



HAL
open science

Amplification de scènes virtuelles naturelles

Adrien Peytavie

► **To cite this version:**

Adrien Peytavie. Amplification de scènes virtuelles naturelles. Informatique [cs]. Université Claude Bernard - Lyon1, 2024. <tel-04796758>

HAL Id: tel-04796758

<https://hal.science/tel-04796758v1>

Submitted on 21 Nov 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



HABILITATION À DIRIGER LES RECHERCHES

opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

Spécialité : Informatique

Amplification de scènes virtuelles naturelles

Soutenue publiquement le 22 octobre 2024 par :

Adrien PEYTAVIE

Devant le jury composé de :

M. Jean-Michel DISCHLER, Professeur des Universités, Université de Strasbourg

Rapporteur

M. Romain RAFFIN, Professeur des Universités, Université de Bourgogne

Rapporteur

M. Damien ROHMER, Professeur, Ecole polytechnique

Rapporteur

Mme. Raphaëlle CHAINE, Professeure des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1

Examinatrice

M. Éric GUÉRIN, Maître de Conférences, INSA Lyon

Examineur

RÉSUMÉ

La conception de paysages virtuels constitue un défi majeur en informatique graphique, visant à reproduire fidèlement notre environnement quotidien à travers la modélisation détaillée de terrains, végétation, centres urbains, cours d'eau, et autres éléments complexes. L'augmentation de la demande pour la création d'univers virtuels nécessite des modèles de plus en plus réalistes pour offrir une immersion optimale à l'utilisateur, élargir les perspectives d'exploration et améliorer l'expérience globale.

Ce manuscrit met en lumière différentes méthodes de modélisation de scènes virtuelles naturelles, explorant diverses approches par génération procédurale et simulation physique. Les méthodes présentées démontrent les capacités de modélisation adaptées aux applications spécifiques visées. Dans ce cadre, mes recherches visent à concevoir des paysages virtuels qui répondent aux critères souvent antagonistes de créativité, de réalisme, de diversité et de représentation étendue des phénomènes observés sur notre planète.

Je présente ainsi plusieurs études sur la modélisation de divers phénomènes visant à amplifier un paysage à partir d'un terrain initial vierge. En premier lieu, une modélisation hiérarchique des réseaux fluviaux à grande échelle est exposée, atteignant une précision permettant d'animer les cours d'eau. Ensuite, une méthode est proposée pour accroître le réalisme des écosystèmes simulés en introduisant une diversité parmi les individus, incluant la modélisation complète du cycle de vie des organismes, de leur création à leur décomposition dans la scène. Dans un troisième temps, une approche de modélisation des déserts arides est présentée, mettant en lumière les mécanismes éoliens à l'origine de ces formations, ainsi qu'une méthode pour modéliser l'évolution des glaciers dans les déserts froids. Enfin, je termine en exposant une méthode pour peupler dynamiquement des scènes virtuelles par des objets, en mettant en avant les interactions entre ceux-ci et en soulignant le niveau de contrôle offert à l'utilisateur pour le positionnement de ces éléments.

Mots-clés : Génération de mondes virtuels, Amplification de terrains, Modélisation procédurale, Simulation physique

ABSTRACT

The design of virtual landscapes represents a significant challenge in computer graphics, aiming to faithfully replicate our daily environment through detailed modeling of terrains, vegetation, urban centers, watercourses, and other complex interactive elements. The increasing demand for virtual world creation necessitates increasingly realistic models to provide optimal immersion for users, broaden exploration possibilities, and enhance overall experience.

This manuscript highlights various methods for modeling natural virtual scenes, exploring procedural generation and physical simulation approaches. The methods presented demonstrate modeling capabilities adapted to specific targeted applications. In this context, my research aims to design virtual landscapes that meet high standards of creativity, realism, diversity, and comprehensive representation of observed phenomena on our planet.

Several studies are presented on modeling diverse phenomena to enhance a landscape from an initial bare terrain. Firstly, a hierarchical modeling of large-scale river networks is discussed, achieving precision suitable for animating watercourses. Secondly, a method is proposed to enhance the realism of simulated ecosystems by introducing diversity among individuals, including comprehensive modeling of organisms' lifecycle from creation to decomposition in the scene. Additionally, an approach to modeling arid deserts is presented, highlighting the wind-driven mechanisms responsible for these formations, along with a method to simulate glacier evolution. Finally, I conclude by presenting a method to dynamically populate virtual scenes with objects, emphasizing interactions between them and emphasizing the level of user control for positioning these elements.

Keywords: Virtual world generation, Terrain amplification, Procedural modeling, Physical simulation

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	RIVIÈRES	7
2.1	Principe général	9
2.2	Graphe du réseau fluvial	10
2.3	Amplification du réseau fluvial	11
2.4	Modèle procédural de rivières animées	15
2.5	Résultats	18
2.6	Conclusion et perspectives	21
3	SIMULATION D'ÉCOSYSTÈMES	23
3.1	Principe général	25
3.2	Réalisation des modèles	27
3.3	Simulation améliorée de l'écosystème	29
3.4	Correspondance des modèles	38
3.5	Résultats	40
3.6	Conclusion et perspectives	45
4	DÉSERTS	47
4.1	Principe général	49
4.2	Calcul du vent en surface	51
4.3	Simulation du sable	53
4.4	Amplification	58
4.5	Résultats	58
4.6	Conclusion et perspectives	61
5	GLACIERS	63
5.1	Principe général	64
5.2	Dynamique des glaciers	65
5.3	Simulation de glaciers	68
5.4	Modélisation des caractéristiques des glaciers	71
5.5	Résultats	76
5.6	Conclusion et perspectives	81
6	PAVAGES FANTÔMES	83

6.1	Principe général	84
6.2	Génération du Ghost Tile	85
6.3	Instantiation	89
6.4	Résultats	93
6.5	Conclusion et perspectives	99
7	CONCLUSION ET PERSPECTIVES	101
8	CURRICULUM VITAE	107
8.1	Enseignements	108
8.2	Encadrement doctoral	110
8.3	Animation scientifique	111
8.4	Projets de recherche	113
8.5	Publications	114
	BIBLIOGRAPHIE	121

INTRODUCTION



La conception de paysages virtuels constitue un défi récurrent en informatique graphique, visant à reproduire numériquement notre environnement quotidien. Cette entreprise exige la modélisation exhaustive de ses divers aspects, caractéristiques et phénomènes interdépendants, englobant la création de terrains, de végétation, de centres urbains ou ruraux, de réseaux routiers, de cours d'eau et de leurs interactions complexes. Les applications de cette démarche sont multiples, allant des expérimentations scientifiques pour des simulations ou des calculs numériques (en physique, géologie, botanique) aux applications culturelles (cinéma, jeux vidéo, publicité, maquettes virtuelles pour les musées), en passant par la création de maquettes pour l'aménagement du territoire en génie civil ou encore la mise en place d'environnements de formation virtuelle (simulation de conduite, formation des pompiers pour les incendies de forêt), entre autres. La demande croissante de création de ces univers virtuels exige toujours plus de réalisme dans les modèles générés, afin d'offrir une immersion accrue à l'utilisateur et d'étendre les possibilités d'exploration. Dans ce contexte, mes recherches visent à concevoir des paysages virtuels répondant aux exigences de créativité, de réalisme, de diversité et d'étendue des phénomènes observables sur notre planète.

