



Développement d'une méthode d'automate cellulaire basé sur une tessellation irrégulière et hiérarchique pour la simulation des processus spatiotemporels

Thèse

Hédia Sammari

Doctorat en sciences géomatiques

Philosophiae doctor (Ph. D.)

Québec, Canada

© Hedia Sammari, 2014

Résumé

Les systèmes d'information géographique (SIG) sont largement utilisés pour représenter, gérer et analyser les données spatiales dans plusieurs disciplines incluant les géosciences, l'agriculture, la foresterie, la météorologie et l'océanographie. Néanmoins, malgré l'avancement récent des technologies des SIG, ils sont encore limités dans la représentation et la simulation des processus spatiotemporels. Ce travail de recherche définit le cadre théorique, conceptuel et applicatif qui vise à améliorer les méthodes de compréhension, de représentation et de simulation des processus dynamiques continus. Il vise plus précisément à améliorer les structures de données dans les SIG en développant une structure de données hiérarchique qui est la base d'un automate cellulaire capable de répondre aux principales caractéristiques de ces processus. L'exploration du potentiel des automates cellulaires pour simuler et représenter les processus dynamiques continus dans les SIG en respectant leur caractère irrégulier et hiérarchique fait l'objet de ce travail de recherche dans lequel une application dans le contexte hydrologique est mise en place. Nos objectifs spécifiques se résument dans 1) la construction d'une tessellation irrégulière et hiérarchique permettant de représenter les processus spatiotemporels et 2) la simulation de ces processus en utilisant un automate cellulaire opérant sur cette tessellation. Nous étudions la discrétisation de l'espace en tessellation irrégulière basée sur le diagramme de Voronoï et nous proposons une procédure de hiérarchisation de cette tessellation dans un objectif de représentation multi-échelle afin d'offrir une solution d'aide à la décision dans la gestion du territoire. Nous expliquons notre méthodologie et les algorithmes de sélection de données pour la génération de différents niveaux d'échelles spatiales. Un automate cellulaire non traditionnel est mis en place pour lequel nous définissons une grille à géométrie irrégulière de type Voronoï, des règles de transition spécifiques et un type particulier de voisinage orienté. Nous validons le fonctionnement de ce prototype dans le Bassin Expérimental de la Forêt Montmorency à Québec où des comparaisons sont possibles grâce à des données de débits d'eau mesurées in situ.

Abstract

Geographic information systems (GIS) are widely used to represent, manage and analyse spatial data in many disciplines including geosciences, agriculture, forestry, meteorology and oceanography. However, despite recent advances in GIS technologies, they are still limited when it comes to representation and simulation of spatiotemporal processes. This research work, deals with a theoretical, conceptual and practical framework which aims to improve the representation of dynamic continuous processes. It aims especially to improve GIS capabilities by developing a CA based on a hierarchical irregular tessellation which is able to take into account the main characteristics of these processes. The exploration of the cellular automata potential to simulate and represent dynamic continuous processes regarding their irregular and hierarchic characteristics is the subject of this work where an application in the hydrologic field is established. Our specific objectives are 1) to build an irregular and hierarchic grid that can be used to represent spatiotemporal processes, 2) to simulate those processes with a cellular automata operating on this grid. We give details about the irregular geometric grid based on a Voronoï Diagram, the characteristics of a specific oriented neighbourhood and the transition rules that are governing the cells update. In addition, we discuss the hierarchical perspective of the build lattice that is essential for easy move between different spatial scales. We explain our methodology of data selection in order to generate the spatial levels of representation by demonstrating the used selection algorithms. This facilitates the representation of spatial dynamic phenomena and contributes to the better understanding of the complex behaviour of the whole system at different levels of details. We also present the data structures and general functioning of the whole simulation system. We finally, validate our framework by simulating the water flow process in a specific watershed in the region of Montmorency Forest of Quebec where in situ data are available. To validate our simulation results we compare them with measured data.

Table des matières

Résumé.....	iii
Abstract.....	v
Table des matières.....	vii
Liste des Tableaux.....	xiii
Liste des Figures.....	xv
Remerciements.....	xxi
Chapitre 1 : Introduction générale.....	1
1.1 Mise en contexte.....	1
1.1.1 Introduction.....	1
1.1.2 Modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG.....	1
1.2 Problématiques de recherche.....	5
1.2.1 Énoncé de la problématique générale.....	5
1.2.2 Problèmes spécifiques.....	7
1.2.2.1 Problème lié à la discrétisation de l'espace.....	7
1.2.2.2 Problème lié à la représentation multi-échelle dans les SIG.....	8
1.2.2.3 Problème lié à la représentation de la dynamique des processus spatiotemporels.....	9
1.3 Objectifs de la thèse.....	10
1.3.1 Objectif général.....	11
1.3.2 Objectifs spécifiques.....	11
1.4 Méthodologie de la recherche.....	12
1.5 Contenu de la thèse.....	15
Chapitre 2 : Revue de littérature sur la modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG.....	17
2.1. Introduction.....	17
2.2 Les processus spatiotemporels.....	18
2.2.1 Ontologies des processus spatiotemporels.....	18
2.2.2 Caractéristiques des processus spatiotemporels.....	19
2.2.3 Exemple de processus spatiotemporel de type diffusion : l'écoulement des eaux de surface.....	22
2.3 Modélisation des processus spatiotemporels.....	24

2.3.1 La modélisation.....	24
2.2.2 La modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG	26
2.2.3 Couplage entre modèles et SIG.....	28
2.2.4 Couplage entre modèles hydrologiques et SIG.....	30
2.4 Utilisation des automates cellulaires dans la modélisation des processus spatiotemporels	31
2.4.1 Le concept de l'automate cellulaire	31
2.4.2 Différentes variantes d'automates cellulaires	32
2.4.3 Automates cellulaires en hydrologie.....	37
2.5 Conclusion du chapitre	42
Chapitre 3 : Géosimulation basée sur une discrétisation irrégulière de l'espace	45
3.1. Introduction.....	45
3.2 Les tessellations utilisées en géosimulation.....	46
3.2.1 Régularité d'une tessellation.....	47
3.2.1.1 Les tessellations régulières en géosimulation	47
3.2.1.2 Les tessellations irrégulières en géosimulation.....	50
3.2.2 Voisinage des tessellations en géosimulation	51
3.2.2.1 Le voisinage des données vectorielles formant une tessellation.....	51
3.2.2.2 Le voisinage par graphe.....	52
3.2.2.3 Le voisinage par tessellation de Voronoï.....	52
3.3 Cadre conceptuel d'une solution de géosimulation basée sur le diagramme de Voronoi	53
3.3.1 Définition du diagramme de Voronoï	54
3.3.2 Le diagramme de Voronoï en géosimulation.....	56
3.3.3 Quels points pour les générateurs de Voronoï?	57
3.3.4 Une tessellation de Voronoï pour une simulation par automate cellulaire	62
3.4 Cas d'application de la solution proposée : Simulation de l'écoulement des eaux de surface par automate cellulaire basée sur un diagramme de Voronoï.....	63
3.4.1 Cas particulier de choix des points générateurs pour la simulation de l'écoulement des eaux de surface	63
3.4.2 Définition d'un voisinage orienté à base de Voronoï pour la simulation de l'écoulement des eaux de surface	66

3.5 Conclusion du chapitre	69
Chapitre 4 : Une approche hiérarchique de représentation des processus spatiotemporels	71
4.1. Introduction.....	71
4.2 Représentation hiérarchique en géosimulation	72
4.2.1 La théorie de la hiérarchie.....	73
4.2.2 Géométrie des structures hiérarchiques	74
4.2.3 Automates cellulaires hiérarchiques	78
4.3 Cadre conceptuel de la structure hiérarchique proposée.....	80
4.3.1 Représentation multi-échelle et/ou multi-résolution.....	80
4.3.2 Présentation de la solution proposée.....	82
4.3.3 Problème de la sélection des données	85
4.3.3.1 Cas général de sélection des données en vue d'une représentation hiérarchique des processus spatiotemporels	85
4.3.3.2 Cas particulier des données topographiques : Algorithmes de sélection de points selon l'altitude	86
4.3.3 Hiérarchisation d'une tessellation irrégulière de type Voronoï	90
4.4 Contexte d'application de la solution proposée	92
4.4.1 Construction des échelles spatiales de la structure de Voronoï hiérarchique pour le processus d'écoulement des eaux de surface.....	92
4.4.2 Validation.....	94
4.5 Conclusion du chapitre	96
Chapitre 5 : Un système de simulation par automate cellulaire multi-échelles basé sur un découpage de Voronoï hiérarchique	97
5.1. Introduction.....	97
5.2 Caractéristiques de l'automate cellulaire	97
5.2.1 Géométrie de la grille de type Voronoï.....	98
5.2.2 État des cellules à valeurs non discrètes	99
5.2.3 Voisinage orienté dynamique et non commutatif.....	100
5.2.4 Règles de transition.....	102
5.2.5 Pas de temps.....	103
5.3 Fonctionnement de l'application.....	103

5.3.1 Le diagramme de classes	105
5.3.2 Les structures de données utilisées	109
5.3.3 Les algorithmes de base de l'application	110
5.3.4 Interface de l'application	113
5.3.4 Implémentation	117
5.4 Conclusion du chapitre	117
Chapitre 6 : Cas d'application et résultats de l'expérimentation pour le processus d'écoulement des eaux de surface.....	
6.1. Introduction.....	119
6.2 Zone d'expérimentation et données	119
6.2.1 Présentation de la zone d'expérimentation : le bassin des Eaux-volées	119
6.2.1.1 Données disponibles.....	121
6.3 Conception de la simulation du processus de ruissellement.....	124
6.3.1 Déroulement de la simulation	124
6.2 Simplifications des équations de simulation.....	130
6.4 Simulation, validation et résultats.....	133
6.4.1 Préparation du système de simulation et calibrage	133
6.4.1.1 Détermination du voisinage orienté dans le BEREV.....	134
6.4.1.1.1 Concept du ratio de voisinage :	134
6.4.1.1.2 Déduction de la forme du terrain.....	134
6.4.1.2 Calibration.....	136
6.4.1.2.1 Choix du pas de temps	136
6.4.1.2.2 Coefficient de Manning	140
6.4.2 Simulation de l'écoulement de l'eau de surface au BEREV	141
6.4.3 Validation des débits d'eau avec des données mesurées	146
6.4.3.1 Conditions de validation.....	146
6.4.3.2 Étude de cas et résultats de validation	146
6.5 Conclusion du chapitre	150
Chapitre 7 : Conclusions générales.....	
7.1 Contributions de la recherche	154
7.2 Discussion.....	156

7.3 Perspectives de recherche	158
Références bibliographiques	161

Liste des Tableaux

Tableau 2.1: Exemples et types de processus spatiotemporels selon les critères de modélisation [Mitasova et Mitas, 1998]	19
Tableau 2.2: Automates Cellulaires en hydrologie : exemples de géométrie, dimension, échelle et voisinage	37
Tableau 2.3: Automates Cellulaires en hydrologie : Exemples de paramètres modélisés, règles de transition et évaluation.....	39
Tableau 3.1: Exemples d'utilisation de tessellations régulières en géosimulation.....	48
Tableau 3.2: Exemples de tessellation formée par des données vectorielles en géosimulation	52
Tableau 3.3: Exemple de tessellations formées par un graphe en géosimulation.....	52
Tableau 3.4: Exemples de tessellations de Voronoï en géosimulation.....	53
Tableau 4.1 : Classification de types d'échelles selon différents critères.....	81
Tableau 6.1 : Intervalles de valeurs des paramètres intervenant dans le calcul du pas de temps au BEREV	137
Tableau 6.2: Exemples de pas de temps de simulation possibles au BEREV	140

Liste des Figures

Figure 1.1 : Les défis de simulation dans les SIG.....	6
Figure 1.2: Illustration de la solution envisagée	10
Figure 1.3: Méthodologie de la recherche	15
Figure 2.1: Différentes approches pour la représentation multi-échelle des données de MNE [Li et al., 2005].....	22
Figure 2.2: Processus physiques du cycle de l'eau	23
Figure 2.3: Schéma méthodologique général de modélisation et de simulation [Schmidt et Pavé, 2002]	25
Figure 2.4: Trois dimensions fondamentales des dynamiques des objets [Goodchild et al., 2007]	28
Figure 2.5: Couplage faible entre SIG et outil de simulation	29
Figure 2.6: Couplage fort entre SIG et outil de simulation.....	29
Figure 2.7: Couplage total entre SIG et outil de simulation	30
Figure 2.8 : Différentes dimensions d'un automate cellulaire.....	33
Figure 2.9: Tessellations du cas bidimensionnel : (A) grille carrée; (B) grille triangulaire et (C) grille hexagonale.....	33
Figure 2.10: Tessellation tridimensionnelle cubique	34
Figure 2.11: (A) Voisinages de Von Neumann; (B) de Moore; (C) de Von Neumann étendu et (D) de Moore étendu	34
Figure 2.12: Voisinage pour une tessellation hexagonale	35
Figure 2.13 : Composantes typologiques des automates cellulaires.....	36
Figure 3.1 : Exemples de primitives géométriques à l'origine des tessellations régulières de l'espace	47
Figure 3.2: Le diagramme de Voronoï et son dual la triangulation de Delaunay	55
Figure 3.3: Correspondance géométrique entre les diagrammes de Voronoï et de Delaunay	55
Figure 3.4: Implantation de trois types de voisinage. Le voisinage du polygone j est indiqué par les polygones grisés [Stevens et Dragicevic, 2007].....	57
Figure 3.5: Utilisation du diagramme de Voronoï pour la détection de la couverture spatiale d'un réseau de capteurs [Argany et al., 2011]	59
Figure 3.6: Exemple de coefficient de représentativité en \log_{10} des stations météorologiques servant de générateurs d'un diagramme de Voronoï (haut) 467 points, (bas) en Suisse [Dubois, 2000].	61
Figure 3.7: Processus d'infiltration et des écoulements des eaux.....	64
Figure 3.8: Types de modèles numériques de terrain	65
Figure 3.9: Définition du voisinage orienté	67

Figure 3.10: Voisinage orienté résultant du voisinage de Voronoï et de l'altitude du terrain, (C) cellule centrale, (V) voisin dans le diagramme de Voronoï, (VO) voisin au sens du voisinage orienté	68
Figure 4.1: Discrétisation et hiérarchisation d'un processus spatiotemporel	71
Figure 4.2: Illustration des concepts de la théorie de la hiérarchie [Wu et David, 2002].	74
Figure 4.3: Construction d'un quadtree par subdivisions successives.....	75
Figure 4.4: Bissection triangulaire: la structure Bintree	76
Figure 4.5: Décomposition illimitée d'un hexagone en triangles équilatéraux	76
Figure 4.6: Fusion de quatre hexagones et formation du HoR	77
Figure 4.7: Adressage selon deux (A) ou trois (B) axes asymétriques des tessellations hexagonales [Burt 1980].....	77
Figure 4.8: Séparation des échelles spatiales et temporelles pour un AC simple et AxC [Hoekstra et al, 2008].....	79
Figure 4.9: Exemple d'une abstraction ternaire pour une distribution irrégulière de cellules	80
Figure 4.10: Représentation hiérarchique sous forme de graphe.....	84
Figure 4.11: Les classes morphométriques du terrain [Wood, 1996]	87
Figure 4.12: Calcul de la distance orthogonale du point central vers la ligne joignant deux voisins diamétralement opposés dans une matrice carrée des altitudes d'ordre 3	89
Figure 4.13: Structure de Voronoï hiérarchique : adressage résultant d'une sélection aléatoire de données [Gold, 2006]	91
Figure 4.14: Algorithme de hiérarchisation par sélection des générateurs	93
Figure 4.15: Construction d'une structure de Voronoï hiérarchique	95
Figure 5.1 : Cellule d'automate identifiée à une cellule de Voronoï	98
Figure 5.2: Comparaison entre l'AC utilisé et un AC traditionnel : l'axe horizontal identifie les cellules, l'axe vertical présente les pas de temps	100
Figure 5.3: Voisinage orienté par rapport au voisinage de Voronoï traditionnel	102
Figure 5.4: Paramètres statiques et dynamiques des cellules de Voronoï	104
Figure 5.5: Diagramme de classe.....	106
Figure 5.6: La classe principale	108
Figure 5.7: Structures de données utilisées.....	109
Figure 5.8: Algorithme de découpage de l'espace en tessellation irrégulière de type Voronoï	111
Figure 5.9: Algorithme de hiérarchisation du diagramme de Voronoï	111
Figure 5.10: Algorithme de simulation des processus spatiotemporels par AC	112
Figure 5.11: Interface globale de l'application	113
Figure 5.12: Interface : L'onglet <i>Voronoï Diagramme</i>	114
Figure 5.13: Interface : L'onglet <i>Générer Hiérarchie</i>	115
Figure 5.14: Interface : Cadre <i>Point Générateur</i>	116
Figure 5.15: Interface : Le cadre <i>Cellule Macro</i>	116

Figure 6.1: Localisation géographique et unités territoriales de la Forêt Montmorency [FFGG, 2012].....	121
Figure 6.2: Localisation des stations de mesure des données météorologiques et hydrologiques.....	122
Figure 6.3: MNA 1 :20 000 disponible sur le portail Géoindex de la bibliothèque de l'Université Laval	123
Figure 6.4: La structure de l'état de la cellule	124
Figure 6.5: Transfert d'eau vers les voisins orientés en fonction de la différence de hauteur.....	127
Figure 6.6: Changement d'état des cellules de l'AC	128
Figure 6.7: Structure de l'application pour le processus de l'écoulement des eaux de surface.....	129
Figure 6.8: Algorithme de simulation de l'écoulement des eaux de surface par AC	132
Figure 6.9: Entrées, variables et sorties du système de simulation.....	134
Figure 6.10: Emplacements des centres des cellules de l'AC à ratio de voisinage nul (creux).....	135
Figure 6.11: Emplacements des centres des cellules de l'AC à ratio de voisinage égal à 1 (sommets).....	136
Figure 6.12: Variation du pas de temps en fonction du coefficient de Manning pour des précipitations de 1 mm.....	137
Figure 6.13: Variation du pas de temps en fonction du coefficient de Manning pour des précipitations de 30 mm.....	138
Figure 6.14: Variation du pas de temps en fonction des précipitations pour un coefficient de Manning de 0,05.....	139
Figure 6.15: Variation du pas de temps en fonction des précipitations pour un coefficient de Manning de 0,1.....	139
Figure 6.16: Hauteurs d'eau simulées après un évènement instantané de précipitation de 10 mm	142
Figure 6.17: Hauteurs d'eau simulées après un évènement instantané de précipitations de 10 mm	143
Figure 6.18: Altitudes (mètres) et étendues d'eau du BEREV	144
Figure 6.19: Hauteurs d'eau simulées au BEREV aux pas de temps 1, 5 et 10	145
Figure 6.20: Hauteur d'eau simulée à l'exutoire du sous-bassin 7A du BEREV	147
Figure 6.21: Hauteur d'eau simulée à l'exutoire du sous-bassin 5 du BEREV	147
Figure 6.22: Débits d'eau mesurés in situ à l'exutoire à la station 51004 du BEREV ...	148
Figure 6.23: Débits d'eau mesurés in situ à l'exutoire à la station 51003 du BEREV ...	149

*Je dédie cette thèse de doctorat à mes chers
parents Rachida Sammari et Mohamed
Salah Sammari qui m'ont transmis avec
brillance la soif de la connaissance et la
volonté d'y exceller.*

*Chahma et Bouk, que ce travail soit une
partie de mon infinie gratitude envers le
long chemin que vous avez parcouru pour
faire de moi une bonne citoyenne.*

*Maman, Papa, je suis fière que vous soyez
fiers de moi. Je ne cesserai jamais de
remercier le bon Dieu d'être votre fille!*

Remerciements

Je remercie tout d'abord mes directeurs de recherche le professeur Mir Abolfazl Mostafavi et le Professeur Bernard Moulin pour leur encadrement, leur disponibilité et leurs conseils.

Merci beaucoup Mir pour votre confiance, votre encadrement scientifique, votre gentillesse remarquable, et votre soutien moral et financier. Je suis fière de faire partie de votre équipe, et j'espère demeurer à la hauteur.

Un grand merci à vous Bernard pour votre disponibilité, vos réponses rapides et claires, vos conseils judicieux et aussi vos questions pointues qui m'ont toujours aidée à avancer. Je suis aussi reconnaissante à votre soutien moral et vos encouragements.

Je tiens à remercier tous les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer cette thèse :

- Un Merci spécial à Mr Marius Thériault professeur à l'École Supérieure d'Aménagement du Territoire et de Développement Régional pour avoir accepté de faire la préfecture de ma thèse.
- Je remercie sincèrement Madame Geneviève Pelletier Professeure au département de Génie Civil et des Eaux à l'université Laval. Geneviève m'a encouragée dès le début de ce travail et a toujours été disponible pour répondre à mes questions. Merci Geneviève.
- Je vous remercie beaucoup Madame Danielle Marceau Professeure au département de Génie Géomatique à l'Université de Calgary pour avoir accepté de juger mon travail et de faire le déplacement à Québec pour la soutenance.

Par ailleurs, ce travail ne pouvait pas avoir lieu sans l'opportunité que m'as donné mon cher pays la Tunisie pour effectuer des études au Canada. Je remercie le Ministère Tunisien des Études Supérieures et la Mission Universitaire de Tunisie à Montréal qui m'ont attribué une bourse d'étude. Bien que la période de trois ans ne fût pas suffisante, c'était une occasion pour moi de vivre l'expérience exceptionnelle étude-travail et de faire mes premiers pas dans un domaine qui me passionne : l'enseignement. Je remercie d'ailleurs Madame Jacynthe Pouliot la directrice du département des sciences géomatiques de l'Université Laval de m'avoir offert la chance de donner des cours. Merci beaucoup Jacynthe pour ta confiance et ton soutien.

Je remercie aussi le Conseil de Recherches en Sciences Naturelles et en Génie du Canada pour le soutien financier supplémentaire qu'il m'a attribué dans le cadre du projet « *Multi-scale and Multi-dimensional Spatial Dynamic Field and Process Representation and Simulation for Informed Decision Making* » du professeur Mir Abolfazl Mostafavi.

Je veux remercier infiniment Monsieur Sylvain Jutras Professeur au département des Sciences du Bois et de la Forêt pour m'avoir fourni les données de la Forêt Montmorency et aussi pour sa disponibilité et ses conseils. Merci beaucoup Sylvain.

Un grand merci au conseiller à la documentation au centre Géo Stat de l'Université Laval Monsieur Stéfano Biondo pour son aide et pour le privilège qu'il m'a donné d'accéder rapidement aux fichiers de données.

Merci beaucoup à mon supérieur au travail Monsieur Serge Jolicoeur pour la flexibilité qu'il m'a donné lors des dernières révisions de rédaction.

Un grand merci à tous mes collègues au Centre de Recherche en Géomatique de l'Université Laval, et au personnel du département des sciences géomatiques; c'était un plaisir de travailler et aussi de m'amuser avec vous. Un merci spécial à mon amie Moji, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables dans notre bureau du 0744. Bravo Moji d'avoir bien achevé ta thèse malgré tout !

Merci à la gang de Moncton : Marwa, Nawres, Wejden et Haythem qui ont supporté mes folies des derniers jours de rédaction. Je vous souhaite beaucoup de réussite mes amis.

Un merci spécial à mon cher époux Fouad pour avoir été là au bon moment. Merci pour tout *habibi* !

Finalement, merci à mes parents et à mes deux frères Walid et Marouen pour avoir soutenu avec beaucoup de patience le premier docteur de la famille. À vous de suivre chers frères ! Toi aussi Aminou.

Chapitre 1 : Introduction générale

1.1 Mise en contexte

1.1.1 Introduction

De nos jours, une bonne compréhension du monde et de ses changements ne peut avoir lieu sans l'avancement théorique, méthodologique et technique qui décode les dynamiques complexes des systèmes humains et environnementaux. Ces systèmes peuvent être représentés en tant que processus évoluant dans l'espace et dans le temps. Ils décrivent ainsi des situations naturelles pouvant aller d'un phénomène local comme l'écoulement des eaux, les marées ou l'érosion côtière jusqu'aux phénomènes les plus globaux tels que le réchauffement climatique. Pour une meilleure représentation de ces processus, il est nécessaire de considérer leurs caractéristiques spécifiques telles que la dimension du phénomène, son étendue spatiale, sa continuité, sa dynamique, sa fréquence dans le temps et ses différentes échelles spatiales et temporelles. La prise en compte de tous ces critères exige des outils appropriés permettant d'abord de mieux comprendre le comportement de tels processus et ensuite de simuler les différents scénarios possibles et d'en anticiper les conséquences, afin d'aider les gestionnaires à prendre des décisions éclairées. C'est ainsi que la représentation, la modélisation et la simulation des processus spatiotemporels constituent des outils d'aide à la décision dans un sens de gestion du territoire, de protection de l'environnement et de développement durable. Cette étude joue en outre à la fois le rôle de trait d'union entre les disciplines scientifiques, techniques et sociales et aussi d'élaboration de modèles opérationnels, ce qui permet d'analyser des scénarios alternatifs et d'aider à la prise de décision. La motivation de ce projet de doctorat est de représenter un processus spatiotemporel particulier qui est le processus d'écoulement surfacique des eaux dans une perspective d'aide à la décision notamment lors des événements d'inondation. Cette motivation s'intègre d'une manière plus générale dans le contexte de l'amélioration de la représentation des processus spatiotemporels.

1.1.2 Modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG

Les processus spatiotemporels en tant que systèmes complexes peuvent être expliqués selon les méthodes analytiques issues des modèles "positivistes" et du discours de la méthode de Descartes. Dans ces dernières, l'explication des phénomènes naturels complexes est proposée par des compositions successives d'éléments simples totalement décrits et prévisibles dont l'analyse permet d'accéder à des preuves objectives indépendantes de l'observateur et reliées par des relations de cause à effet. La

décomposition d'un processus spatiotemporel en primitives obéissant à des lois connues, sous la forme de règles ou d'équations mathématiques, simplifie la compréhension de ce dernier et aide à mieux le représenter. Les équations utilisées sont soit théoriques et basées sur des lois physiques, soit empiriques et basées sur des observations et des calculs statistiques, ou même semi empiriques. Par exemple, l'équation de continuité de Navier-Stokes est une équation théorique qui explique le processus d'écoulement d'un fluide [Beaume, 2008]. Un autre exemple est la représentation du processus de trafic routier par des règles de simulation de type automate cellulaire qui se basent sur des relations de cause à effet [Appert, 2003].

Un processus spatiotemporel peut aussi être perçu comme un ensemble composé d'un phénomène ayant lieu dans une étendue spatiale, d'éléments constituant cette étendue, d'interactions entre ces différents éléments, de leur évolution dans le temps et d'un observateur. Cet ensemble constitue un phénomène complexe qui obéit à la définition des systèmes complexes de Parrott [2002] « Un système complexe est un réseau de plusieurs composants dont le comportement agrégé est à la fois la source et le résultat de patrons multi-échelles, structuraux et dynamiques ne pouvant pas être déduits de la description du système qui ne couvre qu'une seule fenêtre de résolution. Cet extrait montre, que la notion d'échelle qui s'applique à l'espace comme au temps et est définie relativement à un patron et donc un point de vue. Par exemple, représenter la propagation d'un feu de forêt nécessite une échelle temporelle horaire alors que le mouvement de la fonte des glaciers se représente bien dans une échelle annuelle. Aussi, représenter un processus d'érosion se fait sur plusieurs kilomètres, alors que le trafic routier provoquant un accident est plutôt représenté sur quelques mètres. La question qui se pose alors « **comment déterminer les échelles spatiales et temporelles pour représenter un processus spatiotemporel et est-il possible de faire une représentation multi-échelle ?** »

En fait, on parle plus explicitement de résolutions spatiales et temporelles qui informent sur ces niveaux de détail. Chaque processus spatiotemporel est par la suite représenté selon une résolution spatiale et une résolution temporelle qui répondent à l'objectif de la représentation, toujours relativement à un observateur. Par exemple, pour un citoyen, la simulation des conditions météorologiques dans une résolution spatiale par ville et une résolution temporelle par jour serait satisfaisante pour la planification de ses activités touristiques. La question précédente peut être raffinée : **comment sont identifiées les résolutions spatiales et temporelles pour représenter un processus spatiotemporel et comment est-il possible de faire cette représentation à plusieurs résolutions?**

D'un autre côté, dans la littérature, l'étude des processus spatiotemporels se base sur deux grandes familles de représentation : la représentation par objets, et la représentation par champs. Le concept de la représentation par objet est utilisé dans les modèles d'interaction spatiale [Fotheringham et O'Kelly, 1989] et leurs applications telles que le comportement du trafic routier, de migration et d'interaction sociale [Goodchild et Glennon, 2007]

Les limites de la représentation par objet est qu'elle perçoit l'espace comme un domaine vide constitué d'objets spatiaux, ce qui n'est pas le cas pour la plupart des phénomènes complexes qui sont habituellement continus. Quant à la représentation par champs, elle permet de définir une valeur pour chaque champ décrivant le processus en chaque point de l'espace et à chaque instant tel que l'exemple d'un champ C défini par :

$$C_{(x, y, z, t)} = \text{fonction } (x, y, z, t) \quad (\text{Équation 1.1})$$

Où x, y et z sont les coordonnées d'un point de l'espace, t l'instant du temps et *fonction* est une loi ou une équation mathématique définissant le champ.

La représentation correspondante se fait en certains endroits (ou points de l'espace) à des instants connus. Nous citons les exemples des équations différentielles telles que les équations de Maxwell en électromagnétisme, les équations de flux de Darcy pour les écoulements souterrains et les équations de Navier-Stockes pour les fluides visqueux. Ces équations sont caractérisées par la complexité de leur résolution numérique. Plus particulièrement, leur résolution par des méthodes spécifiques d'éléments finis ou de différences finies se fait dans une structure de données Raster qui demeure compatible avec les fonctions des SIG. Aussi, selon Peuquet et al. [1998], la plupart des champs géographiques semblent être réductibles à des objets et des fonctions s'appliquant sur ces objets. À ce niveau, les questions qui se posent sont d'abord ***comment discrétiser les champs pour pouvoir les représenter et comment passer d'une fonction continue à des entités discrètes?*** Ensuite, vient la question concernant la discrétisation des étendues spatiales et temporelles. Plus spécifiquement, ***en quels endroits de l'espace et à quels instants peut-on et doit-on représenter le processus spatiotemporel ?*** La possibilité de représenter en certains points et à certains instants parmi d'autres est liée à la connaissance des champs associés aux processus et donc à la disponibilité des données qui les décrivent. La réussite de la représentation d'un processus spatiotemporel par champs résulte alors de la connaissance des lois et des règles qui le régissent, d'une part, et de la disponibilité des paramètres et données permettant de quantifier ou de qualifier ces champs, d'autre part. On parle dans ce contexte de la disponibilité des données d'entrée pour un modèle ou un outil de simulation. Ce contexte introduit donc le questionnement suivant : ***Comment déterminer la loi ou les règles qui représentent le mieux un processus spatiotemporel ? Quelle peut être l'influence de la disponibilité des données d'entrée d'un modèle d'un processus spatiotemporel sur les résultats produits par ce modèle?***

La géomatique, et plus particulièrement les systèmes d'information géographiques (SIG), sont devenus des outils incontournables de gestion et de développement du territoire puisqu'ils offrent des moyens efficaces pour la gestion des données, la visualisation, et pour produire des requêtes et des analyses [Burrough et McDonnell, 1998, Goodchild 1992, Maguire et al., 2005]. En particulier, les SIG offrent des outils

performants pour intégrer des informations hétérogènes et non-spatiales de différentes sources [Flowerdew 1991, Maguire et al., 2005]. Cependant, des problèmes sont encore rencontrés dans les systèmes d'information géographique actuels, notamment pour la prise en compte des aspects dynamiques et continus des processus spatiotemporels. Ceci est dû aux structures de stockage et de discrétisation des SIG qui ne sont pas toujours adaptées pour intégrer adéquatement le temps et les trois dimensions géographiques à représenter. En effet, les SIG ont été, pour la plupart, élaborés pour étudier des phénomènes soit statiques soit dynamiques mais selon une approche qui reste statique, même si une succession d'états peut être prise en compte selon un pas de temps donné [Robin et Gourmelon, 2005]. Une meilleure représentation des processus spatiotemporels basée notamment sur la modélisation de leur caractère dynamique spatial et temporel évoque une problématique particulière. Il s'agit de **l'intégration de méthodes de passage de l'analyse thématique des entités géographiques intervenant dans ces processus à la simulation de leurs interactions.**

Dès lors, le couplage des SIG avec des modèles (physiques, statistiques ou à base de règles) permet l'accès à la dynamique des processus. Un SIG devient alors source et réceptacle de ce que produit le modèle, en procurant non seulement les données de calibration mais aussi les données de validation [Pouliot, 1998]. Par exemple, avant les années 1980, les développements des SIG et des modèles, notamment en hydrologie, se sont déroulés en parallèle et pour des raisons principalement techniques, aucune passerelle n'était alors envisagée [Sui et Maggio, 1999]. Mais depuis quelques années, des interfaces entre SIG et modèles de simulation ont été développées afin de doter les SIG d'un accès à la dynamique des processus en temps réel. L'intégration des SIG avec les modèles spatiotemporels a fait l'objet de plusieurs recherches au cours des dernières décennies [Clarke et al., 2002]. En revanche, à la base, les approches de modélisation et de représentation des données dans les SIG demeurent fondamentalement différentes. D'une part, la modélisation est orientée vers une description plutôt détaillée des processus dynamiques avec un intérêt important pour la composante temporelle aux dépens de la composante spatiale. D'autre part, dans les SIG, l'état d'un processus est décrit dans un territoire représenté d'une manière statique et discrète, ce qui rend la composante spatiale fondamentale par rapport à une composante temporelle plutôt négligée [Pouliot, 1998].

Différents types d'intégrations (ou couplage) entre SIG et modèles ont alors été mis en place. On parle de couplage *total* d'un modèle avec un SIG lorsque les deux systèmes fonctionnent dans un même environnement informatique. Un couplage *partiel* permet l'intégration d'une interface ainsi qu'une base de données commune entre le SIG et le modèle. Un autre type de couplage *faible*, aussi appelé *import-export*, est basé sur le simple échange de fichiers entre les deux systèmes d'une manière interactive ou pas.

Plusieurs études ont permis en particulier d'évaluer la capacité des SIG à rendre compte des dynamiques spatiales suite à leur association avec des modèles. D'autres chercheurs se sont orientés vers des

tentatives d'association des SIG avec des méthodes de simulation telles que les automates cellulaires et les systèmes multi-agent (Bousquet, 1999). Les objectifs d'une telle association sont de profiter, d'une part, de l'outil de simulation qui permet de définir les interactions locales, le comportement et l'évolution temporelle des processus, et d'autre part, des possibilités qu'offre le SIG en matière d'analyse, de stockage et de visualisation des composantes géospatiales de ces processus.

À la base de ces éléments, l'exploration du potentiel de l'automate cellulaire pour simuler et représenter les processus dynamiques continus vient s'ajouter à la motivation de ce travail de recherche. La prise en compte du caractère irrégulier et hiérarchique dans la représentation de cette catégorie de processus est aussi un point important à considérer. Il s'agit de décortiquer ces processus en champs explicites selon des équations et des lois, de les décomposer en entités géolocalisées, de discrétiser leurs étendues spatiales et temporelles et aussi de comprendre leur comportement et leur évolution dans le temps à l'intérieur de ces discrétisations. Un cas d'application, qui permet de faire la simulation du processus spatiotemporel particulier de l'écoulement des eaux de surface, met en évidence les problématiques dégagées que nous présentons dans la section suivante.

1.2 Problématiques de recherche

Comme présenté précédemment, la représentation dans les SIG des processus spatiotemporels (tels que les processus hydrologiques) présente certaines limites. Plusieurs questionnements sont à étudier. Dans cette section, nous expliquons les problèmes traités dans cette recherche en les classant en problématique générale et en problématiques plus spécifiques.

1.2.1 Énoncé de la problématique générale

La représentation spatiotemporelle de la réalité dans un environnement numérique est faite dans les SIG où les problèmes rencontrés concernent généralement la simplification et la modélisation de différents éléments et où les structures de données sont encore inadéquates pour représenter les processus spatiotemporels dynamiques et continus. Cette simplification se fait essentiellement sur deux niveaux : d'abord dans la définition des lois qui régissent ces processus;et ,ensuite, dans la manière de discrétiser l'espace et le temps dans lesquels ils se déroulent.

D'une manière plus générale, les défis à relever résultent des difficultés de la simulation des processus spatiotemporels dynamiques et continus dans les SIG. En particulier, comment reproduire le plus fidèlement possible la réalité de ces processus? Plus explicitement, ces complexités proviennent principalement des manières de discrétiser l'espace et le temps, de modéliser la géométrie 3D, de prendre en compte différentes échelles de représentation, ainsi que de gérer la topologie, notamment en temps réel. Les difficultés liées à la simulation dans les SIG sont présentées dans la Figure 1.1.

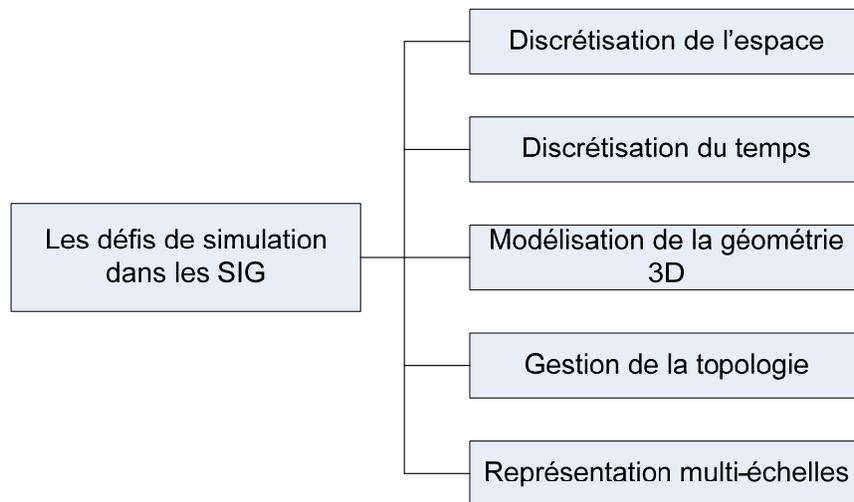


Figure 1.1 : Les défis de simulation dans les SIG

➤ **Classe de problèmes**

Plus particulièrement, la classe de problèmes qui nous intéresse englobe les processus de diffusion qui selon Benenson et Torrens [2004] font partie de l'ensemble des processus spatiotemporels. Plus spécifiquement, nous nous intéressons à l'écoulement d'un fluide dans un milieu géo-référencé tel que l'exemple de l'écoulement des eaux de surface (ou ruissellement) qui représente un exemple de phénomène de diffusion. Les processus de diffusion sont caractérisés par leur propagation spatiale à partir d'un centre et d'une manière continue. Nous nous intéressons plus particulièrement aux problématiques de la conception d'une application visant à simuler dans les SIG les processus spatiotemporels continus en général et l'écoulement des eaux dans un bassin versant, en particulier, modélisé par automate cellulaire. Ceci inclut aussi les problématiques de prise en compte de la complexité de ces processus, notamment dans leur emprise spatiale et leur déroulement dans le temps. Notre finalité est d'abord une meilleure compréhension du comportement du processus et ensuite une analyse complète dans un objectif d'aide à la décision. Ceci demeure néanmoins en lien avec l'observateur qui est le gestionnaire du territoire. C'est pour cette raison que nous mettons en évidence, d'une part, la partie simulation de notre application et, d'autre part, une approche explicite qui valorise la présence et l'influence de l'observateur. Dans ce contexte, nous avons relevé deux points de recherche importants : 1) le développement d'un outil de simulation par automate cellulaire; et 2) la nécessité d'une représentation à géométrie irrégulière et à différentes échelles. Cette dernière vient souligner la position et le rôle de l'observateur dans l'analyse et la compréhension des processus étudiés.

C'est dans ce sens que la problématique générale nous a conduits à identifier des problématiques plus spécifiques reliées à la représentation et à la simulation des processus spatiotemporels dynamiques et continus dans les SIG. L'exemple des processus hydrologiques est identifié comme contexte d'application de ce travail de recherche. Plus explicitement, d'importants éléments de recherche surgissent en essayant

de traiter les deux axes précédemment définis qui sont la simulation par automate cellulaire pour le volet temporel des processus étudiés et la représentation spatiale irrégulière et multi-échelle dans un contexte hydrologique. D'autres éléments se rapportent plus spécifiquement au contexte d'application et soulignent ainsi des interrogations sur la discrétisation de l'espace étudié du bassin versant, sur l'environnement naturel dans lequel évoluent les processus étudiés, ainsi que la disponibilité des données nécessaires pour la simulation.

1.2.2 Problèmes spécifiques

1.2.2.1 Problème lié à la discrétisation de l'espace

La discrétisation de l'espace dans les SIG est souvent liée aux deux modes de représentation des données qui y sont utilisés et qui se basent soit sur une structure de données de type Raster ou soit sur une structure de données de type Vecteur. Dans une structure de données Raster, l'espace est discrétisé en une tessellation régulière statique qui n'est pas toujours efficace pour représenter les variations d'un champ hétérogène [Hashemi et al., 2011]. Une structure de données vecteur comme les TIN (*Triangulated Irregular Network*) est par contre plus flexible pour représenter la complexité des champs réels. De ce fait, l'irrégularité de la structure à développer est un critère pertinent. En effet, dans le domaine de la géosimulation, la plupart des systèmes qui utilisent les automates cellulaires sont basés sur des structures spatiales (ou tessellations) régulières parce qu'elles permettent entre autres de faciliter les calculs [Yeh, 2005]. Néanmoins, certains travaux suggèrent que la tessellation affecte directement la simulation [O'Sullivan, 2002; Moreno et Marceau 2008], ce qui fait qu'une tessellation régulière n'est pas nécessairement une base convenable pour la modélisation d'un phénomène spatiotemporel continu et dynamique dont les variabilités spatiales et temporelles sont complexes. En effet, la forme régulière des cellules ne s'adapte pas aux objets géographiques de l'environnement modélisé [Torrens, 2000] et engendre des problèmes de raisonnement spatial; ce qui affecte la qualité de la simulation et des résultats qui en sont tirés [Yeh, 2005]. Par ailleurs, des tessellations irrégulières ont déjà été employées comme base de modélisation pour des travaux de nature géographique basés sur des automates cellulaires [Semboloni, 2000; Benenson et al., 2002; Lor et al., 2000; Shi et al., 2000; Moreno et al., 2008].

En outre, le caractère spatial des processus spatiotemporels concerne les différents paramètres qui décrivent le processus et qui jouent un rôle dans sa représentation. Ainsi, ils devraient être tous considérés dans le processus de discrétisation spatiale; ce qui engendre un problème dans leur intégration, notamment selon le rôle qu'ils jouent dans le comportement et l'évolution du processus.

1.2.2.2 Problème lié à la représentation multi-échelle dans les SIG

L'origine de la problématique de la représentation multi-échelle est fortement liée à la notion d'observation qui dépend de l'observateur et de ses objectifs. Ce dernier peut avoir pour but soit d'analyser un processus et de le comprendre en détail, soit de prendre des décisions afin de gérer des situations particulières. Dans chacun de ces cas, un niveau d'échelle particulier est plus adéquat que les autres. Par exemple, l'analyse et la compréhension d'un processus d'érosion côtière inclut d'autres processus sous-jacents qui sont les courants marins, la dérive littorale et les vents. Ceci nécessite une étude à une échelle globale. Par contre, la prise de décision d'une solution de protection de la côte contre l'érosion prend en considération d'autres processus plus locaux tels que les contraintes anthropiques construites sur cette côte. Il devient nécessaire dans ce cas de considérer une échelle spatiale plus détaillée afin de mieux gérer le problème d'érosion.

Par ailleurs, pour suivre l'évolution des processus dynamiques, il est souvent nécessaire d'observer et de représenter les différents états du système sur plusieurs niveaux d'échelles spatiales. En effet, dans certains cas, plusieurs interactions locales ne sont pas détectées dans le déroulement global du phénomène et, dans d'autres cas, la focalisation sur les détails fins d'un processus ne permet pas une compréhension à une échelle spatiale plus petite. Dès lors, la représentation du processus devient problématique si elle se fait à un seul niveau d'échelle. Ce point devient évident dans un contexte hydrologique. Citons par exemple le cas de l'état d'une zone de pédologie différente du reste du territoire observé. L'état de cette zone dans un cas d'inondation doit être surveillé et étudié localement; puisqu'il peut être indépendant et ne suit pas le reste du domaine. Aussi, souvent, la présence de crues locales n'informe pas nécessairement sur l'état de la zone étudiée à d'autres échelles moyennes ou globales. Dès lors, la représentation multi-échelle des phénomènes naturels permettrait de focaliser l'étude des processus selon les différentes échelles spatiales où ils se déroulent, ce qui faciliterait la concentration sur une région déterminée de l'espace en fonction du processus étudié. C'est dans ce sens que la représentation multi-échelle est devenue l'un des sujets très importants dans les sciences d'information géographique [Li, 2007]. Plus particulièrement, on parle d'échelle de bassin-versant pour les processus hydrologiques, ces bassins sont aussi souvent découpés en plusieurs sous-bassins selon le réseau hydrographique existant.

La problématique que nous associons à la notion des échelles spatiales des processus étudiés est liée à la capacité des SIG à prendre en compte différentes échelles spatiales au sein d'une même représentation. Dans un sens de hiérarchie spatiale, nous notons l'absence dans les SIG d'une structure de données flexible à géométrie irrégulière, qui permettrait d'opérer dans des échelles différentes, offrant la possibilité de focaliser la représentation sur les interactions à grandes échelles, d'une part, et d'obtenir le résultat d'agrégation de ces interactions à un niveau global, d'autre part.

1.2.2.3 Problème lié à la représentation de la dynamique des processus spatiotemporels

L'une des problématiques spécifiques que nous prenons en compte dans la représentation d'un processus spatiotemporel est la dynamique du processus. En effet, par définition, les processus spatiotemporels sont dynamiques : leur évolution peut se manifester autant dans leurs attributs que dans les géométries et les structures qui les décrivent. Plus explicitement, le comportement dynamique des phénomènes spatiotemporels peut être conçu comme le changement de leur géométrie, de leur localisation et des attributs qui les caractérisent dans le temps et dans l'espace. Cet aspect multidimensionnel est aussi présent dans les SIG où les informations géographiques sont définies par trois types de données : 1) des données thématiques décrivant un objet géographique; 2) des données spatiales exprimant la géométrie, la localisation et les relations topologiques; et 3) des données temporelles exprimant la dynamique et l'évolution des deux dimensions (thématique et spatiale).

La compréhension et la représentation de cette dynamique est aussi étroitement liée à l'approche de modélisation mise en place afin de représenter l'évolution temporelle du processus. Nous parlons dans ce cas de la simulation des processus spatiotemporels qui demeure difficilement prise en compte dans les SIG traditionnels. Elle est généralement faite sur la base de résolution d'équations différentielles avec des méthodes numériques, ou alors en définissant des règles de transition expliquant l'évolution temporelle de l'état du processus.

➤ **Motivation de recherche**

L'écoulement des eaux de surface est un exemple d'application typique de la classe des problèmes « *écoulement d'un fluide dans un milieu géoréférencé* ». Nous nous intéressons à ce domaine d'application qui a pour but général l'analyse et l'aide à la décision en s'appuyant sur la simulation de l'écoulement des eaux dans un bassin versant. Pour la problématique de recherche relative à l'outil de simulation, nous proposons une solution basée sur l'automate cellulaire qui est un outil de simulation pouvant répondre aux défis posés précédemment, notamment ceux liés à la représentation par grille irrégulière et à la modélisation multi-échelle dans les SIG.

L'une des motivations de l'utilisation des automates cellulaires (AC) est qu'ils sont compatibles avec les bases de données spatiales gérées par les SIG. Ils sont connus pour leurs avantages dans la modélisation des processus spatiaux car ils traitent l'espace d'une manière explicite et à un niveau de détail qui peut être considérable. En outre, les AC sont dynamiques ce qui permet de représenter les processus spatiaux d'une façon directe et offre une solution potentielle de l'incompatibilité actuelle entre les modèles dynamiques et les SIG. En effet, les AC se combinent facilement avec les informations spatiales stockées dans les SIG [Shi et Pang, 2000; Itami et Clark, 1992]. D'après Moreno et Marceau [2007], l'approche des automates cellulaires est dynamique et flexible et offre une simplicité, une représentation explicite du temps et de

l'espace et une excellente compatibilité avec les SIG [White et Engelen, 2000]. Par ailleurs, les automates cellulaires offrent des avantages uniques pour la modélisation géographique et environnementale car ils sont capables de représenter les interactions spatiales parmi des sous-systèmes différents du monde réel. Ils génèrent des prédictions de modèles spatiaux complexes et globaux à partir de règles locales simples. Ainsi, sur la base de la problématique générale de ce travail de recherche qui concerne les structures de données dans les SIG, nous proposons la solution suivante :

- **Solution envisagée : *Il est possible de développer une structure de données à tessellation irrégulière et hiérarchique qui supporterait une simulation par automate cellulaire et permettrait la représentation des processus spatiotemporels dynamiques et continus dans les SIG tel que l'exemple de l'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant.***

Nous illustrons dans la Figure 1.2 la solution que nous proposons dans laquelle la simulation est faite par un automate cellulaire dont la structure géométrique est développée dans les SIG et les règles de transition sont liées à une application en hydrologie.

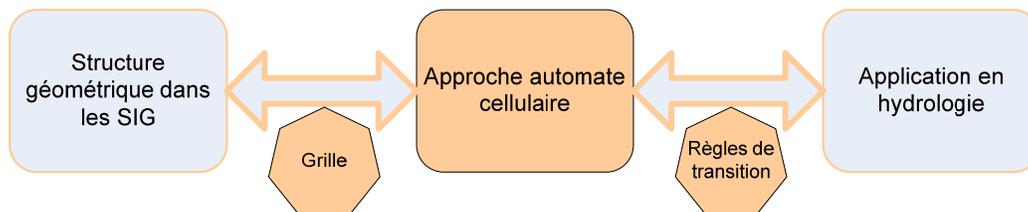


Figure 1.2: Illustration de la solution envisagée

1.3 Objectifs de la thèse

Avant d'énoncer les objectifs de cette thèse, nous rappelons que deux motivations d'ordre général sont à l'origine de notre recherche. D'abord, un avancement dans les connaissances de la représentation des processus spatiotemporels, un domaine où les apports en représentation par grille hiérarchique et irrégulière demeure une innovation importante en géomatique. Ensuite, le développement d'un prototype qui permet d'intégrer l'outil de simulation par automate cellulaire avec une structure de données développée dans un SIG de manière à profiter des fonctionnalités de ce dernier, notamment en matière d'analyse spatiale. Nous voulons contribuer à l'amélioration des structures de données dans les systèmes d'information géographique. Et plus généralement, nous envisageons une meilleure compréhension des phénomènes spatiotemporels dynamiques et continus dans une perspective d'aide à la décision. Le domaine hydrologique a été quant à lui choisi comme un cas d'illustration, puisque les processus y sont spatiotemporels, continus et dynamiques.

1.3.1 Objectif général

À cause des limitations des SIG actuels pour représenter les processus spatiotemporels, l'objectif général de ce travail de recherche consiste à proposer des améliorations aux capacités des SIG afin de représenter de tels processus. Nous proposons une structure de données capable de prendre en compte les caractéristiques pertinentes à la représentation de ces processus, parmi lesquelles nous nous intéressons plus particulièrement à la discrétisation de l'espace et la représentation spatiale multi-échelle.

Pour atteindre cet objectif principal, nous identifions plusieurs sous-objectifs spécifiques.

1.3.2 Objectifs spécifiques

En lien avec les problématiques spécifiques dégagées dans la section précédente et la solution envisagée, les objectifs spécifiques que nous nous fixons sont :

- *Développer une structure de données SIG irrégulière pour la discrétisation de l'espace étudié*

Nous nous proposons de sélectionner et de développer une structure de données dans les SIG qui soit de géométrie irrégulière. Cette structure doit permettre de discrétiser l'espace en répondant d'une manière générale aux caractéristiques des processus spatiotemporels, et plus particulièrement, en tenant compte de la variabilité irrégulière des phénomènes spatiaux dynamiques et continus. À des fins d'illustration, la structure développée sera utilisée pour discrétiser un bassin versant de manière à étudier l'écoulement des eaux de surface.

- *Développer une structure de données SIG multi-échelle : Hiérarchiser la structure du premier objectif*

Un deuxième objectif est de rendre hiérarchique la structure irrégulière proposée précédemment afin d'obtenir une représentation multi-échelle des phénomènes spatiaux dynamiques et continus. La même structure permettra alors d'étudier à l'échelle locale, des niveaux de détails plus fins du processus ou de faire une agrégation pour s'intéresser au phénomène global résultant des interactions locales.

- *Développer une méthode de simulation par automate cellulaire basée sur une tessellation irrégulière et hiérarchique*

Cet objectif vise à concevoir et à construire un automate cellulaire qui soit supporté par la structure de données développée. Cet automate, de type hiérarchique et de géométrie irrégulière, opérera selon des règles de transition qui traduisent les lois régissant les processus spatiotemporels en général. Plus

particulièrement des règles de transition qui sont à la base des processus hydrologiques seront établies afin de simuler l'écoulement des eaux de surface.

- *Valider la simulation par AC dans un contexte de processus de diffusion tel que l'écoulement des eaux de surface*

Le dernier objectif concerne la validation de la structure proposée et développée dans un contexte d'application. La partie validation permet, d'une part, de tester l'apport d'une telle structure dans les SIG et d'autre part, de représenter et simuler plus particulièrement le comportement du processus d'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant.

1.4 Méthodologie de la recherche

Nous présentons dans cette section les différentes étapes proposées pour répondre aux objectifs de ce travail de recherche.

Phase 1 : Inventaire et analyse de l'existant

La première phase est une revue de littérature qui permet d'approfondir le sujet des processus spatiotemporels et leur représentation dans les SIG et d'explorer les domaines d'automate cellulaire et de la modélisation hydrologique. Un état de l'art est également établi à propos du projet étudié, soit l'utilisation des automates cellulaires pour la modélisation hydrologique, ce qui permet d'identifier les cas d'utilisation déjà existants, les procédures mises en place, les limitations et les problèmes rencontrés et, par la suite, les solutions apportées.

Phase 2 : Conception du système

Cette phase est dédiée à la mise en place de procédures permettant d'atteindre les objectifs spécifiques précédemment définis, à savoir la conception d'une structure de données à tessellation irrégulière sur laquelle repose un automate cellulaire hiérarchique dont le fonctionnement tient compte des spécificités et des caractéristiques des processus spatiotemporels.

- Dans une première étape, nous définissons la structure de données proposée en identifiant notamment ses caractéristiques géométriques. Il s'agit aussi de proposer une manière de discrétiser l'espace pour chaque niveau hiérarchique identifié. Cette discrétisation dépend essentiellement des données utilisées (MNT, MNA, cartes géographiques, images satellitaires, données de précipitations, de température, etc.) ainsi que des échelles spatiales et temporelles désirées.

- Par la suite, il s'agit de définir les caractéristiques de l'automate cellulaire correspondant au contexte d'application. À part la grille de la structure de l'automate qui définit la géométrie des cellules, nous définissons le type de voisinage à considérer ainsi que les règles de transition.

Le type de voisinage considéré est un facteur important dans l'obtention de l'état d'une cellule de l'automate à un instant donné. Nous planifions dans notre cas d'utiliser un voisinage de contiguïté qui prend en compte un maximum de cellules voisines à une cellule de référence. Ceci dépend entre autre de la géométrie de la grille sur laquelle se base l'automate cellulaire et donc de la structure de données développée. Ainsi, notre but est de maximiser le nombre de voisins, d'une part, pour récupérer le maximum de paramètres utiles au calcul d'écoulement entre les cellules et, d'autre part, pour pallier les problèmes directionnels connus dans certains types de grilles utilisées dans certains travaux cités dans la littérature.

Les règles de transition concernent le changement d'état des cellules dans le temps et en fonction du voisinage. La règle hydrologique principale de notre cas d'illustration fait que c'est l'angle de la pente du terrain qui est à l'origine de la transition entre les cellules de l'automate. Nous référons ici au modèle géographique qui est devenu une notion standard dans bon nombre d'AC et qui consiste en une règle de transition de la cellule qui est fonction de sa configuration de voisinage où les cellules contiguës exercent un poids sur la cellule centrale [Lajoie et Hagen-Zanker, 2007]. Ceci nous permet de définir la direction de l'écoulement de chaque cellule vers ses voisines et par la suite, de déterminer la direction globale de l'écoulement dans le bassin versant et les quantités d'eau échangées.

L'approche d'intégration de l'automate cellulaire en tant qu'outil de simulation est faite selon un couplage avec un SIG afin de profiter de la robustesse de l'outil de simulation, d'une part, et de mieux gérer l'analyse spatiale et la présentation des résultats de simulation dans le SIG, d'autre part.

Phase 3 : Réalisation

Cette phase est dédiée à élaborer les différents algorithmes pour mettre en place la structure de données. Il s'agit de concevoir et d'implémenter un prototype d'une application de simulation qui utilise les structures de données mises en place. Ainsi, la solution envisagée est de développer notre structure de données dans la librairie CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*) et par la suite de l'intégrer dans un logiciel de SIG.

Les outils (logiciels et langages) qui sont utilisés sont aussi déterminés lors de cette phase. Nous choisissons CGAL une librairie spécialisée dans la géométrie algorithmique.

CGAL est une librairie *open source* dans laquelle il est possible de trouver des fonctions qui seront utiles. En effet, elle vise à rassembler le travail de plusieurs groupes de recherche concernant des librairies de fonctions géométriques. Les créateurs de la librairie cherchent à promouvoir la recherche en géométrie algorithmique et à traduire les résultats en programmes utiles, fiables et efficaces pour des applications

industrielles et universitaires [Fogel et Teillaud, 2006]. La librairie CGAL, intégrée dans plusieurs systèmes et projets de recherche universitaires et commerciaux, permet de disposer de fonctions géométriques complètes, robustes et performantes dans un langage de programmation orienté-objet, le C++. La version gratuite de CGAL disponible pour la recherche universitaire offre du support par courriel et ne restreint pas l'accès au code source et aux algorithmes géométriques sur lesquels il est possible de nous baser en tant que point de départ. Le but de l'utilisation de la librairie CGAL est d'avoir une base pour la triangulation 2D lors de la discrétisation de l'espace du bassin versant.

Phase 4 : Validation

Lors de la phase de validation, une application du modèle réalisé (automate cellulaire supporté par une structure SIG à grille irrégulière et hiérarchique) avec des données réelles, ainsi qu'une comparaison avec des données in situ et d'autres modèles sont prévues. Ce que nous visons à valider c'est d'abord le fonctionnement de la structure irrégulière et hiérarchique, ensuite le résultat de la simulation issue de l'automate cellulaire et supporté par cette structure. Dans le cas d'application, cela concerne le débit ou la quantité d'eau échangée à l'exutoire d'un bassin versant.

Par exemple, pour la ville de Québec, la rivière Saint-Charles fait l'objet d'une observation accrue relativement à la quantité et la qualité de l'eau, en raison de son importance pour l'approvisionnement en eau potable pour la région de Québec. C'est dans ce sens que la modélisation hydrologique de son bassin versant aide dans la prise de décision. Aussi, plusieurs modèles ont été mis en place parmi lesquels nous citons SWAT « Soil and Water Assessment Tool » et GR4. Notre choix du modèle de validation dépend essentiellement de la disponibilité des données et de l'accessibilité aux modèles existants. Le but de la validation envisagée, soit grâce à des mesures in situ ou à des résultats produits par d'autres modèles, est essentiellement de qualifier l'intégration de l'outil de simulation par automate cellulaire au sein d'un système d'information géographique et de vérifier à quel point la simulation faite pour l'écoulement des eaux de surface offre un apport dans la gestion de l'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant. Nous rappelons que ce que nous envisageons avec ce projet de recherche est d'apporter une variante différente pour représenter et quantifier l'écoulement des eaux de surface dans le but d'aider à la prise de décision.

Nous résumons les phases de la méthodologie de recherche dans le diagramme d'activités de la Figure 1.3.

