voir figure 6.34) : en l'absence d'érosion latérale, c'est autant de cas de transport de particules qui seraient ignorés par le simulateur.



FIGURE 6.34 – Comparaison entre le pourcentage de cellules de surface concernées par l'érosion sous lame d'eau et celles concernées par l'érosion latérale, pour un carré de 100×100 cellules.

6.4 Infiltration

6.4.1 Green & Ampt

Pour les premiers essais du simulateur, avant de chercher un modèle d'infiltration plus en adéquation avec le but poursuivi et nos choix initiaux de modélisation, nous avons choisi d'utiliser le modèle d'infiltration de Green et Ampt (1911), très souvent utilisé (voir section 4.4.1) et qui est un modèle simplifié des transferts hydriques dans le sol basé sur une approximation des équations de Darcy-Richards pour les écoulements en milieux non saturés. Les hypothèses simplificatrices utilisées par ce modèle sont les suivantes (voir figure 6.35) : le front d'humectation est abrupt, séparant une zone de transmission à teneur en eau à saturation et une zone à teneur en eau initiale, se situe à une profondeur L et avance à une vitesse constante i pendant la durée d'une itération, la zone de transmission a une teneur en eau et donc une conductivité hydraulique constantes dans le temps et l'espace, et la pression des forces de succion à l'aval du front d'humectation est également constante.

Dans ce modèle, le sol est caractérisé par quatre paramètres : K_s est la conductivité du sol à saturation, homogène à une vitesse, θ_i et θ_s sont les teneurs en eau initiale et à



FIGURE 6.35 – Schématisation de l'infiltration selon Green et Ampt (1911).

saturation, et ψ exprime la pression des forces de succion au niveau du front d'humectation. Ces caractéristiques permettent de calculer une vitesse d'infiltration potentielle par la formule suivante :

$$i = K_s \left(1 + \frac{H_s + \psi}{L} \right) \quad \text{avec} \quad L = \frac{H_i}{\theta_s - \theta_i}$$

$$(6.65)$$

 H_s étant la hauteur d'eau locale en surface et H_i la hauteur d'eau infiltrée. Cette vitesse est potentielle et la quantité d'eau infiltrée est nécessairement limitée par la quantité d'eau disponible en surface. Les constantes K_s , θ_i et θ_s peuvent être estimées à partir de mesures sur des échantillons de sol (ψ est obtenu en intégrant la courbe de conductivité hydraulique en fonction de la pression du sol). Des valeurs pour ces paramètres, en fonction du type de sol, sont par ailleurs disponibles dans la littérature (Rawls et coll., 1983).



FIGURE 6.36 – Évolution de l'eau en surface au cours d'une simulation virtuelle après arrêt de la pluie, avec une infiltration calculée selon le modèle de Green et Ampt.

Pour effectuer les calculs du volume d'eau à soustraire de l'eau en surface, nous faisons l'hypothèse que l'infiltration concerne principalement la dimension verticale du modèle, et nous faisons une simplification en considérant qu'elle ne se fait en chaque cellule de surface que sur la colonne de cellules correspondante. Un résultat visuel donné par l'utilisation de ce modèle dans le simulateur est reproduit figure 6.36.

6.4.2 Automate cellulaire

Nous avons décidé de rechercher un autre modèle d'infiltration plus général, en privilégiant la cohérence avec le modèle de ruissellement. Ce modèle suit donc les mêmes principes que celui du ruissellement : utilisation d'un automate cellulaire (3D dans ce cas), report de l'eau suivant la direction de la charge hydraulique la plus faible, calcul du flux basé sur une loi physique (Darcy-Richards).

Selon cette loi, le flux q s'écrit dans le cas unidimensionnel (nous considérons en effet un

échange entre deux cellules seulement à la fois) :

$$q = K(\theta) \frac{\Delta H}{d} \tag{6.66}$$

avec K la conductivité hydraulique, θ la teneur en eau, ΔH le gradient de charge hydraulique entre les deux points considérés, et d leur distance. La charge hydraulique totale H en un point donné est définie par la somme de la charge de gravité z (altitude) et de la charge de pression h dépendant de la teneur en eau (Musy et Soutter, 1991) :

$$H(\theta, z) = z + h(\theta) \tag{6.67}$$

Cette expression peut également se formuler en remplaçant la charge de pression par son opposée, la charge de succion ψ :

$$H(\theta, z) = z - \psi(\theta) \tag{6.68}$$

La pression (ou la succion) et la teneur en eau varient simultanément, et la relation $h(\theta)$ est une caractéristique spécifique à chaque type de sol, représentée graphiquement par la courbe caractéristique d'humidité du sol, qui peut être déterminée expérimentalement. Diverses lois empiriques ont été établies pour exprimer cette relation. Nous avons choisi d'utiliser la fonction de Van Genuchten (1980), qui est souvent employée et permet de rendre compte de ce qui se passe près de la saturation :

$$\psi\left(\theta\right) = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{-1/m} - 1 \right]^{1/n} \tag{6.69}$$

avec a, n et m des constantes empiriques dépendant du type de sol.

La conductivité hydraulique K varie également avec la teneur en eau du sol. Les relations $K(\theta)$ et $h(\theta)$ sont caractéristiques d'un sol ou, de façon plus générale, d'un type de sol. Nous avons utilisé une autre loi empirique de Van Genuchten (1980) pour exprimer cette relation entre la conductivité hydraulique K et la teneur en eau :

$$K(\theta) = K_s \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/2} \left[1 - \left(1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r}\right)^{1/m}\right)^m\right]^2$$
(6.70)

avec K_s la conductivité hydraulique maximale (à saturation), θ_s et θ_r les teneurs en eau respectivement à saturation (maximale, théoriquement égale à la porosité) et résiduelle (minimale).

Comme pour le ruissellement, le transfert d'eau entre deux cellules voisines est réalisé de la cellule à la plus forte charge hydraulique vers la cellule à la charge la plus faible, et nous imposons qu'une cellule ne puisse transmettre de l'eau qu'à une seule autre cellule, et ne puisse en recevoir que d'une seule également. Cette double simplification nous a permis d'accélérer le traitement et d'introduire une protection simple contre une instabilité possible de l'algorithme en limitant la quantité d'eau transférée entre deux cellules, de manière à ce que, après le transfert, la charge de la cellule réceptrice ne puisse dépasser la charge de la cellule émettrice. Les cellules sont préalablement ordonnées selon la charge hydraulique croissante, et chaque cellule est considérée comme réceptrice potentielle. La quantité d'eau maximale Q transférée d'une cellule émettrice du voisinage est calculée à l'aide du flux estimé par l'équation (6.66) :

$$Q = q A_{cell} \Delta t \tag{6.71}$$

avec A_{cell} l'aire d'une cellule et Δt le pas de temps. À cause de l'évolution de la granulométrie et du tassement dû à l'énergie cinétique, nous avons vu que l'épaisseur des cellules pouvait varier (voir section 6.2.3). Pour les cellules de surface, cette variation peut être maximale, puisque les volumes de particules et de matière utilisés dans la formule (6.37) dépendent directement du détachement (qui supprime de la matière continue), de la projection (qui supprime des particules) et du transport par ruissellement (qui ajoute des particules). Le cas le plus critique est une cellule de surface d'épaisseur presque nulle, qui risque d'être un frein artificiel à l'infiltration par le trop peu d'eau qu'elle peut transmettre en une itération. Nous avons donc, pour pallier ce problème, considéré pour le calcul de l'infiltration que les deux premières cellules n'en formaient qu'une, garantissant ainsi une épaisseur minimale suffisante pour les calculs.



FIGURE 6.37 – Comparaison de l'influence du voisinage sur l'infiltration (modèle automate cellulaire) à partir d'une cellule source au centre du volume : (a-d) 6-voisinage, (e-h) 26-voisinage, (i-l) 26-voisinage avec coefficients, (m-p) 26-voisinage aléatoire avec un rayon R = 1.5.

Nous avons implémenté ce modèle en 3D avec de bons résultats pour une infiltration venant de la surface du sol (voir section 7.4.3.2). Cependant, un second test sans eau en surface (pas de pluie, charge nulle), en introduisant une cellule source au cœur du volume, cellule saturée à tout moment, a mis en évidence, comme pour le ruissellement, une forte anisotropie pour le 6-voisinage et le 26-voisinage, ce qui est clairement montré par les figures 6.37(a-h). Une première solution fut de coefficienter le flux selon la position de la cellule réceptrice par rapport à la cellule émettrice, de manière à adapter la quantité d'eau transférée selon que les cellules sont en contact par une face (coefficient 0.9), une arête (coefficient 0.6) ou un sommet (coefficient 0.1). Le résultat est reproduit par les figures 6.37(i-1), montrant une amélioration nette mais avec cependant un contour non sphérique. La deuxième solution appliquée fut la même que pour le ruissellement, à savoir l'utilisation de voisinages aléatoires à chaque itération, voisinages cette fois déterminés par une sphère de rayon R arbitrairement défini et non par un cercle (voir section 6.3.1.4 la définition d'un tel voisinage en 2D). Le résultat est

reproduit par les figures 6.37(m-p), montrant cette fois une infiltration quasi-isotrope dans le sous-sol.

Néanmoins, cette version 3D étant coûteuse en temps de calcul, et n'apportant finalement que peu au modèle global (puisque seul nous intéresse le volume d'eau infiltrée pour en déduire le ruissellement, et non le profil hydrique complet), nous avons recherché pour modéliser l'infiltration une autre solution, plus simple à définir et moins coûteuse à exécuter.

6.4.3 Modèle sol-croûte

6.4.3.1 Flux d'infiltration

Le fait que le point central du simulateur soit la surface du sol et les interactions entre les processus d'érosion, l'évolution de la structure de surface du sol et de ses propriétés hydrodynamiques, nous a incités à rechercher un modèle d'infiltration moins coûteux et plus spécifique. En présence d'une croûte, le flux d'infiltration est en effet essentiellement déterminé par les propriétés de la croûte et de l'interface sol-croûte, c'est-à-dire par les premiers millimètres à centimètres de sol. Les caractéristiques du sol en profondeur n'ont qu'une importance très limitée. Il est ainsi possible de proposer un modèle focalisant sur le processus d'infiltration dans la croûte et à l'interface sol-croûte, et ne concernant donc qu'un nombre limité de cellules. En régime permanent, le flux à travers la croûte q doit nécessairement être égal au flux K(h) dans le sol sous-jacent. La loi de Darcy permet d'écrire que :

$$q = K_c \frac{H_w + h_{sc} + L_c}{L_c} \quad \text{est égal à } K(h) \text{ du sol sous-jacent, soit :}$$
(6.72)

$$K(h) = K_s \exp(-c h_{sc}) \qquad \text{(formule de Gardner 1958)}$$
(6.73)

avec K_c la conductivité hydraulique de la croûte, L_c son épaisseur, H_w la hauteur de la lame d'eau, K_s la conductivité hydraulique du sol, h_{sc} la charge hydraulique à l'interface et c une constante égale à $1/\psi$, représentant donc l'inverse de la pression des forces de succion au niveau du front d'humectation (valeur par défaut $c = 0.033 \,\mathrm{cm}^{-1}$).

 h_{sc} peut être évalué par une méthode itérative, ce qui permet de déterminer q, le flux à travers la croûte. Cette approche (Hillel et Gardner, 1970) est simple mais a une solide base physique et s'appuie sur des propriétés de la croûte et du sol qui sont mesurables (conductivité, succion, épaisseur) ou que le simulateur est en mesure de prédire (conductivité, épaisseur). Elle permet donc de prendre en compte de façon explicite l'évolution temporelle et spatiale des propriétés physiques et hydrodynamiques de la surface du sol. En outre, cette approche n'impose aucune contrainte sur le pas de temps.

Le principal inconvénient de cette approche est l'hypothèse de régime permanent : nous recherchons en effet une valeur de h_{sc} à l'équilibre. Cette hypothèse n'est pas correcte en début de simulation, sur une durée d'autant plus longue que le sol est sec. Initialement par exemple, h_{sc} est très proche de h_{ini} , et la valeur élevée de la succion induit un flux plus grand que celui obtenu en faisant l'hypothèse d'un équilibre instantané de h_{sc} . Nous sous-estimons donc l'infiltration aux temps courts. En pratique, cette erreur est partiellement compensée par le fait qu'en début de simulation la croûte n'est pas encore en place ou de conductivité

élevée, ce qui fait que de toute manière toute la pluie s'infiltre. Mais nous avons néamoins une erreur sur le moment d'apparition du ruissellement, qui est plus précoce dans la simulation qu'en réalité.

Ahuja (1983) a proposé et testé une extension de ce modèle à régime permanent – qui en conserve les propriétés – traitant du cas transitoire. Nous avons fait quelques essais qui montrent que ce modèle serait un bon candidat pour le simulateur, mais celui-ci n'a pour l'instant pas été implémenté à cause de la sensibilité de l'évaluation de h_{sc} à la valeur initiale fournie.

6.4.3.2 Conductivité hydraulique de la croûte

Le simulateur permet d'évaluer l'évolution de la densité des cellules en s'appuyant à la fois sur leur composition granulométrique et le cumul d'énergie cinétique reçu et propagé en profondeur (voir section 6.2.3). Nous nous sommes par ailleurs appuyés sur un calcul de porosité structurale pour déterminer si une cellule pouvait être considérée comme une cellule de croûte (section 7.2.2), en ajoutant une information sur le type de croûte (structurale ou sédimentaire) en fonction de l'évolution de la signature granulométrique.

La porosité structurale est un bon prédicteur de la conductivité hydraulique (au contraire de la porosité totale par exemple). On trouve en effet dans la littérature des exemples de relation assez nette entre conductivité hydraulique et porosité structurale (Guérif, 1990) ou infiltrabilité (Fiès et Castelao-Gegunde, 1996) avec par ailleurs une bonne constance de la forme de la relation. Nous nous sommes appuyés sur une relation similaire pour évaluer la conductivité hydraulique d'une cellule à partir de sa porosité structurale. Pour obtenir cette relation, nous avons extrait des travaux de Fiès et Castelao-Gegunde (1996) les porosités structurales et les infiltrabilités de croûtes mesurées. Nous avons utilisé des propriétés hydrodynamiques typiques d'un lit de semence pour recalculer des valeurs de conductivité correspondant aux valeurs d'infiltrabilité mesurées, en prenant pour épaisseur de croûte la valeur moyenne des valeurs mesurées par Fiès et Castelao-Gegunde (1996) : 2 à 3 mm, soit 2.5 mm en moyenne. Nous avons ensuite ajusté une fonction à la relation porosité structurale - conductivité hydraulique, en vérifiant deux contraintes :

- pour une porosité structurale nulle, la conductivité doit rester légèrement supérieure à 0, de l'ordre de $0.01 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ ce qui correspond à des infiltrabilités réalistes de $1 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ environ pour $L_c = 1 \,\mathrm{mm}$ et $0.1 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ environ pour $L_c = 10 \,\mathrm{mm}$;
- pour une porosité structurale égale à la porosité structurale initiale du lit de semence (de l'ordre de 0.25), la conductivité doit être de l'ordre de 100 à $150 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ (Desbourdes-Coutadeur, 2002).

La figure 6.38 montre l'ajustement aux données de Fiès et Castelao-Gegunde par la fonction suivante :

$$K_c = m + a P^b \tag{6.74}$$

avec K_c la conductivité hydraulique de la croûte, P la porosité structurale, et $a = 43\,439$, b = 4.2532, $m = 5.1699 \times 10^{-3}$. Ce calcul est appliqué à chaque cellule de la croûte, et la conductivité hydraulique à saturation globale K_c de la croûte est ensuite estimée par la



FIGURE 6.38 – Conductivité hydraulique de la croûte en fonction de la porosité structurale d'après un ajustement aux données de Fiès et Castelao-Gegunde (équation 6.74).

moyenne harmonique des conductivités hydrauliques K_{c_i} des n cellules i composant cette croûte :

$$K_c = \frac{n}{\sum_{i=1}^n K_{c_i}^{-1}} \tag{6.75}$$

Ce modèle d'infiltration présente l'avantage de prendre en compte explicitement l'évolution dynamique et spatiale de la conductivité hydraulique due à la formation d'une croûte. Il est possible de l'utiliser dès qu'apparaît une différenciation de la croûte, et auparavant tout s'infiltre. Il nécessite donc une définition de la croûte selon les variables disponibles dans le simulateur. Nous reviendrons sur ce point dans le chapitre suivant, section 7.2.2.

6.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'exposer en détail la modélisation des différents processus impliqués dans la dégradation de l'état de surface du sol pendant la pluie : génération des gouttes de pluie, détachement et projection par les gouttes de pluie, ruissellement, mobilisation, transport et dépôt par le ruissellement, et infiltration. Nos efforts ont porté sur une exploitation maximale des possibilités offertes par le modèle, notamment la gestion discrète des gouttes de pluie, qui nous a poussés à rechercher comment générer de façon fine une pluie réaliste, et comment reproduire les effets du splash le plus fidèlement possible. De la même façon, nous avons traité le transport par le ruissellement à l'échelle de la particule et de la cellule, notamment en faisant intervenir de manière différenciée le charriage et la suspension. Notons que pour aucun processus nous n'avons été en mesure de différencier les comportements de cellules liées en agrégat de ceux des autres cellules, ce qui a pour conséquence que dans le modèle actuel, la distinction que nous avons rendue possible dans sa structure entre agrégats et autre type de sol, ne joue aucun rôle dans son fonctionnement.

Le modèle mis en place a prouvé sa grande flexibilité par la succession des différents formalismes retenus pour certains processus, certains étant abandonnés au fur et à mesure, mais d'autres étant conservés comme autant d'options disponibles. Cette intégration des connaissances actuelles a permis de faire une large revue des travaux publiés, dont certains très récents, et d'en retenir les plus pertinents dans le contexte du simulateur développé qui embrasse beaucoup de domaines. La démarche de modélisation suivie a été illustrée notamment par l'ajout d'un « étalement de splash » et d'une « érosion latérale » qui nous ont permis de simuler de manière plus exacte des expérimentations menées en laboratoire en vue justement d'améliorer le modèle.

Dans ce chapitre, quoique nous ayons déjà illustré quelques points précis à l'aide d'images produites par le simulateur, nous n'avons pas explicité le rôle de l'interpréteur. C'est l'objet du chapitre suivant, dans lequel seront décrites les méthodes de visualisation employées, ainsi que l'autre fonction importante de l'interpréteur, à savoir la discrimination des zones de croûte. Nous donnerons enfin, en conclusion de cette partie consacrée au modèle de dégradation de la structure du sol sous l'action de la pluie, des résultats de simulation et des comparaisons avec des expériences de laboratoire. Chapitre 7

Interprétation et résultats

Sommaire

7.1	Intro	oductior	$1 \dots 1 \dots 154$		
7.2	Inte	rprétati	on		
	7.2.1	Visualis	ation $\ldots \ldots 154$		
		7.2.1.1	Visualisation du volume		
		7.2.1.2	Visualisation de la surface		
	7.2.2	Définitio	on des croûtes		
		7.2.2.1	Zones de croûte		
		7.2.2.2	Types de croûte		
7.3 Choix et observations préliminaires					
	7.3.1	Résoluti	ions temporelle et spatiale		
		7.3.1.1	Ruissellement sur terrain plan		
		7.3.1.2	Ruissellement sur topographie naturelle 163		
		7.3.1.3	Influence de la résolution spatiale		
	7.3.2	Vérifica	tions $\ldots \ldots 165$		
	7.3.3	Temps of	$l'exécution \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots \dots $		
		7.3.3.1	Bilans		
		7.3.3.2	Modèle bi-résolution		
7.4	\mathbf{Exp}	loration	et tests par processus		
	7.4.1	Pluie .			
		7.4.1.1	Couverture du terrain 169		
		7.4.1.2	Respect d'un hyétogramme		
		7.4.1.3	Vitesse		
	7.4.2	Détache	ement et projection		
	7.4.3	Infiltrat	ion et ruissellement		
		7.4.3.1	Comparaison visuelle des modèles d'infiltration 175		
		7.4.3.2	Comparaisons avec une solution de référence 175		
		7.4.3.3	Hauteur d'eau		
	7.4.4	Contrai	ntes et transport $\dots \dots \dots$		
		7.4.4.1	Transport dans un canal		
	~.	7.4.4.2	Transport le long d'une pente		
7.5	Sim	ulation o	complète		
7.5.1 Description de l'expérience réelle					
	7.5.2	Simulat	ion virtuelle et comparaisons		
		7.5.2.1	Detachement et projection		

	7.5.2.2	Infiltration et ruissellement	
	7.5.2.3	Mobilisation et transport par le ruissellement 189	
	7.5.2.4	Évolution de la topographie	
	7.5.2.5	Encroûtement	
7.6	Conclusion		

7.1 Introduction

Les deux précédents chapitres nous ont permis de détailler notre modèle structurel et fonctionnel de la dégradation des sols sous l'action de la pluie. Une simulation réalisée à l'aide de ce modèle produit des données que l'interpréteur doit transformer en informations le plus aisément perceptibles par l'utilisateur, notamment au moyen d'images. Nous abordons ce point dans la première partie de ce chapitre, en donnant des explications sur les deux types de visualisation utilisées, à savoir la visualisation volumique par rendu volumique direct, et le rendu de maillage pour la surface du terrain et de l'eau. S'ajoute à la production d'images une interprétation fondamentale dans le cadre de notre étude, la discrimination des zones croûtées obtenues au cours d'une simulation, et la détermination de la nature de ces croûtes. Nous donnons sur ce point les choix que nous avons faits en fonction des connaissances actuelles sur les propriétés des croûtes de surface. La deuxième partie de ce chapitre est consacrée à des résultats classés selon les processus concernés, ces résultats provenant principalement de comparaison avec des expériences réelles, et permettant une vérification de l'implémentation et une validation partielle de la modélisation de ces processus. Enfin, la dernière partie donne des résultats globaux obtenus par le simulateur, s'appuyant sur une expérience en laboratoire sur une portion de sol cultivé reconstitué et soumise à un simulateur de pluie. Nous illustrons ainsi les tout premiers pas effectués dans le cadre de l'exploration du modèle développé, premiers pas que nous estimons prometteurs quant au potentiel du simulateur en tant qu'outil d'aide à la recherche.

7.2 Interprétation

7.2.1 Visualisation

Notre simulateur est conçu dès le départ pour pouvoir fournir une visualisation des données et une manipulation interactive de cette visualisation, la vue principale du terrain simulé offrant les possibilités classiques de rotation, translation et zoom à la souris permettant de choisir comment le terrain doit être affiché. Ces fonctions de visualisation et de manipulation sont assurées par la partie interprétation de notre modèle, qui reçoit comme informations le contenu des cellules de volume et des cellules hors sol. La question se pose donc de la traduction de ces données en images.

7.2.1.1 Visualisation du volume

a) Principe

Une simulation produit des données volumiques qui peuvent être traitées pour donner des résultats numériques traduits sous forme de courbes ou de tableaux, mais également pour produire des images ou des animations. Deux des techniques les plus utilisées pour la visualisation de données volumiques sont l'extraction de surface et le rendu volumique direct. L'idée de base de l'extraction de surface est d'effectuer un calcul intermédiaire de géométrie sur le volume afin d'en isoler une surface correspondant à une valeur de donnée particulière (isosurface). Cette technique, utilisant souvent l'algorithme des marching cubes (Lorensen et Cline, 1987), est très performante pour illustrer les structures internes dans des champs de données volumiques, notamment médicaux. Elle pose néanmoins le problème du choix de l'isovaleur, et a, par définition, l'inconvénient de ne montrer aucune information en dehors des surfaces. Dans le cas du sol, il nous a paru plus pertinent de recourir à un rendu volumique qui permet de rendre compte des informations contenues dans toutes les cellules du terrain, sans se restreindre à une surface. L'exception à cette prépondérance du volume en matière de visualisation est évidemment la surface du terrain, mais l'altitude de ce terrain nous est donnée directement par le contenu des cellules hors sol, ce qui offre la possibilité d'un autre type de visualisation exploitant directement cette information sans passer par les données volumiques (voir section 7.2.1.2).



FIGURE 7.1 – Illustration du principe des plans de découpe. La première rangée d'images affiche l'intersection de ces plans avec la boîte englobante du terrain. La seconde rangée d'images montre comment se forme l'illusion de la visualisation d'un volume solide en réduisant le pas séparant ces plans.

Nous avons donc adopté le rendu volumique direct (RVD) qui est une technique puissante pour visualiser la structure d'un volume de données. Parmi les nombreuses méthodes de RVD qui ont été proposées, nous utilisons l'algorithme décrit par Benassarou et coll. (2005), basé sur une méthode de découpage (*slicing-based method*) reprenant le principe des *marching cubes*. Il demande peu de mémoire et fournit un rendu adaptatif pour une meilleure précision de l'image aussi bien qu'un rendu progressif assez rapide pour permettre une manipulation interactive des données. Le principe des méthodes par découpage est de convertir d'abord le volume de données en texture 3D, puis de considérer chaque plan de rendu comme représentant une coupe dans ce volume, coupe polygonale dont les sommets se voient assigner les coordonnées de texture dans l'espace paramétrique de l'objet. Lors de la discrétisation en pixels, les fragments dans une coupe sont interpolés trilinéairement à partir de la texture 3D et projetés dans le plan de l'image en utilisant des opérations de mélange adéquates, de l'arrière vers l'avant. L'utilisation du placage de textures permet d'obtenir non seulement une image 3D de haute qualité, mais aussi une vitesse de rendu qui permet une interaction en temps réel avec les données 3D, en mettant à profit les capacités des cartes accélératrices graphiques pour calculer le rendu des coupes parallèles au plan de la caméra virtuelle. La figure 7.1 montre comment les plans de découpe orientés selon l'angle de visée de la caméra définissent les polygones à texturer et comment la multiplication de ces plans permet l'illusion de la visualisation d'un volume solide.

b) Application

Le rendu volumique direct est basé sur l'hypothèse que les valeurs de données du volume sont elles-mêmes une base suffisante pour créer une image informative. Cela est rendu possible par la correspondance entre les valeurs de l'ensemble des données et les propriétés optiques de l'image rendue, telles que l'opacité et la couleur. Ce rôle critique est rempli par deux fonctions : une fonction de prétraitement f_P , qui transforme les données d'une cellule c en un élément de texture 3D (soit, dans l'implémentation actuelle, un entier non signé codé sur 8 bits), et une fonction de transfert f_T , qui assure la correspondance entre une valeur de texture et des propriétés de couleur et d'opacité réunies dans un quadruplet RGBA (*Red Green Blue Alpha*) (figure 7.2) :

$$(R_c, G_c, B_c, A_c) = f_T(f_P(c))$$

$$(7.1)$$



FIGURE 7.2 – Principe de la transformation du contenu d'une cellule en propriétés de couleur et d'opacité du voxel, au moyen de la fonction de prétraitement f_P et de la fonction de transfert f_T .

En ce qui concerne le prétraitement, nous nous trouvons dans un cas particulier de visualisation, puisque nos volumes de données ne sont pas le produit d'une acquisition faite à partir d'un objet d'étude réel (comme par exemple un volume produit, à partir d'un corps humain, à l'aide de l'imagerie par résonance magnétique nucléaire), mais d'une simulation sur un modèle virtuel. Nos cellules ont un contenu certes complexe (voir sa description section 5.3) mais dont la sémantique est parfaitement connue. Aucun travail de segmentation n'est nécessaire pour, par exemple, extraire l'information du contenu en eau des cellules : nous savons exactement où aller chercher cette information dans les informations stockées
dans une cellule. Cette première étape de traitement de l'information est donc rapide mais offre également une grande souplesse. En effet, rien n'interdit d'améliorer ce traitement par des opérations supplémentaires, par exemple un seuillage (une teneur en eau minimale), ou encore par une combinaison de plusieurs informations de la cellule (la somme des volumes de toutes les particules). La fonction de transfert, quant à elle, est déterminée de manière classique par l'intermédiaire d'une LUT (*Look Up Table*, table de correspondance), qui donne pour chaque valeur possible de texture le quadruplet RGBA correspondant. Cette méthode donne au final la possibilité de montrer différents aspects d'un même volume de données (par exemple l'humidité, les particules d'une certaine taille) en ne retenant que certaines informations lors de l'étape de prétraitement, et en faisant ressortir certaines plages de valeurs. Dans le simulateur, l'utilisateur a le choix entre les différentes fonctions de prétraitement implémentées et peut modifier interactivement, par l'intermédiaire de l'interface graphique, la fonction de transfert.

c) Limitation

La visualisation de notre volume cellulaire est basée sur une correspondance entre les cellules et les voxels. Nous avons vu (section 5.3) que le positionnement dans l'espace des voxels nécessitait une translation verticale par rapport à la position des cellules en mémoire, mais cela s'effectue sans modification de l'information initiale. En revanche, visualiser une cellule sous forme d'un voxel implique que leurs dimensions soient proportionnelles. Comme les voxels sont identiques, les cellules devraient être également de même taille. Or, si les dimensions de la section horizontale d'une cellule sont identiques pour toutes les cellules, il n'en va pas de même pour la dimension verticale, qui varie avec leur densité tout au long d'une simulation (voir section 6.2.3). La visualisation des voxels est donc, à ce point de vue, une approximation dont nous avons tenté d'évaluer l'importance à partir d'un volume de $114 \times 112 \times 6$ cellules soumis à une pluie de 20 mm h⁻¹ pendant 2 heures.



(a) Histogrammes pour toutes les cellules du volume, avec et sans la couche de surface.

(b) Histogrammes par couche de cellules, du bas vers la surface.

FIGURE 7.3 – Histogrammes des différences entre l'épaisseur des cellules et l'épaisseur des voxels, pour un volume de $114 \times 112 \times 6$ cellules soumis à une pluie de 20 mm h^{-1} pendant 2 heures. Les moyennes sont indiquées entre parenthèses dans la légende.

La figure 7.3(a) montre l'histogramme des différences entre l'épaisseur des cellules et l'épaisseur des voxels sur le volume, sans la couche de surface et avec cette couche. Il est normal de constater que la couche de surface augmente notablement la moyenne de cette différence (qui passe de 14.8 % à 20.5 %), puisque les cellules de cette couche voient leur épaisseur changer, non seulement à cause de la densité, mais encore par l'ajout ou l'enlèvement de particules. De plus, des cellules peuvent être créées dans cette couche, avec une épaisseur très faible, ce qui explique que la différence d'épaisseur atteigne presque les 100 %. Cette particularité de la couche de surface est également mise en évidence dans la figure 7.3(b), qui montre l'histogramme des différences couche par couche. Les trois premières couches, vraisemblablement modifiées surtout par la densité, n'atteignent pas les 20 %. Les deux couches suivantes présentent un mode vers 50 %, qui provient sans doute de cellules de surface qui ont été recouvertes par d'autres cellules.

Enfin la couche de surface présente un profil complètement différent, pour la raison évoquée précédemment. Les moyennes des différences d'épaisseur des couches, toujours inférieures à 30 % hormis celle de surface, laissent à penser que l'approximation de la translation verticale des voxels reste acceptable et ne remet pas en cause la validité du rendu visuel et de l'information qui peut en être extraite par l'utilisateur, pour ce qui est du contenu des cellules du sol. Il en va bien sûr tout autrement pour juger de la topographie, mais sur ce point précis nous disposons de l'information de l'altitude en chaque centre des cellules de surface, et la section suivante donne des précisions sur la visualisation de cette information.

7.2.1.2 Visualisation de la surface

En plus de la visualisation volumique il nous est possible d'utiliser une visualisation plus traditionnelle à base de facettes triangulaires, à partir du contenu des cellules hors sol du terrain. Au centre de chaque cellule de surface correspond un sommet du terrain à rendre, à l'altitude indiquée. La surface est donc aisément triangulée, puisque ces sommets sont distribués régulièrement. Nous utilisons pour la visualisation de ces facettes les fonctions OpenGL, qui font appel au modèle d'illumination de Phong. Ces fonctions sont également utilisées pour visualiser l'eau de surface, pour laquelle nous disposons également d'une information de hauteur dans les cellules hors sol. Le procédé est identique, à la différence que l'altitude d'un sommet de la surface d'eau est soit l'altitude du terrain h_i plus la hauteur d'eau locale w_i , si celle-ci est non nulle, soit l'altitude du terrain h_i moins une constante C strictement positive (valeur fixée arbitrairement à 1 mm), s'il n'y a pas d'eau sur le terrain (figure 7.4(a)). De cette façon, le passage entre les parties avec de l'eau et les parties sans eau du terrain est géré automatiquement par le tampon de profondeur OpenGL, lors du rendu, qui va provoquer l'affichage des facettes du terrain devant les facettes d'eau là où il n'y a pas d'eau, et l'inverse là où l'eau est présente (figure 7.4(b)).

Le rendu du sol nécessite la définition d'une couleur et de coefficients spéculaires qui sont attribués uniformément à tous les sommets de la surface. Il est possible également dans le simulateur de texturer le terrain à l'aide d'une image représentant la projection 2D d'une donnée particulière de chaque colonne de cellules, par exemple la densité moyenne ou simplement l'altitude. Le rendu de l'eau sur le terrain se fait également par l'attribution d'une couleur et de coefficients spéculaires, ainsi que d'un coefficient d'opacité. OpenGL ne permet pas une gestion native des propriétés de réflexion et de réfraction de l'eau. Un résultat visuel est reproduit figure 7.5(a), qui montre bien l'aspect spéculaire de la surface de l'eau. La figure 7.5(b) montre que le rendu est loin d'être satisfaisant et manque beaucoup de réalisme, notamment



(a) Vue de profil des deux maillages (sol et eau).



(b) Ce qui est affiché par OpenGL dans le cas d'une vue de dessus.

FIGURE 7.4 – Illustration du principe du maillage des surfaces respectives du sol et de l'eau (a). L'image (b) montre les parties qui seront affichées par OpenGL dans le cas d'une vue de dessus (les parties en gris correspondent à ce qui peut être vu par transparence).

lorsque la surface est vue de près. Une petite amélioration peut être ajoutée en incorporant à la transparence une pseudo-réflexion, produite simplement par le mélange entre la couleur de l'eau et la couleur d'un pixel provenant d'une image de ciel nuageux (figure 7.5(c)). Comme il est apparu lors des expériences virtuelles le même inconvénient que lors des expériences réelles, à savoir que l'eau transparente n'est pas toujours facilement observable, nous avons ajouté un autre type de rendu visuel, où la hauteur d'eau sur une cellule est visualisée par un parallélépipède rectangle, de section carrée égale à la section de la cellule, et de hauteur égale à la hauteur d'eau, cette hauteur affectant également la couleur du parallélépipède, d'un bleu foncé pour les grandes hauteurs d'eau à un bleu clair pour les lames d'eau minces (cette méthode est utilisée par exemple dans les images de la figure 7.18). Il est à noter que cette technique, bien que peu réaliste, se mêle bien à la visualisation volumique pour donner des images facilement interprétables (voir par exemple les images d'infiltration de la figure 6.36).



FIGURE 7.5 – Exemples de rendu visuel de la surface de l'eau sur la surface du terrain.

Il y a beaucoup à faire pour produire une image réaliste à partir des informations fournies par une simulation, et nous n'avons pas vraiment abordé ce thème de recherche. La seule tentative modeste que nous avons faite en ce sens est la prise en compte de l'humidité croissante du sol en début d'un épisode pluvieux. Pour cela, nous avons affecté chaque sommet du terrain d'un « indice d'humidité » entier, compris entre 0 et 5, reflétant la quantité d'eau passée sur la cellule correspondante. Cet indice, nul au départ, est incrémenté si une goutte de pluie atteint la cellule, ou si la cellule est destinataire d'une quantité d'eau par ruissellement. Une couleur et des coefficients spéculaires sont affectés à un sol sec et à un sol humide, et des valeurs intermédiaires en sont déduites par interpolation linéaire, pour correspondre à chaque valeur possible de l'indice de chaque sommet. Cette méthode empirique relativement grossière permet néanmoins de reproduire les premiers instants d'un épisode pluvieux, où l'impact des gouttes de pluie est très visible sur le sol initialement sec, comme le montrent les images de la figure 7.6.



FIGURE 7.6 – La première rangée d'images montre l'évolution visuelle d'un sol soumis à un simulateur de pluie : l'impact des gouttes est très visible au début de l'expérience. La seconde rangée d'images montre le début d'une simulation, avec l'utilisation d'un « indice d'humidité » sur chaque sommet.

Toutes les informations contenues dans les cellules du modèle après une simulation devraient pouvoir contribuer à obtenir une image plus réaliste du sol. Il faut pour cela parvenir à déterminer comment traduire ces informations en propriétés optiques de la surface du sol. Un exemple de l'amélioration possible du rendu final est obtenu rapidement en utilisant une des informations disponibles, à savoir les volumes de particules accumulés en chaque point du terrain, en transformant la carte de hauteur correspondante en texture dont les couleurs sont déterminées par une LUT bien choisie, puis en projetant cette texture sur le terrain. La figure 7.7 montre la différence visuelle entre le terrain sans texture et le même terrain avec une texture ainsi définie. Ce type de méthode réunit à la fois le mérite d'être automatique (une fois établie la traduction des informations en propriétés optiques) et de correspondre à une réalité physique, dans la mesure où la simulation respecte dans une certaine mesure cette réalité.



(a) Rendu avec une couleur unique pour toute la surface.



(b) Rendu avec une texture calculée à partir du contenu des cellules du terrain.

FIGURE 7.7 – Illustration d'une amélioration simple du rendu visuel par l'utilisation d'une information sur le contenu des cellules, ici les volumes de particules accumulés.

7.2.2 Définition des croûtes

Nous ne gérons pas explicitement la création d'une croûte : sa présence et sa nature doivent être des conséquences de l'évolution de la structure de la surface du sol (autrement dit du contenu des cellules) provoquée par les processus simulés. Une définition de la croûte à partir des données fournies par la simulation est donc une interprétation indispensable, d'une part au respect des objectifs du simulateur, mais d'autre part également à son bon fonctionnement (puisque la notion de cellule appartenant à la croûte intervient notamment dans le modèle d'infiltration).

7.2.2.1 Zones de croûte

Lorsque la structure d'un sol se dégrade pour aboutir à la formation d'une croûte, ce sont les gros vides de la structure qui sont dégradés, et quand la croûte est formée, la porosité tend vers la porosité texturale du sol : il y a donc une tendance vers la disparition de la porosité structurale au fur et à mesure qu'une croûte se forme. Cette tendance est confirmée par le fait que la porosité structurale est très liée aux propriétés hydrodynamiques du sol, propriétés qui sont très affectées par la formation d'une croûte. Pour ces raisons, il est cohérent de lier une définition de la croûte à une faible porosité structurale, et c'est le critère que nous avons choisi d'utiliser.

Pour déterminer un seuil de porosité structurale à partir duquel nous considérons qu'une cellule est croûtée, nous nous basons sur le travail de Fiès et Castelao-Gegunde (1996), qui ont analysé la porosité de croûtes de surface à différents états hydriques en utilisant les notions d'espace poral textural et structural. Nous prenons comme seuil la valeur de porosité structurale présentée par les sols les moins dégradés dans cette étude, soit approximativement 8%. La conductivité correspondant à une porosité structurale de 8% (1 mm h^{-1} environ) induit une infiltrabilité (variable selon l'épaisseur de la croûte) de l'ordre de 30 mm h⁻¹ pour une croûte épaisse de 3 mm ce qui est cohérent avec les valeurs d'infiltrabilité mesurées au champ sur croûte structurale tout juste formée.

Le choix de ce seuil est conforté par un autre résultat. Les sols les moins dégradés obtenus par Fiès et Castelao-Gegunde (donc avec une porosité structurale égale approximativement à 8%) correspondent à l'application de pluies d'énergie cinétique totale de 70 J m⁻². Or, dans sa thèse, Gallardo-Carrera (2006) a mis en évidence le rôle seuil des 5 mm de pluie cumulée pour parvenir au premier stade de croûte, ce qui correspond effectivement, pour les pluies utilisées dans ces travaux, à une énergie cinétique totale de 60 J m^{-2} à 70 J m^{-2} environ. En conclusion, dans le simulateur, une cellule est considérée comme faisant partie de la croûte si sa porosité structurale est inférieure à un seuil dont la valeur par défaut est fixée à 8%. La valeur de porosité structurale d'une cellule est calculée comme la différence entre la porosité courante et la porosité texturale de la cellule, déterminées à partir de ses densités courante et texturale (voir section 6.2.3.2) par l'équation (6.38).

7.2.2.2 Types de croûte

Une différence majeure entre une croûte structurale et une croûte sédimentaire est la présence, dans la seconde, d'un tri granulométrique (Bresson et Boiffin, 1990). Il nous a donc semblé intéressant de chercher à voir s'il était possible de discriminer les deux types de croûtes dans les données produites par le simulateur au moyen de ce critère.

Il est difficile de traduire mathématiquement la notion de tri granulométrique. Le choix que nous avons fait est d'utiliser l'amplitude de la différence avec la granulométrie imposée par le détachement et connue *a priori* (test de stabilité) : les zones où cette différence sera importante seront les zones où la granulométrie initiale aura été la plus modifiée par les processus. Nous utilisons cette différence de deux façons : soit par classe de particules, montrant alors, à l'instant t de la simulation et pour la classe de particules i, un écart relatif et signé $\delta_G(i,t)$ avec le pourcentage du détachement original, soit par un critère synthétique, la « signature granulométrique » $\Delta_G(t)$ d'une cellule, qui est simplement la somme des valeurs absolues de ces différences.

$$\delta_G(i,t) = \frac{P_i(t) - P_i(0)}{P_i(0)}$$
(7.2)

$$\Delta_G(t) = \sum_{i=0}^{N_c} |P_i(t) - P_i(0)|$$
(7.3)

La discrimination entre cellules des zones de croûte structurale et des zones de croûte sédimentaire sera alors dépendante de la position de leur signature granulométrique par rapport à Ω_G , seuil à partir duquel les particules sont considérées comme triées. Nous verrons dans la section 7.5.2.5 comment varie, dans un exemple de résultat de simulation, la répartition des types de croûte selon la valeur choisie pour Ω_G .

7.3 Choix et observations préliminaires

7.3.1 Résolutions temporelle et spatiale

7.3.1.1 Ruissellement sur terrain plan

Le modèle de ruissellement est très sensible au pas de temps, qui va conditionner la convergence de la solution. Par ailleurs, compte tenu de la rapidité des transferts par ruissellement et de la taille très réduite des cellules, ce pas de temps est très faible en général, et c'est lui qui va imposer le pas de temps utilisé pour l'ensemble du simulateur. Nous avons testé la convergence de l'algorithme de ruissellement sur un cas simple. Nous avons utilisé un terrain plat de $30 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ présentant une pente uniforme de 5%. L'infiltration est inhibée de manière à simuler un sol imperméable. Le terrain est soumis à une pluie de $30 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ pendant $30 \,\mathrm{s}$, et le débit à l'exutoire est enregistré à chaque itération. Le débit à l'exutoire peut être utilisé comme un critère de convergence de l'algorithme de ruissellement. En effet, l'hydrogramme se découpe théoriquement en trois phases : une partie croissante, une partie en plateau correspondant à un régime permanent, le débit étant égal alors à l'intensité de la pluie, et enfin quand la pluie est arrêtée, une partie décroissante qui va tendre vers 0. Cette expérience a été réalisée avec un 8-voisinage (voisinage de Moore) à des pas de temps différents, de 5 à 40 ms. La figure 7.8 montre que les courbes convergent à partir de 20 ms, ce pas d'itération peut donc être retenu comme donnant une simulation correcte dans ce cas. Nous avons procédé à une deuxième série de tests, avec un 8-voisinage aléatoire (voir section 6.3.1.4), les résultats obtenus sont identiques et donc confirment la possibilité d'employer un pas de 20 ms. Il est intéressant de noter que ce pas de temps est très proche de celui donné par la condition de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), utilisable en 1D ou pour des cas simples en 2D. Cette condition s'écrit :

$$\Delta t < \min\left(C_n \; \frac{\Delta x, \; \Delta y}{u, \; v + \sqrt{g H_w}}\right) \tag{7.4}$$

où Δx , Δy sont les pas d'espace selon deux directions orthogonales, u, v les vitesses selon ces mêmes directions, et C_n le nombre de Courant qui vaut 1 en théorie (en pratique on prend souvent une valeur légèrement inférieure à 1).



FIGURE 7.8 – Comparaison des débits à l'exutoire pour différents pas de temps.

7.3.1.2 Ruissellement sur topographie naturelle

Ainsi que l'avait noté Léonard (2000), dans le cas d'une topographie naturelle, il y a une augmentation notable de la contrainte sur le pas de temps qui devient plus stricte que la condition CFL. Sur un terrain complexe, tel que la topographie provenant de la numérisation du sol reconstitué ayant servi à l'expérience sous simulateur de pluie (voir section 7.5.1), il convient donc d'évaluer avant toute simulation la valeur maximale du pas de temps assurant la convergence. À cette fin, nous utilisons le critère du débit à l'exutoire puisque le terrain avait été placé de manière à offrir une pente principale très marquée.

Nous avons donc utilisé le MNT obtenu après l'expérience de simulation de pluie (2 mm de résolution) de manière à pouvoir considérer que l'état du terrain permettait le ruissellement. Nous avons simulé une pluie correspondant à une intensité de 9 mm h⁻¹, pendant 3 min, avec différents pas de temps. En observant les résultats reproduits figure 7.9(a) et en gardant comme critère la convergence des courbes, il apparaît effectivement que la convergence des courbes n'est pas visible à 5 ms, et qu'il faut plus vraisemblablement descendre au moins à 2 ms pour considérer que les courbes correspondant aux pas de temps inférieurs sont suffisamment proches. Nous vérifions donc qu'une topographie complexe impose sur le pas de temps une contrainte plus sévère. Nous avons également vérifié qu'un pas spatial plus grand permettait de relâcher un peu la contrainte sur le pas de temps. Ainsi, la même expérience sur le même terrain, mais avec une résolution de 5 mm obtenue par krigeage, nous montre que la convergence apparaît plutôt vers 10 ms (figure 7.9(b)).



FIGURE 7.9 – Simulation de ruissellement sans infiltration sur le terrain en fin de simulation, à différents pas de temps et sous une pluie de $9 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$.