Notre planète présente une complexité remarquable, avec une diversité de structures, de phénomènes et de comportements spécifiques. Diverses disciplines scientifiques, telles que la physique, la géologie, la biologie, la botanique, ont entrepris l'étude approfondie de notre planète et des lois qui la gouvernent. Ces scientifiques se sont consacrés à cette tâche pendant plusieurs siècles, chacun apportant sa propre expertise pour appréhender le fonctionnement de notre monde. Leurs travaux ont permis de décrypter et de maîtriser certains phénomènes en formulant des lois physiques ou des règles, ce qui permet de comprendre, de prévoir et d'analyser ces phénomènes. Toutefois, certains phénomènes demeurent encore mal compris à ce jour, en raison d'un manque de données ou d'hypothèses non vérifiées, et continuent d'être l'objet de spéculation, tandis que d'autres sont traitées de manière approximative en raison de leur complexité ou de leur caractère insaisissable.

Au sein de ce paysage de recherche, mes travaux sont orientés vers l'étude et la compréhension de ces phénomènes, dans le dessein de les reproduire à travers la mise en place de modèles numériques spécifiques. Ce processus est effectué en tenant compte de nos contraintes informatiques relatives à la

mémoire et au temps d'affichage, ainsi que des exigences de créativité indispensables pour un contrôle utilisateur optimal. Avec l'évolution constante des capacités de calcul et de stockage des ordinateurs, les méthodologies que je propose offrent la possibilité d'optimiser la qualité de reproduction des phénomènes, les rendant ainsi plus exploitables dans divers contextes.

Ainsi, mon étude se concentre sur la reproduction intégrale de tous les éléments observables sur terre, qu'il s'agisse des paysages naturels ou des aménagements façonnés par l'activité humaine, tels que les réseaux routiers et urbains et les habitations par exemple. Chaque domaine et sous-domaine demeurent distincts et exigent une expertise spécifique. Mon approche s'oriente par une collaboration étroite avec les spécialistes de ces différents domaines afin de bénéficier de leurs expertises pour mieux comprendre les problématiques actuelles et ainsi les adapter à notre domaine d'informatique graphique.

Actuellement, la simulation intégrale d'un monde virtuel avec tous ses aspects demeure hors de portée, en raison de la nécessité de ressources considérables en termes de temps et d'espace mémoire pour prendre en compte l'ensemble des phénomènes, souvent à une échelle considérable. Cependant, comment pouvons-nous rendre cette création de paysages virtuels réalisable malgré ces défis ? La conception d'un paysage suit généralement un processus de raffinement progressif des modèles. Ce processus débute en priorité par la modélisation des éléments présentant une portée spatiale et temporelle étendue sur une grande échelle, pour ensuite affiner progressivement leur représentation à travers des itérations successives. Il se termine par la prise en compte des détails les plus infimes se reposant sur les couches précédemment établies.

La création de la géométrie des scènes virtuelles peut être divisée en deux étapes majeures :

- La première étape consiste à ériger le support de la scène, qui, dans notre contexte, se traduit par la modélisation du terrain. Ce dernier reflète les principales caractéristiques et structures géologiques de la scène, telles que les chaînes de montagnes, les vallées ou encore les plaines. Ces terrains, de nature plus ou moins brute, peuvent être affinés par le biais de simulations d'érosion visant à intégrer des ravines ou des reliefs subtils.
- Pour conférer à la scène un aspect réaliste, une seconde étape d'amplification s'avère indispensable. Celle-ci implique la différenciation de la composition du sol par l'ajout et le traitement de matériaux tels que la terre, le sable, l'eau, et l'incorporation d'éléments visant à enrichir la scène et à lui insuffler une dimension plus importante, comme la végétation, les rochers, des routes ou encore des bâtiments.

Défis et verrous scientifiques

Les objectifs pour les différents acteurs qui interagiront avec ces scènes virtuelles sont multiples. Les utilisateurs finaux souhaitent des paysages immersifs, réalistes et crédibles afin de mieux appréhender la scène. Leur demande incessante de contenus de plus en plus riches et variés a un impact significatif sur la quantité de données à créer et à manipuler de manière efficiente.

Par ailleurs, les créateurs de ces contenus doivent être en mesure de proposer rapidement des scènes virtuelles riches et détaillées, conformément à des scénarios spécifiques. Cela nécessite des outils de modélisation sophistiqués qui leur offrent un contrôle sur la création.

Les défis scientifiques et techniques de ma recherche sont donc étroitement liés aux exigences de ces différents acteurs dans le contexte des scènes virtuelles. Voici un descriptif de ces verrous :

- **Réalisme de la scène** : L'un des critères essentiels lors de la conception de scènes virtuelles réside dans la création d'un environnement réaliste, dans le but d'assurer une expérience immersive optimale aux utilisateurs. Le réalisme demeure une notion complexe à définir, particulièrement dans des scènes de grande envergure, et demeure étroitement lié à l'expérience et à la connaissance des utilisateurs. Afin de répondre de manière adéquate à ce défi, je m'attache à intégrer, dans mes recherches, les principes métiers issus de domaines tels que l'architecture, la géologie et la biologie, au processus de création, dans le but de reproduire le plus fidèlement possible la réalité. Cela implique l'établissement d'une collaboration étroite avec des experts dans ces domaines. L'atteinte d'un niveau accru de réalisme nécessite la modélisation de phénomènes conformes aux lois physiques, la diversification des modèles ainsi qu'une grande précision dans la modélisation.
- **Masse de données** : Les entreprises industrielles sont tenues de fournir une quantité toujours croissante de contenus sur des échelles de plus en plus étendues (actuellement de 16 à 32 km carrés dans le domaine des jeux vidéo, avec une précision de 50 cm à 1 mètre). Afin d'atteindre cet objectif tout en préservant une cohérence d'ensemble, je m'attèle au développement de nouvelles représentations permettant de modéliser ces scènes en utilisant des algorithmes multi-échelles. Ces derniers ont pour vocation de générer des données et du contenu, lesquels serviront soit directement à la modélisation, soit comme des données de contrôle pour les échelles de modélisation plus petites. Cette démarche essentielle vise à obtenir un niveau de détail élevé et à définir des territoires de plus en plus vastes de manière automatique, en vue de réduire les coûts de production.
- **Vitesse de création** : Une contrainte inhérente à la génération de données massives réside dans le temps substantiel requis pour leur traitement et leur création. Certaines applications accordent la priorité au réalisme physique au détriment de la rapidité d'exécution. Dans le domaine du grand public, l'accent est davantage mis sur la création d'éléments interactifs afin de répondre rapidement aux besoins. Dans mes travaux, j'adapte chaque algorithme en fonction de l'application et du contexte d'exécution ce qui multiplie le nombre de solutions à mettre en oeuvre.
- **Contrôle utilisateur** : Les critères énoncés précédemment perdent leur viabilité si les générations ne s'alignent pas sur les intentions du créateur en réponse à son besoin. Les algorithmes qui ne satisfont pas à ce critère se trouvent exclus de l'utilisation, puisque les modèles doivent alors être révisés, engendrant ainsi une perte de temps et d'intérêt pour ces méthodes. L'objectif de mes recherches est de concevoir des algorithmes permettant d'exercer un contrôle intuitif à un niveau élevé et/ou bas, afin de simplifier et accélérer la création de contenu tout en préservant les intentions de l'utilisateur.

Il est souvent difficile de concilier la totalité des verrous scientifiques au sein d'une même méthode. Les méthodes que je propose ont pour dessein de répondre à une portion de ces exigences, et s'adaptent aux applications visées.