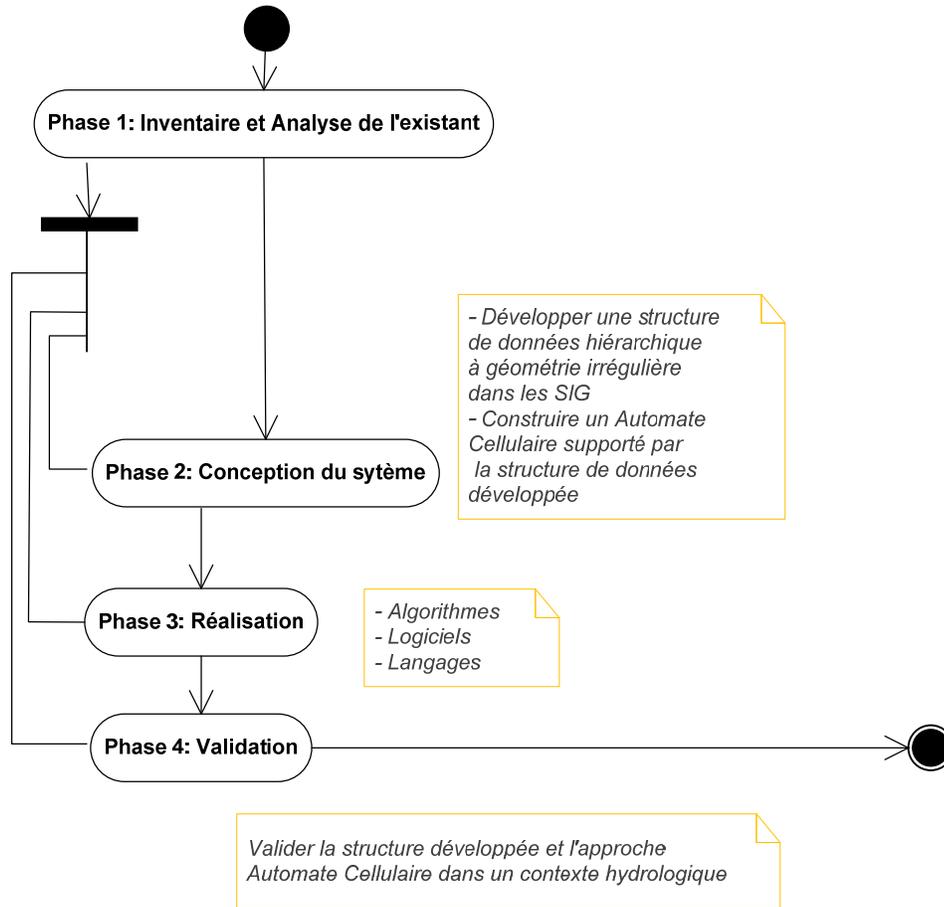


Figure 1.3: Méthodologie de la recherche

1.5 Contenu de la thèse

Dans cette thèse de doctorat, nous définissons le cadre théorique, conceptuel et applicatif d'un travail de recherche qui vise à améliorer les méthodes de compréhension, de représentation et de simulation des processus dynamiques continus. Nous concevons un automate cellulaire basé sur une structure géométrique irrégulière et hiérarchique. Cet AC devrait être en mesure de répondre aux exigences des processus d'évolution continue notamment dans le domaine hydrologique. Cette thèse est constituée de sept chapitres dont les deux premiers forment une introduction générale, une mise en contexte de la classe de problème abordée dans ce travail de recherche, un état de l'art sur la représentation des processus spatiotemporels et la modélisation de l'écoulement des eaux de surface. Les chapitres 3, 4 et 5 présentent les contributions de recherche correspondant aux objectifs cités dans les sections précédentes alors que le chapitre 6 est dédié à la validation expérimentale. Un septième chapitre résume les contributions de la thèse par rapport aux approches existantes et les conclusions générales. Le contenu de cette thèse est le suivant :

- ❖ Le chapitre 2 est intitulé « modélisation des processus spatiotemporels ». Nous étudions la représentation des connaissances et les ontologies en géomatique, la modélisation spatiotemporelle et la représentation des processus spatiotemporels dans les SIG. Nous présentons aussi la géosimulation par automate cellulaire, puis nous abordons le domaine d'application.
- ❖ Les chapitres 3, 4 et 5 sont structurés de la même manière : ils présentent chacun une première partie qui constitue un état de l'art sur un sujet de la thèse, suivi d'une réflexion sur les problèmes posés et une présentation de la solution proposée :
 - Dans le chapitre 3, nous présentons une solution pour le découpage de l'espace selon une tessellation irrégulière dans un objectif de simulation par automate cellulaire. Nous commençons par analyser les limites des tessellations utilisées en géosimulation. Nous présentons par la suite la structure de données de Voronoï, ses contraintes et son adaptabilité au domaine d'application. Finalement, le lien avec l'automate cellulaire est basé sur la structure développée pour simuler le processus d'écoulement des eaux de surface.
 - Le cœur du chapitre 4 présente notre contribution pour représenter les processus spatiotemporels dans différentes échelles spatiales. La solution proposée adopte une approche hiérarchique de représentation basée sur un Voronoï hiérarchique avec explication des défis posés pour l'agrégation multi-échelles. La première partie du chapitre 4 présente un état de l'art des représentations hiérarchiques en géosimulation. La dernière partie valide la pertinence de la structure irrégulière et hiérarchique pour la simulation des processus spatiotemporels.
 - Le chapitre 5 présente un automate cellulaire et nous expliquons le fonctionnement et les caractéristiques du système de simulation des processus spatiotemporels. Nous présentons aussi en détail le cœur de l'automate cellulaire utilisé, à savoir les règles de transition de la simulation du processus d'écoulement des eaux de surface.
- ❖ Le chapitre 6 est dédié à l'expérimentation de la solution proposée dans un contexte de processus de diffusion tel que l'écoulement des eaux de surface. Nous y présentons la zone d'étude et les données utilisées ainsi que les résultats de la simulation et une validation avec des données de débits mesurés in situ.
- ❖ Un récapitulatif des contributions de la thèse ainsi que des conclusions générales sont présentés dans le chapitre 7 qui contient aussi une discussion et les perspectives de recherche.

Chapitre 2 : Revue de littérature sur la modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG

2.1. Introduction

La géomatique est une discipline de recherche multidisciplinaire dont les orientations principales s'intéressent aux données géographiques. En effet, selon Bergeron [1992] elle est définie comme « une discipline ayant pour objet la gestion des données à référence spatiale par l'intégration des sciences et des technologies reliées à leur acquisition, leur stockage, leur traitement et leur diffusion ». En outre, les domaines d'application de la géomatique sont nombreux; on en cite l'aménagement et la planification territoriale, l'agriculture, la météorologie et les services de mobilité. C'est ce qui explique que les fondements théoriques qui sont à la base des traitements et applications émergeant du domaine de la géomatique puisent des connaissances dans les sciences pures et appliquées telles que les mathématiques, la géophysique, les sciences sociales et naturelles, le traitement des données et l'informatique.

Ainsi, la multidisciplinarité des projets de recherche en géomatique résulte de la nature de ce domaine où le traitement et la manipulation des données géographiques demeurent étroitement liés aux connaissances du domaine d'application, d'une part, et aux technologies permettant l'acquisition, la visualisation, le traitement et le stockage des données, d'autre part. Pour répondre à cette caractéristique du domaine de la géomatique, nous nous proposons, dans ce chapitre, de présenter les fondements théoriques, les méthodes et outils de traitement de données ainsi que le domaine d'application de notre projet de recherche.

Une première section est dédiée aux processus spatiotemporels : leurs ontologies et leurs caractéristiques. Par la suite, nous nous intéressons à la modélisation spatiotemporelle des processus et à leur représentation dans les SIG. Nous étudions les couplages entre les modèles et les SIG et nous donnons l'exemple spécifique du domaine d'application qui est la modélisation de l'écoulement des eaux de surface. Finalement, dans la dernière section, nous abordons la géosimulation par automate cellulaire.

2.2 Les processus spatiotemporels

Afin de présenter les différents aspects de la modélisation des processus spatiotemporels cette section présente leurs principales caractéristiques. Néanmoins, il convient d'abord de situer leurs ontologies dans le domaine général de la représentation des connaissances.

2.2.1 Ontologies des processus spatiotemporels

C'est le partage des connaissances qui a toujours été à l'origine de leur représentation sémantique afin de permettre à une communauté d'utilisateurs relativement à un domaine ou une activité de les comprendre. Une description du monde réel intégrant à la fois les dimensions spatiales et temporelles et permettant de modéliser et de partager des informations géographiques peut être définie comme une ontologie spatiotemporelle. C'est dans ce sens que nous avons cherché dans la littérature les notions relatives aux ontologies spatiotemporelles afin d'introduire les fondements ontologiques liés aux processus spatiotemporels que nous résumons dans la section suivante.

Selon Cullot et al., [2003], les applications géographiques manient des données spatiales et souvent aussi temporelles. Dans une ontologie spatiotemporelle, les concepts sont d'abord présentés spatialement; ensuite, une composante temporelle vient compléter la modélisation de l'information géographique. Cependant, les entités évoluent dans le temps et peuvent être considérées dans différents contextes, ce qui offre la possibilité de différentes représentations. La pertinence des ontologies géographiques consiste à intégrer les trois composantes : espace, temps et multi-représentation. En outre, la modélisation de l'évolution d'un phénomène à travers ses processus ainsi que ses déformations permettent de le classer comme concept spatiotemporel. De plus, la présence et la prise en compte d'un cycle de vie des objets dans une modélisation géographique fait partie d'une ontologie spatiotemporelle. On s'intéresse ainsi à plusieurs formes d'évolution touchant ces objets telles que la création, la suppression, la suspension de validité et la réactivation. Dans la littérature, MADS [Spaccapietra et al., 1999] est cité comme un exemple de modèle conceptuel d'une ontologie spatiotemporelle qui permet de conserver l'évolution des valeurs des attributs grâce à l'utilisation d'un type abstrait de données temporelles. Il offre aussi la possibilité d'indiquer le point de vue et la résolution des objets, des attributs et des relations du modèle. Quant à la notion de résolution, elle permet d'identifier un seuil au-delà duquel un objet peut être considéré comme non pertinent. Les types d'objet et de relation dans MADS peuvent aussi être organisés en hiérarchies de généralisation ou spécialisation. C'est dans ce sens qu'est établi un lien avec les notions de pertinence, de résolution et de représentation multiple qui sera étudié dans le chapitre 4 où une approche hiérarchique de représentation des processus spatiotemporels est présentée.

2.2.2 Caractéristiques des processus spatiotemporels

D'après Mitsova et Mitas [1998], la modélisation des processus dépend de leurs caractéristiques comme par exemple le domaine du processus, le type de distribution et des interactions spatiales, le type du processus sous-jacent (physique ou social) ainsi que l'échelle du phénomène modélisé. Nous présentons dans le Tableau 2.1 les types de processus et des exemples pour chacune des modélisations cités par Mitsova [1998].

Tableau 2.1: Exemples et types de processus spatiotemporels selon les critères de modélisation [Mitsova et Mitas, 1998]

Modélisation basée sur	Types de processus	Exemples
Le domaine d'application	Les processus naturels	La circulation atmosphérique, l'hydrologie, la géologie, la biologie des écosystèmes
	Les processus socio-économiques	Le transport, la population, l'urbanisme, la production manufacturière, l'agriculture, la distribution, les services, les interactions entre les processus socioéconomiques
Le type de distribution spatiale	Unités homogènes ou moyennées dans l'espace	Les bassins-versants
	Réseaux	Réseaux routiers, réseaux électriques, réseaux sociaux, etc.
	Points représentant les individus et les agents	
	Combinaisons de champs, points et réseaux	
Les interactions spatiales	Pas d'interaction spatiale	Comportement dépendant de la localisation
	Courte portée	Interaction de voisinage proche
	Longue portée	Interaction plus large
Le type de processus sous-jacent physique ou social	Les flux (sur une surface, par le biais du réseau ou dans un espace 3D)	Diffusion, dispersion, advection, convection, radiation et transfert de chaleur
	La prolifération ou la désintégration	Procédés chimiques, décroissance radioactive
	Dynamique des populations	Naissance, mort, concurrence, prédateur, proie, épidémies
	Agents intelligents	Systèmes d'entités indépendantes qui agissent entre elles et avec l'environnement avec un certain degré d'autonomie de prise de décision.
L'extension spatiale des phénomènes modélisés	Local, régional, global, multi-échelles ou imbriqués	

Si on adopte une optique géomatique, le choix du modèle de SIG est en grande partie lié à la représentation et à l'intégration de l'espace dans le modèle, ce qui implique de considérer la métrique, la topologie, la morphologie et les interactions des objets qui constituent l'espace. Évidemment, l'utilisation de

l'outil mathématique qui va servir de base aux modèles est prédéterminée par le type de processus à modéliser comme décrit dans le Tableau 2.1.

Pour cela, deux facteurs importants doivent être pris en compte : quel est le mode de représentation de l'espace (discret ou continu) et quelles sont les échelles prises en compte (micro, méso ou macro)?

- Le mode de représentation de l'espace correspond au critère '*type de distribution spatiale*' (Tableau 2.1) et indique si le processus étudié et les données sont homogènes et moyennées dans l'espace, comme par exemple les données météorologiques (température de l'air, pression atmosphérique) ou océanographiques (salinité, température de l'eau) ou hydrologique (précipitation, type de sol), ou si elles peuvent être représentées par un réseau, ou alors par des points qui peuvent représenter des individus ou des agents.
- En outre, un processus spatiotemporel dynamique et continu occupe une portion d'espace-temps qui définit sa durée et son extension spatiale et qui, par la suite, se cadre dans un environnement à la fois temporel et spatial tridimensionnel. Cependant, certains processus évoluent dans un espace bidimensionnel. Pour ces processus la troisième dimension de l'espace n'apporte pas d'information supplémentaire pour leur compréhension où alors il est pertinent de les représenter en 2D comme, par exemple, le cas de la propagation d'une épidémie dans un champ agricole ou bien l'extension de la superficie urbaine dans une ville. Dans d'autres cas, une représentation réelle des phénomènes dynamiques tridimensionnels permet aux utilisateurs et aux décideurs de mieux comprendre, analyser et prédire leurs comportements [Goodchild, 2005; Rivington et al., 2007; Fedra, 2006]. Par exemple, la simulation des écoulements souterrains 3D peut donner des éléments de réponse adéquats sur plusieurs questions comme l'origine des eaux ou leur destination ou bien la propagation d'un contaminant. Ces écoulements ont lieu dans un espace 3D continu composé d'objets géologiques comme les couches et les failles. Un autre exemple est le cas des couches océaniques qui représentent la structure verticale de la température, de la salinité et de la densité et dont la représentation dans un espace 3D permet aux océanographes d'étudier leurs variations, facteurs déterminants pour comprendre et simuler la circulation océanique. De ce fait, la dimension spatiale est parmi les caractéristiques pertinentes dans la représentation des processus spatiotemporels.
- La notion d'échelle exprime la variabilité spatiale et temporelle du processus. L'échelle temporelle à laquelle est analysé un processus peut, selon les cas, amener à le considérer comme un processus continu (cas de l'érosion côtière analysée à un pas de temps journalier) ou discret (cas de la même érosion côtière analysée à l'échelle de temps de la décennie). L'échelle spatiale correspond au critère '*extension spatiale des phénomènes modélisés*' du Tableau 2.1 et qui peuvent être locaux (inondations à l'amont d'une rivière, érosion côtière), régionaux (fonte des glaciers aux pôles, précipitations sur une ville, érosion côtière) ou globaux (réchauffement climatique au niveau planétaire, marées). Or, les

processus qui se déroulent sur des échelles différentes sont difficilement modélisables avec le même outil mathématique [Decoupigny, 2006]. Ainsi, si une modélisation doit prendre en compte deux processus sur des échelles différentes, cela nécessite d'intégrer des variables qui n'auront pas le même niveau d'agrégation. Les phénomènes à petites échelles sont généralement formalisés par des modèles agrégés; quant à ceux sur une grande échelle, ils sont désagrégés; dès lors les outils mathématiques utilisés sont souvent fondamentalement différents.

Pour les surfaces en trois dimensions (3D) représentées par les modèles numériques d'élévation (MNE), deux types de représentation multi-échelle sont différenciés [Li et al., 2005] : métrique et visuel. Le premier est similaire à une cartographie soulignant la qualité métrique et donc utilisé pour les mesures. La représentation multi-échelle métrique des modèles numériques d'élévation requiert de dériver automatiquement les données du MNE à n'importe quelle échelle plus petite à partir du MNE d'une échelle plus grande, qui est mise à jour continuellement. Il s'agit alors d'une généralisation qui est appliquée uniformément sur tout le domaine couvert par les données du MNE, ce qui fait que tous les points de données ont une précision uniforme. L'autre type est uniquement utilisé pour une impression visuelle (par exemple pour les jeux) et est appelé représentation multi-échelle visuelle où dans la même représentation, l'échelle n'est pas la même pour tout le domaine représenté, elle est plutôt fonction de la distance d'observation (notion de perspective). En d'autres termes, le niveau de détail dans une représentation varie d'un endroit à un autre.

Comme illustré dans la Figure 2.1, il existe aussi deux approches de transformation d'échelle : discrète et continue. La transformation discrète signifie que certaines échelles sont disponibles et que la transformation passe de l'une à l'autre, comme dans une fonction en palier. La transformation continue permet de choisir n'importe quelle échelle et peut être décrite comme une fonction linéaire [Li, 2007].

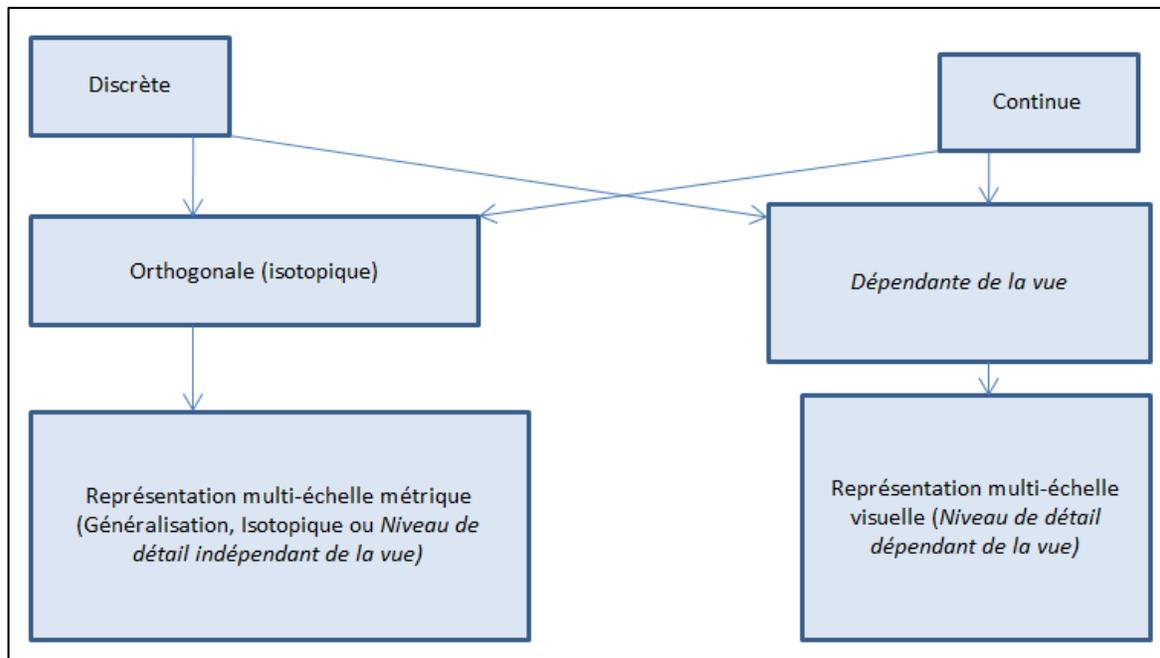


Figure 2.1: Différentes approches pour la représentation multi-échelle des données de MNE [Li et al., 2005]

La représentation et la prise en compte de l'extension spatiale des phénomènes modélisés constituent un champ d'intérêt pertinent dans le domaine de la géomatique. Dans ce contexte, les modèles à base de règles tels que les automates cellulaires fournissent une grande variété de manières de changer d'échelles : *« les modèles locaux présentent une meilleure adaptation que les modèles globaux pour prendre en compte des entités qui ne proviennent pas de la même échelle »* [Pierrick et al. 2006].

2.2.3 Exemple de processus spatiotemporel de type diffusion : l'écoulement des eaux de surface

Rappelons que selon la classe des problèmes de ce travail de recherche, nous nous intéressons aux processus de type diffusion parmi lesquels l'écoulement d'un fluide dans un milieu géo-référencé est l'exemple que nous traitons. Plus particulièrement, c'est l'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant qui constitue le cas d'application de cette thèse, et qui fait partie d'une multitude de processus hydrologiques. Parmi les facteurs caractéristiques de la modélisation hydrologique, on mentionne la diversité des processus en jeu (processus physiques et chimiques), la complexité des systèmes étudiés, vu leurs multiples conditions aux limites et la difficulté de considérer un système fermé, ainsi que la présence de multiples échelles tant spatiales que temporelles. Cette complexité inhérente à la modélisation hydrologique implique qu'il n'existe pas une, mais de multiples modélisations possibles et que le lien entre le modèle et l'objectif de son application est particulièrement important. Les modèles hydrologiques sont des outils numériques qui servent à représenter le cycle de l'eau d'un bassin versant. Les tailles des bassins

versants varient de quelques hectares à plusieurs milliers de km². Les échelles de temps de leur fonctionnement peuvent, elles aussi, varier d'un évènement ponctuel à plusieurs années ou décennies. En décrivant les processus hydrologiques responsables de l'évolution des quantités et de la qualité des eaux à l'échelle d'un bassin versant, Villeneuve et al. [1998] citent les principaux schémas de modélisation identifiés et utilisés à ce jour pour la description de ces processus, à savoir : le cycle de l'eau, l'érosion hydrique du sol, le transport et de la transformation des polluants, ainsi que la qualité de l'eau dans les milieux aquatiques.

Le cycle de l'eau représente les variations spatiales et temporelles des flux d'eau à l'échelle du bassin versant à l'aide de bilans de masse, de quantités de mouvement et d'énergie thermique. Nous montrons dans la Figure 2.2 les principaux processus physiques caractérisant ces bilans sont : la précipitation, l'évapotranspiration, la condensation, la fonte de neige, l'infiltration, l'écoulement en milieux poreux, la recharge des eaux souterraines et l'écoulement des eaux de surface qui représente notre cas d'application.

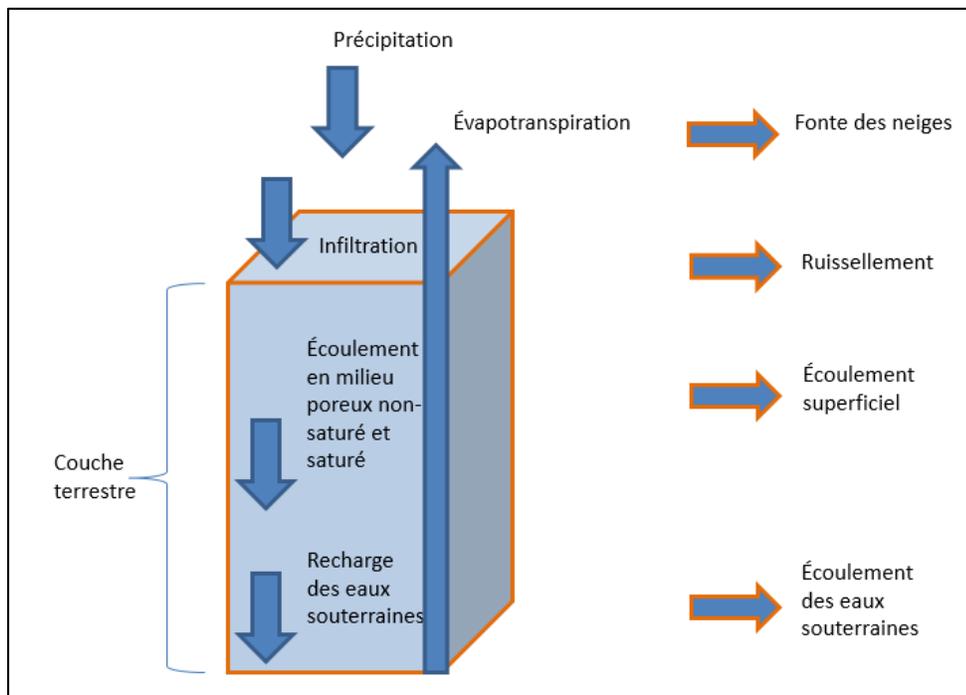


Figure 2.2: Processus physiques du cycle de l'eau

La littérature distingue plusieurs façons de représenter les processus hydrologiques conduisant à plusieurs types de modèles. Le premier type, est généralement appelé *boîte noire*; il utilise une relation empirique issue de l'expérience et il relie entrées et sorties sans chercher à se rapprocher d'une loi physique. On parle

ensuite de modèles conceptuels qui cherchent à se rapprocher de la physique sans toutefois en appliquer le formalisme: par exemple, un bassin versant sera modélisé par une succession de réservoirs représentant les différents compartiments hydrologiques et reliés entre eux par des lois d'échange simples. Enfin, lorsque la description des processus est faite de manière physique, c'est-à-dire avec des lois de comportement propres à une échelle spatiale donnée, on parle, dans la littérature, de modèles à base physique [Chahinian, 2004].

Une autre classification est aussi utilisée en hydrologie, où on parle de deux types de modèles : les *modèles globaux* qui considèrent le bassin versant comme un tout indifférencié et les *modèles distribués* qui se basent sur une discrétisation du bassin versant en mailles ou plus petites unités. Ces derniers offrent alors la possibilité d'inclure les caractéristiques du milieu telle que la topographie, l'occupation du sol et le type de végétation qui sont variables dans le temps et dans l'espace.

Traditionnellement, les simulations hydrologiques basées sur des lois physiques simplifient les équations constitutives dans le but d'obtenir une solution convergente. Les méthodes d'éléments finis et différences finies qui donnent une solution numérique de ces équations requièrent des hypothèses simplificatrices. Par exemple, elles supposent une relation décrite par une fonction liant la décharge et la profondeur de l'écoulement pour chaque région discrétisée. En outre, la stabilité numérique de ces schémas n'est pas certaine dans toutes les situations d'écoulement et le calcul numérique pour les grandes surfaces reste fastidieux. Aussi, le couplage entre les modèles hydrologiques et les SIG est une alternative que nous présentons dans la section suivante.

2.3 Modélisation des processus spatiotemporels

2.3.1 La modélisation

Selon Schmidt et Pavé [2002], la modélisation est la méthode qui permet de représenter un objet ou un phénomène du monde réel par une formule d'un système formel choisi. La simulation quant à elle, ou plus souvent encore la simulation numérique, est la méthode qui permet de mettre en œuvre un modèle et notamment d'obtenir des valeurs calculées pouvant être confrontées à des valeurs observées.

Le but de la modélisation et de la simulation est essentiellement de comprendre les phénomènes observés, de tester les hypothèses et les théories ainsi que de prédire le comportement spatiotemporel des systèmes dans divers scénarios et conditions, et de découvrir le fonctionnement des phénomènes géospatiaux grâce, entre autres, aux expériences faites sur ordinateur. Nous illustrons dans la Figure 2.5 les différentes étapes des processus de modélisation et de simulation montrant le passage du monde réel vers l'utilisation des résultats en passant par la modélisation conceptuelle et formelle, l'étude logique et analytique et la validation.

Il est toujours difficile de classifier les méthodes de modélisation car celles-ci dépendent en grande partie non seulement des processus qu'on étudie mais aussi des objets pris en compte. On assiste alors assez souvent au développement de méthodes qui ne se fondent que sur l'utilisation d'un outil mathématique qui sert de base de modèle : modèles dynamiques construits sur des équations différentielles; modèles logistiques pour expliquer des processus comportementaux désagrégés, systèmes multi-agent pour analyser des phénomènes de diffusion et de colonisation d'espaces, etc. Ces différents outils donnent naissance, en fonction de leur utilisation, à différentes grandes familles de modèles [Durand Dastès, 1992] : agrégés ou désagrégés, dynamiques ou statiques, explicatifs ou descriptifs, déterministes ou probabilistes.

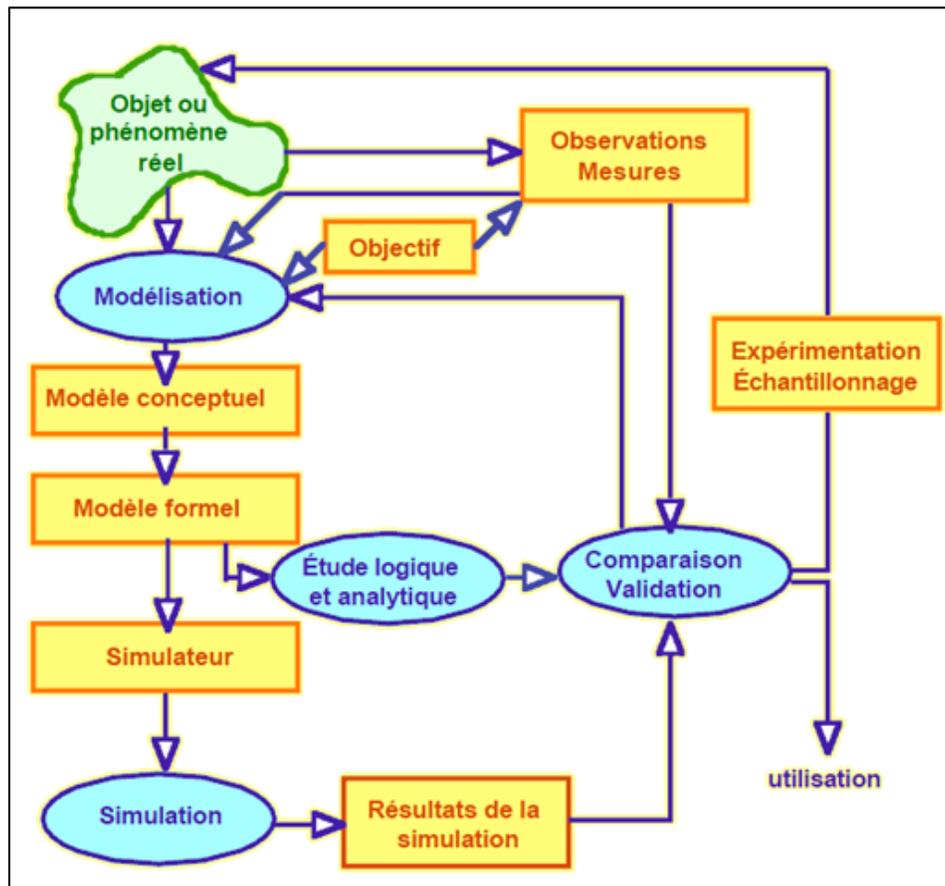


Figure 2.3: Schéma méthodologique général de modélisation et de simulation [Schmidt et Pavé, 2002]

Si on désire classifier les méthodes et approches de modélisation en se basant sur la littérature, on peut annoncer que deux grandes catégories de modèles peuvent être citées. D'abord, les modèles empiriques qui sont fondés sur l'analyse statistique des données observées et ne sont généralement applicables que dans les conditions où les observations ont été faites. Puis, les modèles basés sur des processus, qui sont fondés sur la compréhension des processus physiques, chimiques, géologiques, biologiques ou socio-

économiques, ainsi que leur description mathématique. Les modèles des systèmes complexes ont souvent recours à la combinaison d'approches empiriques et d'approches basées sur les processus [Mitasova, 1998]. Ceci dit, les processus réels sont complexes et incluent souvent des comportements non-linéaires, des composants stochastiques et des boucles de rétroaction sur des échelles spatiales et temporelles différentes. Ainsi, les modèles peuvent représenter les processus uniquement avec un certain niveau de simplification.

2.2.2 La modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG

Modéliser des phénomènes et des processus spatiotemporels implique assez souvent de combiner des savoirs et des compétences relatifs à des domaines divers, les uns liés à la thématique de la recherche, les autres issus de l'informatique, de la statistique, de la physique ou des mathématiques. L'ensemble de ces disciplines ouvre en effet des perspectives méthodologiques stimulantes pour les disciplines s'intéressant à l'organisation de l'espace et à l'évolution de ses structures telles que la géomatique, la géographie, l'urbanisme, l'archéologie, l'économie, l'écologie, l'agronomie, etc. Elles offrent également des cadres techniques utiles pour formaliser leurs modèles thématiques.

Le rôle des SIG est, entre autres, de stocker les données d'entrées et les résultats, de prétraiter les données d'entrées (montage, transformation, interpolation, etc.), d'analyser et de visualiser les résultats, ainsi que de fournir des outils informatiques de simulation.

Dans certains cas, il y a même un enchaînement de modèles : un SIG afin de créer des indicateurs spatiaux; un modèle statistique pour tester la significativité de la relation entre certaines des variables utilisées ou encore pour estimer des informations manquantes; un modèle d'équations différentielles pour gérer les évolutions globales d'un certain nombre de variables d'état ; un modèle d'automate cellulaire pour simuler les interactions spatiales locales et un système multi-agent pour rendre compte des effets d'une coopération entre différents acteurs. Pour mettre en œuvre un modèle thématique, on est ainsi amené à enchaîner, coupler et intégrer des modèles issus de disciplines différentes [Sanders, 2007].

La modélisation des données dans les SIG doit traiter les processus eux-mêmes et pas seulement la géométrie de l'espace et du temps [Chrisman, 1998]. Bien que plusieurs études considèrent la fusion ou l'intégration de l'espace et du temps, il faut noter que la représentation de l'espace et du temps ne doit pas dominer le besoin de représenter les processus. D'après Blaut [1961] *"En géographie, rien n'est purement espace ou temps, tout est processus"*. La représentation compréhensive d'un processus requiert l'incorporation de l'attribut dynamique, de la géométrie, de la structure interne et du mouvement dans les modèles de données de SIG.

L'espace et le temps sont essentiels pour analyser et modéliser la dynamique géographique. Les activités, les événements et les processus ainsi que les changements et les mouvements sont tous considérés

comme fonction du temps et de l'espace. La sélection des variables spatiales et temporelles dans le développement des modèles dépend de la nature des phénomènes géographique à modéliser.

En analysant les dimensions possibles que peuvent manifester les dynamiques, Goodchild et al. [2007] ont proposé un cube conceptuel pour identifier les types de base des changements et transformations possibles des phénomènes géospatiaux à part les changements d'attributs. Pour l'incorporation d'attributs dynamiques, la représentation compréhensible des processus requiert la géométrie, la structure interne ainsi que le mouvement de l'objet dynamique. Ces paramètres sont considérés comme des conditions qui définissent le comportement dynamique de l'objet modélisé [Goodchild et al., 2007]. Par exemple :

- **La condition de géométrie** : certains objets comme les voitures gardent la même géométrie (ou forme) durant le temps tandis que d'autres comme les nuages passent par des géométries variables.
- **La condition de mouvement** : les objets sont soit statiques tels que les bâtiments soit dynamiques tels que les marées noires.
- **La condition de structure interne** : certains objets ont une structure interne variable avec le temps comme le sol dans une ligne de passage d'eau tandis que d'autres sont homogènes tels que les rues.

Le cube conceptuel de Goodchild et al. [2007] est présenté dans la Figure 2.6 où plusieurs combinaisons possibles de géométrie, de structure interne et de mouvement sont montrées.

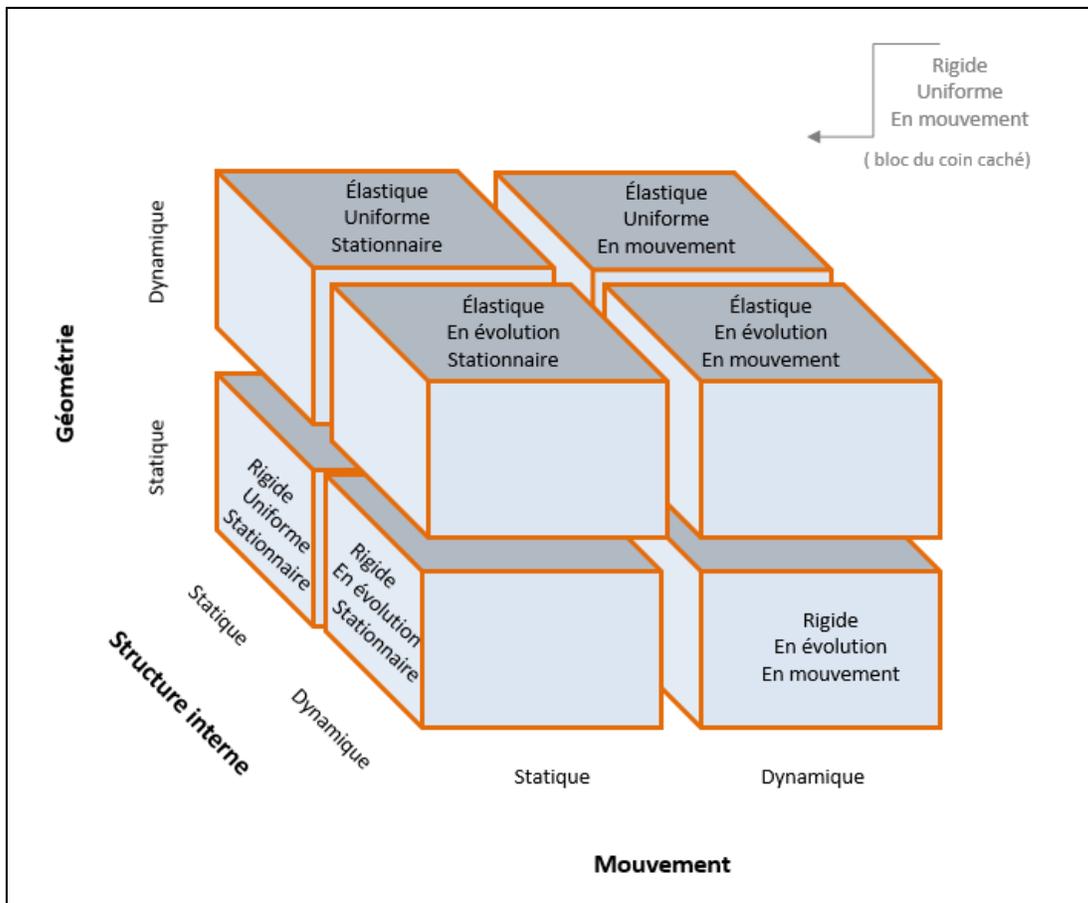


Figure 2.4: Trois dimensions fondamentales des dynamiques des objets [Goodchild et al., 2007]

Ainsi, le comportement dynamique des phénomènes spatiaux peut être conçu comme le changement de leur localisation, de leurs attributs dans le temps et l'espace et aussi de la géométrie des objets qui les constituent, de leur structure interne et de leur mouvement. Cet aspect multidimensionnel est aussi présent dans les SIG où les informations géographiques sont définies par trois types de données : des données thématiques décrivant un objet géographique, des données spatiales exprimant la géométrie, la localisation et les relations topologiques ainsi que des données temporelles exprimant la dynamique et l'évolution des deux dimensions : thématique et spatiale.

2.2.3 Couplage entre modèles et SIG

Le couplage de SIG avec des modèles permet de gérer la dynamique des processus et le SIG devient source et réceptacle de ce que produit le modèle, en procurant non seulement les données de calibration mais aussi les données de validation [Pouliot, 1998]. Depuis quelques années, des interfaces entre SIG et modèles de simulation sont développées afin de doter les SIG d'un accès au temps réel et à la dynamique continue des processus. La modélisation des dynamiques spatiales pose la question de l'intégration des

méthodes permettant de passer de l'analyse thématique des objets géographiques à la simulation de leurs interactions. C'est dans ce sens que des études ont permis d'évaluer la capacité des SIG à rendre compte des dynamiques spatiales et se sont orientées vers des tentatives d'association des SIG avec des méthodes de simulation de type automates cellulaires et systèmes multi-agents [Bousquet, 1999]. Trois approches de couplage existent entre les SIG et les outils de simulation [Gimblett, 2002]; elles sont résumées comme suit:

- Une approche de couplage faible (*Loose coupling*) qui est définie comme un échange de données entre le SIG et l'outil de simulation. Dans ce niveau d'intégration, la simulation est faite indépendamment du SIG bien que les entrées et sorties de la simulation passent à travers le SIG (Figure 2.7).

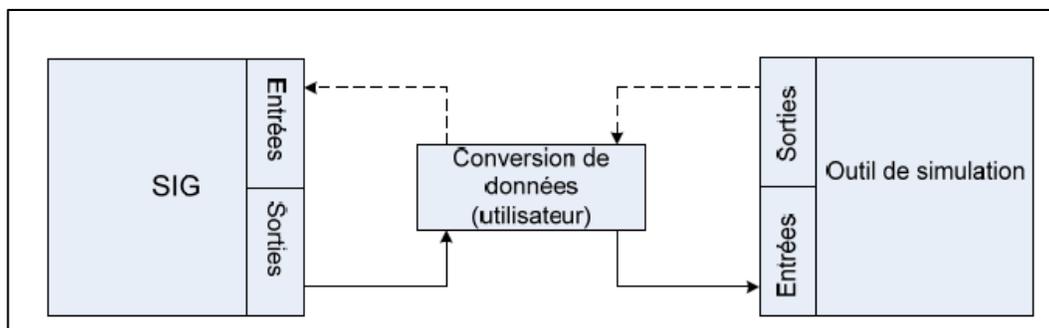


Figure 2.5: Couplage faible entre SIG et outil de simulation

- Une approche de couplage fort (*Tight coupling*) qui est définie comme un lien entre le SIG et l'outil de simulation par une macro SIG ou un script de programmation non visible par l'utilisateur. La simulation dans cette approche est aussi développée indépendamment du SIG mais les données sont échangées avec l'outil de simulation (Figure 2.8).

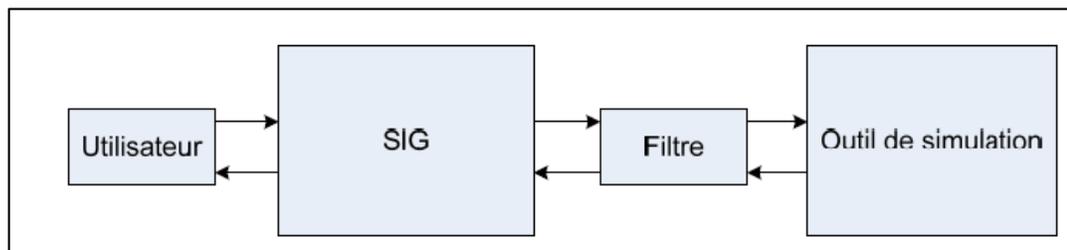


Figure 2.6: Couplage fort entre SIG et outil de simulation

- Une approche de couplage total (*Full coupling*) qui est une intégration totale de l'outil de simulation dans le SIG. Elle signifie une implémentation d'un modèle de simulation dans le SIG en accédant à toutes les fonctionnalités de ce dernier (Figure 2.9). Elle permet aux SIG d'offrir des analyses plus

sophistiquées et des capacités de simulation pour la représentation des phénomènes spatiaux dynamiques [Sui et Maggio, 1999].

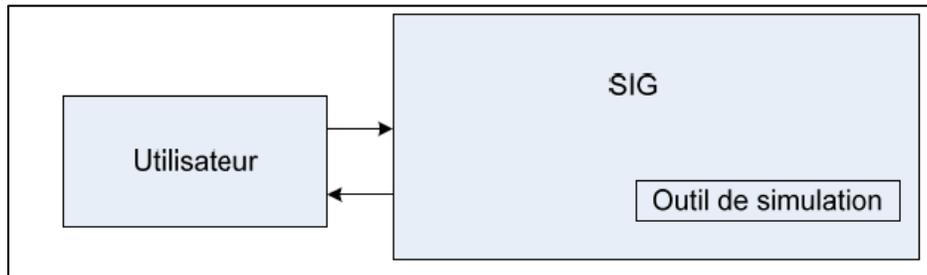


Figure 2.7: Couplage total entre SIG et outil de simulation

2.2.4 Couplage entre modèles hydrologiques et SIG

Avant les années 1980, les développements des SIG et des modèles hydrologiques s'effectuent en parallèle; aucune passerelle n'était envisagée pour des raisons principalement techniques [Sui et Maggio, 1999]. Mais dès 1990, des solutions logicielles de couplage ont fait leur apparition. On cite par exemple le package RIBS (*Real-Time Interactive Basin Simulator*) intégrant un modèle de prédiction des précipitations reposant sur des données radar avec un modèle de ruissellement basé sur un modèle numérique de terrain, et diverses informations relatives au bassin versant destinées à la prise en compte du temps réel dans le ruissellement et les inondations [Garrote et Bras, 1995]. Par ailleurs, des interfaces entre SIG et modèles de simulation ont été développées afin de doter les SIG d'un accès au temps réel à la dynamique des processus. C'est par exemple le cas de la plate-forme GRASS interfacée à des outils de simulation (WEPP, *Water Erosion Prediction Project*) [Engel et al., 1993], du couplage d'Arc Info avec le système HMS (*Hydrologic Modeling System*) et du couplage entre ArcGIS et HydroGeosphere [Brunner et Simmons, 2012]. On cite aussi le cas du couplage d'ArcView GIS avec le modèle SWAT (*Soil land Water Assessment Tool*) [Luzio et al., 2002] ou encore des modules développés par compartiments hydrologiques depuis les bassins versants jusqu'à la mer côtière par DHI Water & Environment. Selon Al-Sabhan et al. [2003] une autre tendance actuelle, au-delà des couplages, consiste à avoir recours aux ressources d'Internet pour l'accès aux bases de données distribuées, décuplant les possibilités d'accès en temps réel au déroulement des processus [Robin et Gourmelon, 2005].

L'intégration des données géospatiales issues des SIG et de la télédétection a contribué au développement et à l'amélioration de certains modèles hydrologiques, notamment par l'exploitation efficace des informations dérivées. En outre, l'avancement dans le domaine informatique facilite de plus en plus la modélisation mathématique des systèmes hydrologiques [Singh et Woolhiser, 2002]. En effet, les SIG permettent de traiter et d'analyser les données et surtout de produire des cartes thématiques afin de décrire

toutes les caractéristiques physiques des milieux. Ce qui offre une représentation réaliste des hydro-systèmes.

Ceci dit, l'intégration de modèles hydrodynamiques avec de grands systèmes géographiques peut aussi être problématique. Malgré l'avancement des technologies, la plupart des logiciels de système d'information géographique posent encore des difficultés informatiques pour l'intégration numérique des processus avec les composantes géométriques, algébriques et visuels des phénomènes concernés. Certains modèles distribués demeurent assez complexes. On cite à titre d'exemple les modèles THALES [Grayson et al., 1992], SHE [Abott et al., 1986] et PMRS [Leavesley et Stannard, 1995] qui ont pour objectif de représenter le comportement de bassins versants, dont l'évolution est continue tant dans le temps et dans l'espace, et ce dans la résolution la plus fine possible. Par ailleurs, le choix du modèle dépend des données d'entrées disponibles, des composantes prises en compte et aussi de l'échelle spatiotemporelle. Les modèles distribués basés sur la résolution d'équations différentielles et faisant appel aux principes de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie nécessitent un nombre important de variables qu'il faut obtenir à partir du traitement des données. Ils ne peuvent être appliqués qu'aux bassins versants suffisamment instrumentés qui disposent de données d'entrées à grande échelle spatiale et aux fréquences temporelles exigées.

L'automate cellulaire peut être présenté comme un cadre alternatif de simulation basé sur une grille (ou tessellation) et offrant une solution à la fois temporelle et géo-algébrique des dynamiques spatiales. Au lieu d'intégrer numériquement la solution de l'équation globale (comme c'est le cas des solutions provenant des éléments finis ou de l'équation de quantité de mouvement), les systèmes d'automates cellulaires évaluent uniquement les processus locaux. Le comportement global émerge de ces processus locaux. L'utilisation des automates cellulaires dans les études spatiales s'est d'abord limitée au domaine de la simulation urbaine et de la modélisation d'occupation du sol. Cependant, durant la dernière décennie, et avec l'introduction des différentes approches d'enchaînement temporel, il est devenu possible de fusionner des simulations séparées d'automates cellulaires provenant de différents systèmes environnementaux dans des modèles unifiés appelés par Parsons et Fonstad [2006] "multi-automates".

2.4 Utilisation des automates cellulaires dans la modélisation des processus spatiotemporels

2.4.1 Le concept de l'automate cellulaire

Un automate cellulaire est un ensemble d'éléments possédant des attributs qui changent au cours du temps [Benenson et al., 2005] et qui permet d'effectuer des simulations de phénomènes complexes sur la base de règles simples [Langlois et Phipps, 1997]. Ainsi, les automates cellulaires sont particulièrement adaptés

pour la modélisation de systèmes complexes puisqu'ils reproduisent des comportements globaux complexes à partir de règles simples et d'interactions locales de cellules individuelles [White et Engelen, 2000].

Un automate est constitué de cellules pouvant prendre à un instant donné un état parmi un ensemble fini [Iltanen, 2012]. Dans un automate cellulaire, le temps est discret et procède par évolution itérative, passant du temps t au temps $t + 1$, puis au temps $t + 2$, etc. L'état d'une cellule au temps t dépend de l'état d'un nombre fini de cellules appelé son « voisinage » au pas de temps précédent. L'échelle de temps d'un automate cellulaire change selon le contexte : un intervalle de temps peut représenter aussi peu qu'une seconde ou une minute (comme dans les modèles de simulation du trafic), pour aller à une journée (comme dans les modèles hydrologiques) ou même à des périodes de temps plus importantes, par exemple, un mois ou une année (comme c'est le cas des modèles d'étalement urbain). À chaque nouvelle unité de temps, les mêmes règles sont appliquées pour toutes les cellules de la grille, produisant une nouvelle « génération » de cellules dépendant entièrement de la génération précédente. De par son fonctionnement, un automate cellulaire est un système dynamique où l'espace et le temps sont discrets. Selon Benenson et Torrens [2005] formellement, un automate A peut être représenté au moyen de ses états S et de ses règles de transition T .

$$A \sim (S, T)$$

Les règles de transition définissent l'état de l'automate S_{t+1} au pas de temps $t+1$ dépendamment de son état S_t ($S_t, S_{t+1} \in S$) et des entrées I_t au pas de temps t :

$$T : (S_t, I_t) \rightarrow S_{t+1}$$

Un automate cellulaire possède les caractéristiques principales suivantes :

- ses caractéristiques structurelles définissant l'aspect topologique du réseau cellulaire ou grille (forme, nombre et arrangement des cellules);
- l'ensemble des états que peut prendre une cellule, parfois appelé ensemble des symboles; et
- son mécanisme de transition, qui définit l'état d'une cellule en fonction de son voisinage.

2.4.2 Différentes variantes d'automates cellulaires

Il existe de nombreuses variantes d'automates cellulaires correspondant à autant d'utilisations différentes [Golay, 2007]. D'une manière générale, on peut noter les variantes suivantes :

- **Fonctionnement de l'automate cellulaire :** Il est dit synchrone lorsque toutes ses cellules changent d'état en même temps. Le nouvel état d'une cellule est donc calculé à partir de l'état précédent de tout le voisinage. Dans le cas où les cellules déclenchent leur mécanisme de transition les unes après les autres, l'automate est dit asynchrone.

- Dimension de l'automate : Il existe des automates dont la grille associée possède une, deux ou trois dimensions (Figure 2.10). Dans le cas des automates cellulaires modélisant un phénomène hydrodynamique, la plupart des grilles sont de deux dimensions. Dans certains cas on introduit l'élévation du terrain pour chaque cellule ce qui induit une dimension 2 et ½ comme dans le travail de Parsons et Fonstad [2006].

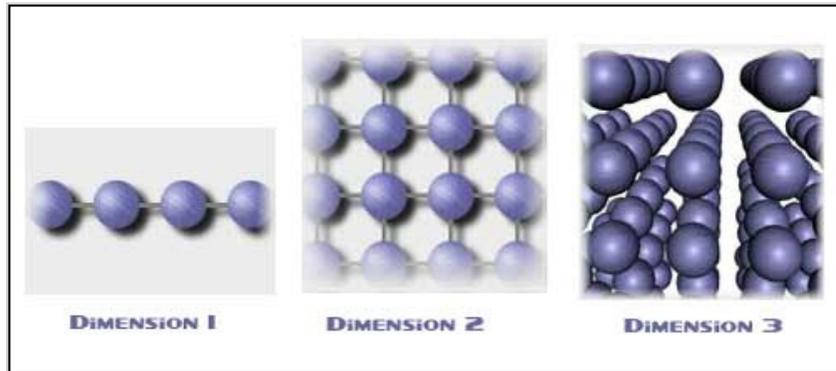


Figure 2.8 : Différentes dimensions d'un automate cellulaire

- Structure du maillage : Dans le cas bidimensionnel, il s'agit en général de carrés, mais on peut également trouver d'autres formes comme par exemple des triangles ou des hexagones (Figure 2.11). En trois dimensions, les cubes (Figure 2.12) sont les plus utilisés [Pichler, 2003].

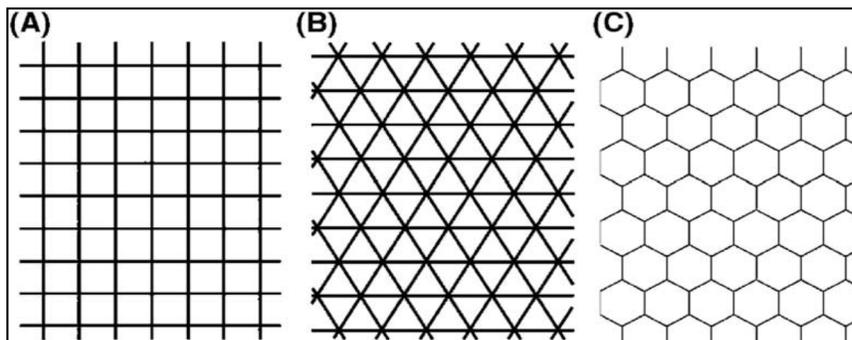


Figure 2.9: Tessellations du cas bidimensionnel : (A) grille carrée; (B) grille triangulaire et (C) grille hexagonale

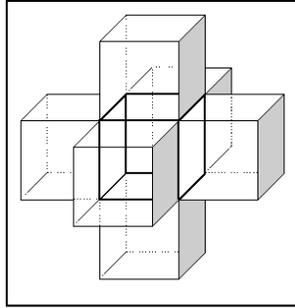


Figure 2.10: Tessellation tridimensionnelle cubique

- **Type de voisinage** : C'est l'ensemble des régions qui ont une influence sur une cellule qui constitue le voisinage d'une cellule. Le voisinage de l'automate cellulaire traditionnel est composé de quatre cellules adjacentes aux côtés de la cellule centrale : c'est le voisinage de Von Neumann [Parsons et Fonstad, 2006] ou de huit cellules adjacentes à la cellule centrale (voisinage de Moore). Deux versions étendues de ces voisinages sont aussi possibles telles que nous les illustrons dans la Figure 2.13.

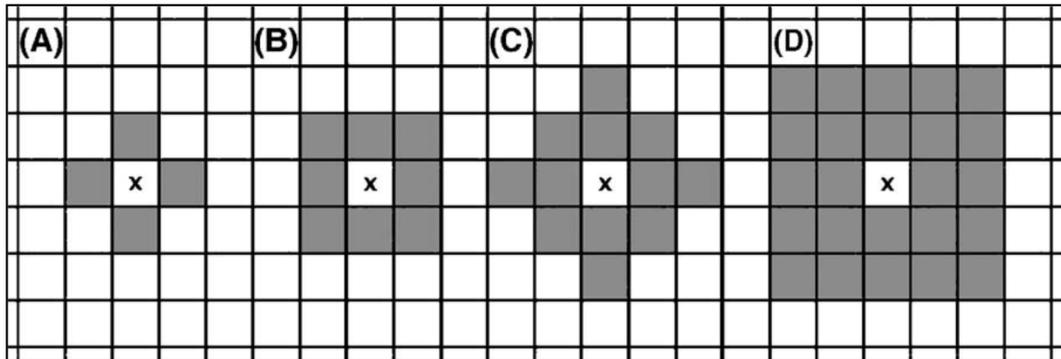


Figure 2.11: (A) Voisinages de Von Neumann; (B) de Moore; (C) de Von Neumann étendu et (D) de Moore étendu

Pour une tessellation hexagonale, le voisinage d'une cellule est généralement formé des six cellules adjacentes comme dans la Figure 2.14.

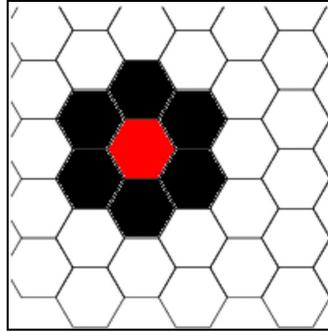


Figure 2.12: Voisinage pour une tessellation hexagonale

Dans le cas tridimensionnel cubique, il existe trois définitions possibles du voisinage d'une cellule : soit on considère les six cellules qui partagent une face avec la cellule centrale; ou bien on leur ajoute les douze autres cellules qui partagent un côté avec la cellule centrale (un total de 18 cellules) ou encore on considère les 18 derniers en ajoutant les huit autres qui partagent un sommet avec la cellule centrale (un total de 26 cellules).

- **Mécanisme de transition** : Il est déterministe si l'état d'une cellule dépend directement de l'état du voisinage au pas de temps précédent. Si c'est une fonction de probabilité qui détermine la transition, l'automate est dit stochastique. D'après Dawson et al. [2009], les règles de transition de l'automate cellulaire forment le moteur de la simulation car elles déterminent le comportement du modèle et l'évolution de la simulation.

Au niveau pratique, les automates cellulaires s'appliquent dans des domaines aussi variés que la reconnaissance de formes, la cryptographie, les systèmes urbains, ainsi que la modélisation des processus physiques, moléculaires et géographiques.

Dans la littérature, les automates cellulaires ont subi différents types d'ajustements de leurs composantes principales. Nous résumons dans la Figure 2.15 les types d'automates cellulaires en fonction des composantes typologiques. Ceci nous permettra par la suite de bien situer les particularités de l'automate cellulaire que nous avons utilisé.

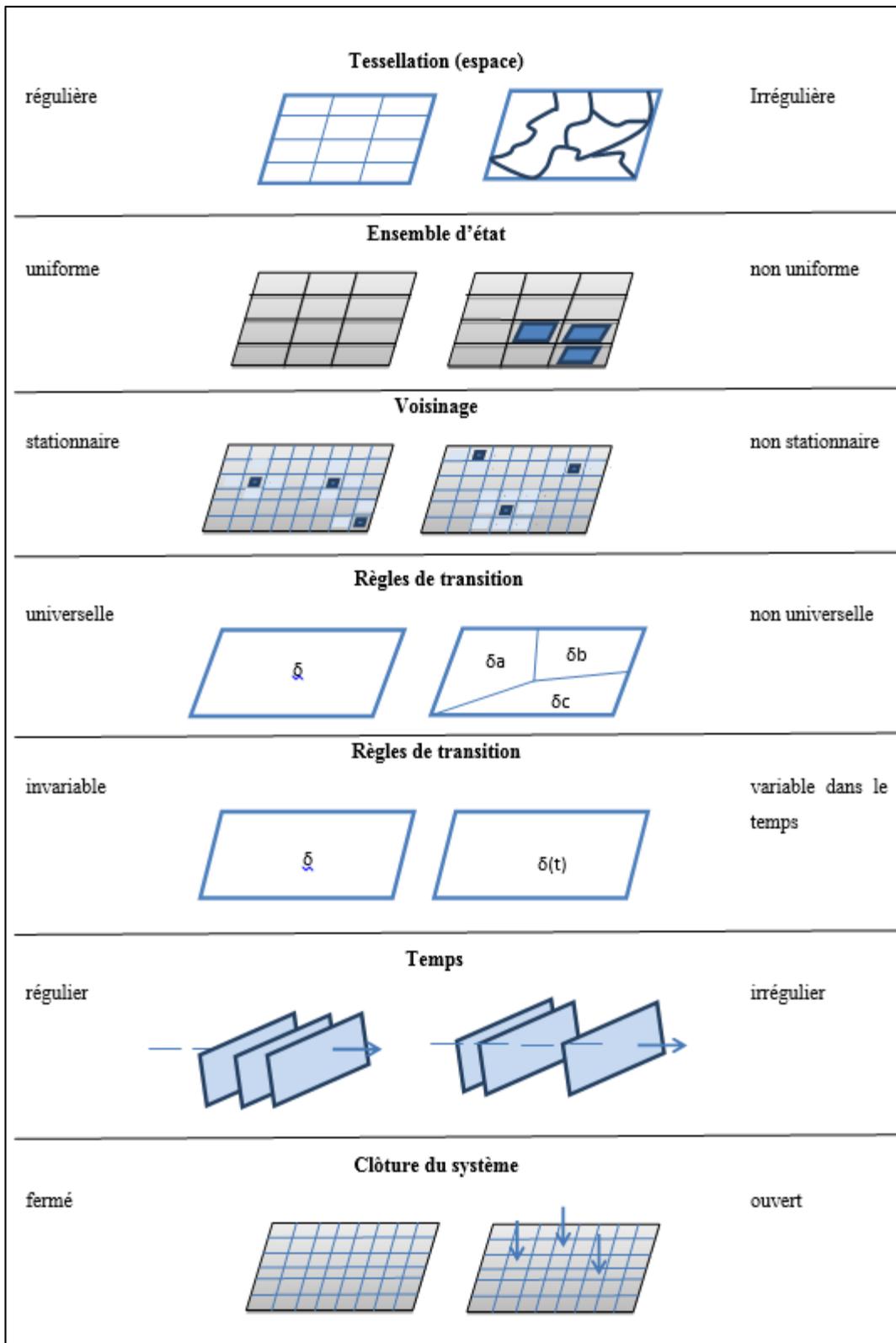


Figure 2.13 : Composantes typologiques des automates cellulaires

2.4.3 Automates cellulaires en hydrologie

En vue de définir certains points d'appui de recherche, nous avons recensé quelques travaux récents d'application des automates cellulaires (AC) dans le domaine de l'hydrologie pour dégager leurs principales caractéristiques en s'appuyant notamment sur les variantes d'automate cellulaire présentées précédemment. Dans la majorité des cas étudiés, la modélisation est faite en 2D avec des cellules carrées régulières. Les échelles de temps et d'espace dépendent respectivement de l'information disponible pour les variables à modéliser et du modèle numérique de terrain à partir duquel est faite la discrétisation en cellules. Nous montrons dans le Tableau 2.2 quelques exemples de simulations par automate cellulaire en hydrologie. Nous présentons pour chaque application : l'objet modélisé, la dimension et la géométrie de la grille, la résolution spatiale et temporelle, ainsi que le type de voisinage.