7.3.1.3 Influence de la résolution spatiale

Nous avons étudié l'influence de la résolution sur la vitesse de l'eau sur une pente simple imperméable de 5%, en variant la résolution, le pas de temps et le coefficient de friction. Pour mesurer la vitesse de l'eau sur une pente, nous plaçons une quantité importante de particules dans le flux en haut de la pente, en leur interdisant de se déposer, et en relevant en bas de la pente la concentration en sédiment : le pic de concentration est l'indicateur que les particules sont parvenues en bas de la pente, et donc permet d'en déduire leur vitesse. La figure 7.10 ne reproduit les résultats que pour un seul pas de temps ($\Delta t = 10 \text{ ms}$) car les deux autres pas de temps utilisés ($\Delta t = 1 \text{ ms et } \Delta t = 50 \text{ ms}$) ont donné exactement les mêmes pics de concentration. Nous constatons sur cette figure une influence normale du coefficient de friction, qui ralentit l'écoulement, et aucune influence du changement de résolution, les pics de concentration étant quasi-parfaitement alignés.



FIGURE 7.10 – Comparaison de l'influence de la résolution sur le temps de parcours des particules sur une pente simple avec trois valeurs de coefficient de friction.

7.3.2 Vérifications

Outre les reproductions d'expériences réelles qui ont servi également à vérifier les implémentations des divers processus, nous avons procédé explicitement et systématiquement à la vérification de la conservation de la matière et de l'eau. L'un des avantages d'une modélisation par automate cellulaire est qu'elle permet une gestion explicite de la conservation de la masse, ainsi qu'une comptabilité précise, à chaque itération, des différents constituants des cellules. Nous avons ainsi pu vérifier à chaque expérience virtuelle que la quantité d'eau apportée par la pluie était bien intégralement transformée soit en eau de surface, soit en eau infiltrée, en tenant compte de l'eau transmise aux exutoires. La conservation du sol est plus délicate à mettre en place, puisqu'en plus de la matière indissociée et des particules présentes dans les cellules, il faut tenir compte non seulement des particules projetées par le splash ou emportées par le ruissellement dans les exutoires, mais encore de la matière qui disparaît avec les cellules supprimées en bas d'une colonne, lorsque l'apport de particules en surface demande la création d'une nouvelle cellule (voir section 5.3.2). Une fois ces diverses quantités prises en considération, il apparaît que la conservation de la masse est bien assurée par le simulateur : les courbes des quantités de pluie et d'eau, ainsi que les courbes de matière initiale et de matière présente dans le volume se superposent parfaitement. Une analyse plus fine montre de très légères variations : la figure 7.11 montre les différences relatives entre ces quantités, calculées au cours d'une longue simulation (120 min de pluie suivies de 20 min sans pluie) sur une topographie naturelle, avec deux résolutions différentes (5 mm et 10 mm) : les très faibles écarts relatifs enregistrés (toujours inférieurs en valeur absolue à 12×10^{-12}) peuvent sans doute être considérés comme dus aux imprécisions numériques provoquées par l'emploi de nombres à virgule flottante.



FIGURE 7.11 – Différences constatées lors de deux simulations, avec deux résolutions différentes, entre d'une part les quantités de pluie et d'eau infiltrée et ruisselée, et d'autre part la matière initiale et la matière présente dans le terrain virtuel. Ces différences tiennent compte de l'eau et des particules exportées en dehors du terrain et recueillies par les exutoires.

7.3.3 Temps d'exécution

7.3.3.1 Bilans

Le facteur prépondérant pour le temps d'exécution d'une simulation est évidemment le nombre de cellules contenues dans le terrain. Deux dimensions interviennent dans la détermination du nombre de cellules : la surface du terrain et sa profondeur. La figure 7.12(a) montre l'influence respective de la surface d'un terrain (carré), et du nombre de couches de cellules de ce terrain, sur la durée réelle d'une itération (moyenne établie sur une simulation de 5 min). Les relations sont quasi-linéaires, et si elles sont calculées sur le critère commun du nombre de cellules, comme pour la figure 7.12(b), leurs pentes respectives montrent qu'il est plus coûteux en temps d'agrandir le côté du terrain que de lui ajouter des couches de cellules. Comme le coût de l'ajout d'une couche dépend *a priori* également de la surface du terrain (plus cette surface est grande, plus le nombre de cellules ajoutées par une couche augmente), nous avons fait le même test d'augmentation de profondeur avec une surface quatre fois plus grande : la pente est sensiblement identique (7.12(b), courbe orange), ce qui confirme la prépondérance de la surface. Nous avons également procédé à un test d'augmentation de la surface sur une profondeur dix fois plus importante, et cette fois la pente est considérablement accentuée (7.12(b), courbe verte). Pour économiser du temps de calcul, il est donc important de bien dimensionner la surface du terrain, mais sans négliger de limiter également sa profondeur au minimum.



FIGURE 7.12 – Influence de la surface du terrain et de sa profondeur sur le temps de calcul nécessaire à une itération lors d'une simulation.

Nous avons vérifié l'influence, moins importante, d'un autre facteur sur le temps de calcul d'une simulation : celle de l'intensité de la pluie (figure 7.13). Cette influence de l'intensité de la pluie s'exerce de manière complexe, mais toujours dans le même sens : lorsqu'il y a plus de gouttes de pluie dans le même temps, il y a plus de splash, plus de ruissellement, et plus d'infiltration à calculer, cela fait donc croître le temps nécessaire à une itération.

Processus	Pourcentage
Pluie	2.8
Détachement	0.1
Projection	0.6
Infiltration	4.0
Ruissellement	57.8
Mobilisation-Dépôt	32.0
Transport	1.9

TABLEAU 7.1 – Répartition du temps de calcul entre les processus.



FIGURE 7.13 – Influence de l'intensité de la pluie sur un terrain plat sur le temps de calcul nécessaire à une itération lors d'une simulation.

Enfin, nous avons étudié comment le temps de calcul d'une itération évoluait au long de cette simulation. La figure 7.14(a) montre cette évolution pour un terrain plat de $25 \times 25 \times 5$ cellules, avec une pluie de $20 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ pendant 120 min et un pas d'itération de 15 ms. La figure 7.14(b) montre cette évolution pour la même expérience, mais sur le terrain naturel de $114 \times 112 \times 5$ cellules. Dans les deux cas, le temps de calcul nécessaire à une itération tend vers une limite supérieure qui est environ le double du temps de départ, ce qui peut s'expliquer par le fait que de plus en plus de cellules participent au ruissellement, grand consommateur de temps (voir tableau 7.1), ce que confirme la décroissance brutale observée lors de l'arrêt de la pluie.



FIGURE 7.14 – Évolution du temps de calcul d'une itération durant une simulation.

À cause de l'importance du temps de calcul nécessaire à une simulation d'une durée correspondante aux expériences sous simulateur de pluie (entre 7 et 9 fois le temps simulé pour une résolution de 5 mm, entre 1.5 et 2 fois le temps simulé pour une résolution de 10 mm), nous avons expérimenté un modèle bi-résolution permettant de garder un temps de calcul raisonnable tout en améliorant la résolution du terrain, et la prochaine section est consacrée à une description sommaire de ce modèle.

7.3.3.2 Modèle bi-résolution

Le principe du modèle bi-résolution est de partager en deux familles les processus : ceux qui peuvent être traités à l'échelle centimétrique (macro-résolution), et ceux qui nécessitent une échelle millimétrique (micro-résolution). Les cellules de terrain ont ainsi une section carrée d'aire égale à 1 cm^2 , et deux cartes de hauteur supplémentaires sont ajoutées, qui ont une résolution de 2 mm : une carte de l'altitude du terrain, et une carte de l'épaisseur de la lame d'eau. Le tableau 7.2 résume comment se répartissent les actions des différents processus entre les deux résolutions. Ainsi la pluie affecte la carte de hauteur de l'eau de surface en micro-résolution, et la projection par le splash change la carte d'altitude du terrain en micro-résolution.

Processus	Changements en macro-résolution	Changements en micro-résolution
Pluie	Hauteurs d'eau en surface Énergie cinétique cumulée	\leftarrow Hauteurs d'eau
Détachement	Matière et particules des cellules	
Projection	Particules des cellules et dans le flux	Altitudes
Infiltration	Hauteurs d'eau en surface Eau des cellules	\rightarrow Hauteurs d'eau
Ruissellement	Hauteurs d'eau en surface	\rightarrow Hauteurs d'eau
Mobilisation et dépôt	Particules des cellules et dans le flux	
Transport	Particules dans le flux	
$R\acute{e}partition$		\rightarrow Altitudes

TABLEAU 7.2 – Répartition des actions des processus entre les deux résolutions.

La dernière ligne du tableau ajoute un processus de répartition des altitudes, qui est obligatoire pour que le relief en micro-résolution prenne en compte les changements opérés dans les cellules en macro-résolution. Cette répartition doit donc répercuter un changement d'altitude qui affecte une aire de 1 cm² sur des cellules 25 fois moins grandes. Afin d'éliminer toute apparition d'artefacts due à la grille orthogonale, une zone de répartition circulaire est décidée à chaque itération pour chaque macro-cellule, dont le centre et le rayon sont tirés aléatoirement, et seules les micro-cellules à l'intérieur de cette zone sont concernées par l'algorithme de redistribution de la matière ajoutée (ou enlevée) de la macro-cellule correspondante. Cet algorithme distribue préférentiellement une partie de la matière ajoutée dans les cellules les plus basses de manière à ne pas écraser le micro-relief (dans le cas de matière enlevée, de manière symétrique, l'algorithme aplanit préférentiellement les sommets). La conservation de la quantité de matière est assurée entre les deux grilles. Les figures 7.15 et 7.16 montrent des résultats visuels obtenus par ce modèle.

Le modèle bi-résolution a été abandonné car nous nous sommes heurtés à un problème que nous n'avons pas réussi à résoudre en respectant nos objectifs de gain de temps. En effet, autant nous sommes parvenus à un algorithme de répartition de la matière efficace et pertinent aussi bien visuellement que quantitativement, autant la répartition de l'eau entre la macro-



FIGURE 7.15 – Évolution d'un terrain avec le modèle bi-résolution pendant une simulation d'une heure sous une pluie de $30 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$.

grille et la micro-grille, nécessaire pour l'infiltration et le ruissellement (voir tableau 7.2), n'a jamais pu être assurée d'une manière satisfaisante, sauf dans certains cas simples où le flux est parvenu à l'équilibre en formant des flaques (voir par exemple l'image reproduite figure 7.5(c)). Dans de nombreux cas, des aberrations apparaissent (de l'eau sur des microcellules qui appartiennent à une macro-cellule sans eau de surface) qui n'ont pu être totalement supprimées, dans la mesure où la méthode choisie devait également être suffisamment rapide pour être appliquée à chaque itération, ce qui a écarté quelques possibilités de solution.



FIGURE 7.16 – Évolution d'une cuvette soumise pendant une heure à une pluie intensive (300 mm h^{-1}) avec le modèle bi-résolution.

7.4 Exploration et tests par processus

7.4.1 Pluie

7.4.1.1 Couverture du terrain

Nous avons étudié le comportement de notre pluie simulée pour juger si la répartition aléatoire des gouttes était suffisamment uniforme, autrement dit si toutes les cellules de surface finissaient bien par être arrosées par la pluie, cela afin de respecter les observations faites au cours des expériences de simulateur de pluie, à savoir qu'en quelques minutes il n'existe plus de zones sèches. La figure 7.17 permet de constater que le simulateur reproduit bien ce délai de quelques minutes, ce délai étant beaucoup plus court pour la distribution naturelle des gouttes de pluie que pour la distribution correspondant au simulateur de pluie de Laon. Cette différence s'explique facilement par le plus grand nombre de petites gouttes produites par la première distribution par rapport à la seconde, pour l'intensité de pluie considérée, à savoir $30 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$ (voir figure 6.1). Visuellement, cet écart est très perceptible (figure 7.18).



FIGURE 7.17 – Comparaison du pourcentage de cellules mouillées en fonction du temps, entre la distribution de tailles de gouttes du simulateur de Laon et une distribution naturelle gamma.



FIGURE 7.18 – Étude de la couverture du terrain par la pluie aléatoire. En haut : distribution correspondant au simulateur de pluie de Laon ; en bas : distribution naturelle selon une loi gamma. Le ruissellement est désactivé, l'intensité de bleu correspond à la hauteur d'eau présente sur une cellule.

La figure 7.19(a) montre que le temps demandé pour arroser toutes les cellules du terrain dépend fortement de l'intensité de la pluie, résultat tout à fait comparable à ce qui se produit dans la nature. Étant donné que la distribution des tailles de gouttes dépend également de l'intensité de la pluie, il n'y a pas de relation simple entre ce temps et l'intensité de la pluie. La figure 7.19(b) montre qu'il existe une dépendance à la résolution des cellules choisie à l'initialisation : plus les cellules ont une aire importante, plus vite elles sont toutes atteintes par une goutte de pluie, ce qui est également peu surprenant. Enfin, nous avons vérifié également que la gestion de la pluie sous forme d'évènements externes induisait une indépendance totale au pas de temps choisi pour le simulateur (tous les autres paramètres étant égaux, les courbes se superposent exactement si le pas de temps varie).



FIGURE 7.19 – Illustration de la dépendance du pourcentage de cellules mouillées à l'intensité de la pluie (a) et la taille des cellules (b).

7.4.1.2 Respect d'un hyétogramme

Pour vérifier le respect d'un hyétogramme par notre générateur de pluie, nous avons utilisé le hyétogramme spécifié par Servat (2000, p. 78) et reproduit dans le tableau 7.3. Nous avons calculé les hauteurs de pluie cumulée théoriques atteintes à chaque changement d'intensité et comparé ces valeurs à la courbe de pluie cumulée enregistrée pendant une simulation utilisant le hyétogramme défini par le tableau 7.3. La figure 7.20 montre que ces valeurs se retrouvent parfaitement sur cette courbe, et que donc la pluie simulée respecte parfaitement le hyétogramme imposé.



FIGURE 7.20 – Vérification du respect d'un hyétogramme (en vert) par le générateur de pluie. La courbe bleue correspond à la pluie cumulée pendant la simulation utilisant ce hyétogramme. Les flèches rouges indiquent la hauteur de pluie cumulée théoriquement atteinte à chaque changement d'intensité.

Durée (min)	5	1	4	5	5	15	25
Intensité $(mm h^{-1})$	22.2	106.8	82.8	66.6	42.6	37.2	22.2

TABLEAU 7.3 – Exemple de hyétogramme imposé à l'étape d'initialisation du simulateur.

7.4.1.3 Vitesse

La section suivante est consacrée au détachement et à la projection, au moyen de la comparaison des résultats obtenus par Furbish et coll. (2007), mais nous avons également utilisé ce travail pour une confirmation de la justesse du calcul de vitesse. En effet, dans leur article, Furbish et coll. font tomber des gouttes de différents diamètres d'une hauteur de 5 m et ils ont obtenu une estimation précise de la vitesse au point d'impact par l'étude d'images successives prises par une caméra à grande vitesse. Nous avons fourni au simulateur les mêmes paramètres de diamètre et de hauteur de chute, et le tableau 7.4 montre une bonne correspondance entre les mesures expérimentales et l'estimation produite par le simulateur.

D	$2\mathrm{mm}$	$3\mathrm{mm}$	$4\mathrm{mm}$
Furbish et coll.	$6.2 \\ 6.125$	7.2	7.6
Simulateur		7.201	7.735

TABLEAU 7.4 – Comparaison de la vitesse à l'impact de gouttes de trois diamètres différents, mesurée expérimentalement par Furbish et coll. (2007) et estimée par le simulateur (en $m s^{-1}$).

7.4.2 Détachement et projection

Nous avons déjà évoqué les expériences de Furbish et coll. (section 6.2.2.2). Ces expériences utilisent des gouttes d'eau lâchées une par une, par une seringue qui en détermine le diamètre. d'une hauteur de 5 m sur une cible (figure 7.21(a)) constituée d'un trou circulaire de 2.5 cm de diamètre et de 2 cm de profondeur, percé dans un bloc de bois et empli de grains de sable d'une taille donnée (figure 7.21(b)). Trois séries d'expériences ont été menées. La première utilise une caméra grande vitesse (500 images par seconde) pour étudier les impacts de goutte et les trajectoires des grains projetés. Pour les deuxième et troisième séries d'expériences, un papier collant avec un trou de 2 cm environ de diamètre centré sur la cible a permis de recueillir les grains de sable projetés, qui ont été ensuite photographiés. La deuxième série concerne la projection sur un plan horizontal, avec entre deux à dix gouttes d'eau à chaque expérience, réparties en trois tailles de gouttes (2 mm, 3 mm et 4 mm) et pour trois tailles de grain (0.18 mm, 0.35 mm et 0.84 mm). La troisième série concerne la projection sur un plan incliné, en utilisant six angles différents avec des gouttes de 3 mm de diamètre et des grains de sable de 0.35 mm. Ces expériences ont permis d'établir des fonctions de distribution de la distance et de l'angle de projection en fonction de la pente locale que nous utilisons. Nous avons voulu reproduire dans le simulateur les deuxième et troisième séries d'expériences de manière à en comparer les résultats.

L'initialisation du simulateur a été spécifique pour les points suivants : pas de correction de la vitesse par la hauteur de la lame d'eau (ce qui n'a aucun sens dans cette expérience puisque l'eau est infiltrée ou projetée tout de suite), une seule classe de particules correspondant à caméra grande vitesse (cou-

verte d'une serviette).



(b) La cible de sable à l'instant de l'impact d'une goutte d'eau.

FIGURE 7.21 – Images des expériences de Furbish et coll. (2007).

la taille des grains utilisée, un nombre maximal de cibles pour les particules projetées (soit une cible par particule), et une définition de la distance moyenne de projection par classe (respectivement 35, 20, 20 mm pour les grains de 0.18, 0.35 et 0.84 mm). Enfin, la pluie (en l'occurrence la chute d'un nombre précis de gouttes les unes après les autres) a été circonscrite au disque représentant la cible – et non uniquement à son centre car Furbish et coll. font remarquer que le point d'impact de certaines gouttes ne coïncide pas avec le centre de la cible, nous avons donc laissé un tirage aléatoire uniforme du point d'impact dans l'aire de la cible. Il faut ajouter que pour la première taille de goutte (2 mm), l'énergie cinétique se trouve en dessous du seuil d'énergie cinétique Ke_0 de la formule du calcul de détachement (6.17), empêchant tout détachement et donc toute projection : nous avons donc fixé ce seuil à 0 (au lieu de 0.1) pour cette taille de goutte.

La figure 7.22 présente la comparaison de la visualisation des résultats des expériences réelles et simulées. Il apparaît que les images sont très comparables, avec la nuance que les « grains de sable » visibles dans nos images sont en fait les cellules de surface contenant au moins un grain de sable, la résolution étant donc celle de ces cellules, soit pour ces simulations, 2 mm de côté. La distribution symétrique des grains sur un plan horizontal est respectée, avec une répartition des distances de projection très comparable à la réalité. Quantitativement, la simulation reproduit la variation du nombre de grains projetés en fonction à la fois de la taille de la goutte et de celle des grains de sable, et la figure 7.23 montre que les nombres obtenus par simulation sont assez proches des nombres réels, avec en général une surestimation pour la simulation (sauf pour le couple 0.18 mm, 2 mm, à savoir les grains les plus fins et la plus petite goutte). Il est important de préciser que le nombre de grains pris en compte est bien celui retourné par notre calcul de masse détachée par les gouttes, et non le nombre qui pourrait être établi à partir de l'analyse des images de projection.

La troisième expérience ne fait intervenir qu'une seule taille de grain de sable et qu'un diamètre de goutte, le but étant d'étudier l'influence de la pente sur la distribution spatiale



FIGURE 7.22 – À gauche, résultats de la deuxième série d'expériences de Furbish et coll., et à droite, résultats de la simulation dans les mêmes conditions. Dans chaque tableau, la taille des gouttes va croissant de haut en bas (2, 3, 4 mm) et la taille des grains va croissant de gauche à droite (0.18, 0.35, 0.84 mm). Le couple (2 mm, 0.84 mm) n'est pas représenté dans les résultats réels car aucun grain n'a pu être projeté (donc photographié et compté) en dehors du trou. Les rayons des deux cercles indiqués sont de 10 et 20 cm.



FIGURE 7.23 – Comparaison du nombre de grains projetés entre les expériences de Furbish et coll. et des simulations dans les mêmes conditions.

des projections. Nous pouvons observer, aussi bien pour les images réelles que celles obtenues par simulation (figure 7.24), une asymétrie croissant avec la pente et dans la direction de celle-ci. Pour mettre plus en évidence cette asymétrie, le centre de gravité de la totalité des grains a été calculé et matérialisé par un disque blanc pour les images réelles et par un disque cyan pour les images de la simulation, et leur déplacement par rapport au centre de la cible est dans chaque cas très comparable.



FIGURE 7.24 – À gauche, résultats de la troisième série d'expériences de Furbish et coll., et à droite, résultats de la simulation dans les mêmes conditions. La taille des grains de sable est 0.35 mm et le diamètre des gouttes 3 mm, l'angle de la pente variant de 0° à 30°. Les rayons des deux cercles indiqués sont de 10 et 20 cm.

7.4.3 Infiltration et ruissellement

7.4.3.1 Comparaison visuelle des modèles d'infiltration

La figure 7.25 permet de comparer visuellement les trois modèles d'infiltration qui ont été implémentés dans le simulateur. Ce test a été mené sous une pluie aléatoire de 30 mm h^{-1} et sur sur un terrain plat ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$), le ruissellement étant inhibé. Une différence très nette s'établit entre les modèles 1D verticaux (voir les images des deux premières rangées de la figure 7.25) et le modèle 3D (troisième rangée de la figure) dans la répartition horizontale des volumes d'eau infiltrés, le modèle 3D permettant une répartition beaucoup plus homogène. La visualisation des 8 premières secondes de simulation reproduites figure 7.26 montre que cette répartition est également très rapide. Pour une simulation donnant une priorité à l'infiltration, ce modèle semble donc le plus approprié. Cependant, une itération a demandé environ 258.3 ms pour le modèle 3D, contre seulement 3.3 ms pour le modèle de Green et Ampt et 3.6 ms pour le modèle sol-croûte (celui-ci devant fonctionner en plus avec la création de particules qui ajoute un peu de temps de calcul). La comparaison de ces temps de calcul, pour ce test, justifie bien dans notre cas d'étude le choix d'un modèle plus simple.

7.4.3.2 Comparaisons avec une solution de référence

a) Infiltration

Les résultats produits par notre modèle d'infiltration à automate cellulaire 3D ont été comparés à des résultats obtenus grâce à une solution numérique des équations de Richards (figure 7.27). La situation étudiée correspondait à celle d'un sol limoneux d'une teneur en eau initiale homogène de $15 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ et soumis à une charge nulle constante pendant une heure. Les volumes infiltrés sont très comparables (22 mm contre 22.8 mm dans la solution de référence), et on peut constater que l'évolution du profil hydrique est bien simulée par notre modèle d'infiltration 3D.



FIGURE 7.25 – Visualisation volumique de l'infiltration, sous une pluie aléatoire de 30 mm h^{-1} , sur un terrain plat ($20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$) vu de dessus, simulée par trois modèles. De haut en bas : Green et Ampt 1D, modèle sol-croûte 1D, automate cellulaire 3D. Temps de gauche à droite : 10 s, 20 s, 30 s, 40 s, 50 s, 1 min 20 s, 2 min, 3 min 20 s.



FIGURE 7.26 – Visualisation volumique des 8 premières secondes d'infiltration modélisée par automate cellulaire 3D, sous une pluie aléatoire de $30 \,\mathrm{mm}\,\mathrm{h}^{-1}$, sur un terrain plat $(20 \,\mathrm{cm} \times 20 \,\mathrm{cm} \times 4 \,\mathrm{cm})$ vu de dessus.



FIGURE 7.27 – Comparaison entre une solution de référence (équation de Richards, en pointillés rouges) et notre algorithme de report 3D : profil hydrique en fin de simulation (a), flux d'infiltration en fonction du temps (b).

b) Ruissellement

Une comparaison entre des résultats donnés par le modèle de ruissellement et une solution de référence a été effectuée grâce à une solution numérique des équations de Saint Venant, sur une pente moyenne de 5 % incluant une dépression, une pluie de 30 mm h^{-1} et un coefficient de friction égal à 10. La comparaison a porté sur l'hydrogramme en sortie de domaine et sur le profil de hauteur d'eau (figure 7.28). Ces figures permettent de constater que le débordement de flaque est bien géré par notre algorithme de ruissellement, et que la solution obtenue est proche de celle calculée à l'aide des équations de Saint Venant.



FIGURE 7.28 – Comparaison entre une solution de référence (équation de Saint-Venant, en pointillés rouges) et notre algorithme de report : hydrogramme (a), profil en long en fin de simulation (b).

7.4.3.3 Hauteur d'eau

Sur un plan incliné, en imposant un débit constant en haut de la pente, il s'établit après un certain temps un régime permanent dont il est possible de calculer les paramètres, notamment la hauteur d'eau moyenne \overline{h} en fonction du débit unitaire Q sur la pente, par la formule suivante :

$$\overline{h} = \sqrt[3]{\frac{f\,Q^2}{8\,g\,S}} \tag{7.5}$$

avec f le coefficient de friction de Darcy-Weisbach, g l'accélération de la gravité et S la pente. Nous avons utilisé un terrain (virtuel) de 1 m de long sur 10 cm de large, avec une valeur de coefficient de friction de 10, avec deux pentes différentes (2.24 % et 4.08 %) et deux débits en amont différents (0.133 cm² s⁻¹ et 0.179 cm² s⁻¹). Nous avons ajouté à cet apport constant d'eau une pluie aléatoire d'intensité 30 mm h⁻¹. Les résultats, représentés figure 7.29, donnent les valeurs attendues pour la hauteur d'eau, soit entre 1 mm en amont et 1.38 mm en aval pour le premier cas, et entre 1 mm en amont et 1.29 mm en aval pour le second cas (la différence de hauteur d'eau entre l'amont et l'aval provient de l'accumulation de la pluie), et traduisent donc un comportement correct du modèle de ruissellement.



FIGURE 7.29 – Représentation de trois instants de la phase d'équilibrage du ruissellement, pour deux pentes différentes (2.24% pour les figures (a,b,c) et 4.08% pour les figures (d,e,f), avec un flux constant en amont et une pluie aléatoire. La surface bleue correspond au profil de la lame d'eau, la surface grise au terrain. Leurs altitudes se rapportent à l'axe gauche des figures, en cm. La ligne pointillée rouge représente l'épaisseur de la lame d'eau en fonction de la distance et se rapporte à l'axe droit des figures, en mm.

7.4.4 Contraintes et transport

7.4.4.1 Transport dans un canal

Nous avons procédé à une expérience de transport dans un canal rugueux à pente uniforme, avec du sable grossier (entre 1 et 2 mm de diamètre, soit 1.414 mm de diamètre moyen, ce qui correspond à la dernière classe de particules pour le simulateur) et un débit d'eau en amont constant. Nous avons observé le comportement des grains pour trois pentes différentes du canal, donc pour trois hauteurs d'eau et trois rapports H_w/D différents, et à chaque fois nous avons constaté que les grains se trouvaient à la limite du mouvement (*incipient motion*). Nous en avons déduit que la contrainte hydraulique dans ces conditions était très proche de la contrainte critique.

Partant de la contrainte critique obtenue pour la pente la plus faible, qui est très proche du cas limite $H_w/D = 1$, nous avons évalué quelles seraient les contraintes critiques calculées par notre modèle pour les deux autres pentes (voir section 6.3.2). La comparaison de ces résultats avec les valeurs mesurées (voir le tableau 7.5) indique que notre modèle simule une stagnation ou une diminution de τ_c avec la pente au lieu d'une augmentation, l'effet gravitaire dominant fortement. Certaines de nos observations ont cependant montré que l'effet de la gravité semblait limité, et ce même au delà de l'angle de repos. Cet effet est peut-être surestimé dans le cas où H_w/D est inférieur ou égal à 1 comme dans nos expériences. Si nous ne considèrons pas l'effet de la gravité, nous obtenons bien une augmentation de la contrainte

Pente (%)	H_w (mm)	H_w/D	$\begin{aligned} \tau &\approx \tau_c \\ \text{(Pa)} \end{aligned}$	$\tau_c \times F^+ \times F^-$ (Pa)	$\begin{array}{c} \tau_c \times F^+ \\ \text{(Pa)} \end{array}$
8.9	1.40	0.99	1.22		
$17.8 \\ 35.6$	$1.14 \\ 0.93$	$\begin{array}{c} 0.81 \\ 0.66 \end{array}$	$2.0 \\ 3.27$	$1.37 \\ 1.04$	$1.67 \\ 2.21$

critique avec la pente, mais qui reste inférieure aux mesures. Nous avons donc dans tous les cas une sous-estimation de la contrainte critique, cette sous-estimation étant une confirmation de l'importance de l'effet limitant de la pente sur la mobilisation des grains.

TABLEAU 7.5 – Résultats de l'expérience de transport dans un canal rugueux.

7.4.4.2 Transport le long d'une pente

Une expérience virtuelle de transport le long d'une pente a permis de mettre en évidence l'apparition de chemins préférentiels d'écoulement de l'eau. Nous avons créé un terrain constitué de trois pentes, (10%, 40% et -5%), et nous avons simulé une pluie de 30 mm h^{-1} sur la première portion du terrain, en inhibant la projection par le splash, de manière à isoler les effets du transport par le ruissellement. Évidemment, de telles conditions expérimentales seraient très difficiles à reproduire en laboratoire. Les chemins creusés au sein des amas de particules sont très visibles dans la figure 7.30. La figure 7.31 permet de visualiser les quantités de particules transportées à différents moments de la simulation. Il faut préciser qu'il s'agit de visualisation volumique, et que ce qui est montré est le contenu des cellules, contenu limité en l'occurrence aux volumes des particules contenues dans la cellule. Il n'y a donc pas de différence visuelle entre les petites et les grosses particules. Le résultat de la figure 7.30(d) est à rapprocher du travail de Favis-Mortlock et coll. (2000) montrant la formation de rigoles sur une pente (voir par exemple la figure 4.14) : notre modèle est donc, comme celui de Favis-Mortlock et coll., capable de faire émerger au cours d'une simulation un comportement non explicitement prévu.



FIGURE 7.30 – Illustration de l'expérience virtuelle sur un terrain constitué de trois pentes, avec désactivation du splash et pluie limitée à la première pente. La figure (c) montre une vue de la pente principale, et la figure (d) la carte de hauteur correspondante.

Nous avons poussé plus avant cette expérience pour analyser le rôle de la pluie et du splash associé sur la création ou non de rigoles. Nous avons créé un volume de particules par une



FIGURE 7.31 – Visualisation volumique des particules créées par la pluie et transportées par le ruissellement.

pluie virtuelle sur une pente de 7.5 % et de 50 cm de côté. Nous avons ensuite procédé à deux simulations de 1 h, la première en faisant couler de l'eau à débit constant à partir du haut de la pente, correspondant à une intensité de pluie de 30 mm h^{-1} , la seconde en faisant tomber sur la pente une pluie de même intensité, en inhibant le détachement par le splash pour éviter la création de nouvelles particules, mais pas la projection des particules existantes. La figure 7.32 permet de constater l'émergence d'un comportement différent selon la présence de projection ou non par les gouttes de pluie : dans le premier cas seulement, en l'absence de cette projection, il y a apparition de rigoles. Ce résultat est en accord avec le travail de Moss et coll. (1979) qui ont montré que l'impact des gouttes de pluie sur une faible pente recouverte d'une lame mince d'eau tend à supprimer la formation de rigoles et à favoriser l'érosion diffuse. Cela prouve que le simulateur est capable d'induire des comportement qualitativement différents – et conformes à l'observation – sans que ceux-ci n'aient été explicitement définis. C'est aussi une manière de démontrer, par la simulation, que le splash joue un rôle clé dans l'apparition ou non de rigoles dans les conditions prévalant en amont.



FIGURE 7.32 – Émergence d'un comportement différent (apparition ou non de rigoles) selon la provenance de l'eau de ruissellement : débit constant en haut de la pente (a-c) ou pluie sur tout le terrain (b-d). Les images (a-b) reproduisent les différences de hauteur du terrain entre le début et la fin de simulation, les images (c-d) sont une visualisation de la surface du terrain et de l'eau.

7.5 Simulation complète de l'évolution d'un sol soumis à une pluie

7.5.1 Description de l'expérience réelle



FIGURE 7.33 – Dispositif expérimental : dans la figure de gauche les points d'insertion des 10 minitensiomètres sont visibles (A), la figure de droite montre le bac de splash (B) et les deux gouttières chargées de récupérer l'eau de ruissellement à l'exutoire et l'eau infiltrée (C).

De nombreux résultats de ce chapitre sont basés sur une expérience sous simulateur de pluie en laboratoire, réalisée en février 2008 à l'unité agronomie INRA de Laon. La figure 7.33 montre le dispositif expérimental utilisé. Un lit de semence prélevé sur le terrain, tamisé à 2 cm pour enlever les éléments les plus grossiers et séché à l'air, est placé dans un bac de 58 cm de côté permettant la récupération de l'eau drainée (infiltration) et de ruissellement (gouttière à l'aval, repère C dans la figure 7.33), avec une pesée en continu des quantités d'eau cumulées, à l'aide de balances permettant la mesure des flux d'infiltration et de ruissellement. Un tamisage est effectué au préalable pour obtenir la granulométrie des mottes. Le lit de semence d'une épaisseur de 7 cm est posé sur une couche de sable grossier. Une microtopographie (dépressions, chenal) est créée pour obtenir des conditions hydrauliques variées. Des cailloux, au nombre de quatre, sont insérés pour former des repères d'évolution de l'altitude par tassement mais pas par érosion (voir section 7.5.2.4). La topographie (initiale et finale) est mesurée à l'aide du rugosimètre laser (résolution horizontale de 2 mm et verticale de 0.01 mm), ce qui a fourni les MNT à partir desquels ont été calculés par krigeage des MNT à des résolutions de 5 et 10 mm utilisés pour les simulations virtuelles. Le sol a une teneur en eau initiale de 1.7 % et une masse volumique initiale de 950 kg m⁻¹. Ses propriétés hydrodynamiques (conductivité hydraulique, pression des forces de succion au niveau du front d'humectation) ne sont pas mesurées mais prises dans la littérature pour un lit de semence similaire (Desbourdes-Coutadeur, 2002).

Un bac de recueil du splash (repère B dans la figure 7.33) est disposé sur un côté avec 1 cm d'eau pour éviter la remobilisation des particules sous l'impact direct des gouttes. Dix mini-tensiomètres (repère A dans la figure 7.33) pour la mesure de la succion sous la croûte sont placés en différents endroits : dépression ou mont pour avoir des mesures sous croûtes structurales et sédimentaires. Le simulateur de pluie est réglé à une intensité constante de 28 mm h^{-1} , mais les vérifications donnent plutôt une intensité comprise entre 20 à 25 mm h^{-1} . La distribution des tailles de gouttes correspond à celle reproduite figure 6.1(a), la hauteur de chute est de 4.6 m. Pendant l'expérience, qui est filmée par une caméra fixe, des observations sont effectuées sur l'intensité et les modes de transport, et des photographies du sol et du

bac de splash sont prises (ce qui a nécessité des interruptions de la pluie d'une durée totale d'environ 40 minutes). La figure 7.34 montre l'évolution du sol pendant cette expérience. En fin de simulation (1 h 50) un traceur coloré est utilisé pour mesurer la vitesse dans le chenal et observer les connexions avec l'exutoire. Enfin après séchage, des observations ont eu lieu pour obtenir la localisation des types de croûte et des micro-profils pour les épaisseurs.



FIGURE 7.34 – Évolution du terrain réel soumis au simulateur de pluie. Les temps indiqués sont les temps réels, incluant les interruptions (le terrain a été soumis à la pluie simulée pendant 2 heures au total).

Parmi les paramètres d'initialisation du simulateur (repris en intégralité dans l'annexe B), l'un des plus importants est la distribution de tailles des particules créées par le détachement (voir section 6.2.2.2), que nous avons décidé de baser sur un test de stabilité structurale (Le Bissonnais, 1996). Ces tests sont effectués selon trois modes d'humectation. Nous avons sélectionné comme valeurs de pourcentage de détachement les résultats fournis par le test d'humectation lente, étant donné la taille des fragments de sol recueillis dans le bac de splash à l'issue de la simulation de pluie. Le tableau 7.6 reproduit les pourcentages du test, pour les classes standards. Ces classes correspondent aux classes par défaut du simulateur, à l'exception des extrêmes : les fragments inférieurs à 50 μ m ne forment qu'une seule classe pour le test, lequel inclut par ailleurs les fragments supérieurs à 2 mm, qui ne font pas partie des classes du simulateur. D'une part, les pourcentages ont donc été réajustés en fonction des classes que nous utilisons, et d'autre part, nous avons réparti le pourcentage de la première classe du test dans les deux premières classes utilisées par le simulateur.

Test de sta	abilité		Dét	achement	
Gamme de tailles (mm)	Pourcentage	Classe	Gamme o (mi	le tailles n)	Pourcentage
$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$ \begin{array}{r} 1.97\\ 4.43\\ 4.95\\ 20.57\\ 35.42\\ 20.35\\ 6.99\\ \end{array} $	$ \begin{array}{c c} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \\ 7 \end{array} $	$\begin{array}{ccc} 0.002 & \rightarrow \\ 0.02 & \rightarrow \\ 0.05 & \rightarrow \\ 0.1 & \rightarrow \\ 0.2 & \rightarrow \\ 0.5 & \rightarrow \\ 1 & \rightarrow \end{array}$	$\begin{array}{c} 0.02 \\ 0.05 \\ 0.1 \\ 0.2 \\ 0.5 \\ 1 \\ 2 \end{array}$	$ \begin{array}{r} 1.15 \\ 1.15 \\ 5.1 \\ 5.6 \\ 23.5 \\ 40.4 \\ 23.2 \\ \end{array} $

TABLEAU 7.6 – Résultats du test de stabilité, et pour centages pour le processus de détachement qui en sont déduits.

Les observations effectuées pendant l'expérience sont données dans le tableau 7.7. Nous avons noté une augmentation linéaire du ruissellement entre 1 h 10 et 2 h 20 avec un ruissellement final de 9 mm h^{-1} et un flux d'infiltration final de 11.5 mm h^{-1} , soit une somme un peu inférieure à l'intensité de pluie mesurée de 23 à 25 mm h^{-1} sur la surface (figure 7.35(a)). Les tensiomètres ont montré un rapide équilibrage avec le sol aux alentours de -50 cm, puis une chute des valeurs mesurées au fur et à mesure du passage du front d'humectation, front complètement passé vers 1 h 30: à ce moment la tension se stabilise ou réaugmente légèrement à cause de l'augmentation de la résistance hydraulique de la croûte, avec des valeurs entre -8 et -18 cm (figure 7.35(b)). Enfin nous avons observé à l'arrêt de la simulation de pluie une disparition très rapide de l'eau dans les flaques (entre 45 s et 120 s), ce qui pour une infiltrabilité de l'ordre de 10 mm h^{-1} impliquerait des flaques de 1/3 mm d'épaisseur environ.

Temps	Observations
$0\mathrm{h}02$	la surface est complètement humide
$0\mathrm{h}07$	quelques zones de croûte structurale
$0\mathrm{h}20$	les zones en creux présentent une croûte structurale
$0\mathrm{h}25$	le brillant subsiste après l'impact de goutte : l'infiltrabilité est descendue aux alentours de $25\rm mmh^{-1}$
0 h 40	pendant 30 minutes, mise en place progressive du ruissellement; la croûte structurale est généralisée
$0\mathrm{h}55$	présence d'une flaque nette dans le chenal central (de 30 cm de long à 1 h)
$1\mathrm{h}10$	début du ruissellement à l'exutoire
$1\mathrm{h}20$	transport observable dans le chenal, charriage, alternance de zones claires de mobilisation et transport et de zones de dépôt, la vitesse des particules est d'environ $1{\rm cms^{-1}}$
$1\mathrm{h}35$	la capacité de transport est visiblement plus grande (mobilisation dans les zones de dépôt)

TABLEAU 7.7 – Observations effectuées pendant l'expérience.



FIGURE 7.35 – Mesures de flux d'infiltration et de ruissellement et de tensions pendant la simulation de pluie.

7.5.2 Simulation virtuelle et comparaisons

7.5.2.1 Détachement et projection

Lors de l'expérience sous simulation de pluie (section 7.5.1), nous avons ajouté sur un côté du bac contenant le sol, un bac destiné à recueillir les produits du splash (figure 7.36(a)), de 24.8 cm de largeur intérieure. Ce bac étant soumis également au simulateur de pluie, était empli d'eau pour éviter le plus possible les phénomènes de re-projection. Nous avons reproduit dans le simulateur virtuel une zone semblable, destinée à stocker et visualiser les particules projetées en dehors du terrain (figure 7.36(b)). Cette zone n'étant pas une partie de l'espace cellulaire, n'est automatiquement pas soumise à la pluie, ce qui est une explication à la différence visuelle de son apparence en fin de simulation avec celle du bac réel, où les perturbations produites par l'impact des gouttes de pluie sont clairement visibles. À noter que ce bac virtuel a été affecté d'une résolution beaucoup plus fine que l'espace cellulaire : 0.5 mm. Dans le simulateur, les distances de transport par le splash sont basées sur les résultats de Leguédois (2003, figure 6.12). Le seuil d'énergie cinétique minimale pour le détachement correspond à la valeur basse donnée par Sharma et Gupta (1989) en l'absence d'éléments pour le fixer *a priori*.



(a) Le bac de recueil de splash lors de la simulation réelle.



(b) Le bac virtuel de recueil de splash.

FIGURE 7.36 – Illustration de la reproduction du bac de recueil de splash dans le simulateur.

Pour quantifier la projection réelle des fragments pendant l'expérience réelle, nous avons binarisé une photographie du bac en fin d'expérience (figure 7.37(b)). Nous avons ensuite compté les pixels noirs contenus dans un certain nombre de zones verticales (de 5 à 40) de manière à pouvoir calculer un pourcentage de fragments projetés en fonction de la distance au terrain. La figure 7.37(c) illustre ce procédé avec 10 zones de comptage.

En ce qui concerne le bac virtuel, la même technique de partage en zones a été appliquée. Puisque nous disposons dans le simulateur de l'information précise du volume de chaque classe de particules en chaque point du maillage du bac virtuel, nous avons sommé ces volumes dans chacune des zones. La figure 7.38 montre les résultats comparés de ce comptage avec le comptage effectué pour le bac réel. Nous retrouvons une décroissance exponentielle très nette pour la simulation, et des valeurs de pourcentage proches entre les deux courbes à partir d'environ 5 cm. Nous avons pensé qu'une explication à cette différence dans ces premiers centimètres



FIGURE 7.37 – Quantification de la projection : les deux figures de droite montrent le découpage de l'image en 10 zones du bac réel et virtuel en fin de simulation.

de bac pouvait être la technique de comptage. En effet, dans le cas du bac réel, l'analyse d'images ne permet pas de prendre en compte l'aspect volumique des quantités projetées : un empilement de fragments occupe autant de pixels que le nombre de fragments nécessaire à le recouvrir. Comme il était impossible d'avoir accès à cette information volumique pour le bac réel, nous avons choisi de modifier le comptage pour le bac virtuel, en utilisant cette même technique d'analyse d'images.



FIGURE 7.38 – En vert : pourcentage du nombre de pixels noirs en fonction de la distance au bord de l'image (en cm). En rouge : pourcentage de volume de particules projetées virtuellement. Six partages différents du bac ont été calculés, de 5 à 40 zones.

Pour représenter visuellement les fragments, nous avons choisi arbitrairement de transformer le volume cumulé V_c des particules projetées sur une cellule du bac, considérées comme



FIGURE 7.39 – En vert : pourcentage du nombre de pixels noirs en fonction de la distance au bord de l'image (en cm). En rouge : même chose sur l'image du bac virtuel. Six partages différents du bac ont été calculés.

des sphères, en un cylindre compact, visible donc comme un disque dont le rayon R_c se calcule aisément :

$$V_c = \sum_{i=0}^{N_c} \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D_i}{2}\right)^3 \tag{7.6}$$

$$R_c = \sqrt{\frac{V_c}{\pi h_c}} \tag{7.7}$$

avec \mathcal{N}_c le nombre de classes de particules, D_i le diamètre pour la classe i et h_c la hauteur du cylindre, que nous avons prise égale à la résolution du bac, soit 0.5 mm. Nous avons ensuite utilisé l'image binaire fournie par le simulateur (figure 7.37(d)) pour la traiter de la même façon que l'image binarisée du bac réel, c'est-à-dire en comptant les pixels par zone. La figure 7.39 montre les résultats comparés de ce nouveau comptage avec le comptage effectué pour le bac réel, il s'avère que les pourcentages sont beaucoup plus proches. Il reste un déficit de particules dans la première zone du bac réel, déficit très visible sur la figure 7.37(a) et localisé en haut de cette zone, ce qui laisse à penser qu'il doit provenir du dispositif expérimental, par exemple une protection par un obstacle, ou une plus grande concentration de gouttes de pluie très localisée, ou encore une déformation importante du fond du bac à cet endroit.

Nous avons effectué une pesée du contenu du bac réel en 5 zones de 5 cm qui nous a permis de constater que le simulateur surestimait les masses projetées dans le bac comme le montre la figure 7.40(a). Plusieurs explications peuvent être envisagées. Tout d'abord, la position du bac virtuel n'est pas exactement conforme à la réalité, puisque dans le simulateur le terrain et le bac virtuel sont juxtaposés, ce qui néglige les bords qui sont présents dans



(a) Masses projetées par zones, (b) Quantités relatives par zone. (c) Quantités relatives sans la preréelles et virtuelles.

FIGURE 7.40 – Comparaison entre les masses projetées dans le bac réel et le bac virtuel.

l'expérience réelle, à la fois pour le bac de sol et pour le bac de splash (voir par exemple la figure 7.36(a) qui ne fait pas apparaître cependant une distance importante). Ensuite, le seuil d'énergie cinétique Ke_0 est fixé arbitrairement et il peut être sous-estimé. Enfin, il est possible que la relation entre les paramètres K_d et Ke_0 (voir section 6.2.2.2) établie à partir des données de Sharma et coll. (1991) ne soit pas valide sous cette forme dans tous les cas. Ce sont des paramètres que nous n'avons pas calés spécifiquement. En revanche, les quantités relatives donnent un bon résultat, ainsi que le montre la figure 7.40(b), qui permet aussi de constater que l'analyse d'images faite à partir de la photographie du bac réel est tout à fait conforme au résultat de la pesée. Les proportions en masse du bac virtuel s'écartent plus de la courbe réelle que les proportions en pixels, mais c'est dû en grande partie au déficit de la première zone, déjà constaté. En enlevant cette première zone (dans laquelle interviennent d'ailleurs les bords des bacs) nous retrouvons des courbes très semblables comme le montre la figure 7.40(c).