1 Modélisation de paysages

Il existe plusieurs approches dans la littérature pour modéliser des paysages. Une des possibilités est de modéliser manuellement l'ensemble de la scène ce qui permet d'avoir des résultats contrôlés mais avec des inconvénients non négligeables qui sont le temps de production qui est très important et par conséquent un coût de production qui explose. Cette approche a aussi un impact sur la difficulté à garder un réalisme sur de grandes étendues, la modélisation nécessite de garder une cohérence globale entre les objets et son intégration dans la scène, c'est réalisable localement mais difficile voir impossible sur des échelles plus importantes et surtout très fastidieux. Ces raisons poussent à automatiser les processus de création afin dans un premier temps de gagner du temps mais également de respecter des règles physiques sur de grandes échelles pour obtenir une cohérence globale de la scène.

Nous pouvons définir 3 grandes catégories de méthodes pour générer ou traiter automatiquement des scènes virtuelles :

- **Simulation physique ou biologique** : Cette approche consiste à modéliser un phénomène en tenant compte du principe de causalité. Elle vise à définir et à modéliser les causes d'un phénomène afin de reproduire l'effet désiré. Cette méthodologie implique la définition d'équations ou de règles régissant le phénomène, qu'il s'agisse de propriétés physiques ou biologiques, et leur application itérative sur une scène pour en obtenir un résultat. L'avantage majeur de cette méthode réside dans la modélisation complète des processus d'évolution, de comportement et d'interaction, fournissant ainsi une solution extrêmement réaliste du phénomène. Cependant, cette démarche soulève plusieurs problèmes, notamment en raison du processus itératif qui nécessite un temps considérable pour aboutir à un résultat. Des propositions existent dans la littérature pour simplifier les équations, permettant ainsi de réduire les temps de convergence à des niveaux plus acceptables. Un autre enjeu réside dans le contrôle du résultat final : bien que l'on puisse maîtriser les causes du phénomène, le résultat en lui-même demeure difficilement contrôlable directement.
- **Génération procédurale** : L'objectif de cette approche est de modéliser directement le phénomène plutôt que sa cause. Cette méthodologie consiste à définir un processus de création permettant de produire un résultat sans recourir à des boucles temporelles. Les contraintes inhérentes à cette méthode sont beaucoup plus flexibles comparées à celles de la simulation, ce qui permet de mettre en œuvre des algorithmes capables de produire des résultats de manière beaucoup plus rapide. De surcroît, cette flexibilité facilite l'ajout de contrôles utilisateur à divers niveaux du processus de création, rendant celui-ci souvent plus intuitif pour les graphistes. Cependant, cette approche est souvent critiquée pour la difficulté à atteindre un réalisme élevé

dans les scènes générées. En effet, elle tend à approximer le phénomène sans se conformer à des règles prédéfinies, ce qui limite la capacité à modéliser la complexité et la diversité de ces phénomènes.

- **Modélisation par l'exemple** : Cette approche vise, tout comme la génération procédurale, à modéliser directement le résultat final. Toutefois, elle se distingue par l'utilisation de données substantielles provenant majoritairement du monde réel, qui servent de base pour les algorithmes en vue de générer le résultat escompté. Les données en entrée sont généralement acquises par des techniques de numérisation, puis stockées dans de vastes bases de données. À titre d'exemple, l'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) met à disposition des données d'altimétrie, des orthophotos ainsi que des plans cadastraux, qui sont ouverts et accessibles au grand public. Ces données sont ensuite traitées et combinées pour reconstruire un paysage. La modélisation et la synthèse des paysages ont connu une forte progression ces dernières années, en partie grâce à l'essor des diverses méthodes d'apprentissage automatique. L'utilisation de données réelles permet de reproduire des phénomènes avec un haut degré de réalisme, étant donné qu'elles reposent sur des informations concrètes et factuelles. De plus, cette méthode offre la possibilité de développer des outils de contrôle intuitifs pour les utilisateurs, avec des temps de génération relativement rapides, bien que ces contrôles soient souvent de haut niveau et, par conséquent, moins précis. Cependant, un inconvénient majeur de cette méthode réside dans son application limitée à certains phénomènes, car elle dépend de l'existence de ces données réelles. Ainsi, elle ne peut pas être utilisée pour modéliser des phénomènes pour lesquels il n'existe pas de données préalablement disponibles. Par exemple, il n'existe pas de bases de données conséquentes concernant la distribution d'arbres au sein de leur écosystème.

Le choix parmi ces trois catégories de modélisation dépend largement des attentes des acteurs impliqués et des contraintes mentionnées précédemment. Chacune de ces méthodes possède des propriétés distinctes qui les rendent plus ou moins adaptées selon les contextes. Ainsi, dans mes travaux, j'adopte l'approche la plus appropriée en fonction du contexte de l'application ciblée, des prérequis disponibles, et des contraintes spécifiques qui varient en fonction du phénomène étudié.

Organisation du document

Mes recherches se concentrent à la fois sur la conception initiale du terrain d'une scène et sur son amplification ultérieure, des domaines dans lesquels j'ai apporté des contributions complémentaires. En choisissant de restreindre la présentation de mes travaux de recherche, j'ai choisi de mettre en lumière uniquement le processus d'amplification des scènes virtuelles à partir d'un terrain préalablement établi. De plus, je me suis également focalisé sur la création de paysages naturels, lesquels occupent actuellement une place centrale dans mes recherches, en contraste avec les paysages urbains. Cette orientation a été le pilier de mes activités de recherche ces dernières années, marquée par l'introduction de nouvelles perspectives au sein de l'équipe, notamment dans les domaines de la modélisation de l'eau et de la végétation. Toutes les méthodes d'amplification abordées prennent donc pour point de

départ un terrain défini sous la forme d'une carte d'élévation, générée par des méthodes de création ou extraite d'un terrain réel préalablement numérisé et issu d'une base de données.

Dans les chapitres de ce manuscrit, je présenterai d'abord deux des travaux émergents dont j'ai été à la fois porteur et initiateur, concernant la modélisation des réseaux de rivières et la création d'écosystèmes de végétation complexe. Le chapitre 2 sera consacré à une modélisation hiérarchique des réseaux fluviaux sur de grande échelle, jusqu'à atteindre une précision permettant l'animation de l'eau. Dans le chapitre 3, je proposerai une méthode visant à accroître le réalisme des écosystèmes simulés en introduisant une diversité au sein des individus. Cette méthode inclut la modélisation intégrale du cycle de vie des organismes, depuis leur création jusqu'à leur décomposition dans la scène, ainsi que l'intégration des impacts de ce cycle de vie dans le processus de simulation des écosystèmes.

Dans un second temps, je présente les recherches menées par mon équipe dans le domaine de l'amplification des scènes naturelles, auxquelles j'ai contribué en apportant toute mon expertise. Le chapitre 4 traitera de la modélisation des déserts arides, un travail initié dans le cadre de la thèse d'Axel Paris en 2020, mettant en lumière les mécanismes éoliens à l'origine de ces formations. Ensuite, le chapitre 5 abordera la formation des glaciers ainsi que le contrôle de la simulation, une thématique portée par le post-doctorant Oscar Argudo entre 2019 et 2020. Le dernier chapitre 6 présentera des travaux de l'équipe, généralisant mes recherches doctorales sur la modélisation de l'empilement de pierres. Il illustrera une méthode pour peupler dynamiquement des scènes virtuelles, en mettant en lumière les interactions entre les objets et en soulignant le contrôle offert à l'utilisateur pour le positionnement de ces éléments.