Tableau 2.2: Automates Cellulaires en hydrologie : exemples de géométrie, dimension, échelle et voisinage

Source	Objet modélisé	Dimension de la grille	Géométrie de la grille	Résolution (temps et espace)	Voisinage
A Cellular Automata model of surface water flow <i>[Parsons et al., 2006]</i>	Eau de surface en écoulement	2D + élévation	Cellules carrées	10 m ou moins si disponible (selon le MNT)	Von Neumann
				0.25s	
Ruicells Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle <i>[Douvinet et al., 2008]</i>	La dynamique hydrologique du bassin versant	3D	Point, ligne, surface (TIN) Attribution d'une signification hydrologique pour chaque cellule	Selon MNT	-----
CAESAR (Cellular automaton Evolutionary Slope And River) Modeling differential catchment response to environmental change	La réponse du bassin versant au changement environnemental	2D	Cellules carrées régulières	Cellules de la grille de 50 m de taille	-----
				pas de temps variable	

[Coulthard et al., 2005]				selon le flux entre 10 ⁻⁶ s et 10 ⁴ s	
CAESAR A Cellular Automata model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution [Coulthard et al., 2002]	Modélisation de la décharge sédimentaire du bassin versant et de l'évolution du cône de déjection durant les 9200 dernières années	2D	Cellules carrées régulières	Cellules de la grille de 3 m de taille	-----
On modeling and simulation of flows of water by 3D Cellular Automata [Pichler, 2003]	L'écoulement des molécules de H ₂ O dans un contenant conique	3D	Cellules cubiques dans un contenant conique		Von Neumann
Cellular Automata algorithm for simulation of surface flows in large plains [Rinaldi et al., 2006]	Écoulement de surface dans les grandes plaines	2D	Cellules carrées	-----	Moore
A hydrological model based on Cellular Automata and Doppler Radar [Dai et al., 2008]	Décharge d'écoulement	2D + élévation		2s au maximum	Moore
HydroCA : A watershed routing model based on GIS and Cellular Automata [Huan and al., 2006]	Ligne de partage des eaux	2D	Cellules carrées	100 m	Moore
Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata. [Lui. et al., 2014]	Écoulement lors d'inondations	2D	Cellules carrées	5 m	Von Neumann

Quant aux règles de transition entre les cellules, elles se basent généralement sur des lois physiques et hydrauliques telles que le transfert d'eau proportionnellement au gradient de pente entre la cellule centrale

et ses voisins, ainsi que la direction de l'écoulement selon l'angle de la pente. Nous résumons dans le Tableau 2.3 les paramètres et variables intervenant dans la simulation pour chacun des exemples d'AC hydrologiques, ainsi que les limites énoncées par les auteurs respectifs. Par exemple, dans le modèle de Fonstad et al., [2006], l'approche d'AC proposée combine l'équation de Manning (pour l'estimation de l'écoulement en surface) avec celle de la conservation de la masse. Ceci leur a permis de créer une interaction spatiale à travers une grille bidimensionnelle et de produire une hydrodynamique qu'ils jugent réelle, telle que prévue par une réelle ligne de partage délimitant le bassin versant.

Tableau 2.3: Automates Cellulaires en hydrologie : Exemples de paramètres modélisés, règles de transition et évaluation

Source	Paramètres	Points faibles
A CA model of surface water flow [Parsons et al., 2006]	-Précipitations -Infiltration -MNT	- négligence de certaines données d'entrée du système : les flux d'eau provenant de la surface, les pertes par évaporation ainsi que les limites de la capacité de saturation sont omis. - le voisinage de Von Neumann ne permet pas de considérer les mouvements diagonaux → asymétrie du temps et de l'espace -Dans certaines situations hydrauliques extrêmes comme la variation rapide des flux ainsi que les flux tridimensionnels, l'équation de Manning ne pourra pas représenter précisément la vitesse. -L'élévation utilisée n'est pas aussi réelle que la morphologie du bassin → possibilité d'utilisation de la stéréophotogrammétrie lidar.
Ruicells Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle [Douvinet et al., 2008]	- La surface est la principale variable étudiée -Précipitations -Occupation du sol -Coefficients de ruissellement	- Relier les variables topographiques (l'altitude et ses dérivés) aux variables hydrauliques telles que la direction et le sens d'écoulement sur le maillage triangulaire

	-MNT	
On modeling and simulation of flows of water by 3D CA [Pichler, 2003]	Les forces qui contribuent à la réflexion des molécules H ₂ O du contour vers le contenant	-Il est encore incertain que le modèle construit montrera le comportement dynamique attendu → ceci dépendra des expériences de simulation - Les conditions aux limites du contenant
Cellular Automata algorithm for simulation of surface flows in large plains [Rinaldi et al., 2006]	-Infiltration -Précipitations -Évapotranspiration -Fuite	
A hydrological model based on Cellular Automata and Doppler Radar [Dai et al., 2008]	-Précipitations -Évapotranspiration -Infiltration -Végétation -Sol -Élévation	-Manque de précision suffisante et de bonne résolution des informations sur le sol, les végétaux et l'élévation du terrain -La précipitation observée par le radar doppler contient une erreur due à l'écho de la pluie dans l'air. -Une moyenne d'évaporation remplace les données observées (par manque d'évaporomètre) -Difficulté de déterminer la valeur initiale d'humidité du sol
HydroCA : A watershed routing model based on GIS and Cellular Automata [Wu et al., 2005]	-Élévation -Index topographique -Ratio d'écoulement dans toutes les directions	-Deux estimations de la précision de la décharge simulée sont obtenues : 64.7% et 71%
CAESAR (Cellular automaton Evolutionary	-Topographie (MNT)	

<p>Slope And River)</p> <p>A CA model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution [Coulthard et al., 2002]</p> <p>Modeling differential catchment response to environmental change [Coulthard et al., 2005]</p>	<p>-Précipitations</p> <p>-Occupation du sol</p>	
<p>Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata. [Lui. et al., 2014]</p>	<p>-Précipitations</p> <p>-Infiltration</p> <p>- Élévation</p>	<p>Vitesse de décharge constante</p>

L'un des éléments intéressants à dégager des Tableaux 2.2 et 2.3 est le type dit 'automate cellulaire géographique' dans le travail de Douvinet et al. [2008] où le concept classique d'automate cellulaire a été généralisé pour pouvoir modéliser à la fois la structure variable des éléments de terrain et les liens entre les cellules. Cette démarche se base sur un automate cellulaire dont les cellules sont de dimensions et de formes variables (point, ligne, surface) reliées par un schéma d'écoulement et dont les liens traduisent directement la structure morphologique de la surface [Delahaye et al., 2001]. Cela signifie que les liens d'écoulement ne sont alors plus guidés uniformément par la topologie de voisinage du réseau cellulaire, mais plutôt par les liens structurant la surface. L'automate Ruicells a une structure combinant le traditionnel formalisme d'un AC dans lequel les règles de transition dictent la manière dont évoluent les différentes cellules en fonction des états des cellules voisines et les nombreuses transformations requises pour la simulation de processus hydrologiques. C'est dans ce sens qu'il est possible d'intégrer Ruicells dans la catégorie des 'automates cellulaires géographiques'. Cette catégorie a aussi été utilisée par Moreno et Marceau [2007]. Elle répond toujours à certaines règles de base des automates cellulaires, à savoir la matrice de l'espace, la configuration du voisinage, la résolution du pas de temps, un ensemble d'états des cellules et des règles de transition. Nous présentons dans la Figure 2.16 les règles de transitions de Ruicells comme elles ont été définies par les auteurs.

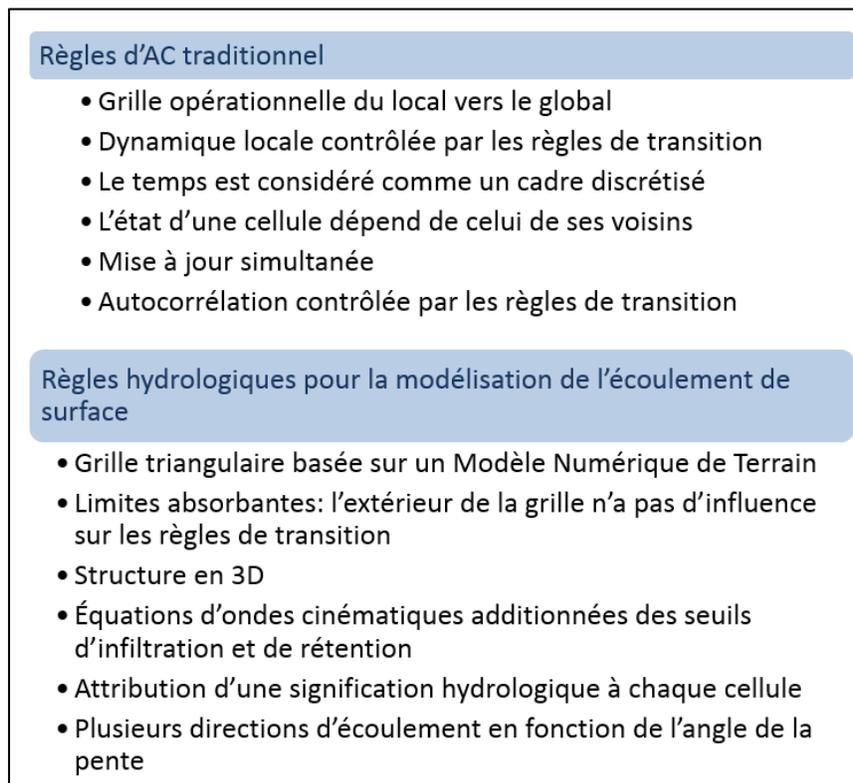


Figure 2. 16: Règles de transition de Ruicells [Delahaye et al., 2001]

2.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue de littérature des grands axes de recherche du projet, notamment les notions de modélisation spatiotemporelle, la géosimulation géosimulation par automate cellulaire ainsi que les notions s'attachant au domaine d'application, à savoir l'écoulement des eaux de surface. Nous avons présenté l'ontologie spatiotemporelle, puis la modélisation des processus spatiotemporels dans les SIG, en général et celle liée au domaine de l'hydrologie, en particulier. Ensuite, nous avons présenté les types de couplage entre les modèles et les SIG. Nous avons terminé en introduisant la géosimulation géosimulation par les automates cellulaires.

Notons cependant qu'en lien avec les deux premiers objectifs de la thèse qui sont liés à la conception et la construction d'une structure irrégulière hiérarchique à des fins de représentation des processus spatiotemporels, nous présenterons des compléments de revue de littérature dans les chapitres ultérieurs. Ainsi, le chapitre 3 est consacré au découpage de l'espace afin de représenter des processus spatiotemporels : nous y présenterons les analyses et les limites des tessellations utilisées en géosimulation. Le chapitre 4 est dédié à une approche hiérarchique de représentation des processus

spatiotemporels; une revue de littérature des représentations hiérarchiques en géosimulation fera l'objet de la première partie du chapitre 4.

Chapitre 3 : Géosimulation basée sur une discrétisation irrégulière de l'espace

3.1. Introduction

« *Que ce soit pour le connaître, le comprendre, le gérer ou le développer, l'espace est sans cesse découpé, morcelé, divisé* » [Frédéric Tesson, 2014].

En partant du fait que le découpage de l'espace en petites portions permet de le gérer d'une manière efficace, la partition de l'espace géographique effectuée par une tessellation spatiale demeure importante dans la mesure où elle permet de le gérer et de l'analyser grâce à une abstraction. Selon Worboys [2004], dans un espace 2D, la tessellation (ou grille) est définie comme une surface qui correspond au recouvrement d'une portion de l'espace à l'aide d'un arrangement de polygones qui ne se chevauchent pas d'une manière à le recouvrir en entier. La régularité ou non de la grille fait référence à la géométrie des polygones qui la constituent. De ce fait, une grille est dite régulière lorsque ses polygones le sont, leurs côtés et angles sont égaux. Autrement, la grille est qualifiée d'irrégulière [Boots et al., 1999]. Dans ce travail, nous utilisons les termes grille et maillage comme synonymes du mot tessellation.

En géosimulation, la grille définit l'aspect spatial de la simulation puisqu'elle permet de subdiviser l'environnement de simulation en une structure cellulaire avec une indexation permettant d'identifier chaque cellule. Traditionnellement, les deux méthodes utilisées pour décomposer l'espace sont la méthode Raster et la méthode Vecteur qui, selon [Lee et Li, 1998], ne parviennent plus à représenter les méthodes de tessellations, car il existe deux formes conceptuelles récentes permettant de définir le partitionnement d'une surface : selon l'espace et selon les objets [Lee et al., 2000]. L'emploi de l'une ou l'autre de ces méthodes résulte en un ensemble de cellules; la différence principale entre les deux réside dans l'origine des cellules. Dans le cas du partitionnement selon les objets, l'emphase est mise sur la présence de ces objets, ce qui se traduit par une relation un-à-un entre la cellule et l'objet. Dans le second cas, l'emphase est mise sur l'existence de l'espace, qui est décomposé de façon arbitraire en cellules, ce qui se traduit par une relation un-à-plusieurs entre une cellule et les objets qu'elle contient (parfois partiellement).

Dans ce chapitre, nous commençons par aborder les diverses tessellations utilisées en géosimulation, afin de les caractériser et de relever leurs limites. Nous les regroupons selon leur régularité et leur type de voisinage. La section 3.2 présente les tessellations utilisées en géosimulation; la section 3.3, propose un cadre conceptuel pour découper l'espace afin de prendre en compte les caractéristiques des processus

spatiotemporels en vue d'une simulation par automate cellulaire; la section 3.4 présente le contexte hydrologique de la simulation de l'écoulement des eaux de surface effectuée pour cette thèse.

3.2 Les tessellations utilisées en géosimulation

En matière de géosimulation, une tessellation est utilisée pour découper l'espace en partitions afin d'étudier l'évolution d'un processus sur une base locale. Cette section porte sur la géométrie de la tessellation et sur le type de voisinage entre les partitions. On distingue ainsi des tessellations régulières et irrégulières en terme de géométrie; ainsi que des voisinages directs et indirects. Plus généralement, plusieurs critères peuvent caractériser une tessellation. Boots et al. [1999] ont défini une taxonomie de critères qualificatifs plus ou moins mesurables afin de cerner les avantages et les inconvénients de chaque type de tessellation, notamment pour le traitement d'image et la structuration de bases de données. Ces critères sont les suivants:

- **L'adjacence** : une tessellation est considérée comme uniformément adjacente lorsque la distance entre le centre de la plus petite composante (la composante atomique) et le reste de son voisinage est la même. La condition de voisinage entre deux composantes résulte quant à elle de leur adjacence via un côté ou un point (sommet). Nous utilisons dans ce travail le terme voisinage pour décrire les relations d'adjacence en géosimulation.
- **La rotation** : une rotation d'ordre n est une rotation de $360/n$ degrés. Le nombre rotation d'une tessellation est son plus grand ordre de symétries rotationnelles.
- **Le diaphragme** : c'est une caractéristique d'une tessellation d'un niveau k qui donne le nombre de tessellations de niveau $k-1$ nécessaires pour la construire.
- **La circularité** : définit la différence entre les surfaces du plus petit cercle circonscrit et du plus grand cercle inscrit pouvant être construits, exprimée en fraction de l'aire d'une composante de la tessellation.
- **L'orientation** : Lorsque toutes les composantes d'une tessellation ont la même orientation, on parle de tessellation à orientation uniforme. Des tessellations ayant une même orientation peuvent être superposées par des translations du plan ne faisant intervenir ni rotation, ni réflexion.
- **La limite** : Si chaque composante de la tessellation peut être divisée en composantes plus petites, on parle de tessellation illimitée. Dans le cas contraire, et lorsque les composantes d'un niveau k sont de formes géométriques différentes de celles d'un niveau $k-1$ qui lui est inférieur, on parle de tessellation limitée.
- **La similarité** : caractérise deux tessellations lorsqu'elles ont la même forme géométrique.
- **La régularité** : une tessellation est dite régulière lorsque son plus petit élément est un polygone régulier.

À la base de cette taxonomie, nous nous intéressons dans les sections suivantes à la régularité et au voisinage (adjacence) des tessellations bidimensionnelles utilisées en géosimulation.

3.2.1 Régularité d'une tessellation

Quand on parle de tessellation régulière de l'espace, il s'agit d'un découpage formé de polygones réguliers ayant la même forme et la même taille (Figure 3.1). Pour un espace linéaire (1D), il s'agit de le découper en des segments de ligne de même longueur. Pour une surface à deux dimensions (2D), il existe trois tessellations couramment utilisés selon la forme géométrique primitive, à savoir en carrés, en triangles et en hexagones à partir desquels on pourrait aussi faire des combinaisons qui donneraient des formes géométriques complexes mais qui restent tout de même régulières. Quant à un espace tridimensionnel (3D), on parle alors de polyèdres réguliers comme dans le cas des hexaèdres (les cubes), des tétraèdres (les pyramides), des octaèdres, etc.

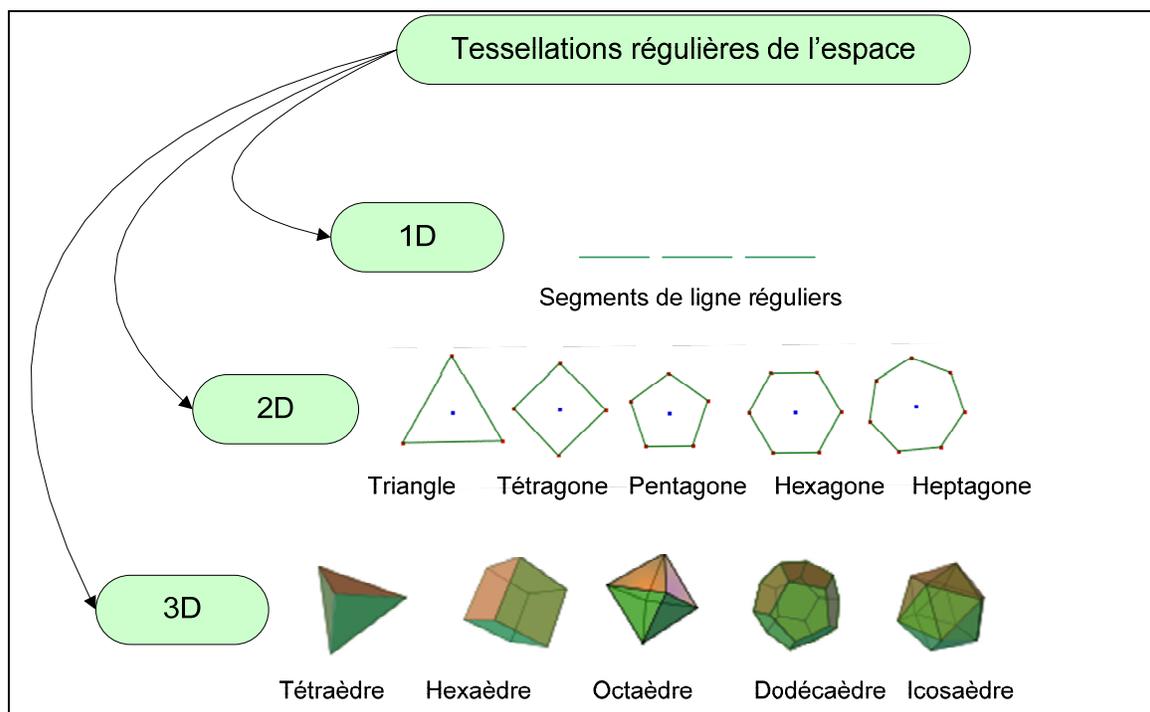


Figure 3.1 : Exemples de primitives géométriques à l'origine des tessellations régulières de l'espace

3.2.1.1 Les tessellations régulières en géosimulation

- **La tessellation carrée** est la plus utilisée en géosimulation avec une grille semblable au modèle Raster pour la représentation des données dans les systèmes d'information géographique. Elle est formée

de cellules carrées de tailles identiques, ce qui fait qu'elle est communément appelée tessellation Raster. Elle est aussi la tessellation de base des automates cellulaires où traditionnellement le voisinage est composé des 4 (voisinage de Von Neumann) ou des 8 (voisinage de Moore) cellules adjacentes aux côtés de la cellule. Alternativement, White et Engelen [1993] étendent le voisinage jusqu'à 113 cellules présentes dans un rayon de 6 cellules en partant de la cellule centrale. Semboloni [1997] et Batty [1998] intègrent quant à eux des notions de distance, alors que White et Uljee [2007] et Vliet et al [2009] évoquent la notion de grille variable. La tessellation carrée présente l'avantage d'avoir une excellente compatibilité avec les systèmes d'information géographique, ainsi qu'avec les données de télédétection au format raster qui sont fréquemment utilisés en géosimulation [Dragicevic, 2007]. D'autant plus qu'elle est facile à implanter quel que soit le langage de programmation utilisé. Elle est de loin la plus simple et demande peu de ressources, ce qui permet d'obtenir une bonne performance à l'application.

- **La tessellation hexagonale** est formée d'hexagones contigus. Elle est moins utilisée que la tessellation carrée en géosimulation. Généralement, le voisinage d'une cellule est formé de six cellules adjacentes. L'implantation et l'emploi de la tessellation hexagonale restent relativement simples, bien que sa complexité soit considérée comme légèrement supérieure à celle de la tessellation raster. Son avantage par rapport à cette dernière est dans son isotropie spatiale : chaque cellule partage avec ses six voisines un sixième de sa frontière, ce qui n'est pas le cas pour la tessellation carrée où certains voisins ont un côté commun et certains autres ne sont adjacents que par un sommet commun du carré avec la cellule centrale [Gibson et Lucas, 1982]. En outre, la distance séparant chaque centre des cellules voisines du centre de la cellule d'origine est la même [Rhind et al., 1988] Cette propriété offre une réponse supérieure pour la simulation des flux par rapport à une grille Raster [Kiester et Sahr, 2008], et ce, spécialement dans les modèles de trafic urbain. Ces caractéristiques simplifient alors les calculs statistiques puisque l'adjacence est à la base de l'interpolation.
- **La tessellation triangulaire** est rarement utilisée en géosimulation.

Le nombre de systèmes de géosimulation à base de tessellation régulière est impressionnant. Hins-Mallet [2009] en a fait un résumé présenté dans le Tableau 3.1.

Tableau 3.1: Exemples d'utilisation de tessellations régulières en géosimulation

Source	Sujet de la simulation	Tessellation	Cellules
Semboloni [1997]	Développement urbain	Carrée	Chaque cellule représente une parcelle de terrain
Benenson [1998]	Mobilité résidentielle	Carrée	Chaque cellule représente une résidence
White et Engelen [2000]	Croissance urbaine	Carrée résolution (500m)	Cellules représentant des zones d'utilisations diverses : commerciale, résidentielle, forêt, aéroport, etc. Couvre la totalité des Pays-Bas (351 000)

			cellules)
Barros [2004; 2003]	Étalement urbain Simulation fictive	Carrée Territoire fictif sans résolution	Cellules représentant une portion du territoire
Barredo et al. [2003]	Croissance urbaine	Carrée résolution 100m	Cellules représentant des zones d'utilisations diverses : commerciale, résidentielle, forêt, aéroport, etc.
Kerridge et al. [2001]	Circulation piétonnière	Carrée Résolution 0,75 m	Une cellule représente une portion de voie piétonnière ou une obstruction Voies de circulation fictives
Nara et Torrens [2005] Torrens et Nara [2007]	Gentrification	Carré Résolution 25 m	Résidences et points d'accès : route, centre-ville, entrée/sortie d'autoroute, centre d'achat, épicerie situés sur les terrains Seules les résidences sont des automates, les autres entités n'évoluent pas.
Vliet et al. [2009]	Croissance urbaine	Carrée 760x635 Résolution 100m	Cellules représentant des zones d'utilisations diverses (commerciale, résidentielle, forêt, industrielle, agricole, etc.)
Sanders et al. [1997], Bura et al. [1996]	Système fictif de peuplement d'une région	Hexagonale Région fictive d'environ 50 Km ²	Cellule hexagonale urbaine (avec population, production et services) ou non-urbaine (mer, montagne, marécage ou plaine)

Les tessellations régulières présentent néanmoins plusieurs désavantages. En effet, c'est un type de découpage de l'espace considéré maintenant comme plutôt restrictif puisqu'il est inapte à modéliser la complexité réelle des processus spatiotemporels. Le fait que les cellules de cette tessellation soient uniformes engendre un manque de réalisme et constitue un modèle géographiquement inadéquat pour la modélisation des entités géographiques réelles et souvent complexes [Dragicevic 2007; Carvalho et al 2006b]. Cet inconvénient est non négligeable puisque les plateformes de géosimulation sont employées par les décideurs et les intervenants dans plusieurs sphères d'activités sociales, industrielles, médicales et militaires en permettant de reproduire des situations complexes, d'en simuler différents scénarios et d'en anticiper les conséquences.

Par ailleurs, selon plusieurs auteurs, le choix arbitraire de la taille des cellules risque de générer des résultats qui ne représentent pas la véritable dynamique du système étudié [Chen et Mynett, 2003; Jantz et Goetz 2005; Kocabas et Dragicevic, 2006]. En effet, des études récentes ont montré que les simulations faites sur des grilles régulières sont sensibles à la taille de la cellule ainsi qu'à la configuration du voisinage [O'Sullivan 2001a; Moreno 2008, Ménard et al., 2008]. Bien que le choix de la taille des cellules soit basé sur une décision logique et argumentée, il demeure cependant arbitraire parce qu'à l'origine, les cellules ne représentent pas des objets géographiques. Les modèles à base de tessellations régulières sont ainsi sensibles à l'échelle, ce qui engendre un autre inconvénient lié à la qualité du raisonnement spatial. Lorsque les cellules ne représentent pas les objets géométriques étudiés, cela diminue la qualité du géoréférencement et cela peut être à la source de nombreux problèmes de raisonnement spatial. En effet,

un objet géographique peut être réparti sur plusieurs cellules et inversement une cellule peut contenir plusieurs objets géographiques [Lee et al., 2000].

Quant à la notion d'adjacence, elle est aussi forcée dans les tessellations régulières. En raison de la forme régulière des cellules, le nombre de voisins de chaque cellule et la forme de ces voisins sont constants d'une cellule à l'autre. Par contre, une tessellation irrégulière où le voisinage est créé de façon naturelle permettrait de définir les concepts d'adjacence, de connectivité et de distance de géosimulation d'une manière beaucoup plus réaliste [Benenson et Torrens, 2005].

La section suivante présente les tessellations irrégulières utilisées en géosimulation et résume quelques cas d'application.

3.2.1.2 Les tessellations irrégulières en géosimulation

Une définition simpliste de la tessellation irrégulière selon Bédard [2003] : « c'est un découpage de l'espace à partir de polygones différents ». Autre que la forme géométrique, la principale différence entre les structures régulières et les structures irrégulières est le fait qu'une unité de tessellation irrégulière est construite à partir de données. Ce qui fait que toutes les caractéristiques des cellules telles que la taille, la forme et l'orientation reflètent la distribution réelle des données. Ceci permet aussi une bonne détection visuelle et aide beaucoup à l'interprétation des données. En outre, la différence entre les deux types de tessellations est évidente lorsqu'il s'agit des règles de transition. Ces dernières ne se limitent pas aux seuls changements d'état des cellules ou des entités géographiques tels que pour les tessellations régulières, mais elles peuvent aussi inclure toutes les transformations de leur forme, taille ou localisation [Benenson et Torrens, 2004]. Le principal avantage des tessellations irrégulières est aussi leur principal inconvénient : elles sont étroitement liées à la distribution des données et tout changement de ces dernières peut être à l'origine d'un changement de toute la structure. Selon O'Sullivan [2001b] et White et Engelen [2000], ceci rend l'utilisation des tessellations irrégulières en géosimulation plus complexes et même moins performantes que les grilles régulières. Néanmoins, l'uniformité des tessellations régulières reste un obstacle majeur aux simulations du monde réel [Shi et Pang, 2000]. C'est pourquoi on a de plus en plus recours aux tessellations irrégulières qui permettent d'offrir plus de réalisme aux applications, que ce soit dans la modélisation ou dans l'interprétation des résultats [Dragicevic, 2007].

En outre, la récente disponibilité des données géoréférencées à haute résolution est à l'origine de l'émergence des simulations à haute résolution, ce qui explique entre autres l'apparition des tessellations irrégulières en géosimulation. On cite ici l'exemple de la simulation urbaine où l'environnement modélisé est maintenant représenté par des subdivisions spatiales nouvelles auparavant impossibles à obtenir, telles que les limites municipales, les aires de recensement et les parcelles cadastrales qui sont pourtant nécessaires

à certaines simulations de dynamique urbaine, notamment celles fondées sur les individus comme dans le cas de la mobilité résidentielle [Mostafavi et al., 2009; Mostafavi et al., 2010].

Dans les SIG, les tessellations irrégulières les plus utilisées sont le réseau de triangles irréguliers TIN (*Triangulated Irregular Network*), la triangulation de Delaunay et le diagramme de Voronoï. D'autres types de tessellations comme les grilles en rectangles et les feuillets cartographiques représentant les méridiens et les parallèles sur le globe terrestre font également partie de cette catégorie de tessellations.

3.2.2 Voisinage des tessellations en géosimulation

L'emploi de l'automate cellulaire en géosimulation est moins lié à l'utilisation d'une tessellation qu'à celle d'entités géographiques formant une couverture de l'espace qui peut être continue ou discontinue. La seule condition selon O'Sullivan [2001b] est qu'il existe des relations d'influence qui lient ces éléments d'une manière valable et que des règles de transition plausibles puissent être élaborées pour expliquer et décrire l'évolution des états des cellules. La répartition spatiale des objets de simulation ainsi que les relations mutuelles de voisinage permettent de différencier trois catégories selon la représentation spatiale des objets et, plus particulièrement, des relations de voisinage entre ceux-ci. En effet, le voisinage étant souvent critique dans le comportement global des modèles de géosimulation [O'Sullivan 2002a; Shi et Pang, 2000]. Ces trois catégories de voisinage utilisés en géosimulation sont le voisinage de données vectorielles formant une tessellation, le voisinage par graphe et le voisinage par tessellation de Voronoï.

3.2.2.1 *Le voisinage des données vectorielles formant une tessellation*

Quand on parle de données vectorielles, on fait référence aux simulations à base d'objets puisque la majorité des simulations à grilles irrégulières sont développées dans des SIG [Stevens et Dragicevic, 2008]. En effet, selon Moreno [2008], l'appellation « automate cellulaire vectoriel » provient du fait que le format de données *vectoriel* des SIG est utilisé pour définir l'espace en faisant correspondre un polygone à chaque entité réelle. Dans une tessellation formée par des données vectorielles, ce sont les objets géographiques qui forment la tessellation et qui jouent donc à la fois le rôle d'automate et de cellule puisqu'ils couvrent l'espace d'une manière continue. Ainsi, il n'existe pas d'intermédiaire entre les cellules et les objets. Par exemple, dans le domaine urbain, les entités choisies pour la couverture spatiale désignent généralement des parcelles cadastrales ou des terrains. Quant au voisinage, il est défini explicitement en faisant intervenir des notions de proximité, de distance, d'adjacence et de zone-tampon autour des objets, et ce, pour chacune des cellules de l'automate cellulaire correspondant à un objet réel. D'après Shi et Pang [2000], ce genre de définition explicite du voisinage permet de l'adapter au contexte de la simulation mais entraîne des pertes de performance. C'est une approche relativement récente en géosimulation d'où le nombre restreint

d'applications de ce genre. Le Tableau 3.2 présente quelques exemples de géosimulations réalisées avec des tessellations vectorielles (à base d'objets).

Tableau 3.2: Exemples de tessellation formée par des données vectorielles en géosimulation

Source	Sujet de la simulation	Cellules
Moreno [2008], Moreno, Ménard et al. [2008], Moreno, Wang et al. [2008]	Cadre théorique de simulation appliqué aux changements de l'utilisation des sols	Zones de divers types (forêt, eau, agriculture, région urbaine)
Stevens [2005], Stevens et al. [2007], Stevens et Dragicevic [2007]	Croissance urbaine (outil de planification) Intégré à un SIG	Lots cadastraux (parcelles résidentielles, commerciales ou industrielles ainsi que rues et parcs)
Basse et al. [2014]	Utilisation du sol	Rectangles réguliers décrivant l'état de l'occupation de sol

3.2.2.2 Le voisinage par graphe

Un graphe est une représentation d'un ensemble de sommets et de liens reliant les paires de sommets. Certaines applications de géosimulation se basant sur des objets n'utilisent pas de tessellation habituelle mais définissent les relations de voisinage entre les objets à l'aide d'un graphe. Les sommets sont alors remplacés par les entités géographiques de la simulation, les liens du graphe les relient à leurs voisins par leurs centroïdes. Les outils de type graphe utilisés en géosimulation se limitent à la structure de Delaunay qui est le dual du diagramme de Voronoï. Le voisinage est donc implicite à la structure qui ne tient compte que de l'adjacence. Cependant, selon Okabe et al [2000] et Luo et al. [2002], la structure de Delaunay demeure moins complexe et relativement plus simple à calculer que le diagramme de Voronoï notamment quand les objets sont modélisés par des segments de droite et des polygones. Des exemples de triangulation de Delaunay employée en géosimulation sont décrits dans le Tableau 3.3.

Tableau 3.3: Exemple de tessellations formées par un graphe en géosimulation

Source	Sujet de la simulation	Cellules
O'Sullivan [2000; 2001b; 2002a]	Cadre théorique de simulation appliqué au phénomène de gentrification	Entités adjacentes selon la triangulation de Delaunay basée sur les centroïdes des bâtiments.
Hamam [2004], Hamam et al. [2007]	Modèle générique pour les changements d'utilisation du sol	Entités urbaines fictives distribuées aléatoirement (parcelles, routes, bâtiments, etc.)

3.2.2.3 Le voisinage par tessellation de Voronoï

En géosimulation, la tessellation de Voronoï a déjà été implantée avec succès dans quelques applications d'automate cellulaire. À notre connaissance, le premier automate cellulaire à base de Voronoï a été développé en 2000 par Shi et Pang dans le cadre d'une plateforme de simulation des mouvements de

population. Par la suite, le concept a été repris successivement par Flache et Hegselmann en 2001 pour la simulation des dynamiques d'influence et de migration, puis par Carvalho [2006b] pour modéliser la propagation de feux de forêt. Un résumé de ces exemples d'applications est présenté dans le Tableau 3.4 [Hins Mallet, 2009].

Tableau 3.4: Exemples de tessellations de Voronoï en géosimulation

Source	Sujet de la simulation	Cellules
Carvalho et al [2006a, 2006b]	Propagation des feux de forêt	Cellules de Voronoï basées sur l'altitude à partir de données orthographiques de la région modélisée.
Shi et Pang [2000]	Un cadre théorique de simulation intégré à un SIG	Cellules générées à partir d'objets fictifs (points, lignes polygones).
Flache et Hegselmann [2001]	Dynamiques sociales telles que la migration et l'influence.	Cellules de Voronoï représentant des personnes, générées à partir d'une distribution aléatoire de points.
Semboni [2000]	Simulation fictive de l'accroissement urbain	Les parcelles de terrain sont des cellules de Voronoï générées à partir d'une distribution aléatoire de points. Les routes sont des liens de Delaunay entre les parcelles.

Nous avons ainsi fait un survol de quelques exemples de plateformes de simulation à base de tessellations irrégulières. Bien que pas très nombreuses, elles font de plus en plus leur apparition dans les applications de géosimulation puisqu'elles respectent mieux le réalisme de la distribution irrégulière des données dans le monde réel. C'est aussi un facteur motivant dans la recherche de solutions nouvelles pour la discrétisation de l'espace en vue de mieux comprendre et représenter les processus spatiotemporels. En effet, le recours à un découpage irrégulier de l'espace modélisé induit, dans plusieurs cas, la mise en place de nouveaux critères incluant la construction de la structure géométrique, la définition du voisinage et la topologie, ainsi que les règles de transition entre les éléments de la tessellation représentant les cellules de l'automate cellulaire. La deuxième partie de ce chapitre présente notre solution à la question : ***Quelle tessellation de l'espace représente le mieux les processus spatiotemporels ?***

3.3 Cadre conceptuel d'une solution de géosimulation basée sur le diagramme de Voronoï

Dans cette section, nous présentons et nous justifions notre approche pour découper l'espace d'une manière irrégulière dans un objectif de simulation des processus spatiotemporels par l'automate cellulaire.

Le tout premier fondement théorique de ce travail de recherche est la discrétisation de l'espace, et avant même d'aborder les différentes méthodes pour le faire il est important de répondre à la question « **pourquoi découpe-t-on l'espace ?** ». Le point de départ de la réponse est étroitement lié à la compréhension, à la représentation et par la suite à la simulation des processus spatiotemporels. Dans cette mesure, il s'agit de discrétiser le processus lui-même et de décortiquer ses différentes composantes, ainsi que son comportement et son évolution dans le temps pour bien le comprendre. De ce fait, la discrétisation du processus spatiotemporel se fait grâce à une discrétisation supervisée de l'étendue spatiale où se déroule le processus, de son étendue temporelle ainsi que de tous les éléments qui le constituent.

3.3.1 Définition du diagramme de Voronoï

Si on considère un ensemble S composé de n sites de l'espace euclidien en dimension d . Pour chaque site p de S , la cellule de Voronoï $V(p)$ de p est l'ensemble des points de l'espace qui sont plus proches de p que de tous les autres sites de S comme nous l'exprimons dans l'équation 3.1. Le diagramme de Voronoï $V(S)$ est la décomposition de l'espace formée par les cellules de Voronoï des sites.

$$V(p_i) = \{p, d(p, p_i) \leq d(p, p_j), j \neq i, \text{ pour tout } j = 1 \dots n\} \quad (\text{Équation 3.1})$$

Dans un contexte géographique 2D par exemple, le modèle spatial de Voronoï est une tessellation qui résulte de la décomposition de la totalité de l'espace S en un ensemble de cellules de Voronoï autour de chaque objet géographique p . Dans l'Équation (1), la cellule de Voronoï $V(p_i)$ de l'objet p_i correspond à la région définie par l'ensemble des points p dans l'espace pour lesquels la distance $d(p, p_i)$ entre p et l'objet p_i est inférieure ou égale à la distance $d(p, p_j)$ entre p et tout autre objet spatial p_j . Ainsi, selon Shi et Pang [2000] les points qui sont situés le long d'une frontière commune entre deux cellules de Voronoï sont équidistants aux objets géographiques correspondants qui sont adjacents selon le modèle spatial de Voronoï. En reliant les objets adjacents par des segments de lignes, l'ensemble de ces segments forme alors ce qu'on appelle la triangulation de Delaunay (Figure 3.2). Par définition, la triangulation de Delaunay de S est le dual géométrique du diagramme de Voronoï de S : plus explicitement deux points de S sont reliés par une arête dans la triangulation de Delaunay si et seulement si leurs cellules sont adjacentes dans le diagramme de Voronoï correspondant à S .

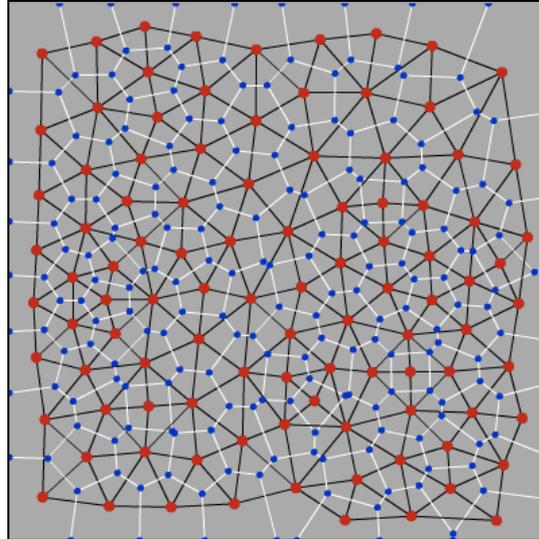


Figure 3.2: Le diagramme de Voronoï et son dual la triangulation de Delaunay

La dualité entre les tessellations de Voronoï et de Delaunay signifie que ces deux structures sont des graphes étroitement liés. Elle résulte des correspondances existantes entre les éléments géométriques de ces deux structures de données, ce qui permet d'extraire l'une des structures à partir de l'autre. Plus spécifiquement un sommet de Voronoï correspond à un triangle de Delaunay (Figure 3.3-a), une arête de Voronoï correspond à une arête de Delaunay (Figure 3.3-b) et à une cellule de Voronoï correspond un sommet de Delaunay (Figure 3.3-c) [Hashemi Beni, 2009].

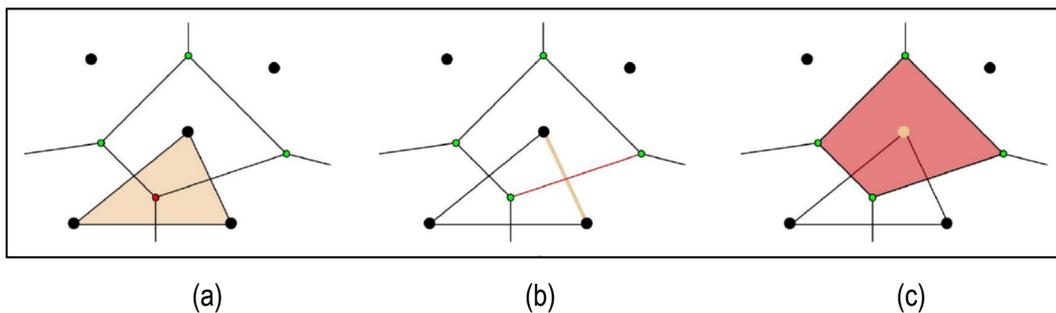


Figure 3.3: Correspondance géométrique entre les diagrammes de Voronoï et de Delaunay

Les diagrammes de Voronoï portent le nom du mathématicien russe *Georgy Fedoseevich Voronoy* qui a défini et étudié le cas général en dimension n en 1908. Les diagrammes de Voronoï qui sont utilisés en géophysique et en météorologie pour analyser des données de distributions spatiales (comme les mesures de chutes de pluie) sont appelés polygones de Thiessen du nom du météorologiste américain *Alfred H. Thiessen* [Fortune, 1987].

3.3.2 Le diagramme de Voronoï en géosimulation

La question initiale de ce travail porte sur le pourquoi et l'origine de cet intérêt pour les diagrammes de Voronoï ? Plusieurs éléments de réponses peuvent être donnés :

- D'abord, la définition même du diagramme de Voronoï répond à une question simple: « dans un ensemble S de N points dans l'espace, pour chaque point p_i de S , quel est le sous-ensemble de points dans l'espace qui sont plus proches de p_i que n'importe quel autre point de S [Preparata et Shamos, 1988] ? » La réponse consiste à partitionner l'espace en régions de Voronoï.
- Les régions de Voronoï se retrouvent déjà dans la nature: les cellules d'un tissu dans un plan 2D forment approximativement une partition de Voronoï [Honda, 1978] ainsi que les ruches alvéoles d'abeilles, les cristaux [Galashev et Skripov, 1985], ou encore les molécules chimiques [David et Davis, 1982, Medvedev et Naberukhin, 1985].
- Les diagrammes de Voronoï sont parmi les constructions géométriques les plus fondamentales pour un ensemble de points.
- La structure duale du diagramme Voronoï (le diagramme de Delaunay) admet elle aussi de très bonnes propriétés géométriques et topologiques [Preparata et Shamos, 1988]. De plus, le graphe de Delaunay contient toutes les informations locales [Toussaint, 1989].
- Il existe des algorithmes efficaces pour la construction de diagrammes de Voronoï. Ces algorithmes sont assez puissants pour résoudre de nombreux problèmes de géométrie algorithmique [Preparata et Shamos, 1988].

Selon Edwards [1993] le partitionnement formé par une tessellation de Voronoï se fait en fonction des objets et non de l'espace, ce qui est contraire aux automates cellulaires traditionnels. Cependant, si on considère que chaque cellule de Voronoï correspond à une cellule de l'automate cellulaire, il est possible de construire un automate cellulaire à base de Voronoï puisque la géométrie des unités spatiales sur lesquelles opère l'automate n'est pas une contrainte. La seule condition est de définir les relations de voisinage entre ces unités spatiales. Cette exigence est intrinsèquement vérifiée pour une tessellation de Voronoï.

Dans ce sens, l'une des critiques faite au sujet de l'utilisation d'une tessellation de Voronoï dans un cadre de géosimulation concerne le voisinage qui selon Hammam [2007] et Moreno et al. [2008] n'est pas défini de façon explicite. En effet, dans une tessellation de Voronoï traditionnelle, le voisinage est uniquement basé sur la topologie. Ceci dit, rien n'oblige à s'y restreindre en termes de simulation car, même si le voisinage implicite d'une tessellation de Voronoï demeure rudimentaire, puisque basé sur les simples notions de proximité spatiale et d'adjacence, il est possible de définir un voisinage différent pour l'automate cellulaire qui se base sur un diagramme de Voronoï. Ainsi, on peut inclure des contraintes basées sur la distance ou la nature des objets comme l'a fait Benenson [2007] où deux bâtiments sont considérés voisins

non seulement lorsqu'ils ont une frontière commune entre les cellules de Voronoï les contenant mais aussi quand la distance entre leurs centroïdes est inférieure à un certain seuil ou quand la ligne les connectant ne traverse pas une artère principale. Par ailleurs, aussi dans le cas d'un système à base d'objets, la même définition de voisinage peut être appliquée dans un système à base de Voronoï. Par exemple, dans l'application de Stevens et Dragicevic [2007] trois formes de voisinage sont définies dans la Figure 3.4 : (A) un voisinage de type adjacence qui comprend tous les polygones qui ont un côté ou un point en commun avec le polygone central j ; (B) Le voisinage de type « distance » qui englobe tous les polygones situés soit complètement ou partiellement à moins de d unités du polygone j , où d est une distance arbitrairement définie; (C) Le voisinage de type « distance tronquée » qui comprend les polygones situés en totalité à moins de d unités du polygone j , ainsi que les portions de polygones situées à moins de d unités du polygone j . On note bien que les deux derniers ne limitent pas le voisinage aux seuls objets adjacents.

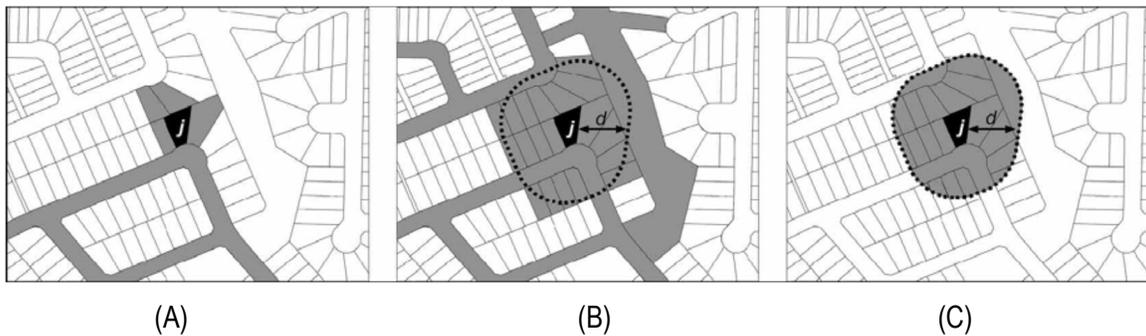


Figure 3.4: Implantation de trois types de voisinage. Le voisinage du polygone j est indiqué par les polygones grisés [Stevens et Dragicevic, 2007].

Ainsi, selon le processus spatiotemporel modélisé, de nouvelles règles et contraintes sont mises en place pour définir le voisinage le plus représentatif du phénomène étudié. Dans la section 3.4 nous présentons un cas d'étude spécifique pour le processus d'écoulement des eaux de surface. Quant à la procédure de construction géométrique du diagramme de Voronoï, elle commence par la sélection d'objets du monde réel qui correspondront aux cellules de Voronoï. Nous traitons la problématique des points générateurs du diagramme de Voronoï dans la section qui suit.

3.3.3 Quels points pour les générateurs de Voronoï?

En comparaison avec l'automate cellulaire traditionnel, les notions spatiales sont plus efficacement et plus naturellement représentées dans un automate cellulaire à base de Voronoï [Shi et Pang, 2000]. En effet, chacune des cellules y est associée soit à un objet spatial comme par exemple un bâtiment pour le cas d'une géosimulation urbaine ou à une caractéristique d'un objet spatial comme par exemple le prix de ce bâtiment. Dans tous les cas, le partitionnement de l'espace selon une tessellation de Voronoï n'est pas fait d'une manière arbitraire puisque les décisions thématiques définissant les paramètres à utiliser sont

justifiées en fonction des finalités de la géosimulation. Le choix des objets sur lesquels sera basée la tessellation, ou autrement dit les points générateurs du diagramme de Voronoï, constitue non seulement un point de départ pour la décomposition de l'espace, mais aussi l'une des difficultés de la méthode. En effet, c'est un choix qui varie selon le contexte et dont les conséquences sur les résultats de la simulation peuvent être considérables. Carvalho l'a par exemple générée à partir de l'altitude et de l'orographie (formes du relief) du terrain [Carvalho et al., 2006b], tandis que Benenson a construit sa tessellation à partir de centroïdes de bâtiments [Benenson et al., 2006]. C'est dans ce sens que la question qui se pose à ce niveau est « **Comment identifier les points générateurs d'un diagramme de Voronoï qui sont à l'origine d'une simulation par automate cellulaire basée sur une tessellation de Voronoï ? Comment ce choix peut-il dépendre du contexte et quelles peuvent être ses conséquences sur le déroulement et les résultats de la simulation ?** »

En réponse à cette question, nous proposons de distinguer deux types de géosimulation à base de diagramme de Voronoï. Dans le premier, nous simulons l'existence d'un objet ou d'un point de mesure de la donnée et ainsi son impact sur l'évolution du processus modélisé : on parle alors de tessellation dynamique de l'espace. Dans le second, nous considérons que la décomposition de l'espace ne change pas dans le temps et nous parlons donc de diagramme de Voronoï fixe dans lequel, une fois le découpage de l'espace effectué, nous ne nous intéressons plus à l'évolution du découpage mais plutôt aux états des cellules. Ainsi, nous définissons dans la section qui suit deux catégories différentes de tessellations de Voronoï.

❖ **Tessellation de Voronoï fixe**

Dans ce type de tessellation, on a besoin de découper l'espace en régions pour étudier l'évolution d'un processus localement, puis éventuellement identifier les relations et interactions entre les régions afin de définir le comportement global qui en résulte sur la totalité de l'espace d'intérêt. Il s'agit alors d'un maillage fixe dans le temps, n'ayant pas besoin d'être modifié. Son avantage par rapport à un modèle raster traditionnel est que ses cellules ne sont pas construites d'une manière automatique ni même selon une résolution prédéterminée. Ainsi, la grille est basée sur des points générateurs de cellules de Voronoï fortement dépendants du phénomène étudié. Les points générateurs ne sont pas susceptibles d'être modifiés au cours du temps, ni par ajout ou suppression, ni par déplacement. Ils représentent des piliers fixes de la tessellation autour desquels sont définis les domaines appartenant à chaque cellule. Dans ce cas, il est souvent question de choisir des points jugés importants pour l'étude et la représentation du processus visé. Et c'est justement dans ce sens que le choix de ces points générateurs constitue un problème de recherche à résoudre dans l'étude des processus spatiotemporels.

❖ Tessellation de Voronoï dynamique

Un des avantages majeurs du diagramme de Voronoï est que sa construction n'est pas définitive. Ses algorithmes de construction permettent de faire des insertions et des suppressions de points afin d'effectuer des mises à jour dans le partitionnement de Voronoï. Cela correspond à des mises à jour dans la décomposition réelle de l'espace en fonction des objets d'intérêt ou des points de données pertinents. Ainsi, la surface et la forme d'un polygone (en 2D) ou d'un polyèdre (en 3D) dépendent de l'angle, de la distance et du nombre de points générateurs voisins. Dans ce genre d'applications, on s'intéresse particulièrement à simuler l'impact de la présence ou de l'absence d'un objet ou d'un point de données dans le fonctionnement d'un système. Cet objet est ainsi représenté par un générateur de Voronoï qui est facilement manipulable grâce à la structure de données. On cite ici l'exemple de l'installation d'un réseau de capteurs (caméras) dans le domaine de la surveillance pour la sécurité publique, où les points générateurs correspondent aux capteurs (Figure 3.5) et où le simple fait d'insérer ou enlever un capteur du réseau influence l'efficacité ainsi que les coûts relatifs au réseau.

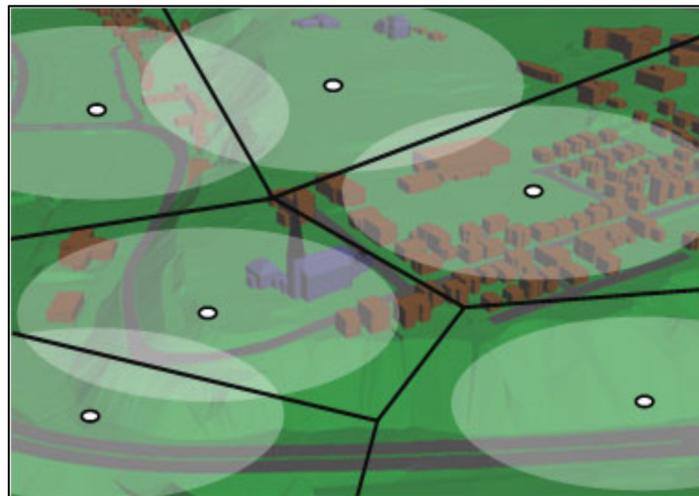


Figure 3.5: Utilisation du diagramme de Voronoï pour la détection de la couverture spatiale d'un réseau de capteurs [Argany et al., 2011]

Un autre exemple est celui de l'analyse de la dynamique forestière à l'aide de diagrammes de Voronoï où un modèle de dynamique forestière est utilisé pour tester l'influence des différentes modalités de recrutement de plantules sur la structure spatiale du peuplement. Dans une telle application, les points générateurs correspondent aux coordonnées des troncs et les polygones représentent l'espace laissé libre par les arbres voisins [Mercier, 1997]. Un troisième exemple peut être cité dans un environnement 3D : il s'agit d'un modèle spatial basé sur le diagramme de Voronoï et la triangulation de Delaunay pour générer et afficher des iso-surfaces des paramètres de l'eau de mer à partir de données originales, et ce dans un cadre de simulation tridimensionnelle en mer lors de l'acquisition de données. Dans cet exemple

d'application, l'utilisation d'un DV/TD permet d'intégrer au système les nouvelles données recueillies au fur et à mesure ainsi que d'intervenir en tout temps pour améliorer la qualité de données recueillies in situ par l'intégration ou la suppression de données et la visualisation en temps réel de leur impact sur la qualité du jeu de données [Ledoux et Gold, 2006].

Dans ces exemples et bien d'autres, les points générateurs du diagramme de Voronoï correspondent aux points où des données sont disponibles. L'objet de la simulation est par conséquent la donnée elle-même : son existence, son ajout et sa suppression. Il n'y a donc pas nécessairement de choix de points à faire pour la construction du diagramme de Voronoï.

❖ **Exemples de choix des points générateurs du diagramme de Voronoï selon le phénomène simulé :**

- En chimie quantitative, les cellules de Voronoï qui sont définies par la position des noyaux dans une molécule sont utilisées pour calculer la charge atomique. Dans ce cas, les points générateurs du diagramme de Voronoï correspondent aux noyaux des atomes et dépendent donc de la position réelle de ces derniers. De ce fait, le choix des atomes à étudier ou à représenter induit celui des points générateurs dans la tessellation de Voronoï. Par exemple, pour calculer la distance entre les atomes de même type, ou la configuration géométrique spatiale de certains types d'atomes, il faudra prendre en compte un ensemble significatif de points générateurs.
- En robotique, la trajectoire d'un robot dans une zone contenant des obstacles correspond à un diagramme de Voronoï puisqu'un robot doit se déplacer d'un point à un autre en se situant à la plus grande distance possible d'obstacles, représentés par des segments ou des polygones. La distance minimale du robot aux obstacles à chaque instant doit être maximale, ce qui implique que le robot suive les arêtes du diagramme de Voronoï des obstacles. Ainsi, les points générateurs des cellules de Voronoï représentent les obstacles dont différent tris ou choix selon la taille ou bien l'importance peut générer une distribution spatiale différente, et donc une structure géométrique différente du diagramme de Voronoï correspondant.
- En climatologie, les diagrammes de Voronoï sont souvent utilisés pour calculer les quantités de précipitation par interpolation dans une région en se basant sur la présence de points de mesures. Ces points de mesures sont des stations météorologiques. Dans ce cas, une cellule de Voronoï correspond à l'étendue spatiale autour d'une station de mesure qui donne les valeurs des paramètres tels que la température de l'air, la précipitation, la pression atmosphérique, etc. Dans certaines applications, quand il s'agit de prendre en compte un sous-ensemble de ces stations, comme par exemple focaliser sur les stations météorologiques qui collectent des données toutes les heures par rapport à celles qui offrent une fréquence quotidienne. Cela signifie que la distribution spatiale des générateurs de Voronoï varie selon le choix des points de mesures. Ce

choix influence la structure géométrique du diagramme de Voronoï correspondant et par la suite la représentation des différents niveaux de détails ainsi que l'interpolation des valeurs mesurées et la simulation des conditions climatiques en résultant. On cite ici l'exemple de l'étude de la représentativité des points de mesure des données météorologiques en combinant leur diagramme de Voronoï représentatif, ainsi que les distances qui séparent chaque générateur de cellule de Voronoï des générateurs de ses voisins [Dubois, 2000]. L'objectif consiste à étudier l'impact des regroupements des points, ainsi que les points isolés dans un réseau de surveillance (Figure 3.6).

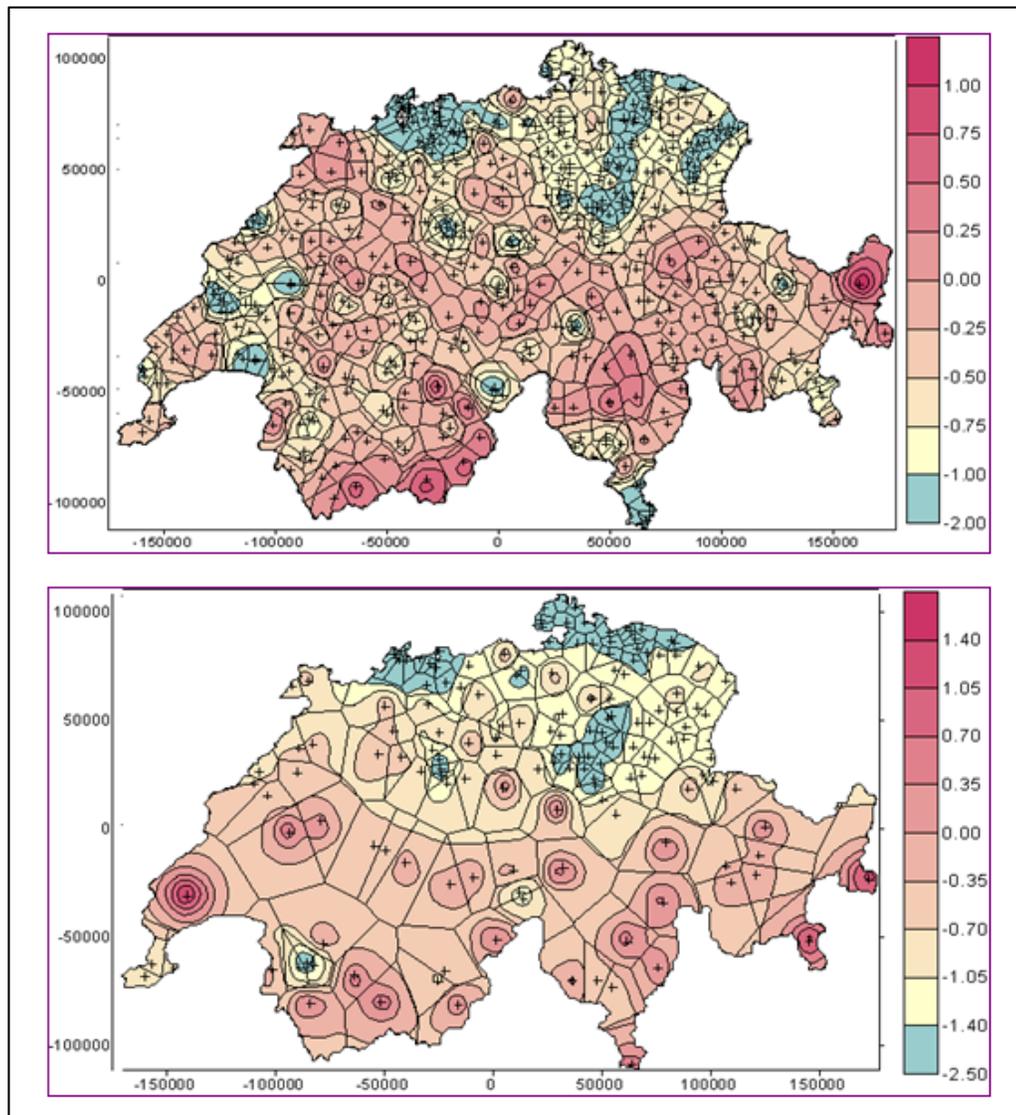


Figure 3.6: Exemple de coefficient de représentativité en \log_{10} des stations météorologiques servant de générateurs d'un diagramme de Voronoï (haut) 467 points, (bas) en Suisse [Dubois, 2000].

Ainsi, la correspondance entre des points de données de la réalité et les générateurs de cellules de Voronoï dans une tessellation peut être une tâche supervisée lorsqu'il s'agit de sélectionner un sous-ensemble de

points selon l'objectif de la modélisation. Nous traitons dans la section qui suit le cas particulier de notre application de simulation de l'écoulement des eaux de surface.

3.3.4 Une tessellation de Voronoï pour une simulation par automate cellulaire

La principale caractéristique commune entre une tessellation de Voronoï et un système de géosimulation est le concept d'adjacence qui définit le voisinage. Ainsi en intégrant une tessellation de Voronoï dans un système de géosimulation, il est possible de conserver la définition classique de voisinage des automates cellulaires. Cette idée est à l'origine de notre conception du système de simulation AC à base d'un partitionnement de Voronoï de l'espace. De plus, on est parti du fait que le concept de voisinage tel que défini par le diagramme de Voronoï se rapproche davantage de la perception humaine en comparaison avec un modèle de données à tessellation régulière, une suggestion appuyée par certains chercheurs selon Gold [1992]. Un autre aspect primordial de la géosimulation est la topologie intrinsèque de la tessellation de Voronoï qui lui confère une adaptabilité exceptionnelle à la résolution de problèmes de voisinage [Shi et Pang, 2000; Tomko, 2007; Rhind et al., 1988]. Aussi, comme indiqué au paragraphe 2-3, lorsque la taille ou la forme des objets spatiaux sont modifiées, le voisinage peut être reconstruit localement ce qui permet de bien intégrer l'aspect dynamique sans avoir à reconstruire la totalité de la tessellation [Carvalho et al., 2006b; Shi et Pang, 2000]

En outre, le fait que la tessellation de Voronoï se définisse comme une approche irrégulière est aussi un avantage majeur conféré aux automates cellulaires basés sur le diagramme de Voronoï. En effet, selon Shi et Pang [2000], une tessellation de Voronoï offre une flexibilité pour introduire les connaissances humaines dans les règles de transition de l'automate dans un système de géosimulation. Le couplage entre ce type de tessellation et les objets géographiques de l'environnement, ainsi que le grand nombre de voisins que peut posséder une cellule en comparaison avec les huit voisins d'une cellule raster pour un automate cellulaire traditionnel, sont aussi des critères du système de géosimulation étroitement liés à l'irrégularité de la tessellation qu'offre le diagramme de Voronoï.