7.5.2.2 Infiltration et ruissellement

a) Charge hydraulique sous la croûte

Une estimation de la pression en sous-sol a été fournie pendant l'expérience réelle par une batterie de dix tensiomètres. Les valeurs retournées après 90 minutes d'expérience, c'est-àdire une fois que le front d'humectation est complètement passé en dessous des tensiomètres, vont de -8 cm = 18 cm. La figure 7.41(a) représente l'évolution de la moyenne de la charge hydraulique (en valeur absolue) sous la croûte sur le terrain pendant une simulation virtuelle. Il n'y a pas de phase décroissante du potentiel hydrique en début de simulation, ce qui est normal car nous faisons l'hypothèse d'un équilibrage instantané de la pression avec celle que l'on obtiendrait en régime permanent pour les caractéristiques de la croûte à l'instant considéré, mais on retrouve une légère augmentation aux temps longs comme dans les mesures (figure 7.35(b)), ce qui indique que la croûte offre une résistance croissante à l'écoulement. L'histogramme représenté figure 7.41(b) montre que les valeurs se situent en majorité entre -18 et -23 cm, assez typiques sous une croûte et un peu plus grandes en valeur absolue que dans la réalité, ce qui suggère une légère surestimation de la résistance hydraulique de la croûte lors de la simulation.



 (a) Moyenne de la charge hydraulique sous la croûte (en valeur absolue).

(b) Histogramme des valeurs de la charge hydraulique sous la croûte à la fin de la simulation (en valeur absolue).

FIGURE 7.41 – Courbes relatives à la moyenne de la charge hydraulique sous la croûte sur le terrain pendant une simulation.

b) Apparition du ruissellement

Pour estimer le moment d'apparition du ruissellement sur la surface du terrain, nous utilisons comme indicateur l'évolution de la hauteur d'eau moyenne sur cette surface. La figure 7.42 montre l'évolution de cette moyenne au cours d'une simulation, avec l'apparition très nette d'un plateau après moins de 20 minutes de simulation. Si le début de ce plateau peut effectivement rendre compte de l'apparition du ruissellement, c'est assez éloigné de l'observation du phénomène réel, puisque nous avons noté au cours de l'expérience de simulation de pluie en laboratoire que les premières accumulations d'eau visibles en surface apparaissaient seulement aux environs de 50 minutes. Nous observons donc un ruissellement précoce et surestimé ce qui est en partie lié aux limites du modèle d'infiltration qui sous-estime celle-ci dans la phase transitoire, et en partie à une sous-estimation de la conductivité hydraulique de la croûte.



FIGURE 7.42 – Estimation de l'apparition du ruissellement.

7.5.2.3 Mobilisation et transport par le ruissellement

Afin de comparer les observations et les résultats de simulation sur la mobilisation et le transport en s'affranchissant des erreurs associées à la surestimation du ruissellement, nous avons imposé pour une partie de l'analyse la topographie et le ruissellement observé à trois périodes clés de l'expérience (à 80 min, 100 min et 140 min) correspondant à des régimes de transport différents. Pour cela, nous avons utilisé la topographie finale observée, et nous avons imposé une infiltration nulle et une intensité de pluie permettant de retrouver le flux de ruissellement observé pour les trois périodes considérées, soit 2.5, 5 et 10 mm h⁻¹.

a) Calage préalable du pas de temps

Afin de déterminer le pas de temps optimal pour un fonctionnement correct du modèle de ruissellement, nous avons exploité une mesure de vitesse dans le chenal central en fin de simulation (140 min, flux de ruissellement 10 mm h^{-1}) plutôt que le flux de ruissellement à l'exutoire (voir section 7.3.1.1). Cette mesure a été effectuée au cours d'une simulation de pluie, à l'aide d'un colorant bleu, dans une rigole creusée dans une portion du terrain (figure 7.43) : l'eau parcourait dans ces conditions 35 cm en 11 s environ.



FIGURE 7.43 – Injection d'un colorant bleu lors d'une expérience sous simulateur de pluie pour mesurer la vitesse du ruissellement.

Nous avons reproduit dans le simulateur le déplacement d'un colorant bleu entre deux bornes, matérialisées par deux lignes rouges, distantes de 35 cm (certaines expériences ont été menées sur 11 cm seulement pour obtenir des résultats plus rapidement). Nous avons procédé de la façon suivante : après avoir attendu que le ruissellement soit parvenu au régime permanent, des particules de la taille la plus fine sont injectées en grand nombre dans quelques cellules placées avant la première ligne. Le dépôt est interdit pour ces particules, elles vont donc se déplacer avec le ruissellement calculé par l'algorithme. Pour la visualisation (volumique), elles sont colorées en bleu (figure 7.44).



FIGURE 7.44 – Reproduction de l'injection d'un colorant bleu dans le simulateur (temps simulé : 0, 3.3, 6, 8, 9 et 12.3 s).

Il s'avère qu'il est délicat de reproduire la technique de mesure réelle, basée sur le franchissement d'une certaine distance à partir d'un critère uniquement visuel, car la visualisation des particules virtuelles est basée sur un seuil quantitatif : une cellule est colorée en bleu si elle contient un nombre suffisant de particules. Or, en modifiant ce seuil, la mesure de temps de parcours elle-même est modifiée. Ce n'est donc pas un critère objectif. Par conséquent, nous avons eu recours à une autre technique de mesure, celle employée lorsqu'on utilise un traceur pour obtenir une vitesse moyenne, à savoir tracer la courbe de concentration au point d'arrivée, et prendre le pic de concentration comme repère de franchissement. Le seul paramètre arbitrairement fixé de cette expérience virtuelle reste la masse des particules initialement injectée dans les cellules de départ. Nous avons donc vérifié l'indépendance du temps de parcours par rapport à cette masse, en opérant une mesure avec la masse initiale divisée et multipliée par 1000 (figure 7.45). Cette expérience a permis de vérifier également le bon fonctionnement de la technique du pic de concentration pour l'expérience virtuelle.



FIGURE 7.45 – Vérification de l'indépendance du temps de parcours (révélé par le pic de concentration) par rapport à la masse des particules simulant le colorant injecté dans le flux. Note : la distance à parcourir est ici environ de 11 cm.

Pour le simulateur, le pas d'itération est limitant dans le processus de ruissellement tel que nous l'avons modélisé : l'eau ne peut se déplacer que d'une cellule au plus au cours d'une itération, la vitesse de l'eau est donc bornée par ce déplacement. En considérant le cas le plus défavorable, c'est-à-dire un déplacement parallèle à un axe (donc un nombre maximal de cellules parcourues), pour une dimension de cellule de 2 mm il faut donc que l'eau puisse parcourir 175 cellules en 11 s, ce qui impose un pas de temps maximal de 11/175 ≈ 62 ms. Nous avons vu que le pas de temps maximal de 5 ms retenu par le test du débit à l'exutoire satisfaisait cette condition. Nous avons procédé à des tests de pic de concentration sur une distance de 11 cm avec quatre pas de temps différents (figure 7.46), et constaté effectivement une grande influence du pas de temps sur le temps de parcours. De plus, en estimant la pente relativement constante, il est clair que les temps enregistrés pour les pas de temps au delà de 5 ms sont trop importants pour vérifier la vitesse mesurée expérimentalement (pour 5 ms, aux environs de 10 s pour moins d'un tiers de la distance qui doit être parcourue en 11 s).

Nous avons procédé à deux tests sur la distance totale de 35 cm, pour des pas de temps de 1 ms et 2 ms (figure 7.47(a)), et constaté que le pas de temps permettant de s'approcher le plus du temps réel de parcours était celui de 1 ms. Nous retrouvons ainsi le résultat obtenu avec le critère du débit à l'exutoire. Ce pas de temps entraînant des temps de calcul très importants, nous nous sommes orientés vers l'utilisation d'une résolution inférieure. La figure 7.47(b) montre les temps obtenus avec le même terrain de résolution 5 mm obtenue par krigeage, pour différents pas de temps. Nous remarquons que les temps de parcours sont à peu près identiques, autour de 9 s, à partir de 10 ms environ, ce qui est cohérent avec les tests de débit à l'exutoire et permet de réduire le temps de calcul de manière conséquente.



FIGURE 7.46 – Mise en évidence du rôle limitant du pas de temps sur la vitesse d'écoulement. Note : la distance à parcourir est ici environ de 11 cm et la résolution du terrain est de 2 mm.



FIGURE 7.47 – Temps de parcours des particules avec des pas de temps différents, avec une résolution de 2 mm et de 5 mm. Note : la distance à parcourir est ici environ de 35 cm, le temps réel est de 11 s environ.

b) Choix du coefficient de friction

Le coefficient de friction f intervient dans la formule de Darcy-Weisbach (6.40); il traduit la rugosité de la surface et dépend également de la hauteur d'eau, pour des lames d'eau minces. Nous faisons l'hypothèse que ce coefficient peut être considéré comme unique sur tout le terrain considéré, ce qui est inexact. Il ne serait pas difficile, puisque les calculs dans le simulateur sont spatialisés, de considérer dans notre modèle un coefficient de friction spécifique à chaque cellule de surface, voire à des zones contigües. Le problème vient de la mesure de ce coefficient sur un sol réel qui est très délicate.

Une première méthode pour estimer si le coefficient de friction choisi dans le simulateur est proche de celui du terrain est de comparer son effet sur la largeur des flaques obtenues après établissement d'un régime permanent. Nous avons opéré des simulations sur terrain virtuel considéré comme imperméable, avec trois valeurs différentes de ce coefficient. Malheureusement, les différences bien que visibles et mesurables sur les images (figure 7.48), restent trop peu significatives pour le choix d'une valeur par comparaison avec des photographies prises pendant l'expérimentation réelle, les limites des flaques étant alors difficiles à situer avec une précision suffisante.



FIGURE 7.48 – Comparaison de la dimension des flaques sur un même terrain, sous des conditions de simulation identiques, avec deux coefficients de friction différents.

La deuxième méthode est d'utiliser la comparaison avec la vitesse d'écoulement mesurée pour la distance de 35 cm. Nous avons vu que pour une résolution de 5 mm, un pas de temps inférieur à 10 ms est un choix adéquat pour permettre une vitesse d'écoulement suffisante. Pour un coefficient de friction égal à 1, le temps de parcours converge vers 9 s environ (figure 7.47(b)). Nous avons donc procédé aux mêmes tests avec une valeur de coefficient de friction de 2, et obtenu le temps correct de 11 s (figure 7.49).



FIGURE 7.49 – Temps de parcours des particules avec des pas de temps différents, avec une résolution de 5 mm et un coefficient de friction égal à 2. Note : la distance à parcourir est environ de 35 cm, le temps simulé est ici égal au temps réel, soit 11 s environ.

c) Comparaison des contraintes locales

La contrainte hydraulique détermine l'intensité et le mode de transport des particules (voir section 6.3.2). La figure 7.50 montre l'évolution des contraintes hydrauliques locales obtenue en laissant progressivement s'écouler une lame d'eau de 1 mm répartie de façon homogène sur le terrain final en absence d'infiltration. Cette évolution fait apparaître très vite des chemins d'eau préférentiels qui vont nourrir des zones importantes de ruissellement. La dernière figure 7.50(e) n'affiche presque que ces zones de ruissellement, et permet de constater une grande variabilité spatiale des valeurs de contraintes hydrauliques au milieu de deux de ces zones (fléchées dans cette figure). Cette variabilité provient de la topographie complexe du sol qui, combinée à une résolution assez fine de 2 mm, entraîne de forts gradients d'altitude et de charge hydraulique sur des voisinages très réduits.


FIGURE 7.50 – Visualisation de l'évolution des contraintes hydrauliques locales à partir d'une la me d'éau uniforme de 1 mm d'épaisseur.

Nous avons étudié pour les trois périodes clés mentionnées au début de la section comment la contrainte hydraulique évoluait selon le flux de ruissellement (2.5, 5 et 10 mm h^{-1}) et la position dans le chenal central. Nous avons sélectionné sur la carte de hauteur du terrain six carrés identiques, de 25 cellules chacun, numérotés de 1 à 6 (voir figure 7.51).



FIGURE 7.51 – Les six zones carrées de la zone principale de ruissellement, contenant chacune 25 cellules (soit 100 mm^2). Le terrain est coloré selon son altitude.

Une fois le régime permanent atteint dans les conditions considérées, nous avons relevé les valeurs de contrainte hydraulique pendant 6 s pour chacune des cellules de ces zones. Les résultats sont présentés figure 7.52, les valeurs de contraintes reportées étant les valeurs moyennes d'une zone. Les lignes horizontales sont les contraintes critiques calculés par la formule de Paphitis (voir section 6.3.2), avec les coefficients correspondant à la courbe médiane, pour les 7 classes de tailles de particules du simulateur. Ces contraintes critiques permettent de juger quelles sont les particules les plus grosses mobilisées par le ruissellement. Dans l'espace, les deux zones les plus en amont présentent des contraintes hydrauliques plus faibles que les autres, et ne permettent pas, même avec l'intensité la plus forte, de transporter les plus grosses particules. Dans le temps, suivant l'augmentation de l'intensité du ruissellement, ces courbes montrent que le processus de transport passe par trois phases, correspondant aux trois rangées de courbes de la figure 7.52 : pas de transport, transport sélectif, et enfin transport non sélectif, ce qui est comparable à l'observation effectuée pendant l'expérience réelle.

d) Particules atteignant l'exutoire

La figure 7.53 montre les pourcentages de particules par classe atteignant l'exutoire. Ces résultats sont cohérents avec ceux donnés par Leguédois (2003) : moins de 10 % des parti-



FIGURE 7.52 – Relevés des contraintes hydrauliques moyennes sur les six zones représentées figure 7.51, pendant 6s et pour trois intensités de pluie. L'axe horizontal représente le temps (10 relevés par seconde), l'axe vertical va de 0 Pa à 3 Pa. Les lignes horizontales sont les contraintes critiques de la courbe médiane de Paphitis pour les 7 classes de tailles de particules du simulateur.

cules d'un diamètre supérieur à 250 μ m atteignent l'exutoire, alors que la quasi-totalité des particules de diamètre inférieur à 20 μ m est exportée. Le seuil de 250 μ m correspond au passage d'un transport en suspension dominant à un transport par charriage dominant (voir section 6.3.2.2), pour lequel la topographie locale impose une contrainte très forte (il n'y a pas de transport pour une pente du sol dans la direction opposée à celle de l'écoulement).



FIGURE 7.53 – Comparaison entre la distribution des tailles de particules issue du test de stabilité et les pourcentages des particules atteignant l'exutoire pour chaque classe.

7.5.2.4 Évolution de la topographie

Le premier résultat attendu d'une simulation, le plus visible, est l'évolution de la topographie du terrain durant cette simulation. La figure 7.54 rend compte visuellement, à intervalles réguliers, de cette évolution de la surface du sol soumis à 120 minutes de pluie. La première observation qui peut être faite est que l'évolution simulée du relief est très perceptible. Si nous comparons (figure 7.55) les rendus visuels respectifs du résultat final de la simulation et du modèle numérique de terrain obtenu par rugosimétrie laser à l'issue de l'expérience réelle, il apparaît clairement que l'érosion du relief est surestimée. La figure figure 7.55(c) montre que le relief simulé après 40 min de pluie est beaucoup plus proche du relief observé sur le terrain final que ne l'est le relief obtenu en fin de simulation. L'hypothèse principale permettant d'expliquer cette surestimation de l'évolution du relief est la surestimation du paramètre Ke_0 (qui n'a pas été calé et est difficile à estimer *a priori*). Cette hypothèse est cohérente avec la surestimation du volume de sédiment splashé (voir section 7.5.2.1). La figure 7.56 montre qu'en élevant ce seuil, le résultat après 120 min de simulation se rapproche de l'image produite par le terrain réel, en conservant plus d'agrégats visibles.



FIGURE 7.54 – Évolution de la topographie du terrain pendant une simulation.



(a) Topographie réelle en fin d'ex (b) Simulation après 120 minutes.
(c) Simulation après 40 minutes.
périence.

FIGURE 7.55 – Comparaison entre l'aspect visuel du terrain après l'expérience réelle, et à deux moments de la simulation.

La figure 7.57 montre deux autres comparaisons des terrains en fin de simulation réelle et virtuelle ($Ke_0 = 0.1$), cette fois à l'aide de fausses couleurs (palette thermique). Les images 7.57(a) et (b) montrent les altitudes des deux terrains : même s'il apparaît pour la simulation une sorte de lissage qui estompe beaucoup de détails, ce qui avait déjà été constaté, il n'y a cependant pas d'erreurs grossières, et les différentes zones d'altitude sont relativement bien



FIGURE 7.56 – Influence du seuil d'énergie cinétique du détachement sur la topographie finale pour 120 min de pluie simulée.



FIGURE 7.57 – Évolution du volume de particules accumulé sur la surface du terrain.

respectées. Afin de pouvoir comparer les variations d'altitude observées et simulées entre terrain initial et terrain final en s'affranchissant des variations d'altitude liées à la prise en masse du sol à l'humectation (ce tassement n'étant pas pris en compte dans le simulateur), nous avons cherché à estimer le tassement lié à la prise en masse. Pour cela, quatre cailloux ont été incorporés à la surface du terrain, cailloux qui sont très visibles sur la photographie reproduite figure 7.58(a). Sur la carte de hauteur du terrain initial (figure 7.58(b)), cinq rectangles ont été repérés aux emplacements de ces cailloux afin de pouvoir isoler les ensembles de pixels correspondants et d'en obtenir les caractéristiques après le calcul des différences de hauteur entre le MNT du terrain initial et le MNT du terrain en fin de simulation réelle (à une résolution de 2 mm).

Ces caractéristiques sont données dans le tableau 7.8, que nous avons établi en recadrant les deux MNT entre eux (les positions initiales respectives du rugosimètre et du bac n'étant pas garanties rigoureusement identiques après la simulation de pluie). Le critère du recadrage était la minimisation de la moyenne de la variance dans les zones des cailloux, avec une amplitude allant de la position (-15, 15) à la position (15, 15). La position optimale trouvée est (-1, 1), qui fait passer la variance de 0.31 en position (0, 0) à 0.03 dans cette nouvelle position (à noter que cette correction est inférieure aux résolutions de 5 mm et 10 mm utilisées pour les simulations, donc il n'y a pas eu de recadrage des autres MNT). Des différences de décalage de hauteur apparaissent entre les différents points d'un même caillou, ce qui en théorie ne devrait pas se produire. Néanmoins, les écarts-types sont suffisamment petits pour cautionner la validité de ces mesures. Il en ressort que les cailloux se sont affaissés d'en moyenne 7.3 mm, ce qui constitue une estimation du tassement par prise en masse.



(a) Photographie du sol initial.

(b) Carte de hauteur.

FIGURE 7.58 – Repérage des cailloux présents sur le sol initial pour l'estimation du tassement global.

Repère	minimum	maximum	écart-type	moyenne
1	-8.82	-7.76	0.22	-8.40
2	-7.78	-6.87	0.16	-7.31
3	-7.49	-6.98	0.14	-7.28
4	-8.30	-7.42	0.23	-7.75
5	-6.22	-5.58	0.14	-5.84

TABLEAU 7.8 – Caractéristiques des différences d'altitude dans les zones des cailloux (valeurs en mm) entre le MNT du terrain initial et le MNT du terrain en fin de simulation réelle.

Après correction de l'effet parasite du tassement par prise en masse de 7.3 mm sur les altitudes finales observées, les variations d'altitude observées et simulées entre les terrains initiaux et finaux peuvent être comparées (voir figures 7.57(c) et 7.57(d)). Cette comparaison montre une bonne cohérence entre observations et simulations avec les même zones d'érosion et d'accumulation de sédiments (principalement dans le chenal central et les dépressions).

7.5.2.5 Encroûtement

La figure 7.59 montre comment les particules transportées par le splash et le ruissellement s'accumulent dans certaines parties du terrain durant le déroulement de la simulation virtuelle. Ces images sont obtenues en sommant sur chaque colonne les hauteurs de particules contenues dans toutes les cellules de la colonne. Comme dans la réalité, les dépressions du terrain favorisent l'accumulation des particules.

Nous avons vu section 7.2.2 que nous considérons une cellule comme faisant partie de la croûte si sa porosité structurale est inférieure à 8%. À partir de cette définition, nous pouvons calculer en chaque point de la surface une épaisseur de croûte, correspondant à la somme des épaisseurs des cellules qui répondent à la condition sur la porosité structurale. La figure 7.60(a) montre comment se répartissent les épaisseurs de croûte, estimées selon ce principe, sur le terrain à la fin de la simulation virtuelle. En complément, la figure 7.60(b) montre les valeurs moyennes par colonne de cellules de la porosité structurale.



FIGURE 7.59 – Évolution du volume de particules accumulé sur le terrain, par calcul de la hauteur totale des particules dans chaque colonne de cellules.



FIGURE 7.60 – Estimation de l'épaisseur de croûte et de la porosité structurale moyenne en chaque point de la surface à la fin d'une simulation.

Afin de distinguer des croûtes de nature différente (structurales ou sédimentaires) nous nous appuyons sur un critère de sélection granulométrique à partir de l'amplitude de la différence entre la granulométrie d'une cellule avec la granulométrie imposée par le détachement, critère qui se traduit par une signature granulométrique Δ_G définie par l'équation (7.3). Pour définir les zones non croûtées nous ajoutons une condition sur une épaisseur de croûte minimale (qui élimine de fait, par définition de cette épaisseur, les zones où la porosité structurale est trop élevée). Une cartographie des croûtes devient donc possible, comme le montrent les images de la figure 7.61, où sont données en légende, pour quatre valeurs arbitraires du seuil Ω_G , les pourcentages correspondants aux différentes zones : P_{nc} pour les parties non croûtées, P_{str} pour les parties à croûte structurale, et P_{sed} pour les parties à croûte sédimentaire. La répartition des types de croûte correspond bien à la réalité, avec une bonne estimation quantitative plutôt pour les plus fortes valeurs de Ω_G .

Afin de permettre d'extraire des informations sur des zones d'intérêt définissables à volonté, il est possible dans le simulateur de créer de telles zones directement sur le terrain, à l'aide de la souris. Ces zones sont modifiables et peuvent être sauvegardées pour une exploitation ultérieure. La figure 7.62 montre un exemple d'un ensemble de zones créées sur le terrain après une simulation. Il est également possible, s'il existe une photographie du terrain correspondant exactement au terrain virtuel, de créer directement des zones sur cette photographie dans le simulateur.



FIGURE 7.61 – Différentes discriminations des deux types de croûte selon la valeur donnée au seuil de signature granulométrique Ω_G . L'épaisseur minimale de la croûte est constante et fixée à 0.5 mm. Les parties noires sont les parties non croûtées P_{nc} , les parties marron sont les parties à croûte structurale P_{str} , et les parties blanches sont les parties à croûte sédimentaire P_{sed} .



FIGURE 7.62 – Exemple de zones d'intérêt définies par l'utilisateur.

Pour illustrer cette manière d'explorer les résultats fournis par une simulation, nous avons choisi de créer huit zones dans des parties à croûte structurale et des parties à croûte sédimentaire. La figure 7.63(a) montre l'épaisseur de croûte moyenne estimée dans chaque zone. Il apparaît que les zones B,C,D,E présentent une croûte plus épaisse que les autres zones. En affichant dans la figure 7.63(b), pour chaque classe, les différences granulométriques relatives δ_G définies par l'équation 7.2, nous retrouvons le résultat mis en évidence dans la section précédente : les écarts les plus importants (donc les croûtes sédimentaires) correspondent aux zones de croûte les plus épaisses, soit les zones B,C,D,E. Deux familles de zones se distinguent même nettement dans cette figure, avec deux profils d'écart granulométrique quasiment identiques dans chacune d'elles. Par rapport à des mesures effectuées sur le sol réel après simulation de pluie, nous remarquons que les types de croûte sont corrects et que nous obtenons un bon ordre de grandeur pour l'épaisseur totale, à la fois pour les croûtes structurales (3-4 mm) et pour les profondeurs maximales atteintes avec les croûtes sédimentaires (6-7 mm).

Toutes les informations contenues dans les cellules peuvent être exploitées à l'intérieur des zones définies. Ainsi, la figure 7.64(a) montre comment varie, pour chaque zone, la hauteur





(b) Différences de pourcentage entre granulométrie initiale et finale, pour chaque classe de particules, dans chaque zone.

FIGURE 7.63 – Étude de la croûte et de la granulométrie dans les zones.



FIGURE 7.64 – Étude du ruissellement et de l'énergie cinétique cumulée dans les zones.

d'eau moyenne. La séparation des zones en deux familles se retrouve, avec une apparition d'un ruissellement ou de flaques au bout d'un certain temps dans les zones B,C,D,E alors que les autres zones conservent la même faible quantité d'eau tout au long de la simulation. La hauteur d'eau maximale semble cependant plus petite que dans l'expérience réelle – mais cohérente avec la vitesse de disparition des flaques en fin de simulation, voir la section 7.5.1. L'effet des variations de hauteur d'eau sur l'énergie cinétique reçue par le sol est très perceptible (figure 7.64(b)) et nous retrouvons de nouveau les deux ensembles distingués précédemment.

7.6 Conclusion

Nous avons dans ce chapitre abordé l'interprétation des données fournies par une simulation. Cette interprétation se fait à deux niveaux : la visualisation, soit volumique, soit surfacique, et la prise de décision quant à la présence d'une croûte et à sa nature. Nous avons basé cette prise de décision sur la porosité structurale des cellules, qui doit être inférieure à un seuil pour une cellule de croûte. Nous avons également établi un critère de discrimination entre croûte structurale et croûte sédimentaire, critère basé sur la sélection granulométrique, que nous évaluons par la différence entre la granulométrie issue du détachement et la granulométrie courante calculée dans une cellule. La position de cette signature granulométrique par rapport à un seuil permet de classer une cellule croûtée dans l'un ou l'autre type de croûte.

Ce chapitre a permis de montrer qu'il est possible de reproduire avec le simulateur un grand nombre d'expériences réelles, voire d'en imaginer de purement virtuelles. Les comparaisons établies pour les expériences concernant les différents processus tendent à valider les choix effectués pour la modélisation de ces processus. Le temps a manqué pour un test quantitatif poussé, mais le comportement qualitatif est très correct pour l'ensemble des processus et l'évolution globale, surtout que peu de paramètres ont été fixés autrement que par importation de valeurs de la littérature ou de mesures. En particulier, nous avons pu aboutir à une modélisation de l'encroûtement réaliste et traitant à la fois des aspects qualitatifs (présence ou absence, nature de la croûte) et quantitatifs (épaisseur, conductivité hydraulique), ce qui constitue l'un des aspects les plus originaux et innovants de notre simulateur.

Enfin, le simulateur a permis d'intégrer des connaissances généralement dispersées pour produire des résultats sur l'interaction des processus, le couplage entre l'érosion et l'évolution de la structure et ses conséquences. Il a également servi d'outil de recherche pour tester différentes hypothèses sur les processus concernés par la dégradation de la structure du sol. Même si les temps de calcul restent importants, ceux-ci restent acceptables pour une résolution de 5 mm, et une simulation virtuelle offre l'avantage par rapport à une expérience réelle de permettre de modifier rapidement et aisément de nombreuses conditions de l'expérience, tout en produisant beaucoup d'informations facilement accessibles et exploitables. De plus des outils spécifiques, comme la définition de zones d'intérêt, augmentent la capacité d'exploration des résultats produits par le simulateur et peuvent aider à nourrir une réflexion sur le phénomène réel. Troisième partie

Simulation de la fissuration du sol

Chapitre 8

Contexte scientifique

Sommaire

8.1	Intro	oduction		206
8.2	Obset	ervation et caractérisation des fissures 20		
	8.2.1	Techniq	ues d'observation $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	207
		8.2.1.1	Porosité	207
		8.2.1.2	Fissures	208
	8.2.2	Caractér	risation des fissures \ldots	209
		8.2.2.1	Données géométriques	209
		8.2.2.2	Données topologiques	210
		8.2.2.3	Indicateurs globaux	211
		8.2.2.4	Nombres de Minkowski	212
		8.2.2.5	Dimension fractale	212
8.3	\mathbf{Mod}	lèles de i	fissuration	213
	8.3.1	Modèles	basés sur les propriétés du sol	214
		8.3.1.1	Hallaire	214
		8.3.1.2	Chertkov et Ravina	215
		8.3.1.3	Voltz et Cabidoche	216
	8.3.2	Modèles géométriques		216
		8.3.2.1	MacVeigh	216
		8.3.2.2	Horgan et Young	216
		8.3.2.3	Perrier et coll.	217
	8.3.3	3.3.3 Modèles à base physique		219
		8.3.3.1	Skjeltorp et Meakin	219
		8.3.3.2	Federl et Prusinkiewicz	220
		8.3.3.3	Hirota et coll.	220
		8.3.3.4	Hoffman, Vogel et coll.	221
		8.3.3.5	O'Brien et coll	222
	8.3.4	Approch	nes phénoménologiques	222
		8.3.4.1	Gobron et Chiba	222
		8.3.4.2	Paquette et coll	224
		8.3.4.3	Desbenoit et coll.	224
8.4	Cone	clusion		225

8.1 Introduction

La fissuration est un phénomène naturel très courant et qui apparaît sur de nombreux types de surfaces, à diverses échelles et orientations. Ce phénomène est donc d'un grand intérêt pour les scientifiques de différentes disciplines. Dans le domaine de l'informatique graphique, l'ajout de fissures à un objet virtuel peut permettre d'augmenter le réalisme de son apparence. En science du sol, il est reconnu que les fissures (surtout verticales) affectent très fortement les propriétés physiques du sol, en particulier hydrodynamiques, un autre effet plus mineur de leur présence étant qu'elles peuvent permettre l'émergence des plantules là où la présence d'une croûte de battance est un obstacle à cette émergence. Un modèle de fissuration peut donc permettre une simulation de l'évolution de la structure du sol et ainsi aider fortement à l'amélioration de la simulation de son fonctionnement, mais également être appliqué à la prédiction de l'émergence des plantules aussi bien qu'à la production d'images plus réalistes.

La littérature concernant les phénomènes de fissuration est importante et couvre plusieurs domaines, dont particulièrement celui de l'ingénierie des matériaux. Nous nous limiterons dans l'état de l'art qui est l'objet de ce chapitre aux travaux publiés en science du sol et en informatique graphique. Pour ces deux domaines, les objectifs sont différents. Il s'agit en science du sol de pouvoir décrire, voire prédire, la réalité physique des fissures, traduite par certaines mesures. En informatique graphique, le but premier est la production d'une image (ou d'une animation) réaliste ou visuellement plausible. Ces objectifs ne sont pas forcément contradictoires, et peuvent même se révéler complémentaires.

Nous consacrerons la première partie de ce chapitre à la description et à la mesure de la porosité et en particulier des fissures, sujets abordés en science du sol, ce qui nous permettra de mettre en évidence la complexité du phénomène mais aussi de trouver quelques pistes pour la validation d'un modèle de fissuration. La seconde partie de ce chapitre sera dédiée à un état de l'art des modèles existants, en science du sol et en informatique graphique.

8.2 Observation et caractérisation des fissures

La description et la mesure des fissures du point de vue de la science du sol peuvent nous servir à nous donner une idée plus précise du processus à simuler mais également nous fournir des outils de validation de la simulation, par comparaison des mesures du phénomène réel et du phénomène simulé. Dans un sol, le réseau de fissures participe à la porosité totale. L'un et l'autre peuvent être observés, ce que nous traitons dans la première partie de cette section, avant d'aborder plus précisément les principaux moyens de caractérisation des fissures qui sont proposés dans les publications de science du sol. Bien que cet état de l'art balaie un large éventail de méthodes, il est à noter que seules certaines de ces caractérisations sont utilisables comme outils de validation sur des résultats de simulation.

8.2.1 Techniques d'observation

8.2.1.1 Porosité

La porosité du sol se définit comme le complémentaire de la phase solide, c'est-à-dire les pores et les cavités entre les solides. On considère généralement que le réseau poreux est constitué de deux types de porosité (voir figure 8.1) : d'une part la porosité texturale, constitutive du matériau et liée à l'organisation des composants élémentaires du sol, et d'autre part la porosité structurale, plus grossière, reliée à l'arrangement macroscopique des éléments structuraux, et qui varie au cours du temps sous l'effet du climat (dessiccation), de l'action de la faune et du travail du sol. Les fissures font partie de la porosité structurale, et l'un des problèmes qui se posent est la difficulté d'obtenir une mesure directe et indépendante de la porosité n'appartenant pas aux fissures.



FIGURE 8.1 – Schéma d'organisation de l'espace por l du sol d'après Stengel (1979).

L'observation de la porosité peut être directe, au champ ou en laboratoire sur des sols reconstitués ou prélevés. Le volume poral au champ peut être visualisé directement après l'infiltration d'un produit qui se solidifie dans le réseau poreux, par exemple le plâtre, ou encore d'une solution colorée, par exemple le bleu de méthylène. Ces techniques ne permettent cependant que des études ponctuelles. Une autre technique repose sur la fabrication de lames minces, qui est destructive et donc interdit le suivi dynamique. Une lame mince de sol est un échantillon de sol à structure conservée, consolidé dans une résine, aminci à une faible épaisseur (typiquement 30 μm) et collé sur une lame de verre. L'analyse d'images 2D (Scott et coll., 1986, Moreau et coll., 1999b) peut être appliquée à ces lames minces observées par microscopie optique ou électronique et permet d'obtenir une description de la forme et de la taille des pores au moyen d'indices (voir figure 8.2). L'analyse d'images 3D (Moreau et coll., 1999a, Delerue, 2001) donne accès, grâce à une visualisation tridimensionnelle de l'objet, à une information topologique, permettant l'étude des connexions entre les pores. Deux méthodes sont principalement employées : les coupes sériées (méthode longue, destructive, difficilement applicable à des échantillons de grandes tailles (voir figure 8.3(a)), et la tomographie aux rayons x (méthode très rapide, non destructive, sur un volume d'application typiquement cylindrique et d'une vingtaine de centimètres de hauteur, présentant cependant l'inconvénient d'un coût élevé (voir figure 8.3(b)). Enfin, il existe des méthodes d'observation indirectes, qui sont invasives : un liquide (ou un gaz) est injecté dans l'échantillon, et le volume correspondant permet d'établir soit le volume poreux global de l'échantillon, soit la distribution de tailles de

pores. Deux liquides sont couramment employés : le mercure, dans un porosimètre à mercure, et l'eau, à travers les modifications de volume d'un échantillon de sol initialement saturé.



(a) $10 \,\mathrm{cm} \times 5 \,\mathrm{cm}$



FIGURE 8.2 – Exemples d'images de lames minces d'après Moreau et coll. (1999b) et Pagliai et coll. (2004).



(a) Visualisation de coupes sériées d'un bloc de $6 \times 6 \times 2$ cm préparées par imprégnation d'une résine puis érodées par pas de 100 µm.

(b) Tomographie aux rayons X d'un cylindre de 15 cm de long et 9.94 cm de diamètre.

FIGURE 8.3 – Exemples d'images 3D d'après Moreau et coll. (1999a) et Delerue (2001).

8.2.1.2 Fissures

Comme pour la porosité en général, l'observation des fissures pose le problème de sa dimensionnalité et de la destruction des échantillons. D'une part, les études spécifiques concernant la fissuration verticale sont souvent basées sur des observations de la surface du sol et généralisent les résultats aux couches inférieures, qui restent non observées, alors que l'organisation du réseau de fissures peut très bien ne pas vérifier la propriété d'isotropie. D'autre part, les mesures tridimensionnelles sont souvent destructives, or dans ce cas, l'observation est réalisée sur de nouveaux échantillons à chaque pas de temps, et non sur un échantillon unique dont il serait alors possible de suivre l'évolution temporelle. Une observation complète de la fissuration devrait donc être 4D, c'est-à-dire à la fois temporelle et tridimensionnelle.

Les fissures présentes dans un sol peuvent être décrites à partir d'observations de surface au champ et de mesures réalisées à la règle, par exemple la largeur, la longueur par cm^2 de surface et la profondeur. Comme ces méthodes sont non-destructives, il devient possible d'établir la dynamique de fissuration et donc une estimation temporelle réelle de l'évolution du réseau de fissures. La reconstruction complète d'un réseau de fissures complexe est cependant difficile puisque l'observation ne se fait que depuis la surface.

Une technique très employée pour calculer des paramètres quantitatifs de description de la structure est l'analyse d'images à partir de photos de surface (figure 8.4), qui peut notamment donner des informations sur la longueur des fissures et la surface des agrégats (Gallardo-Carrera, 2006). Par une prise de photographies régulière du même échantillon, un suivi temporel de l'évolution de sa surface devient possible. La technique utilisée restreint néanmoins cette observation à un domaine spatial bidimensionnel et ne permet donc pas de connaître la variation de la fissuration en profondeur. Nous avons cité les méthodes invasives permettant une mesure indirecte de la porosité. Samouëlian (2004) a travaillé sur la mise au point d'une autre méthode d'observation indirecte, utilisant la résistivité électrique et permettant la description tridimensionnelle de la mise en place d'un réseau de fissures et de son évolution temporelle. Cette méthode est non destructive et permet donc un suivi temporel des fissures.



FIGURE 8.4 – Exemple d'une photographie d'une surface de sol cultivé fissuré et du résultat de la détection des fissures par analyse d'images (Gallardo-Carrera, 2006).

8.2.2 Caractérisation des fissures

8.2.2.1 Données géométriques

Une fissure peut être considérée comme un objet géométrique et être par conséquent caractérisée par des données telles que :

- la largeur,
- la profondeur,
- l'orientation,
- la position,
- le pendage (c'est-à-dire l'angle dans un plan vertical).

À partir des mesures de la largeur, de la longueur par cm^2 de surface prospectée et de la profondeur de la fissure, Ringrose-Voase et Sanidad (1996) caractérisent la fissuration dans

le sol sur la base de trois hypothèses de formes géométriques de fissures : rectangulaire, triangulaire ou de type racine carrée (figure 8.5).



FIGURE 8.5 – Exemple de technique de mesure d'après Ringrose-Voase et Sanidad (1996).

Comme caractérisation de la forme des fissures, Vogel et coll. utilisent la distribution des angles de bifurcation entre deux branches. Ils ont mis en évidence que les angles de bifurcation des fissures dans un matériau isotropique se répartissent majoritairement autour de 90° et 120°, ce qui correspond respectivement à l'angle optimal que fait une fissure pour en rejoindre une autre préexistante, et à l'angle d'un embranchement d'une fissure qui se propage en se séparant en deux branches. Cette distribution des angles de bifurcation serait un invariant des réseaux de fissures.

8.2.2.2 Données topologiques

L'arrangement spatial des fissures possède également des caractéristiques topologiques telles que la connectivité et la tortuosité. Pour définir la tortuosité moyenne T_2 d'un réseau bidimensionnel de fissures, Chertkov et Ravina (1999) considèrent un carré comprenant un nombre suffisant de fissures. Les fissures de type (2) (voir figure 8.6) sont interconnectées et forment des chemins continus à travers ce carré. Le nombre d'intersections de ces fissures avec le bord inférieur du carré multiplié par la dimension du côté du carré considéré donne la « longueur imaginaire » des fissures, correspondant à une tortuosité T_2 égale à 1. La tortuosité réelle du réseau de fissures est donnée par le rapport entre la longueur totale des fissures traversant le carré et la longueur imaginaire. Une tortuosité T_3 en trois dimensions se définit similairement en considérant les fissures contenues dans un cube. La connectivité c se définit comme le rapport entre le nombre de fissures connectées et le nombre total de fissures dans un espace donné (voir figure 8.7).

FIGURE 8.6 – Les différents types de fissures pour le calcul de la tortuosité et de la connectivité : (1) isolées, (2) connectées transversalement, (3) connectées localement (d'après Chertkov et Ravina, 1999).



FIGURE 8.7 – Différentes images de fissures rangées par ordre décroissant de connectivité, d'après Chertkov et Ravina (1999).

8.2.2.3 Indicateurs globaux

Il est possible de caractériser la structure d'un sol sur des échantillons de petite taille par certains indicateurs globaux : la densité apparente à l'état sec (rapport entre la masse des solides d'une part, et le volume des solides et des vides d'autre part), la porosité totale (rapport entre le volume des vides et de l'eau d'une part, et le volume total d'autre part), la porosité structurale (rapport entre le volume des vides non texturaux et le volume total).

Les différentes mesures peuvent être également étudiées sous un angle statistique. Le réseau de fissures peut ainsi se caractériser en termes de distribution de longueurs et de largeurs de fissures ou de distribution de tailles d'agrégats.

Dans sa thèse Samouëlian (2004) a proposé et mis au point un nouvel indicateur de la fissuration, nommé indice d'anisotropie apparent (AAI). Son calcul, très rapide, se fait à partir de la mesure de résistivité électrique du sol et permet d'avoir accès à la répartition spatiale de la présence d'hétérogénéités dans le sol. Cet indice constitue une approche originale et innovante pour la description qualitative de la fissuration. En effet, les tests numériques effectués montrent la sensibilité de l'indice AAI aux variations des paramètres géométriques de la fissure. Celui-ci renseigne sur la direction préférentielle de la fissure mais est également dépendant de l'épaisseur, de la profondeur et du pendage de la fissure.

8.2.2.4 Nombres de Minkowski

La caractérisation de la géométrie et de la topologie d'un motif peut être obtenue au moyen de l'analyse d'image morphologique. Ainsi, afin de faciliter la comparaison entre des fissures dans différents matériaux, et pour mieux décrire l'évolution quantitative d'un réseau particulier, Vogel et coll. (2005a) utilisent la géométrie intégrale et les d+1 nombres de Minkowski M_k pour caractériser un réseau de fissures dans un matériau isotrope (figure 8.8(a)), d étant la dimension de l'espace considéré. Pour un réseau bidimensionnel, M_0 est l'aire des fissures, M_1 est leur périmètre, M_2 est proportionnel au nombre d'Euler¹ du réseau. M_2 est donc une mesure topologique permettant de décrire la connectivité de la structure, sa valeur décroissant lorsque cette connectivité augmente (Michielsen et coll., 2002). De manière à pouvoir comparer des images de différentes tailles, Vogel et coll. rapportent ces quantités à l'aire de l'image, obtenant ainsi des *densités* de Minkowski. Pour quantifier une dynamique de formation des fissures, il suffit de calculer les densités sur une série temporelle d'images (figure 8.8(b)). Les auteurs utilisent également les *fonctions* de Minkowski, obtenues en calculant les densités de Minkowski sur des érosions morphologiques successives de l'image initiale (cette méthode est reprise et détaillée section 10.2.3.3).



(a) Formation de fissures par dessiccation de deux mélanges de sable et de bentonite d'un carré de 20 cm de côté.



(b) Différentes étapes de la formation de fissures par dessiccation dans le carré indiqué dans la figure de gauche.

FIGURE 8.8 – Étude d'un réseau de fissures d'après Vogel et coll. (2005a).

8.2.2.5 Dimension fractale

Comme de nombreux autres phénomènes ou systèmes naturels, le sol a souvent été étudié sous un aspect fractal, que ce soit pour décrire certaines de ses propriétés ou encore pour modéliser certains processus physiques (Perfect et Kay, 1995). À partir de photographies binarisées de sol fissuré, Velde (1999) utilise la dimension fractale de la distribution des pores dans l'espace 2D pour comparer et caractériser des réseaux de fissures dans des sols de type différent, au moyen de la méthode du comptage de boîtes (*box counting method*). Son étude montre d'une part que la dimension fractale, pour les sols cultivés, offre une large étendue de valeurs, et que d'autre part, il existe une relation claire entre la porosité et la distribution des pores dans l'espace 2D, dépendant du matériau (figure 8.9). Cette relation est indépendante de

^{1.} Le nombre d'Euler est un invariant topologique, égal en 2D au nombre de composantes connexes d'une figure moins le nombre de ses trous. Dans le cas des fissures, cela correspond au nombre de boucles dans le réseau de fissures moins le nombre de fissures isolées (Vogel et coll., 2005b).



FIGURE 8.9 – Relation entre l'aire des fissures et la dimension fractale, d'après Velde (1999).

l'aire observée, et fait notamment apparaître que, surtout pour les sols cultivés, l'irrégularité décroît quand la surface des fissures augmente. Dans sa conclusion, Velde émet l'idée que cette relation entre l'aire de fissuration et la dimension fractale pourrait être utilisée pour identifier les processus de retrait. Dans un autre article, Velde (2001) avance l'hypothèse que l'augmentation de la dimension fractale pourrait provenir de l'existence de deux types de porosité, avec une dimension fractale différente, et de l'évolution du rapport quantitatif entre ces deux porosités qui ferait passer d'une dimension à l'autre.

8.3 Modèles de fissuration

La seconde partie de ce chapitre est consacrée à un état de l'art assez large des modèles existants, en science du sol et en informatique graphique. Dans ce dernier domaine, il nous faut précisément établir une distinction qui écarte d'emblée un grand nombre de travaux. En effet, les travaux d'informatique graphique concernant la reproduction de fissures se répartissent en deux grandes catégories :

- 1. les modèles utilisant les fissures pour créer de grandes discontinuités dans la matière, cherchant à reproduire le processus de bris d'un objet par la suite de l'application d'une force extérieure (voir figure 8.10), nous emploierons le terme de fracture dans ce cas;
- 2. les modèles utilisant les fissures pour créer de petites discontinuités à la surface de l'objet, cherchant à reproduire le dessin du réseau de fissures, dues par exemple au vieillissement; le terme utilisé sera alors fissuration. Les fissures produites par ce type de processus sont considérées comme quasi-statiques et leur apparition ne nécessite aucune force extérieure.

La première catégorie rassemble un nombre important d'articles, car elle est d'un intérêt évident pour l'animation et pose des problèmes aigus de réalisme, mais nous ne nous y arrêterons pas, car la fissuration d'un sol entre dans la seconde catégorie.

Les modèles de fissuration quasi-statique peuvent être répartis grossièrement en quatre classes :



FIGURE 8.10 – Quatre bols, avec une solidité décroissante, tombant d'une même hauteur, d'après O'Brien et Hodgins (1999).

- 1. de nombreux modèles ont été basés sur les lois physiques afin de véritablement simuler une dynamique de fissuration, notamment par l'utilisation de la méthode des éléments finis;
- 2. certains modèles directement issus de la science du sol s'appuient en priorité sur les propriétés structurelles ou hydriques du sol, liant notamment la création et la dynamique des fissures à l'évolution de la teneur en eau ;
- 3. il existe des modèles uniquement basés sur la géométrie, qui proposent des algorithmes tentant de produire des motifs de fissures proches de ceux présents dans la nature;
- 4. en informatique graphique, certains modèles se basent sur une approche phénoménologique 2 visant essentiellement à obtenir des résultats visuellement plausibles.

Nous verrons au chapitre suivant que le modèle de fissuration que nous proposons se situe à l'intersection des trois dernières classes de cette liste.