RIVIÈRES



Table des matières

2.1	Principe général	9
2.2	Graphe du réseau fluvial	10
2.3	Amplification du réseau fluvial	11
2.4	Modèle procédural de rivières animées	15
2.5	Résultats	18
2.6	Conclusion et perspectives	21

L'objectif de ces travaux était d'élaborer une méthode unifiée visant à intégrer automatiquement des cours d'eau animés à partir de terrains bruts sur de grandes échelles. Les méthodes de l'état de l'art se sont concentrées de manière isolée sur différentes facettes de la modélisation des rivières, telles que l'animation de fluides à l'aide de méthodes de simulation eulériennes ou lagrangiennes [Bri15 ; LP02b ; LH10 ; KW06 ; Irv+06 ; NB11], ou l'utilisation de techniques procédurales pour améliorer les temps de calcul et ainsi proposer des échelles de modélisation plus importantes [NP01 ; YNS11 ; SS17]. Elles se sont également intéressées à la définition de réseaux de rivières à grande échelle [KMN88 ; PH93 ; Der+11 ; Gén+13], ou à la modélisation de terrains sans rivières en utilisant des procédés d'érosion [Ben+06 ; Kri+09 ; MDH07 ; Šř08]. Aucune méthode n'a été proposée pour produire simultanément un réseau de rivières défini hydrologiquement et une animation correspondante.

Afin de traiter de vastes étendues, nous nous sommes orientés vers des méthodes procédurales. Nous nous sommes concentrés sur le calcul des tracés et des caractéristiques des rivières, pour finalement combiner des archétypes de rivières à l'échelle macroscopique et des archétypes d'animation d'eau à l'échelle mésoscopique. Nous utilisons les classifications de Rosgen [Ros94] pour associer des archétypes de tronçons de rivières à nos données, et nous employons des primitives de terrain et d'eau pour définir des phénomènes locaux, tels que l'affouillement et la pseudopériodicité de la géométrie de l'eau.

Cette initiative a été menée dans le cadre du projet Papaya, en collaboration avec l'entreprise Ubisoft, et dans le cadre de la thèse de Thibault Dupont, que j'ai co-supervisée avec Eric Galin. Une publication

a été réalisée et j'ai eu l'occasion de la présenter lors de la conférence Pacific Graphics en 2019 [Pey+19].



FIGURE 1 : À partir d'un terrain d'entrée en terre nue, notre méthode calcule la pente et la zone de drainage pour générer automatiquement un graphique de rivière qui est amplifié de manière procédurale dans un cours de rivière détaillé. Dans ce cas, 4 km de long, avec 63k primitives de terrain et 42k primitives d'eau.

2.1 Principe général

Le processus d'amplification procédurale prend un terrain en entrée, et produit un paysage contenant un système fluvial animé dont la géométrie du lit est sculptée et couplée à une surface d'eau animée. Le processus complet est décrit dans la Figure 2 ; il commence par une analyse d'un champ d'altitude fourni par l'utilisateur. L'analyse permet d'obtenir différentes cartes dont la pente, la zone de drainage et la puissance du cours d'eau.

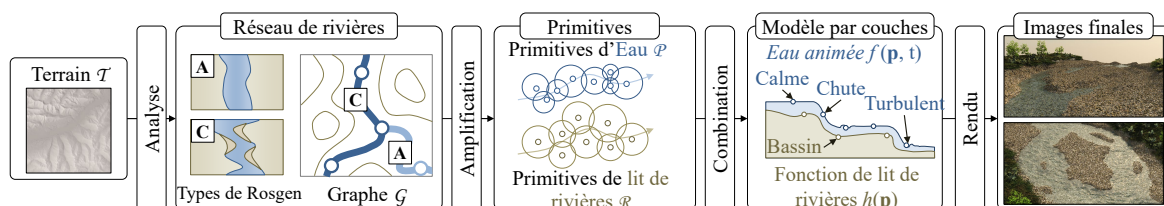


FIGURE 2 : Présentation de la méthode : l'entrée est un champ de hauteur 2D à partir duquel les caractéristiques d'écoulement sont automatiquement dérivées. Un réseau fluvial et une géométrie du lit sont construits en utilisant la catégorisation de Rosgen (Figure 3). Ensuite, les paramètres d'écoulement dérivés pour chaque cellule de la rivière sont transmis à un processus d'amplification procédurale. Le résultat est un modèle de rivière sous la forme d'un arbre de construction qui encode une fonction temporelle d'élévation de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$.

Notre travail utilise la classification des rivières présentée par Rosgen [Ros94] qui définit les caractéristiques morphologiques de la géométrie du lit de la rivière (*i.e.* la section transversale et le profil longitudinal, la sinuosité, les matériaux du lit de la rivière et le rapport d'encaissement) en fonction de la pente locale et du débit de la rivière. À partir de ces données issues de l'analyse du terrain sous-jacent, un graphe de réseau fluvial est généré, dont les arêtes correspondent aux segments de rivière étiquetés par le type de rivière (Figure 3). Il en résulte un *réseau fluvial paramétré*.

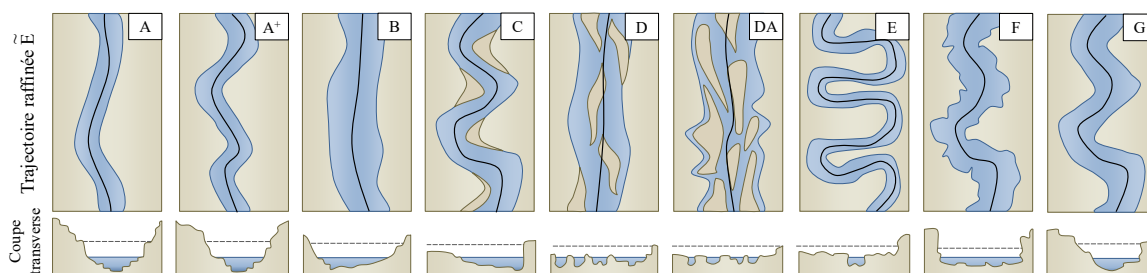


FIGURE 3 : Une vue d'ensemble des différents types de rivières de Rosgen sont présentés ici, ainsi que leurs modèles de trajectoires détaillées \tilde{E} . La classification est basée à la fois sur la section transversale orthogonale et la trajectoire longitudinale des rivières trouvées dans la nature.

Le réseau fluvial est ensuite raffiné en plaçant de manière appropriée des primitives animées localisées qui représentent des motifs d'eau cycliques, tels que des vagues ou des tourbillons. Les primitives superposées sont combinées à l'aide d'opérateurs de mélange dans un arbre hiérarchique. Cette fonction procédurale peut être évaluée directement et à tout moment sans qu'il soit nécessaire de procéder à une simulation.

2.2 Graphe du réseau fluvial

Dans de nombreux cas, un graphe de rivières avec les paramètres correspondants nécessaires à l'amplification du réseau fluvial n'est pas disponible pour un terrain d'entrée donné. Nous proposons une étape procédurale d'analyse du réseau fluvial s'appuyant sur un terrain en entrée (Figure 4).