Ainsi, en partant de ces avantages, on propose l'approche suivante : ***un découpage de l'espace selon un diagramme de Voronoï peut servir comme base géométrique pour un système de géosimulation à base d'automate cellulaire pour l'étude et la représentation des processus spatiotemporels.*** Pour justifier et valider cette approche, nous discutons dans les sections suivantes de la relation qui existe entre la tessellation de Voronoï et l'automate cellulaire comme outil de géosimulation en définissant les types de voisinage existants dans la simulation des processus spatiotemporels et en se basant sur quelques exemples. Par la suite, nous présentons explicitement comment nous bâtissons la structure d'un système de géosimulation sur une tessellation irrégulière de type Voronoï dans le cas des écoulements des eaux de surface.

D'après Pang et Shi [2002] et Edwards [1993], la structure de Voronoï combine les avantages des modèles matriciels et vectoriels car elle permet de représenter les objets de types point, ligne et polygone comme dans le modèle vectoriel, et aussi de bien définir les relations de voisinage entre les objets géographiques comme dans le modèle matriciel. Les définitions et appellations diffèrent sur ce sujet notamment suite à la substitution des cellules par des objets ou des entités géographiques dans un système de géosimulation. On parle alors dans certains cas d'automate cellulaire vectoriel [Moreno, Menard et al., 2008] et dans d'autres cas d'alternative aux automates cellulaires [Hamma et al., 2007].

3.4 Cas d'application de la solution proposée : Simulation de l'écoulement des eaux de surface par automate cellulaire basée sur un diagramme de Voronoï

3.4.1 Cas particulier de choix des points générateurs pour la simulation de l'écoulement des eaux de surface

Comme nous avons indiqué dans les exemples précédents, le choix des points générateurs pour la construction du diagramme de Voronoï est étroitement lié à la nature du processus étudié. On se propose dans cette section de présenter une approche pour le choix de ces points dans une application de simulation de l'écoulement des eaux de surface. Plusieurs problèmes spécifiques sont alors à résoudre pour atteindre cet objectif. D'abord, nous déterminons le ou les facteurs qui seront à la base de la sélection des points les plus représentatifs pour l'étude du processus d'écoulement de l'eau en surface. Ensuite, nous étudions l'impact de la disponibilité des données relatives à la compréhension et à l'évaluation de ce processus spatiotemporel. Enfin, nous présentons certains algorithmes existants offrant une sélection de points dans ce cas d'étude.

❖ L'altitude du terrain est le facteur prédominant dans le processus d'écoulement des eaux de surface

La littérature présente la pente du terrain comme étant la variable directrice de l'écoulement des eaux en surface. Une étude approfondie du processus de l'écoulement des eaux sera présentée dans le chapitre 6. Cependant, on rappelle ici qu'après l'interception éventuelle de l'eau des précipitations par la végétation, se fait un partage de la pluie disponible à la surface du sol en eau d'infiltration et eau de ruissellement. L'eau qui s'infiltrate contribue à la recharge de la nappe et au débit de base par un écoulement plus lent à travers les couches de sol. Dès que l'intensité des pluies dépasse la capacité d'infiltration du sol, l'eau qui reste ruisselle en surface. Cet écoulement de surface relatif à l'excès d'eau s'écoule par gravité le long des pentes formant ainsi l'essentiel de l'écoulement rapide de crue. De plus, tous les processus d'écoulement (souterrain, de subsurface et surfacique) sont influencés par la pente (Figure 3.7).

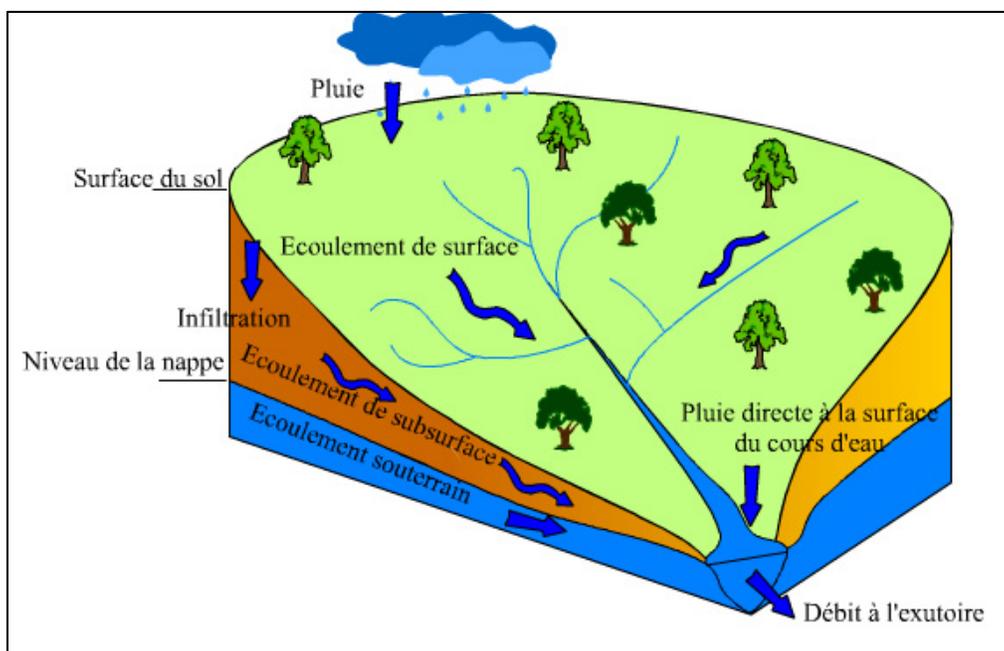


Figure 3.7: Processus d'infiltration et des écoulements des eaux

Nous mentionnons aussi que la vitesse du cours d'eau dans l'écoulement de surface est proportionnelle à la racine carrée de la pente (voir chapitre6). Étant donné que c'est la partie du processus que nous voulons étudier, nous retenons alors que c'est la pente du terrain qui régit l'écoulement en surface de l'eau des précipitations. Or, le calcul de la pente du terrain est une fonction de l'altitude qui représente ainsi le paramètre prépondérant dans la direction de l'écoulement surfacique des eaux. C'est pour cette raison que nous proposons d'y focaliser la sélection de points de mesures qui seront les générateurs d'une tessellation de Voronoï. Cette démarche est aussi en concordance avec la disponibilité et l'accès aux données d'altitude. Nous nous appuyons alors sur le fait que l'altitude du terrain est identifiée comme le facteur principal qui gouverne le processus spatiotemporel de l'écoulement des eaux de surface pour sélectionner les endroits les plus importants dans l'évolution du processus d'écoulement.

❖ Disponibilité des données d'altitude (relief du terrain)

La description la plus idéale du relief du terrain serait une fonction numérique qui associerait à chaque point de la surface terrestre une altitude. En pratique, dans les systèmes d'information géographique, le relief est traditionnellement représenté soit en mode vectoriel soit en mode raster. On cite les quatre représentations suivantes :

- **Les courbes de niveau** : En mode vectoriel, les courbes de niveau numérisées sont représentées par une succession de points à altitude constante qui sont repérés par leurs coordonnées planimétriques (Figure 3.8-A). La procédure de représentation numérique des courbes de niveau

permet de saisir chaque courbe, puis de la discrétiser en segments afin d'obtenir une liste des coordonnées planimétriques de points.

- **Les profils** : Il s'agit d'échantillonnages réguliers dans une seule direction. La distance séparant les points cotés dépend de la pente. Pour stocker numériquement les profils, il suffit d'enregistrer une seule des deux coordonnées planimétriques en plus de l'altitude (Figure 3.8-B).
- **Le réseau irrégulier de triangles (TIN)** : Le principe de cette représentation en maillage est de conserver les points significatifs du relief en retenant les sommets obtenus par triangulation, ce qui permet de réduire la redondance dans les zones planes (Figure 3.8-C). La triangulation de Delaunay est une optimisation d'un TIN avec le minimum possible de triangles. Un des avantages du TIN est que chaque triangle ne possédant qu'une seule pente peut être représenté graphiquement en 3D sans aucune approximation.
- **Le maillage régulier de carrés** : C'est le type de grille le plus utilisé en modélisation du relief puisqu'il est le plus adapté à la compatibilité avec d'autres formes d'information numérique (Figure 3.8-D). La densité de points enregistrés dépend de la résolution d'échantillonnage.

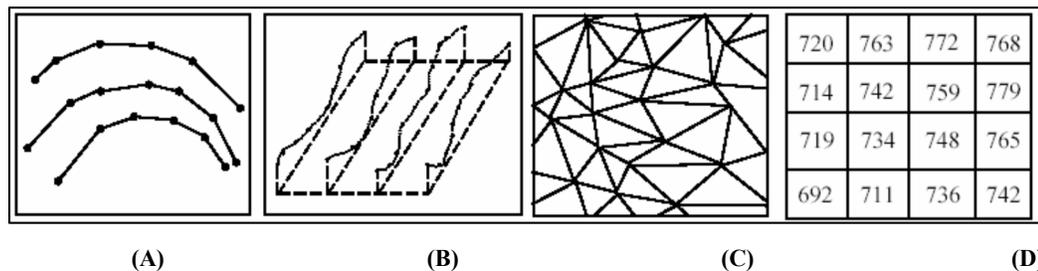


Figure 3.8: Types de modèles numériques de terrain

Plusieurs types de données peuvent être disponibles pour renseigner sur le relief du terrain. Les plus traditionnels sont les courbes de niveaux qui étaient utilisées avant l'ère de la numérisation cartographique. Les plus communément utilisés de nos jours sont les modèles numériques de terrain (MNT) à maillage carré ou en TIN. L'accès à l'un ou l'autre type de données demeure certes dépendant de la région à étudier. En raison de leur prévalence, les MNT à maille carrée sont les plus couramment utilisés pour modéliser l'écoulement des eaux de surface dans les SIG. Ceci dit, le choix de l'un ou l'autre des modèles de relief n'altère en rien la démarche générale, sauf évidemment dans la procédure de sélection des points les plus importants en fonction de l'élévation. Néanmoins, nous nous proposons, dans un premier temps, de discrétiser l'espace selon un diagramme de Voronoï dont les générateurs sont irrégulièrement répartis et où est définie la correspondance entre les cellules de Voronoï et celles de l'automate cellulaire. Nous montrerons par la suite dans les chapitres suivants comment procéder pour choisir les points significatifs

pour le cas d'étude de l'écoulement des eaux de surface. Notamment, dans le chapitre 4, où seront présentés quelques algorithmes de sélection de points selon l'altitude.

Dans la section qui suit, nous présentons les bases d'une simulation des processus spatiotemporels par automate cellulaire fonctionnant sur une tessellation irrégulière de type Voronoï, et nous précisons plus spécifiquement les relations de voisinage dans le cas particulier du processus d'écoulement des eaux de surface.

3.4.2 Définition d'un voisinage orienté à base de Voronoï pour la simulation de l'écoulement des eaux de surface

L'objectif général étant d'étudier et de représenter les processus spatiotemporels, nous nous intéressons plus spécifiquement à la simulation du phénomène de l'écoulement surfacique par automate cellulaire. En nous basant sur les caractéristiques précédemment décrites du diagramme de Voronoï, ainsi que sur sa compatibilité avec les systèmes de géosimulation, nous nous proposons de discrétiser l'espace selon une structure de Voronoï dont les générateurs sont les points d'élévation les plus importants de la zone étudiée. La démarche suivie montre, en premier lieu, l'utilisation du diagramme de Voronoï comme une base géométrique qui supporte l'outil de simulation par AC. Dans la section suivante, nous expliquons l'approche d'une simulation par automate cellulaire sur une tessellation de Voronoï, et plus précisément, nous faisons le lien entre la structure de Voronoï et l'automate cellulaire au niveau du voisinage.

Les automates cellulaires traditionnels basés sur des grilles carrées utilisent généralement les voisinages de Moore et de Von Neumann où les degrés de voisinage définis par le nombre de voisins de chaque cellule sont respectivement de 1:4 ou 1:8 [Benenson et Torrens, 2004]. Par contre, pour une partition de Voronoï, le nombre de voisins est différent d'une cellule à une autre dépendamment de la distribution spatiale des générateurs de cellules de Voronoï. De plus, des paramètres comme la forme géométrique, la distance séparant les générateurs de deux cellules voisines ainsi que la longueur des arêtes communes ne sont pas constantes et ne peuvent pas être fixées à l'avance. Cependant, la triangulation de Delaunay associée à la discrétisation spatiale dans un diagramme de Voronoï sert à définir les liens de voisinage qui constituent une composante importante de l'approche par automate cellulaire. En effet, selon Gold et Angel [2006], le diagramme de Voronoï partage l'espace en régions de telle sorte que tout point soit associé au plus proche générateur de Voronoï, ce qui permet une discrétisation automatique de l'espace qui génère une structure d'adjacence servant à la création d'une table de topologie [Gold 2000]. Plus spécifiquement, la structure de Voronoï fait correspondre à chaque cellule de Voronoï un vecteur contenant de l'information sur ses vertex, ses côtés et les générateurs de ses voisins; ce qui permet de connaître les paramètres du voisinage d'une cellule et, par la suite, d'établir les règles de transition et de mettre à jour l'état général de la grille d'automates.

Dans notre cas, nous définissons un voisinage spécifique basé sur l'élévation du terrain ainsi que sur le phénomène étudié. En d'autres termes, le point de départ est l'élévation du terrain qui permet d'identifier les points les plus importants de la zone d'étude servant de générateurs de cellules dans le diagramme de Voronoï. Par la suite, les gradients d'élévation entre les cellules de Voronoï voisines permettent de définir le sens d'écoulement de l'eau entre les cellules et ainsi d'établir les relations de voisinage intrinsèques aux phénomènes d'écoulement des eaux de surface.

En effet, comme expliqué dans la Figure 3.9, une cellule A est considérée comme voisine à une cellule B non seulement lorsque c'est une voisine au sens géométrique dans le diagramme de Voronoï, mais aussi lorsqu'elle vérifie une condition nécessaire par rapport au sens de l'écoulement de l'eau : Il faut que l'eau se déplace de A vers B. Cette situation ne signifie pas néanmoins que B est une cellule voisine de A. On parle alors d'un type de voisinage particulier qu'on peut intituler « **voisinage orienté non commutatif** » [Sammari et al. 2012].

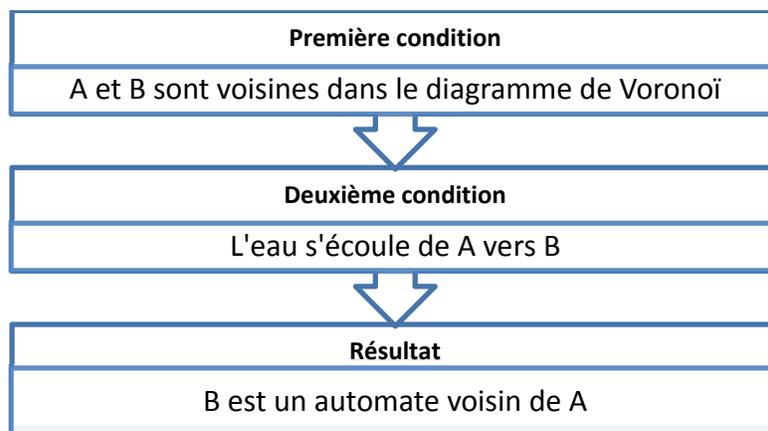


Figure 3.9: Définition du voisinage orienté

Dans ce qui suit, nous utilisons la notation de voisinage orienté (VO) pour ce type de voisinage. Ainsi, il peut arriver qu'une cellule de Voronoï n'ait aucun voisin au terme du VO, si son élévation est inférieure à celles de tous ses voisins du diagramme de Voronoï, ce qui ne permet pas d'écoulement d'eau vers ses voisins. Dans ce cas, cette même cellule est de son côté la voisine selon le VO de toutes les cellules qui lui sont voisines dans le diagramme de Voronoï puisqu'elle représente un creux dans la surface du terrain et donc un endroit où l'eau de surface s'accumule. Plus explicitement, le VO unidirectionnel, non commutatif matérialise les relations de voisinage amont-aval dans le diagramme de Voronoï. La Figure 3.10, montre comment le VO est une combinaison du voisinage géométrique dans le diagramme de Voronoï et la différence d'altitude entre les cellules. Ainsi, pour l'exemple d'une cellule centrale (C) ayant sept voisins (V_i)

dans le diagramme de Voronoï, dont uniquement trois lui sont en aval, il existe uniquement trois relations de VO pour la cellule (C) [Sammari et al. 2012].

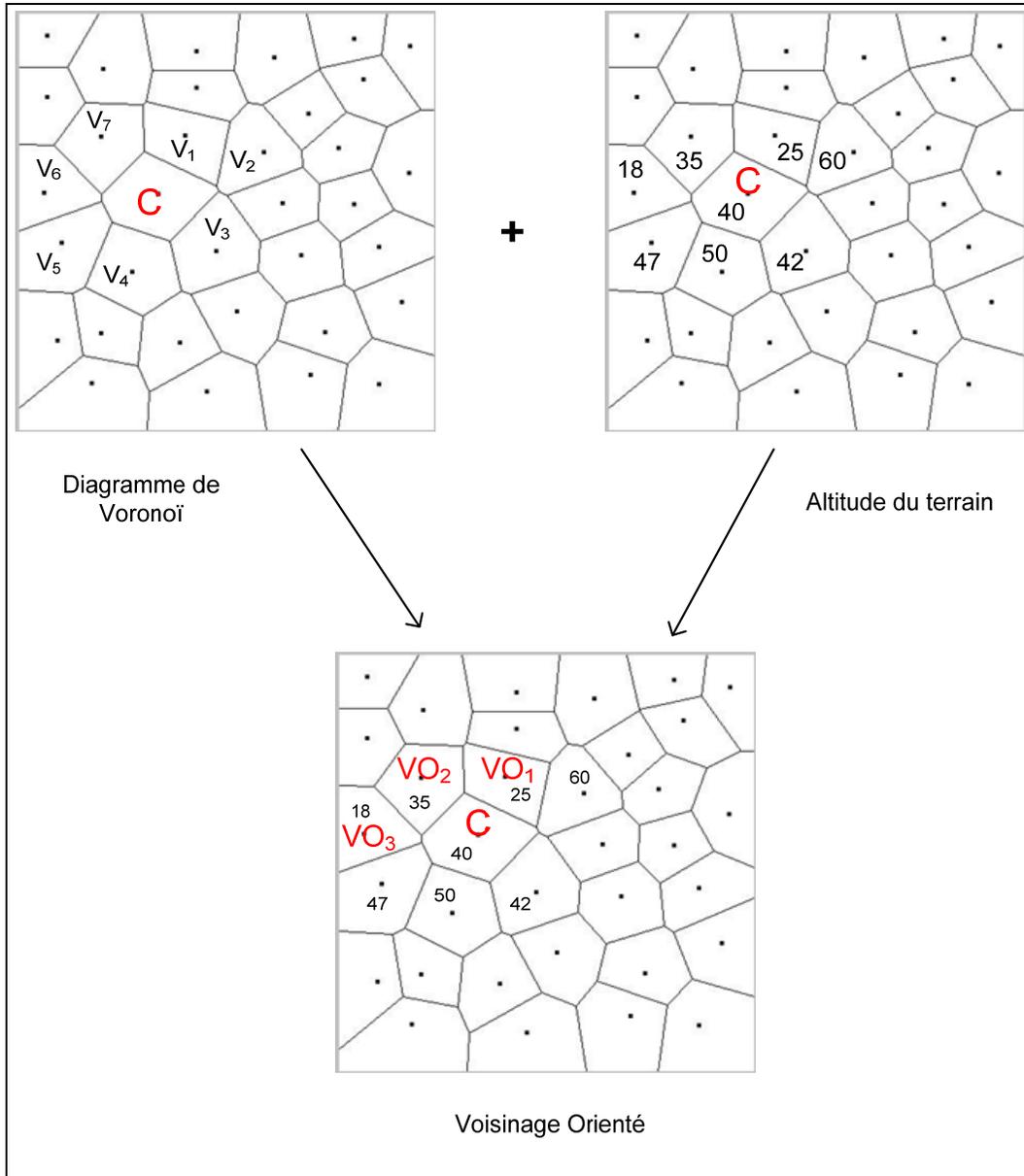


Figure 3.10: Voisinage orienté résultant du voisinage de Voronoï et de l'altitude du terrain, (C) cellule centrale, (V) voisin dans le diagramme de Voronoï, (VO) voisin au sens du voisinage orienté

Dans la pratique, ce voisinage particulier peut être prédéterminé avant même l'exécution de l'algorithme de simulation. Il provient en effet du découpage de l'espace ainsi que de la différence d'altitude du terrain, deux paramètres résultant de l'élévation du terrain pour le cas de l'écoulement des eaux de surface. Les

algorithmes utilisés pour la construction de la structure de données relatives seront présentés dans le chapitre 5.

3.5 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté les tessellations régulières et leurs limites dans le domaine de la géosimulation. Puis nous avons montré l'utilité des tessellations irrégulières et notamment le diagramme de Voronoï avec des exemples tirés de la littérature. Nous avons aussi présenté les types de voisinages des tessellations utilisées en géosimulation. Nous avons proposé notre solution de découpage de l'espace en vue de simuler les processus spatiotemporels. Elle s'appuie sur le diagramme de Voronoï, ce qui nous a menés à introduire le problème spécifique de sélection des points générateurs des cellules de Voronoï dans le cas général et, plus particulièrement, dans le cas de l'écoulement des eaux de surface. Finalement, nous avons défini un type de voisinage approprié au processus étudié qui combine le voisinage implicite de la tessellation de Voronoï et les facteurs responsables du processus d'écoulement. Nous avons ainsi proposé des éléments de réponse au problème de discrétisation de l'espace pour simuler les processus spatiotemporels. Les fonctions et algorithmes de construction géométrique du diagramme de Voronoï ainsi que la structure de données appropriée seront présentés en détails dans le chapitre 6.

Dans le chapitre 4, nous étudions la hiérarchisation des tessellations irrégulières en vue de concevoir un prototype de simulation par automate cellulaire basé sur une tessellation irrégulière et hiérarchique afin de comprendre et représenter les processus spatiotemporels et spécifiquement le processus d'écoulement des eaux de surface.

Chapitre 4 : Une approche hiérarchique de représentation des processus spatiotemporels

4.1. Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la décomposition d'un processus spatiotemporel vise une meilleure compréhension de son évolution en se basant sur le principe que les interactions locales sont à l'origine de la dynamique globale. Dans ce chapitre, nous présentons les fondements de la hiérarchie d'un processus spatiotemporel et nous montrons comment le modéliser en se basant sur sa représentation hiérarchique. Nous nous basons sur la définition de la procédure générale comme une succession de deux démarches : la discrétisation que nous avons étudiée dans le chapitre 3, puis la hiérarchisation dont nous expliquons la démarche dans le présent chapitre. Nous illustrons dans la Figure 4.1 les processus de discrétisation et de hiérarchisation dans la modélisation d'un processus spatiotemporel.

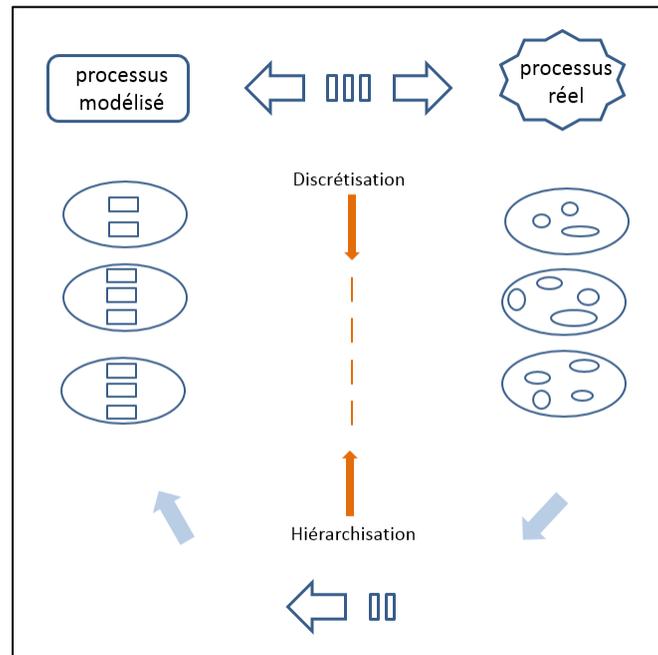


Figure 4.1: Discrétisation et hiérarchisation d'un processus spatiotemporel

Dans ce chapitre, nous montrons comment la représentation hiérarchique des processus spatiotemporels peut être utilisée dans la simulation par automate cellulaire. Nous présentons les principes et alternatives

d'automate cellulaire hiérarchique, ainsi que la mise en place de la solution que nous proposons pour une simulation hiérarchique du processus d'écoulement des eaux de surface. Plusieurs problèmes spécifiques se posent alors: ***Comment hiérarchiser une discrétisation irrégulière de l'espace? Comment définir les niveaux de cette hiérarchie? Quelles entités choisir pour chaque niveau? Et quelles sont les caractéristiques d'un AC hiérarchique?***

Ce chapitre présente d'abord la notion de hiérarchie en géosimulation en étudiant les géométries et l'utilisation des structures hiérarchiques notamment de type régulières. Par la suite, une structure de données spatiale hiérarchique de la tessellation irrégulière (implantée dans le chapitre 3) est proposée, où nous traitons la question spécifique de sélection des données requises par la représentation multi-échelle. Finalement, nous expliquons la solution retenue pour la construction des échelles de la structure de Voronoï hiérarchique et nous montrons le résultat obtenu.

4.2 Représentation hiérarchique en géosimulation

En conformité avec le chapitre 2, la représentation des processus spatiotemporels nécessite la prise en compte d'objets et de phénomènes de spatialités et de temporalités différentes selon le cas d'étude. Lors du déroulement d'un processus, le temps et l'espace peuvent être considérés comme deux attributs totalement indépendants. La notion de discrétisation spatiotemporelle n'est donc pas appliquée simultanément pour les deux attributs puisque leurs unités de mesures et leurs intervalles sont complètement dissociés.

Si on prend l'exemple des processus hydrologiques, on peut parler d'écoulement journalier, d'écoulements saisonniers et d'évènements occasionnels d'inondations ou de sécheresse. Il s'agit dans ce cas de différents niveaux d'échelles temporelles d'un même processus. Aussi, d'une manière analogue, on peut représenter uniquement les bassins versants et les principaux cours d'eau du réseau hydrographique; comme on peut aussi chercher plus de détails en prenant en compte les sous-bassins versants et les ruisseaux. On parle, dans ce cas, d'échelle spatiale du processus. Ensuite, plusieurs combinaisons sont possibles entre les échelles spatiales et temporelles aboutissant à une multitude de discrétisations spatiotemporelles.

Dans la pratique, les structures de données hiérarchiques sont utilisées dans les domaines de l'imagerie, des SIG et de la robotique. Leur concept se base sur une décomposition récursive de la tessellation initiale afin d'atteindre le ou les niveaux de détails adéquats pour représenter le plus fidèlement possible le phénomène étudié. Ce principe de division devient utile quand il s'agit de focaliser sur un sous-ensemble d'entités. Dans la section suivante, nous présentons la théorie de la hiérarchie, les géométries hiérarchiques utilisées en géosimulation, leur application pratique et le résultat en matière d'AC hiérarchique.

4.2.1 La théorie de la hiérarchie

La théorie de la hiérarchie a été introduite par Simon [1962] et est utilisée dans une diversité d'études dans plusieurs disciplines telles que la science de la gestion, l'économie, la psychologie, la biologie et l'écologie [Wu et David, 2002] afin de traiter la complexité des processus. Selon cette théorie, les systèmes complexes peuvent être simplifiés grâce aux principes de décomposition spatiotemporelle. Ces principes permettent d'identifier les caractéristiques spatiales et temporelles selon différents niveaux qui dépendent non seulement de la nature du processus étudié mais aussi de l'objectif de l'étude. Un système hiérarchique est composé de deux structures complémentaires : l'une dans la direction verticale est composée de niveaux; l'autre dans la direction horizontale est composée d'entités intégrant des objets, des relations et des agents permettant au système de fonctionner comme une totalité [Wu, 1999]. La Figure 4.2 illustre les structures verticales et horizontales selon la théorie de la hiérarchie.

Les niveaux hiérarchiques de la structure verticale sont générés en fonction des périodes et des fréquences des processus qui peuvent être traduites par la vitesse du comportement, les temps des cycles, de relaxation et de réponse. Ainsi, les niveaux supérieurs sont caractérisés par des entités plus larges et des événements de basses fréquences, tandis que les niveaux inférieurs présentent des événements plus rapides et des entités plus petites. La relation entre deux niveaux adjacents de la structure verticale est généralement asymétrique puisque le niveau supérieur exerce les contraintes et les conditions aux limites, alors que le niveau inférieur produit les conditions initiales. Quant à la relation au niveau horizontal, elle est considérée comme relativement symétrique entre les différentes composantes. Cette relation dépend des liens qui existent entre les entités du même niveau. De plus, selon Wu [1999], la théorie de la hiérarchie considère aussi la perte de couplage qui peut avoir lieu entre les niveaux de la composante verticale et entre les entités de la composante horizontale.

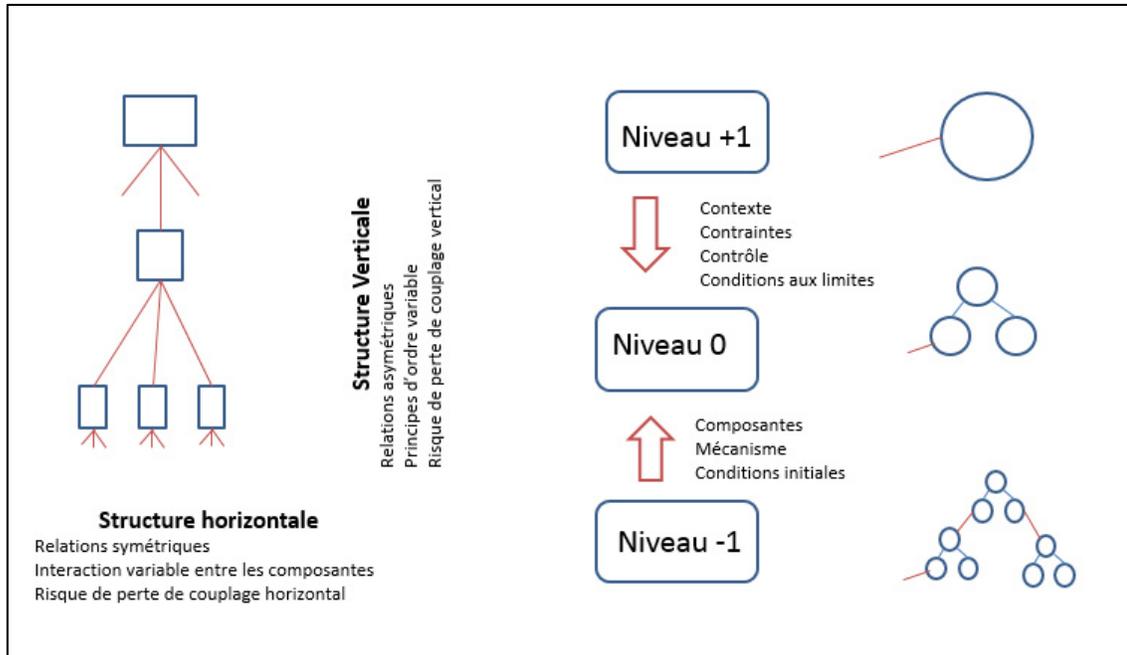


Figure 4.2: Illustration des concepts de la théorie de la hiérarchie [Wu et David, 2002]

4.2.2 Géométrie des structures hiérarchiques

Tout comme la procédure de partitionnement de l'espace de simulation, la décomposition hiérarchique dans un système de géosimulation suit un schéma similaire puisqu'elle est fonction de la décomposition spatiale employée. En effet, les hiérarchies qui se basent sur des tessellations régulières telles que les tessellations carrées et hexagonales ne tiennent pas compte des objets spatiaux qui font partie de l'espace modélisé. Elles dépendent uniquement de ce dernier [Pang et Shi, 1998]. Cependant, une représentation hiérarchique issue d'une décomposition irrégulière de l'espace offre à la fois davantage de réalisme pour la prise en compte des objets spatiaux et aussi plus de liberté dans la construction du modèle spatial. Par ailleurs, le degré de complexité dans la définition de la représentation hiérarchique irrégulière demeure nettement supérieur par rapport à une représentation multi-échelles de tessellation régulière. En effet, à l'inverse d'une application automatique des hiérarchies intrinsèques aux tessellations régulières, il devient nécessaire de tenir compte des entités géographiques contenues dans l'espace durant la procédure de hiérarchisation. En outre, si les niveaux d'agrégation sont prédéfinis et peuvent être infinis pour les structures régulières, c'est lors de la hiérarchisation d'une tessellation de forme irrégulière que nous définissons les différents niveaux d'échelles. Ceci implique un découpage étroitement lié aux entités géographiques mais aussi imprévisible, tant dans la forme géométrique résultante que dans les échelles définies. Dans la section qui suit, nous présentons les aspects hiérarchiques des tessellations régulières.

- **Hiérarchie carrée : la structure en quadtree**

Étant la plus régulière, la tessellation carrée a l'avantage d'être décomposée ou agrégée en éléments géométriques ayant la même forme et la même orientation [Laurini et Thompson, 1992]. L'opération de subdivisions successives d'un carré initial en quatre carrés de tailles égales est appelée segmentation en quadtree. Nous montrons les étapes de construction d'une structure en quadtree ainsi que l'arbre quaternaire qui représente cette subdivision dans la Figure 4.3. Selon Samet [1984], la manière la plus répandue de représenter la décomposition de l'espace est le quadtree qui est une structure sous forme d'arbre où chaque nœud pointe vers ses descendants. L'inconvénient de cette représentation est la perte d'espace dans la mémoire lors du stockage de la structure. D'où le recours à des variantes plus performantes n'utilisant pas les pointeurs. On cite le « quadtree linéaire » [Schrack, 1992] où chaque nœud est représenté par un couple unique de nombres appelés codes de localisation: le premier indique l'emplacement du nœud dans l'arbre et le second est le chemin parcouru pour y parvenir. L'avantage de cette structure par rapport au quadtree régulier (appelé aussi quadtree par point) réside dans le temps d'exécution lors de la recherche de voisins; puisqu'il n'est plus nécessaire de parcourir tous les points dans l'arbre : il suffit plutôt de manipuler les codes de localisation.

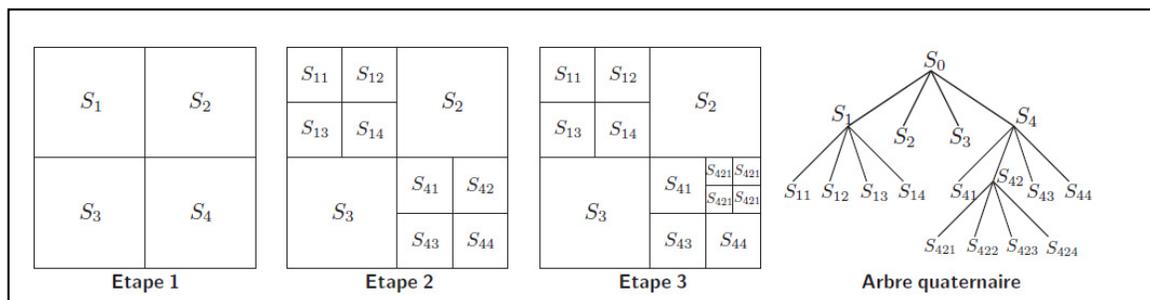


Figure 4.3: Construction d'un quadtree par subdivisions successives

- **Hiérarchie triangulaire :**

D'autres approches de décomposition hiérarchique se basent sur une division en triangles. Schrack [1992] utilise des triangles équilatéraux de même taille. D'autres auteurs comme Samet et al. [1992], Goodchild et al. [1992], Otoo et al. [1993] et Dutton [1996] ont utilisé cette méthode de hiérarchisation avec des versions différentes de numérotation et de recherche de voisinage en adaptant les techniques traditionnelles du quadtree. Ils optent pour une division en quatre d'un triangle équilatéral. Contrairement, dans les travaux de Floriani et al. [1995, 2002], une division récursive de triangles rectangles se fait en partant d'une tessellation initiale en carrés et supportée par une structure intitulée « triangle bintree » basée sur la bissection du triangle parent en deux triangles rectangles qui représentent alors les deux nœuds fils correspondants (Figure 4.4).

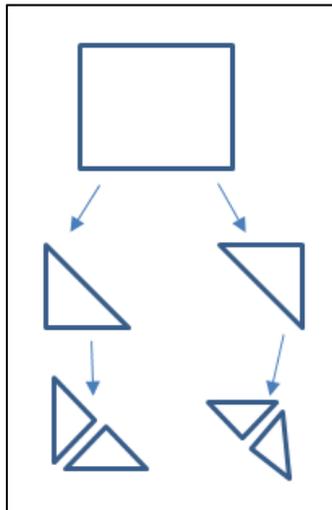


Figure 4.4: Bissection triangulaire: la structure Bintree

- **Hiérarchie hexagonale**

Bien qu'une tessellation hexagonale ne soit pas infiniment divisible, plusieurs approches de hiérarchisation ont été mises en place. Par exemple, chaque cellule hexagonale peut être divisée à l'infini si elle est décomposée récursivement en triangles équilatéraux (Figure 4.5).

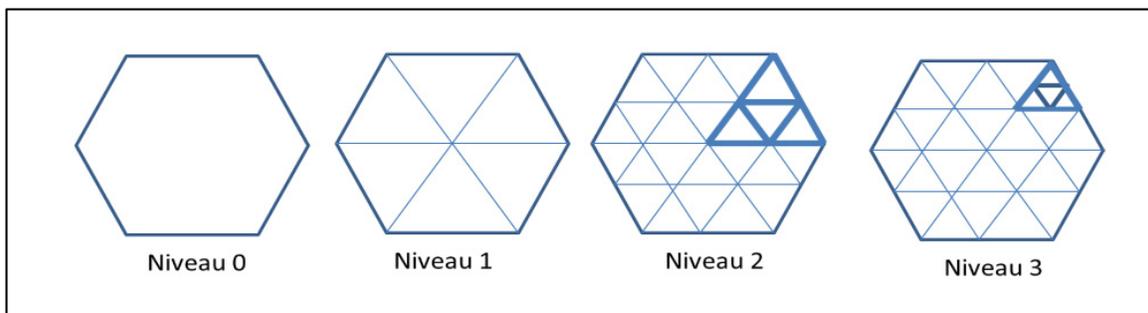


Figure 4.5: Décomposition illimitée d'un hexagone en triangles équilatéraux

On cite aussi la structure proposée par Boots dans [Boots et al., 1999] où quatre hexagones adjacents sont fusionnés pour former un rhomboïde d'où le nom de la structure : « Hexagonal or Rhombus » ou HoR. Ce qui permet d'obtenir une tessellation de rhomboïdes qui sont des cellules infiniment décomposables (Figure 4.6).

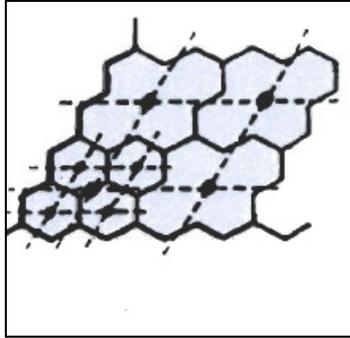


Figure 4.6: Fusion de quatre hexagones et formation du HoR

En outre, l'avantage qu'offre le degré de symétrie de la tessellation hexagonale permet d'adresser les cellules selon un système de coordonnées entières naturelles dans un repère orthonormé. Ainsi, puisque les sommets des hexagones ne sont pas alignés selon deux directions orthogonales, il est possible d'utiliser plutôt deux ou trois axes asymétriques (Figure 4.7) qui permettent d'avoir des coordonnées entières. Il devient alors possible de manipuler les différentes opérations géométriques des vecteurs dans un plan telles que l'addition, la soustraction et la multiplication à ces adresses.

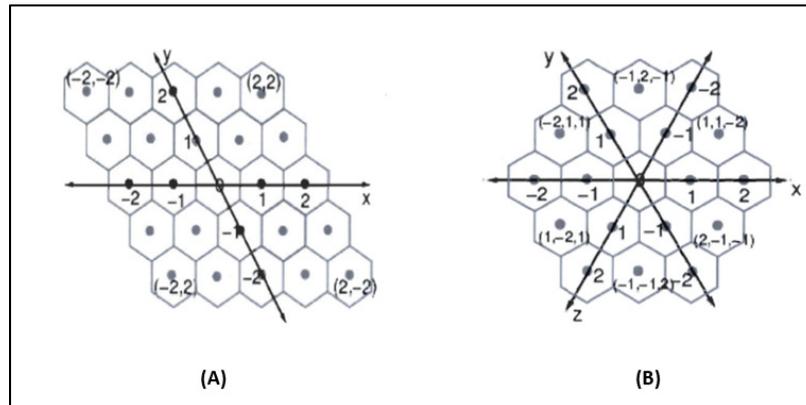


Figure 4.7: Adressage selon deux (A) ou trois (B) axes asymétriques des tessellations hexagonales [Burt 1980]

Une autre méthode élaborée par Burt [1980] permet de construire des pyramides hiérarchiques hexagonales basées sur une structure « sept-tree » en 2D. Chaque niveau hiérarchique est alors un regroupement de sept cellules de type cluster. Cette approche a évolué avec Gibson [1982] vers une structure extensible en plusieurs dimensions. Le principe d'adressage dans un sept-tree est de donner la valeur 0 à la cellule centrale, puis de numéroter les six cellules voisines dans le sens des aiguilles d'une montre. Ainsi, une adresse unique est attribuée à chaque hexagone et est représentée par une séquence de nombres faisant chacun référence au niveau d'agrégation et au numéro correspondant à la position de la cellule dans le voisinage.

4.2.3 Automates cellulaires hiérarchiques

Bien que les automates cellulaires soient assez souvent utilisés comme outils de description et de modélisation des phénomènes naturels, les exemples de leur utilisation pour la simulation multi-échelle ne sont pas nombreux. En particulier, les processus spatiotemporels qui font partie des phénomènes complexes requièrent une prise en considération de leur nature multi-échelle dans les AC qui les décrivent. Certains auteurs [Israeli et Goldenfeld, 2006] ont contribué aux fondements théoriques de la représentation multi-échelle dans les modèles d'AC, alors que d'autres ont plutôt étudié les structures hiérarchiques dans plusieurs domaines sans introduire d'AC [Wu et David, 2002; Wu et Loucks, 1995]. Les AC hiérarchiques ont été d'abord utilisés par Weimar [2001] dans un couplage entre des AC microscopiques et des AC macroscopiques. Le problème soulevé dans l'utilisation des AC hiérarchiques est lié aux méthodes de superposition des grilles relatives aux différentes échelles. En effet, la démarche générale est d'abord d'adapter l'échelle du processus local à la taille de la grille où il est représenté. Ensuite, il s'agit d'intégrer les grilles de différentes échelles dans une région de superposition où l'échange entre les différentes échelles à travers leurs grilles repose sur des procédures d'interpolation. Les défis seront alors de résoudre d'abord les problèmes habituels de non superposition des limites des cellules entre les différentes échelles et ce notamment pour les tessellations à géométrie irrégulière. Ensuite, il s'agit d'interpoler les attributs et les états des cellules dans des étendues et limites spatiales différentes selon la géométrie et la taille des cellules dans chaque échelle. Finalement, l'utilisation de l'automate cellulaire hiérarchique ajoute un défi additionnel lié à l'interpolation du temps puisqu'il s'agit de la simulation des processus spatiotemporels. Dans la littérature, les travaux modélisant les phénomènes multi-échelles avec des AC sont peu nombreux et plutôt présents dans le domaine de l'utilisation du sol et des systèmes géographiques. En outre, les approches d'intégration de l'AC dans la modélisation multi-échelles sont variées.

- Par exemple, Hoekstra et al. [2008] ont présenté un couplage entre un processus microscopique et un autre macroscopique dans ce qu'ils définissent par Automates Complexes (AxC) où un système multi-échelles peut être décomposé en plusieurs automates cellulaires uni-échelle qui interagissent mutuellement de sorte à reproduire le plus fidèlement possible le comportement dynamique du processus multi-échelles. La décomposition est obtenue en construisant une carte de séparation d'échelles dans laquelle chaque système est représenté par une aire qui correspond à son échelle spatiale et temporelle (Figure 4.8). Dans leur travail, ils présentent les entrées du processus macroscopique dans chacun de ses pas de temps comme une sortie provenant de la simulation explicite du processus microscopique.

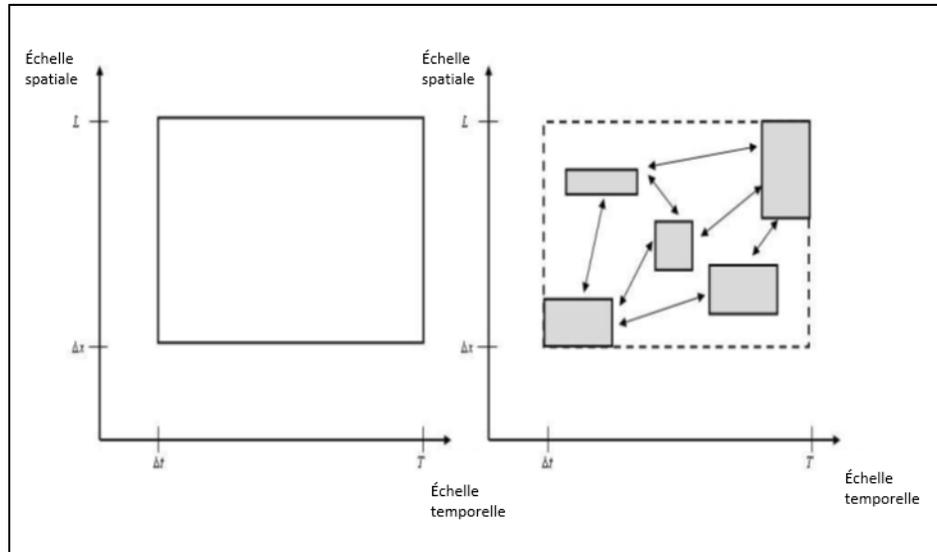


Figure 4.8: Séparation des échelles spatiales et temporelles pour un AC simple et AxC [Hoekstra et al, 2008]

- Un autre exemple présenté par Hoekstra et al.[2010] se base sur un opérateur d'abstraction que l'auteur définit comme une fonction qui transforme un système cellulaire en un autre avec moins de cellules, ce qui donne un système physique avec moins de composantes. Il définit ainsi le lien entre l'espace original et l'espace transformé par un voisinage inter-niveau qui régit les interactions entre les espaces d'abstraction. Chaque espace d'abstraction se définit alors par la somme de deux espaces : le premier contenant les cellules originales et le second les nouvelles cellules construites par abstraction. Le voisinage traditionnel est quant à lui identifié comme un voisinage intra-niveau et il régit les interactions entre les cellules d'un même espace. On montre dans la Figure 4.9 un exemple de l'opérateur d'une abstraction ternaire pour une distribution irrégulière de cellules. Cette abstraction permet de fusionner trois cellules (les cellules grises de la partie gauche de la Figure 4.9) en une seule (cellule grise de la partie droite de la Figure 4.9).

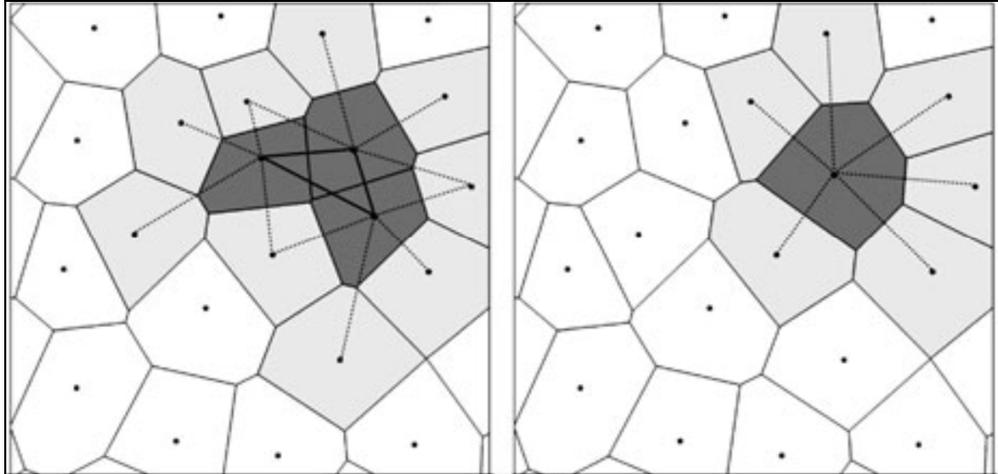


Figure 4.9: Exemple d'une abstraction ternaire pour une distribution irrégulière de cellules

Ces deux exemples montrent deux approches complètement différentes d'automates cellulaires hiérarchiques. Dans notre cas, l'objectif est de hiérarchiser une structure spatiale irrégulière pouvant supporter une simulation par AC. Plus explicitement, à partir d'une tessellation irrégulière qui représente les processus spatiotemporels en servant de base géométrique pour une simulation par AC, nous résolvons les problèmes spécifiques afin de générer une structure hiérarchique permettant une représentation multi-échelle. Dans la section suivante nous présentons les principes d'une représentation multi-échelle et nous expliquons la solution proposée. Nous étudions aussi le problème de sélection des données selon l'échelle de représentation. Par la suite, nous spécifions les caractéristiques d'un automate cellulaire hiérarchique basé sur un diagramme de Voronoï pour la simulation du processus d'écoulement des eaux de surface.

4.3 Cadre conceptuel de la structure hiérarchique proposée

4.3.1 Représentation multi-échelle et/ou multi-résolution

En géosimulation, l'aspect spatial est généralement lié à la tessellation de l'espace et la définition des relations de voisinage entre les entités spatiales d'un processus. Cependant, l'interaction entre les différentes entités spatiales à un niveau d'échelle donné engendre dans la plupart des cas l'apparition de phénomènes émergents dans d'autres échelles. Et c'est cet aspect spatial introduisant à la fois des notions d'échelle de résolution et de multi-représentation qui est défini dans cette section afin de mieux concevoir l'approche irrégulière de la tessellation hiérarchique.

Dans un contexte de partitionnement de l'espace, les notions d'échelle et de résolution spatiale sont étroitement liées. Si on considère un espace de dimension géométrique D et de taille L , et que nous le découpons en r^D cases, soit en r intervalles le long de chaque dimension d'espace, on dit alors qu'on obtient un découpage de résolution r et on définit l'échelle l comme étant inversement proportionnelle à la

résolution, ce qui donne une résolution $r = \frac{L}{l}$. Ainsi, la résolution la plus grossière, où tout l'espace est considéré comme un seul bloc (soit $r=1$) correspond à l'échelle la plus large, tandis que la résolution la plus fine (soit $r=L$) correspond à l'échelle la plus réduite [Verrier, 2011].

Dans la pratique, dans les systèmes d'information géographique, la résolution se rapporte plutôt au niveau de détail d'un ensemble de données puisque la norme ISO la définit comme la métadonnée qui « fournit une idée sur la densité spatiale des données ». On l'exprime alors comme un ensemble de valeurs de distance allant de zéro à plusieurs valeurs dans le cas d'une série de données maillées et de produits dérivés d'imagerie. Pour les cartes et leurs produits dérivés, la résolution est plutôt exprimée en échelles équivalentes [CERTU, 2010]. Habituellement, on associe une échelle pour chaque représentation spatiale et on définit la résolution comme étant relative à la fréquence des données. Par exemple, dans une structure raster la résolution correspond à la taille du pixel tandis que l'échelle indique le rapport entre le modèle représenté et sa réalité.

Dans le cadre de mise en place d'une structure hiérarchique, nous entendons par échelle de représentation un niveau de représentation lié à la fois au point de vue de l'observateur et au niveau de l'évolution du processus. Plus explicitement, nous voulons représenter les différents niveaux dans lesquels se déroule un processus spatiotemporel ainsi que les sous processus associés. Chaque niveau correspondrait donc à une échelle. La notion de résolution mesure dans ce cas l'abondance des entités spatiales qui sont en relation avec le phénomène étudié et qui contribuent à son évolution. Par exemple l'échelle globale (macro-échelle) est associée à la représentation la plus grossière comme les précipitations à l'échelle d'un pays; l'échelle locale (micro-échelle) représente les sous-processus se déroulant dans des étendues spatiales plus réduites telles que les municipalités. Quant aux échelles intermédiaires, nous les nommons méso-échelles. Des appellations similaires sont citées par Zhilin Li [2007] dans son livre '*Multi-Scale spatial representation*' où il présente une classification générale des types d'échelles selon plusieurs critères que nous résumons dans le Tableau 4.1.

Tableau 4.1 : Classification de types d'échelles selon différents critères

Critère	Type d'échelle
Domaine d'intérêt	Digital
	Spatial
	Temporel
	Spectral
	Radiométrique
Portée d'intérêt	Micro
	Géo-échelle
	Macro
	Réalité
Étape du processus	Source de données
	Échantillonnage
	Processus
	Modélisation

	Représentation
	Nominale
Échelle de mesure	Ordinale
	Intervalle
	De rapport

Zhilin Li [2007] affirme aussi que des cartes de la même région à des échelles différentes ne représentent pas la même réalité (chapitre 3), une notion qu'il lie directement aux niveaux d'abstraction. C'est dans ce sens, qu'en plus du rapport de distance, l'échelle indique aussi le niveau d'abstraction ou ce qu'on appelle niveau de détail (LoD pour 'Level of Detail'). Une représentation multi-échelle implique dans ce cas plusieurs niveaux de détail (LoD).

Dans ce même cadre, notre objectif est de construire une structure multi-échelle ainsi qu'une procédure permettant le passage d'une échelle à l'autre dans la représentation spatiotemporelle d'un processus.

4.3.2 Présentation de la solution proposée

Il s'agit de mettre en place une démarche pour représenter les processus spatiotemporels selon une discrétisation irrégulière de l'espace à plusieurs échelles spatiales. L'objectif principal est d'abord d'identifier les niveaux de représentation d'un processus selon une tessellation irrégulière et de pouvoir ensuite passer d'un niveau à l'autre dans une même tessellation. Nous proposons une approche de hiérarchisation de la structure de données à géométrie irrégulière basée sur la tessellation de Voronoï (chapitre 3).

L'un des problèmes de la représentation hiérarchique réside d'abord dans l'identification des échelles spatiales du processus. Il ne s'agit pas de prédéfinir des échelles de représentation d'une manière aléatoire ou conventionnelle, mais plutôt d'obtenir des niveaux hiérarchiques représentatifs des sous-processus locaux à l'origine de l'évolution globale. Ces niveaux dépendent non seulement du phénomène étudié, mais aussi de son caractère hiérarchique intrinsèque, ainsi que des données disponibles pour décortiquer les sous-phénomènes liés. Les exemples de hiérarchie dans les processus spatiotemporels sont nombreux. Nous citons, à titre d'exemples, la circulation des courants océaniques et marins qui peut être étudiée soit localement sur les côtes ou à l'échelle planétaire, l'occupation du sol qui peut être représentée différemment selon qu'on s'intéresse à un pays au complet, une province ou une ville. Dans notre cas, nous étudierons le processus de l'écoulement des eaux de surface dont l'aspect hiérarchique est étroitement lié à l'étendue spatiale considérée dans un bassin versant et aux composantes du réseau hydrographique.

Une fois les niveaux hiérarchiques identifiés, vient ensuite la tâche pratique de concrétiser la hiérarchie. L'idée sur laquelle se base notre solution consiste à débiter avec l'ensemble original de toutes les données qui ont été à l'origine de la discrétisation de l'étendue spatiale en une tessellation irrégulière. Le niveau initial où sont représentées toutes ces données à l'aide d'une structure à géométrie irrégulière est considéré comme *le niveau 0*. Par la suite, la procédure de hiérarchisation consiste à utiliser la même structure de

données pour représenter d'autres niveaux de moindre résolution du processus étudié. Or, comme l'utilisation d'une tessellation irrégulière est étroitement liée aux objets spatiaux représentés, le passage à un niveau de représentation moins détaillé implique par conséquent une diminution du nombre d'objets spatiaux considérés. Il en résulte alors l'utilisation d'un sous-ensemble de données parmi l'ensemble original. La question spécifique à cette étape consiste à choisir adéquatement le sous-ensemble de données qui servira à construire les niveaux de la tessellation irrégulière. En effet, pour chaque niveau de détail, un sous-ensemble de données intervient dans la représentation d'un ou plusieurs sous-processus particuliers constituant le processus global qui se déroule sur la totalité de l'étendue spatiale. Dans la Figure 4.10, nous illustrons une modélisation sous forme de graphe qui représente le principe sur lequel se base la solution de hiérarchisation spatiale proposée pour la représentation des processus spatiotemporels. Le niveau initial des données correspond au découpage irrégulier de l'espace selon la totalité des entités spatiales qui régissent le processus simulé. Les autres niveaux sont des agrégations successives à partir de sous-ensembles d'entités spatiales régissant un ou plusieurs sous-processus relatifs à chaque échelle. Les procédures et les critères de ces agrégations dépendent du type du processus spatiotemporel étudié. Nous en donnerons des exemples dans la section suivante. Le graphe de la Figure 4.10 montre aussi que plusieurs entités spatiales d'un niveau donné sont agrégées dans une entité du niveau supérieur jusqu'à l'atteinte du niveau global (macro-échelle). Nous parlons alors de lien inter-échelle qui permet de naviguer entre les niveaux spatiaux, de réduire successivement l'échelle de représentation des processus spatiotemporels, et de mieux les comprendre dans un objectif général d'aide à la décision.

En cartographie, cette procédure de réduction d'échelle correspond à la généralisation cartographique qui consiste à réduire la quantité d'information figurée sur une carte. Néanmoins, dans notre cas, le passage entre échelles est possible dans les deux sens. Plus spécifiquement, à partir de l'ensemble de données relatives aux entités spatiales, nous sélectionnons un sous-ensemble pour chaque niveau d'échelle et nous reconstruisons le même type de tessellation irrégulière basé sur les données sélectionnées. Cette sélection dépend du type du processus étudié. La tessellation relative à une échelle demeure liée avec celles des autres échelles afin de permettre la navigation inter-échelles, et ce grâce à l'adressage et à l'indexation des entités spatiales. Nous expliquons plus en détails dans les prochaines sections la sélection des données ainsi que les procédures d'adressage.

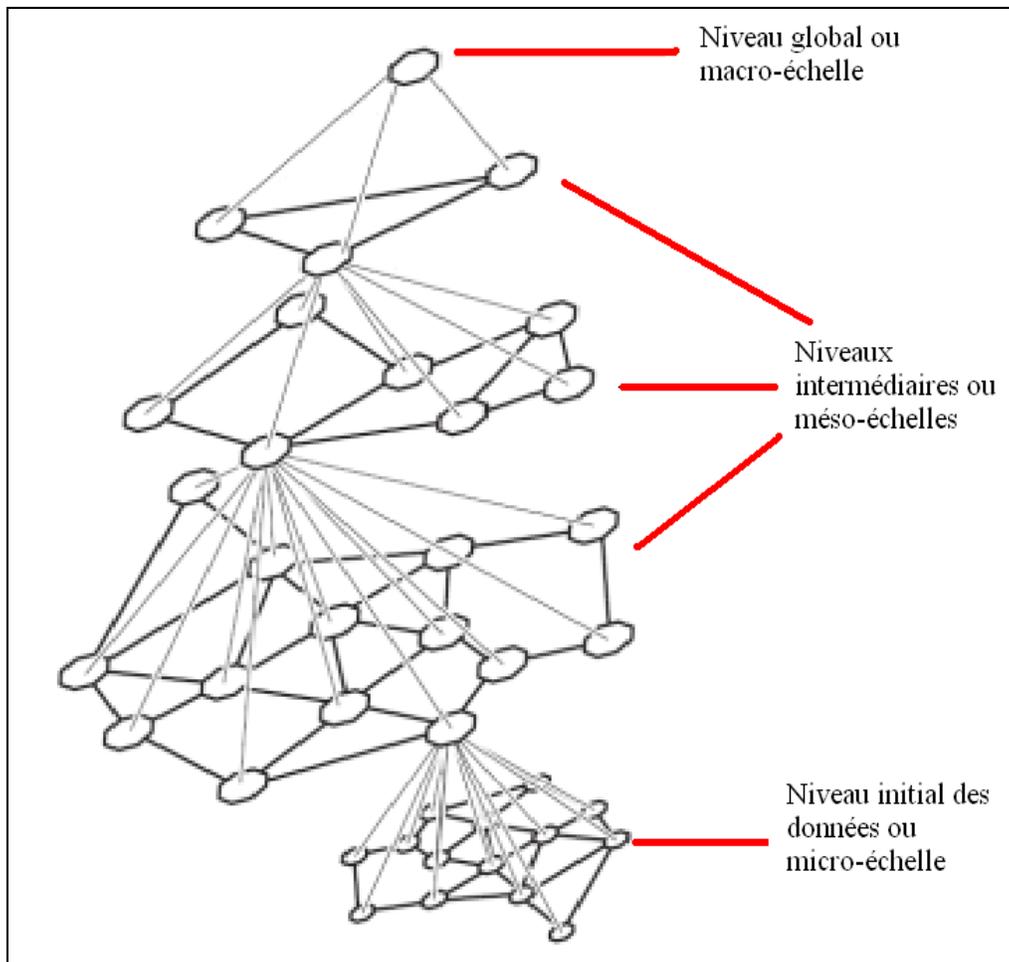


Figure 4.10: Représentation hiérarchique sous forme de graphe

Le reste de ce chapitre présente notre démarche de sélection des données dans la procédure de réduction d'échelle et explique les étapes de la mise en place d'une structure hiérarchique valide pour la représentation multi-échelles des processus spatiotemporels. Nous présenterons aussi les méthodes de sélection de données spatiales.

Notre contribution dans la représentation hiérarchique à base de diagramme de Voronoï est d'identifier une méthode de choix des générateurs avant la construction des divers niveaux comme le montre la Figure 4.10. Aussi, nous étudions dans la section suivante la sélection des données à des fins de hiérarchisation dans le cas des processus spatiotemporels en général, puis dans le cas particulier de l'écoulement des eaux de surface.