8.3.1 Modèles basés sur les propriétés du sol

8.3.1.1 Hallaire

Dans sa thèse Samouëlian (2004) cite le travail de Hallaire (1988a, 1988b) qui propose une évolution morphologique 3D du réseau de fissures, à partir d'observations 2D de surface sur des échantillons décimétriques soumis à une expérimentation de dessiccation. Hallaire distingue deux phases au cours du retrait :

- 1. une première phase de retrait, dite de *fragmentation*, qui est à l'origine de l'écartement des éléments structuraux par l'ouverture de multiples microfissures;
- 2. une seconde phase de retrait, qualifiée de *prise en masse*, qui est à l'origine d'un rapprochement entre les éléments structuraux élémentaires formant ainsi des éléments structuraux de tailles supérieures délimités par un réseau plus lâche de fissures.

Le passage de la première phase à la seconde se fait pour un seuil de teneur en eau observé proche de 23%, dans un sol à 50% d'argile. Le modèle morphologique proposé repose sur ces observations. Le sol est modélisé comme un assemblage emboîté de peds ³, associés en mottes, regroupées en couches. Les hypothèses sont les suivantes :

1. les peds, mottes, et couches de sol suivent une géométrie cubique (figure 8.11);

^{2.} Une modélisation phénoménologique vise à reproduire les comportements observés d'un système sans recourir à une connaissance théorique de ces comportements ou du système.

^{3.} Les peds (ou pèdes) sont les unités structurales naturelles élémentaires du sol (Moureau et Brace, 2000).

- 2. le retrait isotropique et linéaire des éléments du sol est inversement proportionnel à l'humidité pondérale;
- 3. les fissures intra-mottes et inter-mottes sont, soit verticales, soit horizontales, et constituent donc un réseau de fissures toujours orthogonal.



FIGURE 8.11 – Modèle morphologique de Hallaire (1988b).

Ces hypothèses simplificatrices de la géométrie induisent que la largeur des fissures est fixe, ne pouvant ainsi refléter des géométries plus complexes telles que les étranglements et les élargissements. Ces résultats de modélisation restent basés sur des observations bidimensionnelles qui sont, par la suite, généralisées à une organisation tridimensionnelle de la structure.

8.3.1.2 Chertkov et Ravina

Chertkov et Ravina (1998) proposent un modèle géométrique de fissuration probabiliste quasi physique qui décrit les changements de structure du sol par le biais des changements de propriétés hydriques telles que la teneur en eau. Ils introduisent deux paramètres : la profondeur maximale d'une fissure z_m et l'épaisseur z_0 de la couche supérieure dite couche « intensément fissurée » (intensive-cracking layer). Ces paramètres leur permettent d'estimer, avec une courbe de retrait linéaire du sol, les distributions de la largeur des fissures, l'aire des zones de fissures et le volume des fissures en fonction de la profondeur du sol et de la pente des fissures. Les auteurs précisent qu'à son état initial la couche supérieure vérifie $z_0 \approx 0.1 z_m$ et atteint $0.2 z_m$ à l'état stable du réseau de fissures. Chertkov (2000) vérifie par des données expérimentales sur 10 profils de sol de différentes zones géographiques, que l'espacement moyen S entre les fissures à la surface, qui est facilement mesurable, est comparable à la profondeur z_0 de la couche fissurée, c'est-à-dire $z_0 \approx S$. Ce résultat permet donc la prédiction, sous certaines conditions, des caractéristiques géométriques d'un réseau de fissures. Dans un article plus récent Chertkov (2002) montre qu'il existe des relations entre d'une part la dimension caractéristique des fissures l*, définie comme la taille minimale d'une fissure capable de se propager lors de la contraction du sol et reliée aux propriétés physiques de ce sol, et d'autre part certaines dimensions caractéristiques du réseau de fissures. Ces travaux donnent des indications sur ce que doit vérifier un réseau de fissures réel ou réaliste, mais en négligeant la topologie de ce réseau ainsi que la propagation dynamique des fissures.

8.3.1.3 Voltz et Cabidoche

Dans sa thèse Samouëlian (2004) cite le travail de Voltz et Cabidoche (1995) qui se basent sur des travaux expérimentaux sur les phénomènes de retrait-gonflement dans les Vertisols de la Guadeloupe pour proposer un modèle permettant de relier le mouvement macroscopique vertical du sol à ses variations de teneur en eau : une couche de sol est modélisée par un assemblage de cubes homogènes de même volume. Les auteurs distinguent parmi eux deux types différents, ceux composés de deux phases « solide et eau » et ceux composés d'une seule phase « air ». Lors des processus de dessiccation (ou d'humectation) chaque cube subit un retrait (ou un gonflement). Ce modèle repose sur trois hypothèses, relatives à la géométrie du système :

- 1. la variation des cubes est isotrope,
- 2. le retrait ou gonflement est normal,
- 3. la fissuration est uniquement verticale.

L'accord entre données mesurées expérimentalement et simulées numériquement est satisfaisant. Cependant le modèle n'a été validé que dans le cas spécifique étudié sur des argiles à smectite de Guadeloupe en condition de dessèchement. De plus ce type de modélisation se base uniquement sur un bilan de volume et ne tient compte, ni de la distribution spatiale des fissures, ni de la géométrie réelle du réseau de fissures.

8.3.2 Modèles géométriques

8.3.2.1 MacVeigh

MacVeigh (1995) propose un partitionnement binaire de l'espace à deux dimensions considéré, qui peut simuler une formation de fissures. Ce partitionnement est basé sur les observations suivantes :

- 1. les fissures tendent à avoir des intersections à angle droit,
- 2. leur longueur tend à être minimisée.

Sur ces bases l'auteur montre comment trouver un segment d'intersection, entre un point et un contour, qui respecte ces critères. Les contours, ainsi que les segments d'intersection, sont formés de segments de lignes et d'arcs de cercle. Pour former un ensemble de fissures dans un contour fermé, un point est choisi aléatoirement à l'intérieur puis un segment reliant le point au contour est calculé de manière à être le plus court possible. Un nombre prédéterminé de points et de segments sont ainsi ajoutés. Cette méthode est plus algorithmique et mathématique que réaliste. En particulier aucune notion physique, comme la tension dans la surface, n'est simulée, et la forme des fissures est limitée aux segments de droite et arcs de cercle, ce qui peut en limiter le réalisme visuel.

8.3.2.2 Horgan et Young

Horgan et Young (2000) proposent un modèle stochastique et empirique de fissures bidimensionnelles basé sur trois principes (figure 8.12) :

- 1. une propagation aléatoire en deux dimensions,
- 2. une fragmentation des agrégats d'une taille supérieure à un certain seuil,
- 3. une attraction entre les fissures à partir d'une certaine distance.





(a) Les fissures partent d'un point tiré aléatoirement et croissent par marche aléatoire jusqu'à rejoindre une autre fissure ou un bord.

(b) Des sous-fissures (en violet) partent orthogonalement de points aléatoires sur les premières fissures.



(c) D'autres points de départ sont tirés pour diviser l'aire des plus gros agrégats en deux.



(d) Ce processus se répète jusqu'à ce que tous les agrégats aient une aire inférieure à un seuil.

FIGURE 8.12 – Détail des trois étapes du modèle stochastique de Horgan et Young (2000).

Ce modèle ne permet pas l'apparition de branches mortes ⁴, puisque toute fissure rejoint soit une autre fissure, soit une frontière. La largeur des fissures produites est constante. Comme le font remarquer les auteurs, ces points pourraient être facilement ajoutés dans leur procédure. Ce modèle ne tient pas compte de l'épaisseur et ne permet pas différents types de connexion. Les paramètres utilisés sont purement géométriques (nombre de fissures à l'état initial, taille des agrégats à l'état final, élongation des fissures, taux d'attraction des fissures, angle maximum de changement de direction) et ne peuvent être rattachés de façon évidente à des caractéristiques physiques du sol considéré (notamment la teneur en eau). Enfin, bien que les différents paramètres du modèle aient été calés d'après des réseaux de fissures naturels, l'aspect visuel présente une homogénéité supérieure à celle observable dans la réalité.

8.3.2.3 Perrier et coll.

Afin d'étudier les relations entre les propriétés hydrodynamiques et structurales d'un sol, Perrier et coll. (1995a, 1995b) construisent un sol virtuel poreux en deux dimensions. Les surfaces représentent des volumes et sont extrapolées à trois dimensions à l'aide d'hypothèses simples pour obtenir des résultats numériques. La méthode repose sur la répétition sur plusieurs niveaux d'un algorithme de fragmentation comportant une tessellation de Voronoï suivie par une réduction homothétique (voir figure 8.13). Les auteurs obtiennent ainsi un modèle fractal (c'est-à-dire présentant la propriété d'auto-similarité pouvant être caractérisée par un nombre unique, la dimension fractale). En variant le rapport d'homothétie k à différents niveaux, il est possible d'obtenir différents volumes poreux et également de faire apparaître les contours d'agrégats de différentes tailles ou de simuler une dynamique de dessiccation (voir figure 8.14).

^{4.} L'appellation « branche morte » caractérise une fissure dont l'une des extrémités ne rejoint pas une autre fissure et ne se partage pas non plus en deux fissures.



Chaque zone est réduite homothétiquement autour de son centre de gravité avec un rapport constant k (ici k=0.8).

FIGURE 8.13 – Construction du modèle fractal (ici sur un niveau) d'après Perrier et coll. (1995a).

mentation à ces points.



FIGURE 8.14 – Trois représentations d'une même fragmentation en 10^4 particules (c.-à-d. zones de niveau 4) d'après Perrier et coll. (1995a).

Remarquons néanmoins que le squelette de la structure est invariant, il ne peut donc y avoir de propagation de fissure dans ce modèle mais seulement un élargissement de ces fissures. Une déformation anisotropique (en remplaçant la réduction homothétique par une composition de deux transformations affines selon les directions de l'espace avec des rapports k_x et k_y différents) est également envisagée par les auteurs. Une structure « désordonnée » peut être aussi obtenue en tirant aléatoirement la position du centre de l'homothétie (Perrier et coll., 1995b). Ces deux extensions demandent la prise en compte et l'élimination des cas dégénérés où il se produit un recouvrement de certaines zones. L'évaluation de la construction de la structure par dimension fractale s'effectue par une validation indirecte en comparant les courbes de rétention en eau expérimentale et numérique.

8.3.3 Modèles à base physique

8.3.3.1 Skjeltorp et Meakin

Un modèle de formation et de propagation de fissures dues à la contraction d'un matériau déposé sur un support statique a été proposé par Skjeltorp et Meakin (1988). Le matériau déposé est modélisé par une couche de micro-sphères identiques maintenues par deux fines plaques de verre parallèles. Le diamètre des sphères diminue progressivement à cause de leur dessiccation, amenant l'apparition de fissures. La couche de matériau est discrétisée par un réseau hexagonal de masses-ressorts (figure 8.15a). Les connexions entre les plaques et les sphères sont modélisées par des ressorts d'ancrage qui approximent la friction statique et cinétique. Chacun de ces ressorts relie une masse ponctuelle à un point d'ancrage sur une plaque. Les propriétés des ressorts d'ancrage sont différentes de celles des ressorts de matériau : leurs coefficients de raideur sont différents et leur longueur de repos est nulle. Tous les ressorts obéissent à la loi de Hooke (l'allongement est proportionnel à la force). La contraction des micro-sphères est modélisée par la réduction de la longueur au repos des ressorts du matériau. Comme chaque masse ponctuelle est attachée à une plaque, cette réduction provoque un accroissement de la tension dans la couche de matériau. La longueur de certains des ressorts de matériau peut atteindre un seuil : ils sont alors cassés, ce qui provoque une instabilité dans le voisinage par une baisse de la tension sur quelques ressorts et une hausse sur d'autres. La fissure peut alors se propager. Les fissures ainsi produites ressemblent à celles observées sur des couches fines de peinture ou encore sur des céramiques (figure 8.15b). Cependant l'arrangement régulier des micro-sphères conduit à favoriser six directions de fissuration.



FIGURE 8.15 – Modèle de Skjeltorp et Meakin (1988).

8.3.3.2 Federl et Prusinkiewicz

Le modèle de Skjeltorp et Meakin a été adapté par Federl (2002) par l'ajout de la possibilité d'une croissance de la couche statique. Il simule la formation de fissures sur l'écorce des arbres et à la surface de la boue en considérant deux couches : pour les arbres, une couche intérieure (le tronc) croissant rapidement et entourée par une couche peu ou pas déformable (l'écorce); pour la boue, une couche séchant rapidement en surface sur une couche séchant beaucoup plus lentement en sous-sol. Federl (2002) puis Federl et Prusinkiewicz (2004) ont également introduit cette notion d'expansion (ou de rétraction) dans le cadre de la méthode des éléments finis suivant en cela la méthode de O'Brien et Hodgins (1999) qui l'ont appliquée au bris d'objets pour déterminer les points d'initiation des fractures et leur direction de propagation. Dans cette méthode, il est nécessaire de remailler l'objet lors des fractures et d'utiliser un pas de temps fin. Elle donne de bons résultats visuels (figure 8.16) même si elle ne semble pas capable de produire des branches mortes.





FIGURE 8.16 – Modèle de Federl (2002).

8.3.3.3 Hirota et coll.

Hirota et coll. (1998) utilisent également un système masse-ressort 2D en liant la formation et la propagation des fissures aux notions de stress et de tension. Le maillage est soit tetragonal, soit hexagonal, les résultats étant meilleurs avec ce dernier type de maillage. Leur algorithme utilise deux pas de temps différents : un pas fin pour évaluer le mouvement des nœuds (position et vitesse), un pas plus large pour évaluer la contraction ou l'expansion de la couche simulée. Les auteurs ont étendu cette méthode à des volumes (Hirota et coll., 2000), simulant les fissures à l'intérieur d'un objet modélisé par un assemblage de cubes de 4 mm de côté, eux-mêmes subdivisés en cinq tetrahèdres dont chaque côté est un ressort. Les caractéristiques des ressorts varient avec le temps afin de reproduire les conséquences de l'évaporation, et peuvent se briser sous certaines conditions. Ils supposent que l'humidité de l'intérieur de l'objet ne varie pas, contrairement à celle de sa surface. Leur méthode est testée sur un parallélépipède rectangle en porte à faux (*cantilever*) et un cube d'argile soumis à la dessiccation (figure 8.17). La structure du réseau et la résolution du modèle ne sont pas modifiées par l'apparition de fissures ce qui provoque un aliasage très visible.



(a) Fissures bidimensionnelles (maillage hexagonal).

(b) Fissures tridimensionnelles sur un cube d'argile (40 mm de côté), réelles (en haut) et simulées (en bas, avec $10 \times 10 \times 10$ cubes élémentaires).

FIGURE 8.17 – Modèle de Hirota et coll. (1998, 2000).

8.3.3.4 Hoffman, Vogel et coll.



premiers ressorts.

(b) Fissures obtenues en variant les paramètres du modèle.

FIGURE 8.18 – Modèle de Vogel et coll. (2005b).

Hoffmann (2000) ainsi que Vogel et coll. (2005b) cherchent à capturer la nature du processus de fracture pour reproduire les caractéristiques d'un réseau de fissures (figure 8.18). La base de leur modèle est un maillage triangulaire 2D de nœuds reliés par des ressorts qui se cassent quand une tension critique est atteinte. Quand un ressort se casse, la distribution du stress dans son voisinage immédiat est modifiée et influe donc sur le développement de la fissure. La dessiccation est simulée par la réduction de la taille naturelle du ressort, ce qui augmente sa force de contraction. Le mouvement des nœuds est la conséquence des forces qui lui sont appliquées par les ressorts qui leur sont encore attachés, lorsque ces forces sont supérieures à un certain coefficient de frottement. Le calcul de la relaxation du stress et des mouvements des nœuds se fait itérativement à partir des nœuds voisins d'une fissure jusqu'à atteindre un nombre maximal d'itérations. L'équilibre peut donc ne pas être atteint avant qu'un autre ressort se casse. Les auteurs utilisent des méthodes détaillées dans un autre article (basées notamment sur les nombres de Minkowski, voir section 8.2.2.4) pour établir des comparaisons quantitatives de leurs simulations de fissures.

8.3.3.5 O'Brien et coll.



FIGURE 8.19 – Différents paramétrages permettent de varier le degré de ductilité d'un matériau, heurté ici par un projectile, d'après O'Brien et coll. (2002).

O'Brien et Hodgins (1999) sont parvenus à modéliser des fractures fragiles par la méthode des éléments finis, en produisant des animations très convaincantes (figure 8.10, page 214). Par la suite, O'Brien et coll. (2002) ont appliqué cette approche aux fractures ductiles, en obtenant là encore des images très réalistes (figure 8.19), cependant toujours au prix de longs temps de calculs. Plus récemment, Iben et O'Brien (2006) se sont intéressés aux fractures quasi-statiques, dont font partie les fissures du sol (figure 8.20), et ont proposé une méthode basée sur une discrétisation surfacique par la méthode des éléments finis. Ils parviennent à fissurer toute surface maillée à partir de la définition, par une méthode basées sur des heuristiques et non par un calcul précis de la déformation élastique de l'objet, de champs de stress et d'une relaxation de ce stress autour des fissures. Les fissures apparaissent sur des sommets du maillage et sont propagées à l'aide de remaillages locaux. Ils ajoutent également un effet de « retroussement » (*curling effect*) par déplacement vertical des sommets, dont l'amplitude est définie par l'utilisateur.



FIGURE 8.20 – Surface de boue se desséchant, d'après Iben et O'Brien (2006).

8.3.4 Approches phénoménologiques

8.3.4.1 Gobron et Chiba

Gobron et Chiba (2001) utilisent leur modèle d'automates cellulaires 3D surfaciques 3DSCA (*3D Surface Cellular Automata*, Gobron et Chiba, 1999) pour simuler la formation et la propagation de fissures du type de celles qu'on retrouve principalement sur les céramiques. Les objets modélisables doivent donc pouvoir être décomposés en couches. Le stress dû à une déformation est modélisé par un « spectre de stress » (*stress spectrum*) suivant 8 directions



FIGURE 8.21 – Illustration de la méthode de Gobron et Chiba (2001).

privilégiées (voir figure 8.21(a)) et parallèles à la surface. En effet les auteurs font l'hypothèse que l'aire de la couche est beaucoup plus importante que son épaisseur et que donc la dimension orthogonale à la surface peut être ignorée (ils précisent que l'épaisseur ne doit pas excéder de beaucoup la dimension d'une cellule). De plus ils ne simulent aucun stress entre les couches. Ce spectre de stress est défini pour chaque cellule et calculé proportionnellement à la différence d'épaisseur entre deux cellules voisines et à la courbure de la couche dans la direction correspondante. Une fissure se forme lorsque le stress dans une cellule est supérieur à un seuil dans une certaine direction. Les fissures sont représentées par une suite de segments de ligne et se propagent indépendamment des cellules du modèle. La propagation des fissures tient compte du stress courant, et les fissures formées relâchent le stress dans leur voisinage approximé par un rectangle (voir figure 8.21(b)). Les paramètres contrôlant les propriétés des matériaux sont peu intuitifs (pourcentage de redistribution de stress, nombre de redistributions), mais compréhensibles si on connaît les calculs qu'ils contrôlent. Avec un rendu approprié détaillé dans l'article, la méthode donne de bons résultats visuels pour plusieurs exemples (voir figure 8.22) même si aucun ne correspond véritablement à une fissuration de sol cultivé.



(a) Fissures simulées sur un bloc d'argile virtuel.



(b) En haut, fissures préparatoires à un écaillement. En bas, fissures simulées sur une céramique.

FIGURE 8.22 – Résultats de Gobron et Chiba (2001).

8.3.4.2 Paquette et coll.

Paquette et coll. (2002) proposent une méthode de fissuration qui n'est pas basée sur les automates cellulaires, mais qui est cependant inspirée par le modèle de Gobron et Chiba. En effet, Paquette et coll. étendent ce modèle en y ajoutant des notions d'adhésion et de retroussement afin de reproduire les écaillures d'une couche de peinture. Leur méthode, limitée à des surfaces planes, repose sur la prise en compte de quatre facteurs au sein de la couche de peinture : le stress, la résistance, l'élasticité et l'adhésion. Même si la méthode d'initialisation par des textures permettant de définir les propriétés de la peinture ou de la surface de base, par exemple les différentes zones de tension, ne permet pas de tenir compte de particularités environnementales variables, les résultats sont visuellement réalistes (figure 8.23); cependant ils restent assez éloignés d'un réseau de fissures d'un sol cultivé. De plus certaines hypothèses posées pour cette méthode, qui sont valides dans le cas d'une surface peinte, ne peuvent être reprises dans le cadre de la fissuration du sol, notamment celle d'une couche infiniment mince sur une autre couche infiniment épaisse.



FIGURE 8.23 – Écaillures de peinture synthétiques obtenues par Paquette et coll. (2002).

8.3.4.3 Desbenoit et coll.

Desbenoit et coll. (2005) proposent une méthode pour ajouter des fissures à un maillage 3D, en deux étapes. Tout d'abord, il faut établir un patron du dessin des fissures, à partir de photographies de fissures réelles, grâce à un éditeur spécifique. Ce patron définit le réseau 2D des fissures, qui peut être soit perturbé par une fonction de bruit, soit au contraire lissé, ainsi que la géométrie de leur section, qui est interpolée pour caractériser pleinement l'intérieur de toutes les fissures. Ensuite intervient la création proprement dite des fissures, qui sont projetées sur le maillage de l'objet en respectant les normales locales. L'objet fissuré est calculé par différence booléenne entre son volume initial et les volumes des fissures considérées comme des cylindres généralisés. Cette méthode semi-automatique produit des images très intéressantes (figure 8.24) dans lesquelles cependant le talent de l'utilisateur intervient grandement, même s'il peut être assisté par certaines fonctionnalités de l'éditeur dédié et par l'existence d'un atlas de fissures génériques. Un grand défaut de ce modèle est qu'il ne peut prendre en compte des zones entièrement fermées par des fissures (le chemin de fissuration est représenté par un graphe qui ne peut comporter de cycle), ce qui est pourtant un cas très courant dans les fissures d'un sol (voir par exemple la figure 8.4, page 209).



FIGURE 8.24 – Fissures créées sur une coquille d'œuf et sur la statue d'Aphrodite par la méthode proposée par Desbenoit et coll. (2005).

8.4 Conclusion

Au terme de cet état de l'art, il apparaît que le choix fondamental à faire est de décider entre d'une part une modélisation des fissures en tant qu'objets indépendants agissant sur les caractéristiques du sol sans modifier sa structure (modèles géométriques, automates cellulaires), ou d'autre part une modélisation des fissures en tant que modification intrinsèque de cette structure (modèles masse-ressort ou éléments finis). D'autre part, si nous désirons pouvoir reproduire une propagation réaliste des fissures (notamment en prenant en compte leurs volumes), les modèles purement géométriques sont à écarter. Il se peut néanmoins que l'utilisation de certaines de leurs contraintes soit un moyen de garantir un aspect caractéristique du réseau de fissures produit.

La plupart des méthodes de simulation de la fissuration ne comportent qu'une phase, or d'après Hallaire (section 8.3.1.1) il existe deux phases : une phase de formation et propagation des fissures pendant laquelle la longueur totale du réseau augmente, suivie d'une phase d'élargissement des fissures pendant laquelle cette longueur n'augmente plus (ce que reproduit le modèle de Perrier à partir d'un squelette invariant, voir section 8.3.2.3). Nous allons nous inspirer de l'existence de ces deux phases, en séparant le calcul du réseau de fissures du calcul de leur élargissement, en faisant l'hypothèse que la dynamique du processus n'influence pas le réseau possible de fissures.

Notre modèle structurel cellulaire de sol, utilisé pour la dégradation de sa surface, ressemble fortement à la modélisation proposée par Hallaire (section 8.3.1.1) et Voltz et Cabidoche (section 8.3.1.3). Il semble donc légitime de modéliser le retrait du sol en conservant ce modèle géométrique et en faisant se rétracter chaque cellule parallépipédique élémentaire, ce processus entraînant un stress de la couche de sol. Cette modélisation sous forme d'un espace cellulaire offre de plus l'avantage de permettre un lien direct entre les résultats d'une simulation de dégradation de sol et l'état initial d'un sol à fissurer. La première question à résoudre est donc d'exprimer l'évolution de ce retrait au cours du temps, et de définir les modalités de son action sur la dynamique de fissuration (création, propagation, élargissement des fissures).

À cause de la complexité des phénomènes mis en jeu, une simulation physique comme

la simulation par éléments finis semble devoir être écartée. En effet, ce type d'approche est pertinent lorsque l'on possède un modèle précis décrivant le phénomène, comme c'est le cas de la simulation de ruptures fragiles de matériaux homogènes (O'Brien et Hodgins, 1999). En revanche, elle n'est pas indiquée lorsque le phénomène dépend de nombreux paramètres mal connus et délicats à mettre en évidence. D'autre part, il ne s'agit pas pour nous d'obtenir des informations quantitatives sur les propriétés d'un matériau comme le demandent les études d'ingénierie où les éléments finis sont abondamment utilisés, mais bien de simuler qualitativement le comportement d'un milieu hétérogène à un niveau macroscopique. Nous privilégierons donc une approche phénoménologique qui sera décrite en détails dans le prochain chapitre.

Chapitre 9

Modèle de fissuration

Sommaire

9.1	Introduction			
9.2	Desc	Description formelle 229		
	9.2.1	Modèle o	couplé P-DEVS	
	9.2.2	Modèle a	atomique du sol $\ldots \ldots 230$	
9.3	3 Modèle structurel			
	9.3.1	Terrain		
		9.3.1.1	Description	
		9.3.1.2	Initialisation	
	9.3.2	Fissures		
		9.3.2.1	Méthode de Horgan et Young	
		9.3.2.2	Tessellation de Dirichlet	
		9.3.2.3	Ligne de partage des eaux	
9.4	\mathbf{Mod}	lèle fonct	tionnel	
	9.4.1	Évolutio	n des fissures $\ldots \ldots 236$	
		9.4.1.1	Création des fissures	
		9.4.1.2	Progression des fissures	
		9.4.1.3	Création et progression hiérarchiques	
		9.4.1.4	Élargissement des fissures	
	9.4.2	Calcul et	t propagation des volumes de retrait	
		9.4.2.1	Définition des volumes de retrait	
		9.4.2.2	Calcul des volumes de retrait	
		9.4.2.3	Propagation des volumes de retrait	
		9.4.2.4	Retrait vertical $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 247$	
9.5	Con	clusion .	249	

9.1 Introduction

Nous cherchons à modéliser et reproduire visuellement, dans un objectif plus orienté vers l'obtention d'images réalistes que de simulation prédictive, les caractéristiques principales des fissures verticales qui se forment à la surface d'un sol croûté soumis à dessiccation : la structure 2D du réseau qu'elles forment, leurs différentes largeurs (et, dans une moindre mesure, leurs profondeurs) et leur dynamique de création et d'évolution. Nous nous intéressons à une fissuration verticale quasi 2D puisqu'elle concerne un sol comportant une croûte de quelques millimètres de profondeur et faiblement solidaire de la couche sous-jacente. Nous présentons dans ce chapitre notre modèle de fissuration, qui se base une cinétique de dessiccation continue. Afin de maintenir la cohérence de notre démarche, nous utiliserons le formalisme P-DEVS pour décrire formellement ce modèle et le cadre expérimental qui le contient et définit une simulation (voir chapitre 1). Même si notre modèle ne fait intervenir que le seul processus de dessiccation, ce qui le rend beaucoup plus simple formellement que le modèle de dégradation du sol, notamment avec l'inutilité de la prise en compte d'évènements externes, cette formalisation offre l'avantage de séparer nettement ce qui est du ressort d'abord de l'initialisation, qui joue un grand rôle dans notre méthode, ensuite du modèle de calcul de la fissuration proprement dit, et enfin de la production d'images, point qui sera abordé dans le chapitre suivant.

Nous avons vu au chapitre précédent que de nombreux modèles de fissuration existent, tant en science du sol qu'en informatique graphique. Nous avons voulu avec ce travail tenter d'aborder la fissuration sous un angle résolument phénoménologique, en cherchant à calculer l'évolution des fissures par une méthode tirant parti de connaissances et de données venant de la science du sol (notamment la géométrie du réseau de fissures à la surface, l'évolution de la teneur en eau et la courbe de retrait du sol), qui vont permettre d'obtenir un aspect visuel et une dynamique d'évolution réalistes. Comme dans la plupart des méthodes de fissuration existantes, nous utilisons une fonction de stress. L'originalité de notre méthode est que nous ne recourons pas à une définition aléatoire ou basée sur une heuristique 1 de ce stress, nous le relions directement aux caractéristiques de la couche à fissurer et au processus physique de contraction de matière. Cette approche nous a amenés à introduire et utiliser un concept nouveau, celui de volume de retrait. Bien évidemment, il était également important de pouvoir relier ce modèle de fissuration aux résultats de simulation venant du modèle de dégradation des sols, ce qui a fortement induit sa structure cellulaire mais également les informations disponibles lors de l'initialisation (typiquement l'épaisseur de la croûte). Ce dernier point nous a conduits à proposer un calcul des chemins de fissuration basé sur une technique classique en analyse d'images : la ligne de partage des eaux.

Après une première partie consacrée à la description formelle du modèle parallèle couplé de la fissuration du sol, et du modèle atomique du terrain lui-même, nous donnerons les détails de la structure de notre modèle, en précisant notamment comment peuvent être initialisés les chemins de fissuration. La dernière partie sera dévolue au fonctionnement du modèle, qui repose sur les concepts d'évolution des fissures, de calcul et de propagation des volumes de retrait. Ce fonctionnement permet de répondre à deux approches différentes : soit la production d'un réseau de fissures générique, sans partir d'information particulière, et qui puisse par exemple donner une image plausible d'un sol fissuré, soit la production de fissures réalistes dans un contexte précisé par l'utilisateur (par exemple une courbe de retrait spécifique), avec des propriétés cohérentes qui puissent évoluer dans le temps.

^{1.} Une heuristique est une règle qu'on a intérêt à utiliser en général, parce qu'on sait qu'elle conduit souvent à la solution, bien qu'on n'ait aucune certitude sur sa validité dans tous les cas (Carré et coll., 1991).
9.2 Description formelle

9.2.1 Modèle couplé P-DEVS

Notre modèle de fissuration est basé sur l'évolution d'un espace cellulaire qui sera décrit en détails dans la section 9.3.1. Sa description formelle s'appuie donc sur la correspondance entre le modèle *CellSpace* et le modèle P-DEVS (voir la section 3.3.2), et notre modèle couplé P-DEVS reprend le concept de cadre expérimental défini par Zeigler et coll. (2000) qui comprend le modèle atomique cellulaire, et se décompose en un générateur, un interpréteur et un accepteur (figure 9.1).



FIGURE 9.1 – Le modèle couplé P-DEVS de la fissuration du sol.

Le générateur fournit au modèle des entrées pendant la simulation. Dans notre cas, la fissuration est considérée comme une évolution autonome du sol, il n'est donc pas besoin d'évènements externes. Le générateur est par conséquent responsable uniquement de l'initialisation du modèle. L'étape d'initialisation est très importante dans notre méthode (elle correspond à la partie « générateur » de la figure 9.8) et sera détaillée dans la partie décrivant le modèle structurel (section 9.3).

L'interpréteur reçoit du modèle cellulaire l'état du sol et l'ensemble des informations brutes concernant les fissures. Nous verrons dans le chapitre 10 comment l'interpréteur transforme ces entrées en images ou en animations. L'un des intérêts majeurs de cette description à l'aide du cadre expérimental est de faire une distinction claire entre la méthode de fissuration et les choix de visualisation (distinction mise en évidence par les trois parties de la figure 9.8), ce qui nous permet d'insister sur la possibilité d'améliorer ces choix sans avoir besoin de modifier le modèle de fissuration.

Le rôle de l'accepteur est d'indiquer si la simulation peut se poursuivre ou non. Cette décision peut être basée sur un critère décidé lors de l'initialisation (le plus immédiat étant un seuil limitant la durée simulée, mais ce peut être par exemple un critère choisi pour respecter le réalisme de la fissuration, tel la longueur maximale des fissures). L'accepteur peut également simplement traduire la volonté de l'utilisateur d'interrompre la simulation, par exemple lorsqu'il juge que l'image transmise par l'interpréteur lui convient – critère qui peut difficilement être traduit par une procédure automatique. Formellement, le modèle couplé P-DEVS SF de la fissuration du sol se définit donc par la structure suivante, illustrée par la figure 9.1 :

$$SF = \langle X, Y, D, \{M_d\}, \{I_d\}, \{Z_{id}\} \rangle$$

où :

X est l'ensemble des évènements d'entrée, c'est-à-dire les indications vers le générateur provenant du monde extérieur, qui correspond dans notre cas aux données d'initialisation rassemblées dans un fichier.

Y est l'ensemble des évènements de sortie, venant soit de l'interpréteur (dans notre cas des images, des courbes) ou de l'accepteur (la décision « oui » ou « non »).

 $D = \{g, i, a, c\}$ est l'ensemble des identifiants des composants du modèle couplé.

Pour tout $d \neq D$, M_d est un composant, donc un modèle P-DEVS : M_g est le générateur, M_i est l'interpréteur, M_a est l'accepteur et M_c est l'espace cellulaire.

Pour tout $d \text{ de } D \cup \{SF\}$, I_d est l'ensemble des influences entre composants, représentées par des flèches dans la figure 9.1 et qui ont été décrites ci-dessus.

Pour tout i de I_d , Z_{id} est l'ensemble des fonctions d'interprétation sortie-entrée entre i et d, qui sont dans notre cas simplement des fonctions identité, puisque les informations échangées entre composants sont directement identifiées et interprétables (valeurs de paramètres ou de variables).

La section suivante est consacrée à la description du modèle atomique du sol, correspondant au composant M_c .

9.2.2 Modèle atomique du sol

Nous avons vu au chapitre 3 qu'il est possible de considérer un automate cellulaire étendu comme un modèle atomique *CellSpace*, qui est lui-même équivalent à un modèle atomique P-DEVS. C'est donc cette dernière structure que nous utilisons pour définir formellement notre modèle atomique de sol pour la fissuration :

$$M_{c} = \langle X, S, Y, \delta_{int}, \delta_{ext}, \delta_{con}, \lambda, ta \rangle$$

où :

X est l'ensemble des évènements d'entrée, qui ne comprend que les informations d'initialisation.

Y est l'ensemble des évènements de sortie, c'est-à-dire l'état du terrain et le graphe des fissures, qui sont transmis à l'interpréteur.

S est l'ensemble des états, soit les états du graphe des fissures (section 9.3.2) et l'ensemble des états des variables contenues dans les cellules (section 9.3.1).

 δ_{int} est la fonction de transition interne, qui se décompose en deux fonctions : une fonction chargée de l'évolution des fissures et une fonction chargée du calcul et de la propagation des volumes de retrait (voir la partie « espace cellulaire » de la figure 9.8).

 $\lambda: S \to Y$ est la fonction de sortie, appelée juste avant la fonction de transition interne, et qui transmet simplement l'état du terrain (le contenu des cellules) et le graphe des fissures.

ta est la fonction d'avance du temps, qui ici renvoie le pas de temps, constante indépendante de l'état de l'espace cellulaire : $ta(s) = \Delta t$

En l'absence d'évènements externes, la fonction de transition externe δ_{ext} et la fonction de conflit δ_{con} ne seront jamais appelées et n'ont donc pas besoin d'être spécifiées.

9.3 Modèle structurel

9.3.1 Terrain

9.3.1.1 Description

Nous considérons que la fissuration concerne une partie seulement de la surface du sol, que nous appelons couche de retrait : les caractéristiques des fissures sont déterminées par certaines propriétés de cette couche, et leur propagation est restreinte au volume défini par cette couche. Dans le cas d'un sol cultivé, nous assimilons cette couche de retrait à la croûte de battance formée après des épisodes pluvieux. En chaque point, le terrain peut donc être défini par deux variables : sa hauteur H et l'épaisseur de la couche de retrait T. Ces paramètres sont donnés de manière discrète par deux cartes de hauteur, de mêmes dimensions, qui constituent les entrées de notre méthode (figure 9.8). Comme le montrent les différents cas reproduits figure 9.2, ces paramètres peuvent être constants (situation où le sol est plat et la couche uniforme) ou variables. Comme dans le cas d'un sol cultivé, à certains endroits, l'épaisseur de la couche de retrait peut être nulle (voir T_i dans la figure 9.2(c)).



FIGURE 9.2 – Trois cas possibles pour le terrain : (a) la hauteur H et l'épaisseur de la couche de surface T sont constantes, (b) H est constante et T est variable, (c) H et T sont variables.

De manière à pouvoir traiter l'évolution des fissures avec une approche de type automate cellulaire 3D, ce qui nous permet notamment d'utiliser directement les informations fournies par notre simulateur de dégradation des sols, nous considérons le terrain comme un ensemble de cellules élémentaires parallépipédiques, de section horizontale carrée (figure 9.3). Nous identifions la résolution des deux cartes de hauteur avec celle du terrain ainsi discrétisé. Le pixel (i, j) d'une de ces cartes correspond donc à la colonne (i, j) du terrain (et à la cellule particulière de cette colonne qui est en surface). Nous décomposons le sol en trois phases : liquide, solide et gazeuse. Nous utilisons les volumes de ces trois phases de manière additive, en écrivant pour une cellule :

$$V_{cell} = V_m + V_l + V_q \tag{9.1}$$

avec V_m le volume de solide (ou matière), V_l le volume de liquide et V_g le volume de gaz. Le volume poreux V_p correspond à la différence entre le volume de la cellule et celui occupé par la matière. Il est donc égal à la somme des volumes occupés par le liquide et le gaz :

$$V_{cell} = V_m + V_p \quad \text{soit} \quad V_p = V_{cell} - V_m = V_l + V_q \tag{9.2}$$

Nous conservons ces quantités dans chaque cellule comme autant de sous-états. Un quatrième sous-état, le volume de retrait, visible dans la figure 9.3, sera présenté ultérieurement.



FIGURE 9.3 - Un terrain découpé (dans cet exemple) en cellules élémentaires cubiques, avec le détail de la composition d'une cellule.

9.3.1.2 Initialisation

Excepté dans le cas particulier de valeurs constantes, les cartes de hauteur peuvent être générées aléatoirement ou obtenues par d'autres moyens, comme, pour le cas d'une simulation, une rugosimétrie laser d'un morceau de terrain puis la simulation de la dégradation de la surface du sol (voir le chapitre 10), ou encore, pour le cas d'une production d'images, une texture dessinée par l'utilisateur. Le contenu des cellules (eau, pores) peut provenir de mesures ou d'estimations d'un sol réel ou être généré aléatoirement. Cette initialisation peut permettre de créer une hétérogénéité dans la structure du terrain, hétérogénéité qui se retrouvera, grâce au principe de calcul de l'évolution des fissures de notre méthode, dans l'apparence du réseau de fissures (voir un exemple figure 10.12).

9.3.2 Fissures

Nous utilisons des chemins de fissuration précalculés, en nous basant sur l'hypothèse que les chemins pouvant être suivis par les fissures dépendent de la structure de la couche à fissurer plus que de la dynamique du processus de fissuration. Ce choix est conforté par l'observation que pour des surfaces finies (par exemple un bac de sol reconstitué), l'absence de stress sur les bords influence fortement le réseau. Ces chemins possibles bidimensionnels sont stockés dans un graphe non orienté G, dont les nœuds sont les intersections (ou les extrémités) des fissures, et les arêtes les séquences de cellules de surface reliant deux nœuds. Toute image binaire contenant un réseau de lignes d'un pixel d'épaisseur peut être utilisée pour obtenir ce graphe (figure 9.4).



FIGURE 9.4 – L'image de gauche présente un exemple complet de chemins possibles de fissuration sous la forme d'un réseau de lignes d'un pixel d'épaisseur. L'image de droite montre le rectangle rouge agrandi avec les nœuds en noir et les chemins stockés dans les arêtes en gris. Les flèches indiquent simplement que ces chemins sont incomplets et ne font pas partie du graphe.

Afin d'obtenir des résultats visuellement plausibles, nous avons implémenté trois différentes méthodes pour calculer ce graphe. Les deux premières méthodes ne sont pas nouvelles dans ce contexte : il s'agit de la méthode empirique et stochastique de Horgan et Young (2000) et de la tessellation de Dirichlet (Perrier et coll., 1995a). Si, pour décider du réseau de fissuration, nous ne disposons pas d'une information structurelle sur le sol à fissurer, ces deux méthodes peuvent être employées. En revanche, si une telle information est disponible sous forme d'une carte de hauteur, la tessellation de Dirichlet peut l'utiliser et nous ajoutons à cette possibilité une troisième approche, originale dans ce contexte, basée sur la méthode de la « ligne de partage des eaux » (*watershed*) ou LPE (Vincent et Soille, 1991, Beucher, 2004).

9.3.2.1 Méthode de Horgan et Young

Nous avons évoqué dans la section 8.3.2.2 le modèle de Horgan et Young (2000) qui proposent un modèle stochastique de définition de la géométrie d'un réseau 2D de fissures d'un sol (figure 9.5). Nous avons utilisé ce modèle de deux façons : statiquement, comme chemin complet de fissuration d'où nous avons extrait le graphe pour notre méthode, ou dynamiquement, en ajoutant aux arêtes de ce graphe une information sur l'ordre de création de la fissure contenant cette arête. Des explications plus complètes sur cette méthode hiérarchique sont données section 9.4.1.3, et une comparaison entre les deux méthodes est visible figure 10.6.



FIGURE 9.5 – Deux exemples de réseaux de fissures produits par le modèle de Horgan et Young.

9.3.2.2 Tessellation de Dirichlet

Dans la section 8.3.2.3, nous avons vu que Perrier et coll. (1995a) utilisent une tessellation de Voronoï (également appelée tessellation de Dirichlet) pour obtenir une partition du terrain en zones polygonales (les régions de Voronoï, que l'on trouve également en hydrologie et en géographie sous la dénomination de polygones de Thiessen). Cette méthode part d'un ensemble S de m points s_i dans le plan euclidien \mathbb{R}^2 , appelés graines. Les points de la région de Voronoï V(i) sont les points du plan qui sont plus proches de la graine $s_i \in S$ qu'aucune autre graine s_j de S, $(j \neq i)$. Cette définition est donc basée sur la notion d'une fonction de distance entre deux points, et nous avons choisi d'utiliser la distance euclidienne d_e . Nous pouvons donc définir une région de Voronoï par :

$$V(i) = \{ p \in \mathbb{R}^2 : \forall j \neq i, d_e(p, s_i) \le d_e(p, s_j) \}$$
(9.3)

Les frontières B_v des régions de Voronoï forment le squelette par zones d'influence ou SKIZ (*skeleton by influence zones*, Serra 1982). Elles contiennent les points qui sont équidistants de deux graines, et pour nous elles forment les chemins possibles de fissuration :

$$B_v = \{ p \in \mathbb{R}^2 : \exists i, j \ d_e(p, s_i) = d_e(p, s_j) \}$$
(9.4)

Les graines peuvent être choisies selon deux méthodes. La première est purement aléatoire et ne nécessite aucune entrée particulière, à part le nombre de graines : nous générons les graines en perturbant les points d'une grille régulière recouvrant la surface selon un pas spatial dépendant du nombre de graines désiré. La seconde méthode utilise une carte de hauteur représentant une information sur le sol à fissurer, les graines étant placées là où le stress déduit de cette information est minimal. Pour utiliser cette méthode, il faut donc trouver une information qui peut aider à définir le stress, et définir les endroits où ce stress est minimal. Il n'existe pas beaucoup d'éléments permettant de juger de la résistance d'une croûte à la fissuration à part son épaisseur, qui peut donner une indication. Cette épaisseur est représentée par la carte de hauteur de la couche de retrait. Nous pouvons avancer deux hypothèses contradictoires pour décider si la fissuration se produit de préférence dans les zones de croûte mince

235

ou les zones de croûte épaisse : ou bien une croûte mince est considérée comme peu résistante et donc sujette à fissuration, ou bien les parties les plus fines d'une croûte sont considérées comme les frontières de la zone croûtée, donc comme des endroits où l'accumulation de stress est limitée. L'influence de l'épaisseur sur le réseau de fissuration se traduit par le choix fait pour positionner les graines dans cette carte de hauteur, ce qui donne un moyen de contrôle à l'utilisateur sur le réseau qui sera obtenu, selon le choix effectué : dans les minima ou dans les maxima de la carte de hauteur, ou encore en utilisant une combinaison de ces deux extrêmes. Nous avons choisi de produire des fissures préférentiellement là où la croûte est épaisse, donc de prendre comme graines les m premières valeurs minimales de la carte de hauteur de la couche de retrait, qui doit bien évidemment être non constante pour produire un résultat. Deux exemples sont donnés figure 9.6. Dans notre méthode, contrairement à Perrier et coll., nous stoppons au premier niveau de fragmentation, laissant à l'algorithme de propagation et d'élargissement des fissures décider de leur évolution.



FIGURE 9.6 – L'image (a) présente une tessellation de Dirichlet obtenue avec 300 graines aléatoires. L'image (b) présente une tessellation de Dirichlet obtenue avec 300 graines correspondant aux minima de la carte de hauteur de la couche de retrait basée ici sur une génération de bruit de Perlin (c).

9.3.2.3 Ligne de partage des eaux

Nous considérons une épaisseur non uniforme de la couche à fissurer, en faisant l'hypothèse que les fissures apparaissent et se propagent là où cette couche est la plus épaisse (voir la section précédente pour une discussion sur cette hypothèse). Par conséquent, nous appliquons un algorithme de LPE en partant des minima de la couche de retrait, mais il est clair que notre méthode ne dépend pas de ce choix, et que nous pouvons partir tout aussi bien des maxima, favorisant alors l'apparition des fissures dans les zones le plus minces. Cette méthode offre une grande souplesse, puisque toute information codée sous forme d'une image en niveaux de gris peut lui servir de base et donc influer sur le réseau de fissures. Dans l'idéal, ce peut être une carte de résistance de la croûte, mais également toute autre information qui peut présenter un intérêt pour l'utilisateur.

Une définition algorithmique de la méthode LPE par immersion a été donnée par Vincent et Soille (1991), et Beucher (2004) en a proposé une implémentation par files d'attente hiérarchiques supprimant les biais de l'algorithme original qui peuvent donner une mauvaise affectation de certains pixels à un bassin versant. La méthode de la LPE traite l'image en niveaux de gris comme un relief : le pixel (i, j) est considéré comme un point avec une élévation égale à son niveau de gris, ce qui transforme l'image en une sorte de paysage avec des sommets et des vallées. Dans cette méthode, ce paysage est progressivement inondé avec de l'eau provenant des minima locaux (ou, plus généralement, des marqueurs), et, aux points où de l'eau provenant de bassins différents se rencontre, une digue est construite. Lorsque l'inondation est terminée, le paysage se retrouve partitionné en régions (les bassins versants), en nombre égal à celui des marqueurs initiaux, séparés par ces digues qui forment la ligne de partage des eaux. Cette ligne représente dans notre méthode les chemins possibles de fissuration.