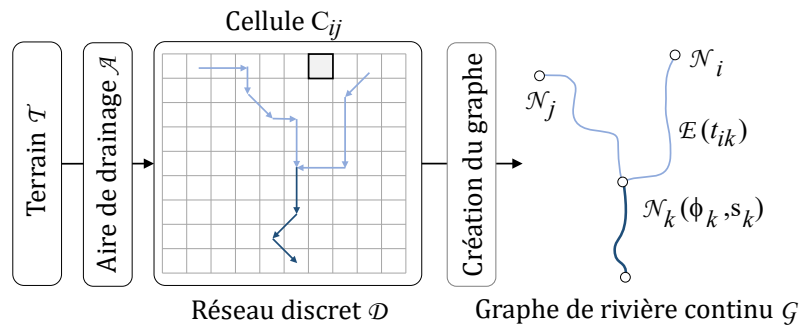


FIGURE 4 : Aperçu de la définition du réseau fluvial : des cartes de drainage du terrain sont extraites pour ensuite calculer le réseau discrétisé \mathcal{D} . Celui-ci est converti en un graphe continu \mathcal{G} contenant un ensemble de paramètres.

L'analyse se déroule comme suit : étant donné un terrain \mathcal{T} composé de cellules de grille régulières C_{ij} , nous générons d'abord un réseau fluvial discrétisé \mathcal{D} , puis nous le convertissons en un graphe de réseau fluvial \mathcal{G} avec des nœuds et des arêtes étiquetés avec des données de débit, comme préalable à l'amplification du réseau fluvial (comme décrit dans la section 2.3).

Nous commençons par calculer l'aire de drainage A_{ij} pour chaque cellule C_{ij} du terrain d'entrée \mathcal{T} (en utilisant la méthode de Freeman [Fre91]). Le réseau fluvial discret \mathcal{D} est alors simplement l'ensemble des cellules qui ont une aire de drainage supérieure à une valeur seuil contrôlée par l'utilisateur (Figure 5).

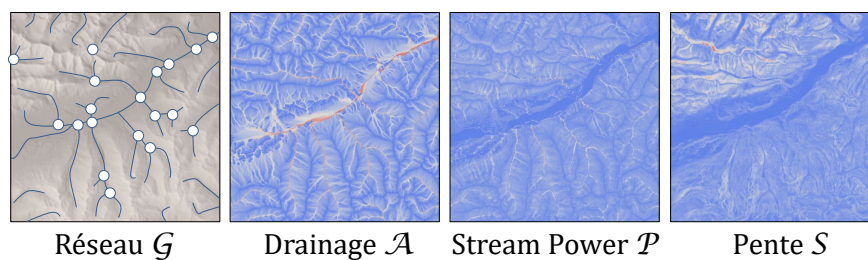


FIGURE 5 : Paramètres caractérisant les différentes parties du réseau hydrographique : la pente S et la puissance du cours d'eau \mathcal{P} se rapportent aux forces d'érosion, tandis que la surface de drainage \mathcal{A} dicte le volume du débit.

Le réseau fluvial discret est ensuite converti en un graphe continu \mathcal{G} en définissant un nœud aux cellules ayant plus d'un contributeur et en lissant la trajectoire de la rivière entre les nœuds avec des splines cubiques par morceaux. Ensuite, les nœuds du graphe sont étiquetés avec les valeurs de la pente du terrain s et du débit de la rivière ϕ à la position de leur cellule. Ce dernier est une mesure du taux volumétrique auquel l'eau est transportée vers le bas de la rivière. Nous appliquons un modèle

simplifié basé sur une loi de puissance empirique observée en géomorphologie [Dun78] : à partir de la zone de drainage A_{ij} [m^2], le débit ϕ_{ij} de la rivière [$m^3 s^{-1}$] est approximé par $\phi_{ij} = 0,42A_{ij}^{0,69}$. Cette équation prend en compte les phénomènes d'évaporation et d'infiltration, c'est pourquoi le volume du débit n'est pas conservé.

L'étiquetage des arêtes du graphe est plus complexe, car la classification de Rosgen [Ros94] nécessite le calcul des propriétés suivantes des rivières : le débit des rivières par segment, la puissance des cours d'eau et le nombre de Horton-Strahler. Tout d'abord, la moyenne du débit de la rivière ϕ_{ij} est calculée sur les cellules occupées par le bord. Ensuite, la puissance du cours d'eau, qui capte l'action érosive de l'eau s'écoulant dans la rivière [Cor+16], est calculée sur la base de la pente S_{ij} et de la zone de drainage A_{ij} par cellule de bord comme suit : $P_{ij} = A_{ij}^{1/2} S_{ij}$, et on en fait la moyenne. La dérivation finale est le nombre de Horton-Strahler [Hor45], une mesure numérique de la complexité des ramifications, les segments de rivière les plus élevés ayant plus d'affluents pourvoyeurs. Le graphe du réseau fluvial est ainsi entièrement étiqueté et peut être transmis directement au processus d'amplification du réseau fluvial décrit dans la Section 2.3.

2.3 Amplification du réseau fluvial

Avec un réseau de rivières sous la forme d'un graphe \mathcal{G} (Section 2.2), nous générons automatiquement une trajectoire détaillée du cours de la rivière, nous sculptons le lit de la rivière correspondant dans la surface du terrain, et nous générons des primitives d'écoulement de la rivière à partir desquelles un arbre de mélange d'écoulement est construit pour animer la surface de la rivière (Figure 6).

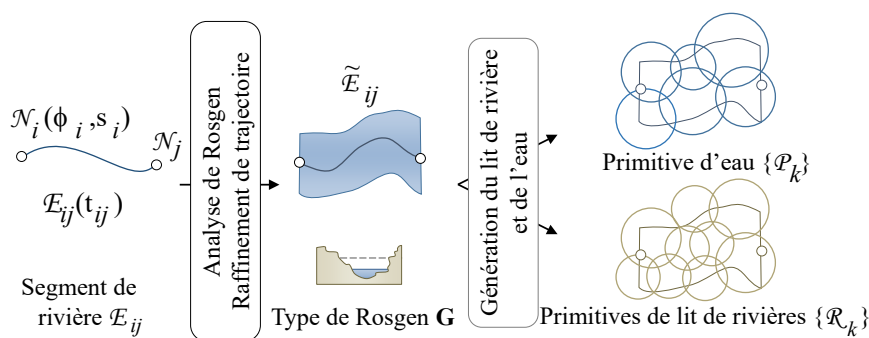


FIGURE 6 : L'amplification procédurale prend une trajectoire de rivière grossière $\tilde{\mathcal{E}}$ et la raffine selon le type de Rosgen. Les primitives de lit de rivière \mathcal{R} et d'écoulement de rivière \mathcal{P} pour l'animation de l'eau sont ensuite placées conjointement sur le domaine de la rivière.

Le graphe fluvial \mathcal{G} a des nœuds N_i qui correspondent aux jonctions fluviales et des arêtes \mathcal{E}_{ij} qui représentent la trajectoire intermédiaire de la rivière. Les nœuds du graphe stockent des données géomorphologiques ; en particulier, la pente moyenne s_i dans le voisinage local du nœud et le débit de la rivière ϕ_i . Les arêtes du graphe, quant à elles, stockent leur type de Rosgen t_{ij} (Figure 3) et encodent la trajectoire de la rivière sous la forme d'une courbe cubique par morceaux.

L'amplification du graphe en rivière animée est réalisé en 3 étapes qui sont l'analyse et le raffinement de la trajectoire (Section 2.3.1), la sculpture de la géométrie du lit de rivière (Section 2.3.2) et le placement de primitives d'animation de la surface d'eau (Section 2.3.3).