4.3.3 Problème de la sélection des données

4.3.3.1 Cas général de sélection des données en vue d'une représentation hiérarchique des processus spatiotemporels

Le problème de sélection de données dans une représentation se pose lorsqu'on veut extraire l'information jugée importante pour un besoin particulier : cette extraction est appelée la généralisation. Il s'agit de simplifier les informations les moins importantes en les réduisant et de mettre en valeur les informations les plus pertinentes en les amplifiant. Selon Muller et al. [1995], deux grands thèmes composent la généralisation d'information géographique : il s'agit de la généralisation par modélisation et de la généralisation cartographique.

Pour les données spatiales, la généralisation par modélisation sert à représenter un phénomène à un plus haut niveau, c'est-à-dire dans une échelle plus petite que celle des données ou objets le constituant. Elle consiste en une opération d'interprétation basée sur une adaptation de la représentation selon la quantité de données retenue. Plusieurs opérateurs peuvent être utilisés dans un objectif de fusion ou subdivision des données. On cite : l'élimination, le regroupement de classe et l'agrégation. La généralisation par modélisation concerne plutôt la base de données géographique associée au modèle et ne prend pas en compte les contraintes esthétiques et visuelles. Quant à la généralisation cartographique, elle consiste en une simplification d'une carte lors du passage à une plus petite échelle. La réduction de complexité se base sur une suppression de ce qui semble peu important et une mise en valeur de l'information essentielle, et ce en préservant l'esthétisme de la carte et en gardant les liens entre les objets [Weibel et Dutton, 1999]. Parmi les opérateurs de généralisation cartographique, citons : le raffinement, la reclassification, la simplification, l'exagération symbolique, le déplacement, la déformation et le lissage.

Des exemples de sélection de données selon le type du processus étudié sont présentés dans la section qui suit.

- ❖ Par exemple, dans un contexte écologique où on voudrait étudier le déplacement d'une espèce faunique dans son habitat, il serait légitime de suivre l'évolution de la distribution de tous les facteurs (alimentation, climat, prédateurs, etc.) en lien avec la dynamique de la population. Un diagramme de Voronoï pourrait représenter la totalité de ces facteurs dans un niveau initial. Par la suite, une sélection selon l'importance des facteurs peut être faite pour présenter des niveaux de priorité différents pour la survie de l'espèce. Wu et David [2002] proposent une telle approche de modélisation hiérarchique pour les systèmes écologiques.
- ❖ Dans un contexte urbain ou administratif, il est possible de sélectionner les données selon la résolution, ce qui donne des niveaux correspondant à chaque catégorie de taille d'objets. Dans son travail de recherche sur la géosimulation des phénomènes urbains, Hins Mallet [2009] a adapté

une tessellation de Voronoï hiérarchique sur plusieurs échelles spatiales. Dans cet exemple, l'unique critère de sélection des objets est leur taille, ce qui aboutit à des niveaux d'échelles correspondant aux niveaux de détails (LoD).

- ❖ Dans un contexte d'évaluation de risque de pollution chimique dans une zone industrielle, si on s'intéresse à la représentation de la propagation des produits chimiques dans l'environnement, les niveaux d'une structure hiérarchique de type Voronoï peuvent correspondre aux niveaux de vulnérabilité des milieux. Ainsi, la sélection des générateurs de cellules Voronoï se fait en fonction du niveau de risque attribué à chaque cellule.

Les exemples de sélection des générateurs de cellules lors de la construction d'une structure hiérarchique de type Voronoï sont aussi variées que les applications et les processus spatiotemporel concernés. La section concerne la topographie et son lien avec l'écoulement des eaux de surface.

4.3.3.2 Cas particulier des données topographiques : Algorithmes de sélection de points selon l'altitude

Au chapitre 3, nous avons opté pour une structure spatiale à géométrie irrégulière basée sur un diagramme de Voronoï pour la représentation du processus spatiotemporel d'écoulement des eaux de surface. Nous avons aussi expliqué pourquoi l'élévation du terrain est le critère principal pour définir les points générateurs du diagramme de Voronoï. La démarche de hiérarchisation, utilise ce même critère, soit en sélectionnant les points du terrain suite à une analyse des altitudes afin de configurer une structure spatiale selon les points les plus importants dans chaque échelle. La définition des points importants selon l'altitude permet d'identifier six classes morphométriques du terrain définies par Wood [1996] et illustrées dans la Figure 4.12 d'après Gilbert [2010].

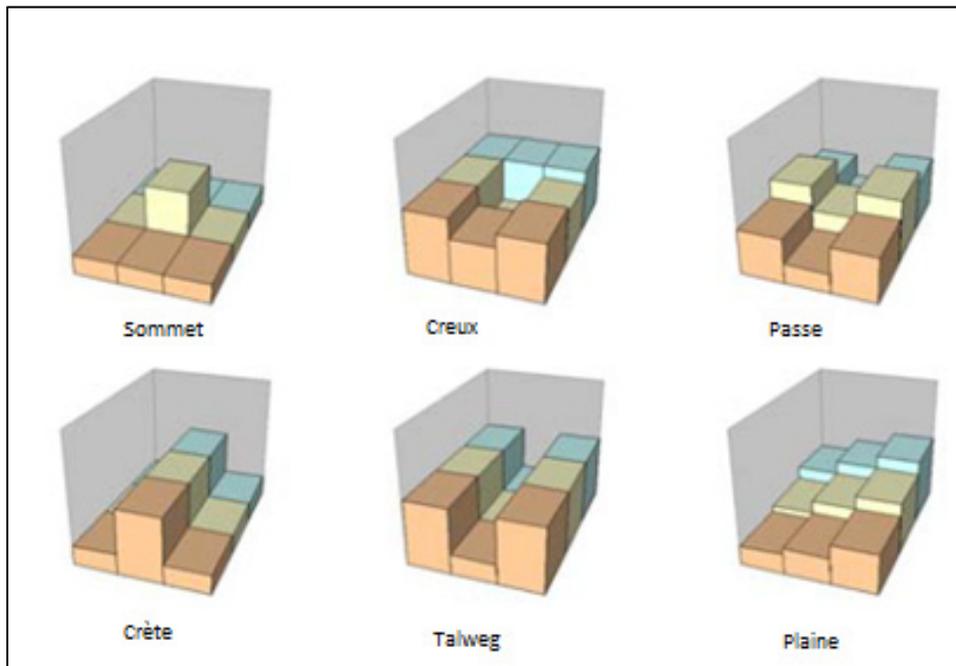


Figure 4.11: Les classes morphométriques du terrain [Wood, 1996]

La section suivante explique comment ces classes morphométriques sont à l'origine de la sélection des points importants de terrain. Dans la littérature, nous avons trouvé trois algorithmes de sélection de points de terrain selon l'altitude, tous utilisés pour la construction des modèles numériques d'altitude : l'algorithme de « Fowler and Little », l'algorithme des points les plus importants « VIP » et l'algorithme d'élimination des points les moins significatifs « NIP ».

L'algorithme de « Fowler and Little »

L'approche de cet algorithme est fondée sur le concept de points spécifiques jouant un rôle particulier pour définir la surface du terrain. Elle représente les éléments tels que les sommets, les creux et les crêtes. Son application est basée sur une matrice régulière de points d'altitudes connus qui permet d'appliquer la procédure suivante :

- Dans un premier temps, on examine la surface par blocs à l'aide d'une matrice carrée de 9 points pour chaque bloc (3x3).
- À partir de la valeur d'altitude du point central, on code les autres points de la matrice par des signes (+) s'ils sont situés plus haut et par des signes (-) s'ils sont situés plus bas.

- On nomme « sommet » tout point dont tous les voisins ont été codés par un signe (-) et « creux » si tous ses voisins ont des altitudes plus élevées que la sienne et sont donc codés par des signes (+).
- Un point est considéré comme « passe » lorsque les signes (+) et (-) sont alternés autour de lui pour au moins deux cycles.
- En deuxième lieu, on examine la surface en utilisant des blocs de matrice carré de taille 2x2.
- Chaque point se trouve alors attribué, à chaque pas, une position parmi les quatre positions de la matrice.
- La comparaison se fait toujours selon les valeurs d'altitude.
- Un point est alors potentiellement un point de crête s'il ne se trouve jamais le plus bas parmi les quatre positions de la matrice. Il est potentiellement un point de talweg s'il n'est jamais plus haut que les quatre positions de la matrice (un talweg correspond à la ligne qui rejoint les points les plus bas d'une vallée).
- Par la suite, en partant d'une passe, on cherche les points de crête adjacents jusqu'à atteindre un sommet. De la même manière, en partant aussi d'une passe, on cherche les points de talweg adjacents jusqu'à atteindre un creux.

Ainsi, on obtient finalement un ensemble connecté de sommets, de passes, de lignes de crête et de talweg, ce qui entraîne une sélection des points les plus significatifs selon l'altitude et permet d'identifier les formes majeures du relief. Cette méthode est souvent utilisée pour la construction des réseaux de triangles irréguliers (TIN : *Triangular Irregular Network*). Néanmoins, les inconvénients de cet algorithme sont d'abord la nécessité d'avoir une grille régulière de données et ensuite de ne pas avoir le choix de fixer le nombre de points à retenir.

L'algorithme « des points les plus importants « Very Important Points : VIP »

L'algorithme des points les plus importants fonctionne en analysant en détail la surface à l'aide d'une matrice locale carrée d'ordre 3 à laquelle on applique la procédure suivante :

- Chaque point de la matrice possède 8 voisins qu'on partage en 4 paires de voisins diamétralement opposés. Sur un diagramme représentant les altitudes, on joint chaque paire par une ligne droite, et on calcule la distance orthogonale qui la sépare du point central (Figure 4.13).

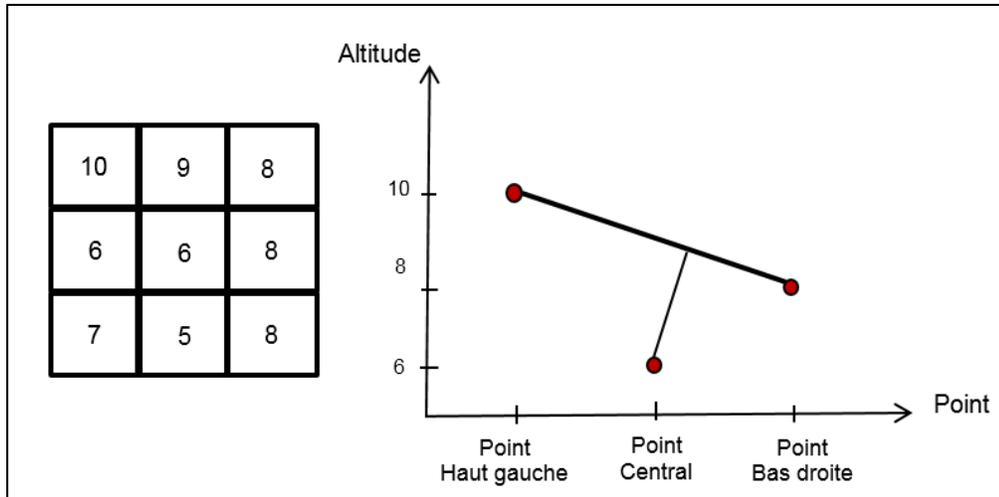


Figure 4.12: Calcul de la distance orthogonale du point central vers la ligne joignant deux voisins diamétralement opposés dans une matrice carrée des altitudes d'ordre 3

- La moyenne des quatre distances donne ce qu'on appelle mesure de signification globale du point central.
- La sélection des points les plus importants se fait alors selon cette valeur de signification : on élimine les points les moins significatifs jusqu'à atteindre un nombre prédéfini de points ou un seuil déterminé à l'avance de la valeur de signification.

L'avantage de cet algorithme est qu'il est possible de fixer le nombre de points à sélectionner. Cependant, tel que conçu, il n'est opérationnel que sur un jeu de données à grille régulière.

L'algorithme « Not Important Points : Élimination des points peu significatifs »

Cette méthode utilise une démarche de sélection par optimisation selon la procédure suivante :

- À partir de points d'altitude, on examine chaque point à tour de rôle.
- On élimine temporairement chaque point et on ajuste en conséquence les triangles environnants.
- On mesure la différence entre l'altitude réelle du point et celle de la nouvelle surface à la même position et on mémorise cette différence.
- On remet le point éliminé, et on procède à l'élimination du point suivant.
- Une fois tous les points examinés, on élimine définitivement le point pour lequel la différence d'altitude était la moins importante.
- On reprend la procédure pour l'ensemble des points de la liste jusqu'à atteindre le nombre de points désirés.

L'avantage de cet algorithme est qu'il ne nécessite pas de grille régulière de données d'altitude. De plus, il est possible de choisir le nombre final de points qu'on veut retenir.

La particularité de ces algorithmes est qu'ils peuvent tous être utilisés sur des données d'altitudes en format matriciel régulier, ce qui est considéré comme un avantage puisque les données topographiques en format matriciel sont généralement disponibles et accessibles. Néanmoins, pour les cas où le format original des données d'altitudes n'est pas une grille régulière carrée, seul l'algorithme d'« élimination des points les moins significatifs » est utilisable, ce qui permet de l'adapter pour une distribution irrégulière de points. C'est l'objet de la section suivante.

4.3.3 Hiérarchisation d'une tessellation irrégulière de type Voronoï

Ayant opté pour une structure de partitionnement de l'espace de type Voronoï (chapitre 3), nous avons noté l'absence d'une procédure commune dans la littérature aboutissant à la hiérarchisation d'un diagramme de Voronoï. Le partitionnement de l'espace à base de Voronoï fait partie des découpages irréguliers qui n'ont a priori pas de propriétés hiérarchiques visibles. Comme le mentionnent Gold et Angel [2006], le diagramme de Voronoï n'est pas toujours facilement utilisé dans un contexte hiérarchique et il lui manque un modèle hiérarchique valide qui permettrait l'indexation, la généralisation et la structuration des données spatiales. L'aspect le plus étudié dans les modèles de Voronoï hiérarchiques est l'indexation spatiale qui permet de déterminer une stratégie pour localiser un point d'une manière rapide et flexible en se basant sur des algorithmes.

- **Adressage dans la hiérarchie irrégulière de type Voronoï**

Comme nous l'avons expliqué précédemment, le passage inter-échelles se fait par sélection de données. Plus explicitement, il existe toujours des données qui sont représentées dans deux échelles consécutives, du niveau le plus fin au niveau le plus global. Ceci garantit une approche simple d'adressage des cellules de Voronoï dans une structure hiérarchique. Nous illustrons cette approche dans la Figure 4.13 où l'adressage se résume dans le fait que le générateur de chaque cellule de Voronoï d'un niveau n pointe vers un générateur d'une autre cellule du niveau inférieur ($n-1$) et ainsi de suite jusqu'à atteindre le niveau de base dit niveau 0, lequel correspond dans notre cas au niveau des données. Ainsi, chaque générateur du niveau le plus élevé (Figure 4.13) a automatiquement une chaîne de pointeurs traversant toute la structure hiérarchique jusqu'au niveau 0.

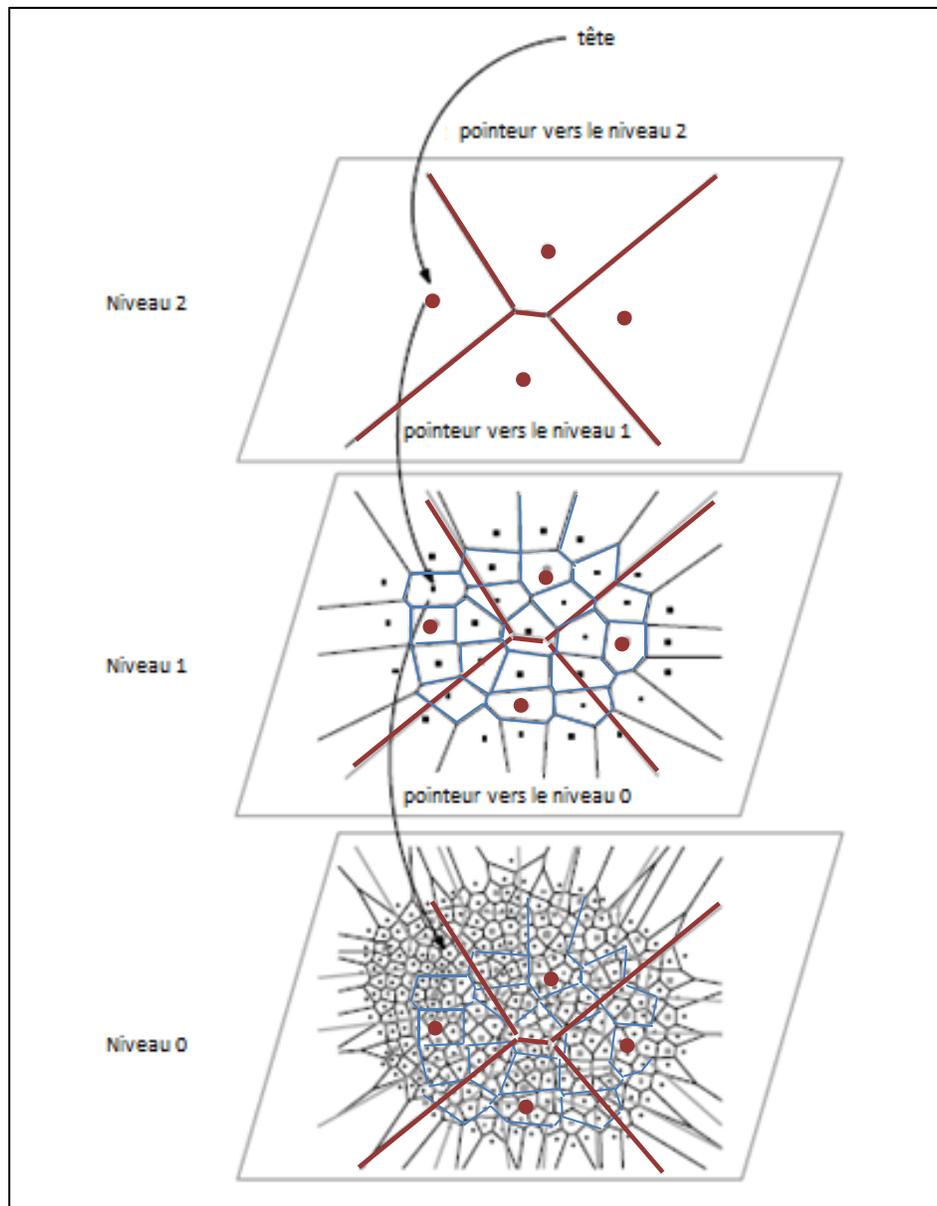


Figure 4.13: Structure de Voronoï hiérarchique : adressage résultant d’une sélection aléatoire de données [Gold, 2006]

Cette particularité résulte du fait que chaque étape de réduction d’échelle se fait par sélection de certains générateurs de cellules afin de construire les cellules de l’échelle suivante dont certains autres générateurs seront aussi sélectionnés.

Cette approche a été présentée par Gold [2006] et Mioc et al. [2013]. Elle offre une structure dynamique en termes de suppression et d’ajouts de points et peut être utilisée dans plusieurs applications telles que la modélisation du terrain ainsi que la visualisation et les niveaux de détail du terrain. Cependant, elle ne présente pas de méthodologie pour la sélection des générateurs lors de la réduction d’échelle. Gold [2006] parle alors de sélection aléatoire de générateurs en ajustant un rayon de proximité, quant à Obake et

Sadahiro [1996], ils ont proposé de faire une sélection de générateurs selon les maxima locaux des attributs de l'application.

4.4 Contexte d'application de la solution proposée

4.4.1 Construction des échelles spatiales de la structure de Voronoï hiérarchique pour le processus d'écoulement des eaux de surface

Cette application requiert une procédure pour effectuer des itérations successives de sélection à chaque échelle de représentation. En outre, cette procédure doit être adaptée à une distribution initiale des données topographiques au niveau 0 à géométrie irrégulière. La sélection des générateurs de Voronoï sera basée sur le nombre de points à retenir pour chaque échelle. Ce nombre sera déterminé en fonction de la superficie du bassin versant, ainsi que la taille moyenne désirée des cellules pour chaque échelle. Les échelles spatiales sont quant à elles déterminées selon les sous-bassins versants contenus dans le bassin versant étudié. De plus, les générateurs sélectionnés pour chaque niveau supérieur seront sauvegardés afin de faciliter l'indexation des cellules entre les échelles. Cette approche permet de passer d'une échelle spatiale à une autre et répond à l'objectif général d'aide à la décision pour le suivi des processus spatiotemporels en gestion du territoire.

La Figure 4.14 présente l'algorithme utilisé afin de récupérer les données d'altitude sélectionnées à chaque échelle spatiale. Ces données servent à la construction d'un diagramme de Voronoï pour chaque échelle spatiale à partir des coordonnées des points retenus.

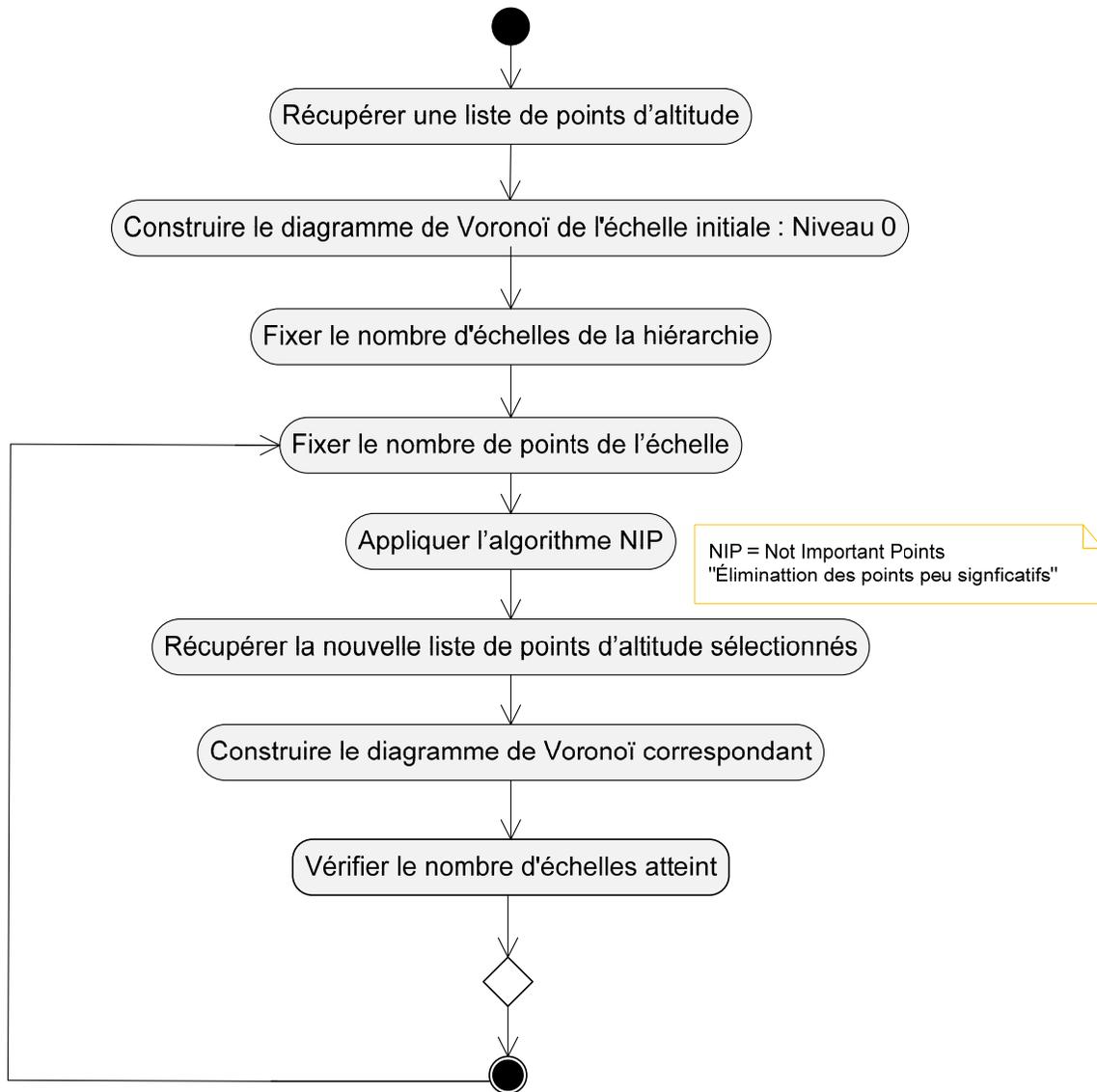


Figure 4.14: Algorithme de hiérarchisation par sélection des générateurs

- La première étape consiste à construire le diagramme de Voronoï à partir de la triangulation de Delaunay des points d'altitude. Nous expliquons dans le chapitre 5 comment nous utilisons la librairie de géométrie algorithmique CGAL (*Computational Geometric Algorithmic Library*) pour construire le diagramme de Voronoï. La manière dont est stockée une structure de Voronoï permet de sauvegarder pour, chaque cellule, son point central intitulé générateur, les autres sommets qui sont les vertex ainsi que les côtés appelés arêtes. De plus, pour notre objectif de simulation, nous y sauvegardons aussi tous les paramètres utilisés pour calculer le bilan d'eau et estimer son déplacement entre les cellules Voronoï. Les fonctions de simulation seront expliquées dans le chapitre 5. En résumé, nous retenons à ce niveau que chacune des cellules de Voronoï de la

- structure informe non seulement sur l'emplacement et la disposition des éléments géométriques, mais contient également l'information nécessaire pour représenter la dynamique de l'eau.
- Ensuite vient l'étape de hiérarchisation par sélection de certains points par l'algorithme NIP. L'application de l'algorithme NIP est réalisée pour chaque niveau spatial à représenter. Notons au passage que la démarche de hiérarchisation demeure valide pour divers processus spatiotemporels; il s'agit simplement de remplacer l'algorithme NIP par un algorithme correspondant aux données et au processus étudié.
 - Pour chaque échelle spatiale, nous construisons le diagramme de Voronoï associé. Les points communs à deux échelles successives sont ainsi les générateurs communs pour des cellules de Voronoï différentes dans les deux échelles. Ils représentent le lien de hiérarchisation.
 - Une fois que le nombre d'échelles choisi est atteint, le procédé de hiérarchisation est arrêté.

4.4.2 Validation

Dans un premier essai basé sur un échantillon de données, nous avons construit une hiérarchie à trois niveaux où le passage vers les niveaux supérieurs se fait par sélection successive des deux tiers puis de un tiers des générateurs initiaux par l'algorithme NIP. Le choix de ce nombre de points est arbitraire. La Figure 4.15 présente les résultats. La première échelle étant la micro-échelle qui correspond aux données initiales, puis vient la méso-échelle et la macro-échelle. Nous utilisons la librairie ouverte CGAL qui offre des modules pour implanter le diagramme de Voronoï et nous l'adaptions à notre prototype d'abord pour une représentation hiérarchique, ensuite pour exécuter la simulation de l'écoulement des eaux de surface en associant les cellules de Voronoï à des cellules automates. Les fonctions et le prototype sont expliqués dans les prochains chapitres.

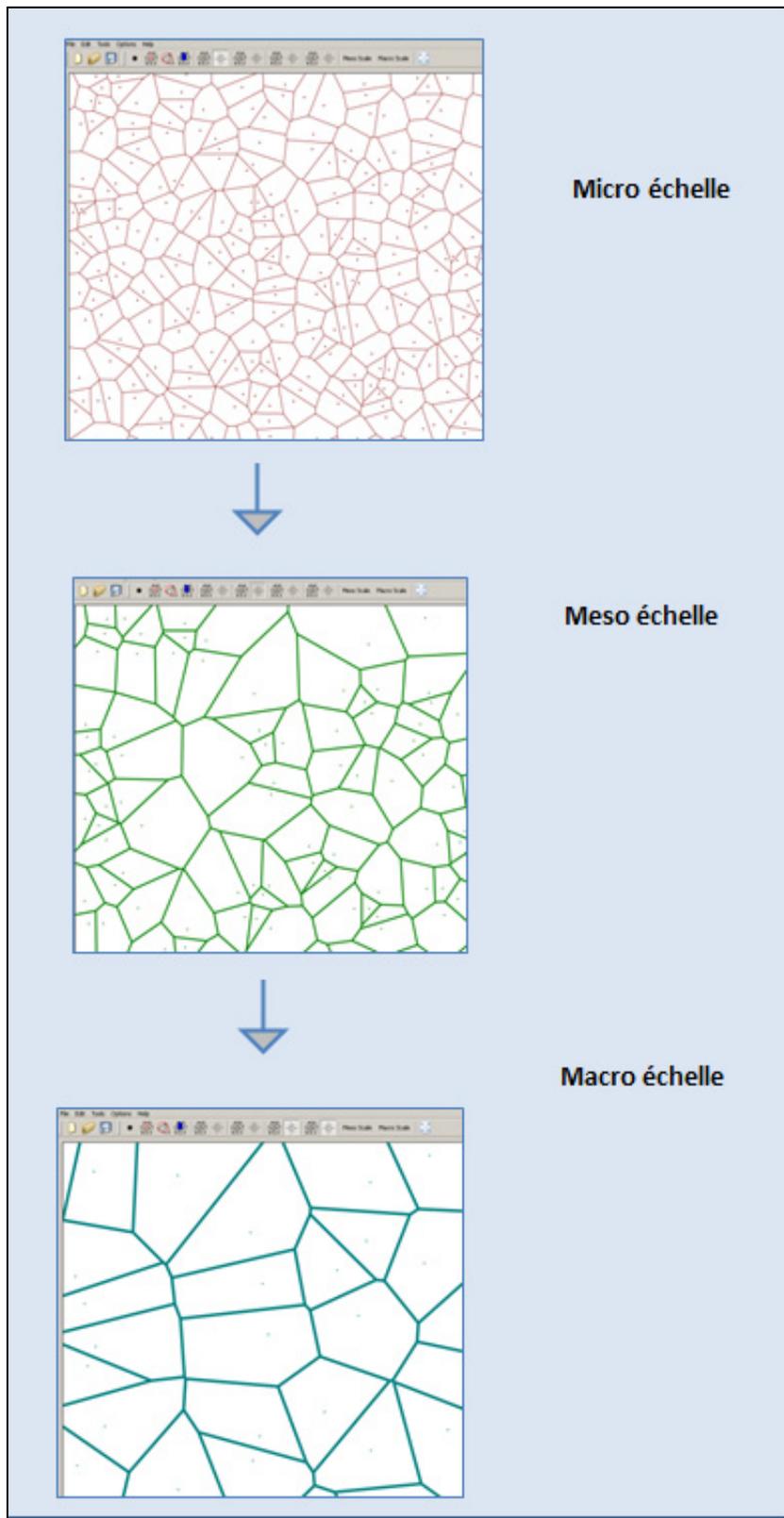


Figure 4.15: Construction d'une structure de Voronoï hiérarchique

Avec ce test, nous montrons la validité de la procédure de hiérarchisation de la structure de Voronoï. Nous expliquons dans les chapitres suivants comment adapter l'algorithme à des fins de simulation en utilisant un modèle numérique de terrain.

4.5 Conclusion du chapitre

Rappelons que l'objectif général du projet de recherche est la représentation des processus spatiotemporels. Cette représentation est caractérisée d'abord par une structure irrégulière dont on a montré les caractéristiques dans le chapitre 3, ensuite par une structure hiérarchique que nous avons étudiée et présentée dans le présent chapitre.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de base de la théorie de la hiérarchie ainsi que les géométries hiérarchiques en géosimulation qui sont habituellement régulières. Nous avons aussi étudié le problème de sélection des données à des fins de hiérarchisation dans le cas général des processus spatiotemporels. Puis nous avons proposé une solution de sélection qui prend en compte la distribution irrégulière des données et qui s'adapte bien au processus de l'écoulement des eaux de surface. Nous avons expliqué la démarche qui permet de construire un diagramme de Voronoï hiérarchique basé sur la sélection des points d'altitude significatifs du terrain. Nous présentons dans le chapitre suivant, les caractéristiques de l'automate cellulaire qui simule les processus spatiotemporels dans le cas général. Puis, nous validons l'implantation de l'AC basé sur la structure irrégulière et hiérarchique que nous avons mise en place dans les chapitres 3 et 4.

Chapitre 5 : Un système de simulation par automate cellulaire multi-échelles basé sur un découpage de Voronoï hiérarchique

5.1. Introduction

Comme présenté dans le chapitre 2, la simulation des écoulements de l'eau est traditionnellement basée sur une analyse numérique afin de résoudre les équations de conservation de la masse et de quantité de mouvement. Ce genre de simulation s'appuie souvent sur des simplifications des équations différentielles permettant d'obtenir des solutions plus précises, ce qui diffère de notre approche de simulation par automate cellulaire. En effet, le concept d'automate cellulaire est présenté comme une alternative pour étudier les processus locaux à l'origine du comportement global et dont l'étude et la compréhension ne sont pas nécessairement liées à un modèle fonctionnel.

Dans ce chapitre, nous revenons sur les composantes de l'outil de simulation par automate cellulaire que nous avons présenté au chapitre 2. Nous spécifions les caractéristiques intrinsèques de l'automate cellulaire basé sur une tessellation particulière dont les deux composantes importantes ont déjà été introduites : la géométrie irrégulière (chapitre 3) et le caractère hiérarchique (chapitre 4). Ces caractéristiques permettent d'explicitement le fonctionnement du système de simulation en soulignant la contribution originale de cette recherche, notamment dans l'intégration de l'automate cellulaire et d'une structure de données irrégulière et hiérarchique. Nous présentons d'abord les caractéristiques spécifiques de l'automate cellulaire en expliquant les différences par rapport à un automate cellulaire traditionnel. Ensuite, la structure et le fonctionnement global de l'application dans le cas général des processus spatiotemporels sont expliqués ainsi que les détails de l'implémentation du prototype et l'interface développée. Nous abordons le cas particulier du processus d'écoulement des eaux de surface pour décrire le fonctionnement du système de simulation du ruissellement. Finalement, nous expliquons les fonctions utilisées pour le changement d'état et les règles de transition entre les cellules de l'automate ainsi que les approximations utilisées.

5.2 Caractéristiques de l'automate cellulaire

Cette section présente les caractéristiques particulières de l'AC proposé. Nous commençons d'abord par rappeler les différents types d'AC selon les caractéristiques de leurs composantes. Nous avons présenté et défini dans le chapitre 2 les composantes principales de l'automate cellulaire à savoir : la dimension de

l'espace, la géométrie de la grille, l'état des cellules, les règles de transition, le pas de temps ainsi que les conditions aux limites. Plusieurs genres d'automates cellulaires peuvent être définis selon leurs types de composantes ainsi que les possibilités de combinaisons inhérentes. Selon la définition d'automate cellulaire qu'on a adoptée, il est possible d'identifier les composantes traditionnelles comme suit :

- Une grille de cellules de géométrie carrée;
- Un état pour chaque cellule appartenant à un ensemble prédéterminé d'états;
- Un voisinage de type uniforme soit de *Von Neumann* ou de *Moore* pour chaque cellule;
- Des règles de transition permettant de modifier les états des cellules;
- Un pas de temps qui définit la dimension temporelle où, lors de chaque itération, l'état des cellules est modifié d'une manière simultanée.

L'automate cellulaire que nous utilisons est conçu dans un objectif de simulation des processus spatiotemporels de manière générale et de l'écoulement des eaux de surface plus particulièrement. Il n'adopte pas un formalisme d'automate cellulaire classique tel que défini dans le chapitre 2. Des modifications sont proposées afin d'adapter l'automate cellulaire aux types de processus spatiotemporels étudiés. Nous les présentons dans la section qui suit.

5.2.1 Géométrie de la grille de type Voronoï

Nous utilisons un découpage irrégulier de type Voronoï comme structure spatiale de la simulation parce que ce type de géométrie est bien adapté à la représentation des processus spatiotemporels et en particulier au ruissellement. Les cellules de Voronoï sont identifiées aux cellules de l'automate tel qu'illustré dans la Figure 5.1 où une cellule de Voronoï joue le rôle d'une cellule automate, ce qui implique une non-conformité géométrique au cas classique où les cellules sont identiques et de géométrie régulière.

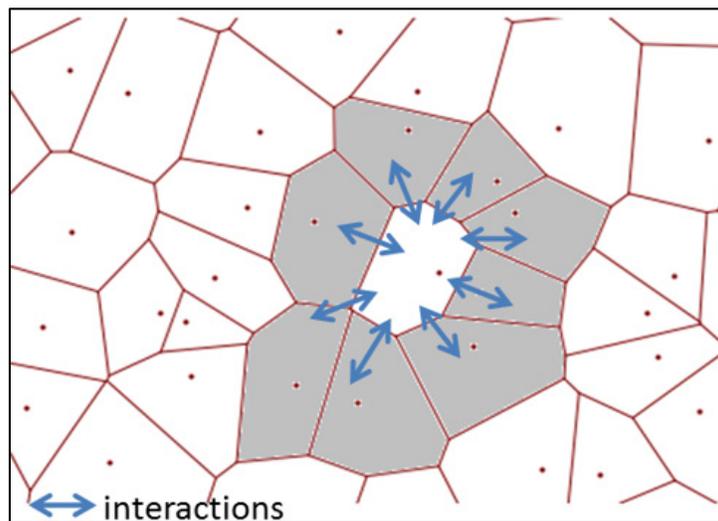


Figure 5.1 : Cellule d'automate identifiée à une cellule de Voronoï

Les voisins d'une cellule dans le diagramme de Voronoï peuvent être considérés comme des voisins au sens de l'AC, ce sont donc les cellules qui sont adjacentes à la cellule centrale et pouvant être en interaction selon les règles de transition du processus.

5.2.2 État des cellules à valeurs non discrètes

La représentation d'un processus spatiotemporel dans un espace discrétisé en cellules, comme le cas du diagramme de Voronoï, se fait par la description de l'état de chaque cellule selon le type de processus. Cet état peut être soit *qualitatif*, faisant partie d'un ensemble fini de qualifications relatives au processus, soit *numérique*, donnant la valeur d'une fonction faisant intervenir un ou plusieurs paramètres décrivant le processus.

- Dans le premier cas, on parle d'état à valeurs discrètes, ce qui correspond à la définition de l'automate cellulaire traditionnel. Par exemple, un état de type discret peut être utilisé pour un processus de propagation de feu, où l'état d'une cellule binaire indique si le feu a affecté cette cellule. Un autre exemple est appliqué au contexte urbain, où l'occupation du sol peut avoir un état libre ou occupé (binaire), le type d'occupation est industriel, commercial ou résidentiel, etc.
- Dans le deuxième cas, il s'agit d'un état à valeurs continues comme par exemple un AC qui simule un processus d'érosion côtière ou un processus d'élévation du niveau de la mer. Ce type d'état de cellules ne correspond pas à la définition traditionnelle de l'AC. Nous proposons de l'utiliser dans un AC pour la simulation des processus spatiotemporels afin de permettre une description quantitative des paramètres décrivant le processus, notamment dans le cas où la représentation du processus l'exige. Par exemple, pour simuler le processus d'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant, une valeur du bilan d'eau dans chaque cellule décrit le processus d'une manière plus réaliste .

La Figure 5.3 compare deux AC par rapport au type de valeurs attribuées à l'état des cellules (discret ou continu). Elle présente une évolution sur quatre itérations (axe vertical) de l'état d'une ligne de cellules (axe horizontal). Dans la partie de gauche, l'état est représenté par une valeur discrète et fait partie d'un ensemble fini de valeurs (exemple binaire). Ce cas est typique de l'AC traditionnel. Dans la partie de droite, on représente le cas d'une évolution continue de cellules d'AC; on attribue des valeurs successives aux cellules pour quantifier le paramètre étudié, par exemple des valeurs de bilan d'eau.

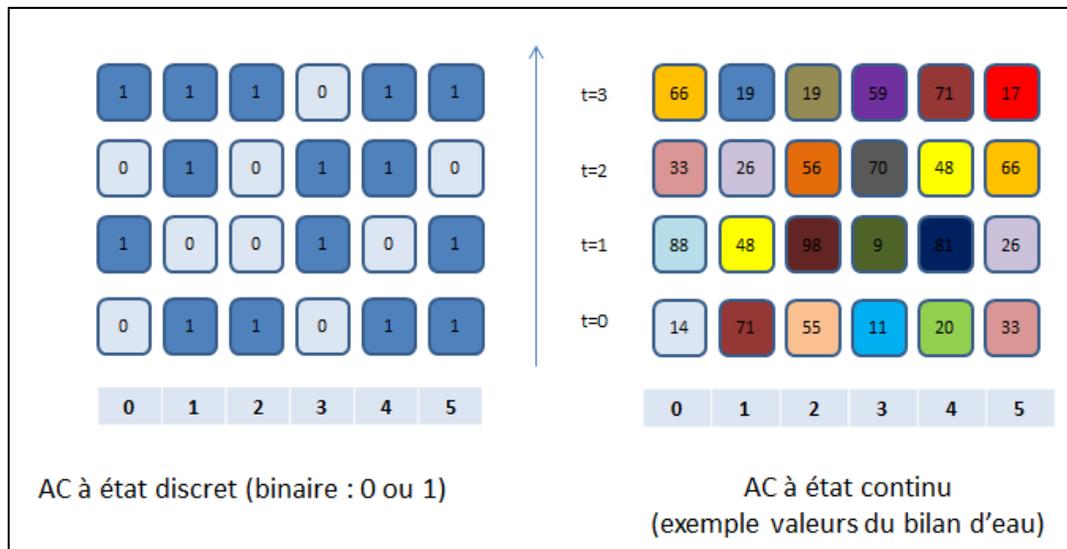


Figure 5.2: Comparaison entre l'AC utilisé et un AC traditionnel : l'axe horizontal identifie les cellules, l'axe vertical présente les pas de temps

Plus explicitement, pour le cas d'application de l'écoulement des eaux, la non-conformité de l'automate cellulaire, en termes d'état des cellules, par rapport à un automate cellulaire traditionnel est que l'état est représenté par une variable continue qui présente le résultat d'un calcul de bilan d'eau fait à chaque itération de la simulation. Ainsi, la valeur d'état attribuée à chaque cellule de Voronoï n'est autre que le bilan d'eau qui résulte de la quantité de précipitation, de la quantité d'eau infiltrée dans le sol et de celle partagée avec les cellules voisines.

Ceci dit, dans un objectif plus spécifique, et pour adapter notre solution de simulation des écoulements des eaux à un contexte d'évaluation de risque ou d'aide à la décision, on peut transformer les valeurs de bilan en indicateurs de type binaire pour indiquer si une cellule appartient à une zone à risque, ce qui implique des valeurs de seuil prédéterminées pour cibler les interventions.

5.2.3 Voisinage orienté dynamique et non commutatif

Le troisième élément de différence de notre automate est la non-conformité au voisinage traditionnel fondée en général sur la notion d'adjacence et se compose soit de quatre cellules (voisinage de Neumann) soit de huit cellules (voisinage de Moore) voisines à la cellule centrale. Certains types de voisinages particuliers sont cités dans la littérature, notamment dans les systèmes qui comportent une dimension humaine [White et Engelen, 2000] où l'environnement d'une personne dépasse la simple notion de voisinage. Plusieurs autres voisinages alternatifs ont aussi été proposés obéissant toujours à la définition qui présente le voisinage d'une cellule comme l'ensemble des régions qui ont une influence sur cette cellule [Shiyuan et Deren, 2004; O'Sullivan, 2001b]. Ce qui permet entre autre d'inclure des voisinages pouvant être basés sur

la distance ou la proximité [Stevens et Dragicevic, 2007] ou même la nature des objets [White et Engelen, 2000; Moreno et al. 2008].

Pour ce qui est de la solution proposée, nous pouvons la caractériser par un voisinage composite puisqu'on associe au voisinage défini dans le diagramme de Voronoï (adjacence par les sommets ou les arrêtes) un sous-ensemble fondé sur la notion d'influence sur le changement de valeur ou d'état des cellules de l'automate dans le cadre spécifique du processus spatiotemporel étudié. La Figure 5.3 montre la différence entre un voisinage de Voronoï traditionnel et le type de voisinage proposé.

Par exemple, dans un cas de propagation de feu, il est possible, malgré l'adjacence des cellules, d'imposer une contrainte telle que la direction de vent ou la couverture du sol de sorte que le feu ne se propage pas de la même manière à toutes les cellules voisines. Un autre exemple concerne la contamination de l'air par un polluant chimique où la propagation vers les cellules voisines dépend de la direction du vent et de la turbulence liée au relief.

Pour le cas de l'écoulement de l'eau en surface, on identifie comme cellules voisines au sens de l'automate cellulaire, celles qui reçoivent une quantité d'eau en provenance de la cellule centrale et qui subissent donc une augmentation de leur bilan d'eau après un pas de temps donné. Nous proposons l'appellation *voisinage orienté* pour le cas du processus d'écoulement des eaux, car tel que défini, c'est un voisinage qui indique la direction de l'écoulement à partir d'une cellule de Voronoï centrale vers les voisines directes dans le diagramme de Voronoï. Une illustration du *voisinage orienté* est faite à la Figure 5.3.

Une caractéristique importante du type de voisinage proposé est qu'il est variable dans le temps. Plus explicitement, pour un temps t , une cellule C est considérée comme voisine d'une cellule centrale C_c si elle vérifie deux conditions :

- Une première condition que nous qualifions de statique et qui est liée à la géométrie : la cellule C fait partie de l'ensemble des voisins directs de C_c dans le diagramme de Voronoï.
- Une deuxième condition que nous qualifions de dynamique et qui dépend du pas de temps : la cellule C reçoit une quantité d'eau (par écoulement) au pas de t depuis la cellule C_c ; C est en aval de C_c et C_c est en amont de C .

Une autre caractéristique de ce type de voisinage est la non-commutativité. Ainsi, si une cellule C_A est voisine d'une cellule C_B au temps t , cela n'implique pas que C_B soit voisine de C_A au même pas de temps, comme dans un voisinage traditionnel. Bien au contraire, C_B ne peut pas être voisine de C_A au même pas de temps. Pour une cellule centrale C_c , les voisins au temps t sont alors les cellules qui reçoivent de l'eau par écoulement lors du changement d'état de C_c au temps $t+1$ et qui sont donc à l'origine d'une diminution de la quantité d'eau de cette cellule centrale.

Ce type de voisinage peut ainsi impliquer différents cas particuliers qui distinguent l'automate cellulaire proposé. Par exemple, il peut arriver que lors d'un pas de temps donné, une cellule centrale C_c n'ait aucune

cellule voisine lorsqu'elle présente un point d'accumulation d'eau. Par contre, l'exemple d'une cellule représentant un sommet dans la morphologie du terrain engendre nombre de voisins égal à celui identifié par le digramme de Voronoï et qui est le maximum qui peut avoir lieu.

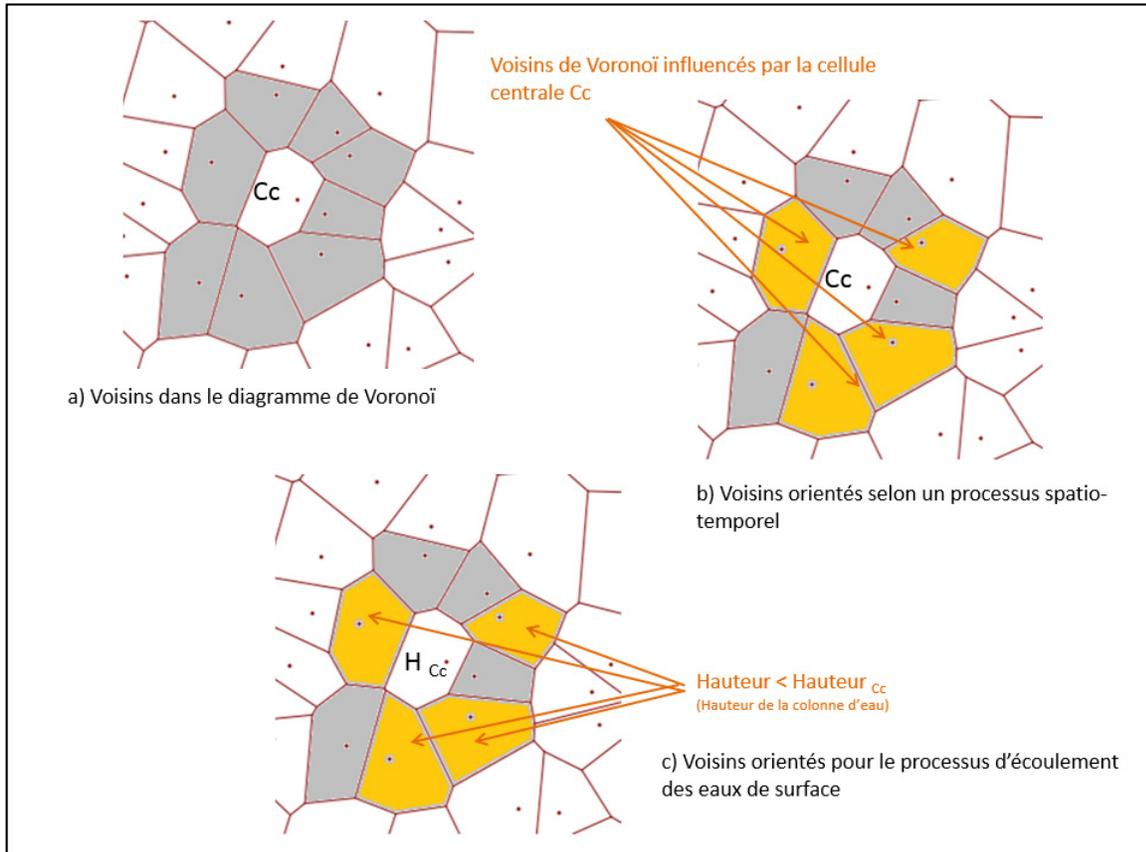


Figure 5.3: Voisinage orienté par rapport au voisinage de Voronoï traditionnel

5.2.4 Règles de transition

D'une manière générale, les règles de transition constituent le moteur de la simulation par automate cellulaire. En effet, selon Dawson et al. [2009], elles définissent la manière dont évolue la simulation en déterminant le comportement du modèle. C'est ainsi que les états successifs de l'ensemble des cellules sont gérés par ces règles et évoluent d'un pas de temps au suivant.

Sachant que c'est le contexte de simulation qui définit la nature des règles de transition, c'est le processus spatiotemporel modélisé qui permet de les générer et de construire le moteur de la simulation. Dans le cas particulier de l'écoulement des eaux, on veut expliquer comment se fait la transition des états de l'ensemble des cellules, en calculant à chaque pas de temps le bilan d'eau en fonction du bilan local précédent et des bilans des voisins d'amont. On se base sur des règles hydrologiques de calcul de bilan et d'écoulement de surface dont principalement l'équation de Manning tel que expliqué dans le chapitre 6.

5.2.5 Pas de temps

L'automate cellulaire utilisé est de type synchrone : à chaque itération les règles de transition hydrologiques sont appliquées simultanément à toutes les cellules. Dans un cas général de processus spatiotemporel, le pas de temps est fortement lié au phénomène simulé et surtout à l'objectif de la simulation. Néanmoins, le choix du pas de temps demeure un compromis entre la disponibilité des données qui sont à l'origine des règles de transition de l'AC d'une part, et l'évolution dans le temps des états successifs, d'autre part.

Le système demeure flexible puisqu'on prend en compte la disponibilité des données hydrologiques qui sont les variables nécessaires pour le calcul du bilan d'eau à l'aide des règles de transition. Le pas de temps de la simulation est supérieur ou égal à celui de la fréquence de collecte des données observées sur le site expérimental. Comme expliqué au chapitre 2, certaines des variables utilisées dans la fonction de Manning pour le calcul du bilan d'eau évoluent dans le temps, telle que la précipitation qui représente en effet l'entrant dynamique dominant dans l'évolution du processus d'écoulement d'eau de surface. Les mesures de précipitation sont pour notre cas d'étude un facteur important dans le choix du pas de temps; d'où la nécessité d'adapter un pas de temps correspondant à la disponibilité des données de précipitation in situ. Cette possibilité d'adaptation est un point fort du modèle proposé dans la phase d'aide à la décision, puisqu'il permet aux décideurs de fixer le pas de temps selon les mesures de précipitations de l'évènement étudié. En outre, la taille de chaque cellule de l'automate est un facteur limitant pour l'incrémentement du temps lors du processus de simulation. En effet, il faut que l'écoulement ait une vitesse qui permette à l'eau de traverser la cellule durant le pas de temps de la simulation s'écoule. Plus explicitement, une condition nécessaire est que le pas de temps de la simulation doit être supérieur au temps requis par l'eau pour traverser la cellule la plus large. Sinon, un pas de temps est additionné avant que l'état de la grille soit mis à jour. Un algorithme simplifié de la simulation est présenté dans la Figure 5.10 de la dernière section de ce chapitre.

Notre modèle s'avère utile pour la simulation des écoulements des eaux lors de périodes d'inondation ou de crues intenses puisque le pas de temps de la simulation peut s'ajuster à celui des prévisions météorologiques afin de simuler différents scénarios d'écoulement et ainsi prévoir les localisations d'accumulation potentielle où les mesures d'urgence devront être déclenchées.

5.3 Fonctionnement de l'application

Notre application est construite afin de représenter puis de simuler les processus spatiotemporels en général, et le ruissellement, en particulier. Quel que soit le processus spatiotemporel étudié, les caractéristiques suivantes demeurent vérifiées. D'abord, la représentation spatiale du processus dépend de l'échelle spatiale. Ensuite, l'identification d'une échelle spatiale se traduit par la sélection d'un ensemble de

primitives géométriques (points, lignes ou polygones) correspondant aux données et permettant la construction des cellules de Voronoï. Quant à la simulation, elle dépend du pas de temps choisi. Nous expliquons dans cette section le fonctionnement de notre application en montrant les liens existants entre les classes, les structures de données, les algorithmes, l'implémentation et l'interface d'utilisation.

Afin de préciser les aspects spatiaux et temporels de l'application, nous commençons dans un premier lieu par illustrer dans la Figure 5.4 la relation entre les cellules de Voronoï qui discrétisent l'espace, les paramètres statiques qui permettent de géo-localiser chaque cellule et les paramètres dynamiques ainsi que le lien avec le procédé de simulation.

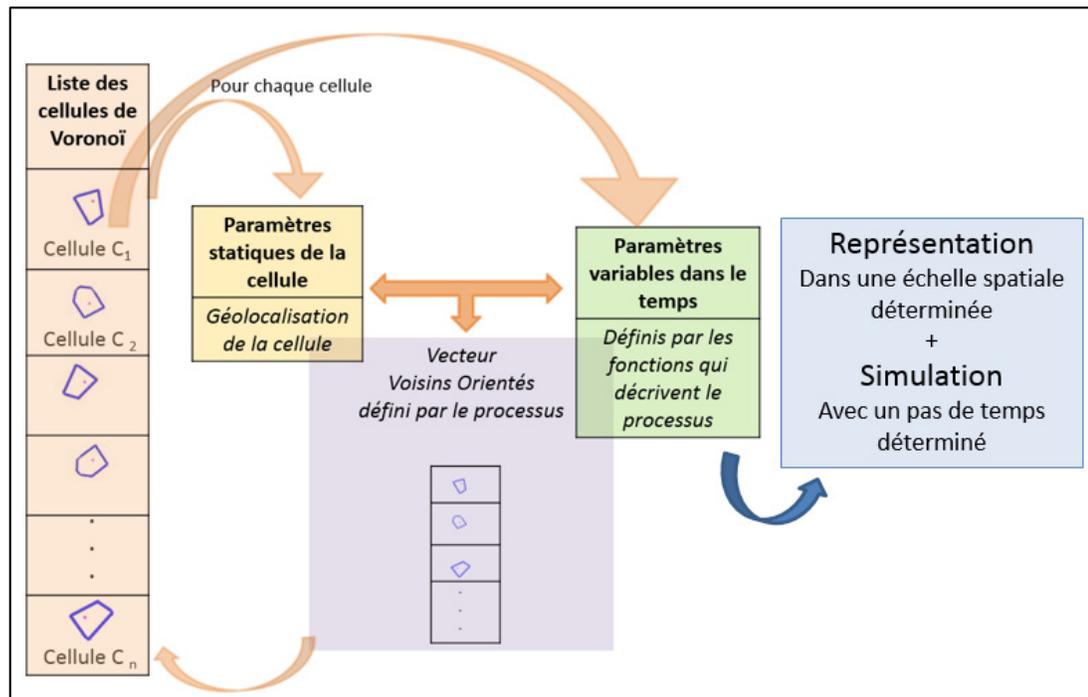


Figure 5.4: Paramètres statiques et dynamiques des cellules de Voronoï

Dans un objectif de simulation, nous classons ces paramètres en paramètres statiques et dynamiques. Les paramètres statiques sont liés aux coordonnées des cellules de Voronoï. Le voisinage orienté peut, selon le processus étudié, être soit statique, soit dynamique. L'évolution des paramètres dynamiques est définie par les fonctions et les lois qui décrivent l'évolution du processus spatiotemporel. Cette évolution est expliquée pour le cas d'écoulement des eaux de surface dans la dernière section de ce chapitre.

5.3.1 Le diagramme de classes

La conception des classes de l'application répond aux objectifs spécifiques du projet tels que présentés dans le chapitre 1. Nous rappelons que les défis précédemment identifiés pour notre contribution de recherche se résument au fonctionnement de l'application dans les points d'intérêt suivants :

- D'abord une géométrie irrégulière de découpage de l'espace induit le choix du diagramme de Voronoï comme grille de représentation du cadre spatial du processus. Les cellules de Voronoï joueront par la suite le rôle des cellules de l'outil de simulation par AC.
- Ensuite une représentation spatiale à différentes échelles selon les niveaux spatiaux d'évolution du processus, ce qui conduit à une structure de type Voronoï hiérarchique.
- Enfin une représentation de l'évolution du processus étudié basée sur une approche combinant le maillage de l'espace, la notion de voisinage et des lois d'évolution dépendantes du processus. Ceci se traduit par le choix d'un outil de simulation par AC qui fonctionne selon le découpage irrégulier et hiérarchique. Une question importante se pose par rapport au choix d'échelle appropriée pour effectuer la simulation. Nous proposons de faire la simulation à plusieurs échelles puis de comparer avec une simulation réalisée à micro-échelle et dont les résultats sont agrégés à travers les méso-échelles jusqu'à la macro-échelle.

La Figure 5.5 présente le diagramme de classe de l'application développée qui comporte quatre classes principales:

- ❖ La classe du diagramme de Voronoï intitulée **Check Polygone** permet de le générer à partir d'un fichier de points ou d'objets pertinents pour étudier l'évolution du processus spatiotemporel. Les fonctions de cette classe proviennent de la librairie libre CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*) que nous présenterons dans la section implémentation. Chacune des cellules de Voronoï est stockée dans la structure intitulée **CellVoro** que nous montrons dans la Figure 5.8 avec ses points de contour ainsi que la liste des cellules voisines. Il est aussi possible d'enregistrer dans la classe **Delaunay Hiérarchie** un nombre déterminé de paramètres liés au processus qui serviront par la suite à établir les règles de transition pour les cellules de l'AC.



Figure 5.5: Diagramme de classe

- ❖ La classe **Delaunay Hiérarchie** constitue notre classe principale qui est présentée dans la Figure 5.6. Elle permet de construire différents diagrammes Voronoï à différentes échelles à partir du diagramme de Voronoï résultant de la classe **CheckPolygone**. Cela correspond à une généralisation du niveau initial selon un critère spécifique des cellules de Voronoï lié à leur position, aux points de contour, aux voisins ou à toute variable décrivant le processus étudié. Les méthodes de hiérarchisation ont été présentées dans le chapitre 4. Pour chaque niveau d'échelle, les coordonnées des cellules de Voronoï de chacun des diagrammes, ainsi que leurs voisins respectifs, sont sauvegardés dans la structure **hierarchieData** (voir Figure 5.7), et leurs résultats dans des fichiers textes de sortie. Cette classe effectue la simulation avec la grille du diagramme de Voronoï dont elle utilise les cellules pour l'AC. Elle contient les méthodes et les fonctions pour établir les règles de transition et mettre à jour l'état des cellules à chaque pas de temps. Elle

permet aussi de sauvegarder les états des cellules à chaque pas de temps dans la structure **etatCellule** (voir Figure 5.7).

- ❖ La classe **FenêtrePrincipale** détermine les fonctionnalités de l'interface de l'application et les boutons d'exécution.
- ❖ La classe **VisualisationScene** comporte les fonctions d'affichage des diagrammes de Voronoï de différentes échelles.

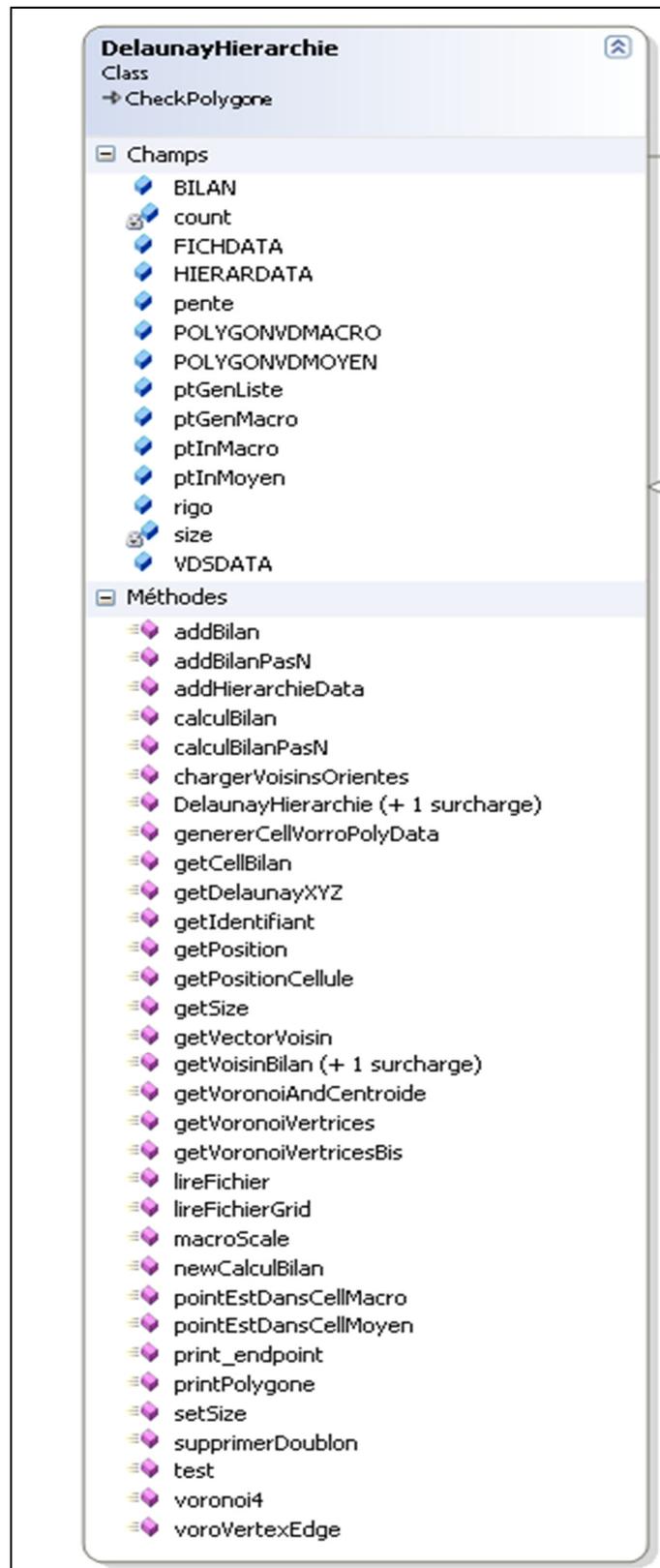


Figure 5.6: La classe principale

5.3.2 Les structures de données utilisées

L'ensemble des structures de données utilisées dans cette application sont présentées dans la Figure 5.7.