FIGURE 9.7 – Deux exemples d'application de la méthode de la ligne de partage des eaux (LPE), représentée en blanc, avec deux niveaux de lissage de l'image originale (en niveaux de gris) qui représente l'épaisseur de la croûte du terrain visible en (c) et obtenue par simulation.

L'un des défauts les plus connus de la LPE est qu'elle produit une sur-segmentation de l'image, c'est-à-dire que beaucoup de petits bassins sont construits à cause d'un nombre important de minima locaux dans l'image initiale. Selon la théorie de l'espace-échelle pour les signaux discrets, les détails significatifs d'une image sont une constante indépendante des variations d'échelle (Lindeberg, 1994). Par conséquent, ce défaut peut être évité par un lissage préalable de l'image avant l'application de la LPE, ce qui revient dans notre méthode à dire qu'il est envisageable de contrôler le nombre de fissures possibles en lissant plus ou moins la carte de hauteur de la couche de retrait (figure 9.7). Cette approche est valable dans la mesure où elle préserve la structure du réseau des fissures et donc n'affecte pas l'aspect visuel. En revanche, si on s'intéresse plutôt à un aspect simulation, par exemple à la densité de ce réseau, il est clair que cette information est modifiée par le lissage qui ne doit donc pas être utilisé. Une autre possibilité, plus intéressante, est la prise en compte, comme pour le modèle de Horgan et Young, d'une *hiérarchie* parmi les digues construites lors de l'application de l'algorithme de LPE (voir section 9.4.1.3).

9.4 Modèle fonctionnel

9.4.1 Évolution des fissures

L'algorithme d'évolution des fissures comporte trois étapes : la création, la progression et l'élargissement, qui vont être explicitées dans les sections suivantes. Cette évolution peut être stoppée lorsqu'un critère donné est vérifié : il n'y a plus d'évolution possible (la contraction est maximale et tous les chemins du graphe sont parcourus), une longueur totale maximale de fissuration est atteinte, ou encore un temps simulé maximal est atteint. Il est possible



FIGURE 9.8 – Illustration du modèle fonctionnel de la fissuration du sol.

également d'interrompre le processus lorsqu'un résultat visuel intéressant est obtenu - en ayant recours pour cela à un rendu et une visualisation à chaque itération.

9.4.1.1 Création des fissures

Nous ne pouvons pas placer un départ potentiel de fissure sur un nœud du graphe G (présenté section 9.3.2), parce qu'un nœud représente dans le cas le plus fréquent une intersection, et appartient donc par définition à au moins deux fissures différentes, ce qui ne nous permet pas de décider quelle fissure faire apparaître. Nous devons donc démarrer une fissure à partir d'un point d'une arête du graphe, qui est segment discret entre deux intersections de fissures, ou entre une intersection et une extrémité. Nous avons arbitrairement choisi comme points de départ potentiels des fissures toutes les cellules situées au milieu des arêtes du graphe G. Ces points sont stockés dans une liste ordonnée selon leur distance aux fissures existantes. Les fissures sont créées aux points les plus distants, ces points étant ôtés de la liste dès qu'ils sont utilisés. En l'absence de toute fissure (début de la simulation), un point est tiré au hasard dans la liste. Nous maintenons donc une carte de distance (figure 9.9) calculée à partir des squelettes des fissures par une transformation de distance euclidienne externe (Saito et Torikawi, 1994). Le choix de la distance comme critère de sélection des points de départ est basé sur l'observation que les fissures d'un sol argileux ont tendance à subdiviser une région en sous-régions d'aire similaire, et cela par générations successives, la génération la plus récente divisant les régions créées par les générations précédentes. En créant les nouvelles fissures le plus loin possible des fissures existantes, nous parvenons à reproduire ce comportement.



(a) Après 5 itérations. (b) Après 11 itérations. (c) Après 25 itérations. (d) Après 30 itérations.

FIGURE 9.9 – Évolution de la carte des distances au fur et à mesure de la création de fissures (un pixel blanc représente la distance maximale de la carte).

Dans la nature, toutes les fissures n'apparaissent pas au début du processus, elles n'apparaissent pas non plus une par une. C'est pourquoi dans notre modèle la création des fissures est gouvernée par deux paramètres : un nombre minimal m et un nombre maximal M de fissures actives (une fissure est dite « active » si au moins l'une de ses extrémités continue de progresser). À chaque itération, de nouvelles fissures sont créées de manière à avoir M fissures actives dès que leur nombre est égal ou inférieur à m. En choisissant m = 0, la création procède par générations entières de fissures, et au contraire, en prenant m = M, la création opère par une seule fissure à la fois. La création n'est évidemment possible que si la liste des points de départ n'est pas vide, elle peut être également inhibée si le nombre de fissures créées atteint un maximum défini par l'utilisateur, ou encore si la longueur totale des fissures dépasse un maximum fixé à l'initialisation.

9.4.1.2 Progression des fissures

Une fois créée, une fissure croît simultanément à chacune de ses extrémités (figure 9.10). Chaque extrémité grandit par ajout, à chaque itération, de cellules stockées dans l'arête correspondante du graphe G jusqu'à atteindre la distance égale à une certaine vitesse de propagation (paramètre d'initialisation) multipliée par la durée simulée d'une itération. Quand une fissure atteint un nœud, le choix de l'arête suivante se fait en respectant l'orientation initiale φ de la fissure, définie par la séquence de cellules de l'arête de départ de la cellule. Une limite globale de tolérance α est donnée, et une fissure choisit l'arête dont l'angle est le plus proche de φ en restant dans l'intervalle $[\varphi - \alpha, \varphi + \alpha]$. Une fissure interrompt sa croissance si une telle arête n'existe pas, si le nœud atteint est une extrémité, ou encore si elle est attirée par une autre fissure. Cette attraction intervient si la distance entre le nœud courant et un nœud d'une autre fissure est en dessous d'un seuil donné. En l'absence de ce processus d'attraction et en ne faisant que respecter la direction initiale, des résultats indésirables pourraient se produire, tels que deux fissures très proches et parallèles. Cette attraction offre en plus l'avantage de promouvoir une plus grande compacité des régions, ce qui est proche du phénomène naturel. Enfin, une fissure est également stoppée si elle arrive à une cellule où l'épaisseur de la couche à fissurer est en dessous d'un seuil minimal. Ces deux seuils sont définis par l'utilisateur lors de l'initialisation.



FIGURE 9.10 – Illustration de la création et de la progression d'une fissure en trois étapes. L'étape 1 montre le point de départ au milieu d'une arête. La fissure commence à croître à partir de ce point en direction des deux nœuds de cette arête. La fissure stoppe en 2a parce que c'est une extrémité. En 2b et en 3, la fissure choisit de continuer vers la droite parce que ce choix donne la direction la plus proche de la direction initiale.

9.4.1.3 Création et progression hiérarchiques

Une autre possibilité pour la création et la progression des fissures est offerte lorsque les arêtes du graphe G ont été ordonnées, permettant ainsi de créer une hiérarchie entre les chemins possibles. Dans ce cas, les points de départ potentiels sont ordonnés selon cette hiérarchie, le second critère restant la distance aux fissures existantes. De la même manière, durant la progression d'une fissure, à l'arrivée à un nœud le choix de l'arête suivante se fait en respectant à la fois cette hiérarchie et l'orientation initiale.

Une hiérarchie est possible dans la méthode de Horgan et Young et découle directement de l'ordre des créations des chemins par l'algorithme (voir la figure 9.11, un résultat est reproduit figure 10.6). Dans le cas de la méthode de la ligne de partage des eaux, il n'est pas possible d'obtenir une hiérarchie en appliquant une LPE à une carte de hauteur de plus en plus lissée, parce que notre méthode demande que les fissures présentes à un niveau de hiérarchie



FIGURE 9.11 – Trois étapes différentes obtenues par le modèle de Horgan et Young.

soient aussi présentes dans les niveaux ultérieurs, et ce avec exactement les mêmes chemins de manière à retrouver les arêtes du graphe à tous les niveaux hiérarchiques. Par conséquent, nous utilisons l'algorithme des cascades (Beucher, 1994), appelé également LPE hiérarchique. Le principe de la LPE hiérarchique, pour reprendre l'analogie hydraulique, est de fusionner deux bassins versants, et donc de supprimer la digue correspondante, lorsque l'eau d'un bassin s'écoule dans l'autre (comme lorsqu'une cascade apparaît dans la nature). À chaque disparition d'une digue, la fissure correspondante est affectée d'un niveau hiérarchique, ce qui crée un ordre total entre les arêtes, et le processus se poursuit jusqu'à obtenir le minimum de deux bassins versants, soit une fissure unique, ancêtre de tout le réseau. La figure 9.12 donne un exemple de cinq niveaux hiérarchiques différents de LPE. Par cette méthode il devient possible d'obtenir un réseau de fissures en adéquation avec les propriétés de la surface, la hiérarchie ainsi créée entre les chemins donnant une plus haute priorité aux arêtes présentes dans les zones où la couche à fissurer est la plus épaisse. Comme les chemins peuvent être ajoutés un par un dans cette méthode, nous les regroupons dans des familles hiérarchisées contenant toutes un nombre minimum de chemins (nombre fixé à l'initialisation), cela afin que les critères géométriques utilisés lors de la progression et de la création des fissures aient toujours un rôle à jouer.

9.4.1.4 Élargissement des fissures

Dans notre modèle, une fissure est composée d'une succession de portions rejoignant deux à deux les cellules de surface adjacentes qui la composent. La portion de fissure entre deux cellules de surface adjacentes est considérée comme un prisme triangulaire, dont la base peut être tronquée (figure 9.13(b)). En surface, ce prisme est vu comme un rectangle. Nous faisons l'approximation d'imposer des valeurs égales de w, W, h, et H à chaque extrémité du prisme afin de faciliter le calcul du volume de la fissure, mais cette approximation n'est pas utilisée lors du rendu. Comme expliqué dans la section 10.2, ces valeurs peuvent être alors différentes de chaque côté du prisme (mais bien évidemment deux prismes consécutifs d'une fissure ont les mêmes valeurs à leur jonction).

Le volume du prisme triangulaire tronqué s'écrit :

$$\mathcal{V} = \frac{1}{2} L \left(H W - h w \right) \tag{9.5}$$

avec L la distance entre les deux extrémités, W la largeur de la fissure, H la profondeur de la



FIGURE 9.12 – Exemple d'une carte de hauteur prise comme image originale et de cinq niveaux hiérarchiques de LPE. Dans cet exemple, nous obtenons 402 niveaux différents, et le dernier niveau contient l'ancêtre (indiqué en rouge) de toutes les LPE. Comme imposé par notre méthode, la ligne de partage des eaux présente dans un niveau se retrouve exactement au niveau précédent.



lieu des cellules représentent la surface à l'intérieur de laquelle les extrémités peuvent être aléatoirement placées.



FIGURE 9.13 – Une portion de fissure définie entre deux cellules de surface adjacentes, et le volume correspondant. Cette figure montre l'approximation utilisée pour calculer le volume de la fissure. Cependant, à l'étape de rendu, nous ne considérons plus que w, W, h, et H sont de valeur identique à chaque extrémité (voir section 10.2).

fissure triangulaire, w la largeur de la base de la fissure, h la différence entre H et la profondeur réelle de la fissure (figure 9.13(b)). Dans le cas d'une forme triangulaire, il suffit de prendre w = 0 et h = 0. Pour déterminer les proportions de la fissure, nous utilisons deux rapports qui font partie des paramètres d'initialisation du modèle : R = H/W et r = w/W = h/H. Le volume peut à présent s'écrire sous la forme :

$$\mathcal{V} = \frac{1}{2} L W^2 R (1 - r^2) \tag{9.6}$$

Nous définissons dans la section suivante le « volume de retrait » V_r qui s'accumule dans chaque cellule d'une fissure, et que nous considérons comme équivalent au volume de la portion de fissure partant de cette cellule (dans le graphe qui la contient, la fissure est orientée, donc pour chaque couple de cellules adjacentes définissant une portion de fissure, nous sommes capables de déterminer un ordre). En posant $\mathcal{V} = V_r$ il devient possible de déduire de (9.6) la largeur et la profondeur du prisme correspondant :

$$W = \sqrt{\frac{2V_r}{LR} \frac{1}{1 - r^2}} \tag{9.7}$$

$$H - h = R W (1 - r)$$
(9.8)

Pour obtenir une fissure triangulaire, il suffit de fixer r = 0. Il est important de noter que la largeur d'une fissure n'est aucunement contrainte par la largeur des cellules : elle peut être beaucoup plus étroite qu'une cellule (comme dans la figure 9.13) ou recouvrir plusieurs cellules. Enfin, pour éviter une régularité trop artificielle, les extrémités de chaque portion de fissure sont légèrement décalées de façon aléatoire du centre de la cellule (figure 9.13(a)).

9.4.2 Calcul et propagation des volumes de retrait

9.4.2.1 Définition des volumes de retrait

La notion de volume de retrait que nous utilisons comme base de notre modèle de propagation et d'élargissement des fissures provient d'une interprétation phénoménologique de la fissuration (figure 9.14). Durant le processus de dessiccation d'un sol la quantité d'eau V'_l s'évaporant est remplacée par une quantité d'air V'_q . Deux cas sont envisageables :

$$V'_g = V'_l$$
 aucune contraction ne se produit,
 $V'_g < V'_l$ il y a contraction.

Lorsqu'il y a contraction, nous appelons « volume de retrait » V_r la différence $V'_l - V'_g$. Nous prenons en compte cette nouvelle quantité dans une cellule en modifiant l'équation (9.2) de la façon suivante :

$$V_{cell} = V_m + V_p + V_r \tag{9.9}$$

Une cellule de notre modèle est indéformable; par conséquent, afin de lui conserver un volume constant, il est nécessaire de compenser localement cette perte de volume. Nous supposons que cette compensation se fait par attraction d'un volume de matière équivalent



FIGURE 9.14 – Illustration du concept de volume de retrait. En (1) un certain volume d'eau s'évapore de la cellule. Cette perte de volume doit être compensée en (2) par une entrée d'air dans la cellule. Si les deux volumes sont égaux, il n'y a pas de retrait (3a). Dans le cas contraire (3b) il reste un vide à compenser que nous nommons volume de retrait, et qui est empli en (4) par de la matière provenant du voisinage de la cellule.

au volume de retrait, matière provenant de cellules voisines. Ce processus se répétant pour toutes les cellules et dans toutes les directions, il est nécessaire que certaines cellules ne reçoivent pas de matière de leurs voisines mais au contraire subissent une perte de matière de plus en plus importante. Nous définissons ces cellules comme les cellules de fissuration, c'està-dire les cellules par lesquelles passe une fissure. En remplaçant le déplacement de matière par une propagation équivalente mais de sens inverse des volumes de retrait, nous pouvons donc déduire de la quantité de volume de retrait accumulée dans une cellule de fissuration, à chaque instant, les caractéristiques géométriques de la fissure dans cette cellule. Il est à noter que cette interprétation phénoménologique ne donne aucune indication sur la manière de différencier les cellules de fissure des autres cellules, c'est pourquoi nous utilisons des chemins précalculés.

9.4.2.2 Calcul des volumes de retrait

Pour pouvoir utiliser l'équation (9.7), dans chaque cellule à l'instant $t + \delta t$, nous devons calculer le nouveau volume de retrait V_r , qui peut s'obtenir par l'équation (9.9) si nous connaissons la valeur du volume de pores V_p pour cette cellule :

$$V_r(t + \delta t) = V_r(t) + V_p(t) - V_p(t + \delta t) \quad \text{avec} \quad V_r(0) = 0$$
(9.10)

Les modifications du volume de pores sont liées aux effets de gonflement-retrait lors des périodes d'humectation et d'assèchement. Nous avons utilisé deux approches pour ce calcul de V_p , correspondant à deux objectifs différents de notre simulateur de fissuration. Dans le cas où l'utilisateur désire une formation générique de fissures réalistes, hors de tout contexte précis, nous proposons un calcul direct du volume poreux en fonction du temps, avec un ajustement des paramètres basés sur des données réelles. Il est possible également de fournir, par une mesure ou un modèle théorique, des informations sur le contexte de fissuration, afin d'obtenir une dynamique réaliste correspondant à une situation donnée, et nous donnons un exemple utilisant des courbes de retrait et d'évolution de la teneur en eau disponibles dans la littérature.

a) Fissuration générique

Dans une première approche, nous proposons d'utiliser une seule formule synthétique du calcul du volume de pores en fonction du temps, en limitant le nombre de ses paramètres et en leur donnant une signification assez intuitive pour l'utilisateur. Les paramètres de cette formule ont pu être ajustés en fonction de données spécifiques dont nous disposions (il ne s'agit pas d'une calibration du modèle).

Nous calculons le volume poreux par la formule empirique :

$$V_p(t) = V_{min} + (V_{max} - V_{min}) \exp(-\kappa t^2)$$
(9.11)

avec V_{min} et V_{max} respectivement la valeur minimale et maximale du rapport poreux, κ un coefficient servant à contrôler la vitesse du processus de retrait, et t le temps simulé écoulé.

De manière à ajuster les paramètres de cette équation afin d'obtenir des résultats réalistes, nous avons dans un premier temps utilisé les données de Hussain et coll. (1985) qui nous ont donné une dynamique d'assèchement d'une croûte (figure 9.15(a)), que nous avons combinée ensuite avec une courbe caractéristique de retrait d'un sol de texture similaire (figure 9.15(b)) de manière à obtenir la relation correspondante entre le temps d'assèchement et le volume poreux (figure 9.15(c)). Grâce à cette courbe, nous avons ensuite pu ajuster les paramètres de notre équation (9.11) aux valeurs suivantes : $V_{max} = 0.714$, $V_{min} = 0.567$, $\kappa = 0.072$ qui ont été utilisées dans notre modèle de simulation pour calculer directement le volume poreux.

b) Fissuration spécifique

Notre deuxième approche se base sur des informations fournies par l'utilisateur, concernant le contexte de fissuration. Pour illustrer cette approche par un exemple, nous avons utilisé deux modèles de retrait disponibles en science du sol (voir figure 9.16(b)). Ces modèles se définissent par une relation entre le taux d'humidité $v = V_l/V_m$ et le rapport poreux $e = V_p/V_m$. Olsen et Haugen (1998) proposent une équation de retrait à trois paramètres λ_1 , λ_2 et λ_3 :

$$e(v) = \frac{1}{2} \left(\lambda_3 v + \lambda_2 + \sqrt{(\lambda_3 v + \lambda_2)^2 - 4\lambda_3\lambda_2(1 - \lambda_1)v} \right)$$
(9.12)

Groenevelt et Grant (2002) proposent pour leur part une équation à quatre paramètres :

$$e(v) = \varepsilon + k_3 \left[\exp\left(\frac{-k_0}{v^n}\right) - \exp\left(\frac{-k_0}{\varepsilon^n}\right) \right]$$
(9.13)

Ces équations (9.12) et (9.13) permettent d'obtenir V_p en fonction de V_l (voir figure 9.16). Comme nous voulons faire varier V_p avec le temps, nous devons également connaître la variation du taux d'humidité du sol avec le temps. Cette variation est due à l'évaporation qui,





(a) Relation moyenne entre temps d'assèchement et taux d'humidité pour 11 types de sol, d'après l'étude de Hussain et coll. (1985).

(b) Courbe de retrait d'un sol limoneux fin (d'après l'expérience INRA de longue durée sur la structure du sol, à Mons-en-Chaussée, France).



(9.11).

FIGURE 9.15 – Courbes ayant servi de base au calcul empirique du volume de retrait.

pendant un temps assez bref, est constante, puis décroît. Suleiman et Ritchie (2003) proposent d'évaluer l'évaporation correspondant à cette seconde étape par la formule suivante (voir figure 9.16(a)) :

$$\theta(t) = \theta_{ad} + (\theta_{dul} - \theta_{ad}) \exp(-Ct) \tag{9.14}$$

avec t le temps simulé écoulé, $\theta = V_l/V_{cell}$ la teneur en eau volumétrique, θ_{dul} la teneur en eau volumétrique uniforme initiale (c.-à-d. θ pour $t = 0, z \ge 0$), et θ_{ad} la teneur en eau volumétrique à la surface, constamment en équilibre avec la pression de vapeur de l'atmosphère (c.-à-d. θ pour t > 0, z = 0). C est un paramètre de conductance qui dépend du sol et est donné par la formule empirique $C(z) = az^b$, avec z la profondeur, et a, b deux paramètres. Les égalités suivantes montrent comment obtenir finalement V_p en utilisant les équations (9.14), puis (9.12) ou (9.13) :

$$V_l = \theta(t) \, V_{cell} \tag{9.15}$$

$$v = V_l / V_m \tag{9.16}$$

$$V_p = e(v) V_m \tag{9.17}$$



FIGURE 9.16 – (a) présente l'évolution du taux d'humidité du sol en fonction du temps et de la profondeur, d'après Suleiman et Ritchie ($a = 0.58, b = -1.98, \theta_{dul} = 0.32, \theta_{ad} = 0.05$) et (b) présente les courbes caractéristiques de retrait, d'après Olsen et Haugen ($\lambda_1 = 0.00626, \lambda_2 = 0.755, \lambda_3 = 1$) et Groenevelt et Grant ($k_0 = 9.988, k_3 = 6101, n = 0.233, \varepsilon = 1.546$).

9.4.2.3 Propagation des volumes de retrait

La propagation des volumes de retrait est un processus itératif qui vise à diminuer le stress provoqué par la présence de ce volume dans les cellules, en l'acheminant dans les cellules de fissuration. Cette propagation utilise la même carte de distance que la création des fissures (section 9.4.1.1) et part des cellules dont la distance est égale à D, qui est initialement le maximum de cette carte. A chaque itération du processus, D est décrémenté de manière à traiter des cellules plus proches jusqu'à atteindre les cellules de fissuration qui sont par définition à distance nulle. La propagation se fait entre cellules de même profondeur; si une cellule n'a pas de voisine de même profondeur et plus proche d'une fissure, la propagation se fait verticalement (figure 9.17).

Pour une cellule c, le calcul du volume de retrait à distribuer $V'_r(c)$ se fait de la façon suivante :

$$V_r'(c) = \begin{cases} \left(1 - \frac{1}{r_s}\right) V_r(c) \left(1 - \sqrt{\frac{d}{d_{max}}}\right) & \text{si } d \le d_{max} \\ 0 & \text{si } d > d_{max} \end{cases}$$
(9.18)

avec $V_r(c)$ le volume de retrait de c, d la distance de la cellule à une fissure, r_s un « facteur géométrique » qui est défini plus loin, d_{max} la distance maximale de propagation. Cette distance peut être fixée par l'utilisateur ou être égale au maximum de la carte de distance, et dans ce cas à chaque itération de la fonction de transition, toutes les cellules participent à la propagation. Afin de pouvoir tenir compte du retrait vertical (ou *subsidence*) nous utilisons le facteur géométrique r_s qui est égal à 3 dans le cas d'un retrait isotrope et à 1 si la subsidence est seule prise en compte. Par définition, si la subsidence est prépondérante, nous avons $1 < r_s < 3$, et si la fissuration est plus importante que la subsidence, nous avons $r_s > 3$.

Nous utilisons la valeur $V'_r(c)$ donnée par l'équation (9.18) pour mettre à jour $V_r(c)$ pour l'itération suivante de la fonction de transition :

$$V_r(c) = V_r(c) - V_r'(c)$$
(9.19)



(a) Grâce à la carte de distance, les volumes de retrait sont propagés vers une cellule du voisinage plus proche de la fissure.



(b) Cette section verticale du terrain montre comment les volumes de retrait sont propagés horizontalement quand c'est possible, et verticalement sinon, jusqu'à rencontrer une fissure.

FIGURE 9.17 – Illustration du principe de la propagation des volumes de retrait.

Ensuite, nous calculons la proportion $V''_r(i)$ du volume $V'_r(c)$ qui est distribué à une cellule voisine valide (c'est-à-dire plus proche d'une fissure) i:

$$V_r''(i) = V_r'(c) \frac{d - d_i}{\sum_{j \in N(c)} (d - d_j)}$$
(9.20)

avec N(c) l'ensemble de cellules valides dans le voisinage horizontal de c, et d, d_i , d_j la distance aux fissures des cellules c, i, j respectivement. Quand toutes les cellules ont été traitées, les cellules de fissuration ont reçu la quantité de volume de retrait qu'elles doivent transformer, pour l'itération courante, en largeur locale de fissure comme expliqué section 9.4.2.2.

La figure 9.18 donne un exemple des effets visuels produits par la propagation des volumes de retrait : la relaxation du stress est plus forte, dans le temps, au début de la fissuration, et, dans l'espace, à proximité des fissures, ce qui a pour conséquence que les fissures les plus anciennes sont les plus larges, et que les fissures larges demeurent relativement isolées.

9.4.2.4 Retrait vertical

Dans le cas d'une surface plane, étant donné que notre méthode n'affecte pas la hauteur originale du sol, le résultat peut paraître peu plausible (figure 9.19(a)). Pour améliorer cet aspect, nous proposons d'introduire un retrait vertical utilisant le même volume de retrait V_r que pour la fissuration, mais pour modifier la carte de hauteur et non les fissures. Nous utilisons deux principes de calcul (figure 9.19(b)). Le premier prend en compte les points de la carte de hauteur selon leur distance aux fissures (plus un point est éloigné d'une fissure, plus il s'enfonce) :

$$V'_{vr}(c) = \frac{d}{D_{max}} V_r(c) \tag{9.21}$$

avec d la distance de c aux fissures et D_{max} le maximum de la carte de distance. Le deuxième principe de calcul prend en compte les régions délimitées par les fissures selon leur aire (plus cette aire est importante, plus la région s'enfonce) :

$$V_{vr}''(c) = \frac{\sum_{i \in R(c)} V_r(i)}{\max(area)}$$
(9.22)



(a) Après 5 itérations.







- (b) Après 11 itérations. (c) Après 25 itérations.
- (d) Après 37 itérations.



(e) Après 5 itérations.



(f) Après 11 itérations.



(g) Après 25 itérations.



(h) Après 37 itérations.

FIGURE 9.18 – Exemple des effets visuels produits par la propagation des volumes de retrait. Les images du haut montrent les fissures en rouge sur la surface du terrain, et le volume de retrait dans chaque cellule, par visualisation volumique : la couleur et l'opacité d'un voxel indiquent la quantité du volume de retrait que la cellule correspondante contient (les cellules avec un volume de retrait nul sont transparentes). Les images du bas montrent un rendu du terrain fissuré. Il est visible que la relaxation du stress est plus forte près des fissures et que l'absorption croissante des volumes de retrait provoque une différence dans la largeur des fissures, ce qui reflète leur âge, les plus anciennes étant les plus larges. Pour cette simulation la distance maximale de relaxation est de 50 cellules (soit 10 cm).

avec R(c) la région de c et max(area) l'aire maximale des régions (en cellules). Le volume de retrait vertical d'une cellule c est donné par :

$$V_{vr}(c) = \frac{(1-k)V'_{vr}(c) + kV''_{vr}(c)}{r_s}$$
(9.23)

avec r_s le facteur géométrique et k un coefficient déterminant la contribution de chacun des deux calculs.

Pour obtenir le changement de hauteur H_r d'un point de la carte de hauteur, nous divisons ce volume par l'aire d'une cellule A_{cell} , et effectuons la somme du résultat pour toute la colonne



(a) La création de fissure ne change pas la hauteur du terrain.

(b) Illustration des deux principes du retrait vertical, par point et par région.

FIGURE 9.19 – Comparaison entre une fissuration sans retrait vertical, à partir d'un terrain plat et d'une tessellation de Dirichlet, ($r_s = 1.5$, k = 0.5), les autres paramètres étant inchangés : l'effet de relèvement des bords produit par le retrait vertical ajoute du réalisme à l'image obtenue.

C(p) correspondant à ce point :

$$H_r(p) = -\frac{\sum_{c \in C(p)} V_{vr}(c)}{A_{cell}}$$

$$(9.24)$$

Finalement, nous mettons à jour $V_r(c)$ comme dans l'équation (9.19) :

$$V_r(c) = V_r(c) - V_{vr}(c)$$
(9.25)

L'illustration des principes du retrait vertical et le résultat de son application sont montrés figure 9.19, qui permet de constater qu'il ajoute beaucoup de réalisme à la fissuration dans le cas d'un terrain initialement plat, grâce à l'effet visuel de relèvement des bords qu'il génère au sein des régions délimitées par les fissures.

9.5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de présenter notre modèle de fissuration de sol, dans son aspect structurel et dans son aspect fonctionnel. Le sol est décrit comme un espace cellulaire tridimensionnel contenant les informations sur l'humidité et la porosité des cellules le composant. Deux cartes de hauteur servent à définir en chaque cellule de surface la topographie du sol et l'épaisseur de la couche à fissurer. Un graphe de fissures contient les chemins possibles de fissuration, qui sont précalculés. Nous avons utilisé pour ce précalcul deux méthodes connues, celle de Horgan et Young et la tessellation de Dirichlet, et une troisième, la ligne de partage des eaux. Ces deux dernières méthodes offrent à l'utilisateur la possibilité d'influer sur le réseau de fissures en prenant en compte une caractéristique particulière du terrain considéré destiné à traduire la résistance de la couche de retrait à la fissuration. Nous avons utilisé l'épaisseur de la croûte, en faisant l'hypothèse que les fissures se créent préférentiellement dans les zones les plus épaisses, à cause d'une accumulation de stress plus importante.

Les fissures sont créées et se propagent en respectant les chemins précalculés et suivant des critères géométriques (distance aux fissures existantes, respect d'une orientation) avec la possibilité de faire intervenir une hiérarchie. Nous proposons de calculer dans un deuxième temps leur élargissement, basé sur le concept phénoménologique de volume de retrait traduisant le stress subi par les cellules qui ne sont pas fissurées. Ces volumes de retrait sont propagés jusqu'aux cellules fissurées, et la largeur d'une fissure est déduite, pour une cellule donnée, du volume de retrait accumulé dans cette cellule. Nous avons également introduit la possibilité d'ajouter un retrait vertical, calculé également à partir de ce volume de retrait. Le calcul des volumes de retrait peut se faire à partir d'une équation générique qui permet d'obtenir une fissuration réaliste même en l'absence d'informations particulières. Ce calcul peut également se faire en tenant compte d'un contexte précis fourni par l'utilisateur, ce qui rend le modèle un peu plus prédictif et assure une dynamique dépendant d'une situation donnée. Ces entrées du simulateur peuvent être la cinétique d'évolution de la teneur en eau, la courbe de retrait, voire une courbe synthétique donnant directement la variation du volume poreux en fonction du temps.

Au sein du cadre expérimental de la fissuration, nous avons décrit dans ce chapitre le rôle du générateur à travers l'initialisation, notamment des chemins de fissuration, et l'évolution de l'espace cellulaire. En revanche, même si nous avons déjà constaté sur quelques images que cette méthode peut produire des fissures réalistes, nous n'avons pas donné de détails sur l'interpréteur, qui est en charge justement de traduire les données de simulation en images. C'est l'objet du chapitre suivant, qui va nous permettre également de montrer d'autres résultats visuels ainsi que d'aborder la validation du modèle.

Chapitre 10

Interprétation graphique et résultats

Sommaire

10.1 Introduction	
10.2 Fissuration de sol	
10.2.1 Maillage du terrain $\dots \dots \dots$	
10.2.2 Résultats visuels $\ldots \ldots 255$	
10.2.3 Validation $\ldots \ldots 259$	
10.2.3.1 Dimension fractale $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots 260$	
10.2.3.2 Densités de Minkowski	
10.2.3.3 Fonctions de Minkowski	
10.2.4 Temps de calcul et occupation mémoire	
10.2.5 Exemple d'utilisation $\dots \dots \dots$	
10.3 Généralisation aux maillages 3D	
10.3.1 Méthode	
10.3.1.1 Pipeline	
10.3.1.2 Défauts	
10.3.1.3 Méthodes de paramétrisation	
10.3.2 Résultats visuels $\ldots \ldots 276$	
10.4 Conclusion	

10.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons présenté le modèle de fissuration de sol, sans donner de précisions sur l'interprétation des données obtenues par simulation pour produire une image. Ce point sera éclairci dans ce chapitre, et illustré par la présentation de plusieurs résultats visuels mettant en évidence les points intéressants de notre méthode. Nous y ajouterons deux applications possibles. La première sera simplement esquissée, il s'agit de la prédiction de l'émergence des plantules. La seconde sera plus détaillée, faisant l'objet de la deuxième partie du chapitre, et fournira également son lot de résultats visuels, il s'agit d'une tentative de généralisation de la méthode de fissuration aux maillages 3D, par le biais de la paramétrisation. Enfin, il nous apparaissait important d'entreprendre une démarche de validation du modèle, en utilisant des critères déjà employés dans la littérature, comme la dimension fractale et les nombres de Minkowski. De manière un peu plus originale, nous avons cherché à savoir si ces critères permettaient de valider véritablement un modèle de fissuration, c'està-dire s'ils étaient suffisamment discriminants pour écarter des images ne représentant pas des fissures.

10.2 Fissuration de sol

10.2.1 Maillage du terrain

Les informations transmises à l'interpréteur, responsable de leur traduction sous la forme la plus compréhensible par l'utilisateur désirant les exploiter, sont de deux types : il s'agit de la carte de hauteur du terrain qui a pu être modifiée par le retrait vertical, et du graphe de fissuration, qui comporte le chemin des fissures et leurs largeur et profondeur en chaque point, dimensions qui peuvent être nulles pour traduire le fait qu'une fissure n'a pas atteint la cellule correspondante. L'interpréteur doit traduire ces informations en images, et nous avons choisi de le faire en transformant ces données en une surface triangulée. Cette transformation est relativement aisée et se fait en six étapes (illustrées par la figure 10.1, voir la figure 10.2 pour la signification de P_S , P_B , L_B) :



FIGURE 10.1 – Illustration des six étapes d'un maillage de trois portions d'une fissure de section triangulaire (donc définies par trois polygones de surface P_S et trois segments de droite L_B). Ici un seul sommet interpolé (en rouge) est ajouté entre deux sommets initiaux.

- 1. nous transformons les pixels de la carte de hauteur en sommets regroupés dans un ensemble S;
- 2. nous assemblons les portions ¹ consécutives de fissure en polygones P_S à la surface du terrain, en respectant la largeur du début de chaque portion; la figure 10.3 montre plusieurs de ces polygones constituant des fissures;
- 3. nous éliminons de l'ensemble S les sommets qui se trouvent à l'intérieur de ces polygones (figure 10.4(a));
- 4. nous calculons les segments de droite L_B ou les polygones P_B correspondant à la base des fissures;
- 5. nous transformons les côtés de tous les polygones P_S , P_B et les segments de droite L_B en sommets ajoutés à \mathcal{S} , avec la possibilité d'interpoler un nombre suffisant de sommets de manière à améliorer le rendu (figure 10.4(b));

^{1.} Une portion rejoint deux cellules de surface adjacentes qui font partie d'une fissure.

6. finalement, nous obtenons les facettes triangulaires à passer à l'étape de rendu par une triangulation de Delaunay des sommets contenus dans S, effectuée au moyen de la bibliothèque Triangle proposée par Shewchuk (1996).



FIGURE 10.2 – Volume d'une portion de fissure définie entre deux cellules de surface adjacentes. La base peut être représentée par un segment de droite dans le cas d'une section triangulaire, ou par un polygone si le prisme est tronqué.

Pour obtenir un résultat visuel rapide (par exemple au cours de la simulation afin de l'interrompre lorsque le degré de fissuration désiré est obtenu), ces facettes sont rendues par OpenGL et le modèle d'illumination de Phong (figure 10.4(c)). Une image de meilleure qualité peut être obtenue avec un traceur de rayons, POV-Ray par exemple (figure 10.12(c)).



FIGURE 10.3 – Illustration du principe des polygones de surface pour représenter l'information de largeur des portions de fissure.

L'étape (2) du maillage modifie la forme des portions de fissure, ce qui introduit une approximation par rapport au calcul du volume utilisé pour calculer l'élargissement. Nous avons tenté de quantifier l'amplitude de cette approximation dans un cas simple, en la ramenant à l'approximation effectuée sur les aires des portions de fissures visibles à la surface (figure 10.5).

Si on considère les aires des portions de fissures, on peut écrire l'aire totale A_1 prise en compte lors du rendu, en joignant les polygones (figure 10.5(b)) :

$$A_1 = \sum_{i=1}^{4} L_i \frac{W_i + W_{i+1}}{2} + L_5 W_5 \tag{10.1}$$



- des polygones de surface et du maillage final.
- Delaunay, avec un maillage plus fin près des fissures, dû à l'ajout de sommets interpolés.
- (a) Superposition de la jonction (b) Résultat de la triangulation de (c) Rendu par OpenGL de la fissure de l'image précédente.

FIGURE 10.4 – Résultats obtenus par la méthode de maillage des portions de fissure.



(a) Données dont nous disposons (le volume de chaque portion de fissure partant des cellules de cette fissure).



(b) Ce qui est rendu graphiquement.



FIGURE 10.5 – Illustration de l'approximation tolérée dans le calcul des volumes de portion de fissure et leur rendu.

En assimilant les L_i à une valeur moyenne ² \overline{L} , nous obtenons :

$$A_{1} \approx \overline{L} \left(\sum_{i=1}^{4} \frac{W_{i} + W_{i+1}}{2} + W_{5} \right)$$

$$\approx \overline{L} \left(\frac{W_{1}}{2} + \sum_{i=2}^{4} W_{i} + \frac{3W_{5}}{2} \right)$$
(10.2)

^{2.} Ce qui se justifie dans la mesure où les extrémités des portions de fissures se situent à l'intérieur d'une grille régulière.

L'aire A_2 que nous approximons lors du calcul de l'élargissement s'écrit dans ce cas (figure 10.5(c)) :

$$A_{2} = \sum_{i=1}^{5} L_{i} W_{i}$$

$$\approx \overline{L} \sum_{i=1}^{5} W_{i}$$
(10.3)

Par conséquent, l'erreur ΔA commise est donnée par :

$$\Delta A = |A_1 - A_2|$$

$$\approx \left| \overline{L} \left(\frac{W_1}{2} + \sum_{i=2}^4 W_i + \frac{3W_5}{2} \right) - \overline{L} \sum_{i=1}^5 W_i \right|$$

$$\approx \left| \overline{L} \left(\frac{W_5 - W_1}{2} \right) \right|$$
(10.4)

Cette erreur, avec les simplifications faites ici, dépend donc d'une longueur moyenne \overline{L} (qui dans notre cas d'une cellule de 2 mm de côté, est toujours inférieure à $4\sqrt{2}$ mm³) et de la différence entre les largeurs W_1 et W_5 de la première et de la dernière portion, sur lesquelles nous ne pouvons faire d'hypothèse, mais qui dans la majorité des essais que nous avons effectués, étaient de petite dimension et de plus très comparables, l'élargissement maximal ne se produisant pas en général aux extrémités des fissures. Nous considérons donc que cette erreur peut être négligée, au moins dans le rendu visuel servant de comparaison avec les fissures réelles. De plus, cette approximation n'intervient que lors de l'interprétation des résultats de la simulation, et n'interfère aucunement avec le cœur de notre modèle, à savoir le précalcul des chemins de fissuration et la propagation des volumes de retrait. Une autre méthode d'obtention d'images, plus précise, pourrait donc se substituer à celle décrite ici, sans devoir modifier l'étape précédente.

10.2.2 Résultats visuels

La figure 10.6 montre un résultat obtenu sur un terrain plat et une couche à fissurer d'épaisseur constante, avec un précalcul des chemins basé sur le modèle de Horgan et Young. Il est visible sur ces exemples que notre modèle est capable de produire des fissures délimitant des régions fermées, c'est-à-dire correspondant à un cycle dans le graphe des chemins de fissuration. Inversement, même si aucun chemin du graphe initial n'est interrompu (ce qui est le cas pour les trois types de calcul de chemin de fissuration que nous avons employés), notre méthode dynamique, basée sur la propagation des fissures et l'élargissement dû à l'accumulation des volumes de retrait, permet également de produire des « branches mortes », c'est-à-dire des fissures interrompues avant de rejoindre une autre fissure, phénomène fréquent dans la nature (un exemple de branche morte est visible figure 10.7).

^{3.} Plus exactement, $2\sqrt{2}(1+c) \text{ mm}$, $0 \le c \le 1$, c étant égal au demi côté du carré dans lequel l'extrémité de la portion de fissure peut être aléatoirement placée, ce qui représente donc la distance maximale entre deux extrémités d'une portion de fissure.



(a) Chemins produits par la méthode de Horgan et Young (2000).



(c) Fissures suivant des chemins non hiérarchiques (après 63 itérations).



(b) Apparence des premières fissures produites (après 10 itérations).



(d) Fissures suivant des chemins hiérarchiques (après 63 itérations). Certaines des fissures les plus larges (c.-à-d. les plus anciennes) ne sont pas les mêmes que dans l'image précédente.

FIGURE 10.6 – Fissures sur une surface plane, suivant des chemins non hiérarchiques (c) et hiérarchiques (d) produits par la méthode de Horgan et Young, au début et à la fin du processus. Notre méthode produit des fissures de largeur différente, mettant en évidence l'ordre de leur création, ce qui permet d'obtenir un résultat d'aspect naturel.

La figure 10.6(b) montre que notre méthode peut produire une première génération de fissures, découpant le terrain en régions d'aire étendue, qui seront subdivisées par les générations de fissures suivantes. La comparaison entre les figures 10.6(c) et 10.6(d), produites respectivement par des chemins non hiérarchisés et hiérarchisés, permet de constater des différences induites par l'introduction de la hiérarchie. Il est clair notamment qu'il arrive que ce ne soient pas les mêmes arêtes qui sont choisies si la hiérarchie s'ajoute au critère de l'orientation. Ces images montrent que les premières fissures bénéficient de plus de volume de retrait que les dernières, et donc s'élargissent et s'approfondissent plus. Il est ainsi possible, pour cet exemple, de déterminer facilement au moins trois générations de fissures.

Notre méthode de fissuration étant dynamique, il est possible d'obtenir un rendu à chaque itération et donc de produire une animation qui permet de mieux rendre compte de l'évolution du processus simulé (figure 10.8). Un autre intérêt de la production d'une image à chaque pas de temps est de pouvoir interrompre une simulation quand le résultat visuel est satisfaisant, pour passer par exemple à un rendu visuel de meilleur qualité (lanceur de rayons par exemple).



FIGURE 10.7 – Un exemple de fissuration appliqué à un sol croûté par simulation. La figure (a) montre les chemins possibles de fissuration obtenus par LPE. La figure (b) montre le résultat d'une simulation de fissuration. Bien que le chemin original n'ait ni différentes largeurs, ni branches mortes, les fissures produites peuvent présenter de telles particularités (voir par exemple le cercle rouge qui entoure une branche morte dans l'image finale et le chemin de fissuration dont elle est issue, qui lui n'est pas interrompu).



FIGURE 10.8 – Exemple de dynamique de fissuration sur un terrain plat.

La comparaison entre les deux images de la figure 9.19, page 249 montre l'apport de la prise en compte du retrait vertical dans le cas de la fissuration d'un terrain plat, à partir d'une tessellation de Dirichlet et d'une couche de retrait uniforme. L'ajout d'une texture photographique peut renforcer encore l'aspect réaliste des fissures produites avec des paramètres identiques (figure 10.9).

Dans le cadre d'une simulation de la fissuration d'un sol croûté, nous n'utilisons pas de génération aléatoire pour la couche de retrait. Nous partons d'une carte de hauteur provenant de la rugosimétrie laser d'une portion de terrain reconstituée en laboratoire (figure 10.10(a)). Nous simulons la dégradation de la surface de ce terrain sous l'action de la pluie (figure 10.10(b)), ce qui nous permet d'obtenir à la fois une carte de hauteur du terrain modifiée, et une carte d'épaisseur de la croûte formée qui peuvent servir d'entrées à notre méthode de fissuration. La LPE appliquée à la carte de croûte nous donne les chemins de fissuration possibles (figure 10.10(c)), et finalement notre méthode de fissuration permet de calculer les fissures se produisant sur ce terrain (figure 10.10(d)).

En raison de l'utilisation, soit de la LPE non hiérarchique, soit de la LPE hiérarchique, des différences apparaissent, de manière globale dans le motif final des fissures, ou de manière locale dans leur élargissement, entre les figures 10.11(a) et 10.11(b). La méthode hiérarchique



(a) Le terrain plat initial texturé.

(b) Le terrain après fissuration avec retrait vertical.

FIGURE 10.9 – Illustration d'une fissuration d'un terrain plat, basée sur une tessellation de Dirichlet, une couche de retrait uniforme, avec l'apport du retrait vertical et d'une texture photographique.



(a) Le rendu du modèle numérique de terrain (MNT) initial obtenu par rugosimétrie laser d'une portion de sol réel.



(c) Carte de hauteur de la croûte et chemins possibles de fissuration obtenus par LPE.



(b) Le terrain virtuel après simulation de la formation d'une croûte.



(d) Le terrain virtuel après application de la méthode de fissuration.

FIGURE 10.10 – Le simulateur de dégradation d'un sol sous l'action de la pluie produit, à partir de la topographie intitiale d'un sol réel, un sol virtuellement croûté, auquel nous appliquons notre méthode de fissuration.

donne l'assurance que l'ordre dans le choix des fissures, tant lors de leur création que lors de leur progression, dépend non seulement de la distance aux autres fissures existantes et du respect d'une orientation initiale, mais aussi et surtout de l'état du sol, en l'occurrence de l'épaisseur de la couche de retrait, équivalente ici à la croûte formée par la pluie.

L'initialisation du modèle est une étape importante de notre méthode, et elle offre l'op-



(a) Fissuration d'après une LPE non hiérarchique.



(b) Fissuration, avec les mêmes paramètres, mais basée sur une LPE hiérarchique.