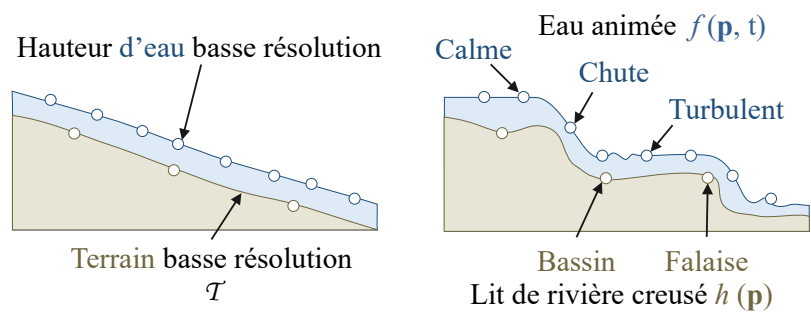


FIGURE 7 : Le profil longitudinal d'une rivière est affiné 1) en échantillonnant aléatoirement la trajectoire de la rivière et 2) en aplatissant le niveau d'eau et le lit de la rivière entre certains échantillons en fonction du type de Rosgen, puis 3) en instanciant des primitives procédurales basées en partie sur le profil révisé.

2.3.1 Analyse et raffinement de la trajectoire

L'amplification procède en affinant d'abord les trajectoires des arêtes \mathcal{E} dans le graphe de la rivière \mathcal{G} , en fonction de leur type de Rosgen. Le résultat est un graphe géométrique révisé $\tilde{\mathcal{G}} = \{\mathcal{N}, \tilde{\mathcal{E}}\}$. Il est important de noter que ce processus n'ajuste pas seulement la trajectoire planaire (x, y) de la rivière, mais aussi son profil longitudinal (valeurs d'élévation z le long de la trajectoire) de manière à créer des bassins et des cascades appropriés. Pour chaque segment de rivière \mathcal{E}_i dans \mathcal{G} , nous générons une trajectoire tridimensionnelle raffinée $\tilde{\mathcal{E}}_i$, en fonction de son type de Rosgen calculé t_i . La trajectoire horizontale peut être sinueuse si la pente locale s_i est faible et l'écoulement ϕ_i modéré (type **C**, **E** ou **G**), ou droite si la pente est forte (type **A** ou **A+**). Ensuite, le profil d'élévation longitudinal de la trajectoire est également affiné en vue de créer des bassins ou cascades correspondant au type de Rosgen (Figures 7 et 9).

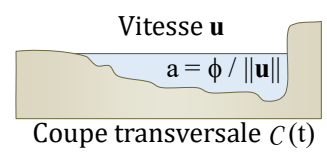


FIGURE 8 : Mise à l'échelle des sections transversales des modèles.

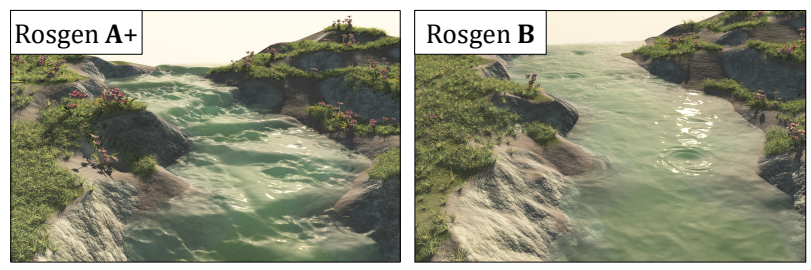


FIGURE 9 : A gauche, une rivière à forte pente (Rosgen **A+**) et à droite, une rivière avec moins de dénivelée obtenues avec une trajectoire planaire identique.

Les modèles de Rosgen définissent également des sections transversales $C(t)$ prises orthogonalement à la direction de la rivière et d'une surface unitaire (Figure 8). Par conséquent, nous devons calculer la superficie de la rivière à partir du débit afin de mettre à l'échelle le modèle. Pour chaque section transversale du modèle $C(t)$, le facteur d'échelle est défini comme la zone $a = \phi / \|\mathbf{u}\|$ avec $\phi = 0,42\mathcal{A}^{0,69}$ (Section 2.2).

2.3.2 Sculpture du lit de la rivière

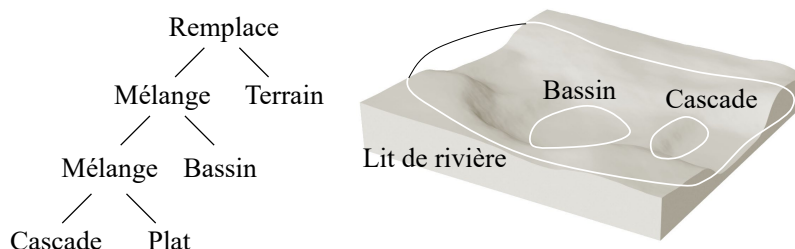


FIGURE 10 : Représentation arborescente du terrain du lit de la rivière \mathcal{R} de type Rosgen A avec cascade et bassin.

À partir de la trajectoire raffinée et de son type Rosgen, la géométrie du lit de la rivière \mathcal{R} peut être construite et intégrée au terrain (Figure 10). Pour cela, nous utilisons des modèles de Rosgen normalisés en coupe transversale et longitudinale. Ceux-ci sont inspirés des sections transversales $C(t)$ présentées dans la Figure 3, mais dépendent également de la courbure locale de la trajectoire de la rivière. Ils sont normalisés dans le sens où leur échelle suppose une surface unitaire pour l'eau dans la section transversale, et lorsqu'ils sont instanciés, ils sont mis à l'échelle selon un facteur dérivé du débit ϕ et de l'élévation de la trajectoire.

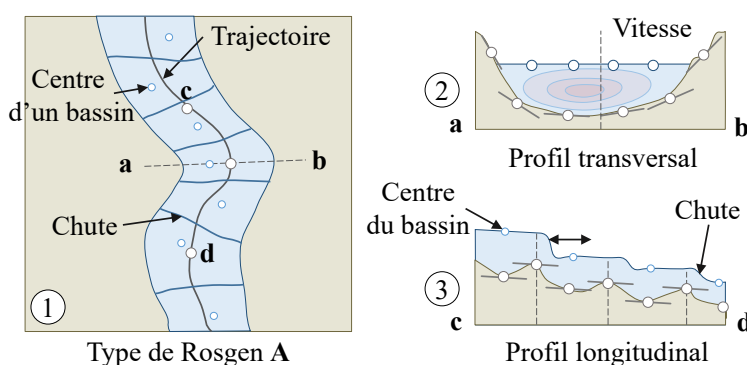


FIGURE 11 : Rosgen A caractérisé par une pente raide avec des chutes et des bassins. (1) vue en plan, (2) coupe transversale, (3) profil longitudinal.

La Figure 11 illustre la construction du modèle de Rosgen de type A qui est obtenu lorsque la pente du terrain est importante sur la section étudiée. La rivière est définie comme une succession de chutes d'eau entrecoupées de tronçons d'eau plus plate mais toujours turbulente. On place d'abord des bassins à des positions aléatoires le long de la trajectoire de la rivière en fonction de la pente : plus la pente est forte, plus on place de bassins mais de plus petites tailles. Les primitives des bassins du lit de la

rivière sont caractérisées par des creux couvrant la surface de la primitive, avec des obstacles rocheux aux intersections des bassins pour définir les chutes d'eau.

Autres types de Rosgen : Les autres types de Rosgen sont obtenus en définissant d'autres règles de calculs dépendant de la vitesse, de la pente et de la courbure. Des variations peuvent être obtenues soit en combinant différents profils transversales **C** soit en découpant des trajectoires en plusieurs trajectoires **D** ou finalement en combinant les différentes méthodes avec des paramètres adaptés au type (voir une variété des résultats dans la Figure 12).