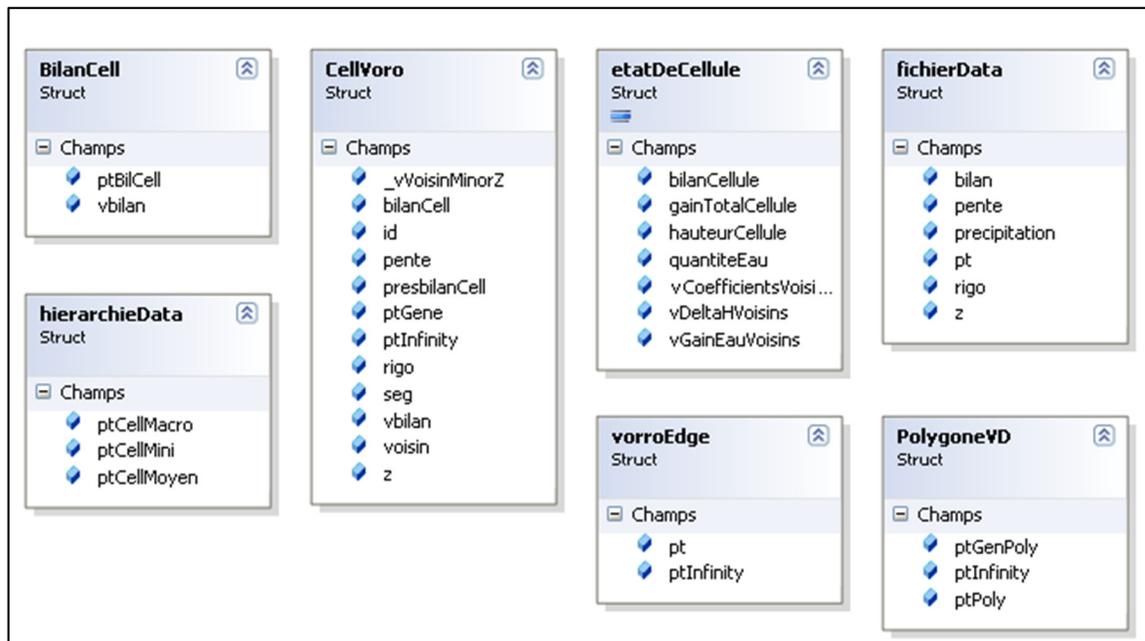


Figure 5.7: Structures de données utilisées

- La structure **fichierData** est conçue afin de prendre en compte les paramètres du fichier d'entrée contenant les données. La Figure 5.7 présente un exemple de champs contenant les données initiales pour le processus d'écoulement des eaux.
- La structure **PolygoneVD** est extraite de la librairie CGAL et permet de gérer les cellules Voronoï, à savoir leur point générateur et leurs vertex. Elle permet aussi d'identifier les cellules qui se trouvent à la limite du diagramme Voronoï et dont certains vertex sont à l'extérieur du diagramme. Ces dernières sont exclues dans notre application.
- La structure **VorroEdge** fait aussi partie de la librairie CGAL qui est utilisée pour la gestion des arêtes des cellules dans la fonction de voisinage.
- La structure **cellVoro** effectue le lien entre le fichier des données et les cellules du diagramme de Voronoï. Ainsi, à chaque cellule de Voronoï seront attribués les paramètres statiques présentés dans la Figure 5.4.
- La structure **etatDeCellule** stocke les paramètres dynamiques de chaque cellule de Voronoï. C'est la structure utilisée comme couche temporaire lors de chaque pas de temps de simulation afin d'y stocker les résultats préliminaires avant la mise à jour synchrone des états de toutes les cellules, et par la suite le passage au pas de temps suivant. Les champs illustrés dans la Figure 5.7

correspondent au cas d'application et seront expliqués en détail dans la dernière section de ce chapitre.

- La structure **hierarchieData** est utilisée pour gérer les cellules du diagramme de Voronoï de chaque échelle spatiale. Elle permet en effet de stocker les points générateurs correspondants. Dans l'illustration de la Figure 5.7, les champs correspondent à trois échelles telles que définies pour le cas d'application.
- La structure **bilanCell** stocke le bilan de chaque cellule à chaque pas de temps de la simulation.

5.3.3 Les algorithmes de base de l'application

L'application développée met en évidence notre contribution de recherche pour la compréhension, la représentation et la simulation des processus spatiotemporels. La conception en trois classes permet de mettre en évidence chacun des défis de recherche et d'offrir une flexibilité compatible avec différents types de processus spatiotemporels.

Le fonctionnement de l'application est le suivant :

- Il commence par la construction d'une tessellation irrégulière de type Voronoï à partir des coordonnées de points de données originales comme le montre l'algorithme de la Figure 5.8. Le résultat est représenté grâce à une interface graphique où on visualise l'espace découpé en cellules de Voronoï autour des points générateurs. En outre, le résultat est aussi sauvegardé dans une liste de cellules de Voronoï qui contient d'une part tous les paramètres géométriques propres au diagramme de Voronoï tels que les points générateurs, les points de contours et les cellules voisines, et d'autre part, tous les autres paramètres spécifiques du processus spatiotemporel étudié. Cette liste est obtenue avec la structure **cellVoro** (Figure 5.7). Ces paramètres du processus de ruissellement seront détaillés dans la prochaine section.

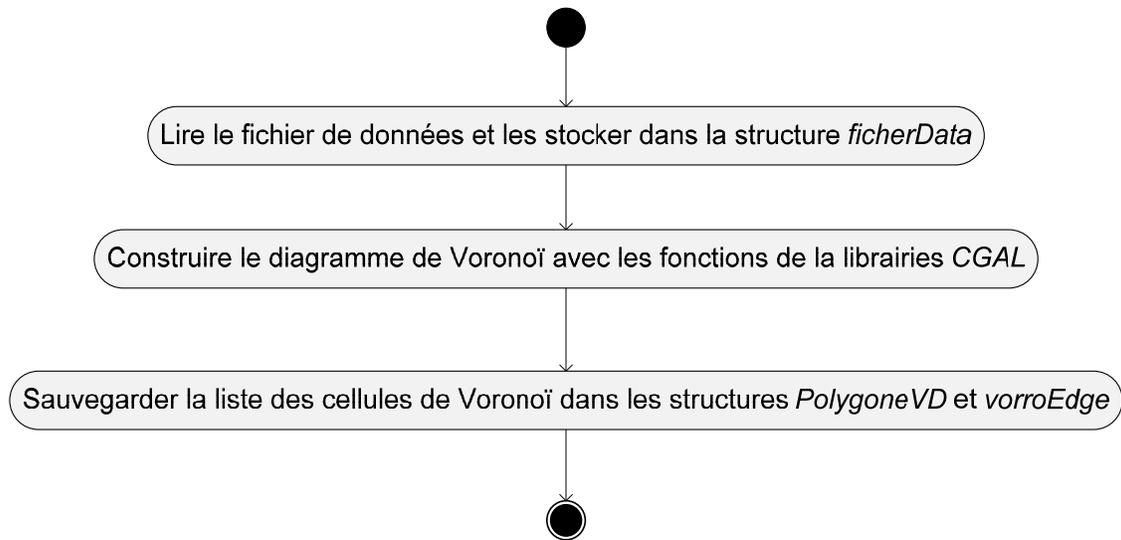


Figure 5.8: Algorithme de découpage de l'espace en tessellation irrégulière de type Voronoï

- Ensuite, la phase de hiérarchisation permet de spécifier les critères de généralisation, ce qui met en évidence l'approche de sélection de données présentée au chapitre 4. Cette phase produit plusieurs niveaux d'échelles de diagrammes de Voronoï à partir du diagramme initial (Figure 5.9), tout en gardant une indexation des cellules dans la structure *hierarchieData*, ce qui permet la navigation entre les échelles.

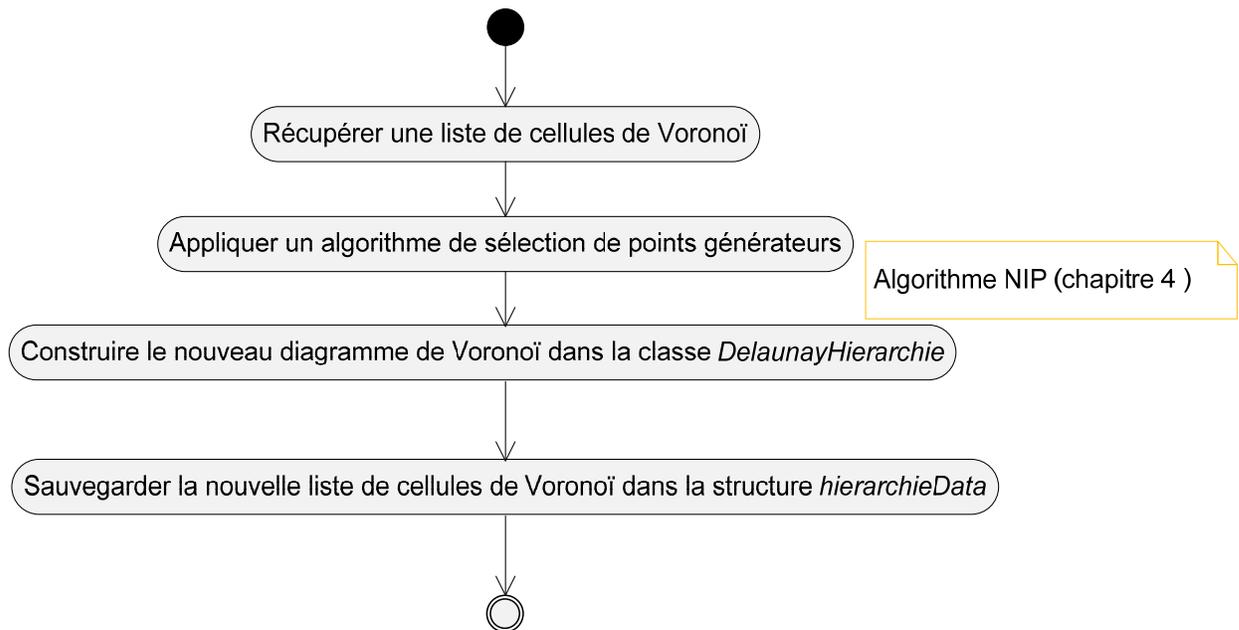


Figure 5.9: Algorithme de hiérarchisation du diagramme de Voronoï

- Le processus de simulation vient en dernier lieu et peut se faire soit dans le premier niveau de représentation qui correspond à un diagramme de Voronoï de micro-échelle, soit dans un autre niveau de méso ou de macro échelle. La section suivante présente les fonctions utilisées pour la simulation du ruissellement. La Figure 5.10 présente l'algorithme général de simulation des processus spatiotemporels par AC.

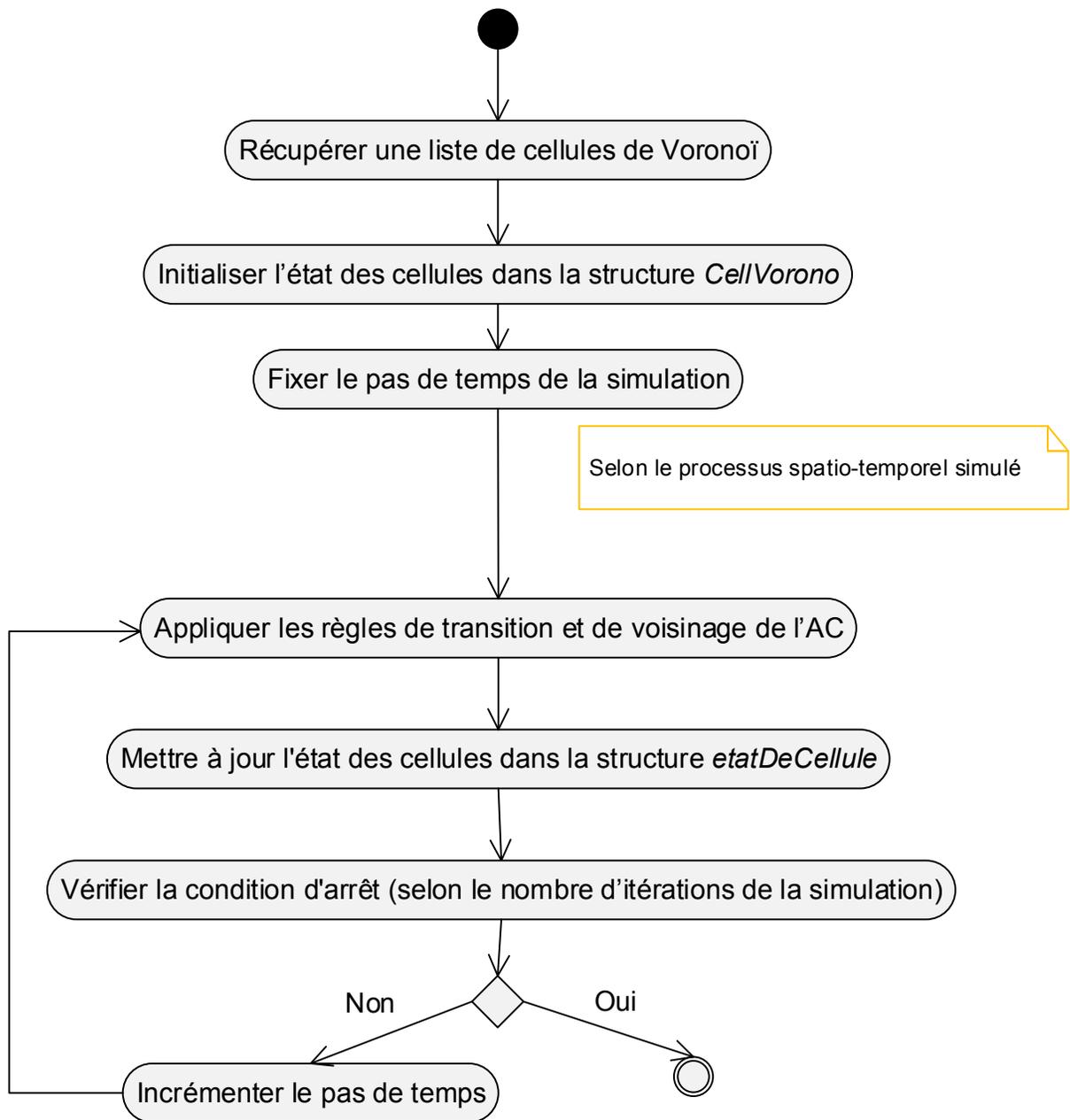


Figure 5.10: Algorithme de simulation des processus spatiotemporels par AC

5.3.4 Interface de l'application

Telle que présentée dans la Figure 5.5, la classe *Fenêtre principale* encapsule les fonctions d'interface de l'application. La Figure 5.11 présente une vue globale de l'interface.

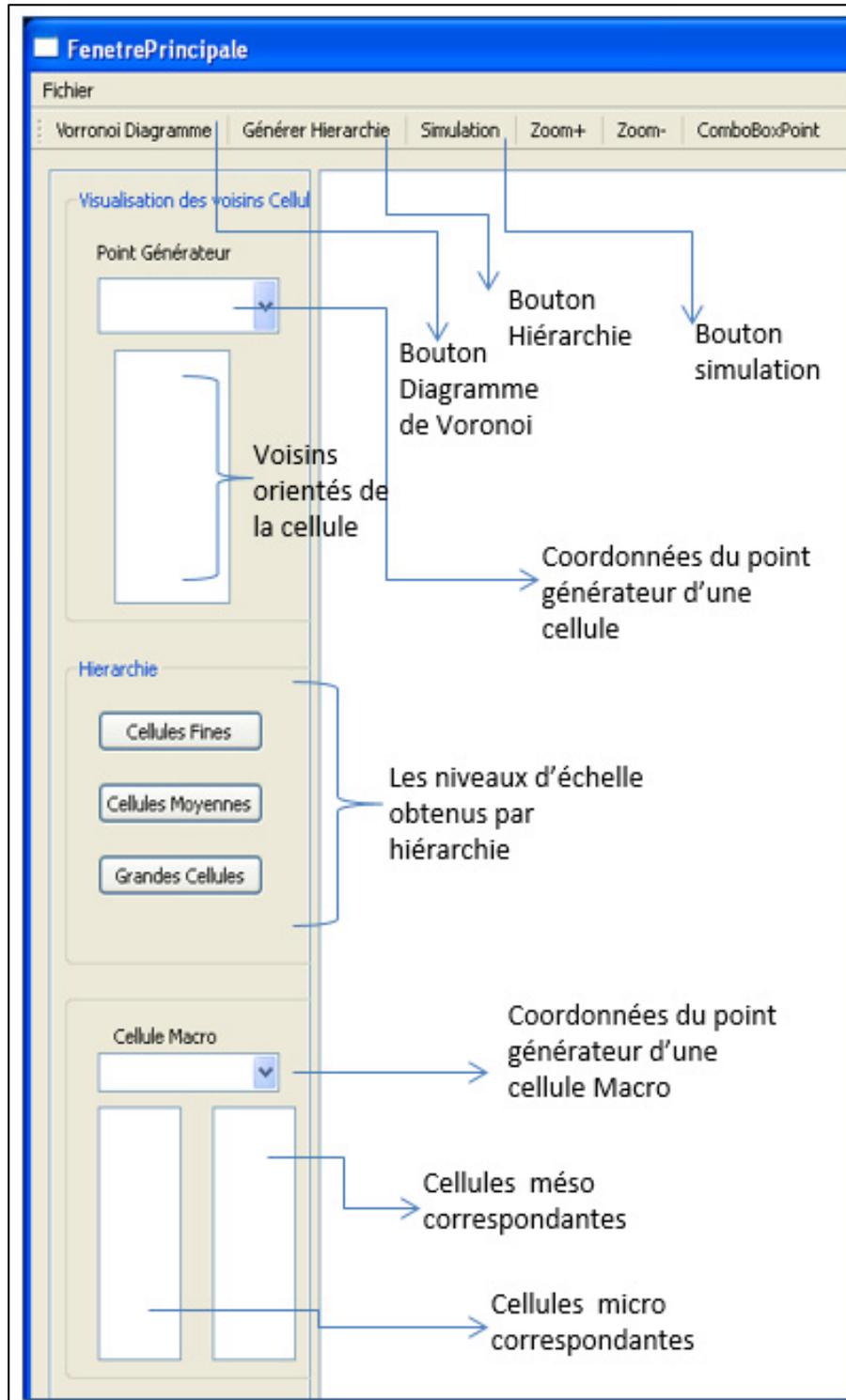


Figure 5.11: Interface globale de l'application

- L'onglet *Voronoi Diagramme* permet de construire le diagramme de Voronoï associé au fichier de points de données et de l'afficher à l'écran. Ce bouton fait le lien avec la classe **CheckPolygone** (Figure 5.5) qui utilise les structures **PolygoneVD** et **vorroEdge** (Figure 5.7). La Figure 5.12 présente un exemple d'affichage du résultat.

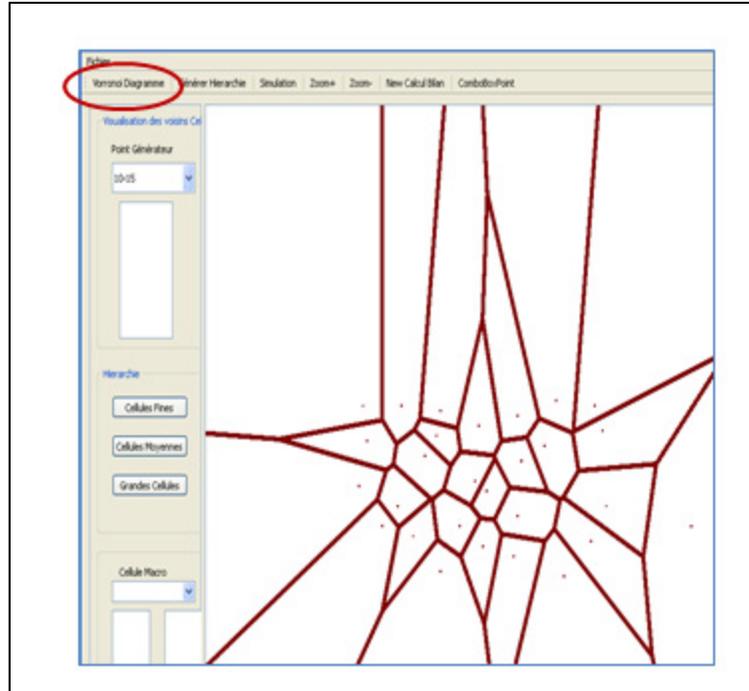


Figure 5.12: Interface : L'onglet *Voronoi Diagramme*

- Le bouton *Générer hiérarchie* permet de construire un diagramme de Voronoï pour chaque échelle spatiale. L'affichage de chaque diagramme se fait à l'aide des boutons de l'onglet *Hiérarchie* (Figure 5.13).

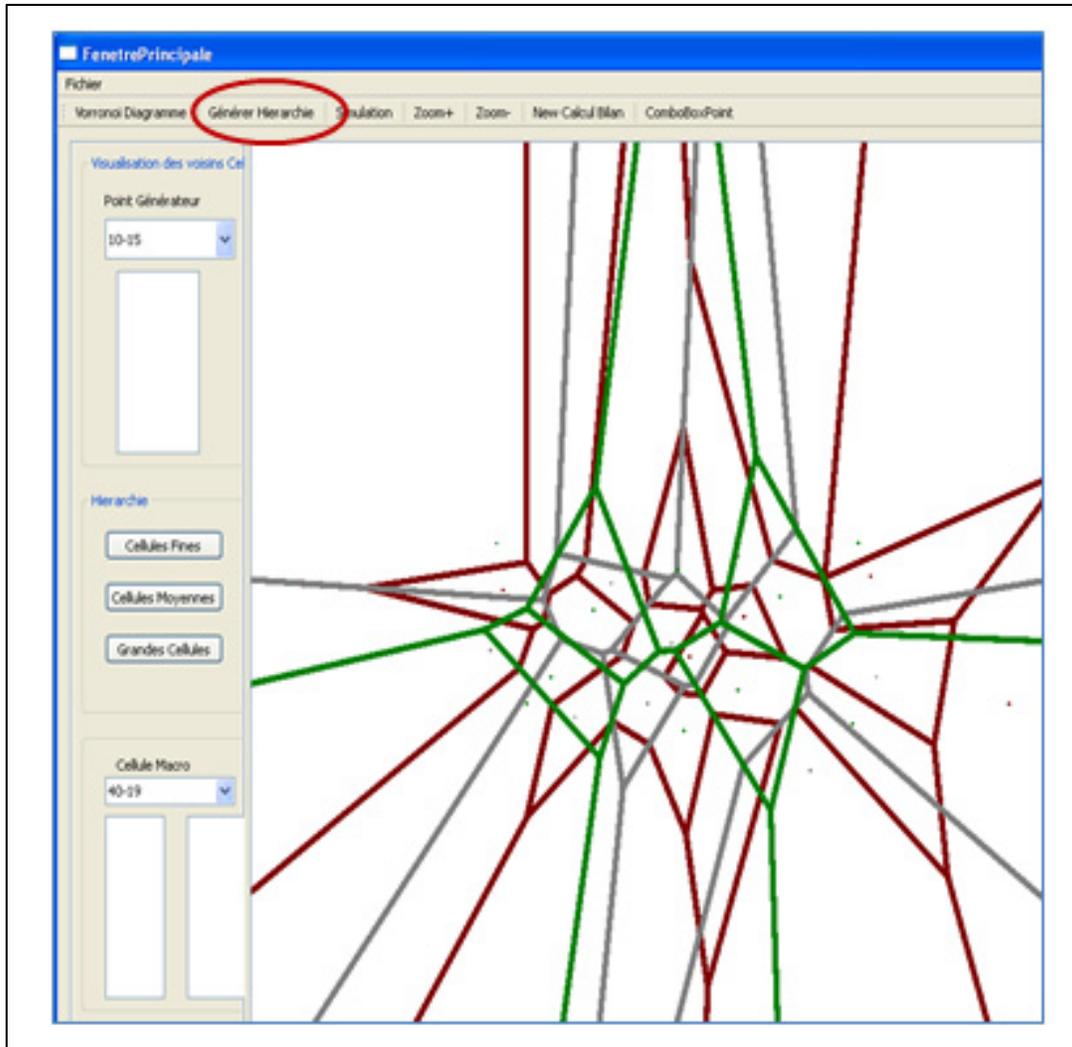


Figure 5.13: Interface : L'onglet *Général Hiérarchie*

- L'onglet *Simulation* effectue la simulation et produit des fichiers de type texte avec les résultats des bilans d'eau par cellule et par pas de temps.
 Dans le cadre *Point Générateur*, il est possible de sélectionner une cellule de Voronoi particulière dans le diagramme de la fenêtre principale et d'afficher ses coordonnées ainsi que celles des cellules voisines.
 La Figure 5.14 présente un exemple d'affichage du cadre *Point Générateur*.

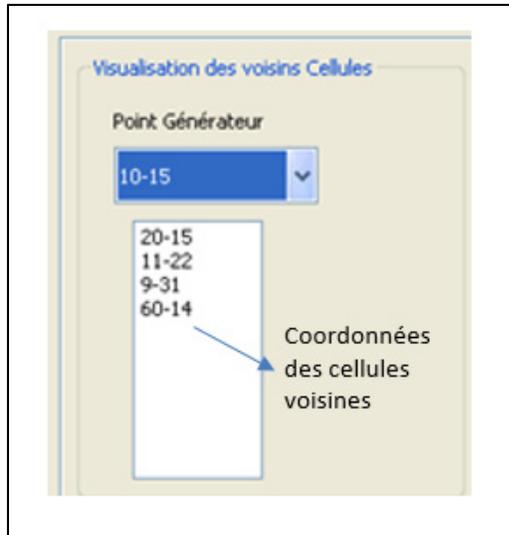


Figure 5.14: Interface : Cadre *Point Générateur*

- Le cadre *Cellule Macro* permet de sélectionner une cellule appartenant à l'échelle macro et d'afficher dans les deux listes subordonnées les coordonnées des cellules correspondantes dans les échelles méso et micro (Figure 5.15).

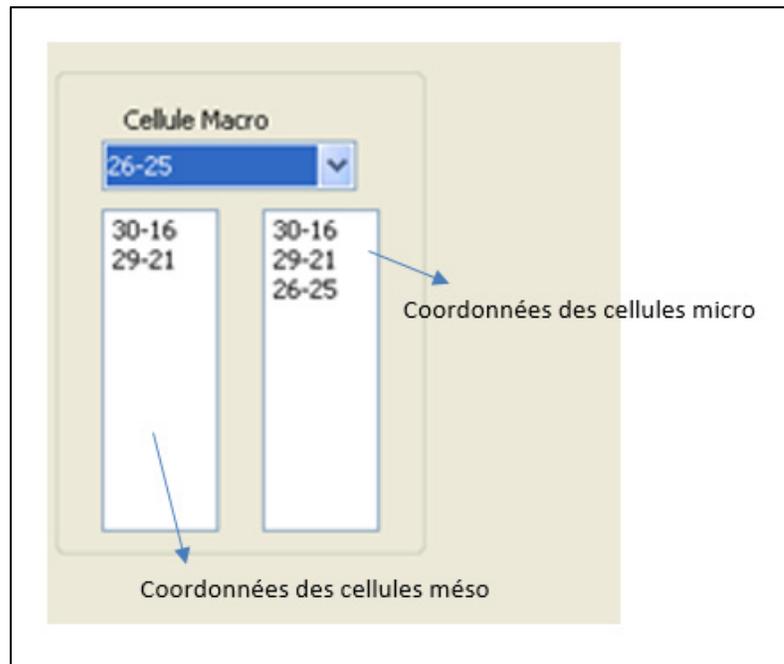


Figure 5.15: Interface : Le cadre *Cellule Macro*

5.3.4 Implémentation

La construction du diagramme de Voronoï ne représente pas un défi de ce travail de recherche qui réside plutôt dans l'utilisation de ce dernier pour produire un découpage irrégulier de l'espace en vue d'une simulation par AC des processus spatiotemporels. Nous avons choisi d'utiliser une librairie géométrique logicielle pour construire le diagramme de Voronoï.

Le choix particulier de la librairie CGAL (*Computational Geometry Algorithms Library*) est justifié par sa robustesse et de sa capacité à implanter des diagrammes de Voronoï, non seulement pour des objets ponctuels, mais aussi pour des lignes et des polygones. Nous concevons ainsi un système de simulation adapté pour une multitude de processus spatiotemporels qui peuvent être représentés par diverses primitives géométriques. CGAL existe depuis 1996 sous la forme d'un produit « open source » issu de la collaboration de plusieurs groupes de recherche afin de rassembler leur avancement dans les bibliothèques de fonctions géométriques. CGAL est aussi une librairie gratuite qui à part l'accès au code source et aux algorithmes géométriques, offre un support aux utilisateurs. La version 3.8 de CGAL a été utilisée (la plus récente au moment de l'implantation de notre système). Le choix du langage de programmation C++ est imposé par la librairie CGAL, et le développement a été réalisé dans l'environnement *Microsoft Visual Studio*.

Pour des applications de démonstration de CGAL, il existe une bibliothèque associée Qt⁴ qui a été utilisée pour présenter l'aspect graphique de notre implémentation et construire une interface utilisateur. Comme CGAL, Qt4 est une librairie logicielle orientée objet et développée en C++. Comme illustré dans la Figure 5.10, nous utilisons cette interface pour exécuter les tâches des différentes classes du système et afficher le diagramme de Voronoï, les voisins de chaque cellule ainsi que les échelles spatiales construites à partir d'un jeu de données. Néanmoins, au-delà de l'affichage, les générateurs des cellules de Voronoï de chaque échelle, les voisins ainsi que le résultat de l'exécution des tâches de la classe simulation sont enregistrés dans des fichiers de sortie en format texte, ce qui permet de visualiser les résultats de simulation dans un logiciel de SIG tel qu'ArcGIS.

5.4 Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons expliqué la conception du système de simulation des processus spatiotemporels. C'est un système qui se base sur un découpage irrégulier et hiérarchique de l'espace de type Voronoï. Nous avons élaboré une simulation qui utilise les cellules du diagramme de Voronoï avec un AC grâce à des modifications de ce dernier pour l'adapter aux spécificités des processus étudiés. Nous avons défini une grille à géométrie irrégulière, un voisinage orienté dynamique et non commutatif, un état de cellules non discret qui est fonction des particularités du processus simulé.

Nous avons présenté la structure générale de l'application adaptée aux processus spatiotemporels, le prototype résultant, son interface ainsi que son implémentation, tout en expliquant les structures de données utilisées.

Le chapitre 6 présente un exemple d'utilisation utilisant les données d'élévation d'une zone de la forêt Montmorency à Québec pour simuler le ruissellement des eaux.

Chapitre 6 : Cas d'application et résultats de l'expérimentation pour le processus d'écoulement des eaux de surface

6.1. Introduction

La gestion de l'eau demeure l'une des préoccupations majeures tant des scientifiques que des décideurs et des gestionnaires de grands projets gouvernementaux, et ce, aussi bien pour la prévention des catastrophes naturelles que pour les plans de conservation de l'eau. Les exemples d'application de la gestion de l'eau sont nombreux, citons l'étude des glissements de terrains dans des zones à versants instables, l'étude de l'érosion, la gestion des périmètres irrigués en agriculture et l'implantation des barrages collinaires (qui sont des ouvrages de stockage de l'eau) pour la lutte contre la sécheresse.

Dans un objectif d'aide à la décision pour la prévention d'inondation suite à un événement de précipitation, nous proposons de faire la simulation du ruissellement par automate cellulaire. Cet exemple constitue un cas d'application du système de simulation des processus spatiotemporels élaboré précédemment.

Dans ce chapitre nous proposons de faire preuve du concept de simulation développé. Il s'agit plus spécifiquement d'expérimenter d'une manière simplifiée le système élaboré pour un bassin versant spécifique avec des données de topographie et de débits d'eau de surface. La première section présente la zone d'étude et les données disponibles, puis l'application des algorithmes développés pour la zone d'étude. La seconde énonce les simplifications considérées, les hypothèses et le choix des paramètres de calcul avant de présenter les résultats de simulation. Nous terminons par une procédure de validation de la simulation notamment pour des comparaisons du comportement global de l'écoulement simulé avec celui déduit des données de débit d'eau mesurées pour la zone d'étude.

6.2 Zone d'expérimentation et données

6.2.1 Présentation de la zone d'expérimentation : le bassin des Eaux-volées

Selon la FFGG [2012] : « La Forêt Montmorency est située sur des terres publiques à 80 km de l'Université Laval à Québec. Elle fait partie de la région écologique du massif du Lac Jacques-Cartier et constitue une enclave dans la réserve faunique des Laurentides. La forêt d'enseignement et de recherche fait partie de la municipalité régionale de comté de la Côte-de-Beaupré, dans la région administrative de la Capitale-Nationale et dans l'unité de gestion de Portneuf-Laurentides. Elle est localisée approximativement entre les

latitudes 41°12'N et 41°22'N et les longitudes 71°11'O et 71°04'O, dans la sapinière à bouleau blanc de l'Est du Québec (Figure 6.1.a). La Forêt Montmorency a été confiée à l'Université Laval par le gouvernement du Québec en 1964, en vertu d'un contrat d'emphytéose d'une durée de 99 ans, pour des fins d'enseignement et de recherche en sciences forestière et géodésique. C'est un véritable laboratoire grandeur nature d'une superficie de 66 km², à la disposition des étudiants, des professeurs et des chercheurs dans les différents domaines associés à la forêt. Depuis maintenant plus de 45 ans, cette forêt est aménagée suivant les principes du développement durable, conformément à un plan général d'aménagement intégré qui valorise donc l'ensemble des ressources forestières ».

Parmi les quatre unités territoriales de la forêt Montmorency présentées dans la Figure 6.1.b, le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux-Volées (BEREV) se situe à une latitude de 47°16' 20", une longitude de 71°09' 40" et une altitude variant entre 560 et 1000 m. Il couvre une superficie de 9.3 Km² et a comme fonction majeure la recherche scientifique depuis 1965. Il s'agit à l'origine d'un dispositif implanté dans le cadre d'un projet de recherche sur l'impact des coupes sur l'hydrologie des bassins versants. Le BEREV est composé de quatre sous-bassins comme nous les représentons dans la Figure 6.1.c.

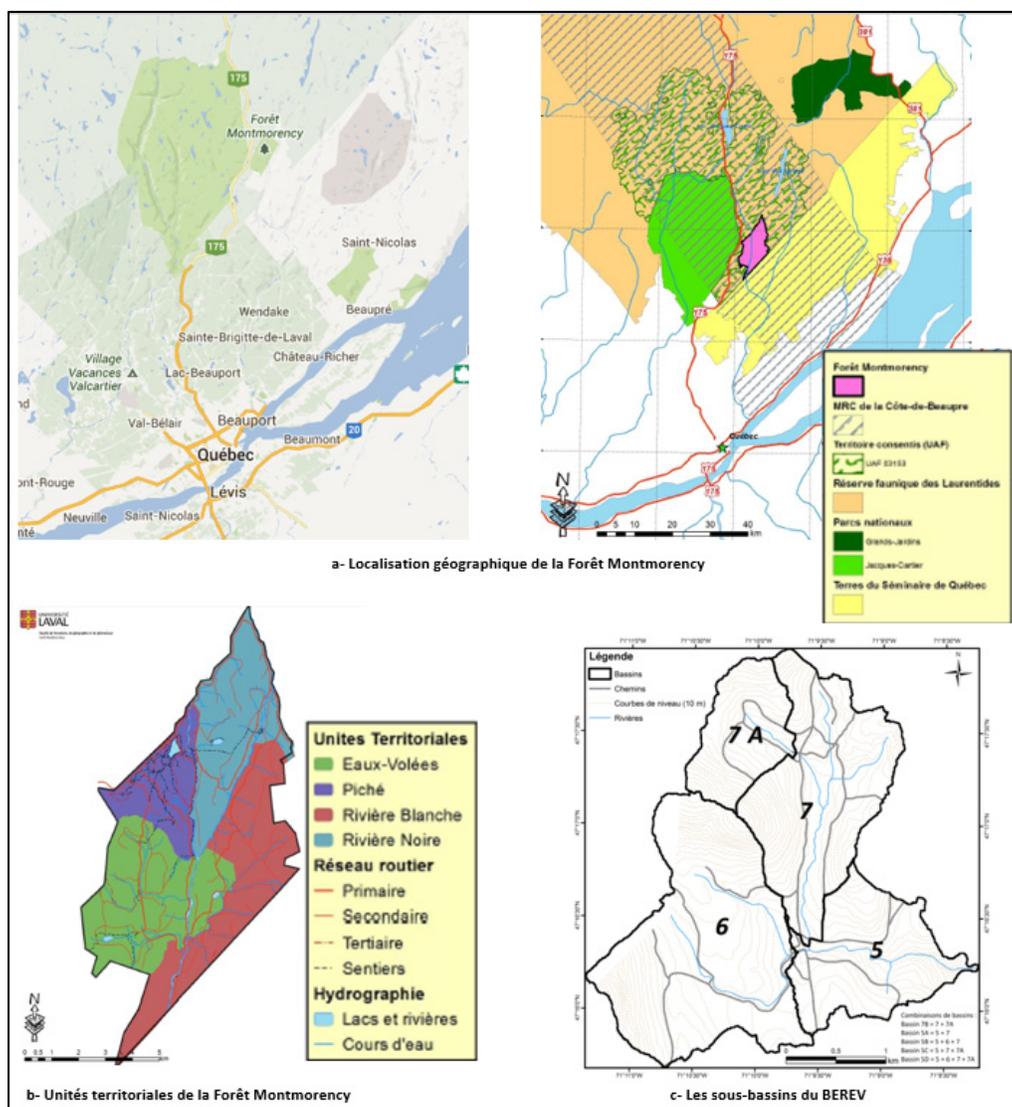


Figure 6.1: Localisation géographique et unités territoriales de la Forêt Montmorency [FFGG, 2012]

Le choix de ce bassin expérimental comme zone d'étude est essentiellement basé sur la disponibilité des données hydrologiques sur une durée d'au moins quarante années. Ceci représente un atout important dans le cadre d'une simulation du ruissellement, notamment pour confronter les résultats avec des données mesurées. La section suivante présente les données disponibles et utilisées dans notre expérimentation.

6.2.1.1 Données disponibles

Les données disponibles sont présentées en deux catégories : les données mesurées sur le terrain et les données modélisées qui résultent de traitements.

6.2.2.1.1 Données mesurées : météorologiques et hydrométriques

- Une station météorologique gérée par le Ministère de l'Environnement du Canada est située à quelques kilomètres au nord du BEREV. Elle est appelée station principale et fournit des données de températures et de précipitations.
- Quatre seuils jaugeurs ont été installés au BEREV et fournissent des données de débit d'écoulement. Elles sont publiées par le Centre d'Expertise Hydrique du Québec (CEHQ) au pas de temps journalier depuis 1965 et instantané depuis 1995.

La Figure 6.2 présente les emplacements de la station principale et des quatre seuils jaugeurs du BEREV et qui se trouvent dans les points exutoires des sous-bassins. Les points exutoires sont les destinations finales ou points de sortie de l'eau écoulée à travers chacun des sous-bassins. Par conséquent, ils présentent un intérêt majeur pour notre expérimentation en fournissant des valeurs de débits d'eau utilisée dans la démarche de validation expliquée dans les sections suivantes.

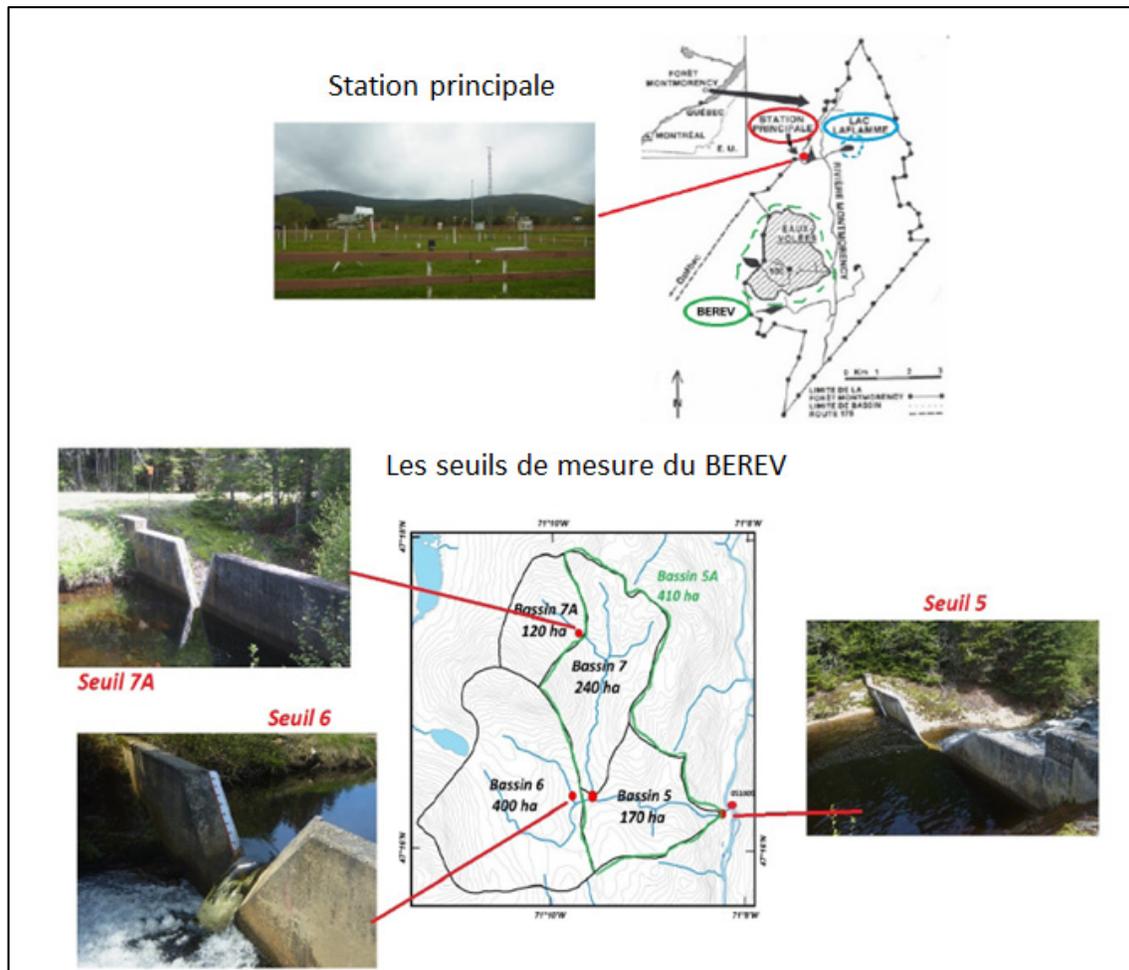


Figure 6.2: Localisation des stations de mesure des données météorologiques et hydrologiques

6.2.1.1.2 Données modélisées

Le centre **GéoStat** à la bibliothèque de l'Université Laval donne accès à une base de données géospatiales qui fournit notamment des données vectorielles et matricielles de topographie, d'hydrologie et de foresterie accessibles via la plateforme de diffusion **Géoindex**. Pour la simulation de ruissellement par automate cellulaire, nous avons essentiellement besoin de la géomorphologie qui est déduite des données d'altitude issues des modèles numériques de terrain, des courbes de niveaux et des points cotés. Or, comme la structure de données que nous avons développée est basée sur une géométrie irrégulière, nous disposons de multiples choix quant aux sources de données d'altitude à utiliser. Ce qui compte pour cette application est de disposer des coordonnées et de l'altitude d'un ensemble de points qui constituent les objets géographiques de la structure de données. Nous discrétisons l'espace, où se déroule le processus spatiotemporel à simuler, selon une structure irrégulière issue d'un diagramme de Voronoï hiérarchique multi-échelle. Nous effectuons ensuite des sélections de points pour passer d'une échelle à l'autre (chapitre 4). Ainsi, la source de données principale utilisée est un modèle numérique d'altitude sous forme raster à l'échelle 1/20 000 dont trois feuillets couvrent la totalité de la forêt Montmorency et ses alentours. La Figure 6.3 présente les feuillets 21M06-202, 21M06-102 et 21M03-202 sur le portail **Géoindex** de la bibliothèque de l'Université Laval.

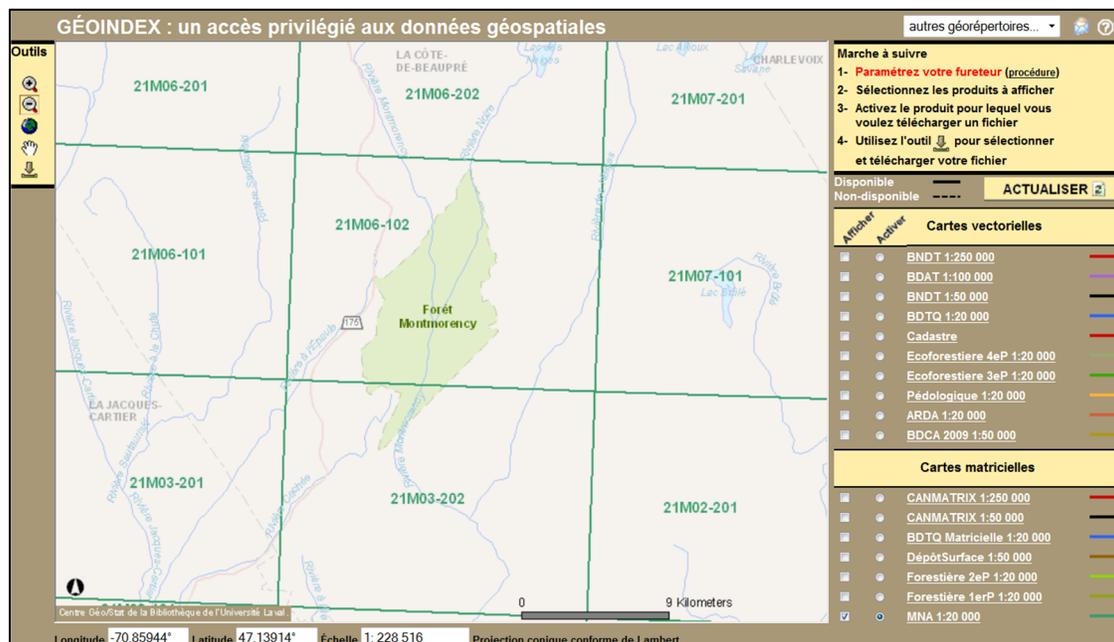


Figure 6.3: MNA 1 :20 000 disponible sur le portail Géoindex de la bibliothèque de l'Université Laval

Des données vectorielles de la base de données topographique du Québec (BDTQ 1 : 20 000) notamment les thèmes hydrographie, hypsographie et végétation ont permis de mieux représenter la topographie de la zone d'expérimentation en particulier dans le choix des échelles spatiales pertinentes.

6.3 Conception de la simulation du processus de ruissellement

Les simulations de l'écoulement des eaux dans les bassins versants sont traditionnellement basées sur la résolution numérique des équations différentielles de quantité de mouvement et de charge. Dans une application de simulation par automate cellulaire, ce sont plutôt les règles de transition qui dictent l'écoulement de l'eau entre les cellules. Ces dernières reproduisent les processus physiques responsables du mouvement de l'eau. Ainsi, afin de respecter la loi de conservation de la masse, les règles de l'AC devraient spécifier d'une part, les quantités d'eau provenant des précipitations et ajoutées à chaque cellule de l'automate, et d'autre part, les quantités perdues par infiltration dans le sol par les végétaux et par évaporation dans l'air.

6.3.1 Déroulement de la simulation

Les étapes de simulation sont stockées dans la structure *etatDeCellule* présentée à la Figure 6.4. Cette structure sauvegarde l'état de chaque cellule qui est représenté par les valeurs calculées des paramètres servant au calcul de l'écoulement à partir du type de voisinage de l'AC et des règles de transition. Ces paramètres permettent de quantifier la quantité d'eau totale reçue ou perdue par échange avec les cellules voisines à chaque pas de temps.

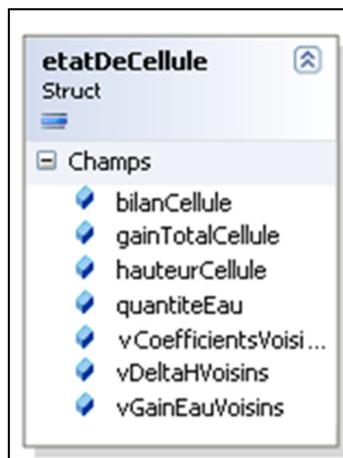


Figure 6.4: La structure de l'état de la cellule

La méthode suivante est utilisée :

- Pour chaque cellule, on calcule la vitesse de l'eau en utilisant l'équation de Manning. La vitesse dépend d'abord du volume d'eau reçu par unité de surface, ensuite de la topographie qui génère la

penne de la surface de l'eau et aussi du type de sol ainsi que la végétation qui contribuent ensemble à définir ce qu'on appelle la rugosité du sol : c'est un coefficient de ruissellement sans unité qui tient compte du pourcentage de la surface qui est imperméable, ce qui se traduit par la proportion de l'eau totale précipitée qui ruisselle.

La vitesse est calculée selon l'équation de Manning (Équation 6.1).

$$Vitesse = \frac{(Pronfondeur\ de\ l'eau)^{\frac{2}{3}} \cdot (Pente\ de\ la\ surface\ de\ l'eau)^{\frac{1}{2}}}{coefficient\ de\ rugosité\ du\ sol}$$

(Équation 6.1)

L'équation de Manning est une formule empirique utilisée dans les calculs des écoulements dans des canaux libres. Or, comme on simule un écoulement de surface, la profondeur de l'eau dans l'équation 6.1 est une approximation du rayon hydraulique de la formule originale de l'équation de Manning. La même approximation a été aussi utilisée par Parsons et Fonstad [2007]. La profondeur est obtenue par la division du volume d'eau par l'aire de la cellule (Équation 6.2). Dans la pratique, cette profondeur correspond à la mesure de précipitation dont l'unité en millimètre provient d'une hauteur d'eau de 1 mm sur une surface plane de 1 m², et ce dans un cas simplifié d'absence d'infiltration d'eau dans le sol. Sinon, la quantité d'eau infiltrée est déduite de la profondeur de l'eau.

$$Profondeur\ de\ l'eau = \frac{Volume\ d'eau\ dans\ la\ cellule}{Aire\ de\ la\ cellule}$$

(Équation 6.2)

La pente de la surface de l'eau est définie par rapport à la différence de hauteurs totales Δ hauteur entre deux cellules incluant les quantités d'eau qui s'y trouvent. La hauteur totale d'une cellule correspond à la somme de son altitude topographique et de sa profondeur d'eau. D représente la distance entre deux cellules, laquelle est définie par la distance euclidienne entre les générateurs des deux cellules. (Équations 6.3 et 6.4).

$$Hauteur\ totale = altitude\ du\ terrain + profondeur\ de\ l'eau$$

$$Pente\ de\ la\ surface\ de\ l'eau = \frac{\Delta\ hauteur\ totale}{D}$$

(Équations 6.3 et 6.4)

Dans un état d'équilibre initial en absence de précipitations, la pente de la surface de l'eau correspond à la pente du terrain liée à la topographie. Cependant, au fur et à mesure qu'il y a un apport d'eau, les profondeurs d'eau dans les cellules ainsi que la pente de la surface de l'eau varient dans le temps. Un nouvel état d'équilibre est finalement atteint lorsque toute la quantité d'eau des précipitations est distribuée entre les cellules selon les pentes.

Le coefficient de rugosité du sol informe sur la proportion d'eau en ruissellement par rapport à la quantité d'eau totale. Il existe des tables qui déterminent les valeurs de ce coefficient selon la nature du sol et sa couverture. Les valeurs utilisées dans notre système en fonction des caractéristiques du sol de la zone d'étude sont expliquées et discutées en détail dans la section suivante.

- La vitesse est utilisée pour calculer le temps (noté $T_{cellule}$) nécessaire pour que l'eau traverse la cellule (Équation 6.5) en divisant la *largeur* de la cellule par la valeur de la vitesse. Pour une cellule de Voronoï, la largeur est estimée par la moyenne des distances séparant ses vertex.

Le simulateur garde l'eau dans la cellule jusqu'à la fin de la période de temps $T_{cellule}$ au fil de la simulation. Une fois le temps $T_{cellule}$ atteint, l'eau quitte la cellule vers les cellules voisines.

$$T_{cellule} = \frac{\text{largeur}}{\text{vitesse}}$$

(Équation 6.5)

- Auparavant, la quantité (en terme de hauteur) d'eau qui peut quitter la cellule vers les cellules voisines est déterminée selon le principe de voisinage orienté. Cette quantité d'eau en mouvement correspond à la différence des hauteurs d'eau entre le voisin le plus bas et la cellule centrale (Équation 6.6).

$$\text{Quantité d'eau en mouvement} = \max |\Delta \text{Hauteur}_{\text{voisins}}|$$

(Équation 6.6)

La répartition de la quantité d'eau en mouvement entre les cellules voisines s'effectue en fonction des hauteurs de ces dernières en proportion de la différence des hauteurs avec la cellule centrale. Nous exprimons cette répartition d'eau entre les voisins orientés d'une cellule par un ensemble de coefficients qui renseignent sur le rapport de la quantité d'eau reçue par rapport à la quantité totale en mouvement. Pour chaque voisin orienté de chaque cellule de l'automate est calculé un coefficient (Équation 6.7) qui renseigne sur la proportion d'eau qu'il reçoit de la cellule donnanter.

$$\text{Coefficient de voisinage} = \left| \frac{\Delta \text{Hauteur}}{\sum_{\text{voisins}} \Delta \text{Hauteur}} \right|$$

(Équation 6.7)

Par exemple, lorsque deux cellules voisines sont plus basses que la cellule centrale et qu'elles se partagent la quantité d'eau en mouvement, si la première a un écart de hauteur deux fois plus grand que l'autre, alors elle recevra les deux tiers de la quantité d'eau en mouvement.

La quantité d'eau que reçoit chaque voisin et que nous nommons *Gain* (Équation 6.8) est calculée par le produit de son coefficient de voisinage et de la quantité d'eau en mouvement de la cellule centrale.

$$Gain = \text{coefficient de voisinage} \times \text{Quantité d'eau en mouvement}_{\text{cellule centrale}}$$

(Équation 6.8)

La figure 6.5 illustre le partage de la quantité d'eau en mouvement d'une cellule avec ses voisins orientés.

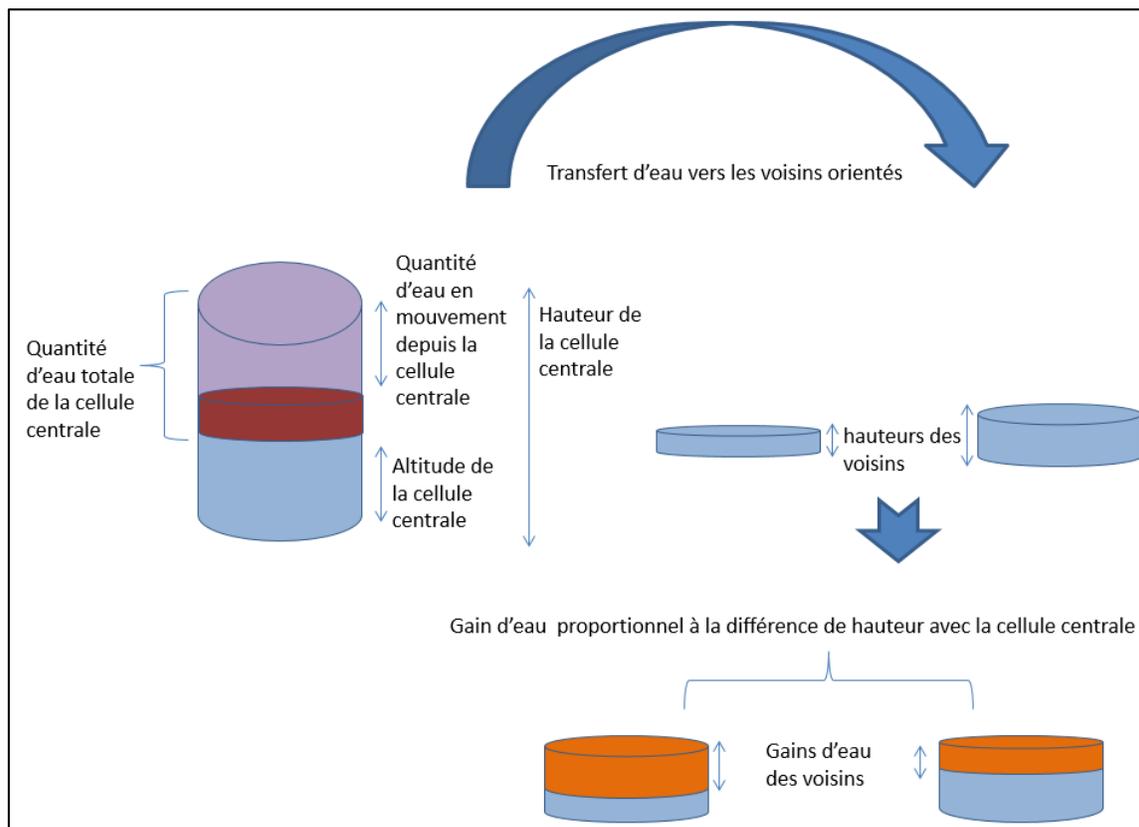


Figure 6.5: Transfert d'eau vers les voisins orientés en fonction de la différence de hauteur

- Afin de permettre une mise à jour simultanée des états de toutes les cellules de l'AC, la quantité d'eau en mouvement pour chaque cellule est d'abord stockée dans une couche temporaire qui

correspond à la structure **etatCellule** (Figure 6.4) en attendant que le processus soit complété pour toutes les cellules de la zone de simulation pour qu'elle soit finalement retranchée du bilan d'eau de la cellule pour le pas de temps en cours. Dans la couche temporaire, les gains des cellules voisines de toutes les cellules de l'automate sont aussi stockés afin de les ajouter au bilan des cellules avant le passage au pas de temps suivant. La Figure 6.6. résume les opérations faites dans chaque pas de temps.

- Finalement, toutes les quantités d'eau en mouvement de toutes les cellules sont ajoutées simultanément aux hauteurs d'eau des cellules voisines en respectant les coefficients de distribution. Toutes les quantités d'eau en mouvement de toutes les cellules sont retranchées de leurs bilans respectifs, ce qui produira le changement d'état de l'automate cellulaire.

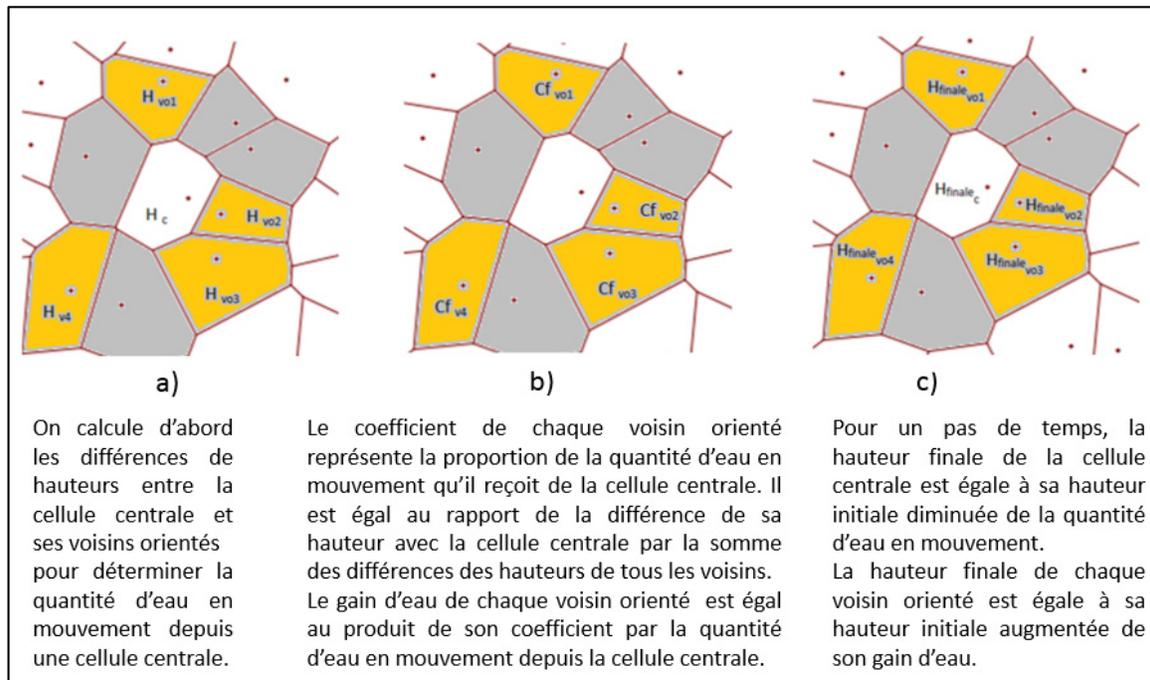


Figure 6.6: Changement d'état des cellules de l'AC

- La dernière composante de l'AC est la définition des conditions aux limites qui permettent de décrire ce qui se passe aux frontières de la grille de simulation. En effet, les cellules frontières se caractérisent par des voisinages incomplets, d'où la nécessité de leur appliquer des conditions spéciales pour régir leur comportement au sein de l'automate. Nous avons présenté dans le chapitre 2 différents types de conditions aux limites utilisées pour les automates cellulaires.