FIGURE 10.11 – Autre exemple de fissures produites sur un sol croûté par simulation. Les chemins possibles de fissuration sont produits dans un cas par une LPE non hiérarchique (a), et dans l'autre cas par une LPE hiérarchique (b), à partir de la même carte d'épaisseur de croûte. Les chemins sont donc identiques, seul diffère le choix opéré lors de la création et de la progression, donnant au final deux motifs de fissuration, le second étant directement lié à l'épaisseur de la couche de retrait du sol.

portunité d'influer de manière directe sur le résultat final. Le sol étant représenté par une grille régulière 3D, il est aisé d'y définir des hétérogénéités significatives, par exemple des zones avec des conditions initiales spécifiques qui vont jouer un rôle dans la formation des fissures. Un exemple en est donné figure 10.12, où nous avons utilisé le logo d'Eurographics comme carte d'humidité initiale (les zones couvertes par les lettres étant les plus humides). Ces zones, subissant une plus grande variation dans leur teneur en eau, vont produire une plus grande quantité de volume de retrait que les zones sèches, ce qui aura pour conséquence que les fissures y seront plus nombreuses et plus larges.

L'initialisation comprend aussi la donnée des deux cartes de hauteur : une pour le relief, l'autre pour la couche de retrait. La figure 10.13 présente trois exemples d'initialisation particulière de ces cartes. Le relief initial provient de caractères alphabétiques qui définissent les parties hautes du terrain. La couche de retrait est basée sur les mêmes caractères, avec une variante : soit elle est présente uniquement en dehors des lettres, et dans ce cas les zones planes sont les seules zones à présenter des fissures (figure 10.13(b)), soit l'effet est inverse, la couche de retrait étant semblable à la carte de relief, et alors ce sont seulement les lettres qui sont fissurées (figures 10.13(d) et 10.13(e)).

10.2.3 Validation

Nous avons tenté de trouver un moyen de valider notre modèle de fissuration, en nous focalisant sur les propriétés générales du réseau de fissures, sans chercher à respecter un contexte précis de fissuration. Un des moyens les plus usités pour étudier les fissures est la photographie, qui permet de conserver de manière simple une image d'un réseau de fissures à la surface du sol. Différentes techniques d'analyse d'image sont donc applicables à ces images pour caractériser la fissuration. D'un autre côté, notre méthode est conçue pour produire des



(a) Taux initial d'humidité du sol en haut, et taux final en bas avec, en jaune et en surface, le chemin des fissures créées.



(b) Le terrain fissuré en fin de simulation.

FIGURE 10.12 – Cet exemple illustre comment les conditions initiales peuvent influer sur la fissuration du terrain. L'image (a) montre, à l'aide d'une visualisation volumique (l'intensité de la couleur et l'opacité d'un voxel dépendant de la quantité d'eau contenue dans la cellule correspondante), la teneur en eau du terrain, au début et à la fin de la simulation. Pour l'image (b), nous avons utilisé, pour colorer la surface, une texture basée sur la quantité d'eau évaporée pendant la simulation dans les deux premiers centimètres de terrain.

images, il était donc naturel de privilégier ce type d'analyse pour comparer nos fissures synthétiques et des fissures naturelles. Pour ces dernières, nous avons utilisé des images binaires (figure 10.14) extraites de différents articles (Velde, 1999, 2001, Vogel et coll., 2005a) lorsque les dimensions réelles étaient fournies, de manière à respecter l'échelle des pixels des fissures calculées par notre méthode, c'est-à-dire 2 mm. Il est à noter que ces dimensions, quelques dizaines de centimètres, correspondent parfaitement à l'échelle choisie pour nos travaux. De manière à établir des comparaisons, nous avons produit différentes séries de fissures : avec la tessellation de Dirichlet (avec 100 et 500 graines), avec la méthode de Horgan et Young, avec la LPE et la LPE hiérarchique (figure 10.15). Nous avons également ajouté, comme « images témoins », des images de motifs géométriques arbitraires (figure 10.16) ainsi que des images couramment utilisées en traitement d'images (figure 10.17), *a priori* éloignés de fissures naturelles .

10.2.3.1 Dimension fractale

a) Principe

Comme indiqué dans la section 8.2.2.5, Velde (1999) a utilisé la dimension fractale des distributions de pores en 2D pour caractériser le réseau de fissures apparues dans différents types de sol. La méthode utilisée par Velde pour estimer la dimension fractale est la méthode



(a) De gauche à droite : la carte de hauteur, la couche de retrait, les chemins de fissuration (tessellation de Dirichlet).



(b) Le résultat de la fissuration, avec un effet de retrait vertical très visible.



 (c) Cartes de (d) Résultat de la fissuration, basée sur une (e) Résultat de la fissuration, basée sur la métessellation de Dirichlet.
 (e) Résultat de la fissuration, basée sur la méthode de Horgan et Young.

FIGURE 10.13 – Exemples d'utilisation de cartes de hauteur initiales dessinées par l'utilisateur. Pour l'image (b), la couche de retrait est inversée par rapport au relief : les fissures se produisent dans les zones basses (en dehors des lettres). Pour les images (d,e) l'effet est contraire : la couche de retrait est identique à la carte du relief (aucune couche en dehors des lettres), donc seules les lettres sont fissurées.

du comptage de boîtes (*box counting method*). Nous avons procédé de la même façon, en utilisant le programme FDC⁴ (cité et utilisé par Foroutan-Pour et coll., 1999). Le principe consiste à recouvrir l'image d'une succession de grilles régulières de « boîtes » carrées, en changeant pour chaque grille la dimension s de ces boîtes (figure 10.18). Le nombre de boîtes N(s) contenant une partie de l'objet fractal est compté pour chaque dimension. D'après la relation (Foroutan-Pour et coll., 1999) :

$$\log(N(s)) = \log(K) + D \, \log(1/s) \tag{10.5}$$

K étant une constante, il vient que la dimension fractale D peut être estimée par la pente d'une portion linéaire significative de la courbe $\log(N(s))$ en fonction de $\log(1/s)$. L'un des problèmes soulevés par cette méthode est le choix de l'étendue des dimensions s de manière à obtenir effectivement une portion linéaire de la courbe, mais la procédure de recherche

^{4.} Fractal Dimension Calculator, écrit par Paul D. Bourke, University of Western Australia, Australie (paul.bourke@uwa.edu.au).



FIGURE 10.14 – Images binaires de fissures provenant de divers articles : (a-e) Velde 1999, (f-i) Velde 2001, (j) Vogel et coll. (2005a).



FIGURE 10.15 – Images binaires provenant de notre simulation de fissuration.



FIGURE 10.16 – Images géométriques arbitraires.



FIGURE 10.17 – Autres images de test.

peut s'automatiser. Comme le montre la table 10.1, il est possible avec FDC de retrouver des valeurs proches des dimensions fractales théoriques de figures connues (erreur relative toujours inférieure à 2%).



FIGURE 10.18 – Illustration du principe de la méthode du comptage de boîtes pour estimer la dimension fractale d'un réseau de fissures.

	${\cal D}$ théorique	Destimée	Erreur relative
Sierpiński Carpet	1.8928	1.860	1.73%
Sierpiński Triangle	1.585	1.570	0.95%
Koch Curve	1.2619	1.259	0.23%
Quadratic Koch Island	1.5	1.482	1.20%
Gosper Island	1.1291	1.115	1.25%
Segment de droite	1	0.984	1.60%

TABLEAU 10.1 – Comparaison de la dimension fractale théorique et de la dimension fractale estimée par la méthode du comptage de boîtes pour différentes figures connues.

b) Résultats

Velde (1999) a observé que les images de fissures qui faisaient l'objet de son étude présentaient une large étendue de valeurs de dimension fractale, allant de 1.2 à 1.8, autrement dit partant d'une forte irrégularité de la structure jusqu'à une quasi régularité (figure 10.19(a)). Les fissures produites par notre méthode donnent la même étendue de valeurs, quel que soit le type de création des chemins de fissuration, ainsi que le montre les figures 10.19(b,c). Cependant, la figure 10.19(b) montre de plus que les images géométriques arbitraires, dont nous avons également mesuré la dimension fractale, donnent la même étendue de valeurs; ce critère ne semble donc pas suffisant pour juger du réalisme des fissures produites.

Velde a également montré qu'il existait une relation quasi linéaire entre la porosité et la dimension fractale du réseau de fissures dans les images de sol de ses expériences (figure 10.19(a)). Nous avons également constaté une relation linéaire entre l'aire des fissures et la dimension fractale, avec cependant une pente beaucoup moins accentuée (figure 10.19 b,c) et un caractère linéaire moins flagrant pour le modèle de Horgan et Young. Il reste que c'est néanmoins un résultat intéressant, car les figures géométriques témoins ne semblent respecter aucune linéarité.

Enfin, à partir des mesures d'un seul cycle de gonflement-retrait d'un sol cultivé, Velde



FIGURE 10.19 – Comparaison des courbes donnant l'aire des fissures en fonction de la dimension fractale, à la fois pour des fissures réelles et des fissures synthétisées. (a) : images de fissures réelles (Velde, 1999). (b-c) : séries temporelles de fissures obtenues par simulation, avec également des figures géométriques arbitraires dans la figure (b).

(2001) a trouvé que la dimension fractale des fissures change régulièrement au cours du temps (figure 10.20(a)). Nous observons également pour les fissurations simulées (figure 10.20(b)) une évolution nette de la dimension fractale, avec, tout d'abord, une étendue des valeurs plus importante, et ensuite un accroissement plus rapide. Il est difficile de comparer précisément la forme des courbes, puisque la figure Velde (2001) ne différencie pas les différents réseaux mesurés, dont fait partie la série d'images figure 10.14(f-i). Cette série, correspondant à 1, 4, 6 et 10 jours, permet de constater que le réseau à 10 jours (dernière image) est bien moins dense que les réseaux obtenus par simulation, d'où sans doute la différence dans leur dimension fractale. Nous ne pouvons pas conclure que cette dimension fractale aurait effectivement continué à augmenter dans le cas des fissures réelles, cependant les dimensions fractales maximales visibles dans la figure 10.20 semblent bien indiquer cette tendance.



FIGURE 10.20 – Comparaison de la dimension fractale à différentes dates de dessiccation du sol, à la fois pour des fissurations réelles et simulées (dans ce cas, un jour correspond à une itération de notre algorithme).
10.2.3.2 Densités de Minkowski

Nous avons vu dans la section 8.2.2.4 que les densités de Minkowski sont utilisables pour estimer les caractéristiques globales de structures binaires, et Vogel et coll. (2005b) les ont utilisées pour valider leur modèle de fissuration. Nous avons estimé les densités de Minkowski au moyen d'une méthode proposée par Ohser et coll. (1998), basée sur un filtrage linéaire de l'image binaire, qui produit une image en niveaux de gris dont l'histogramme sert à calculer ces densités : densité d'aire, densité de longueur et nombre d'Euler. Deux paramètres conditionnent cette estimation : le rapport hauteur/largeur des pixels ζ et la taille du filtre ν . Pour les images que nous utilisons, les pixels sont carrés ($\zeta = 1$), en revanche la taille du filtre reste à déterminer.

Dans une première série d'évaluations (Valette et coll., 2008b), nous avions fixé arbitrairement une valeur à la taille du filtre ($\nu = 10$). Nous avons cherché à évaluer l'influence de cette taille sur l'estimation des densités de Minkowski, pour les dix images de fissures réelles reproduites figure 10.14. Les courbes de la figure 10.21, obtenues en calculant les trois quantités en faisant varier la taille du filtre de 0 à 100, montrent que, si la densité d'aire est peu sensible au changement de cette taille (encore que l'image (a) présente de larges variations), les deux autres caractéristiques présentent en revanche une grande évolution dans les premières valeurs de la taille avant de relativement se stabiliser en plateau. Nous avons donc choisi d'utiliser les moyennes sur ces 101 valeurs, moyennes qui sont également reproduites sur ces figures. Il s'avère que ces moyennes peuvent servir à discriminer les dix images aussi bien que les courbes dans leur totalité. Le seul défaut montré par ce test est visible pour la densité de longueur des images (a) et (c) : alors que les moyennes sont égales pour ces images, l'image (a) montre un maximum (obtenu pour $\nu = 1$) plus élevé que l'image (c). Néanmoins, le reste des deux courbes est très comparable, ce qui peut légitimer le fait que nous estimions que ces deux images ont une même densité de longueur.

Ce calcul de moyenne a été appliqué aux images des quatre types, chaque image donnant donc un point dans l'espace 3D défini par ces trois caractéristiques. Ces points sont reproduits dans les figures 10.22(a) et 10.22(b). Il est à noter que les points des images de fissures réelles et les points des images des fissures artificielles semblent assez bien se retrouver sur une courbe unique, alors que les points des autres images ont des positions beaucoup plus divergentes. Les figures 10.22(c) et 10.22(d) ont été établies sans tenir compte de la largeur des fissures artificielles (qui ont été réduites à cet effet à leur squelette). Les points résultants de ces images suivent la courbe déjà mise en évidence, avec un léger décalage, mais sont entièrement absents d'une grande partie de cette courbe, ce qui tend à prouver que notre calcul d'élargissement des fissures contribue à produire des réseaux de fissures plus proche de la réalité.

10.2.3.3 Fonctions de Minkowski

Vogel et coll. (2005a) remarquent que, bien que les densités de Minkowski soient capables de renseigner sur la taille moyenne des agrégats créés par la fissuration, ou sur la connectivité moyenne du réseau de fissures, elles ne donnent pas d'information sur la distribution des tailles des agrégats ou leur densité en nombre, lorsqu'ils ne sont pas entièrement délimités par des fissures. Ils proposent d'utiliser, pour obtenir une description plus détaillée, les fonctions de Minkowski.



FIGURE 10.21 – Influence de la taille du filtre (en abscisse) sur les estimations des densités de Minkowski (en ordonnée). Les droites en pointillés fins représentent les moyennes des courbes de même couleur.

Ces fonctions s'obtiennent en recalculant les densités de Minkowski après une succession d'un certain nombre d'érosions morphologiques appliquées à l'image initiale avec un élément structurant circulaire de rayon croissant r. Ces densités deviennent donc des fonctions de r. Pour effectuer les érosions, nous partons d'une carte de distance euclidienne signée (Saito et Torikawi, 1994) et, suivant la méthode déjà employée par Vogel et coll., nous produisons les différentes érosions par une segmentation de cette carte, considérée comme une image en niveaux de gris, selon des seuils dont la valeur correspond aux valeurs successives de r(figure 10.23). Les valeurs négatives de r correspondent à des distances intérieures aux fissures, et les valeurs positives à des distances extérieures aux fissures. Comme précédemment, les valeurs moyennes des densités de Minkowski sont calculées à l'aide de la méthode proposée par Ohser et coll. Les figures 10.24, 10.25, 10.26 donnent les fonctions de Minkowski ainsi obtenues pour différentes séries d'images, en fonction du niveau r de l'érosion morphologique appliquée (axe des abscisses).

La figure 10.24 correspond aux images de fissures réelles reproduites figure 10.14, réparties en deux séries différenciées par trois points :

- 1. la pente de la fonction de densité d'aire est plus forte pour la première série;
- 2. le maximum de la densité de longueur est atteint pour r < 5, avec une valeur supérieure à 0.025 dans la première série, et pour $r \ge 5$ dans la seconde série, avec une valeur inférieure à 0.025;
- 3. le minimum du nombre d'Euler est atteint pour r < 5 dans la première série, et pour $r \ge 5$ dans la seconde série, avec des valeurs comparables; enfin, dans la première série, le maximum est atteint pour un r strictement négatif, alors que dans la seconde série, il est atteint pour r positif ou proche de 0.



FIGURE 10.22 – Densités de Minkowski obtenues par la méthode de Ohser et coll. (1998) (moyennes établies avec ν variant de 0 à 100 et $\zeta = 1$). Les figures (a) et (b) d'une part, (c) et (d) d'autre part, montrent les mêmes points 3D d'un point de vue différent. Pour les figures (c) et (d), les largeurs des fissures artificielles n'ont pas été prises en compte dans le calcul des densités.

Il est intéressant de noter que cette catégorisation se retrouve visuellement : il est notoire que les images de la première série montrent un réseau de fissures beaucoup plus dense, donc des aires de porosité et des longueurs de fissures plus élevées pour r = 0. Nous retrouvons un résultat mis en évidence par Vogel et coll. (2005b), à savoir que les fonctions de Minkowski peuvent servir à classer les fissures selon certaines propriétés.

Pour établir des comparaisons, nous avons fait les mêmes calculs de fonctions de Minkowski sur les images de fissures simulées par notre méthode, et ces calculs nous ont donné les courbes reproduites figure 10.25. Qualitativement, les courbes présentent les mêmes formes que celles correspondant aux fissures réelles, et quantitativement, les extrema des courbes sont dans les mêmes intervalles. Si l'on reprend les trois points différenciant les fissures réelles évoqués ci-dessus, on s'aperçoit aisément que ces courbes présentent les caractéristiques de la première série : pente de la fonction de densité d'aire forte, maximum de la densité de longueur atteint pour r < 5, maximum du nombre d'Euler atteint pour r < 0 (sauf un cas), minimum atteint pour r < 5 (sauf deux cas). Les deux exceptions de ce dernier point sont aussi des cas limites pour les autres points, il s'avère que ce sont des types de chemin (tessellation de



FIGURE 10.23 – Illustration du principe des érosions morphologiques successives obtenues à partir de segmentations d'une carte des distances selon la valeur du seuil r.



FIGURE 10.24 – Fonctions de Minkowski (r est en abscisse) calculées pour les images de fissures réelles : en haut, 10.14 (a, b, c, d, j), en bas 10.14 (e, f, g, h, i).

Dirichlet avec 100 graines et modèle de Horgan et Young) qui génèrent beaucoup moins de fissures que les autres, ce qui est cohérent avec notre remarque précédente sur la classification visuelle des fissures réelles selon la densité du réseau.

Nous avons voulu finalement décider si les fonctions de Minkowski étaient des outils pertinents pour différencier des images de fissures d'autres images. Pour cela, nous avons calculé ces fonctions pour les deux séries d'images, reproduites figures 10.16 et 10.17. Les courbes résultantes sont données figure 10.26. Il apparaît malheureusement que ces courbes sont beaucoup moins discriminantes que la position des points dans l'espace des densités



FIGURE 10.25 – Fonctions de Minkowski calculées pour les fissures produites par notre méthode (r est en abscisse).



FIGURE 10.26 – Fonctions de Minkowski (r est en abscisse) calculées pour des images ne représentant pas des fissures : en haut, des figures géométriques (voir figure 10.16), et en bas d'autres images (voir figure 10.17).

de Minkowski, et qu'il est difficile de distinguer des critères permettant de trier les courbes provenant de fissures de courbes provenant d'autres images.

En conclusion de ces comparaisons, nous retenons que les fonctions de Minkowski calculées à partir de nos fissures simulées ne sont pas éloignées de celles obtenues à partir de (certaines) fissures réelles. Nous pouvons en déduire que notre méthode n'est pas invalidée par ces comparaisons. En revanche, comme nous avons pu trouver des images présentant d'autres motifs que ceux d'une fissuration et donnant néanmoins des fonctions de Minkowski globalement comparables, cette méthode ne peut être suffisante pour valider notre modèle de fissuration.

10.2.4Temps de calcul et occupation mémoire

Le facteur prépondérant dans le temps réel de calcul d'une simulation de fissuration est la dimension du terrain, et plus précisément le nombre de cellules actives, c'est-à-dire les cellules de la couche dans lesquelles il y a calcul des volumes de retrait et propagation. La figure 10.27(a) montre comment varie le temps de calcul d'une itération au cours d'une simulation, pour différentes dimensions du côté du terrain. Les tests décrits ici utilisent une configuration de base d'un terrain de $256 \times 256 \times 20$ cellules et une tessellation de Dirichlet avec 200 graines. Un autre facteur important est la longueur totale des fissures, autrement dit le nombre de cellules de surface pour lesquelles un calcul de largeur et de profondeur est nécessaire. La figure 10.27(b) montre que cette longueur est la quantité qui varie le plus, mais d'une façon assez régulière, alors que le temps de calcul, et dans une moindre mesure, le nombre de sommets, affichent nettement deux phases, qui correspondent, la première à une production importante de volumes de retrait, et la seconde à une faible production de ces volumes, avec une priorité à l'accroissement des longueurs et non des largeurs de fissures.



(a) Variation du temps de calcul (s) d'une itération pour différentes tailles de terrain (en cellules).



(b) Évolution de différentes données au cours d'une simulation.



pour différents nombres de fissures précalculées.

(c) Évolution du temps de calcul (d) Évolution du nombre de som- (e) Évolution de la longueur totale mets pour différents nombres de fissures précalculées.

(m) de fissuration pour différents nombres de fissures précalculées.

FIGURE 10.27 – Études du temps de calcul et de l'occupation mémoire selon différents critères.

Nous avons étudié l'influence du nombre de fissures précalculées sur l'évolution du temps de calcul (figure 10.27(c)), du nombre de sommets (figure 10.27(d)) et de la longueur totale des fissures (figure 10.27(e)), en faisant varier le nombre de graines utilisées pour la tessellation de Dirichlet. Les plateaux observés pour les temps d'itération avec 50 et 100 graines correspondent à une fissuration qui ne progresse quasiment plus : les volumes de retrait ont été répartis, et les chemins de fissure sont tous explorés. La même remarque s'applique aux nombres de sommets, avec en plus une diminution de ces nombres dans certains cas, lorsque les sommets à l'intérieur des fissures qui s'élargissent sont supprimés. Enfin, les longueurs totales croissent régulièrement, jusqu'à un maximum correspondant à la longueur totale des chemins précalculés.

La durée totale d'une simulation dépend évidemment du nombre d'itérations demandé, qui peut être réduit car quelques itérations peuvent suffire à obtenir un réseau complet de fissures. Par exemple l'image de la figure 9.19(b) a nécessité 20 itérations, de 4 s à 12.5 s chacune, ce qui représente un temps total de 3 min 8 s, avec un rendu visuel OpenGL à chaque itération afin d'obtenir une animation, sur un Pentium IV cadencé à 3 GHz avec 1 GB de RAM. Le nombre de polygones utilisé lors du rendu dépend d'abord de la taille de la grille originale qui représente typiquement 256×256 cellules pour les terrains plats utilisés par exemple pour la figure 10.6, et 279×279 pour le sol réel représenté figure 10.7. Ces grilles génèrent respectivement 130050 et 154568 polygones, et ces nombres augmentent évidemment dès que des fissures sont ajoutées. Le nombre de fissures pouvant être très varié, il est difficile de donner un nombre final de polygones suffisamment représentatif. Une portion de fissure ajoute 3 ou 4 sommets, et 4 ou 6 polygones, selon que la section est triangulaire ou non. Il faut ajouter les polygones créés par la subdivision des carrés par où passe la fissure (voir figure 10.1), et les sommets interpolés (et donc les polygones) supplémentaires ajoutés pour améliorer le rendu. Le tableau 10.2 donne des détails sur le temps de calcul, les nombres de sommets et de facettes, la longueur totale et le temps total de calcul qui correspondent aux images de test de la validation (figure 10.15).

Modèle	Sommets	Triangles	Longueur totale (m)	Temps total (s)
Dirichlet 500	110243	219128	19.85	186
Dirichlet 100	91571	181918	10.74	168
Horgan et Young	73615	146044	7.68	113
LPE	112016	222436	22.53	181
LPE hiérarchique	126144	247772	29.28	334

TABLEAU 10.2 – Exemples de temps de calcul et d'occupation mémoire pour 12 itérations et les différents modèles de précalcul des chemins de fissures.

10.2.5 Exemple d'utilisation

La structure du sol et son évolution influencent grandement l'émergence des plantules : la présence d'agrégats et d'une croûte de battance peuvent l'empêcher, alors que la présence de fissures offrent une possibilité aux plantules de trouver un chemin vers la surface du sol (Aubertot et coll., 2002). Dans sa thèse, Gallardo-Carrera (2006) présente une méthode pour estimer un taux de franchissement des plantes par les fissures à partir d'un modèle de fissuration. Cette méthode peut être appliquée de la même façon à notre modèle. Une fois le réseau de fissures calculé en surface, il faut disposer des trois paramètres suivants d'une ligne de semis, spécifiques à chaque espèce (figure 10.28) :

- le nombre de graines (distribuées régulièrement le long de la ligne de semis);
- la position des graines, en respectant une distribution spatiale donnée (typiquement une distribution gaussienne autour de la ligne de semis) avec introduction d'un possible décalage par rapport à la ligne de semis;

 le rayon du cercle d'action des plantules, qui représente la distance maximale qu'une plantule peut parcourir sous la croûte pour atteindre une fissure.



FIGURE 10.28 – Illustration du principe de la prédiction de l'émergence des plantules. Chaque anneau en surface définit une zone d'action pour la plantule correspondante. Si cette zone intersecte une fissure, l'émergence est possible (anneau vert). Dans cet exemple fictif, 53% des plantules arrivent en surface.

À partir du réseau de fissures et de ces paramètres, le critère d'émergence est simple : si le cercle d'action d'une plantule intersecte une fissure, alors elle peut émerger par cette fissure. La figure 10.29 illustre le résultat de cette prédiction dans un cas fictif, ce qui nous permet également de montrer qu'une telle information peut servir, dans le cadre de l'informatique graphique, à obtenir une image de champ cultivé plus réaliste.



FIGURE 10.29 – Visualisation des plantules ayant émergé à la surface grâce à la présence d'une fissure.

Gallardo-Carrera utilise le modèle de Horgan et Young ou une tessellation de Dirichlet comme base du réseau de fissures. Notre approche, dans la mesure où elle est tridimensionnelle et dynamique, pourrait permettre de prendre en compte d'autres paramètres : la distribution temporelle de la germination, la vitesse d'élongation des hypocotyles, la profondeur d'enfouissement des graines, la présence d'agrégats qui sont également un obstacle à la progression de la plantule (les cellules composant notre modèle sol pouvant contenir une information supplémentaire concernant leur appartenance à un agrégat).

10.3 Généralisation aux maillages 3D

Beaucoup de matériaux ou d'objets peuvent être considérés comme étant composés d'au moins deux couches superposées, souvent avec des caractéristiques variables au cours du temps. La fissuration quasi-statique survient dans la première couche, interface entre le matériau considéré et l'extérieur, soumise à un stress. Dans le cas d'un sol cultivé soumis à dessiccation, cette interface correspond à la croûte mais il existe bien d'autres exemples, comme le vernis d'une peinture pendant le séchage ou encore l'émail d'une céramique lors de la cuisson. Il est donc intéressant de tenter de généraliser notre modèle de fissuration à un maillage 3D d'un objet fissurable.

10.3.1 Méthode

Notre méthode de fissuration de terrain, exposée dans la section précédente, permet de fissurer une surface 2D. Pour pouvoir généraliser cette méthode à une surface 3D, il suffit de trouver un moyen d'opérer sur cette surface 3D comme s'il s'agissait d'une surface 2D, or c'est exactement ce que permet de faire la paramétrisation, en exprimant une correspondance bijective entre les sommets de cette surface et des points d'un domaine simple, par exemple des portions du plan, sur laquelle elle se retrouve naturellement paramétrisée. Le principe gouvernant notre généralisation de la méthode de fissuration de terrain est par conséquent de considérer un terrain plat comme l'aire paramétrée d'une surface 3D quelconque, de le fissurer afin d'obtenir une aire paramétrée fissurée,



FIGURE 10.30 – Le principe de la généralisation de notre méthode de fissuration aux maillages 3D.

10.3.1.1 Pipeline

La figure 9.8 (page 237), qui représente les trois parties de la méthode de fissuration de sol (initialisation, fissuration, interprétation), a été modifiée de manière à détailler notre méthode généralisée (voir la figure 10.31).

La partie initialisation (qui incombe au générateur) est modifiée par les points suivants :

- ajout de l'étape de paramétrisation du maillage 3D considéré;
- possible prise en compte des informations de la surface 3D (par exemple la courbure) pour établir la carte de hauteur de la couche de retrait;
- utilisation systématique d'un terrain plat (carte de hauteur constante).

La partie fissuration (revenant à l'espace cellulaire) est inchangée. Le retrait vertical n'est plus mentionné car il n'est pas vraiment justifié de l'utiliser dans le contexte d'une surface



FIGURE 10.31 – Généralisation de notre méthode de fissuration aux maillages 3D.

3D, sauf à rechercher un effet visuel très particulier. En sortie de l'étape de fissuration, la carte de hauteur est donc a priori toujours constante.

La partie interprétation n'est pas modifiée dans son début : elle produit à partir de la géométrie des fissures, par fusion et triangulation, un terrain plat fissuré, c'est-à-dire une collection de sommets répartis sur une surface 2D et ayant chacun une information de hauteur. Il s'agit ensuite de mélanger les données obtenues lors de la fissuration avec l'aire paramétrée. À cette fin nous procédons par une étape d'interpolation et de déplacement : nous projetons tous les sommets de la surface fissurée sur la surface paramétrée, en éliminant les sommets en dehors de cette surface. Pour chaque sommet restant, nous déterminons dans quelle facette il se projette et nous utilisons ses coordonnées barycentriques dans cette facette pour interpoler ses coordonnées 3D et sa normale, ce qui permet de recréer un nouveau maillage du modèle original. Finalement nous modifions la position 3D de ce sommet en déplaçant le point suivant sa normale d'une distance proportionnelle à l'information de hauteur correspondant et venant de l'étape de fissuration, les points à l'intérieur des fissures étant toujours à déplacer, les autres l'étant en fonction de l'application possible du retrait vertical lors de l'étape de fissuration.

10.3.1.2 Défauts

Le remaillage complet de la surface peut provoquer une perte de définition si la résolution du terrain est inférieure à celle du maillage initial. Une alternative serait d'utiliser la solution mise en œuvre par Desbenoit et coll. (2005), à savoir opérer la différence booléenne entre le volume initial et le volume des fissures, qui peut être parfaitement identifié puisque nous connaissons les sommets en bordure comme à l'intérieur des fissures. La fissuration étant indépendante de la surface traitée, un autre problème, également identifié par Desbenoit et coll., peut se poser aux endroits de forte courbure, à savoir l'intersection entre deux portions de fissure si celle-ci est trop profonde ou trop large. Nous n'avons mis en place qu'une solution partielle à ce problème, à savoir la possibilité d'appliquer un facteur d'échelle à la fissure, ce qui peut (dans certains cas) éliminer l'intersection en réduisant sa profondeur. Une solution complète, ne pouvant s'appliquer lors de la fissuration, devrait traiter le maillage localement pour éliminer tous les cas à problème, ce qui aurait pour effet de modifier certaines portions de fissure, et donc d'altérer une partie des résultats de l'étape de fissuration, ce qui réduit son intérêt. Il nous paraît donc plus cohérent d'indiquer que cette méthode de fissuration risque d'échouer dans des cas difficiles.

10.3.1.3 Méthodes de paramétrisation

La paramétrisation de surface fait l'objet de nombreux travaux dans le domaine de l'informatique graphique (voir par exemple l'état de l'art proposé par Sheffer et coll., 2006), l'enjeu principal des techniques proposées résidant en la minimisation ou le contrôle des distorsions induites par cette opération. Dans notre cas, les images visent surtout à illustrer les possibilités offertes par notre méthode, et nous n'avons pas porté nos efforts sur la qualité de la paramétrisation que nous avons réduite dans la plupart des cas à une simple projection, en tolérant en certains endroits une non préservation des aires, des distances ou des angles. Il est à noter que, comme nous opérons la fissuration sur une surface continue, une méthode de paramétrisation basée sur une décomposition en cartes (*charts*) imposera de fissurer chaque partie indépendamment, sans possibilité d'avoir des fissures communes entre deux parties; en revanche une paramétrisation qui déplie (*unfold*) la surface considérée ne posera pas ce genre de problème, sauf en bordure de l'aire paramétrée si une fissure vient s'y interrompre brutalement : en effet, cette interruption, légitime au bord d'un terrain, paraîtra peu réaliste à la surface d'un volume.

10.3.2 Résultats visuels

Pour des modèles simples présentant des parties plates, nous avons utilisé comme paramétrisation une simple projection plane. Deux exemples, une peinture, basé sur une tessellation de Dirichlet, et une assiette, utilisant le modèle de Horgan et Young, sont donnés figure 10.32.



(a) La peinture originale.

(b) Après une fissuration basée sur une tessellation de Dirichlet.

(c) Assiette fissurée selon un chemin calculé avec la méthode de Horgan et Young.

FIGURE 10.32 – Deux exemples de généralisation par projection plane.

À titre d'exemple, nous avons appliqué des fissurations aux modèles « Moai » et « Igea », par une projection cylindrique pour l'un et sphérique pour l'autre, en utilisant des chemins calculés avec la méthode de Horgan et Young (figures 10.33 et 10.34(a,b)) et par la méthode LPE appliquée sur une carte de hauteur aléatoire (figure 10.34(c)).

Nous indiquions dans la section précédente que notre méthode de fissuration pouvait prendre en considération une information provenant de la surface 3D. C'est ce que nous avons mis en application en calculant la carte de courbure gaussienne de deux surfaces, le « Moai » et le « Stanford Bunny », et en utilisant cette carte comme carte de hauteur de la couche de retrait. Autrement dit, en calculant par la suite les chemins de fissuration à l'aide de la méthode LPE, nous favorisons les fissures aux endroits où la courbure est la plus forte, comme les arêtes du nez ou la joue de la statue Moai (figure 10.35).

Outre l'exemple de l'utilisation de la courbure gaussienne, le maillage du Stanford Bunny nous a également permis de vérifier que notre généralisation pouvait s'appliquer à des surfaces plus complexes, grâce à l'utilisation de méthodes de paramétrisation plus sophistiquées telle la paramétrisation globale et conforme proposée par Gu et Yau (2003) et qui nous a permis de fissurer une oreille du Stanford Bunny (figure 10.36).



FIGURE 10.33 – Exemple de généralisation par projection cylindrique, avec un chemin calculé par la méthode de Horgan et Young.



FIGURE 10.34 – Exemple de généralisation par projection sphérique, avec un chemin calculé par la méthode de Horgan et Young (a,b) et par la méthode LPE appliquée sur une carte de hauteur aléatoire (c).

Même si notre principe de fissuration est basé sur l'existence d'une couche de retrait, qui n'existe pas dans le cas de la pierre, cette utilisation de la courbure comme critère de fissuration permet quand même de reproduire un type de fissuration existant dans la réalité, comme le montre la figure 10.37. Cette figure met aussi en évidence une limite de notre méthode pour ce type de matériau, puisqu'il est visible que la colonne réelle, en plus de la fissuration, a subi également une importante perte de matière en plusieurs endroits, effet que nous ne prenons pas en compte (d'où une dégradation plus discrète de la colonne dans l'image de synthèse).

Concernant les temps de calcul, les commentaires de la section 10.2.4 restent valables. Le temps ajouté par l'étape d'interpolation et déplacement des sommets peut être considéré comme négligeable : pour nos tests, il allait de quelques secondes à une minute maximum. Comme le montrent les exemples du tableau 10.3, le temps de fissuration peut devenir important car la résolution demandée par une paramétrisation suffisamment fine du maillage a pour conséquence un nombre élevé de cellules actives. Ce tableau donne également le nombre de sommets et de polygones, avant et après la fissuration.



les chemins de fissuration obtenus par LPE (à droite).

(a) La carte de courbure (à gauche) et (b) Résultat de la fissuration, avec, à droite, une mise en évidence des zones préférentiellement fissurées.

FIGURE 10.35 – Fissuration du Moai basée sur la courbure gaussienne de la surface 3D utilisée comme carte de hauteur de la couche de retrait.



FIGURE 10.36 – La paramétrisation de Gu et Yau (2003) reproduite en (a) permet de fissurer des zones complexes comme l'oreille du Stanford Bunny, avec la méthode de Horgan et Young comme le montre l'image (b) ou à partir d'une LPE (d) basée sur la courbure gaussienne(c), comme le montre l'image (e). Pour cet exemple nous n'avons utilisé et reproduit en (a) qu'une moitié de la paramétrisation complète du lapin, paramétrisation obligeamment fournie par X. Gu.

Modèle	Sommets (avant fis	Triangles suration)	Sommets (après fis	Triangles suration)	Temps
EG (figure $10.13(e)$)	33114	65484	99087	132534	$1 \min 20 \mathrm{s}$
Moai (figure 10.35)	10002	20000	92038	164212	$18{ m min}$
Igea (figure $10.34c$)	134359	268714	417056	593386	$21\mathrm{min}$

TABLEAU 10.3 – Exemples de temps de calcul (de la génération des fissures à l'interprétation graphique) et d'occupation mémoire, sur un Pentium IV cadencé à 3 GHz avec 1 GB de RAM.



- (a) Photographie d'une colonne d'église (G. Fronteau).
- (b) Résultat de la fissuration.

(c) Détail de l'image précédente.

FIGURE 10.37 – Comparaison entre une fissuration réelle et une fissuration virtuelle, établie à partir d'une LPE hiérarchique basée sur la courbure gaussienne et une paramétrisation triviale (surface de révolution).

10.4 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de détailler l'aspect visualisation des fissures, qui s'appuie sur les données produites par la simulation, et qui aboutit à un maillage de la surface du terrain fissuré. Les résultats visuels obtenus montrent que notre méthode est capable de reproduire les caractéristiques générales d'un réseau de fissures verticales, et notamment certains aspects des ces fissures : cycles, branches mortes, épaisseurs et profondeurs variables correspondant à différentes générations de fissures, prise en compte d'hétérogénéités locales. Nous avons pu constater également que la propagation des volumes de retrait et le calcul de largeur des fissures qui en découle permettent une relative indépendance du motif final de fissuration par rapport aux chemins possibles précalculés, ainsi qu'une cinétique réaliste d'apparition des fissures.

En ce qui concerne la validation d'un modèle de fissuration, l'analyse d'images 2D est une technique qui s'impose car elle permet d'opérer le même type de mesures sur les réseaux réels que sur les réseaux obtenus par simulation. La dimension fractale et les densités comme les fonctions de Minkowski permettent de différencier certains types de fissures, en se basant sur les motifs terminaux ou sur la dynamique de fissuration. Elles peuvent donc servir de validation partielle, en étudiant si un modèle de fissuration peut produire autant de variétés que dans la nature. En revanche, elles ne suffisent pas à écarter des images qui ne représentent pas des fissures, donc on ne peut pas valider un modèle par ce moyen, avec l'exception notable de la représentation dans l'espace 3D des densités de Minkowski, qui révèle une similarité de distribution spatiale entre fissures réelles et fissures simulées par notre méthode, au contraire des autres images. Il semble néanmoins que l'œil humain et la comparaison visuelle entre réalité et simulation restent pour la validation un outil privilégié. Il est donc important qu'un modèle de fissuration soit à même de produire des images.

Enfin, bien que la fissuration que nous cherchons à modéliser corresponde au phénomène dû à la présence d'une couche de retrait en surface, nous avons tenté de généraliser notre méthode à des maillages 3D quelconques, au moyen d'une paramétrisation. Cette généralisation n'est pas exempte de défauts : la qualité du résultat dépend de la qualité de la paramétrisation, elle peut rencontrer des problèmes d'intersection des fissures, par exemple sur des surfaces dont la courbure est supérieure à la profondeur des fissures. Néanmoins, elle produit des résultats visuels intéressants, qui peuvent même être dépendants de certaines caractéristiques de la surface originale, par le biais de la couche de retrait qui peut se baser par exemple sur la courbure, voire sur toute autre donnée dont dispose l'utilisateur.

Conclusion générale

Rappel des objectifs initiaux

L'objectif principal de notre travail était de développer un modèle décrivant l'évolution temporelle et spatiale de la structure de surface d'un sol cultivé sous l'action de la pluie, à une échelle de l'ordre du mètre carré, avec des capacités de visualisation avancées. Cet objectif impliquait de décrire les nombreux processus d'érosion locaux et – ce qui constituait la principale originalité de la démarche – les interactions entre ces processus et l'évolution du relief et de la structure de la surface du sol, afin d'aboutir à une prédiction de la localisation, du type et des propriétés des croûtes de surface. Un second objectif était de poursuivre cette démarche en proposant une modélisation de la dynamique de création et de développement d'un réseau de fissures réaliste dans la couche de surface constituée par la croûte lorsque celleci se dessèche. Dans le cadre de l'informatique graphique, où de nombreux travaux ont été effectués sur la fissuration, ce second objectif pouvait être également l'occasion de proposer une méthode originale de fissuration, utilisable en image de synthèse pour générer du réalisme, et ce même en l'absence d'informations précises sur le contexte.

Principaux résultats obtenus

Les principaux acquis de ce travail de thèse concernent d'une part des réalisations originales et innovantes par rapport à l'existant et, d'autre part, quelques résultats marquants illustrant les capacités prédictives du simulateur développé.

Notre simulateur est d'abord un simulateur des différents processus d'érosion locaux contrôlant l'évolution de la surface du sol, assez proche de nombreux modèles d'érosion existants. Cependant, nous avons fait un effort important pour décrire de façon plus adaptée certains processus (le détachement par les gouttes de pluie, traité de façon discrète pour mieux distinguer l'effet de la taille des gouttes de celui de leur vitesse), pour introduire des processus qui nous semblaient indispensables (par exemple les processus de sélection granulométrique lors de la mobilisation, du transport et du dépôt, la différenciation de modes de transport distincts par le ruissellement – l'effet du relief local étant très différent, suivant que le transport s'effectue par charriage ou en suspension) et, de façon à améliorer notre description des processus, pour importer des connaissances parfois très récentes (splash), parfois très dispersées (effets de la pente sur la contrainte critique) et parfois simplement peu répandues (relation entre porosité structurale, encroûtement et propriétés hydrodynamiques, effet de la granulométrie sur la densité). Il en résulte que le modèle proposé constitue, indépendamment de son utilité en tant que modèle, une synthèse récente et originale sur les processus d'érosion locaux. Ce rôle d'intégrateur de connaissances nous paraît être un apport essentiel de ce travail, d'autant plus que l'intégration de ces connaissances dans un modèle permet d'en tester les conséquences et la portée.

Au delà des processus d'érosion, l'aspect le plus original de notre modèle est d'aller jusqu'à simuler l'évolution de la structure de la surface du sol (porosité structurale, type de croûte), de ses propriétés (conductivité hydraulique, épaisseur de croûte), ainsi que l'interaction entre ces évolutions et les processus d'érosion – à travers le couplage entre évolution du relief et hydraulique du ruissellement par exemple, ou le couplage entre évolution de la structure de surface, évolution des propriétés hydrodynamiques et ruissellement. Ces aspects, malgré les (sans doute) nombreuses limites du travail réalisé, constituent une innovation importante par rapport aux modèles existants. Un des éléments essentiels qui a permis d'aller jusqu'à ces couplages est le fait d'avoir considéré la granulométrie des fragments de sol détachés par la pluie et d'avoir tracé l'évolution de cette granulométrie induite par les différents processus de transfert.

Quelques résultats marquants méritent d'être mentionnés, comme le succès à prédire la nature des croûtes formées à la surface du sol, à reproduire leur distribution spatiale ou à fournir un bon ordre de grandeur à leur épaisseur, ou encore les bons résultats quantitatifs enregistrés dans la prédiction du splash (quantité de grains, direction de projection et distribution spatiale en fonction de la pente) – le tout en ayant calé très peu de paramètres. L'un des résultats les plus intéressants que nous ayons obtenu concerne la formation de rigoles. Les simulations effectuées ont en effet montré que le simulateur était capable de faire émerger des comportements qualitativement très différenciés, c'est-à-dire la présence ou l'absence de rigoles selon l'intensité du splash, cela en totale cohérence avec les observations et sans que ces comportements distincts soient explicitement décrits dans le modèle. Ce résultat montre l'intérêt de la modélisation et de la simulation afin de tester des hypothèses et d'arriver à une compréhension quantitative des phénomènes observés.

Le modèle de fissuration que nous avons proposé, qui peut être appliqué à un sol encroûté obtenu par le modèle d'évolution de la structure de surface du sol, présente plusieurs originalités, au premier rang desquels l'utilisation de la propagation de volumes de retrait qui tiennent lieu de facteur de stress, laquelle permet en particulier de gérer l'élargissement des fissures. Outre des méthodes déjà employées auparavant pour obtenir des réseaux de fissures, nous avons introduit l'utilisation de la méthode de la ligne de partage des eaux hiérarchique (algorithme des cascades) afin d'obtenir un réseau de fissures qui puisse être déterminé par des propriétés du sol, en particulier l'épaisseur de la croûte. Le modèle de fissuration offre une grande souplesse d'utilisation, puisqu'il peut par exemple s'appuyer sur une cinétique de teneur en eau et une courbe de retrait du sol pour fournir une cinétique de développement d'un réseau de fissures très spécifique du sol et du contexte climatique considérés, tout comme proposer automatiquement un réseau de fissures réaliste en l'absence d'informations. Les images de sol fissuré produites par notre méthode sont comparables visuellement aux réseaux de fissures observés. Un début de validation par l'utilisation des nombres de Minkowski a par ailleurs montré que les réseaux produits possédaient des caractéristiques similaires à celles de réseaux de fissures réels. Enfin, nous avons proposé une généralisation de notre algorithme de fissuration aux maillages 3D par le biais de la paramétrisation, en visant pour ce point particulier un objectif de production d'images réalistes et non de simulation, et nous avons pu obtenir ainsi des résultats visuels intéressants qui peuvent être, de plus, dépendants de certaines caractéristiques de la surface originale, par exemple la courbure.

D'un point de vue plus général, concernant le simulateur dans son ensemble indépendamment du contexte de l'application, plusieurs aspects méritent d'être mentionnés. Notre simulateur a montré sa capacité à recréer de façon totalement explicite des expériences réelles très diverses. Cette possibilité ouvre des perspectives prometteuses dans le domaine de la validation et de la paramétrisation des modèles. En effet, cela rend possible une comparaison directe et sans biais de l'observation, des mesures, avec les prédictions du modèle. Par exemple, nous nous sommes appuyés sur cette possibilité pour vérifier très facilement et de façon sûre la quantité de sol projeté par le splash ainsi que la distribution spatiale des projections. Habituellement, ce travail est difficile et délicat car il n'y a pas de correspondance directe entre le résultat de simulation et les observations. Nous avons également utilisé différents concepts de manière originale dans le contexte de la dégradation des sols, dont principalement le formalisme DEVS, formalisme dédié aux systèmes à évènements discrets, cela en mettant à profit les résultats d'une thèse récente dans ce domaine (Shiginah, 2006) qui nous a permis de conserver le principe des automates cellulaires étendus. Nous sommes ainsi parvenus à un simulateur offrant beaucoup de souplesse dans sa configuration initiale, permettant une grande variété dans les paramètres d'action des processus, allant jusqu'à leur inhibition. Cette souplesse dans la paramétrisation et le formalisme, combinée à la capacité de créer un nombre infini d'expériences virtuelles, fait du simulateur un outil d'investigation scientifique puissant et économique en temps et en moyens humains.