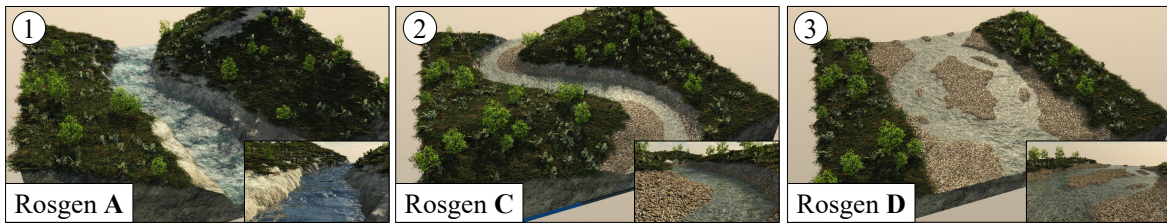


FIGURE 12 : Différents types de Rosgen : (1) Type A avec une forte pente, (2) Type C avec une forte courbure, (3) Type D avec plusieurs canaux.

Une fois instanciés, les modèles de Rosgen sont placés le long de la trajectoire de la rivière et interpolés. La géométrie finale du lit de la rivière \mathcal{R} est définie comme une fonction d'élévation qui combine les modèles de Rosgen instanciés et les caractéristiques du bassin. Un terrain amplifié $\tilde{\mathcal{T}}$ est obtenu en combinant \mathcal{R} dans le \mathcal{T} original. Pour assurer la continuité dans le mélange des sections de rivière, nous nous appuyons sur des opérateurs de découpage et de mélange adaptés de nos travaux sur la modélisation de terrains [Gén+15].

2.3.3 Placement des primitives d'eau

La géométrie de l'eau dépend principalement de la vitesse de la rivière et de la géométrie du lit de rivière. Par exemple, des obstacles vont produire une retenue de l'eau et des remous par la suite. Comme nous générons l'ensemble du lit de la rivière, nous connaissons l'ensemble des caractéristiques du terrain qui vont produire un phénomène particulier sur la géométrie de l'eau comme des cascades ou des dépressions.

Pour placer les primitives d'écoulement, un processus d'échantillonnage adaptatif est effectué sur le domaine du lit de la rivière $\Omega_{\mathcal{R}}$. Une primitive d'écoulement de rivière est placée à chaque position d'échantillon avec son rayon défini en fonction de la densité locale. Nous garantissons un chevauchement suffisant pour obtenir un mélange continu entre les primitives. Le type de Rosgen, la trajectoire de la rivière, le profil longitudinal, l'écoulement et l'élévation de la surface, et la topographie du lit de la rivière se combinent pour dicter le type de la primitive et ses autres paramètres (e, a, \mathbf{v}) .

En prenant pour exemple le type A de Rosgen pour connaître l'impact sur le choix des primitives d'eau, nous attribuons une hauteur quasi constante sur chaque bassin, puis nous ajoutons des primitives de chute d'eau là où les bassins se rejoignent. Ensuite, nous plaçons des primitives de turbulence en

aval en fonction de la chute de la cascade et de la vitesse moyenne de l'écoulement. L'amplitude et la fréquence des vagues sont adaptées avec l'augmentation de la distance de la chute d'eau.

2.4 Modèle procédural de rivières animées

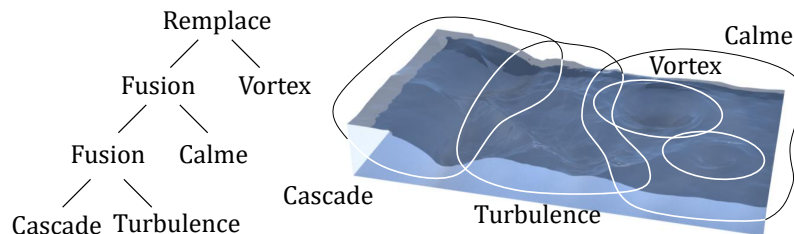


FIGURE 13 : Un exemple de primitives animées d'écoulement de rivière organisées dans un arbre hiérarchique.

Notre approche de la modélisation des rivières est centrée sur un arbre hiérarchique (illustré dans la Figure 13) qui fusionne les primitives procédurales animées de l'écoulement fluvial à l'aide d'opérateurs de mélange. Nous nous inspirons de la hiérarchie des caractéristiques de nos travaux dans l'article [Gén+15] et la généralisons pour prendre en charge le contenu animé. Les primitives de l'écoulement fluvial sont des nœuds feuilles de l'arbre et encapsulent des motifs temporels autosimilaires couramment observés dans les rivières. Chaque primitive est responsable de l'animation d'une étendue de surface d'eau, comme des vagues, des tourbillons ou des sillages le tout sur un support compact. Elles ont des entrées paramétrées pour le contrôle de l'utilisateur, une faible empreinte mémoire et sont capables de générer un contenu animé précis et varié. Les opérateurs de mélange sont des nœuds internes de l'arbre qui agissent pour combiner et agréger des nœuds feuilles et des sous-arbres qui se chevauchent.

Chaque nœud interne et externe de l'arbre définit quatre fonctions de sortie relatives à la surface de l'eau : l'élévation de l'eau $w_i(\mathbf{p}, t)$, la vitesse de surface $\mathbf{v}_i(\mathbf{p}, t)$, l'effervescence $s_i(\mathbf{p}, t)$, qui différencie les eaux claires des eaux vives, et une valeur de pondération $\alpha_i(\mathbf{p})$ utilisée pour combiner les sous-arbres. Ces fonctions dépendent d'un emplacement $\mathbf{p} \in \Omega$ et, parce que l'eau est animée, également du temps t . Notez que la valeur de pondération $\alpha_i(\mathbf{p})$ ne dépend que de la localisation spatiale et non du temps.

2.4.1 Primitives de rivières

Nous avons implémenté une gamme de primitives procédurales avec plusieurs caractéristiques (Figure 14), à savoir : des primitives d'eau calme, de turbulence, de vague, de chutes d'eau, de vortex et d'ondulation. Les primitives d'eau calme sont générées dans des régions à faible turbulence et ne produisent que des houles et des ondulations amorties. En revanche, les primitives d'eau turbulente sont créées là où l'eau est agitée et la vitesse élevée. Les primitives d'ondes représentent approximativement des crêtes et des creux locaux, souvent dictés par la topographie du lit de la rivière. Les primitives de

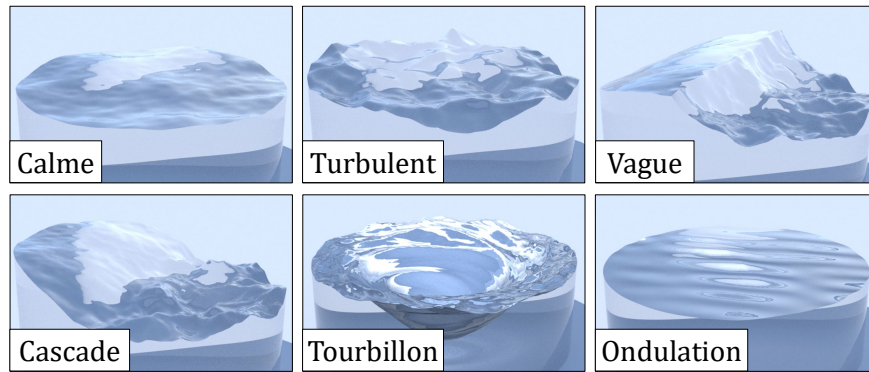


FIGURE 14 : Liste des primitives dynamiques d'eau implémentées dans notre modèle. Les primitives sont animées en fonction de l'élévation de l'eau e_i , de l'amplitude a_i et de la vitesse \mathbf{v}_i .

cascade représentent une version plus extrême de cet effet et comprennent un bassin correspondant. Les primitives de vortex produisent des tourbillons qui se produisent généralement en aval d'obstacles sous-marins, tels que des rochers. Enfin, les ondulations capturent les perturbations à haute fréquence de la surface de l'eau causées par les vents latéraux et d'autres sources. Nous avons également conçu des primitives particulières pour des effets spécifiques, comme les ondulations de l'eau en écho qui représentent approximativement le mouvement complexe de l'eau en interaction avec les berges. De par sa conception, il est facile de coder de nouvelles primitives de flux d'eau à inclure dans l'arbre.