Dans notre application, les échanges entre les cellules de l'AC se font selon le voisinage orienté de telle sorte que la quantité d'eau dans le système est conservée. Ainsi, nous qualifions d'*absorbantes* les cellules se trouvant à la limite du diagramme de Voronoï. Les quantités d'eau dans ces cellules sont surestimées puisque aucun écoulement n'est possible à l'extérieur du diagramme de Voronoï. Par ailleurs, la construction du Diagramme de Voronoï aboutit à des cellules limites nommées *cellules infinies* dans la librairie CGAL, et dont un ou plusieurs vertex sont à l'infini. Ces dernières sont supprimées du diagramme utilisé pour la simulation.

La Figure 6.7 présente la structure de l'application pour le processus de ruissellement où les paramètres statiques qui sont les points générateurs des cellules de Voronoï et les vecteurs voisins orientés de toutes les cellules sont identifiés. Les paramètres variables pour chaque cellule sont la quantité d'eau en mouvement qui se transfère aux voisins, le bilan d'eau qui renseigne sur la quantité d'eau se trouvant dans la cellule, et la hauteur totale de la cellule qui fait intervenir le bilan et l'altitude.

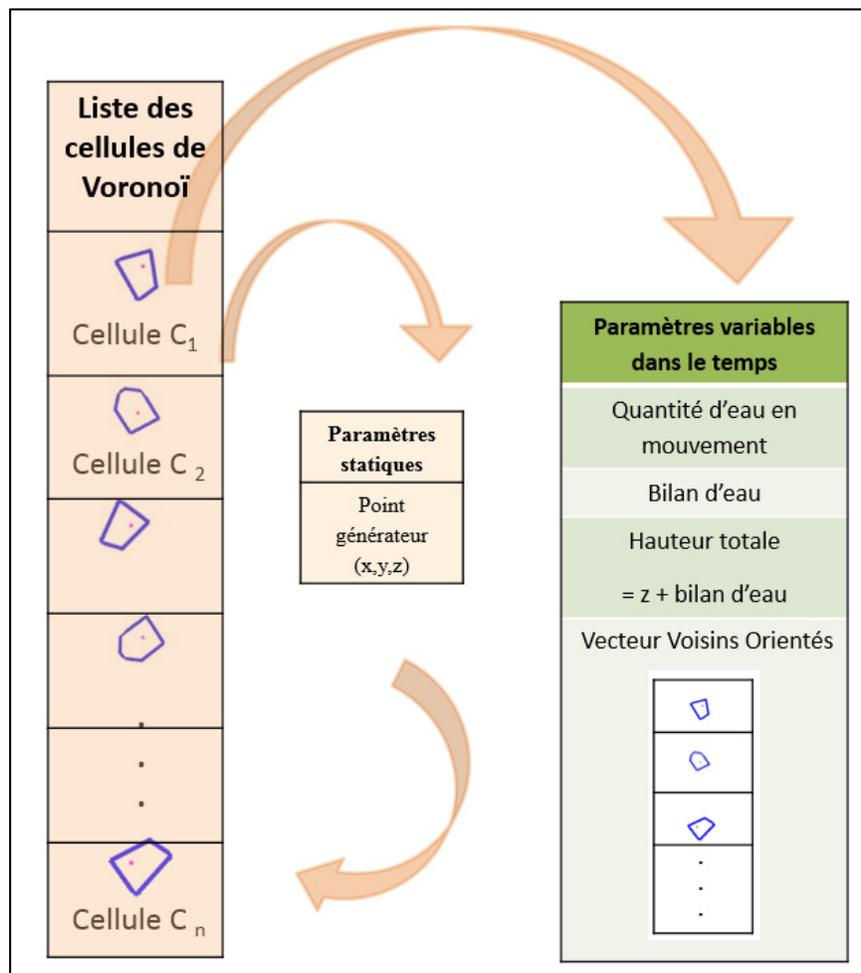


Figure 6.7: Structure de l'application pour le processus de l'écoulement des eaux de surface

6.2 Simplifications des équations de simulation

- La première condition à vérifier pour qu'une quantité d'eau puisse quitter une cellule est que le temps $T_{cellule}$ soit égal ou supérieur au pas de temps de simulation. Ainsi, le choix d'un pas de temps de simulation supérieur à $T_{cellule}$ de toutes les cellules de l'automate garantit qu'un changement d'état de toutes les cellules se fait pour chaque pas de temps. Plus explicitement, toutes les quantités d'eau en mouvement de toutes les cellules sont distribuées aux cellules voisines lors d'un pas de temps de simulation. Une première simplification concernant le pas de temps et vérifiant l'Équation 6.9 est proposée ici :

$$temps\ simulation \geq \max T_{cellule} \quad (\text{Équation 6.9})$$

Pour une cellule donnée, un pas de temps de simulation inférieur à $T_{cellule}$ aura pour effet de surestimer la quantité d'eau réellement en mouvement car une partie de la quantité d'eau calculée n'aura pas suffisamment de temps pour quitter effectivement la cellule.

- Une deuxième simplification est aussi faite pour le calcul du bilan d'eau : Dans la pratique, comme nous le montrons dans l'Équation 6.10, la loi de la conservation de la masse appliquée aux bilans hydriques fait intervenir les quantités d'eau perdues par évaporation et infiltration dans le sol.

$$Bilan_{cellule} = Q_{reçue} - (Q_{transférée_{voisins}} + Infiltration_{sol} + Évaporation) \quad (\text{Équation 6.10})$$

Or, nous avons ignoré les processus d'infiltration de l'eau dans le sol, de l'utilisation par les végétaux et de l'évaporation dans notre application (Équation 6.11). Nous ne faisons intervenir dans les opérations de l'AC que les quantités d'eau reçues par précipitation et celles transférées vers les voisins. Notre objectif n'est pas d'aboutir à un modèle hydrologique qui évalue les bilans d'eau dans un bassin versant mais plutôt de faire la preuve de l'intérêt de l'utilisation de l'AC dans un contexte d'évaluation et de simulation du ruissellement d'eau en respectant des règles de transition spécifiques au processus. Il est aussi possible d'identifier des cas réels où ces simplifications peuvent être appliquées lorsque les processus d'infiltration et d'évapotranspiration sont presque absents. Une discussion suivra dans la section de comparaison des résultats de simulation avec des données mesurées sur le terrain.

$$Infiltration_{sol} = Évaporation = Utilisation_{végétaux} = 0 \quad (\text{Équation 6.11})$$

Ainsi, pour chaque cellule de l'automate, les quantités d'eau correspondant aux processus que nous ignorons devraient être retranchées de la quantité d'eau reçue avant de passer à l'opération de transfert vers les cellules voisines. La prise en compte des processus d'évaporation, d'utilisation par les végétaux et d'infiltration dans le sol aurait pour effet de diminuer les valeurs de bilans obtenues. Elle aurait aussi un effet sur le choix du pas de temps de simulation, car il faudrait vérifier selon les conditions du climat et de l'état du sol, les périodes de temps nécessaires pour le déroulement de ces processus.

- Une troisième simplification concerne les conditions aux limites de l'AC. Dans notre cas, nous avons opté pour des limites absorbantes qui éliminent les quantités d'eau arrivant aux frontières de la grille de simulation. Ainsi, les cellules se trouvant aux limites de la zone de simulation absorbent l'eau qui y rentre en l'accumulant dans une cellule fictive de stockage qui n'affectera pas la suite de la simulation.

La Figure 6.8 présente l'algorithme de simulation pour le processus d'écoulement des eaux de surface.

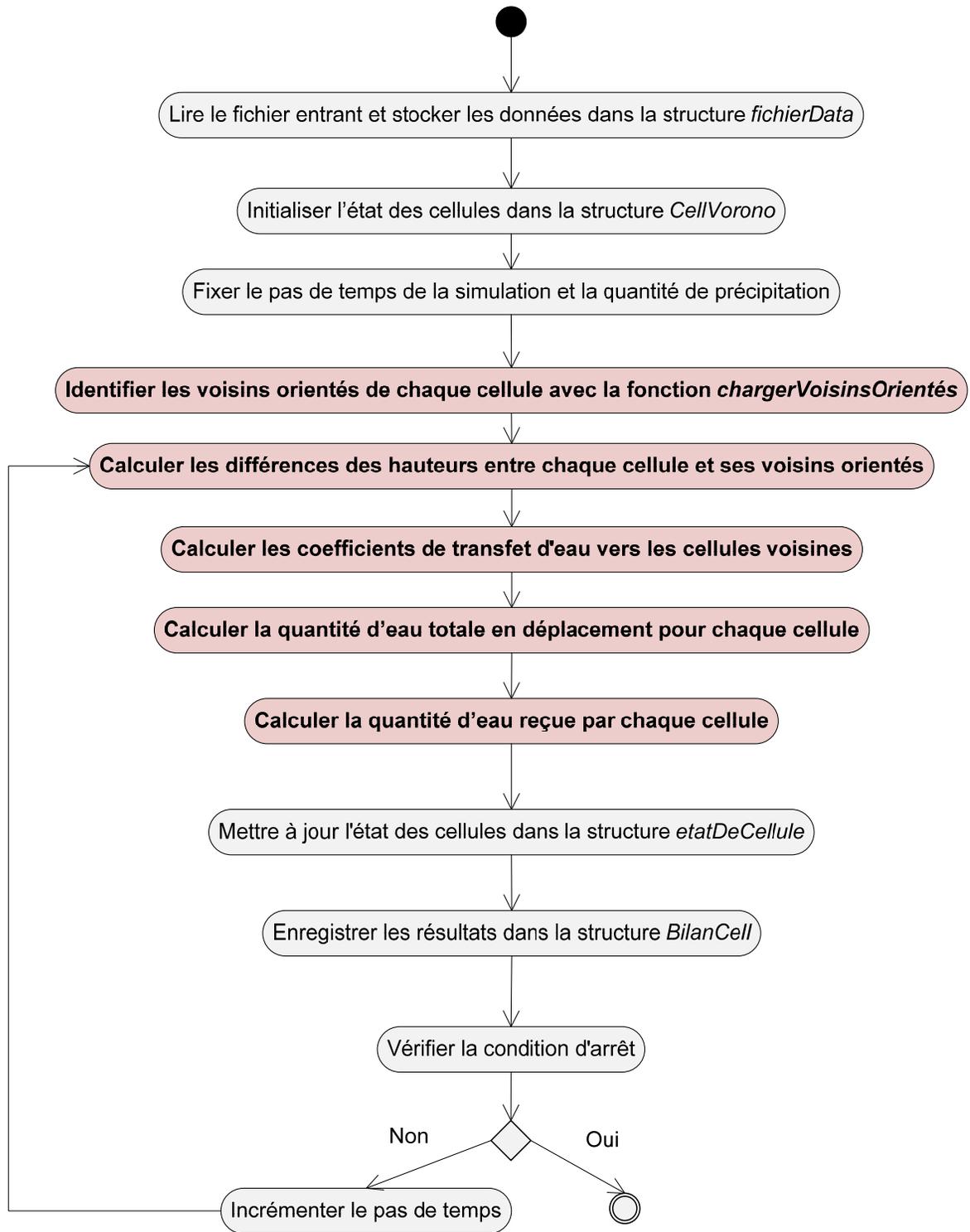


Figure 6.8: Algorithme de simulation de l'écoulement des eaux de surface par AC

6.4 Simulation, validation et résultats

6.4.1 Préparation du système de simulation et calibrage

Pour le prototype présenté dans le chapitre 5, le système de simulation est basé sur une approche par automate cellulaire dont la tessellation spatiale est du type Voronoï hiérarchique. Il en résulte que, quel que soit le processus spatiotemporel pris en compte, le système permet de construire une grille irrégulière et hiérarchique de l'espace qui offre une discrétisation spatiale multi-échelle de type Voronoï. Les objets géographiques représentés par le diagramme de Voronoï ainsi que l'approche de sélection pour le passage aux échelles supérieures dépendent du processus étudié et des objectifs de la représentation. De même, les composantes de fonctionnement de l'AC telles que les états des cellules, les règles de transition et les conditions d'itération demeurent étroitement liées au processus étudié.

Pour le processus d'écoulement de l'eau de surface, nous avons expliqué pour notre cas d'application que la discrétisation de l'espace se fait selon l'altitude du terrain. Ainsi, les points de mesure de l'altitude définissent les objets géographiques du diagramme de Voronoï. Plus explicitement, chaque point correspond à un générateur d'une cellule de Voronoï. Le fonctionnement de l'AC est basé sur des règles hydrologiques simplifiées permettant de calculer le bilan d'eau simplifié dans chaque cellule et de mettre à jour le transfert de l'eau vers les cellules voisines en fonction du temps. L'initialisation du système est faite par l'injection d'une quantité d'eau dans la zone modélisée. Cette quantité représente les précipitations et est distribuée d'une manière homogène. Ainsi, à l'instant initial, la même quantité d'eau est introduite dans toutes les cellules de l'automate. Par la suite, et selon les règles de transition et le type de voisinage, une redistribution de la quantité d'eau est effectuée et les valeurs de bilan d'eau sont ajustées dans chaque cellule à chaque itération.

La représentation de l'écoulement est visualisée avec une séquence de cartes. Nous résumons les entrées et sorties du système de simulation dans la Figure 6.9.

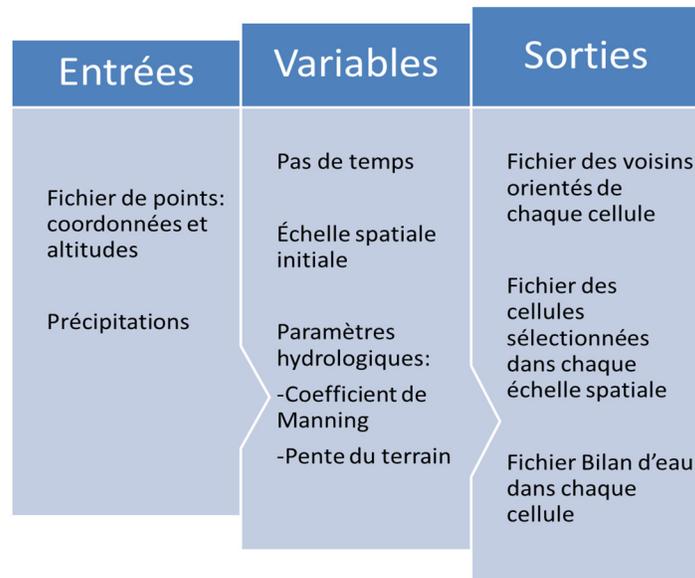


Figure 6.9: Entrées, variables et sorties du système de simulation

6.4.1.1 Détermination du voisinage orienté dans le BEREV

6.4.1.1.1 Concept du ratio de voisinage :

Cette section définit et propose d'analyser un indicateur de forme de terrain, le ratio de voisinage qui exprime le quotient du nombre de voisins orientés d'une cellule automate par le nombre total de voisins dans le diagramme de Voronoï.

$$\text{ratio de voisinage} = \frac{\text{nombre de voisins orientés}}{\text{nombre total de voisins}}$$

L'introduction de ce ratio permet de caractériser la forme du terrain puisque les valeurs du ratio de voisinage oscillent dans l'intervalle [0,1] car le nombre maximum de voisins orientés est égal au nombre total de voisins et son minimum est nul.

6.4.1.1.2 Dédution de la forme du terrain

Lorsque le ratio de voisinage d'une cellule automate est égal à 1, tous ses voisins dans le diagramme de Voronoï sont également des voisins orientés dont les élévations respectives sont inférieures à celle de la cellule centrale, ce qui indique que cette dernière est un sommet local. Au contraire, lorsque le ratio de voisinage est nul, la cellule automate constitue un creux local. Quant aux autres valeurs, un ratio de voisinage proche de 1 indique une élévation; alors que s'il approche de 0, on est dans un creux. Le ratio de voisinage a été calculé pour une partie du terrain et a été superposé au modèle numérique de terrain dont nous disposons pour la même zone.

La Figure 6.10 montre les emplacements des cellules ayant un ratio de voisinage nul et qui correspondent aux creux du terrain du BEREV. La superposition des creux identifiés avec une scène 3D de la zone d'étude montre bien la cohérence entre la morphologie du terrain et les valeurs du ratio de voisinage.

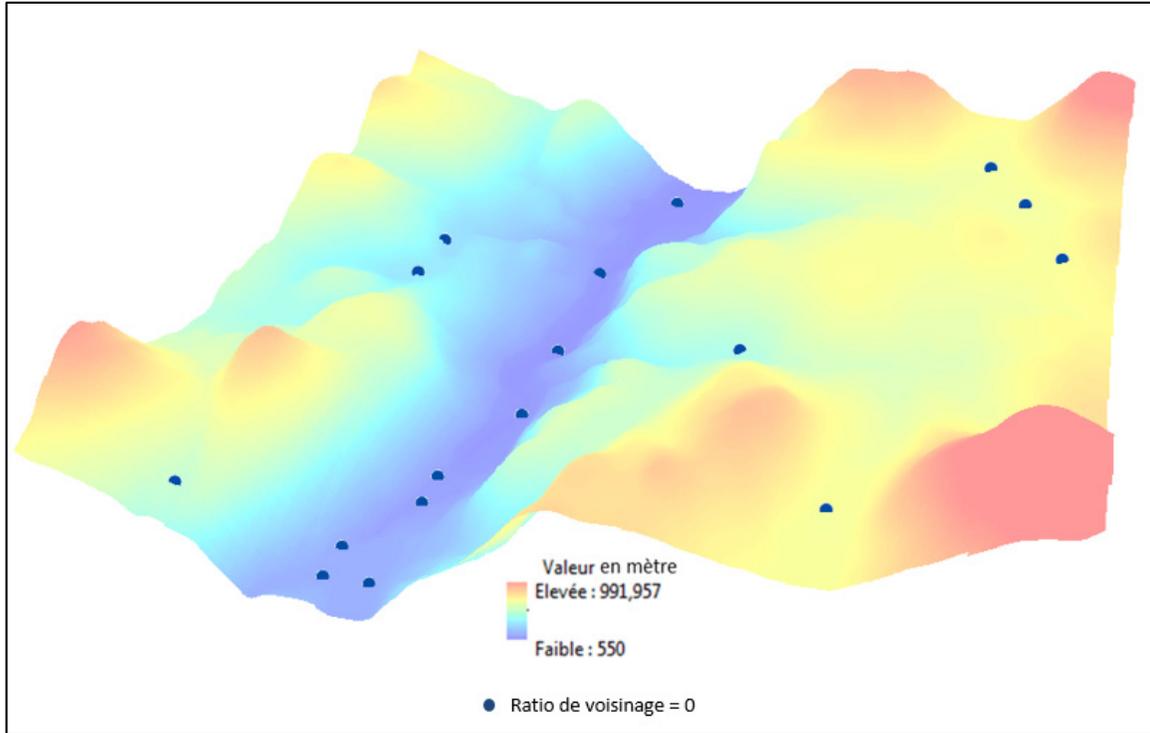


Figure 6.10: Emplacements des centres des cellules de l'AC à ratio de voisinage nul (creux)

Les emplacements des cellules correspondant aux sommets du terrain et qui vérifient bien une valeur du ratio de voisinage égale à 1 sont montrés dans la Figure 6.11. Leur localisation est aussi bien cohérente avec la forme du terrain de la zone étudiée du BEREV telle que montrée dans la scène 3D de la figure.

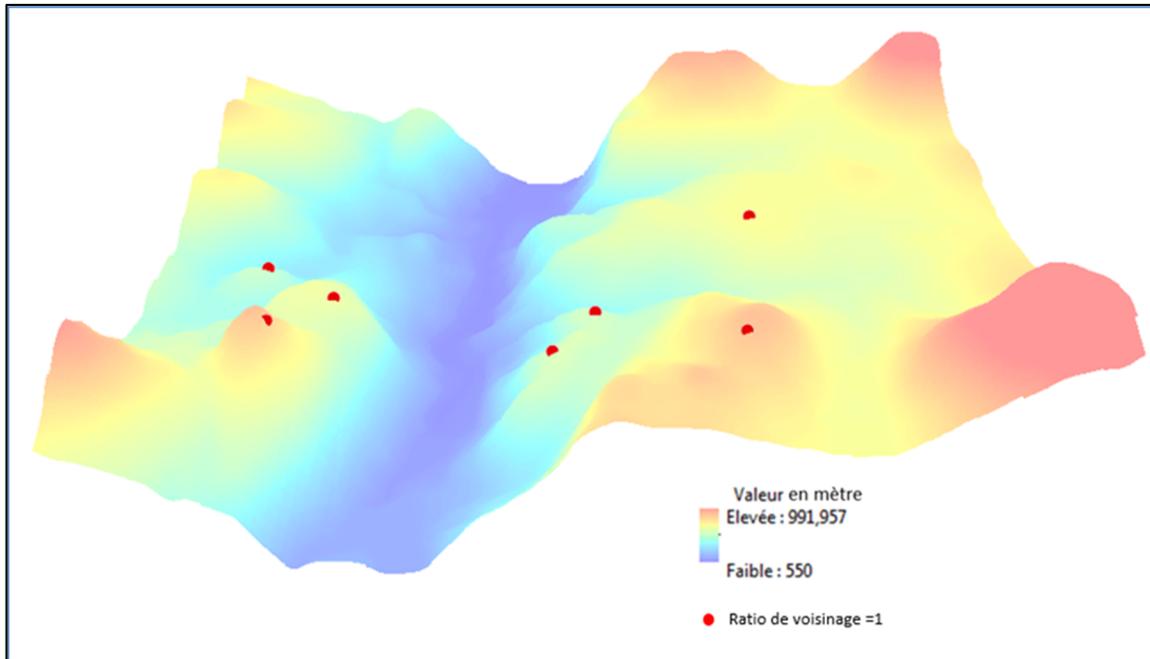


Figure 6.11: Emplacements des centres des cellules de l'AC à ratio de voisinage égal à 1 (sommets)

La structure géométrique du système de simulation procure ainsi une nouvelle approche pour la détermination de la forme du terrain et, plus particulièrement, à l'identification des points importants. En effet, suite à un événement de précipitation, les cellules dont le ratio de voisinage est nul reçoivent de l'eau de toutes leurs voisines et peuvent ainsi être identifiées comme des cellules d'accumulation d'eau. Celles dont le ratio de voisinage est égal à l'unité ne font par contre que transférer toutes les quantités d'eau reçues par précipitation à leurs voisines.

6.4.1.2 Calibration

6.4.1.2.1 Choix du pas de temps

L'algorithme principal de simulation de l'écoulement des eaux requiert de fixer un pas de temps suffisant pour permettre à l'eau de se déplacer dans chacune des cellules de l'automate afin de permettre le transfert d'eau vers les cellules voisines pendant la durée du pas de temps. Néanmoins, il faut noter que plusieurs paramètres interviennent dans le calcul du pas de temps. Les paramètres de fixation du pas de temps étant variables, le paragraphe suivant présente quelques résultats des tests effectués. Le Tableau 6.1 résume les intervalles de valeurs des paramètres utilisés. Celui des précipitations est fixé selon les données historiques publiées au CEHQ, celui des pentes a été calculé pour la zone du BEREV. Les valeurs du coefficient de Manning respectent l'intervalle défini dans la littérature. En outre, nous ne nous intéressons pas à la variation spatiale de ce coefficient puisque le bassin du BEREV est relativement homogène (couvert

forestier), mais cela ne conviendrait absolument pas pour un bassin partiellement urbanisé, en prairie et avec quelques forêts de densité variable parce que la rugosité serait mal estimée avec une valeur unique. Quant au choix de la largeur moyenne des cellules, il dépend de l'échelle spatiale de la simulation.

Tableau 6.1 : Intervalles de valeurs des paramètres intervenant dans le calcul du pas de temps au BEREV

Paramètre	Intervalle de valeurs
Précipitations	[1, 30] mm
Pente	[0,06, 0,7] %
n= Coefficient de Manning	[0,05, 0,1]
Largeur moyenne des cellules	[20, 1000] m

- Dans un premier temps, nous étudions l'effet sur le pas de temps des quantités de précipitations entrées dans le système. Nous montrons que pour une largeur moyenne de cellule égale à 200 m et quel que soit la valeur des précipitations, le pas de temps est proportionnel au coefficient de Manning. Ce dernier qualifie en effet la rugosité du terrain qui ralentit l'écoulement de l'eau. Nous présentons dans les Figures 6.12 et 6.13 la variation du pas de temps en fonction du coefficient de Manning pour deux cas de précipitation.

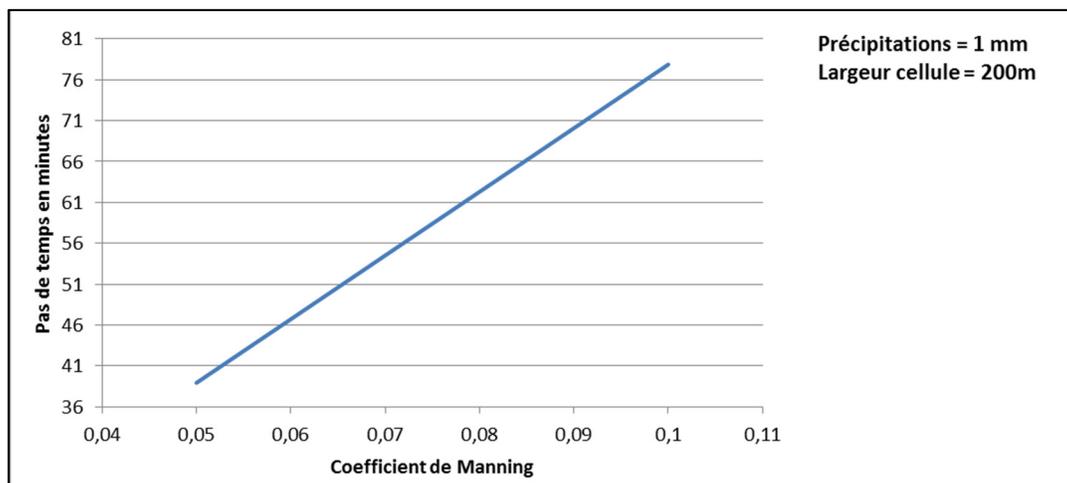


Figure 6.12: Variation du pas de temps en fonction du coefficient de Manning pour des précipitations de 1 mm

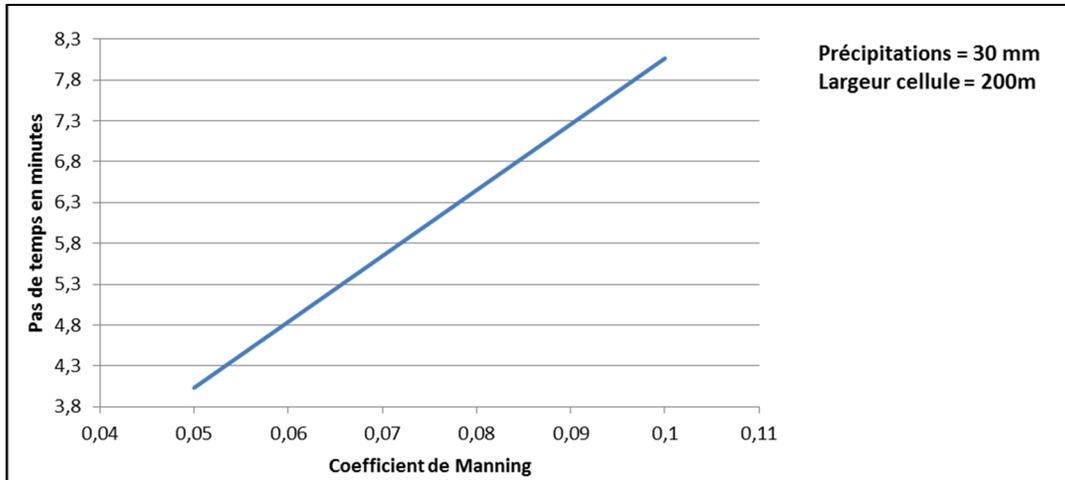


Figure 6.13: Variation du pas de temps en fonction du coefficient de Manning pour des précipitations de 30 mm

Cependant, nous observons que suite à une variation du coefficient de rugosité, le pas de temps demeure dix fois plus petit pour des précipitations de 30 mm par rapport à celles de 1 mm. Une précipitation de 1 mm correspondrait à une valeur minimale. Par contre, une valeur de 30 mm de précipitations est plutôt exceptionnelle au BEREV. Nous concluons donc que lors de pluies importantes, et dans les conditions que nous avons présentées, l'écoulement est dix fois plus rapide.

- Un autre test permet de montrer la variation du pas de temps en fonction des précipitations pour un coefficient de Manning fixé à 0,05 et pour une largeur moyenne de cellule de 200 m. Dans la Figure 6.14, nous observons une diminution importante du pas de temps passant au cinquième de la valeur initiale pour les précipitations inférieures à 1 mm, suivie d'une décroissance plus lente pour des précipitations plus importantes. Ainsi, il faut environ 50 secondes pour que l'eau traverse une cellule de 200 m suite à une pluie de 30 mm contre 2400 secondes suite à 1 mm de pluie. Nous concluons que le temps nécessaire pour que l'écoulement ait lieu dans ces conditions est inversement proportionnel à la quantité de précipitations.

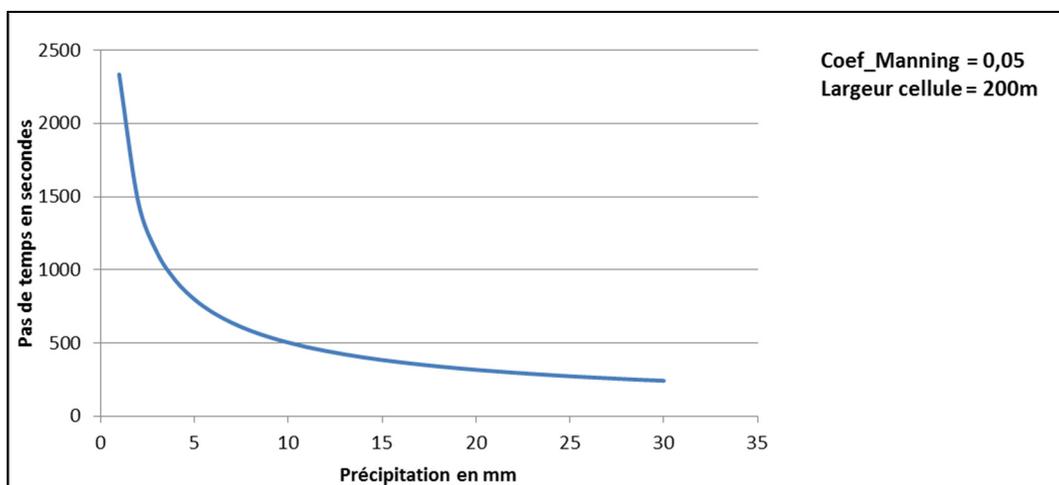


Figure 6.14: Variation du pas de temps en fonction des précipitations pour un coefficient de Manning de 0,05

Nous observons la même relation pour un coefficient de Manning de 0,1 dans la Figure 6.15 qui illustre la courbe de variation du pas de temps en fonction des mêmes valeurs de précipitation (entre 1 mm et 30 mm). Un coefficient de Manning de 0,1 correspond à une rugosité assez importante du sol telle que pour le cas des bois à végétation dense. Le temps pour que l'eau traverse une cellule de 200 m de largeur décroît de la même manière à la Figure 6.14, cependant les valeurs du pas de temps sont dix fois plus importantes que celles calculées pour une rugosité minimale dont le coefficient de Manning est égal à 0,05. Elles varient entre 500 et 4600 secondes.

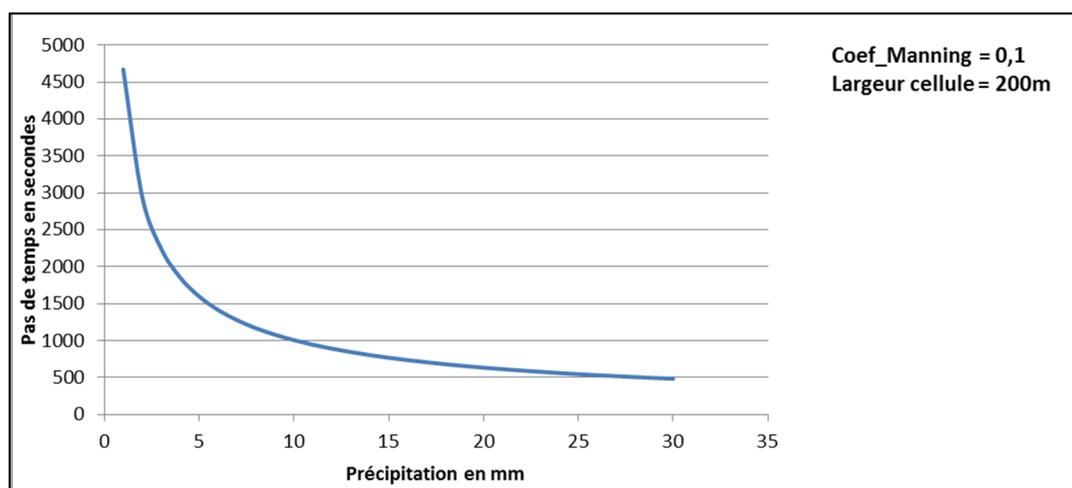


Figure 6.15: Variation du pas de temps en fonction des précipitations pour un coefficient de Manning de 0,1

Nous concluons ainsi que le temps nécessaire pour que l'eau traverse les cellules de l'AC varie selon la taille des polygones de l'AC (et plus particulièrement la taille de la cellule la plus large), les caractéristiques

de la zone d'étude et l'intensité des précipitations. Le Tableau 6.2 présente des exemples d'intervalles de pas de temps en fonction de la variation de chaque paramètre dans les conditions du BEREV et en fixant à chaque fois les autres paramètres.

Tableau 6.2: Exemples de pas de temps de simulation possibles au BEREV

Paramètre variable	Cas de paramètres fixes	Pas de temps correspondant
Précipitations	pente = 0,18 % coefficient de Manning = 0,1 largeur cellule = 200 m	[500, 4500] secondes
Pente	précipitations = 1 mm coefficient de Manning = 0,05 largeur cellule = 200 m	[123, 241] secondes
Coefficient de Manning	précipitations = 1 mm pente = 0,18 % largeur cellule = 200 m	[38, 78] minutes
Largeur moyenne de la cellule	précipitations = 30 mm pente = 0,18% coefficient de Manning = 0,05	[24, 1209] secondes

Une vérification de la valeur du pas de temps à calculer est faite en fonction des autres paramètres dans les tests de simulation effectués. Ceci influence le choix du nombre d'itérations de la simulation fixé au début de chaque test. Par la suite, des simulations de type simultané sont exécutées où toutes les quantités d'eau en déplacement sont stockées dans une couche temporaire avant qu'elles se distribuent aux cellules voisines selon les règles de transition prédéfinies. Les résultats de quelques tests de simulation sont présentés dans la section suivante où est précisé dans chaque cas, le pas de temps choisi. Le nombre d'itérations nécessaires à l'atteinte d'un état d'équilibre sert à calculer la durée totale du processus d'écoulement suite à un évènement de précipitation avant la stabilisation du système.

6.4.1.2.2 Coefficient de Manning

Les règles de transition que nous utilisons pour mettre à jour le bilan d'eau dans les cellules de l'automate se basent sur le type de voisinage que nous avons défini et les lois hydrologiques que nous avons expliquées dans la section précédente. Cependant, avant le passage au partage de l'eau entre les cellules, nous avons commencé par calculer la vitesse d'écoulement qui est nécessaire au calcul du temps nécessaire pour traverser chacune des cellules. Ces deux dernières opérations ont été faites en utilisant la formule de Manning dans l'Équation 6.1.

Le coefficient de Manning est identifié au coefficient de rugosité du sol et a pour effet de ralentir l'écoulement de l'eau puisqu'il informe sur la proportion d'eau en ruissellement par rapport à la quantité d'eau totale reçue. Or, comme la formule de Manning est à l'origine utilisée pour le calcul des écoulements dans des canaux, le coefficient de Manning pour le sol n'a pas été suffisamment étudié dans la littérature et ce sont plutôt des tables empiriques qui sont utilisées pour définir ses valeurs selon le type de sol. Nous

avons retenu l'intervalle [0,05, 0,1] qui est selon CORPEN (2007) et MDDEP [2012] le cas des canaux naturels avec végétation. Dans l'approximation de la formule de Manning, cet intervalle correspond bien au type du milieu forestier que nous étudions. La valeur de 0,075 est attribuée au coefficient de Manning dans les tests que nous décrivons dans la prochaine section, soit la moyenne de l'intervalle identifié.

6.4.2 Simulation de l'écoulement de l'eau de surface au BEREV

La gestion de l'espace et du temps dans les tests de simulation se fait essentiellement à travers le choix de l'échelle spatiale et du pas de temps. C'est d'abord l'échelle spatiale de simulation qui gère le processus de sélection des points du terrain et définit la largeur des cellules. Le pas de temps est fixé ensuite selon l'intensité des précipitations en supposant que le coefficient de Manning est fixe et constant pour toute la zone. Nous exécutons alors la simulation pour un nombre déterminé d'itérations qui, multiplié par le pas de temps calculé donne la durée totale de l'évènement simulé.

Après les points d'altitude qui ont servi à déterminer les cellules de l'AC, la quantité de précipitations constitue la deuxième entrée du système de simulation. Pour les besoins de l'exemple, on la considère homogène sur tout le territoire et on injecte le même volume d'eau dans toutes les cellules de l'AC afin de déterminer la hauteur d'eau correspondante selon l'aire de la cellule puis de suivre le transfert vers les cellules voisines à chaque itération de simulation. L'introduction d'une quantité de précipitation dans les cellules de l'automate peut se faire en une fois au début de la simulation ou à plusieurs reprises (par exemple à chaque pas de temps). Dans le premier cas, nous simulons la réponse du système à l'arrivée ponctuelle d'une certaine quantité d'eau (par exemple, lors d'un orage), alors que dans le deuxième, les réponses du système sont cumulées. Ceci permet d'identifier deux types de simulation de réponses aux évènements de précipitation : simulation d'un '*évènement de pluie*' versus simulation de '*pluie continue*'.

Quant à l'échelle de simulation, elle dépend du bassin versant étudié. En effet, la plus petite échelle utilisable correspond à un sous-bassin versant ou bassin élémentaire qui correspond à la surface d'alimentation des affluents se jetant dans le cours d'eau principal. Il est essentiel d'identifier une direction d'écoulement du sous-bassin ainsi qu'un exutoire. Pour ce faire, nous nous référons aux sous-bassins identifiés dans la Figure 6.2. L'échelle globale correspond à la zone couverte par l'image matricielle formée par les trois feuillets des données d'altitude disponibles autour de la forêt Montmorency tel que présenté dans la Figure 6.3.

La section suivante présente les résultats de quelques tests de simulation pour les deux types de cas de pluie et dans deux échelles spatiales.

6.4.2.1 Simulation d'un évènement de pluie à l'échelle macro

➤ Test de validation :

Le premier test consiste à simuler la réponse d'écoulement de l'eau dans une zone d'environ 700 km² autour le BEREV à l'échelle globale, suite à des précipitations instantanée de 10 mm (orage violent). Nous introduisons alors une quantité uniforme de pluie dans toutes les cellules de l'automate afin de simuler la hauteur d'eau dans chaque cellule à chaque pas de temps. Les Figures 6.16 et 6.17 montrent les hauteurs d'eau simulées sur la totalité de la zone couverte par les 3 feuillets de MNA entourant la forêt Montmorency avec une discrétisation spatiale de 1 km de résolution. Les hauteurs sont représentées après 8 minutes, 25 minutes, 50 minutes et 90 minutes.

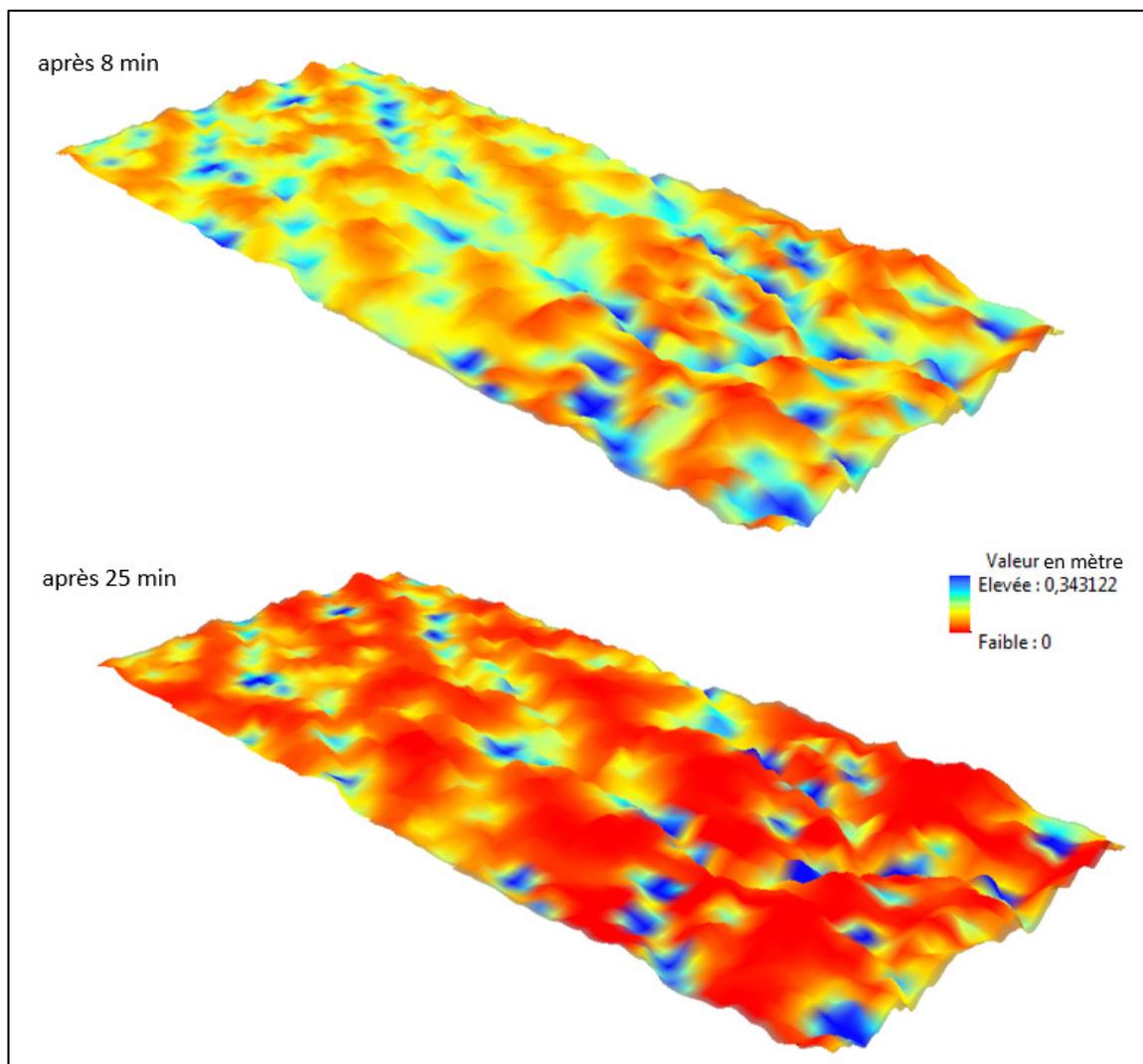


Figure 6.16: Hauteurs d'eau simulées après un évènement instantané de précipitation de 10 mm

(Coefficient de Manning = 0,05)

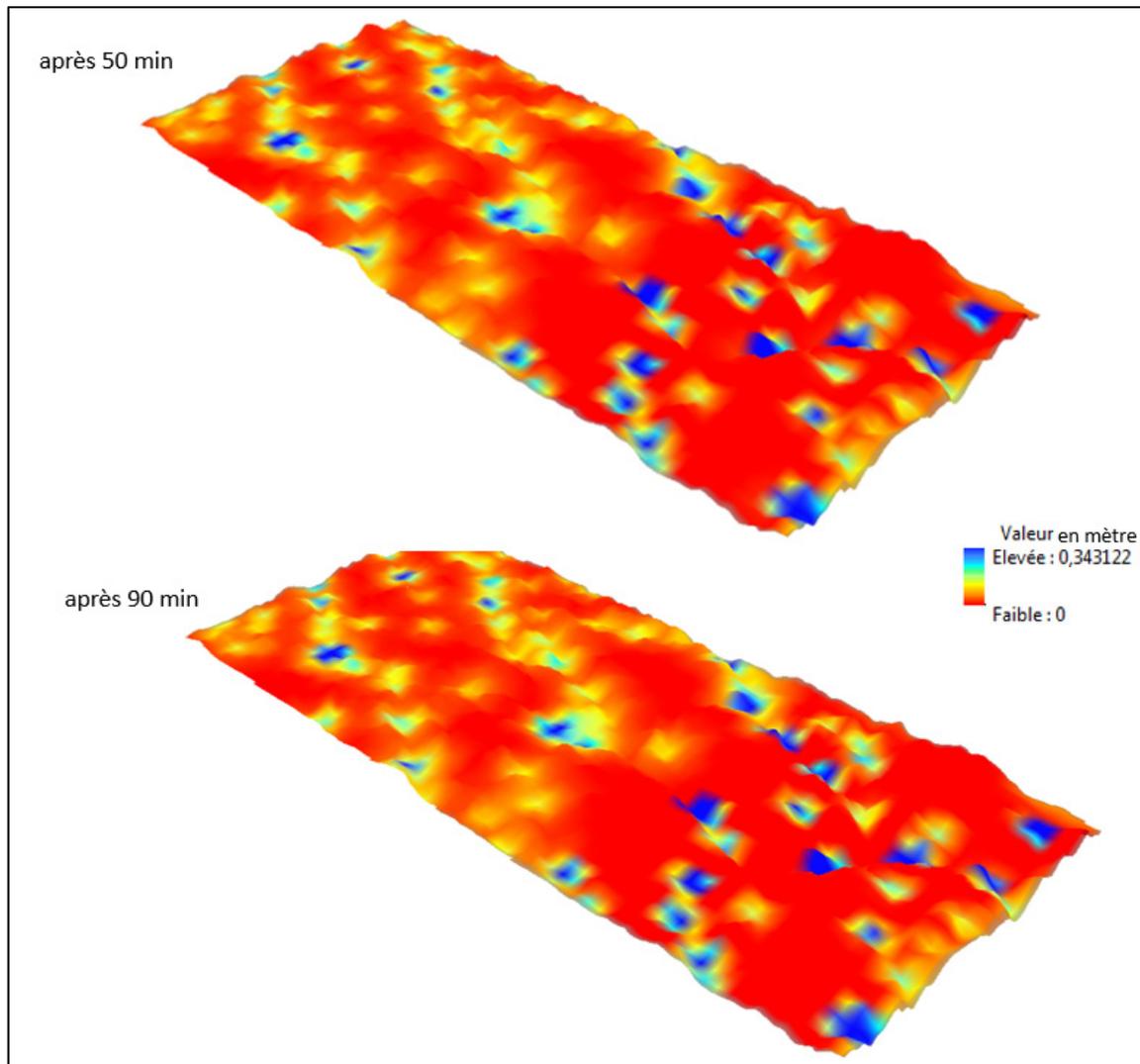


Figure 6.17: Hauteurs d'eau simulées après un évènement instantané de précipitations de 10 mm
 (Coefficient de Manning = 0,05)

Nous observons que l'eau se concentre dans certains endroits où les valeurs maximales enregistrées sont de l'ordre de 34 cm de hauteur, alors que dans d'autres endroits, les hauteurs d'eau deviennent graduellement nulles. Nous observons aussi que le système finit par se stabiliser et reprendre un nouvel état d'équilibre entre 50 minutes et 90 minutes après la précipitation. En conclusion, le prototype implémenté permet d'identifier à une échelle spatiale globale, dont la taille des cellules de l'automate est de l'ordre de 1 km, des zones d'accumulation d'eau suite à un évènement de précipitation intense. Cependant,

afin de valider ces résultats avec les données hydrométriques du BEREV, nous présentons un test plus réaliste dans la section suivante.

6.4.1.2 Simulation d'une pluie continue à l'échelle méso

➤ **Test à l'échelle du BEREV :**

La simulation d'une pluie continue est plus conforme à la nature du phénomène de précipitation qui s'étale sur une période de temps. Nous avons simulé l'écoulement dû à des précipitations continues de 20 mm par heure sur une durée de 3 heures sur la zone délimitée par le BEREV. Il s'agit de notre méso échelle (résolution spatiale d'environ 200m), ce qui permet de sélectionner environ 800 points de mesure sur une superficie d'environ 32 km². La Figure 6.19 présente quatre scènes des hauteurs d'eau simulées à trois pas de temps dans la zone du BEREV.

D'abord, et d'une manière générale, nous observons une accumulation d'eau dans la partie Est de la zone, ce qui correspond bien à la localisation d'un cours d'eau sur la carte du BEREV dont la Figure 6.18 présente une carte d'altitude.

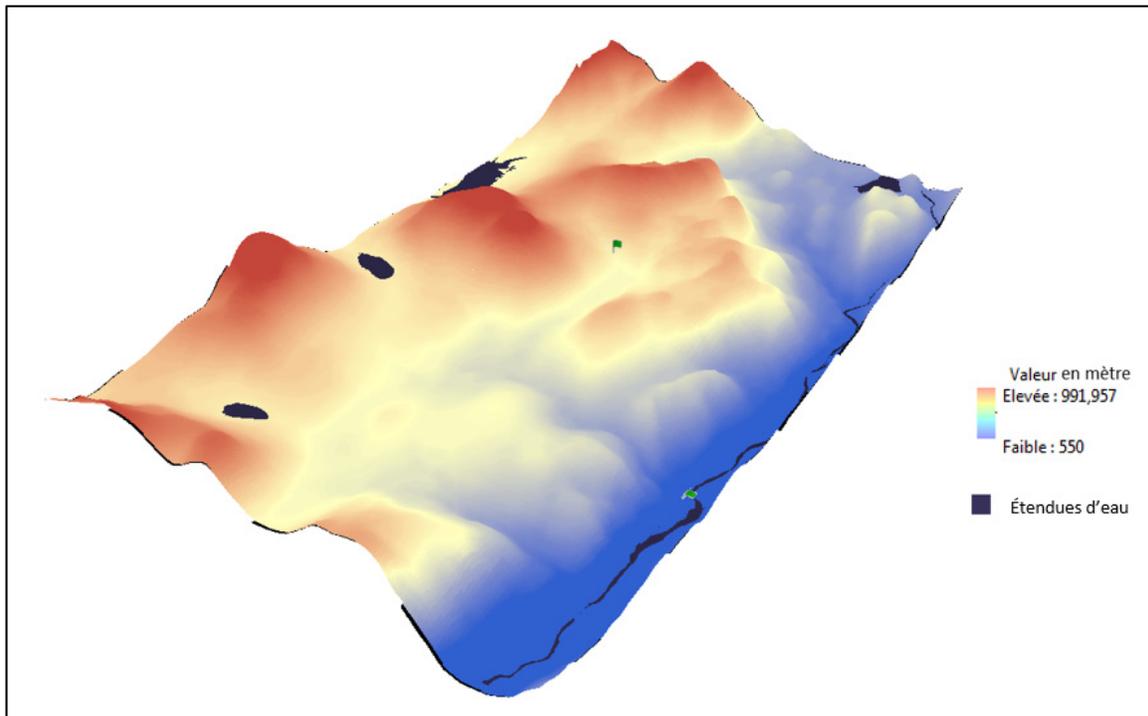


Figure 6.18: Altitudes (mètres) et étendues d'eau du BEREV

Sur la Figure 6.19, les seuils jaugeurs sont encerclés afin de vérifier qu'ils représentent bien des points d'accumulation d'eau selon la simulation effectuée. Ce résultat valide la cohérence de l'écoulement simulé

avec les caractéristiques du BEREV puisque le système de simulation offre la possibilité d'identifier les cellules de l'automate ayant reçu des quantités importantes d'eau suite à l'écoulement. En effet, nous avons déjà noté que les stations des seuils jaugeurs se localisent dans les points exutoires des sous-bassins du BEREV.

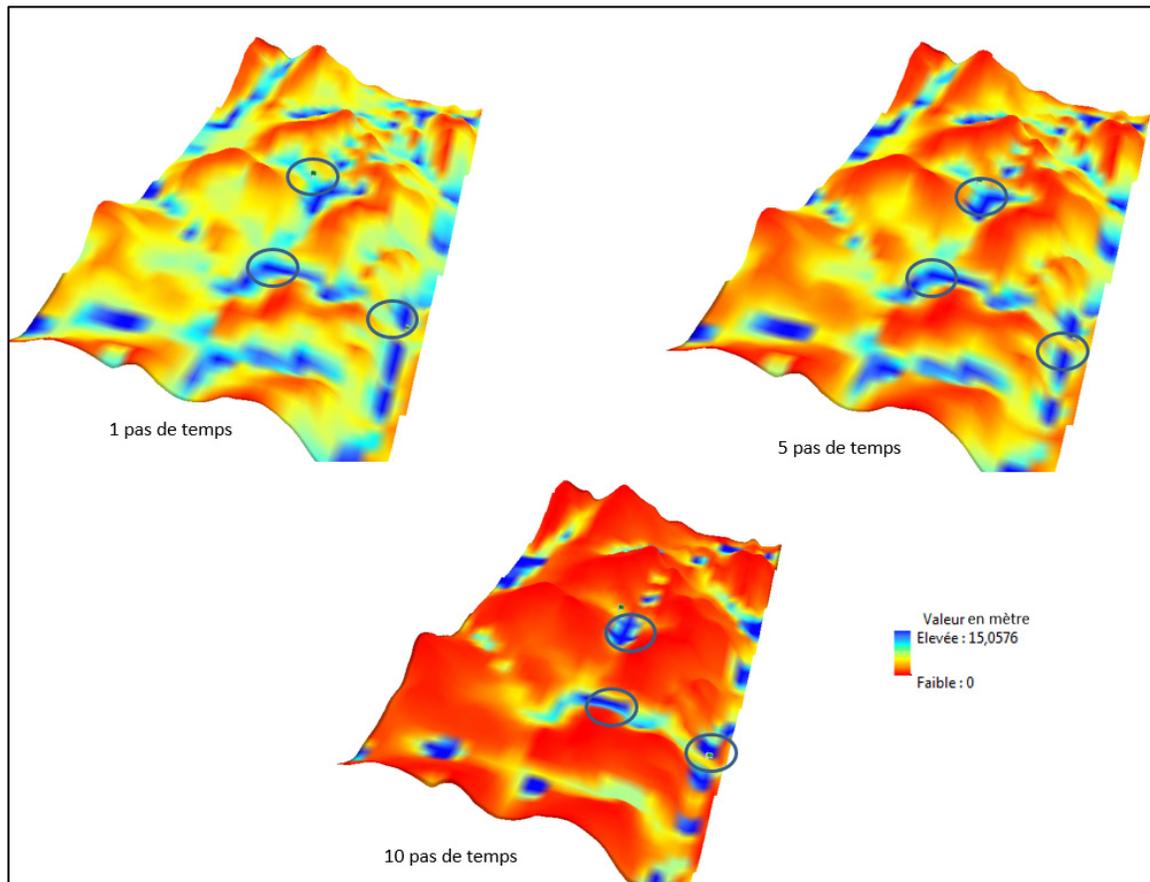


Figure 6.19: Hauteurs d'eau simulées au BEREV aux pas de temps 1, 5 et 10 (Évènement continu de précipitation durant 3 heures, coefficient de Manning = 0,05)

Les tests de pluie continue que nous avons effectués à différentes échelles spatiales et avec différentes valeurs de précipitations montrent un écoulement de plus longue durée et un retour à un état d'équilibre plus lent que les tests d'évènement de pluie. Cette réponse de l'automate cellulaire à l'introduction d'un apport de pluie sur un ou plusieurs pas de temps successifs peut faire l'objet d'une comparaison avec la réponse hydrologique du bassin versant qui est définie comme étant la manière dont réagit le bassin lorsqu'il est soumis à une sollicitation. Cependant, il faut noter que l'écoulement de base existe même en absence de précipitations. On parle de réponse hydrologique nulle lorsque l'écoulement n'est pas modifié et de réponse hydrologique positive lors de la modification d'écoulement due à une crue. Il en résulte ainsi des

analyses spécifiques en hydrologie qui mettent en évidence des événements pluies-débits et montrent la transformation de la pluie en hydrogramme de crue, et plus spécifiquement, les réactions à l'exutoire d'un bassin versant. Il est ainsi possible de comparer la réponse de l'automate cellulaire utilisé à une réponse hydrologique d'un événement réel afin de valider les résultats. La section suivante élabore une démarche de comparaison entre les résultats simulés et les valeurs de débit mesurées au BEREV.

6.4.3 Validation des débits d'eau avec des données mesurées

6.4.3.1 Conditions de validation

Nous rappelons dans cette section que le principe de validation de l'outil de simulation par automate cellulaire est de montrer la preuve du concept développé. Nous voulons ainsi reproduire le comportement global de l'écoulement des eaux de surface dans un bassin versant dans des conditions simplifiées. C'est dans ce sens que nous avons choisi de nous intéresser de plus près aux exutoires de deux sous-bassins du BEREV. Comme montré dans la Figure 6.2, le BEREV est subdivisé en quatre sous-bassins principaux qui peuvent être subdivisés en sous-bassins d'alimentation. L'exutoire de chaque sous-bassin représente son déversement vers le reste du bassin versant et est muni d'un seuil jaugeur où des valeurs horaires de débit d'eau sont mesurées. Nous avons déjà identifié des cellules de l'AC où il y a accumulation d'eau (Figure 6.9) et qui coïncident avec les endroits où les seuils jaugeurs sont installés. Afin de comparer les hauteurs d'eau simulées par AC avec les hydrogrammes construits avec les données de débit mesurés du BEREV, nous avons identifié un cas de précipitation remarquable dans cette zone qui est compatible avec les simplifications effectuées dans le modèle d'écoulement implémenté (sans évapotranspiration, sans infiltration, etc.) :

- Une période de l'année où l'écoulement est faible et homogène;
- Une période de l'année où l'évapotranspiration est minimale;
- Une période de l'année où le sol est gorgé d'eau et donc l'infiltration dans le sol est minimale ou même nulle;
- Une période de l'année où la végétation est saturée en eau et donc l'absorption hydrique par les végétaux est nulle;
- Des précipitations liquides importantes pouvant provoquer des inondations.

6.4.3.2 Étude de cas et résultats de validation

La date du 30 septembre 2010 satisfait les contraintes énoncées à la section précédente. La station météorologique a enregistré des hauteurs de pluies importantes au début de l'automne, moment où l'infiltration dans le sol, l'évapotranspiration et l'absorption hydrique par les végétaux sont minimales et où l'écoulement de base est constant. Nous avons utilisé la valeur réelle de précipitation enregistrée vers 23

heures et calculé un pas de temps de 300 secondes et avons exécuté une simulation sur une durée totale de 2 heures 30 minutes. La Figure 6.20 présente la variation de la hauteur d'eau à l'exutoire du sous-bassin 7A du BEREV en fonction du temps et la Figure 6.21 celle du sous-bassin 5. Les valeurs de précipitations sont en millimètre par heure.

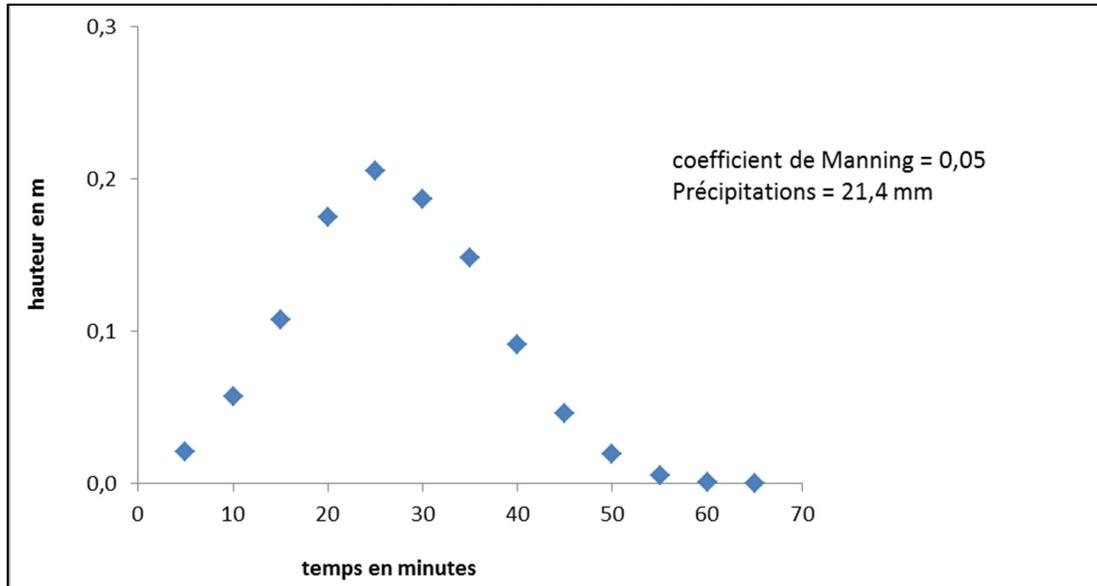


Figure 6.20: Hauteur d'eau simulée à l'exutoire du sous-bassin 7A du BEREV

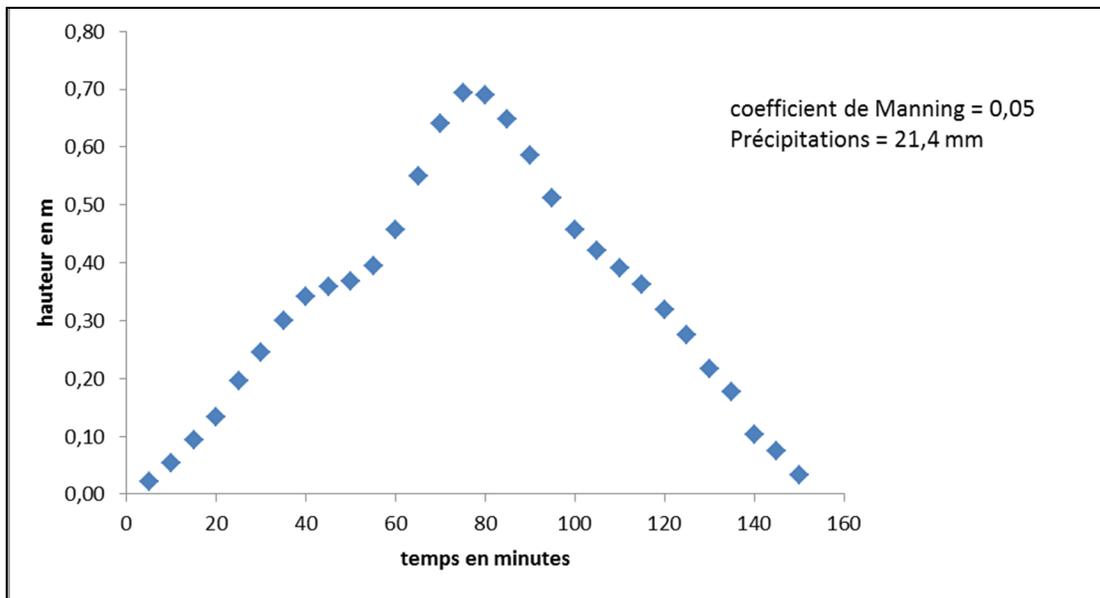


Figure 6.21: Hauteur d'eau simulée à l'exutoire du sous-bassin 5 du BEREV

L'allure générale des deux hydrogrammes est semblable : elle présente une montée graduelle de la hauteur d'eau vers un maximum, puis une descente pour revenir à la valeur initiale qui est nulle dans ce cas puisque nous avons ignoré l'écoulement de base.