Enfin, un effort particulier a été fait dans le domaine de la visualisation, ce qui nous a souvent permis de mettre en lumière des aspects évidents pour l'œil mais qui ne sont pas facilement extraits de résultats chiffrés, et dans le domaine de l'exploration des données produites, avec l'ajout d'outils dédiés, comme une spécification interactive de zones d'intérêt sur le terrain. Si nous devions retenir une limite du simulateur, ce serait la contrainte imposée par le ruissellement sur le pas de temps, qui se traduit par des temps de calcul excessivement longs lorsque la résolution spatiale est très fine. Nous reviendrons sur ce point en évoquant les perspectives à notre travail. Un certain nombre de résultats obtenus dans le cadre de cette thèse ont été valorisés par des publications : deux dans des revues internationales, six dans des actes de conférences internationales et deux dans des actes de conférences nationales, dans un large éventail de thématiques : étude des transferts en milieux poreux, logique floue, modélisation et simulation, visualisation, géométrie discrète et informatique graphique.

Perspectives

Dans le domaine de la science du sol, nous pouvons dégager trois grands types de perspectives à notre travail, que nous discuterons dans l'ordre de priorité qui nous semble le plus approprié.

Le premier ensemble de perspectives, qui nous semblerait devoir être traité en priorité, concerne le test, l'exploration, l'utilisation et la valorisation du modèle, que nous n'avons pu qu'aborder de façon très limitée. L'utilisation du modèle pour reproduire des expériences décrites dans la littérature (avant même d'en réaliser de nouvelles) serait très riche à la fois pour le test et l'amélioration du simulateur mais sans doute aussi pour la compréhension des processus, dans la mesure où la simulation permet d'étendre ces expérimentations dans des directions non explorées et d'en analyser les conséquences avant d'imaginer de nouvelles expériences à mettre en place. De nombreuses données de grande valeur mais difficiles à exploiter pourraient trouver de nouvelles et intéressantes opportunités de valorisation avec l'apport de la simulation. Par exemple, l'INRA dispose d'une masse de données d'observation visuelle et photographique de l'évolution de la surface du sol, acquises soit *in situ* soit en laboratoire (simulation de pluie sur sols reconstitués). De nombreux travaux ont tenté d'établir des relations empiriques entre les caractéristiques des pluies et des critères morphologiques observables en 2D, mais ils se heurtaient souvent à l'absence de relation explicite entre caractéristiques des pluies, mobilisation de particules solides et altération du microrelief suite au transfert et au dépôt de ces particules. Notre simulateur apporte ce lien explicite.

Un deuxième point à aborder concerne le temps de calcul très long, qui limite les possibilités d'utilisation du simulateur. Le temps requis pour une simulation complète à une résolution moyenne de 5 mm représente actuellement environ huit fois le temps réel. Ce problème est lié à la contrainte imposée sur le pas de temps par le modèle de ruissellement, puisque le splash, géré en tant qu'évènement discret, est indépendant du pas de temps, et que le modèle d'infiltration a été simplifié pour être suffisamment rapide à l'exécution. La solution que nous avons adoptée est d'utiliser une résolution plus grossière mais néanmoins suffisamment précise pour donner des résultats spatialisés significatifs (passage de 2 mm à 5 mm en résolution horizontale, voire 10 mm). La tentative de gérer deux résolutions spatiales simultanément n'ayant pas abouti, une première piste pour améliorer ce point est d'envisager la parallélisation de l'implémentation, puisque nous avons veillé à ce que tous les algorithmes des processus soient parallélisables. Une solution originale pourrait être un découpage du terrain dépendant de la topographie, l'aire d'une zone affectée à un processeur étant par exemple inversement proportionnelle à son activité potentielle de ruissellement. Une deuxième piste serait purement et simplement de ne pas gérer des flux d'eau explicites, et de rendre compte du transfert de sédiment par le ruissellement au travers d'indicateurs topographiques plus ou moins élaborés.

Enfin, et c'est sans doute un point plus mineur, il serait intéressant d'exploiter la capacité du simulateur à distinguer des agrégats (mottes). Ceux-ci sont présents dans le modèle structurel du sol, sous la forme de liens bidirectionnels entre cellules, et un travail spécifique a même été fourni pour reproduire les formes d'agrégats polyédriques réalistes. Leur présence n'a cependant pas été exploitée dans le modèle fonctionnel, principalement par manque de connaissance sur les différences de comportement face aux processus que pourrait induire le fait qu'une cellule appartienne à un agrégat.

En ce qui concerne le modèle de fissuration, une première piste de travail à retenir serait la mise au point d'un couplage complet avec le modèle d'évolution de la structure de surface du sol, de manière à pouvoir passer d'un modèle à l'autre de façon bidirectionnelle : faire subir à un sol fissuré par dessiccation un nouvel épisode pluvieux, de la même manière qu'il est possible actuellement de fissurer un sol encroûté issu d'une simulation. Pour cela, il est nécessaire de trouver un moyen de traduire l'existence de fissures, autrement dit des volumes

285

de retrait, en termes acceptables par le premier modèle : par exemple la topographie dans le cas de fissures larges, ou sinon la porosité des cellules concernées. Un travail exploratoire pourrait, par ailleurs, être mené pour déterminer quelles informations relatives au sol initial seraient susceptibles d'être traitées par la méthode de la ligne de partage des eaux afin de donner les chemins possibles de fissuration. Nos tentatives de validation par des critères statistiques ont montré s'il en était besoin combien l'œil humain est un outil incomparable pour juger de la vraisemblance d'un réseau de fissures. Sur ce point, il serait intéressant de poursuivre le travail de développement d'outils de validation par la recherche d'une quantification des validations visuelles, par exemple selon des critères de degré de ressemblance entre les motifs géométriques de deux images. Enfin, dans le domaine de l'informatique graphique, des améliorations peuvent être apportées à la généralisation de la méthode aux surfaces 3D, parmi lesquelles la résolution des problèmes de remaillage. Dans ce domaine, notre approche ouvre par ailleurs une piste nouvelle, à savoir abandonner le passage par la paramétrisation de la surface 3D et utiliser notre méthode de précalcul des fissures par la ligne de partage des eaux et de propagation des volumes de retrait directement sur des données volumiques.

Sur le plan plus strictement informatique, nous avons accordé une grande place à l'image dans ces travaux de thèse, et nous avons souvent employé le terme de réaliste pour qualifier un résultat visuel, au sens de « proche de la réalité ». Il nous apparaît que ce réalisme recherché, et même adopté comme critère de qualité, se situe à deux niveaux. Il peut s'agir d'un réalisme d'information, c'est-à-dire la garantie que les données, dans un sens très large, obtenues par simulation et support de l'image produite, correspondent de manière suffisamment proche à ce qui pourrait se mesurer ou s'observer dans la réalité. C'est sur ce réalisme que nos efforts ont beaucoup porté, par un aller-retour permanent entre expérimentation et modélisation, et l'image intervient là encore comme un moyen privilégié, mais il peut s'agir dans ce cas aussi bien d'une image qui prétend à un certain réalisme que d'une image à rendu nonphotoréaliste, ou, pour mieux dire, à rendu expressif : sur ce point, non abordé dans cette thèse à part à travers l'utilisation de palettes spécifiques, il reste beaucoup à faire pour aider à la perception visuelle immédiate d'informations primordiales pour un observateur de l'évolution d'un sol. L'autre pan du réalisme est, à l'opposé de ce dernier point, un réalisme de rendu, c'est-à-dire faisant appel à des propriétés optiques physiquement exactes (ou au moins suffisamment proches de cette exactitude) à partir d'informations sur le contenu d'une scène (principalement l'éclairage et les propriétés des matériaux). Ce second point n'a été que très partiellement abordé durant cette thèse, mais c'est à notre avis une piste de recherche qui s'ouvre à toutes les données produites par simulation, et singulièrement dans le cas du sol : quelles sont les propriétés optiques à déduire des informations à notre disposition concernant le sol à visualiser? Nous avons fait un premier pas très insuffisant dans cette direction, en utilisant une information d'humidité pour colorer différemment la surface du sol, mais toutes les autres informations obtenues par simulation devraient pouvoir être mises à contribution pour produire une image réaliste sur le plan du rendu (par exemple il devrait être possible et très utile d'être capable de rendre la granulométrie de la couche de surface de façon à ce que notre œil puisse en percevoir les variations sans nécessiter une réelle analyse).

Nous avons donc dans ce mémoire considéré l'image aussi bien en tant que production à part entière (notamment pour la fissuration), que comme premier moyen d'exploration des données et de validation, permettant ainsi de conserver au premier plan dans un simulateur (donc *in virtuo*), le rôle de l'observation, primordiale sur le terrain (*in vivo*) ou en laboratoire (*in vitro*). Dans cette direction, nous avons fait une première tentative durant ce travail de thèse vers le rendu haptique, autrement dit vers la réalité virtuelle. Pour cela nous avons

utilisé d'une part une visualisation stéréoscopique à l'aide d'un écran polarisant et de lunettes passives, et d'autre part un stylet à retour d'effort. Nous sommes rapidement parvenus, en utilisant une bibliothèque dédiée au rendu haptique (H3D API), à faire ressentir au moyen du stylet, manipulable grâce à sa représentation symbolique visible sur l'image du sol vue en relief, la présence d'agrégats en surface et une résistance nette à la pénétration du stylet dans le sol virtuel, cela sans ajouter aucune information spécifique aux données issues d'une simulation. Si nous faisons mention de cette modeste incursion dans la réalité virtuelle, avec un résultat qui est très banal aujourd'hui, c'est qu'elle nous semble révélatrice de questions à poser dans la relation entre l'informatique graphique et les autres sciences, dans le contexte de la simulation. En effet, une fois ce petit développement haptique achevé, il est resté inutilisé : les informaticiens n'ayant pas les connaissances en science du sol pour parvenir à imaginer comment interroger « haptiquement » de façon pertinente des résultats de simulation, et les chercheurs en science du sol se retrouvant devant un matériel ne correspondant pas à un moyen d'investigation existant déjà dans leur vécu de praticien. Il s'agit donc en cette matière d'un double défi à relever : que d'une part les informaticiens continuent à offrir des moyens d'exploration virtuelle de plus en plus riches et ouverts, et de plus en plus faciles d'emploi et surtout adaptés aux besoins des utilisateurs chercheurs, et que d'autre part les chercheurs d'un autre domaine scientifique, en l'occurrence la science du sol, parviennent à s'approprier ces moyens, jusqu'à inventer de nouvelles expérimentations ou explorations spécifiques (il doit être possible, par exemple, de faire percevoir par la manipulation virtuelle les variations de cohésion de la surface du sol qui aident l'observateur de terrain à distinguer la croûte du sol sous-jacent encore fragmentaire). Ces nouvelles façons de définir un cadre expérimental, même si elles n'ont plus de rapport direct avec ce qui se pratique dans la réalité, permettront néanmoins d'interroger différemment et sans doute d'acquérir de nouvelles connaissances sur cette réalité. Cela suppose une collaboration étroite entre chercheurs de domaines différents, collaboration qui suppose autant un partage du savoir que l'acceptation d'une certaine prise de risque, partage et prise de risque qui ont fait d'ailleurs tout le sel de ce travail de thèse.

Annexes

Annexe A

Modélisation du splash par un système flou optimisé par algorithme génétique

Nous présentons dans cette annexe notre modélisation du détachement et de la projection par les gouttes de pluie par système flou. Nous exposons d'abord les principes du système flou puis son optimisation par algorithme génétique. Les résultats obtenus avec cette méthode ont été donnés dans la section 6.2.2.3.

A.1 Principes du système flou

La figure A.1 présente notre système flou, dont le principe est identique pour le détachement et le transport. Nous avons choisi de nous concentrer sur la façon dont l'énergie cinétique de la pluie, la taille des gouttes et la granulométrie du sol influent sur le détachement et la projection. Pour déterminer la masse détachée (ou projetée), les variables d'entrée sont par conséquent l'énergie cinétique de la pluie et la taille de goutte (partie gauche de la figure A.1), et pour déterminer quels pourcentages de chaque classe de particules sont concernés par le processus, les variables d'entrée sont la taille de goutte et la compacité du sol (partie droite de la figure A.1). Cette dernière est exprimée par un indice $C \in [-1:1]$ défini par :

$$\mathcal{C} = 1 - 2\sum_{p}^{\mathcal{N}_{c}} \frac{\mathcal{M}_{i}}{\mathcal{M}_{t}}$$
(A.1)

avec \mathcal{N}_c le nombre de classes de particules, p l'indice de la première classe de particules considérées comme « petites » (c'est-à-dire inférieures à 250 μ m), \mathcal{M}_i la masse de particules de classe i, \mathcal{M}_t la masse totale de sol dans la cellule.

Les entrées du système étant des valeurs nettes (*crisp values*), la première étape (*fuzzi-fication*) consiste à les transformer en valeurs floues, c'est-à-dire en degrés d'appartenance aux différents sous-ensembles flous définissant la variable correspondante. Pour définir ces sous-ensembles flous, nous avons privilégié la simplicité à la fois dans les calculs et dans



FIGURE A.1 – Notre système flou pour le calcul du détachement et du transport, avec la mise en évidence des trois étapes de son fonctionnement. La partie gauche correspond au calcul de la quantité, la partie droite au calcul des pourcentages de classes de particules.

leur interprétation. En théorie, tout type de fonction est utilisable, et nous avons choisi des fonctions trapézoïdales qui conviennent bien à des descriptions linguistiques de quantités physiques. De plus, quatre points $S_{i,j}$ suffisent à les caractériser, comme il est montré figure A.2. Pour chaque variable d'entrée nous définissons cinq sous-ensembles flous correspondant chacun à une description en langage naturel. Par exemple, l'énergie cinétique sera qualifiée de très faible, faible, moyenne, forte, ou très forte.



FIGURE A.2 – Fonctions d'appartenance trapézoïdales définissant un sous-ensemble flou, avec deux cas particuliers.

La deuxième étape du système flou est l'application des règles floues, assurée par le moteur d'inférence. Ces règles prennent en entrée les degrés d'appartenance des deux variables d'entrée, et donnent en sortie les degrés d'appartenance de la variable de sortie. Elles sont du type : « si l'énergie cinétique est forte et la taille de la goutte est petite *alors* le détachement est moyen ». L'intérêt d'utiliser un système flou vient de ces règles, qui permettent à un expert du domaine étudié d'injecter dans le simulateur des connaissances, même si elles ne sont pas formalisables de manière traditionnelle (par exemple par un système d'équations différentielles). L'application des règles est implémentée de manière classique : l'opérateur etainsi que l'implication sont faites avec le minimum (t-norme de Zadeh), l'agrégation des règles est faite avec le maximum (t-conorme de Zadeh). Comme il y a cinq degrés d'appartenance pour chaque variable d'entrée, il faut établir 25 règles pour couvrir tous les cas possibles. Comme l'exemple de règle donné précédemment le montre, la variable de sortie est elle aussi exprimée par son degré d'appartenance à des sous-ensembles flous. Pour la variable de sortie définissant la masse à détacher (ou projeter), ces sous-ensembles flous correspondent à la description d'une quantité, allant de « très petite » à « très grande ». La seconde variable de sortie, définissant les pourcentages pour chaque classe de particules, est un indice dans un tableau uni-dimensionnel de tuples de \mathcal{N}_c pourcentages chacun. Nous avons conservé la partition en cinq sous-ensembles flous, et donc utilisé un tableau contenant cinq éléments.

La troisième étape est la « défuzzification », qui consiste à transformer les degrés d'appartenance de la variable de sortie en une valeur nette. Là encore l'implémentation est classique et fait appel à la méthode du centroïde (Bouchon-Meunier et coll., 1995). Il reste une question à régler : en effet, la valeur nette retournée par la défuzzification est un nombre réel, ce qui convient pour le pourcentage de masse à détacher ou projeter. En revanche, l'autre variable de sortie doit être un indice dans un tableau, donc une valeur entière. Si la valeur retournée r est comprise entre les deux indices i et j = i + 1, nous calculons le pourcentage P'_p pour la classe p par une interpolation linéaire entre les pourcentages $P_{i,p}$ et $P_{i+1,p}$:

$$\forall p \in [1: \mathcal{N}_c] P'_p = (r-i) P_{i,p} + (1 - (r-i)) P_{i+1,p}$$
(A.2)

Il est important de noter que ce système flou ne peut donner qu'un nombre maximal de particules de chaque classe à détacher, car il n'est pas garanti que le calcul de détachement puisse respecter ce nombre, cela à cause des limitations du modèle¹ : les particules ne peuvent être créées qu'à partir de la matière continue, donc cette matière doit être encore présente, dans les cellules concernées par le détachement, en quantité suffisante pour respecter le nombre de particules demandé. De manière équivalente, le nombre de particules de chaque classe à projeter calculé par le système flou est considéré comme un maximum, car il n'est pas garanti qu'un nombre supérieur ou égal existe dans la cellule recevant la goutte de pluie. Il se peut donc que le nombre de particules projetées soit inférieur au nombre demandé. Enfin, le dernier point à déterminer pour la projection est la destination des particules : pour cela, nous procédons à un tirage selon une distribution uniforme d'un angle de projection, puis la distance est tirée aléatoirement selon une distribution exponentielle négative (Van Dijk et coll., 2002) avec une moyenne fonction de la taille des particules mais relativement indépendante du type de sol considéré (Leguédois, 2003).

A.2 Optimisation du système flou par algorithme génétique

En l'absence de la collaboration d'un expert, ou si les connaissances de celui-ci ne peuvent suffire à établir les règles d'inférence du système flou, le hasard, l'intuition ou la méthode essai-erreur ne peuvent en général pas aboutir à une paramétrisation acceptable du système. Nous avons donc eu recours à une méthode d'optimisation globale, les algorithmes génétiques,

^{1.} Précisons qu'il s'agit ici du *premier* modèle structurel du sol (voir section 5.3.2), le splash par système flou n'ayant pas été testé avec le second modèle, qui lui n'a été utilisé qu'avec le modèle empirique de splash, présenté dans la section suivante.

procédés itératifs qui combinent l'utilisation de tirages aléatoires et la mise à profit des informations venant des itérations précédentes afin d'évaluer et d'améliorer une population entière de solutions potentielles, plutôt qu'une solution unique à la fois. Ils constituent une approche systématique et logique de l'optimisation (Cordón et coll., 2001). De plus, dans le contexte des systèmes flous, il a été établi qu'ils sont un outil robuste et puissant pour optimiser à la fois les paramètres et la structure d'un système (Bäck et Kursawe, 1994).



FIGURE A.3 – Principe de fonctionnement d'un algorithme génétique.

Un algorithme génétique est basé sur quatre opérations élémentaires sur la population (figure A.3) : l'évaluation des individus, la sélection basée sur les résultats d'évaluation, les opérations génétiques qui créent de nouveaux individus, et finalement le remplacement d'une partie de la population par certains de ces individus de nouvelle génération. La première étape de l'algorithme est évidemment la construction d'une population initiale, qui peut se faire aléatoirement ou utiliser une connaissance préalable du problème étudié. Après cette construction, l'algorithme génétique est réitéré jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit vérifié.

Il est en général admis qu'un algorithme génétique doit disposer des informations suivantes pour résoudre un problème (Herrera et coll., 1994) :

- une représentation génétique des solutions du problème (encodage) et un moyen de générer la population initiale;
- une fonction d'évaluation qui peut calculer l'aptitude (*fitness*) de chaque individu;
- des opérateurs génétiques qui modifient la composition génétique des enfants pendant la phase de reproduction;
- les valeurs des paramètres utilisés par l'algorithme génétique (taille de la population, probabilités d'application des opérateurs génétiques, pourcentage de descendants, etc.).

Un algorithme génétique utilise un encodage soit binaire, soit réel des paramètres du problème étudié. Nous avons choisi un encodage réel, qui offre en général de meilleures performances dans les problèmes d'optimisation faisant intervenir des paramètres continus (Wright, 1991). L'encodage réel permet aussi une meilleure compréhension de la progression de l'algorithme génétique dans l'espace des solutions (il est plus aisé pour un humain de comprendre un vecteur de paramètres qu'une suite de bits).

Paramètres des sous-ensembles		Règles d	de sortie	%
60 gènes	60 gènes	25 gènes	25 gènes	25 gènes

FIGURE A.4 – Composition d'un chromosome.

Pour le détachement comme pour la projection, un individu (appelé aussi chromosome pour conserver une analogie avec la biologie), est un vecteur de paramètres réels (ou gènes) qui peut être décomposé lui-même en cinq vecteurs (figure A.4) :

- un pour les 60 paramètres définissant les sous-ensembles flous correspondant aux règles floues pour les pourcentages de masse;
- un pour les 60 paramètres définissant les sous-ensembles flous correspondant aux règles floues pour la distribution des classes de particules;
- deux pour les 25 sorties de chacune des deux séries de règles floues;
- le dernier pour le contenu des ensembles de pourcentages utilisés comme sortie pour la seconde série de règles (25 valeurs pour le premier modèle de sol à 5 classes).

Le dernier vecteur permet d'améliorer les solutions en faisant varier les pourcentages $P_{i,j}$ de particules. Au cours de l'évolution, il est évidemment nécessaire d'imposer la contrainte suivante à ces valeurs :



FIGURE A.5 – Sous-ensembles flous de l'indice de compacité, avant et après optimisation. La forme, l'ordre et l'intersection des trapèzes sont respectés grâce à l'application de contraintes durant l'évolution de la population.

Nous avons choisi des fonctions d'appartenance trapézoïdales, définies par quatre couples de valeurs (figure A.2). Pour préserver l'interprétabilité des règles en maintenant une sémantique correcte des variables linguistiques, la forme et l'ordre de ces fonctions d'appartenance (et donc des sous-ensembles flous leur correspondant) sont conservés par l'ajout de ces contraintes :

$$\forall i \ S_{i,1} \leq S_{i,2} \leq S_{i,3} \leq S_{i,4}$$

$$\forall i \ S_{i,3} < S_{i+1,2}$$

$$\forall i \ S_{i,4} \geq S_{i+1,1}$$

$$(A.4)$$

La figure A.5 montre les sous-ensembles flous d'une variable d'entrée (l'indice de compacité), avant et après optimisation. Nous avons choisi une taille de population de 100 individus et la population initiale est tirée au sort, en respectant les contraintes ci-dessus.

Les opérateurs génétiques sont le croisement et la mutation. Le croisement est une technique de reproduction qui génère deux enfants à partir de deux parents, en mélangeant les gènes à partir d'un ou plusieurs points des chromosomes. Trois méthodes principales de croisement existent : à un point, à deux points et à points multiples. Nous avons utilisé la dernière méthode, en prenant au hasard un point de croisement dans chacun des cinq sous-vecteurs du vecteur de solution (voir figure A.6), tout en assurant le respect des contraintes. La probabilité de croisement est fixée à une valeur couramment utilisée : 0.9. Pour choisir les parents dans la population, nous avons utilisé la méthode de la roulette, qui prend en compte l'évaluation d'un individu par rapport au reste de la population : plus un individu est une bonne solution, plus il a de chances de servir à une reproduction par croisement. L'autre opérateur génétique, la mutation, sert à trouver d'autres solutions dans l'espace des paramètres. Quand un individu est choisi pour muter, un paramètre dans chacun de ses sous-vecteurs est tiré au hasard, et une nouvelle valeur (tirée au hasard en respectant les contraintes) lui est assignée (figure A.7). Pour éviter d'être bloqué trop longtemps dans un minimum local, nous avons choisi une probabilité de mutation élevée : 0.5.



FIGURE A.6 – Illustration de l'opération de croisement à points multiples (5).



FIGURE A.7 – Illustration de l'opération de mutation.

La fonction d'évaluation des individus permet de juger leur qualité en tant que solution du problème. Dans notre cas, nous calculons la somme des carrés des différences entre les résultats obtenus par une simulation paramétrée selon cette solution et les résultats d'une expérience réelle de référence. Cette nécessité de calculer une évaluation pour chaque individu de la population est le principal inconvénient de l'algorithme génétique, d'autant que dans notre cas cela implique une simulation complète à chaque calcul de la fonction d'évaluation. Ainsi, pour le détachement une simulation de 4 min représente environ 5 s de calcul pour chaque individu, et pour la projection, une simulation de 20 min réclame environ 20 s à chaque fois.

Notre population contient constamment 100 individus, avec un renouvellement de 75% à chaque génération. À cette fin tous les nouveaux individus sont ajoutés et évalués, et les plus mauvaises solutions de toute la population sont rejetées jusqu'à retrouver le nombre initial (étape de sélection).

Annexe B

Données d'initialisation de la dégradation des sols

Ces données d'initialisation sont écrites, et lues au lancement du simulateur, dans un fichier au format XML. Sauf indication contraire dans le texte, les valeurs par défaut sont celles utilisées lors des simulations.

Nom	Description	Valeur par défaut
Configuration gén	érale du simulateur :	
Graine	Valeur d'initialisation du générateur de nombres pseudo- aléatoires $(-1 \text{ impose un nombre différent à chaque exé-cution basé sur la date du système})$	0
Visualisation	Une valeur nulle lance la simulation en mode console	1
Δt	Pas temporel : durée d'une itération (ms)	15
Δx	Pas spatial horizontal (mm)	5
Δz	Pas spatial vertical (mm)	2
Données concerna	nt les classes de particules :	
Classes	Intervalles de diamètres par classe (mm)	(voir
D	Diamètre moyen par classe (mm)	tableau 5.3) (voir tableau 5.3)
μ	Masse volumique par classe $(kg m^{-3})$	2000
ω_r	Angle de repos par classe (degrés)	$30 \ 30 \ 30 \ 30$
λ_0	Distance moyenne de projection par classe (mm)	$\begin{array}{c} 30 \ 31 \ 32 \\ 130 \ 150 \ 200 \\ 210 \ 160 \ 100 \\ 50 \end{array}$
Charriage	Interdit le charriage pour la classe si valeur nulle	$0\;1\;1\;1\;1\;1\;1\\$

Dépôt	Interdit le dépôt pour la classe si valeur nulle	$0\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1\ 1$
Mobilisation	Interdit la remobilisation pour la classe si valeur nulle	$1\ 0\ 0\ 1\ 1\ 1\ 1$

Données concernant le terrain :

Hauteur	Nombre de couches de cellules	6
$ heta_i$	Teneur en eau initiale	0.0175
$ heta_s$	Teneur en eau à saturation	0.40
K_s	Conductivité hydraulique à saturation $(mm h^{-1})$	720
С	Inverse de la pression des forces de succion au niveau du	0.033
	front d'humectation (cm^{-1})	
$ ho_{ini}$	Masse volumique initiale de la matière (kg m^{-3})	950
$ ho_{max}$	Masse volumique maximale de la matière (kg m^{-3})	1600
Fichier	Terrain à charger (fichier MNT, image PGM ou format	
	propriétaire)	

Données concernant la pluie :

1	
Processus actif si valeur non nulle	1
Débit constant imposé sur le bord x_{min} (cm ³ s ⁻¹)	0
Débit constant imposé sur le bord x_{max} (cm ³ s ⁻¹)	0
Débit constant imposé sur le bord y_{min} (cm ³ s ⁻¹)	0
Débit constant imposé sur le bord y_{max} (cm ³ s ⁻¹)	0
Diamètre maximal d'une goutte (mm)	7
Restriction de la surface arrosée	Aucune
Formule de calcul de la vitesse ou hauteur de chute (m)	4.6
Formule de correction de la vitesse	formule
	(6.15)
Séquence d'épisodes pluvieux avec définition : de l'inten- sité $(mm h^{-1})$, de la durée (min) , du type de distribution des tailles de gouttes (uniforme, distribution imposée, gamma, lame d'eau, nulle)	Aucune
	Processus actif si valeur non nulle Débit constant imposé sur le bord x_{min} (cm ³ s ⁻¹) Débit constant imposé sur le bord y_{max} (cm ³ s ⁻¹) Débit constant imposé sur le bord y_{min} (cm ³ s ⁻¹) Débit constant imposé sur le bord y_{max} (cm ³ s ⁻¹) Débit constant imposé sur le bord y_{max} (cm ³ s ⁻¹) Diamètre maximal d'une goutte (mm) Restriction de la surface arrosée Formule de calcul de la vitesse ou hauteur de chute (m) Formule de correction de la vitesse Séquence d'épisodes pluvieux avec définition : de l'inten- sité (mm h ⁻¹), de la durée (min), du type de distribution des tailles de gouttes (uniforme, distribution imposée, gamma, lame d'eau, nulle)

Données concernant le détachement :

Actif	Processus actif si valeur non nulle	1
Taille	Si valeur non nulle, le processus ne détache une particule	1
	que si la goutte est d'un diamètre supérieur	
Création	Si valeur nulle, effectue le calcul de détachement pour	1
	la projection seulement	
Formule	Formule de calcul du détachement	formule
		(6.17)
Distribution	Distribution des tailles de particules à respecter	(voir
		tableau 7.6)
Profondeur	Profondeur maximale de détachement (mm)	4
Données concerna	ant la projection par le splash :	
Actif	Processus actif si valeur non nulle	1
Tore	Si valeur nulle, le splash peut projeter des particules	1
	hors du terrain	

Étalement Taille	Si valeur non nulle, le splash s'étale Si valeur non nulle, le splash projette au minimum une	1 1
	particule entière	
Cibles	Nombre maximal de cellules de destination	10
Flot	Si valeur non nulle, le splash projette les particules dans	1
	l'eau et non sur le sol	

Données concernant l'infiltration :

Actif	Processus actif si valeur non nulle	1

Données concernant le ruissellement :

20111000 001100111		
Actif	Processus actif si valeur non nulle	1
f	Valeur du coefficient de friction	1
Voisinage	4-voisinage ou 8-voisinage	8
Aléatoire	Si valeur positive, définit le rayon du voisinage aléatoire,	1.5
	sinon impose le voisinage complet	
$ heta_{es}$	Valeur de l'angle de contact sur surface sèche (degrés)	25
$ heta_{eh}$	Valeur de l'angle de contact sur surface humide (degrés)	5
Bords	Comportement des quatre bords (mur W, tore T, puits	мммм
	H ou prolongement M)	

Données concernant la mobilisation et le dépôt :

Actif	Processus actif si valeur non nulle	1
Contrainte	Formule de calcul de la contrainte critique (Govers, Ju-	Paphitis 0.5
	lien ou Paphitis)	
Charriage	Formule de calcul la capacité de transport (Govers ou	Wiberg
	Wiberg et Smith)	
Latérale	Si valeur non nulle, l'érosion latérale est activée	1

Configuration du recueil de données :

comgaration du recuen de donnees.			
Données	Nom du fichier de données	Aucun	
Δt_D	Délai entre deux enregistrements de données (ms)	1000	
Volume	Nom générique des fichiers de volume à enregistrer au-	Aucun	
	tomatiquement		
Δt_V	Délai entre deux enregistrements de volume (ms)	60000	
Bac	Nom générique des fichiers du contenu du bac de splash	Aucun	
	virtuel, avec sa position et ses dimensions		
Position	Position du bac de splash virtuel (mm)	$(0,\!0,\!0)$	
Dimensions	Dimensions du bac de splash virtuel (mm)	0×0	
Δt_B	Délai entre deux enregistrements du bac (ms)	60000	
Δx_B	Résolution du bac (mm)	0.5	
Couleur	Triplet RGB de la couleur des particules dans le bac vir-	$(0,\!0,\!0)$	
	tuel		
Δt_C	Délai entre deux captures automatiques d'image (ms)	1000	

Annexe

Données d'initialisation de la fissuration des sols

Ces données d'initialisation sont écrites, et lues au lancement du simulateur, dans un fichier texte dans un format propriétaire pour ce qui est de l'implémentation actuelle. Un passage au format XML est prévu.

Nom	Description	Valeur par défaut	
Configuration générale du simulateur :			
Graine	Valeur d'initialisation du générateur de nombres pseudo- aléatoires $(-1 \text{ impose un nombre différent à chaque exé-cution basé sur la date du système})$	0	
Δt	Pas temporel : durée d'une itération (min)	60	
Itérations	Durée de la simulation en nombre d'itérations	10	
Volume	Volume du simulateur de dégradation des sols à charger	Aucun	
LUT	Palette de couleurs initiale et finale pour le sol		
Données concernant le terrain :			
Dimensions	Largeur, longueur, hauteur en cellules	$256\times256\times10$	
Données concernant le retrait :			
Type	Formule empirique ou contexte donné	Formule em-	
		pirique	
Paramètres	Paramètres de la formule empirique V_{min}, V_{max}, κ	$0.567 \ 0.714$	
		0.072	
Évaporation	Formule de calcul de la teneur en eau avec le temps	Aucune	
Retrait	Courbe de retrait	Aucune	
r_s	Facteur géométrique	3	
Vertical	Si valeur non nulle, le retrait vertical est pris en compte	0	

0.5

Données concernant les fissures :

Répartition entre le retrait horizontal et le retrait verti- cal

Nombre maximal de fissures actives M10 Nombre minimal de fissures actives 10mHiérarchie Si valeur non nulle la hiérarchie des fissures est activée 1 Vitesse Vitesse de propagation $(mm h^{-1})$ 10 Forme Forme des fissures : trapèze ou triangle Triangle RRapport profondeur/largeur d'une fissure 3 Rapport largeur fond/largeur surface d'une fissure tra-1/3rpézoïdale 2Sommets Nombre de sommets à ajouter (anti-aliasage) Option de tolérance sur l'angle des arêtes (degrés) 90 α Marge Marge du terrain sans départ de fissure (en cellules) 5Relaxation Distance de relaxation maximale (mm), -1 pour utiliser -1la distance maximale de la carte Attraction Distance d'attraction maximale entre fissures (mm) 10Distance Distance minimale pour la création d'une nouvelle fis-0 sure (mm) Croûte Hauteur minimale de croûte pour la naissance et la pro- $0.1 \ 0.1$ pagation des fissures (mm) Nombre maximal de fissures (0 pour infini) Nombre 0 Longueur Longueur totale maximale des fissures (mm, 0 pour in-0 fini) Géométrie Définition du précalcul du réseau de fissures : soit par Dirichlet 100 tessellation de Dirichlet, en indiquant le nombre de graines, soit par une image binaire contenant ce réseau sous forme de lignes d'un pixel de large, et utilisant les niveaux de gris pour en indiquer les niveaux hiérarchiques

Configuration du recueil de données :

Données Volume	Nom du fichier de données Nom générique des fichiers de volume à enregistrer au-	Aucun Aucun
	tomatiquement	
Δt_V	Délai entre deux enregistrements de volume (min)	60
Δt_C	Délai entre deux captures automatiques d'image (min)	60

k

300
Bibliographie

- L. R. AHUJA : Modeling Infiltration into Crusted Soils by the Green-Ampt Approach. Soil Science Society of America Journal, 47:412–418, 1983. [p. 150]
- D. ATLAS et C. W. ULBRICH : Path- and Area-Integrated Rainfall Measurement by Microwave Attenuation in the 1–3 cm Band. Journal of Applied Meteorology, 11(12):1322–1331, déc. 1977. [p. 108]
- J. N. AUBERTOT, G. DÜRR, Richard, N. SOUTY et Y. DUVAL : Are Penetrometer Measurements Useful in Predicting Emergence of Sugar Beet (Beta vulgaris L.) Seedlings Through a Crust? *Plant and Soil*, 241(2):177–186, avr. 2002. [p. 271]
- M. V. AVOLIO, G. M. CRISCI, D. D'AMBROSIO, S. DI GREGORIO, G. IOVINE, R. RONGO et W. SPATARO : An Extended Notion of Cellular Automata for Surface Flows Modelling. WSEAS Transactions on Computers, 2:1080–1085, 2003. [p. 5 et 38]
- T. BÄCK et F. KURSAWE : Evolutionary Algorithms for Fuzzy Logic : a Brief Overview. Proceedings IPMU 1994, II:659–664, 1994. [p. 124 et 292]
- D. BAIZE : Petit lexique de pédologie. Editions Quae, 2004. [p. 61]
- K. V. BEARD et C. CHUANG : A new model for the equilibrium shape of raindrops. *Dans Journal of the Atmospheric Sciences*, vol. 44, p. 1509–1524, 1987. [p. xiii, 112, 113 et 114]
- F. BELHADJ: Terrain modeling: a constrained fractal model. Dans AFRIGRAPH '07: Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa, p. 197–204, New York, NY, USA, 2007. ACM. [p. xii et 66]
- E. BEN-DOR, N. GOLDLSHLEGER, Y. BENYAMINI, M. AGASSI et D. G. BLUMBERG : The Spectral Reflectance Properties of Soil Structural Crusts in the 1.2- to 2.5-μm Spectral Region. Soil Science Society of America Journal, 67(1):289–299, jan. 2003. [p. 1]
- A. BENASSAROU, E. BITTAR, N. JOHN et L. LUCAS : MC Slicing for Volume Rendering Applications. Dans Computer Graphics and Geometric Modeling, p. 314–321, Atlanta, GA, USA, mai 2005. Springer Verlag. [p. 155]
- B. BENEŠ : Real-Time Erosion by Shallow Water Simulation. Dans The 4th Workshop on Virtual Reality Interaction and Physical Simulation - Vriphys'07. J. Dingliana, F. Ganovelli, 2007. [p. 3 et 69]

- B. BENEŠ et R. FORSBACH : Layered Data Representation for Visual Simulation of Terrain Erosion. Dans EEE Proceedings of SCCG volume 25(4), p. 80–86, 2001. [p. 63 et 68]
- B. BENEŠ et R. FORSBACH : Visual Simulation of Hydraulic Erosion. Dans Journal of Winter School of Computer Graphics, vol. 10, p. 79–94, 2002. [p. xii, 68, 69, 70 et 71]
- B. BENEŠ, I. MARAK, P. SLAVIK et S. P. : Hierarchical Erosion of Synthetical Terrains. Dans Proceedings of the 13th Spring Conference on Computer Graphics, p. 93–100. Comenius University, Bratislava, 1997. [p. xii, 63 et 68]
- B. BENEŠ et T. ROA : Simulating Desert Scenery. Dans WSCG (Short Papers), p. 17–22, 2004. [p. 61]
- B. BENEŠ, V. TĚŠÍNSKÝ, J. HORNYŠ et S. K. BHATIA : Hydraulic erosion. Computer Animation and Virtual Worlds, 17(2):99–108, 2006. [p. xii, 69 et 70]
- E. BERLEKAMP, J. CONWAY et R. GUY: Winning Ways for your Mathematical Plays, vol. 2. Academic, 1982. [p. 34]
- A. C. BEST : Empirical formulae for the terminal velocity of water drops falling through the atmosphere. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 76:302–311, juil. 1950.
 [p. 108]
- S. BEUCHER : Watershed, Hierarchical Segmentation and Waterfall Algorithm. *Morphology* and its Applications to Image Processing, p. 69–76, 1994. [p. 240]
- S. BEUCHER : Unbiased Implementation of the Watershed Transformation based on Hierarchical Queues. *CMM Internal note, Paris School of Mines*, 2004. [p. 233 et 235]
- L. BEUSELINCK : Sediment deposition by overland flow. An experimental and modelling approach. Thèse de doctorat, University of Leuven, 2000. [p. 97 et 138]
- J. BOARDMAN et D. FAVIS-MORTLOCK : Modelling Soil Erosion by Water. Dans Proceedings of the NATO Advanced Research Workshop "Global Change : Modelling Soil Erosion by Water", vol. 55 de NATO ASI Series. University of Oxford, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1998. [p. 73]
- J. BOIFFIN : La dégradation structurale des couches superficielles sous l'action des pluies. Thèse docteur ingénieur, INA-PG, 1984. [p. 2]
- B. BOUCHON-MEUNIER, L. A. ZADEH et R. R. YAGER : *Fuzzy Logic and Soft Computing*. World Scientific Publishing Co., Inc., River Edge, NJ, USA, 1995. [p. 291]
- R. BOUDAREL, J. DELMAS et P. GUICHET : Commande optimale des processus, Tome 1, Concepts fondamentaux de l'automatique. Dunod, Paris, 1967. [p. 14]
- J. M. BRADFORD et C. HUANG : Mechanisms of crust formation : physical components, p. 55–72. Soil crusting : Chemical and physical processes. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, M.E. Sumner and B.A. Stewart édn, 1992. [p. 2]
- L. M. BRESSON et J. BOIFFIN : Morphological Characterization of Soil Crust Development Stages on an Experimental Field. *Geoderma*, 47:301–325, 1990. [p. 62 et 161]
- R. B. BRYAN : Soil Erodibility and Processes of Water Erosion on Hillslope. *Geomorphology*, 32(3):385–415, mars 2000. [p. 73]

- M. BURSIK, B. MARTNEZ-HACKERT, H. DELGADO et A. GONZALEZ-HUESCA : A smoothedparticle hydrodynamic automaton of landform degradation by overland flow. *Geomorphology*, 53:25–44, juil. 2003. [p. 5 et 75]
- M. CAPCARRÈRE : Cellular Automata and Other Cellular Systems : Design & Evolution. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002. [p. 37]
- R. CARRÉ, J.-F. DÉGREMONT, M. GROSS, J.-M. PIERREL et G. SABAH : Langage humain et machine. Presses du CNRS, 1991. [p. 228]
- A. CASENAVE et C. VALENTIN : Les états de surface de la zone sahélienne. influence sur l'infiltration. Rap. tech., ORSTOM, Paris, 1989. [p. 1]
- O. CERDAN : Analyse et modélisation du transfert de particules solides à l'échelle de petits bassins versants cultivés. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, juin 2001.
 [p. 62, 63, 77 et 105]
- C. G. CHASE : Fluvial Landsculpting and the Fractal Dimension of Topography. *Geomorphology*, 5:39–57, 1992. [p. 5 et 74]
- V. Y. CHERTKOV : Using Surface Crack Spacing to Predict Crack Network Geometry in Swelling Soils. Soil Science Society of America Journal, 64:1918–1921, 2000. [p. 215]
- V. Y. CHERTKOV : Characteristic Crack Dimension of Saturated Drying Soils : Theory and Applications. Agricultural Engineering International : the CIGR Journal of Scientific Research and Development, IV, déc. 2002. [p. 2 et 215]
- V. Y. CHERTKOV et I. RAVINA : Modeling the Crack Network of Swelling Clay Soils. Soil Science Society of America Journal, 62:1162–1171, 1998. [p. 2 et 215]
- V. Y. CHERTKOV et I. RAVINA : Tortuosity of Crack Networks in Swelling Clay Soils. Soil Science Society of America Journal, 63:1523–1530, nov. 1999. [p. xvii, 210 et 211]
- N. CHIBA, K. MURAOKA et K. FUJITA : An Erosion Model Based on Velocity Fields for the Visual Simulation of Mountain Scenery. Dans The Journal of Visualization and Computer Animation, vol. 9, p. 185–194, 1998. [p. xii et 67]
- A. C. H. CHOW et B. P. ZEIGLER : Parallel DEVS : a Parallel, Hierarchical, Modular, Modeling Formalism. Dans WSC'94 : Proceedings of the 26th conference on Winter simulation, p. 716–722, San Diego, CA, USA, 1994. Society for Computer Simulation International. [p. 49]
- V. T. CHOW, D. R. MAIDMENT et L. W. MAYS : *Applied Hydrology*. Water Resources and Environmental Engineering. McGraw-Hill, New-York, 1988. [p. 108, 110, 132 et 141]
- C. CLANET, C. BÉGUIN, D. RICHARD et D. QUÉRÉ : Maximal deformation of an impacting drop. *Journal of Fluid Mechanics*, 517:199–208, oct. 2004. [p. xiv et 123]
- E. F. CODD: Cellular Automata. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 1968. [p. 32]
- P. COQUILLARD et D. R. C. HILL : Modélisation et simulation d'écosystèmes : des modèles déterministes aux simulations à événements discrets. Masson, 1997. [p. xi, 12, 13, 16, 17, 24, 25 et 26]

- O. CORDÓN, F. HERRERA, F. HOFFMANN et L. MAGDALENA : Genetic Fuzzy Systems : Evolutionary Tuning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases. World Scientific Pub Co Inc, 2001. [p. 124 et 292]
- A. M. COXE et C. A. REITER : Fuzzy Hexagonal Automata and Snowflakes. Computers & Graphics, 27(3):447–454, juin 2003. [p. xi et 36]
- R. F. CRAIG : Soil Mechanics. Taylor & Francis Group, 2004. [p. 128]
- D. D'AMBROSIO, S. DI GREGORIO, S. GABRIELE et R. GAUDIO : A Cellular Automata Model for Soil Erosion by Water. *Physics and Chemistry of the Earth, Part B*, 26(1):33–40, 2001. [p. 76]
- P. G. de GENNES : Wetting : statics and dynamics. Review of Modern Physics, 57(3):827–863, Jul 1985. [p. xiv et 136]
- A. P. J. DE ROO, R. J. E. OFFERMANS et N. H. D. T. CREMERS : LISEM : A single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. II : Sensitivity analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, 10(8):1119–1126, août 1996a. [p. 2 et 73]
- A. P. J. DE ROO, C. G. WESSELING et C. J. RITSEMA : LISEM : A single-event physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins. I : Theory, input and output. *Hydrological Processes*, 10(8):1107–1117, 1996b. [p. 2 et 73]
- J. F. DELERUE : Segmentation 3D, application à l'extraction de réseaux de pores et à la caractérisation hydrodynamique des sols. Thèse de doctorat, Université Paris XI, 2001. [p. xvii, 207 et 208]
- B. DESBENOIT, E. GALIN et S. AKKOUCHE : Modeling Cracks and Fractures. *The Visual Computer*, 21(8-10):717–726, sept. 2005. [p. xviii, 3, 224, 225 et 275]
- C. DESBOURDES-COUTADEUR : Étude du transport de l'eau dans un sol labouré. Modélisation 2-D de l'infiltration et de la redistribution dans un sol à structure hétérogène. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 2002. [p. 150 et 181]
- A. R. DEXTER : Shapes of aggregates from tilled layers of some dutch and australian soils. Geoderma, 35:91–107, 1985. [p. 100]
- S. DEY et K. DEBNATH : Influence of stream-wise bed slope on sediment threshold under stream flow. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 126(4):255–263, 2000. [p. 140]
- S. DI GREGORIO et R. SERRA : An Empirical Method for Modelling and Simulating Some Complex Macroscopic Phenomena by Cellular Automata. *Future Generation Computer* Systems, 16(2–3):259–271, déc. 1999. [p. 5, 37 et 76]
- S. DI GREGORIO, R. SERRA et M. VILLANI : Applying cellular automata to complex environmental problems. *Theoretical Computer Science*, 217:131–156, 1999. [p. 37]
- C. DÜRR, J.-N. AUBERTOT, G. RICHARD, P. DUBRULLE, Y. DUVAL et J. BOIFFIN : SIMPLE : a Model for SIMulation of PLant Emergence Predicting the Effects of Soil Tillage and Sowing Operations. Soil Science Society of America Journal, 65:414–442, 2001. [p. 1 et 98]

- D. S. EBERT, F. K. MUSGRAVE, D. PEACHEY, K. P et S. WORLEY : Texturing and Modeling : a Procedural Approach. Third Edition. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 2002. [p. 3 et 20]
- W. D. ELLISON : Soil erosion studies part i. Agricultural Engineering, 28:145–146, 1947. [p. 73]
- D. T. FAVIS-MORTLOCK : Self-organization and cellular automata models, p. 349–369. Environmental Modelling : Finding Simplicity in Complexity. Wiley, Chichester, Wainwright, J. and Mulligan, M. édn, 2004. [p. xii, 75 et 79]
- D. T. FAVIS-MORTLOCK, J. BOARDMAN, A. J. PARSONS et B. LASCELLES : Emergence and Erosion : a Model for Rill Initiation and Development. *Hydrological Processes*, 14 (11-12):2173–2205, 2000. [p. 2, 5, 25, 74, 78 et 179]
- P. FEDERL : Modeling Fracture Formation on Growing Surfaces. Thèse de doctorat, University of Calgary, Alberta, Canada, sept. 2002. [p. xvii, 2 et 220]
- P. FEDERL et P. PRUSINKIEWICZ : Finite Element Model of Fracture Formation on Growing Surfaces. Lecture Notes in Computer Science, 3037:138–145, mai 2004. [p. 220]
- V. FERRO : Evaluating overland flow sediment transport capacity. *Hydrological Processes*, 12:1895–1910, 1998. [p. xiv et 140]
- J. C. FIÈS et A. M. CASTELAO-GEGUNDE : Variation of crust pore space under rain and consequences on infiltrability. *Agronomie*, 16(6):367–379, 1996. [p. 127, 128, 129, 150, 151 et 161]
- P. A. FISHWICK : Simulation Model Design and Execution : Building Digital Worlds. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 1995. [p. 13]
- P. A. FISHWICK : *Handbook of Dynamic System Modeling*. Chapman & Hall/CRC Computer and Information Science Series, 2007. [p. 15]
- K. FOROUTAN-POUR, P. DUTILLEUL et D. L. SMITH : Advances in the Implementation of the Box-Counting Method of Fractal Dimension Estimation. Applied Mathematics and Computation, 105(2–3):195–210, nov. 1999. [p. 261]
- R. FORTIN : Comprendre la complexité. Introduction à La Méthode d'Edgar Morin. L'Harmattan, Paris, 2000. [p. 20]
- N. FOSTER et D. METAXAS : Realistic Animation of Liquids. Graphical models and image processing : GMIP, 58(5):471–483, 1996. [p. 69]
- A. FOURNIER, D. FUSSELL et L. CARPENTER : Computer rendering of stochastic models. Communications of the ACM, 25(6):371–384, 1982. [p. xii, 63, 64 et 65]
- D. FOX, R. BRYAN et A. PRICE : The Role of Soil Surface Crusting in Desertification and Strategies to Reduce Crusting. *Environmental Monitoring and Assessment*, 99:149–159, jan. 2004. [p. 128]
- U. FRISCH, B. HASSLACHER et Y. POMEAU : Lattice-Gas Automata for the Navier-Stokes Equation. *Physical Review Letters*, 56:1505–1508, avr. 1986. [p. 36]

- D. J. FURBISH, K. K. HAMNER, M. SCHMEECKLE, M. N. BOROSUND et S. M. MUDD : Rain splash of dry sand revealed by high-speed imaging and sticky paper splash targets. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112, 2007. [p. xv, xxi, 117, 118, 119, 172, 173, 174 et 175]
- A. GALLARDO-CARRERA : Analyse et modélisation de la levée sous croûte. Contribution à l'amélioration du modèle SIMPLE. Thèse de doctorat, Institut national agronomique Paris-Grignon, 2006. [p. xvii, 1, 161, 209, 271 et 272]
- N. GANGULY, B. K. SIKDAR, A. DEUTSCH, G. CANRIGHT et P. P. CHAUDHURI : A Survey on Cellular Automata. Rap. tech., Centre for High Performance Computing, Dresden University of Technology, déc. 2003. [p. 5, 22, 34, 35 et 37]
- M. GARDNER : Mathematical Games : The Fantastic Combinations of John Conway's New Solitaire Game Life. *Scientific American*, 223(4):120–123, oct. 1970. [p. 33]
- W. GARDNER : Some steady state solutions of the unsaturated moisture flow equation with applications to evaporation from a water table. *Soil Science*, 85:228–232, 1958. [p. 149]
- J. GERRARD : Fundamentals of Soils. Routledge, London, 2000. [p. 129]
- S. GOBRON et N. CHIBA : 3D Surface Cellular Automata and Its Applications. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 10:143–158, 1999. [p. 222]
- S. GOBRON et N. CHIBA : Crack Pattern Simulation Based on 3D Surface Cellular Automata. The Visual Computer, 17:287–309, juin 2001. [p. xviii, 3, 222 et 223]
- G. GOVERS : Initiation of motion in overland flow. *Sedimentology*, 34:1157–1164, 1987. [p. xiv et 140]
- G. GOVERS : Evaluation of transporting capacity formulae for overland flow. Dans A. PAR-SONS et A. ABRAHAMS, éds : Overland flow. Hydraulics and erosion mechanics, p. 243–273. UCL Press, London, 1992. [p. xiv, 138, 139, 142 et 297]
- Y. GRATTON : Le krigeage : La méthode optimale d'interpolation spatiale. Les Articles de l'Institut d'Analyse Géographique, juin 2002. [p. 95]
- W. H. GREEN et G. A. AMPT : Studies on Soil Physics Part I : The Flow of Air and Water Soils. *Journal of Agricultural Science*, 4(1):1–24, mai 1911. [p. xiv, 145 et 146]
- P. H. GROENEVELT et C. D. GRANT : Curvature of Shrinkage Lines in Relation to the Consistency and Structure of a Norwegian Clay Soil. *Geoderma*, 106:235–245, 2002. [p. 244 et 246]
- X. GU et S.-T. YAU: Global conformal surface parameterization. Dans SGP '03: Proceedings of the 2003 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing, p. 127–137, Aire-la-Ville, Switzerland, 2003. Eurographics Association. ISBN 1-58113-687-0.
 [p. 276 et 278]
- J. GUÉRIF : Conséquences de l'état structural sur les propriétés et les comportements physiques et mécaniques, p. 71–89. La structure du sol et son évolution : conséquences agronomiques, maîtrise par l'agriculteur. J. Boiffin et A. Marin-Lafleche, Paris, 1990. [p. 150]
- P. K. HAFF : Waterbots, p. 239–275. Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Harmon R. S. and Doe, W. W. III édn, 2001. [p. 5 et 75]

- P. B. HAIRSINE et C. W. ROSE : Rainfall detachment and deposition : Sediment transport in the absence of flow-driven processes. Soil Science Society of America Journal, 55(2):320– 324, 1991. [p. 2]
- V. HALLAIRE : La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. I Description in situ. Agronomie, 8(3):139–145, 1988a. [p. 2, 214 et 225]
- V. HALLAIRE : La fissuration d'un sol argileux au cours du dessèchement. II Modélisation morphologique. Agronomie, 8(3):273–280, 1988b. [p. xvii, 2, 214 et 215]
- J. HARDY, O. DE PAZZIS et Y. POMEAU : Molecular dynamics of a classical lattice gas : Transport properties and time correlation functions. *Physical Review A*, 13(5):1949–1961, mai 1976. [p. 135]
- M. J. HARRIS, G. COOMBE, T. SCHEUERMANN et A. LASTRA : Physically-Based Visual Simulation on Graphics Hardware. Dans SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Courses, p. 221, New York, NY, USA, 2005. ACM. [p. xi et 37]
- D. M. HARTLEY et P. Y. JULIEN : Boundary shear stress induced by raindrop impact. *Journal* of Hydraulic Research, 30(3):341–359, 1992. [p. 111]
- F. HERRERA, M. LOZANO et J. L. VERDEGAY : Generating Fuzzy Rules from Examples Using Genetic Algorithms. *Proceedings IPMU 1994*, p. 675–680, juil. 1994. [p. 292]
- D. R. C. HILL : Analyse orientée objets et modélisation par simulation. Addison-Wesley, Paris, 1993. [p. 17, 19 et 20]
- D. HILLEL et W. R. GARDNER : Transient infiltration into crust-topped profiles. Soil Science, 109:69–76, 1970. [p. 149]
- K. HIROTA, Y. TANOUE et T. KANEKO : Generation of Crack Patterns With a Physical Model. The Visual Computer, 14:126–137, 1998. [p. xvii, 220 et 221]
- K. HIROTA, Y. TANOUE et T. KANEKO : Simulation of Three-Dimensional Cracks. *The Visual Computer*, 16:371–378, 2000. [p. xvii, 3, 220 et 221]
- H. HOFFMANN : The Dynamics of Crack Patterns in Soil Induced by Desiccation. Mémoire de D.E.A., University of Environmental Physics, Heidelberg, 2000. [p. 2 et 221]
- G. W. HORGAN et I. M. YOUNG : An Empirical Stochastic Model for the Geometry of Two-Dimensional Crack Growth in Soil (with discussion). *Geoderma*, 96(4):263–276, 2000.
 [p. xvii, xix, 2, 216, 217, 233, 236, 239, 250, 255, 256, 260, 261, 263, 268, 272, 276 et 278]
- X. HU et B. P. ZEIGLER : A high performance simulation engine for large-scale cellular DEVS models. Dans High Performance Computing Symposium (HPC'04), p. 3–8. Advanced Simulation Technologies Conference, 2004. [p. 53]
- S. M. HUSSAIN, G. W. SMILLIE et J. F. COLLINS : Laboratory Studies of Crust Development in Irish and Iraqi Soils. I. Moisture Content, Penetration Resistance, Aggregate Size and Seedling Emergence of Spring Barley (Hordeum Vulgare L.). Soil & Tillage Research, 5:33–53, 1985. [p. 244 et 245]
- H. N. IBEN et J. F. O'BRIEN : Generating Surface Crack Patterns. Dans Proceedings of the ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation, p. 177–185, sept. 2006. [p. xviii, 3 et 222]

- V. JETTEN, A. DE ROO et D. FAVIS-MORTLOCK : Evaluation of field-scale and catchment scale soil erosion models. *Catena*, 37(3–4):521–541, oct. 1999. [p. 79]
- V. JETTEN, G. GOVERS et R. HESSEL : Erosion models : quality of spatial predictions. Hydrological processes, 17(5):887–900, avr. 2003. [p. 79]
- P. Y. JULIEN et D. B. SIMONS : Sediment transport capacity of overland flow. *Transactions* of the American Society of Agricultural Engineers, 28(3):755–762, 1985. [p. 3 et 69]
- P. Y. JULIEN : Erosion and Sedimentation. Cambridge University Press, 1998. [p. xiv, 138, 139, 141, 142 et 297]
- A. D. KELLEY, M. C. MALIN et G. M. NIELSON : Terrain Simulation Using a Model of Stream Erosion. SIGGRAPH 1988, Computer Graphics Proceedings, 22(4):263–268, 1988.
 [p. xii, 65, 66 et 67]
- M. G. KLEINHANS et B. T. GRASMEIJER : Bed load transport on the shoreface by currents and waves. *Coastal Engineering*, 53(12):983–996, déc. 2006. [p. 142]
- D. G. KRIGE : A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand. Journal of the Chemical Metallurgical and Mining Society of South Africa, 52:119–139, 1951. [p. 95]
- T. S. KUHN : *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, 1962. [p. 20]
- M. P. LAMB, W. E. DIETRICH et J. G. VENDITTI : Is the critical Shields stress for incipient sediment motion slope dependent? *Journal of Geophysical Research Earth Surface*, 2007. [p. 139 et 140]
- L. J. LANE et M. A. NEARING : USDA Water Erosion Prediction Project : Hillslope Model. Rap. tech., USDA-ARS National Soil Erosion Research Laboratory, NSERL, West Lafayette, Indiana, USA, 1989. [p. 2, 61 et 73]
- E. J. LANGENDOEN : CONCEPTS Conservational Channel Evolution and Pollutant Transport System. Rap. tech., Research Report № 16, US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Oxford, MS, USA, déc. 2000. [p. 3 et 69]
- C. G. LANGTON : Computation at the Edge of Chaos : Phase Transition and Emergent Computation. *Physica D*, 42:12–37, 1990. [p. 35]
- Y. LE BISSONNAIS : Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility : I. Theory and methodology. *European Journal of Soil Science*, 47(4):425–437, 1996.
 [p. 118 et 182]
- Y. LE BISSONNAIS et C. GASCUEL-ODOUX : L'érosion hydrique des sols cultivés en milieu tempéré, p. 129–144. Sol : interface fragile. INRA Editions, Paris, Stengel, P. and Gelin, S. édn, 1998. [p. xii, 59, 61 et 62]
- Y. LE BISSONNAIS et C. LE SOUDER : Mesurer la stabilité structurale des sols pour évaluer leur sensibilité à la battance et à l'érosion. Étude et Gestion des Sols, 2(1):43–56, 1995.
 [p. 116 et 118]
- Y. LE BISSONNAIS, J. THORETTE, C. BARDET et J. DAROUSSIN : L'érosion hydrique des sols en France. Rap. tech., IFEN - INRA, nov. 2002. [p. xii, 60, 62 et 63]

- J.-L. LE MOIGNE : La Théorie du système général : Théorie de la modélisation. Presses Universitaires de France, Paris, 1977. [p. xi, 13, 14, 15, 22 et 23]
- J.-L. LE MOIGNE : La modélisation des systèmes complexes. Afcet Systèmes, Dunod, Paris, 1990. [p. 15]
- C. LEGOUT, S. LEGUÉDOIS et Y. LE BISSONNAIS : Aggregate Breakdown Dynamics Under Rainfall Compared With Aggregate Stability Measurements. *European Journal of Soil Science*, 56(2):225–238, 2004. [p. 116, 117 et 125]
- C. LEGOUT, S. LEGUÉDOIS, Y. LE BISSONNAIS et O. MALAM ISSA : Splash Distance and Size Distributions for Various Soils. *Geoderma*, 124(3–4):279–292, fév. 2005. [p. 105 et 126]
- S. LEGUÉDOIS : Mécanismes de l'érosion diffuse des sols. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, oct. 2003. [p. xiii, 1, 82, 83, 97, 116, 117, 118, 119, 120, 142, 184, 193 et 291]
- J. P. LEWIS : Generalized stochastic subdivision. ACM Trans. Graph., 6(3):167–190, 1987.
 [p. xii, 63, 64 et 65]
- T. LINDEBERG : Scale-Space Theory in Computer Vision. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1994. ISBN 0792394186. [p. 236]
- J. LÉONARD, O. ANCELIN, B. LUDWIG et G. RICHARD : Analysis of the Dynamics of Soil Infiltrability of Agricultural Soils from Continuous Rainfall-Runoff Measurements on Small Plots. *Journal of Hydrology*, 326:122–134, 2006. [p. 2]
- J. LÉONARD : Interaction entre le ruissellement et les macropores créés par les termites dans le cas d'un sol encroûté au Sahel. Thèse de doctorat, Université Paris VI, nov. 2000. [p. 163]
- W. E. LORENSEN et H. E. CLINE : Marching Cubes : A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm. Dans SIGGRAPH 1987, Computer Graphics Proceedings, p. 163–169, New York, NY, USA, 1987. ACM Press. [p. 155]
- W. LUO: LANDSAP: a coupled surface and subsurface cellular automata model for landform simulation. *Computers and Geosciences*, 27(3):363–367, avr. 2001. [p. xii, 5, 74 et 75]
- W. LUO, K. L. DUFFIN, E. PERONJA, J. A. STRAVERS et G. M. HENRY : A Web-Based Interactive Landform Simulation Model (WILSIM). *Computers and Geosciences*, 30:215– 220, avr. 2004. [p. 75]
- D. S. MAC INTYRE : Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impact. Soil Science, 85:185–189, fév. 1958. [p. 1]
- D. T. MACVEIGH : Emulation of Uniform Cracking. Dans H. P. SANTO, éd. : Proceedings of Compugraphics '95, p. 218–227, déc. 1995. [p. 2 et 216]
- C. MAGONO : On the shape of water drops falling in stagnant air. Journal of the Atmospheric Sciences, 11(1):77–79, fév. 1954. [p. xiii et 113]
- B. B. MANDELBROT : Gaussian Self-affinity and Fractals. Springer, 2001. [p. 64]
- I. MARAK, B. BENEŠ et P. SLAVIK : Terrain Erosion Based on Rewriting of Matrices. Dans Proceedings of The Fifth International Conference in Central Europe on Computer Graphics and Visualization, p. 341–351, 1997. [p. xii, 66 et 67]

- J. S. MARSHALL et W. M. PALMER : The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, 5:165–166, 1948. [p. 106]
- M. MASTERMAN : The Nature of a Paradigm. Dans I. LAKATOS et A. MUSGRAVE, éds : Criticism and the Growth of Knowledge, p. 59–89. Cambridge University Press, 1970. [p. 20]
- A. B. MCBRATNEY et I. O. A. ODEH : Application of Fuzzy Sets in Soil Science : Fuzzy Logic, Fuzzy Measurements and Fuzzy Decisions. *Dans Geoderma*, vol. 77, p. 85–113, 1997. [p. 124]
- X. MEI, P. DECAUDIN et B. HU : Fast Hydraulic Erosion Simulation and Visualization on GPU. Dans PG '07 : Proceedings of the 15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, p. 47–56, Washington, DC, USA, 2007. IEEE Computer Society. [p. 3 et 69]
- G. H. MERTEN, M. A. NEARING et A. L. O. BORGES : Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills. Soil Science Society of America Journal, 65(3):861– 868, juin 2001. [p. 142]
- K. MICHIELSEN, H. DE RAEDT et J. T. M. DE HOSSON : Aspects of Mathematical Morphology. Advances in Imaging and Electron Physics, 125:119–195, 2002. [p. 212]
- J. A. MILLER : Living Systems. Behavioral Science, 10(3-4):103-411, 1965. [p. 14]
- M. L. MINSKY : Matter, Minds and Models. International Federation of Information Processing Congress, 1:45–49, 1965. [p. 16]
- E. MOREAU, B. VELDE et F. TERRIBILE : Comparison of 2D and 3D Images of Fractures in a Vertisol. *Geoderma*, 92:55–72, 1999a. [p. xvii, 207 et 208]
- E. MOREAU, B. VELDE et F. TERRIBILE : Pore networks in an Italian Vertisol : quantitative characterisation by two dimensional image analysis. *Geoderma*, 92(1–2):55–72, sept. 1999b. [p. xvii, 207 et 208]
- R. P. C. MORGAN et J. N. QUINTON : Erosion Modeling, p. 239–275. Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Harmon R. S. and Doe, W. W. III édn, 2001. [p. 72 et 73]
- R. P. C. MORGAN, J. N. QUINTON, R. E. SMITH, G. GOVERS, J. W. A. POESEN, K. AUERS-WALD, G. CHISCI, D. TORRI et M. E. STYCZEN : The European Soil Erosion Model (EU-ROSEM) : a Dynamic Approach for Predicting Sediment Transport from Fields and Small Catchments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(6):527–544, 1998. [p. 2, 73 et 111]
- A. J. MOSS, P. H. WALKER et J. HUTKA : Raindrop-stimulated transportation in shallow water flows : an experimental study. *Sedimentary Geology*, 22(3–4):165–184, mars 1979. [p. 180]
- M. MOUREAU et G. BRACE : Dictionnaire des sciences de la terre. Editions TECHNIP, Paris, 2000. [p. 60, 62, 141 et 214]
- F. K. MUSGRAVE, C. E. KOLB et R. S. MACE : The Synthesis and Rendering of Eroded Fractal Terrains. Dans Proceedings of the 16th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, p. 41–50. ACM Press, 1989. ISBN 0-201-50434-0. [p. xii, 63, 64, 65, 68 et 70]

- A. MUSY et M. SOUTTER : *Physique du sol*. Presses pol. et univ. romandes, Lausanne, 1991. [p. 88, 136 et 147]
- A. MUZY et J. J. NUTARO : Algorithms for efficient implementations of the DEVS & DSDEVS abstract simulators. Dans 1st Open International Conference on Modeling & Simulation (OICMS), p. 273–279. ACM Press, 2005. ISBN 0-201-50434-0. [p. 53]
- K. NAGASHIMA : Computer Generation of Eroded Valley and Mountain Terrains. *The Visual Computer*, 13:456–464, 1997. [p. 67]
- P. NASLIN : Rapport de conjoncture du CNRS, Automatique, 1974. [p. 16]
- B. NEIDHOLD, M. WACKER et O. DEUSSEN : Interactive Physically Based Fluid and Erosion Simulation. Dans Eurographics Workshop on Natural Phenomena, p. 25–32. E. Galin, P. Poulin, 2005. [p. xii, 68, 69, 70 et 71]
- G. NORD : Modélisation à base physique des processus de l'érosion hydrique à l'échelle de la parcelle. Thèse de doctorat, LTHE Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement, Université Grenoble I, 2006. [p. 2, 76 et 142]
- J. F. O'BRIEN, A. W. BARGTEIL et J. K. HODGINS : Graphical modeling and animation of ductile fracture. Dans SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, p. 291–294, New York, NY, USA, 2002. ACM Press. [p. xviii et 222]
- J. F. O'BRIEN et J. K. HODGINS : Graphical Modeling and Animation of Brittle Fracture. Dans Proceedings of the 26th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, p. 137–146. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 1999. [p. xvii, 214, 220, 222 et 226]
- J. OHSER, B. STEINBACH et C. LANG : Efficient Texture Analysis of Binary Images. *Journal of Microscopy*, 192(1):20–28, oct. 1998. [p. xix, 265, 266 et 267]
- P. A. OLSEN et L. E. HAUGEN : A New Model of the Shrinkage Characteristic Applied to Some Norwegian Soils. *Geoderma*, 83(1):67–81, avr. 1998. [p. 244 et 246]
- T. J. ONG, R. SAUNDERS, J. KEYSER et J. J. LEGGETT : Terrain generation using genetic algorithms. Dans GECCO '05 : Proceedings of the 2005 conference on Genetic and evolutionary computation, p. 1463–1470, New York, NY, USA, 2005. ACM. [p. 66]
- K. ONOUE et T. NISHITA : A Method for Modeling and Rendering Dunes with Wind-Ripples. Dans PG'00 : Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications, p. 427–430, Washington, DC, USA, 2000. IEEE Computer Society. [p. 61]
- M. PAGLIAI, N. VIGNOZZI et S. PELLEGRINI : Changes of soil pore system and pore functions following stress application. *Dans Proceedings of Eurosoil*, Freiburg, Germany, sept. 2004. [p. xvii et 208]
- D. PAPHITIS : Sediment movement under unidirectional flows : an assessment of empirical threshold curves. *Coastal Engineering*, 43:227–245, août 2001. [p. xiv, 139, 193, 194 et 297]
- E. PAQUETTE, P. POULIN et G. DRETTAKIS: The Simulation of Paint Cracking and Peeling. Dans Graphics Interface 2002 Conference Proceedings, p. 59–68, 2002. [p. xviii et 224]

- A. J. PARSONS, J. WAINWRIGHT, A. D. ABRAHAMS et J. R. SIMANTON : Distributed dynamic modelling of interrill overland flow. *Hydrological Processes*, 11:1833–1859, nov. 1997. [p. 79]
- A. PAVÉ : Modélisation en biologie et en écologie. Aléas, Lyon, 1994. [p. 23, 24 et 26]
- E. PERFECT et B. D. KAY : Applications of Fractals in Soil and Tillage Research : a Review. Soil & Tillage Research, 36(1):1–20, nov. 1995. [p. 212]
- K. PERLIN : Improving noise. Dans SIGGRAPH '02 : Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques, p. 681–682, New York, NY, USA, 2002. ACM. [p. 64]
- E. PERRIER, C. MULLON, M. RIEU et G. de MARSILY : Computer Construction of Fractal Soil Structures : Simulation of their Hydraulic and Shrinkage Properties. *Water Resources Research*, 31:2927–2943, 1995a. [p. xvii, 2, 217, 218, 233, 234 et 235]
- E. PERRIER, J. P. TREUIL, C. CAMBIER et M. RIEU : Représentation informatique d'un ensemble d'objets spatiaux structuré et déformable. *Dans Communication Colloque INRA*, *Etudes des phénomènes spatiaux, La Rochelle*, p. 215–226, déc. 1995b. [p. 217 et 218]
- E. PERRIER : Modélisation mathématique et informatique de structures naturelles complexes en interaction avec des dynamiques de flux. Habilitation à diriger des recherches, Université Paris 6, 2002. [p. 2]
- U. PESAVENTO : An implementation of von Neumann's self-reproducing machine. Artificial Life, 2(4):337–354, 1995. [p. 32]
- P. PRUSINKIEWICZ et M. HAMMEL : A fractal model of mountains with rivers. *Dans Graphics Interface*, p. 174–180, mai 1993. [p. xii, 65, 66 et 67]
- E. RAMAT et P. PREUX : Virtual Laboratory Environment (VLE) : a software environment oriented agent and object for modelling and simulation of complex systems. *Dans Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 11, p. 45–55, 2003. [p. xi, 3, 20 et 21]
- W. J. RAWLS, D. L. BRAKENSIEK et N. MILLER : Green-Ampt Infiltration Parameters from Soils Data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(1):62–70, jan. 1983. [p. 146]
- K. G. RENARD, G. R. FOSTER, G. A. WEESIES, D. K. MCCOOL et D. C. YODER : Predicting Soil Erosion By Water : A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). U.S. Department of Agriculture Handbook, 703, 1997. [p. 72]
- P. RENDELL : Turing Universality of the Game of Life. Dans A. ADAMATZKY, éd. : Collisionbased Computing, p. 513–540, London, UK, 2002. Springer-Verlag. [p. xi et 34]
- J.-P. RENNARD : Implementation of logical functions in the Game of Life. Dans A. ADA-MATZKY, éd. : Collision-based Computing, p. 491–512, London, UK, 2002. Springer-Verlag. [p. 33 et 34]
- A. J. RINGROSE-VOASE et W. B. SANIDAD : A Method for Measuring the Development of Surface Cracks in Soils : Application to Crack Development After Lowland Rice. *Geoderma*, 71:245–261, 1996. [p. xvii, 209 et 210]
- P. ROUDIER, B. PEROCHE et M. PERRIN : Landscapes Synthesis Achieved through Erosion and Deposition Process Simulation. *Computer Graphics Forum*, 12(3):375–383, 1993. [p. xii, 67, 68 et 71]

- T. SAITO et J. TORIKAWI : New Algorithms for Euclidean Distance Transformation of an n-Dimensional Digitalized Picture with Applications. *Pattern Recognition*, 27(11):1551–1565, 1994. [p. 238 et 266]
- A. SAMOUËLIAN : Analyse tridimensionnelle non destructive de la fissuration d'un sol cultivé à partir de mesures de résistivité électrique. Thèse de doctorat, Université Orléans, 2004.
 [p. 209, 211, 214 et 216]
- P. SARKAR : A Brief History of Cellular Automata. ACM Computing Surveys, 32(1):80–107, 2000. [p. 34]
- B. SCHÖNFISCH : Anisotropy in cellular automata. BioSystems, 41:29–41, 1997. [p. 5 et 134]
- R. SCHRANDT et S. ULAM : On Recursively Defined Geometrical Objects and Patterns of Growth. Dans A. BURKS, éd. : Essays on Cellular Automata, p. 232–243, University of Illinois Press, 1970. [p. 32]
- G. J. T. SCOTT, R. WEBSTER et S. NORTHCLIFF : An analysis of crack pattern in clay soil : its density and orientation. *Journal of Soil Science*, 37:653–668, 1986. [p. 207]
- T. SEDRAN et F. DE LARRARD : RENÉ-LCPC Un logiciel pour optimiser la granularité des matériaux de génie civil. Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 194:87–93, 1994. [p. 128]
- R. S. SEKHON et R. C. SRIVASTAVA : Doppler Radar Observations of Drop-Size Distributions in a Thunderstorm. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 28(6):983–994, 1971. [p. 108]
- J. SERRA : Image Analysis and Mathematical Morphology, vol. 1. Academic Press, London, England, 1982. [p. 234]
- D. SERVAT : Modélisation de dynamiques de flux par agents. Application aux procesus de ruissellement, infiltration et érosion. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, nov. 2000. [p. xii, 2, 76, 77 et 171]
- P. P. SHARMA et S. C. GUPTA : Sand detachment by single raindrops of varying kinetic energy and momentum. Soil Science Society of America Journal, 53:1005–1010, 1989. [p. 117 et 184]
- P. P. SHARMA, S. C. GUPTA et W. J. RAWLS : Soil detachment by single raindrops of varying kinetic energy. Soil Science Society of America Journal, 55:301–307, 1991. [p. 118 et 187]
- A. SHEFFER, E. PRAUN et K. ROSE : Mesh Parameterization Methods and their Applications. Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision, 2(2):105–171, 2006. [p. 275]
- G. SHEPHERD : Visual soil assessment. Volume 1. Field guide for cropping and pastoral grazing on flat to rolling country. Horizons. Mw & Landcare Research : Palmerston North, New Zealand, 2000. [p. xii et 90]
- J. R. SHEWCHUK : Triangle : Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. Dans M. C. LIN et D. MANOCHA, éds : Applied Computational Geometry : Towards Geometric Engineering, vol. 1148 de Lecture Notes in Computer Science, p. 203– 222. Springer-Verlag, mai 1996. [p. 253]

- A. SHIELDS : Application of similarity principles and turbulence research to bedload movement. Hydrodynamics Laboratory Publication, California Institute of Technology, 167, 1936. [p. 138 et 139]
- F. A. S. B. SHIGINAH : Multi-Layer Cellular DEVS Formalism for Faster Model Development and Simulator Efficiency. Thèse de doctorat, Electrical and Computer Engineering Dept., University of Arizona, 2006. [p. xii, 53, 54, 55, 86 et 283]
- A. B. SHVIDCHENKO et G. PENDER : Flume study of the effect of relative depth on the incipient motion of coarse uniform sediments. Water Resources Research, 36(2):619–628, fév. 2000. [p. 140]
- M. SIPPER, M. TOMASSINI et M. S. CAPCARRÈRE : Evolving Asynchronous and Scalable Non-uniform Cellular Automata. Dans G. D. SMITH, N. C. STEELE et R. F. ALBRECHT, éds : Proceedings of International Conference on Artificial Neural Networks and Genetic Algorithms (ICANNGA'97), p. 66–70. Springer-Verlag, Vienna, 1997. [p. 36]
- A. T. SKJELTORP et P. MEAKIN : Fracture in Microsphere Monolayers Studied by Experiment and Computer Simulation. *Nature*, 335:424–426, sept. 1988. [p. xvii, 2 et 219]
- J. C. SMUTS : Holism and Evolution. MacMillan & Co Ldt, London, 1926. [p. 12]
- J. STAM : Stable Fluids. Dans A. ROCKWOOD, éd. : Siggraph 1999, Computer Graphics Proceedings, p. 121–128, Los Angeles, 1999. Addison Wesley Longman. [p. 68]
- P. STENGEL : Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Annales Agronomiques, 30:27–51, 1979. [p. xvii et 207]
- P. STENGEL et S. GELIN : Sol : interface fragile. INRA Editions, Paris, 1998. [p. 1 et 60]
- A. A. SULEIMAN et J. T. RITCHIE : Modeling Soil Water Redistribution during Second-Stage Evaporation. Soil Science Society of America Journal, 67(2):377–386, 2003. [p. 245 et 246]
- J. TISSEAU et M. PARENTHOËN : La modélisation énactive. Dans AFIG'05 : Association Française d'Informatique Graphique, Strasbourg, nov. 2005. [p. xi, 3 et 18]
- T. TOFFOLI : Cellular Automata as an Alternative to (Rather Than an Approximation of) Differential Equations in Modeling Physics. *Physica 10D*, 10:117–127, 1984. [p. 35]
- T. TOFFOLI : Occam, Turing, von Neumann, Jaynes : How much can you get for how little ? (A conceptual introduction to cellular automata). *The InterJournal*, déc. 1994. [p. 35 et 135]
- G. E. TUCKER, S. T. LANCASTER, N. M. GASPARINI et B. R. L. : The Channel-Hillslope Integrated Landscape Development Model, p. 349–388. Landscape Erosion and Evolution Modeling. Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, Harmon R. S. and Doe, W. W. III édn, 2001. [p. 78]
- R. UIJLENHOET et J. N. M. STRICKER : A consistent rainfall parameterization based on the exponential raindrop size distribution. *Journal of Hydrology*, 218(3-4):101–127, mai 1999. [p. 107 et 108]
- C. W. ULBRICH : Natural Variations in the Analytical Form of the Raindrop Size Distribution. Journal of Applied Meteorology, 22:1764–1775, oct. 1983. [p. 107]

- W. G. UPLINGER : A new formula for raindrop terminal velocity. Dans Proceedings of the 20th Conference Radar Meteorology, p. 389–391, Boston, nov. 1981. American Meteorological Society. [p. 108]
- C. VALENTIN et L. M. BRESSON : Morphology, Genesis and Classification of Surface Crusts in Loamy and Sandy Soils. *Geoderma*, 55(3–4):225–245, 1992. [p. 1]
- G. VALETTE, M. HERBIN, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Preliminary Approach of 3D Simulation of Soil Surface Degradation by Rainfall. *Dans Eurographics Workshop on Natural Phenomena, Dublin, Ireland*, p. 41–50. E. Galin, P. Poulin, août 2005. [p. 91]
- G. VALETTE, S. PREVOST et L. LUCAS : Simulation of Rain Splash Using a Genetic Fuzzy System. Dans Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems (IPMU), p. 150–157, Paris, juil. 2006a. [p. 117]
- G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : SoDA Project : a Simulation of Soil Surface Degradation by Rainfall. Computers & Graphics, 30(4):494–506, août 2006b. [p. 91]
- G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Discrete Modelling of Soil Fragments Transport by Runoff. 14th Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI 2008) Lecture Note in Computer Science, 4992:482–494, avr. 2008a. [p. 130]
- G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Dynamic Model of Cracks Development Based on a 3D Discrete Shrinkage Volume Propagation. Computer Graphics Forum, 27(1):47–62, 2008b. [p. 265]
- G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Non-Modular Cellular DEVS Model of the Degradation of a Cultivated Soil Surface by Rainfall. Dans 22nd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2008), p. 285–291, Nicosia, Cyprus, juin 2008c. [p. 82]
- J. H. VAN BOXEL : Numerical model for the fall speed of rain drops in a rain fall simulator. Dans International Workshop on Technical Aspects and Use of Wind Tunnels for Wind-Erosion Control and Combined Effect of Wind and Water on Erosion Processes, vol. 1998/1, p. 77–86, nov. 1998. [p. xiii, 109, 110 et 112]
- A. I. J. M. VAN DIJK, A. G. C. A. MEESTERS et L. A. BRUIJNZEEL : Exponential Distribution Theory and the Interpretation of Splash Detachment and Transport Experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 66:1466–1474, 2002. [p. 119 et 291]
- M. T. VAN GENUCHTEN : A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. Soil Science Society American Journal, 44:892–898, 1980. [p. 147]
- L. C. van RIJN : Sediment transport, part I : bedload transport. Journal of Hydraulic Engineering, 110(10):1431–1454, 1984. [p. 141]
- H. VANGHELUWE : Multi-Formalism Modelling and Simulation. Thèse de doctorat, Ghent University, 2000. [p. xi, 12, 13, 14, 16, 17, 26, 45, 46 et 51]
- B. VELDE : Structure of Surface Cracks in Soil and Muds. *Geoderma*, 93:101–124, 1999.
 [p. xvii, 212, 213, 260, 262, 263 et 264]

- B. VELDE : Surface Cracking and Aggregate Formation Observed in a Rendzina Soil, La Touche (Vienne) France. *Geoderma*, 99(3):261–276, 2001. [p. 213, 260, 262, 263 et 264]
- A. VICARI, H. ALEXIS, C. DEL NEGRO, M. COLTELLI, M. MARSELLA et C. PROIETTI : Modeling of the 2001 lava flow at Etna volcano by a Cellular Automata approach. *Environmental Modelling & Software*, 22(10):1465–1471, 2007. [p. 134 et 135]
- L. VINCENT et P. SOILLE : Watersheds in Digital Spaces : An Efficient Algorithm Based on Immersion Simulations. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 13(6):583–598, 1991. [p. 233 et 235]
- H. J. VOGEL, H. HOFFMANN, A. LEOPOLD et K. ROTH : Studies of crack dynamics in clay soil : I. Experimental methods, results and morphological quantification. *Geoderma*, 125 (3-4):203–211, avr. 2005a. [p. xvii, 210, 212, 260, 262, 265 et 266]
- H. J. VOGEL, H. HOFFMANN, A. LEOPOLD et K. ROTH : Studies of crack dynamics in clay soil II. A physically based model for crack formation. *Geoderma*, 125(3-4):213–223, avr. 2005b. [p. xvii, 2, 212, 221, 265 et 267]
- M. VOLTZ et Y. M. CABIDOCHE : Non-Uniform Volume and Water Content Changes in Swelling Clay Soil : I Theoretical Analysis. *European Journal of Soil Science*, 46:333–343, 1995. [p. 2, 216 et 225]
- L. VON BERTALANFFY : Théorie générale des systèmes (édition française). Dunod, Paris, 1973. [p. 12 et 13]
- J. VON NEUMANN : Theory of Self Reproducing Automata, edited and completed by Arthur Burks. Univ. of Illinois Press, 1966. [p. 29 et 32]
- L. E. WAGNER : An Overview of the Wind Erosion Prediction System. Dans International Conference on Air Pollution from Agricultural Operations, p. 73–78. MidWest Plan Service, 1996. [p. 61]
- G. WAINER : CD++ : a Toolkit to Develop DEVS Models. Software Practice and Experience, 32(13):1261–1306, 2002. [p. 53]
- G. WAINER et N. GIAMBIASI : Application of the Cell-DEVS Paradigm for Cell Spaces Modelling and Simulation. *Simulation*, 76(1):22–39, jan. 2001a. [p. 53]
- G. WAINER et N. GIAMBIASI : Timed cell-DEVS : modeling and simulation of cell spaces. Discrete event modeling and simulation technologies, p. 187–214, 2001b. [p. 51 et 54]
- H. WANG, P. J. MUCHA et G. TURK : Water drops on surfaces. *Dans SIGGRAPH '05 : ACM SIGGRAPH 2005 Papers*, p. 921–929, New York, NY, USA, 2005. ACM. [p. 136]
- L. X. WANG : Fuzzy Systems are Universal Approximators. Dans Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy Systems, p. 1163–1169, San Diego, CA, 1992. [p. 124]
- L. T. WEST, S. C. CHIANG et L. D. NORTON : *The morphology of surface crusts*, p. 73–92. Soil crusting : Chemical and physical processes. Lewis Publishers, Boca Raton, FL, M.E. Sumner and B.A. Stewart édn, 1992. [p. 2]
- P. WIBERG et J. SMITH : Model for calculating bed load transport of sediment. Journal of Hydraulic Engineering, 115:101–123, 1989. [p. 142 et 297]

- W. H. WISCHMEIER et D. D. SMITH : Rainfall Energy and Relationship to Soil Loss. Transactions of the American Geophysical Union, 30(2):285–291, 1958. [p. 71]
- W. H. WISCHMEIER et D. D. SMITH : Predicting rainfall erosion losses : a guide to conservation planning. U.S. Department of Agriculture Handbook, 537, déc. 1978. [p. 71]
- S. WOLFRAM : Cellular Automata as Simple Self-Organizing Systems. Caltech preprint CALT-68-938 (submitted to Nature), 1982. [p. 34]
- S. WOLFRAM : Universality and Complexity in Cellular Automata. *Physica D*, 10:1–35, 1984. [p. 35]
- S. WOLFRAM : A New Kind of Science. Wolfram Media, 2002. [p. 30, 34 et 41]
- T.-T. WONG, W.-S. LUK et P.-A. HENG : Sampling with Hammersley and Halton points. Journal of Graphics Tools, 2(2):9–24, 1997. [p. 70]
- N. P. WOODRUFF et F. H. SIDDOWAY : A wind erosion equation. Soil Science Society of America Journal, 29(5):602–608, 1965. [p. 61]
- A. H. WRIGHT : Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization. Dans G. J. RAWLINS, éd. : Foundations of Genetic Algorithms, p. 205–218. Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991. [p. 292]
- L. A. ZADEH : Fuzzy Sets. Information Control, 8:338–353, 1965. [p. 124]
- B. P. ZEIGLER : Theory of Modeling and Simulation. Wiley Interscience, New York, 1976. [p. 14, 24, 43 et 46]
- B. P. ZEIGLER : Theory of Modeling and Simulation. Second Edition. Krieger Publishing Company, 1984. [p. xi, 12, 13, 14, 43 et 46]
- B. P. ZEIGLER, T. G. KIM et H. PRAEHOFER : Theory of Modelling and Simulation : Integrating Discrete Event and Continuous Complex Dynamic Systems. Academic Press, San Diego, CA, USA, 2000. [p. 16, 43, 50, 84 et 229]

Publications personnelles

Articles dans des revues internationales avec comité de lecture

G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Dynamic Model of Cracks Development Based on a 3D Discrete Shrinkage Volume Propagation. *Computer Graphics Forum*, 27(1):47–62, 2008.

G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : SoDA Project : a Simulation of Soil Surface Degradation by Rainfall. *Computers & Graphics*, 30(4):494–506, août 2006.

Communications internationales avec actes et comité de lecture

G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Non-Modular Cellular DEVS Model of the Degradation of a Cultivated Soil Surface by Rainfall. 22nd European Conference on Modelling and Simulation (ECMS 2008), p. 285–291, Nicosie, Chypre, juin 2008.

G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Discrete Modelling of Soil Fragments Transport by Runoff. 14th Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI 2008) Lecture Note in Computer Science, p. 482–494, Lyon, avr. 2008.

G. VALETTE, S. PREVOST et L. LUCAS : Modeling and visualization of cracks in a desiccating soil. 11th International Fall Workshop Vision, Modeling, and Visualization, p. 177–184, Aachen, Germany, nov. 2006. Aka Verlag, Berlin.

G. VALETTE, S. PREVOST et L. LUCAS : A generalized cracks simulation on 3d-meshes. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, p. 7–14, Vienna, Austria, sept. 2006.

G. VALETTE, S. PREVOST et L. LUCAS : Simulation of rain splash using a genetic fuzzy system. *Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems* (*IPMU*), p. 150–157, Paris, juil. 2006.

G. VALETTE, M. HERBIN, L. LUCAS et J. LÉONARD : A Preliminary Approach of 3D Simula-

tion of Soil Surface Degradation by Rainfall. *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*, p. 41–50, , Dublin, Ireland, août 2005.

Communications nationales avec actes

G. VALETTE, S. PRÉVOST, L. LUCAS et J. LÉONARD : Description d'un simulateur de l'évolution de la structure de la surface du sol sous l'action des pluies. 32^{es} Journées Scientifiques du GFHN (Groupe Francophone d'Humidimétrie et traNsferts en milieux poreux), Bulletin du GFHN, 53:67-72, Nantes, nov. 2007.

G. VALETTE, S. PREVOST et L. LUCAS : Fissurations de surfaces 3D : du terrain à leur généralisation. 19^{es} journées de l'Association française d'informatique graphique / 4^{es} rencontres du Chapitre français d'Eurographics (AFIG06), p. 233–240, Bordeaux, nov. 2006.

Résumé

Ce mémoire est le fruit d'un travail de thèse mené en interface entre les domaines de la science du sol et de l'informatique. Ce travail concerne la modélisation et la simulation de deux types d'évolution de la structure de surface d'un sol cultivé : sa dégradation sous l'action de la pluie, conduisant principalement à la formation de croûtes de battance, et sa fissuration sous l'effet de la dessiccation. Les modèles développés sont basés sur le formalisme DEVS, formalisme dédié aux systèmes à évènements discrets, cela en mettant à profit les résultats d'une thèse récente dans ce domaine qui nous a permis de conserver le principe des automates cellulaires étendus.

Le simulateur de la dégradation du sol modélise une parcelle de l'ordre du mètre carré soumise à la pluie, et sa principale originalité est qu'il vise à reproduire les interactions entre les processus érosifs et l'évolution du relief et de la structure de la surface du sol. Il gère pour cela la granulométrie issue des processus de fragmentation par les gouttes de pluie, afin d'en tenir compte dans les processus de transport et d'analyser ainsi l'évolution de la composition granulométrique de la surface du sol. Les différents processus de transfert d'eau (pluie, infiltration, ruissellement) sont représentés, ainsi que les processus de transfert de sédiments (fragmentation et projection par splash, transport et dépôt par le ruissellement). Cette prise en compte d'une large gamme de processus a conduit à un important travail d'agrégation des connaissances actuelles sur ces processus. Des comparaisons avec des expérimentations en laboratoire ou issues de la littérature tendent à valider les choix effectués pour la modélisation des processus. Une expérience sous simulateur de pluie a permis également de vérifier que notre simulateur présente un comportement global correct, produisant un encroûtement réaliste à la fois sur des aspects qualitatifs (présence ou absence, nature de la croûte) et quantitatifs (épaisseur, conductivité hydraulique), ce qui en constitue l'une des caractéristiques les plus originales et innovantes.

Le simulateur de la fissuration du sol reproduit l'apparition et le développement de fissures verticales dans la couche de surface d'un sol soumis à dessiccation. Outre des méthodes déjà employées pour obtenir des réseaux de fissures, nous avons introduit l'utilisation de la méthode de la ligne de partage des eaux hiérarchique afin d'obtenir un réseau de fissures qui puisse être déterminé par des propriétés du sol, en particulier l'épaisseur de la croûte. Les fissures créées se développent et s'élargissent au moyen d'une propagation de volumes de retrait qui tiennent lieu de facteur de stress. Le modèle développé offre une grande souplesse d'utilisation, puisqu'il peut par exemple s'appuyer sur une cinétique de teneur en eau et une courbe de retrait du sol pour fournir une cinétique de développement d'un réseau de fissures très spécifique du sol et du contexte climatique considérés, tout comme proposer automatiquement un réseau de fissures réaliste en l'absence d'informations. Un début de validation au moyen des nombres de Minkowski a par ailleurs montré que les réseaux produits possédaient des caractéristiques similaires à celles de réseaux de fissures réels. Enfin, nous avons proposé une généralisation de notre méthode aux maillages 3D et pu obtenir ainsi des résultats visuels intéressants.

Ce travail de thèse a été financé par les régions Champagne-Ardenne et Picardie.

Mots-clés : encroûtement du sol, infiltration, ruissellement, splash, pluie, érosion, fissuration, modélisation, simulation, visualisation, automates cellulaires, DEVS.