Cependant, les valeurs des hauteurs d'eau ainsi que le temps de réponse pour le retour à un écoulement de base sont plus grands pour l'exutoire du bassin 5, ce qui s'explique par la différence de taille des deux sous-bassins. Le sous-bassin 5 a une superficie de 170 ha, contre 120 ha pour le sous-bassin 7. Ces résultats montrent bien que le système de simulation est capable de reproduire l'évolution du processus de l'écoulement dans des conditions simplifiées d'absence d'infiltration, d'évapotranspiration et d'assimilation d'eau per les végétaux.

Par ailleurs, les hydrogrammes de débits mesurés après la pluie du 30 septembre 2010 aux seuils jaugeurs installés à l'exutoire des deux sous-bassins sont présentés dans les Figures 6.22 et 6.23.

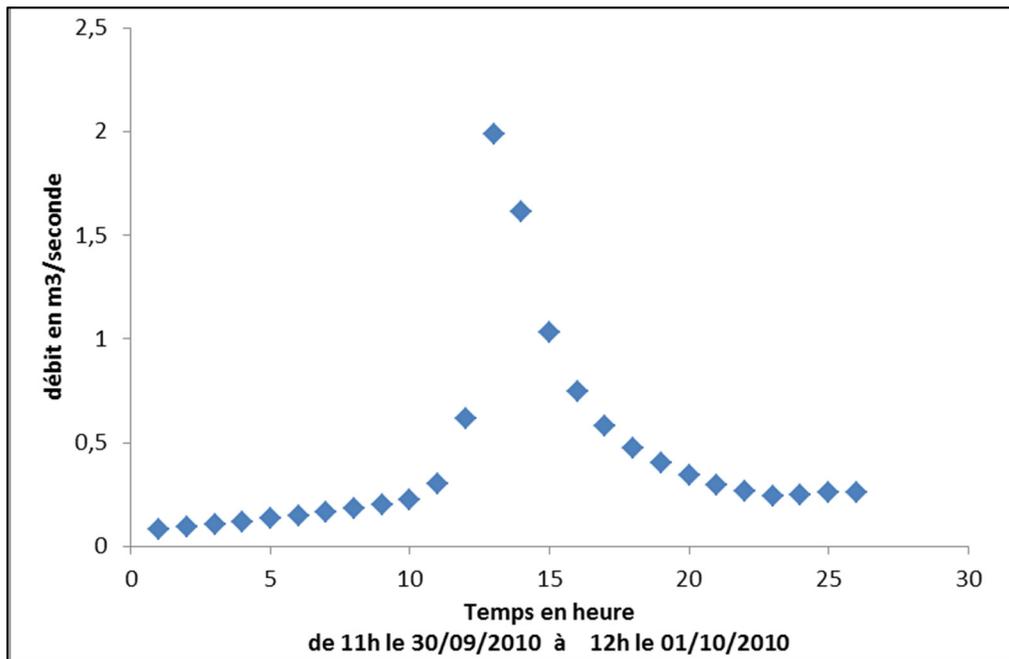


Figure 6.22: Débits d'eau mesurés in situ à l'exutoire à la station 51004 du BEREV

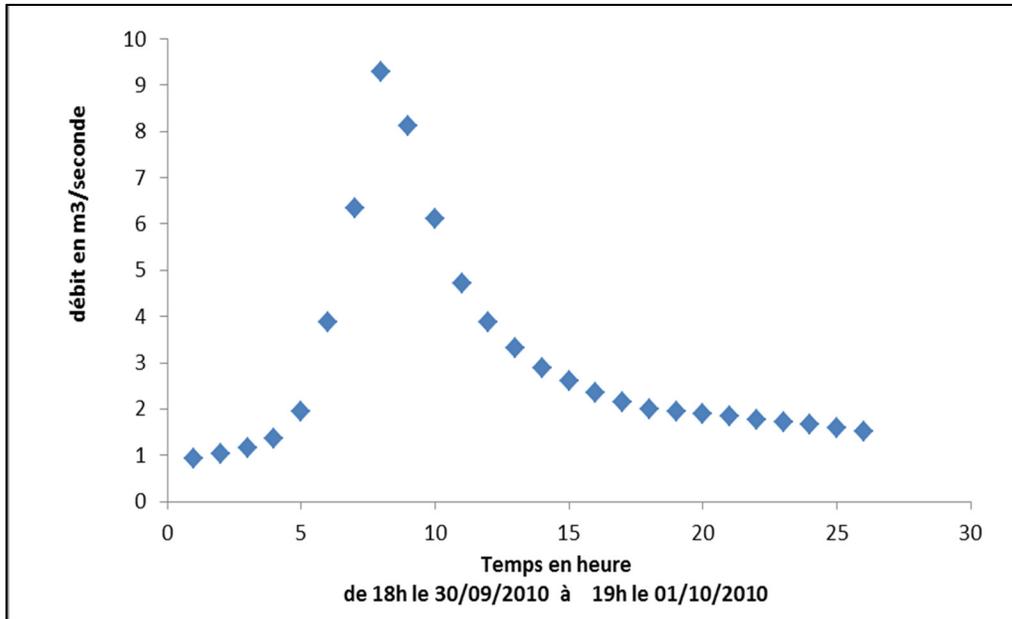


Figure 6.23: Débits d'eau mesurés in situ à l'exutoire à la station 51003 du BEREV

Bien que les valeurs mesurées aux stations des seuils jaugeurs du BEREV soient des débits en mètre cube par seconde, leurs volumes relatifs correspondent au produit d'une hauteur d'eau par une surface de section. Sans entrer dans les détails du calcul des surfaces correspondantes des installations des seuils jaugeurs, nous supposons que ces dernières sont constantes et que la variation des débits représente une variation dans la hauteur d'eau. Nous pouvons alors comparer les deux types d'hydrogrammes.

- Pour l'évènement de précipitation du 30 septembre 2010, nous avons exécuté des simulations sur une durée de 2 heures 30 avec un pas de temps de 5 minutes dans la zone du BEREV. Les données de débits mesurées ont quant à elles une fréquence horaire. Pour cette raison, nous ne disposons pas de suffisamment de valeurs mesurées dans l'intervalle des 2 heures 30 après l'évènement de précipitation pour avoir un hydrogramme comparable à celui des simulations. Alors, nous allons comparer les valeurs maximales enregistrées dans les hydrogrammes des débits mesurés (Figures 6.22 et 6.23) par rapport à celles des hauteurs simulées (Figures 6.20 et 6.21).
- En terme de temps, les maximums des hauteurs d'eau simulées ont lieu dans la nuit du 30 septembre 2010 à 23 heures et 25 minutes pour le bassin 7A et à minuit et 20 minutes pour le sous-bassin5 tels que présentés dans les Figures 6.20 et 6.21. Ce résultat est comparable aux mesures où nous notons que les deux hydrogrammes présentent des pics respectifs des valeurs de débit d'eau suite aux précipitations du 30 septembre 2010, à 23 heures et minutes 30 pour la station 51003 (sous-bassin7A), et 2 heures plus tard pour la station 51004 (sous-bassin5). Ce

- décalage s'explique par la direction générale de l'écoulement au BERV qui se fait vers le sud-est et donc passe du sous-bassin7A au sous-bassin5.
- Par ailleurs, les valeurs de débits mesurés sont plus importantes dans la station du sous-bassin5 que celles du sous-bassin7A (Figures 6.22 et 6.23). Le même résultat est présent dans les Figures 6.20 et 6.21 pour les valeurs des hauteurs d'eau simulées. Ceci s'explique par la différence des superficies des deux bassins : 120 ha pour le sous-bassin7A contre 170 pour le sous-bassin5.

Discussion sur la validation:

- Les simplifications effectuées ignorent les processus d'évapotranspiration et d'infiltration dans le sol, ce qui surestime l'écoulement d'eau.
- Un évènement instantané de précipitation tel que nous l'avons considéré dans des conditions particulières d'infiltration et d'évapotranspiration peut être décrit comme un 'pulse d'eau sur un terrain imperméable'.
- La formule de Manning utilisée pour calculer l'écoulement, notamment le coefficient de rugosité n'a pas été beaucoup étudié dans la littérature; c'est ce qui nous incite à proposer pour des travaux futurs, d'utiliser notre système de simulation afin de calibrer le coefficient de Manning pour les zones forestières de caractéristiques similaires au BEREV.
- Les valeurs de précipitations injectées dans le système de simulation pendant la durée de l'évènement de pluie proviennent de la station météorologique du BEREV, dont la fréquence des mesures est horaire et ne correspondent pas nécessairement aux valeurs réelles tombées pendant les 2 heures et 30 minutes de la simulation.

6.5 Conclusion du chapitre

Ce chapitre présente l'expérimentation du système de simulation des processus spatiotemporels par automate cellulaire pour le cas d'application de ruissellement des eaux. Nous avons présenté et décrit la zone d'étude, soit le Bassin Expérimental du Ruisseau des Eaux Volées (BEREV) qui fait partie de la forêt Montmorency à Québec. Nous avons décrit les caractéristiques de ce bassin, les conditions qui favorisent l'utilisation du prototype développé ainsi que les données utilisées. Nous avons expliqué les méthodes de calibration des paramètres dans les fonctions de simulation, soit le pas de temps de simulation et le coefficient de Manning; ainsi que les caractéristiques des entrées et des sorties du système. Nous avons par la suite présenté les résultats des tests de simulation à différentes échelles et pendant des durées différentes. Finalement, nous avons simulé la réponse des sous-bassins du BEREV à des conditions réelles de précipitations identifiées dans les séries des données disponibles de précipitation et de débit des cours

d'eau. Pour cela nous avons expliqué comment la journée de test a été choisie afin de minimiser l'impact des simplifications effectuées dans les équations de simulation. Ceci a permis de valider les résultats puisque les hauteurs d'eau simulées aux exutoires des sous-bassins du BEREV sont comparables à celles qui sont déduites des mesures de débits mesurés aux mêmes endroits. Comme résultat additionnel, nous avons introduit la notion de ratio de voisinage que nous avons élaborée à partir du type de voisinage orienté de l'AC, et nous avons montré son utilité pour identifier les points importants du relief (les sommets et les creux).

Dans le prochain chapitre, nous récapitulons les contributions de cette recherche et nous discutons des limites et améliorations à apporter, ainsi que des travaux qui peuvent faire suite à notre projet.

Chapitre 7 : Conclusions générales

Les systèmes d'information géographique jouent un rôle important dans divers domaines de gestion du territoire allant des sciences atmosphériques, à l'hydrologie en passant par les transports. Plusieurs études ont démontré la capacité des SIG dans la modélisation des dynamiques géographiques, notamment en ce qui concerne les analyses spatiales et leur visualisation. Cependant, d'autres progrès sont nécessaires pour pallier les limites des SIG dans la prise en compte de la dynamique temporelle essentiellement en matière de simulation des processus spatiotemporels. C'est dans cette mesure, que nous avons contribué par ce travail de recherche à l'amélioration des structures de données à références spatiales afin de mieux représenter les processus spatiotemporels en intégrant un outil de simulation par automate cellulaire avec des structures de données utilisées dans les SIG.

Le chapitre 1 présente les différents thèmes abordés dans la thèse en lien avec le cadre général qui est la représentation des processus dans les SIG. Nous avons ainsi présenté les motivations de la recherche, sa problématique, ses objectifs ainsi que la méthodologie proposée.

Nous avons identifié trois objectifs principaux qui ont été atteints par cette thèse:

- La discrétisation de l'espace avec une tessellation irrégulière de type Voronoï pour supporter la représentation des processus;
- La conception d'une procédure de hiérarchisation de la structure de données à base de Voronoï à des fins de représentation multi-échelles des processus; et
- La construction d'un système de simulation par automate cellulaire basé sur une structure de données à géométrie irrégulière et hiérarchique dans les SIG.

Le Chapitre 2 présente une revue de littérature autour des grands axes de recherche, à savoir la modélisation spatiotemporelle et la géosimulation par automate cellulaire. Nous avons présenté les types de couplages entre les SIG et les modèles et avons cité certains exemples d'intégration de modèles dans des SIG. Par ailleurs, nous avons présenté les fondements théoriques du domaine d'application en étudiant les processus hydrologiques.

7.1 Contributions de la recherche

Afin de représenter les processus spatiotemporels dans les SIG, nous avons exploré le potentiel des automates cellulaires qui permettent, à partir de règles de transition simples, de définir le comportement global d'un processus résultant d'interactions locales. Nous avons conçu et implémenté un prototype de simulation par AC. Le point commun avec les autres AC est que notre système respecte bien une caractéristique principale : il permet de simplifier la réalité en la réduisant à un ensemble de cellules réparties dans l'espace et interagissant dans le temps selon des règles prédéfinies.

Habituellement, c'est une tessellation carrée régulière qui définit les cellules des automates cellulaires. Dans notre cas, les cellules de l'AC que nous avons conçu héritent leur géométrie du diagramme de Voronoï qui représente une solution de discrétisation spatiale. Nous avons démontré dans le chapitre 3 que le partitionnement de l'espace formé par une tessellation de Voronoï se fait en fonction des objets et non en fonction de l'espace. Plus explicitement, un découpage irrégulier de l'espace permet de mieux représenter les processus spatiotemporels car la discrétisation spatiale se fait en fonction des entités géographiques inhérentes au processus et ainsi n'est pas prédéfinie comme c'est le cas des tessellations régulières. Ainsi, selon notre solution, les entités représentatives du processus identifiées sont utilisées comme générateurs des cellules de Voronoï qui constituent le diagramme de Voronoï. Chacune des cellules de Voronoï correspond à une cellule de l'automate. Cependant, ce n'est plus le voisinage topologique qui est utilisé, mais plutôt un voisinage dépendant de type du processus représenté. Pour le cas de l'écoulement des eaux de surface, ce sont les points les plus importants du terrain qui constituent les entités géographiques du processus de ruissellement. Ils sont obtenus grâce à l'algorithme « *Élimination des points les moins significatifs (NIP)* » comme c'est expliqué au Chapitre 4. Quant au type de voisinage utilisé, il combine le voisinage purement topologique du diagramme de Voronoï et les règles de direction de l'écoulement déduites de la topographie. Ainsi nous avons mis en place un voisinage particulier appelé « voisinage orienté » qui permet de sélectionner parmi les cellules contigües d'une cellule centrale uniquement celles qui sont susceptibles de recevoir une quantité d'eau de cette dernière, en raison de leur altitude plus basse. Nous avons stocké les informations relatives au diagramme de Voronoï telles que les coordonnées des points générateurs, les sommets et les arêtes des cellules dans la structure de données *PolygoneVD* et le voisinage dans la structure de données *CellVoro*. Cette structure contient aussi tous les paramètres relatifs au processus qui sont nécessaires à la mise à jour des états des cellules de l'automate (Chapitre 5). Dans le cas du processus d'écoulement de surface, il s'agit de l'altitude, de la pente, du coefficient de rugosité, ainsi que du bilan d'eau.

Ainsi, la première contribution de ce travail de recherche est la mise en place d'une structure de données à géométrie irrégulière pour la discrétisation de l'espace à des fins de représentation des processus spatiotemporels.

La deuxième contribution de recherche, telle que présentée dans le Chapitre 4, correspond à la conception d'une procédure de hiérarchisation du diagramme de Voronoï pour une représentation multi-échelle des processus spatiotemporels. Le principe est de construire un diagramme de Voronoï pour chaque échelle de représentation et de permettre de naviguer entre les diagrammes Voronoï dans les deux sens : soit dans un sens de généralisation vers une échelle plus petite afin de représenter le comportement global du processus, soit vers une échelle plus grande afin de détecter un comportement local. Nous avons montré dans le Chapitre 4 que la généralisation du diagramme de Voronoï se fait par la sélection de certaines entités géographiques. Nous avons aussi étudié les méthodes de sélection selon le type du processus spatiotemporel et nous avons expliqué les procédures existantes qui traitent les données topographiques qui sont les données de base pour le processus d'écoulement des eaux de surface. L'algorithme *NIP* a été utilisé et permet de sélectionner progressivement certains points du modèle numérique de terrain afin de construire les diagrammes de Voronoï de trois échelles spatiales, micro, méso et macro, qui sont stockés dans la structure de données *hierarchieData*. La procédure de sélection des points de relief offre aussi la possibilité de sauvegarder les identifiants des points sélectionnés et par la suite ceux des cellules de Voronoï correspondantes dans chacune des échelles spatiales. Ceci permet de garder un lien entre les points générateurs des différents diagrammes de Voronoï et d'identifier, pour chaque cellule de Voronoï, les cellules qui sont incluses dans les échelles plus grandes. C'est cet adressage de points générateurs qui permet de naviguer entre les échelles.

Dans le Chapitre 5, nous avons conçu un outil de simulation des processus spatiotemporels par AC, ce qui représente la troisième contribution de recherche. L'originalité de notre AC repose sur une structure de données à géométrie irrégulière de type Voronoï et hiérarchique. Les cellules du diagramme de Voronoï représentent les cellules de l'automate pour chacune des échelles spatiales. Nous avons présenté les caractéristiques de l'AC et notamment les différences par rapport à un automate cellulaire traditionnel : la géométrie irrégulière des cellules, le type de voisinage orienté dynamique et non commutatif ainsi que l'état des cellules à valeurs continues. Le fonctionnement du système de simulation est expliqué dans la Chapitre 5 qui présente les paramètres de l'application divisés en paramètres statiques (les cellules) et dynamiques qui sont définis par les fonctions descriptives du processus étudié. Nous avons aussi présenté les différentes classes et structures de données utilisées, ainsi que les algorithmes de base, l'interface de l'application et les détails d'implémentation.

Dans le Chapitre 6, nous avons expérimenté les concepts développés dans un cas d'application de notre AC pour simuler l'écoulement des eaux de surface avec des règles de transition entre les cellules basées

sur l'équation d'écoulement de Manning dont les principes, les conditions et les restrictions ont été discutées. Nous avons utilisé le voisinage orienté pour identifier les voisins de chaque cellule de l'automate. Dans ce cas, l'état des cellules correspond au bilan d'eau de chaque cellule à chaque pas de temps. Quant au changement d'état, il est simultané pour toutes les cellules. Nous avons aussi expliqué comment les algorithmes et les structures de données développées au Chapitre 5 sont adaptés au processus d'écoulement des eaux de surface. La validation des simulations est faite dans le Bassin Expérimental des Eaux Volées « BEREV » situé dans la forêt Montmorency à Québec où des données de débit d'eau sont mesurées et archivées depuis quelques décennies. Nous avons choisi dans les archives disponibles du BEREV un événement de pluie réel qui satisfait les contraintes du système de simulation, afin de comparer les résultats des bilans d'eau simulés avec les données enregistrées in situ. Les résultats obtenus par simulation, qui représentent des hauteurs d'eau dans les points exutoires des deux sous-bassins versants étudiés, sont comparables aux valeurs mesurées de débits ramenées à des hauteurs. Nous avons attribué les différences essentiellement aux simplifications utilisées dans notre application et pour lesquelles nous proposons des alternatives dans la section des travaux futurs de ce chapitre.

7.2 Discussion

L'une des limitations les plus citées dans les travaux de géosimulation par automate cellulaire est liée au voisinage. En effet, les types de voisinage les plus utilisés sont le voisinage de Von Neumann et celui de Moore pour les tessellations carrées. Le voisinage de Von Neumann qui se fait uniquement dans deux directions ne prend en compte que quatre cellules voisines situées à la même distance de la cellule centrale, ce qui facilite les calculs. Le voisinage de Moore a l'avantage d'inclure en plus les quatre cellules qui se sont dans les directions des diagonales, mais dont les distances sont différentes des quatre premières (de Von Neumann), ce qui implique des difficultés dans l'application des lois physiques et l'intégration avec des bases de données géospatiales [Parsons et Fonstad, 2007]. L'avantage du voisinage du diagramme de Voronoï est que la tessellation de Voronoï peut servir pour définir la topologie des entités géographiques de la simulation lorsque ces derniers sont des objets; mais peut aussi constituer la base de l'automate cellulaire. L'application que nous avons développée utilise un voisinage particulier, basé sur la topologie du diagramme de Voronoï, et que nous avons appelé voisinage orienté. Il offre une solution alternative pour les problèmes de directions des voisinages de Von Neumann et de Moore. Par exemple, pour le processus d'écoulement des eaux de surface, c'est la pente du terrain qui permet d'identifier le voisinage orienté. Nous n'avons considéré comme voisines que les cellules qui drainent la cellule centrale. Ceci implique aussi que ce type de voisinage peut être dynamique puisqu'il varie à chaque pas de temps en fonction de la mise à jour des états des cellules de l'automate. Par exemple, pour l'écoulement des eaux, c'est la pente de la surface de l'eau qui détermine les cellules voisines. Or, le calcul de la pente de la

surface de l'eau prend en compte non seulement l'altitude du terrain, mais aussi la hauteur de l'eau qui varie à tous les pas de temps.

De plus, la hiérarchisation de la structure de données permet de naviguer entre les échelles spatiales afin de faciliter la prise de décision par les gestionnaires du territoire. Ainsi, une structure de données à géométrie hiérarchique permet de détecter rapidement le comportement des cellules de l'automate puis de vérifier leurs états dans d'autres échelles afin de prendre les mesures nécessaires pour minimiser les impacts négatifs du processus étudié. Les travaux cités dans la littérature par rapport à la hiérarchisation du diagramme de Voronoï ont plutôt étudié les méthodes d'insertion et de suppression de points générateurs afin de modifier leurs densités [Schussman et al., 2000]. La notion d'adressage des points générateurs entre les différents niveaux de représentation dans une hiérarchisation de diagramme de Voronoï a été étudiée par Gold et Angel [2006], mais ces derniers n'ont pas présenté de solution quant à la sélection des points générateurs, si ce n'est une méthode aléatoire. Notre contribution spécifique repose sur l'étude des procédures de sélection de points générateurs du diagramme de Voronoï qui sont basées sur les entités géographiques utilisées pour représenter le processus spatiotemporel étudié. Nous avons ainsi présenté un algorithme de sélection, l'« *algorithme des points peu significatifs* » conçu pour les données topographiques, que nous avons utilisé pour le cas d'application du processus de ruissellement des eaux. Nous avons montré l'utilité de cet algorithme pour les cas de distribution irrégulière des points de mesure d'altitude du terrain.

Notre principale contribution en matière d'automate cellulaire est essentiellement liée à la tessellation irrégulière de type Voronoï dont les cellules sont identifiées aux cellules de l'automate. Ce dernier hérite alors des caractéristiques de la structure de données proposée, ce qui offre la possibilité de réaliser un système d'automate cellulaire hiérarchique grâce à l'adressage des cellules entre les d'échelles spatiales. Cependant, les limitations de l'AC utilisé dans l'étude de l'écoulement des eaux sont essentiellement liées aux omissions puisque nous avons ignoré les processus d'évapotranspiration, d'infiltration d'eau dans le sol, d'écoulement de base, ainsi que la capacité de saturation du sol. Une autre simplification est liée aux précipitations homogènes utilisées dans la zone d'expérimentation où aucune variation spatiale de pluie n'a été considérée et où l'utilisation de cartes de précipitation dérivées de données radar peut être considérée comme une alternative intéressante. Ceci dit, notre apport en matière de simulation est que nous avons conçu un automate cellulaire adapté aux processus évolutifs en général et au processus de ruissellement des eaux en particulier. Il permet de retrouver les valeurs de hauteurs d'eau dans un bassin versant et de détecter les endroits à risque d'accumulation d'eau et d'inondation sans recourir à la résolution numérique d'équations différentielles complexes.

7.3 Perspectives de recherche

- **Comparaison des résultats de simulation dans une tessellation autre que le diagramme de Voronoï**

Le diagramme de Voronoï est bien adapté à la discrétisation spatiale des processus et à la simulation par automate cellulaire dont nous nous avons validé les résultats de pour le cas de l'écoulement des eaux en les comparant avec des données mesurées. Dans des travaux futurs, nous proposons de simuler le même processus en utilisant d'autres tessellations : régulières carrées ou triangulaires, ou irrégulières de type réseaux de triangles irréguliers par exemple; puis de comparer les résultats avec ceux que nous obtenus avec une tessellation de type Voronoï. Il serait aussi intéressant de trouver une procédure pour classer les processus selon le type de tessellation spatiale qui les représente le mieux.

- **Agrégation des résultats de simulation**

Il serait également pertinent d'étudier les procédures de hiérarchisation des paramètres des cellules de Voronoï suite à la hiérarchisation géométrique. En effet, l'un des inconvénients des tessellations irrégulières en général, et du diagramme de Voronoï en particulier, est que les limites des cellules ne se superposent pas suite à un changement d'échelle. Ainsi, le résultat d'une agrégation de cellules produit des polygones qui ne s'emboîtent pas avec les limites des cellules de l'échelle initiale. Cette question a été abordée par Gold et Angel [2006] qui ont proposé d'approximer les limites des cellules enfants par celles des cellules parents du niveau supérieur.

Cette caractéristique pose un problème lors de l'agrégation des résultats de la simulation par AC. En effet, il s'agit non seulement de proposer une méthode pour agréger les attributs des cellules mais aussi pour gérer l'information aux frontières. Dans le cas particulier du processus d'écoulement des eaux, il s'avère utile de comparer les résultats des bilans d'eau agrégés vers une échelle déterminée aux résultats obtenus directement par simulation dans cette échelle.

- **Simulation par AC tridimensionnel**

Un autre volet de recherche potentiel concerne la prise en compte de la troisième dimension spatiale et de la représentation du comportement des processus évolutifs en 3D. En effet, malgré les avancés récentes des systèmes d'information géographique, leurs capacités demeurent encore limitées pour la représentation et l'analyse spatiale des processus 3D dynamiques. Parmi les SIG les plus répandus, il n'existe pas aujourd'hui de logiciel capable de manipuler toutes les formes de données 3D. On qualifie de 2D½ les modélisations dont la caractéristique essentielle est de faire correspondre à un couple (x, y) de coordonnées géographiques une seule altitude z. Les complexités principales des SIG 3D impliquent tous les aspects de collecte, de stockage et d'analyse des données du monde réel. L'analyse tridimensionnelle

et les conséquences liées telles que les modèles topologiques, la représentation des relations spatiales et la visualisation 3D font partie de ces problèmes. Malgré l'émergence de nouvelles fonctionnalités des SIG 3D (tels que dans ArcGIS 2010), la modélisation des processus en 3D reste encore limitée. Ainsi, la plupart des travaux visant à modéliser et représenter les processus dynamiques et continus se sont contentés de deux dimensions; et les solutions en matière de visualisation 3D dédiées à l'information géographique sont peu nombreuses. Les structures de données que nous avons développées peuvent être modifiées afin de mettre en place un AC à trois dimensions où un diagramme de Voronoï 3D est construit et où la représentation de plusieurs processus serait améliorée. Par exemple dans notre cas d'application, il serait possible grâce à la prise en compte de la troisième dimension de représenter le processus d'écoulement souterrain des eaux et de modéliser le cycle de l'eau de manière plus globale.

- **Calibration de l'équation de Manning**

Nous avons montré dans le Chapitre 6 que l'équation d'écoulement que nous avons utilisée est une approximation de l'équation de Manning qui est conçue pour l'écoulement dans des canaux à surfaces artificielles. Le coefficient de Manning correspondant est défini selon des tables empiriques. Dans notre cas, le coefficient de Manning pour les sols dénudés ou couverts de végétation est peu étudié dans la littérature; et selon CORPEN (2007) et MDDEP (2012) nous utilisons les valeurs des cas des canaux naturels avec végétation. Afin d'améliorer la précision des coefficients de Manning pour les milieux naturels, une analyse de sensibilité des effets de variation du coefficient de Manning serait pertinente. Nous proposons d'étudier la variabilité des hauteurs d'eau simulées par notre système simulation en fonction de différents coefficients de Manning pour d'autres événements de précipitation où nous serons capables de définir toutes les autres variables intervenant dans les calculs.

- **Couplage fort de l'outil de simulation avec un logiciel de SIG**

Nous avons procédé par couplage faible entre l'outil de simulation par AC et un logiciel de SIG : *ArcGIS 10.2*. En effet, le processus de simulation est effectué dans une application séparée que nous avons conçue et associée à la librairie ouverte CGAL afin notamment de profiter des fonctions de base du diagramme de Voronoï, et aussi de la robustesse du langage de programmation C++. Ceci dit, les fichiers des résultats de simulations sont exportés dans *ArcGIS* où la visualisation est plus conviviale grâce aux options de ce dernier en matière de cartographie et d'analyse spatiale. Il serait intéressant de trouver un moyen de lancer la simulation directement à partir d'un logiciel SIG tel que *ArcGIS* grâce à une boîte de dialogue qui puisse être intégrée dans ce logiciel; afin de permettre à l'utilisateur de gérer les entrées et

sorties du processus de simulation directement dans *ArcGIS*. Ceci permettrait aussi d'améliorer les fonctions de simulation qui existent dans *ArcGIS*.

Références bibliographiques

- Abbott, M.B., Bathurst. J.C. Cunge, J.A. O'Connell, P.E., Rasmussen, J., (1986). An introduction to the European Hydrological System- Système Hydrologique Européen, 'S.H.E.' I-History and philosophy of a physically based distributed modelling system. *J. Hydrol.*, 87, 45-59.
- Al-Sabhan W., Mulligan M., Blackburn G. A., (2003). "A real-time hydrological model for flood prediction using GIS and the WWW". *Computers, Environment and Urban System* (27). 9-32.
- Appert, C. et Ludger, S. (2002). " Modélisation du trafic routier par des automates cellulaires." Actes INRETS 100 et École d'automate de modélisation du Trafic, 18.
- Argany, M., Mostafavi, M. A., Karimipour, F., et Gagné, C. (2011). A GIS based wireless sensor network coverage estimation and optimization: A Voronoï approach. In *Transactions on Computational Science XIV Springer Berlin Heidelberg*, 151-172.
- Barredo, J.I. et al. (2003). Modeling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata. *Landscape and Urban Planning*, 64(3), 145-160.
- Barros, J. (2003). Simulating Urban Dynamics in Latin American Cities. In *Proceedings of the 7th International Conference on GeoComputation*. Southampton.
- Barros, J. (2004). Urban Growth in Latin American Cities: Exploring urban dynamics through agent-based simulation. Thèse de doctorat, University of London.
- Basse, R. M., Omrani, H., Charif, O., Gerber, P., & Bódis, K. (2014). Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale. *Applied Geography*, 53, 160-171.
- Batty, M. (1998). Urban evolution on the desktop: simulation with the use of extended cellular automata. *Environment and Planning A*, 30(11), 1943-1967.
- Beaume, M.G. (2008). "Modélisation et Simulation Numérique Directe de L'écoulement d'un Fluide Complexe." Thèse de doctorat- Mines Paris Tech École doctorale sciences fondamentales et appliquées, 182.
- Benenson, I. et Torrens, P.M. (2004). *Geosimulation: Automata-Based Modeling of Urban Phenomena*, London: John Wiley & Sons.

- Benenson, I. et Torrens, P.M. (2005). A minimal prototype for integrating GIS and geographic simulation through Geographic Automata Systems. In *GeoDynamics*. P. Atkinson, G. Foody, S. Darby and F. Wu. (Eds), Florida: CRC Press, 347-369.
- Benenson, I. (2007). The scale of land-use CA is changing. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(2), 107-113.
- Benenson, I. et al. (2006). Residential Distribution in the City—Re-examined. In *Proceedings of AGILE 2006: 9th AGILE Conference on Geographic Information Science*. Visegrád, Hungary, April.
- Benenson, I. Omer, I. et Hatna, E. (2002). "Entity-based Modeling of Urban Residential Dynamics: The Case of Yaffo, Tel Aviv." *Environment and Planning B*, 29, 491-512.
- Benenson, I., Aronovich, S. et Noam, S. (2005). Let's talk objects: Generic methodology for urban high-resolution simulation. *Computers, Environment and Urban Systems*, 29(4), 425-453.
- Bergeron M, (1992), *Vocabulaire de la géomatique*, Québec, office de la langue française.
- Blaut, J.M, (1961). Space and process, the professional Geographer, *The Journal of American Geographers* 13 (4): 1-7.
- Boots, B., Okabe, A., et Sugihara, K. (1999). Spatial tessellations. *Geographical information systems*, 1, 503-526.
- Bousquet, F. et Gautier, D. (1999). "Comparaison de deux approches de modélisation des dynamiques spatiales par simulation multi-agents : les approches "spatiale" et "acteurs" ", *Cybergeo : European Journal of Geography [En ligne]*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 89, mis en ligne le 13 avril 1999. URL: <http://cybergeo.revues.org/index2389.html>.
- Brunner, P., & Simmons, C. T. (2012). HydroGeoSphere: a fully integrated, physically based hydrological model. *Groundwater*, 50(2), 170-176.
- Bura, S. et al. (1996). Multi-agents systems and the dynamics of a settlement system. *Geographical Analysis*, 28(2), 161-178.
- Burrough, P.A. et McDonnell, R.A. (1998). "Principles of Geographical Information Systems." Oxford: Oxford University Press.
- Burt, P. J. (1980). Tree and pyramid structures for coding hexagonally sampled binary images. *Computer Graphics and Image Processing*, 14(3), 271-280.

- Carvalho, J.P., Carola, M. et Tomé, J.A.B. (2006). Using Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps to Model Dynamic Cell Behaviour in Voronoï Based Cellular Automata. In IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vancouver, Canada, 1687-1694.
- Carvalho, J.P., Carola, M. et Tomé, J.A.B. (2006b). Using Rule-Based Fuzzy Cognitive Maps to Model Dynamic Cell Behaviour in Voronoï Based Cellular Automata. In IEEE International Conference on Fuzzy Systems. Vancouver, Canada, 1687-1694.
- Chahinian, N (2004). "Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole". Thèse de doctorat à l'Université Montpellier 2, 264.
- Chen, Q. et Mynett, A.E. (2003). Effects of cell size and configuration in cellular automata based prey-predator modelling. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 11(7-8), 609-625.
- Chrisman, N.R. (1998). Rethinking Levels of Measurement in Cartography. *Cartography and GIS*, 25 (4) 231-242.
- Clarke, K.C. Parks, B.O. et Crane, M.P. (2002). "Geographic Information Systems and Environment Modeling, Prentice Hall", New Jersey, 306.
- CORPEN (Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement). (2007). Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du Territoire Français. Direction de l'Eau. Fonction d'atténuation hydrique des zones Tampons. Annexe A2, 94-187.
- Coulthard, T.J., Macklin, M.G., Kirkby, M.J. (2002). A cellular model of Holocene upland river basin and alluvial fan evolution. *Earth Surface Processes and Landforms* 27, 269– 288.
- Coulthard, TJ, Lewin J et Macklin, MG. (2005) Modelling differential and complex catchment response to environmental change. *Geomorphology*. 69. 224-241.
- Cullot N., Parent C., Spaccapietra S., Vangenot C. (2003). "Des ontologies pour données géographiques". *Les SIG sur le Web, Revue internationale de géomatique*, Hermes Lavoisier.
- DAI, Jicai, LI, Xia, et LIU, Xiaoping. (2008). A hydrological model based on cellular automata and Doppler radar. In: *Sixth International Conference on Advanced Optical Materials and Devices*. International Society for Optics and Photonics.71431U-71431U-9.
- David E.E., David. C.W. (1982). Voronoï polyhedra as a tool for studying solvation. *J. Chem. Phys.*, 76(9):4611-4614.

- Dawson, R. J., Hall, J. W., Barr, S., Batty, M., Bristow, A., Carney, S., et Zanni, A. M. (2009). A blueprint for the integrated assessment of climate change in cities. *Green CITYnomics: The urban war against climate change*. Greenleaf Publishing, Chippenham, UK, 32-51.
- De Floriani, L., et Magillo, P. (2002). Multiresolution mesh representation: Models and data structures. In *Tutorials on Multiresolution in Geometric Modelling* Springer Berlin Heidelberg, 363-417.
- De Floriani, L., et Puppo, E. (1995). Hierarchical triangulation for multiresolution surface description. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 14(4), 363-411.
- Decoupigny F. (2006). "L'intérêt du couplage d'outils de modélisation en analyse spatiale", Colloque Géopoint "Demain La géographie", Avignon, juin 2006.
- Delahaye D., Guermond Y., Langlois P. (2001). Spatial interaction in the runoff process, *Proceedings of the 12th ECTG2001, European Colloquium on Theoretical and Quantitative Geography*, St Valéry en Caux, France.
- Douvinet J., Delahaye D., Langlois P. (2008). Modélisation de la dynamique potentielle d'un bassin versant et mesure de son efficacité structurelle, *Cybergeo European Journal of Geography [En ligne]*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 412, mis en ligne le 15 février 2008. URL: <http://cybergeo.eu/index16103.html>.
- Dragicevic, S. (2007). Embedding spatial agents into irregular cellular automata models of urban land use change to improve scenario exploration and decision making. In *Proceedings of GeoComputation'07 Conference*. Maynooth, Ireland, 3 to 5 September.
- Dubois, G. (2000). How representative are samples in a sampling network. *Journal of Geographic Information and Decision Analysis*, 4(1), 1-10.
- Dunn A. (2008). *Simulating Complex Systems by Cellular Automata Understanding Complex Systems*, Volume 0, 2010, Springer Berlin Heidelberg, 59-80.
- Durand-Dastès, F., (1992). Les modèles en géographie, in Bailly, A., Ferras, R., Pumain, D. (Eds), *Encyclopédie de la géographie*, Paris, Economica, 311-325.
- Dutton. G. (1996). Improving locational specificity of map data – a multiresolution, metadata-driven approach and notation. *International Journal of Geographic Information Systems* Vol 10, 253-268.

- Edwards, G. (1993). The Voronoï model and cultural space: applications to the social sciences and humanities. In *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS. Lecture Notes in Computer Science (Vol 716)*, A. U. Frank and I. Campari (Eds), Berlin: Springer-Verlag, 202-214.
- Edwards, G. (1993). The Voronoï model and cultural space: applications to the social sciences and humanities. In *Spatial Information Theory: A Theoretical Basis for GIS. Lecture Notes in Computer Science (Vol 716)*, A. U. Frank and I. Campari (Eds), Berlin: Springer-Verlag, 202-214.
- Engel B. A. Srinivasan R., Arnold J., Rewerts C., Brown S. J., (1993). Nonpoint source (NPS) pollution modeling using models integrated with geographic information systems (GIS), *Water Science and Technology*, n° 28 (3-5). 685- 690.
- Fedra, K. (2006). "Embedded GIS in environmental management". *GIS Development*, 10(2), 16-22.
- FFGG Faculté de Foresterie, de Géographie et de Géomatique de l'Université Laval. (2012). Démarche d'identification des forêts de haute valeur pour la conservation de la Forêt Montmorency et modalités d'intervention applicables.
- Flache, A. et Hegselmann, R. (2001). Do Irregular Grids make a Difference? Relaxing the Spatial Regularity Assumption in Cellular Models of Social Dynamics. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, (4), 4.
- Flowerdew, R. (1991). "Spatial data integration." in: *Geographic Information Systems: Principles and Application*. 1, 375-387.
- Fogel, E. et Teillaud, M. (2006). "Generic programming and the CGAL library, In *Effective Computational Geometry for Curves and Surfaces*". Mathematics and Visualization, J.-D. Boissonnat and M. Teillaud (Eds), Berlin: Springer-Verlag. 313-320.
- Fortune S. (1987) "A Sweepline Algorithm for Voronoï Diagrams", *Algorithmica*, (2). 153-174.
- Fotheringham, O'Kelly. (1989). "Spatial Interaction Models: Formulations and Applications." Springer, 224.
- Galashev A.E., Skripov. V.P (1985). Stability of Lennars-Jones crystal structures in the molecular dynamics model. *Sov. J. Low Temp. Phys.*, 6, 1985.
- Garrote L., Bras R. L., (1995). An integrated software environment for real-time use of a distributed hydrologic model, *Journal of Hydrology*, n° 167,307-326.

- Gibson L. et Lueas D, (1982). Vectorization of raster images using hierarchical methods. *Computer Graphics and Image Processing*, Vol 20, 9-82.
- Gimblett, H.R. (2002). *Integrating geographic information systems and agentbased modeling techniques for simulating social and ecological processes*, Oxford University Press, London.
- Golay F. (2007). *SIG Pour l'Environnement, Les Automates Cellulaires en environnement*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 11.
- Gold, C. et Angel, P. (2006). Voronoï Hierarchies. In *Geographic Information Science. Lecture Notes in Computer Science (Vol 4197)*, Raubal, M., Miller, H., Frank, A., Goodchild, M. (Eds), Berlin: Springer-Verlag, 99-111.
- Gold, C. M. (1992). The meaning of "Neighbour". In *Theories and methods of spatio-temporal reasoning in geographic space*, Springer Berlin Heidelberg, 220-235.
- Goodchild, M. (1992). "Geographical data modeling." *Computers & Geosciences*, 18, 401- 408.
- Goodchild, M. F., Glennon, A. (2008). "Representation and computation of geographic dynamics. *Understanding Dynamics of Geographic Domains*. K. S. Hornsby and M. Yuan. Boca Raton." FL, CRC Press, 13-29.
- Goodchild, M. (2005). GIS, "Spatial analysis, and modeling: overview,". In Maguire, D.J., Batty, M. and Goodchild, M.F., *GIS, Spatial Analysis and Modelling*, ESRI Press, Redlands, California.
- Goodchild, M., Haining, R., et Wise, S. (1992). Integrating GIS and spatial data analysis: problems and possibilities. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(5), 407-423.
- Goodchild, M., Yuan, M. et Cova, T.J., (2007). Towards a general theory of geographic representation in GIS, *International Journal of Geographical Information Science*, 21, 239-260.
- Grayson, R.B., Moore, I.D. et McMahon, T.A., (1992). Physically based hydrologic modeling .1. A terrain-Based model for investigative purposes. *Water Resources Research*, 28(10): 2639-2658.
- Hammam, Y. (2004). Irregular vector-agent based simulation for land-use modelling. In *Proceedings of the 16th Annual Colloquium of the Spatial Information Research Centre*. University of Otago, Dunedin, New Zealand, 2004.

- Hamman, Y., Moore, A. et Whigham, P. (2007). The dynamic geometry of geographical vector agents. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(5), 502-519.
- Hashemi L, Mostafavi MA, Gavrilova M, Pouliot J. (2011). Towards 3D dynamic field simulation within GIS: A 3D Kinetic Data Structure for representation and management of dynamic Fields.. *International Journal of Geographic Information Sciences (IJGIS)*. 25(1): 25-50.
- Hashemi Beni, L. (2009). Development of a 3D Kinetic Data Structure for a 3D Spatial Dynamic Field Simulation. Thèse de doctorat, Département des Sciences Géomatiques, Université Laval.
- Hins-Mallet K., 2009, Amélioration du processus de géosimulation des phénomènes urbains complexes par l'adaptation d'une tessellation Voronoï, Mémoire de maîtrise, Département des Sciences Géomatiques, Université Laval.
- Hoekstra, A., Kroc, J., & Sloot, P. (2010). *Simulating complex systems by cellular automata* (pp. 1-16). Berlin: Springer.
- Hoekstra, A. G., Falcone, J. L., Caiazzo, A., et Chopard, B. (2008). Multi-scale modeling with cellular automata: The complex automata approach. In *Cellular automata* (pp. 192-199). Springer Berlin Heidelberg.
- Honda. H. (1978). Description of cellular patterns by Dirichlet domains: the two dimensionnal case. *J. Theor. Biol.*, 75:523-543.
- Iltanen, S. (2012). Cellular automata in urban spatial modelling. In *Agent-based models of geographical systems* (pp. 69-84). Springer Netherlands.
- Israeli, N., et Goldenfeld, N. (2006). Coarse-graining of cellular automata, emergence, and the predictability of complex systems. *Physical Review E*, 73(2).
- Itami, Robert M., et Clark John D. (1992). "Spatial Dynamic Simulations Using Discrete Time and Discrete Event Theory in Cell Based GIS Systems". *Proceedings: 5th International Symposium on Spatial Data Handling*. Charleston, SC.702-12.
- Weimar, J. R. (2001). Coupling microscopic and macroscopic cellular automata. *Parallel Computing*, 27(5), 601-611. Jantz, C. et Goetz, S. (2005). Analysis of scale dependencies in an urban land-use-change model. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 217-241.

- Kerridge, J., Hine, J. et Wigan, M. (2001). Agent-based modelling of pedestrian movements: the questions that need to be asked and answered. *Environment and Planning B*, 28(3), 327-42.
- Kiester, A.R. et Sahr, K. (2008). Planar and spherical hierarchical, multi-resolution cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 32(3), 204-213
- Kocabas, V. et Dragicevic, S. (2006). Assessing cellular automata model behaviour using a sensitivity analysis approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), 921-953.
- Lajoie G. et Hagen-Zanker A. (2007). "La simulation de l'étalement urbain à La Réunion : apport de l'automate cellulaire Metronamica® pour la prospective territoriale", *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 405, mis en ligne le 18 octobre 2007, consulté le 04 mai 2014. URL: <http://cybergeo.revues.org/11882>; DOI: 10.4000/cybergeo.11882.
- Langlois, A. et Phipps, M. (1997). *Automates cellulaires: application à la simulation urbaine*, Paris: Hermès.
- Laurini, R. et Thompson, D. (1992). *Fundamentals of spatial information systems*, London: Academic Press.
- Le Moigne, J. L. (1993). *Modélisation des systèmes complexes*. Dunod, 178 pp.
- Leavesley, G.H. et Stannard, L.G. (1995). The precipitation-runoff modeling system- PRMS, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications, Highlands Ranch, CO, edited by V.P Singh, Chapter 9, pp 281-310.
- Ledoux, H., et Gold, C. (2006). A Voronoï-based map algebra. In *Progress in Spatial Data handling*. 117-131. Springer Berlin Heidelberg.
- Lee, Y. C. et Li, Z. L. (1998). A taxonomy of 2D space tessellation. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. (32) 344-346.
- Lee, Y. C., Li, Z. L., et Li, Y. L. (2000). Taxonomy of space tessellation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* .5 (3). 139-149.
- Li, Z. L., Zhu, Q., et Gold, C. (2005). "Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology", CRC Press, Boca Raton, FL.
- Li, Z., (2007). *Algorithmic foundation of multi-scale spatial representation*. CRC Press 280 pp
- Li, Z., (2007). *Algorithmic foundation of multi-scale spatial representation*. CRC Press 280 pp.

- Liu, L., Liu, Y., Wang, X., Yu, D., Liu, K., Huang, H., & Hu, G. (2014). Developing an effective 2-D urban flood inundation model for city emergency management based on cellular automata. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 2, 6173-6199.
- Lor, W.K.F. et Szeto, K.Y. (2000). Existence of minority in multi-agent systems using Voronoï Tessellation. In Kwong Sak Leung (ed.), *Lecture Notes in Computer Sciences Series, LNCS/LNAI, Volume 1983*, Springer-Verlag, Heidelberg. Proceeding of the Second International Conference on Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2000, 320-325.
- Luo, P., Du, Q. Y., He, S. F., Li, S., Michael, G., et Niu, H. E. (2002). A study on cellular automata based on relational databases and spatio-temporal simulations of culture diffusion. *Chinese Geographical Science*, 12(4), 359-365.
- Luzio D. M., Srinivasan R., Arnold J. G. (2002). Integration of watershed tools and SWAT model into BASINS, *Journal of The American Water Resources Association*, 38 (4). 1127-1141.
- Maguire, D.J. Batty, D.J. et Goodchild, M. (2005). *GIS, Spatial Analysis and Modeling*. ESRI Press.
- MDDEP. (2011). *Guide des Gestion des Eaux Pluviales. Stratégies d'aménagement, principes de conception et pratiques de gestion optimales pour les réseaux de drainage en milieu urbain*. MDDEP et MAMROT, Disponible à : <http://www.mddep.gouv.gc.ca/eau/pluviales/partie1.pdf>.
- Medvedev N.N. et Naberukhin. Yu. I. (1985). Delaunay simplexes of simple liquid and amorphous substances. *Journal of computational physics* . 31(6):465- 466.
- Mercier, F. (1997). *Analyse et modélisation de la dynamique forestière guyanaise à l'aide de diagrammes de Voronoï*, Université de Lyon 1, (Doctoral dissertation).
- Mioc, D., Anton, F., Gold, C. M., & Moulin, B. (2013). Spatio-temporal map generalizations with the hierarchical Voronoi data structure. In *Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD), 2013 10th International Symposium on* (pp. 63-72). IEEE.
- Mitasova H. et Mitas L. (1998). *Process Modeling and Simulations*, NCGIA Core Curriculum in GIScience, <http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u130/u13.html>.
- Moreno, N. et Marceau, D. J. (2007). Performance assessment of a new vector based geographic cellular automata model. *Proceedings of the International conference on GeoComputation*, 3 - 5 September 2007. Maynooth, Ireland.

- Moreno, N. (2008). A vector-based geographical cellular automata model to mitigate scale sensitivity and to allow objects' geometric transformation. Thèse de doctorat, University of Calgary.
- Moreno, N., Ménard, A. et Marceau, D.J. (2008). VecGCA: a vector-based geographic cellular automata model allowing geometric transformations of objects. *Environment and Planning B*, 35(4), 647-665.
- Moreno, N., Wang, F. et Marceau, D.J. (2008). Implementation of a dynamic neighborhood in a land-use vector-based cellular automata model. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 44-54.
- Mostafavi MA, Hashemi L, Hans Mallet K. (2010). Representing Dynamic Spatial Processes Using Voronoi Diagrams: Recent Developments. *Journal of Transactions on Computational Science*. 9: 183-201.
- Mostafavi, M. A., Beni, L. H., & Hins-Mallet, K. (2009). Representing Dynamic Spatial Processes Using Voronoi Diagrams: Recent Developements. In *Voronoi Diagrams, 2009. ISVD'09. Sixth International Symposium on* (pp. 109-117). IEEE.
- Nara, A. et Torrens, P.M. (2005). Inner-city gentrification simulation using hybrid models of cellular automata and multi-agent systems. In *Proceedings of the Geocomputation 2005 conference*. University of Michigan, Michigan, USA.
- Okabe, A. et al. (2000). *Spatial tessellations: concepts and applications of Voronoi diagrams* (2nd Edition), London: John Wiley et Sons.
- O'Sullivan, D. (2001a). Exploring spatial process dynamics using irregular cellular automaton models. *Geographical Analysis*, 33(1), 1-18.
- O'Sullivan, D. (2001b). Graph-cellular automata: a generalised discrete urban and regional model. *Environment and Planning B*, 28(5), 687-705.
- O'Sullivan, D. (2002). The difference that space can make: toward a geographical agent modeling environment. Presented at Agent 2002 'Social Agents: Ecology, Exchange, and Evolution', October 11-12, University of Chicago and Argonne National Laboratory, IL, USA.
- O'Sullivan, D. (2002a). Toward micro-scale spatial modeling of gentrification. *Journal of Geographical Systems*, 4(3), 251-274.
- O'Sullivan, D.B. (2000). *Graph-based Cellular Automaton Models of Urban Spatial Processes*. Thèse de doctorat, University of London.

- Otoo, E. J., et Zhu, H. (1993). Indexing on spherical surfaces using semi-quadcodes. In *Advances in Spatial Databases* (pp. 510-529). Springer Berlin Heidelberg.
- Pang, M.Y.C. et Shi, W. (1998). Modeling hierarchical structures of spatial processes using Voronoï spatial model. In *Proceedings of Spatial Data Handling' 98*. Poiker, T.K. and Chrisman, N (Eds), Vancouver, pp. 34-44
- Parrott, L. (2002). "Complexity and the limits of ecological engineering." *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 45(5): 1-6.
- Parsons J. A., Fonstad M. A. (2006). A cellular automata model of surface water flow, *Hydrological Processes*, 21 pp 2189-2195.
- Peuquet, D. Smith, B, et Brogaard, B. (1998). The Ontology of Fields Report of a Specialist Meeting Held under the Auspices of the Varenus Project. Panel on Computational Implementations of Geographic Concepts, *Proceedings of summer assembly of the university consortium for geographic information science*, 2(3), 5.
- Pierrick Tranouez, Cyrille Bertelle, et Damien Olivier. (2006). Changing levels of description in a fluid flow simulation. In M.A. Aziz-Alaoui and Cyrille Bertelle, editors, *Emergent Properties in natural and Artificial Dynamics Systems, "Understanding Complex Systems"*, pages 89-101, Berlin Heidelberg, Springer.
- Pishler F. (2003). On Modeling and Simulation of Flows of Water by 3D-Cellular Automata Computer Aided Systems Theory - EUROCAST 2003 Springer Berlin Heidelberg, Chapitre 3 -Volume 2809, pp 1-9.
- Pouliot, J. (1998). Définition d'un référentiel pour le couplage SIG-modèle. dans Actes 4e journées scientifiques du département de génie rural, Montana (Suisse), PFL, [http://sirs.scg.ulaval.ca/jacynthe/doctorat/article_JS_98.html].
- Pouliot, J. Bédard, K. Kirkwood, D. et Lachance, B. (2008). Reasoning about geological space: Coupling 3D Geomodels and topological queries as an aid to spatial data selection. *Computers and Geosciences*, 34(5), 529-541.
- Preparata F.P., Shamos M.I.S. (1988). *Computational Geometry, an Introduction*. Springer Verlag, NewYork.
- Rhind, D., Openshaw, S. et Green, N. (1988). The analysis of geographical data: data rich, technology adequate, theory poor. In *Proceedings of the 4th international conference on Statistical and Scientific*

Database Management table of contents. Lecture Notes in Computer Science (Vol 339), Berlin: Springer-Verlag, pp. 427-454.

Rinaldi P. R., Dalponte D. D., Vnere M. J et Clause. (2006) A Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains, Rinaldi P. R., Dalponte D. D., Vnere M. J et Clause. (2006) A Cellular automata algorithm for simulation of surface flows in large plains.

Rivington, M., Matthews, K.B., Bellocchi, G., Buchan, K., Stockle, C.O., et Donatelli, M. (2007). An integrated modeling approach to conduct multifactorial analyses on the impacts of climate change on whole-farm systems. *Environmental Modelling & Software*, 22(2), 202-210.

Robin, M. et Gourmelon, F. (2005). "La télédétection et les SIG dans les espaces côtiers. Éléments de synthèse à travers le parcours de François Cuq." *Norois*, 196/ 2005, 11-21.

Samet, H. (1984). The quadtree and related hierarchical data structures. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 16(2), 187-260.

Sammari, H., Mostafavi, M., & Moulin, B. (2012). An Irregular and Multi Scale Cellular Automata Tessellation to Model Surface Water Flow. *Proceedings of CAMUSS, Oporto, Portugal, November 8 to 10.*

Sammari H, Mostafvai MA. (2011). Toward a cellular automata simulation of surface water flow based on a hierarchical voronoi lattice within GIS. *Proceedings of the th ICA Workshop on Geospatial Analysis and Modeling. 4th ICA Workshop on Geospatial Analysis and Modeling, Vancouver, Canada, 2011-08-10.*

Sanders L., (2007). Introduction: Les modèles en analyse spatiale, Manuscrit auteur, publié dans *Modèles en analyse spatiale*, Sanders Lena (Ed.) 2001, pp 17-29.

Sanders, L. et al. (1997). SIMPOP: a multiagent system for the study of urbanism. *Environment and Planning B*, 24(2), 287-305.

Schmidt-Lainé, C., Pavé, A. (2002). Environnement : modélisation et modèles pour comprendre, agir et décider dans un contexte interdisciplinaire, *NaturesSciences et Sociétés, Sciences pour l'ingénierie de l'environnement*, 10 : S1.

Schrack, G. (1992). Finding neighbors of equal size in linear quadtrees and octrees in constant time. *CVGIP: Image Understanding*, 55(3), 221-230.

- Semholoni, F. (2000). The growth of an urban cluster into a dynamic self-modifying spatial pattern, *Environment and Planning B: Planning & Design*, 27: pp. 549-564
- Shi, W. et Pang, M.Y.C. (2000). Development of Voronoi-based cellular automata, an integrated dynamic model for geographical information systems, *International Journal of Geographical Information Science*, 14(5): pp 455–474.
- Simon, H. A. (1962). The architecture of complexity. *Proceedings of the American Philosophical Society*, 106:467-482.
- Singh, V. P., D.A. Woolhiser. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7:270-292.
- Spaccapietra S., Parent C., Zimanyi E. Spatio-Temporal Conceptual Models: Data Structures + Space + Time, 7th ACM Symposium on Advances in Geographic Information Systems (ACM GIS'99), 1999, p. 26-33.
- Stevens, D. et Dragicevic, S. (2007). A GIS-based irregular cellular automata model of land-use change. *Environment and Planning B*, 34(4), 708-724.
- Stevens, D. (2005). Integration of an Irregular Cellular Automata Approach and Geographic Information Systems for High-Resolution Modelling of Urban Growth. Mémoire de maîtrise, Simon Fraser University.
- Stevens, D., Dragicevic, S. et Rothley, K. (2007). iCity: A GIS-CA modeling tool for urban planning and decision making. *Environmental Modelling & Software*, 22(6), 761-773.
- Sui D, Z. et Maggio, R.C. (1999). "Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects." *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(33-51).
- Sui D. Z., Maggio R. C., (1999). Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems and prospects, *Computers, Environment and Urban Systems*, n° 23, pp.33-51.
- Tesson F. (2014). Support de cours électronique. Université de Pau et des pays de l'Adour. <http://web.univ-pau.fr/~ftesson1/tesson/LDecCours.html>.
- Tomko, M. (2007). Destination Descriptions in Urban Environments. Thèse de doctorat, University of Melbourne.
- Torrens, P. (2000). "How cellular models of urban systems work." Working Paper 28, Centre for Advanced.

Spatial Analysis, University College of London.

<http://www.casa.ucl.ac.uk/publications/workingpapers.html>.

- Torrens, P.M. et Nara, A. (2007). Modeling gentrification dynamics: A hybrid approach. *Computers, Environment and Urban Systems*, 31(3), 337-361.
- Toussaint. G.T. (1989). Pattern recognition and geometrical complexity. In Proc. of the 5th ICPR, IEEE, Miami Beach, pages 1324-1347.
- Villeneuve J.P., Hubert P., Mailhot A., Rousseau A.N. (1998). La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue des sciences de l'eau*, n° spécial pp 19- 39.
- Vliet, J., White, R. et Dragicevic, S. (2009). Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(1), 35-43.
- Weimar J.R. (2001). Coupling microscopic and macroscopic cellular automata. *Parallel Comput.* 27(5), 601-611.
- White, R. et Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: a cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25(8), 1175-1199.
- White, R. et Uljee, I. (2007). Multi-Scale Modelling of Population and Land Use with a Variable Grid CA. In Proceedings of the International Conference on GeoComputation. Maynooth, Ireland
- White, R., Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modeling of the spatial dynamics of urban and regional systems, *Computers, Environment and Urban Systems*, 24, pp.383-400.
- Wood J. (1996). The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models. Thèse de doctorat, Université de Leicester.
- Worboys, M. et Duckham, M., (2004). *GIS: A Computing Perspective*, Second edition, Taylor & Francis.
- Wu J., Loucks, O. (1995). From balance-of-nature to hierarchical patch dynamics: A paradigm shift in ecology. *Quarterly review of biology*.. 70, pp.439-466
- WU, Huan, YI, Yonghong, et CHEN, Xiuwan. HydroCA. (2005). A watershed routing model based on GIS and cellular automata. In: *Remote Sensing and Space Technology for Multidisciplinary Research and Applications*. International Society for Optics and Photonics, p. 61990Q- 61990Q-9.
- Wu, J. (1999). Hierarchy and scaling: extrapolating information along a scaling ladder. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 25(4), pp.367-380.

Wu, J., et David, J. L. (2002). A spatially explicit hierarchical approach to modeling complex ecological systems: theory and applications. *Ecological Modelling*, 153(1), pp.7-26.

Yeh, A.G.O. et Li, X. (2005). Error Propagation and Model Uncertainties of Cellular Automata in Urban Simulation with GIS, In: Peter M. Atkinson, Giles M. Foody, Stephen E. Darby, and Fulong Wu (eds.), *GeoDynamics*. CRC Press, pp.329-344.