La pondération des primitives α_i est régie par une fonction radiale C^1 continue décroissante sur un support compact en forme de disque de rayon R_i , notée $\Omega_i = \mathcal{B}(\mathbf{c}_i, R_i)$. Cela permet à la fois de limiter l'influence des primitives et de contrôler la façon dont elles sont combinées (Section 2.4.2).

La fonction de pondération $\alpha_i = g \circ d_i(\mathbf{p})$ dépend de la distance au centre du disque $d_i(\mathbf{p}) = \|\mathbf{p} - \mathbf{c}_i\|/R_i$ combinée à une fonction de décroissance g de classe C^2 :

$$g(r) = \begin{cases} (1 - r^2)^3 & \text{si } r < 1 \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Toutes les primitives sont également caractérisées par un ensemble de paramètres d'entrée, qui contrôlent les fonctions de sortie (w_i , \mathbf{v}_i , s_i) et comprennent : l'élévation moyenne e_i , l'amplitude a_i , et la vitesse d'écoulement moyenne \mathbf{v}_i . Pour des raisons de lisibilité, nous supprimons l'indice i par la suite.

2.4.2 Opérateurs

La capacité d'expression de notre modèle provient d'une combinaison cohérente de primitives. Par exemple, une section de rivière en escalier peut être construite à partir d'un mélange de primitives d'écoulement d'eau calme, de cascade, de vague et de turbulence, comme le montre la Figure 15.

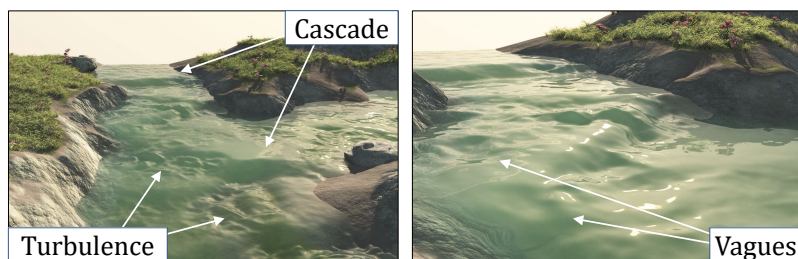


FIGURE 15 : Deux segments de rivière générés en combinant une variété de primitives.

Les opérateurs se présentent sous deux formes. L'**opérateur de fusion** combine deux primitives d'eau animées en interpolant l'élévation de l'eau, ainsi que la vitesse et l'effervescence. Par exemple, l'élévation de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$ à un point \mathbf{p} et un temps t donnés est définie comme la somme pondérée :

$$w(\mathbf{p}, t) = \frac{\alpha_A(\mathbf{p}) w_A(\mathbf{p}, t) + \alpha_B(\mathbf{p}) w_B(\mathbf{p}, t)}{\alpha_A(\mathbf{p}) + \alpha_B(\mathbf{p})},$$

$$\alpha(\mathbf{p}) = \alpha_A(\mathbf{p}) + \alpha_B(\mathbf{p}).$$

Le second opérateur est l'**opérateur de remplacement** qui est asymétrique et place des caractéristiques spécifiques du cours d'eau, comme les tourbillons ou les sillages, en écrasant une surface d'eau existante. Cela nous permet de conserver des caractéristiques spécifiques et d'éviter un mélange irréaliste entre des primitives disparates. L'opérateur remplace un sous-arbre \mathcal{N}_A par un autre \mathcal{N}_B , tout en assurant la continuité :

$$w(\mathbf{p}, t) = (1 - \alpha_A(\mathbf{p})) w_A(\mathbf{p}, t) + \alpha_B(\mathbf{p}) w_B(\mathbf{p}, t),$$

$$\alpha(\mathbf{p}) = \alpha_B(\mathbf{p}).$$

Afin d'évaluer les caractéristiques de la surface en un point donné \mathbf{p} , nous interrogeons l'arbre de construction et le parcourons récursivement pour trouver les primitives locales qui contribuent à l'élévation de l'eau $w(\mathbf{p}, t)$, à la vitesse $\mathbf{v}(\mathbf{p}, t)$ et à l'effervescence $s(\mathbf{p}, t)$.

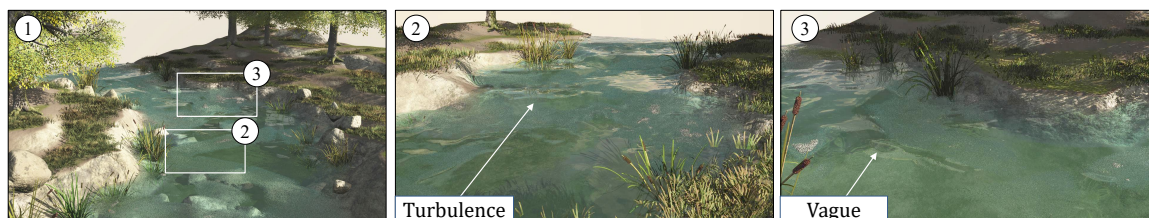


FIGURE 16 : Exemple d'une rivière générée de manière procédurale par notre système. L'utilisateur a spécifié le type Rosgen, la trajectoire et le flux en amont et en aval. Le lit de la rivière et les différentes primitives d'eaux (tourbillons, eaux turbulentes et calmes) ont été générés automatiquement en fonction de leur position par rapport aux berges et aux roches situées dans le lit de la rivière.

2.5 Résultats

La Figure 1 montrent différentes vues d'un vaste réseau fluvial, couvrant un terrain de 3×3 km. La scène a les caractéristiques suivantes : une carte d'élévation numérique en entrée avec une résolution par pixel de 100 m, une rivière qui s'étend sur environ 4 km, plus de 40000 primitives formant la surface de la rivière, et une résolution finale du terrain et de la surface de l'eau de 10 cm.

Scène	Caractéristiques			Génération			Rendu interactif	
	Taille	Longueur	Type	$\#\mathcal{P}_t$	$\#\mathcal{P}_w$	t_{gen}	#Triangles	fps
Arid (1)	3×3	4.3	B, A	63k	42k	130	3.1–9.1	160–500
Nevada (18)	6×6	13.8	B, D, DA	412k	276k	175	8.3–15.1	48–195
Network	24×24	193.1	A, B, C, D	930k	1505k	227	5.5–13.0	45–234

TABLE 2.1 : Statistiques des rivières générées à un niveau de détail élevé : taille du terrain [km^2], longueur de la rivière [km], type de rivière Rosgen, nombre de primitives procédurales (terrain $\#\mathcal{P}_t$ et eau $\#\mathcal{P}_w$), temps de génération procédurale pour le modèle de rivière t_{gen} [s], nombre de requêtes de fonction (triangulation à la volée) et fréquence d'images (fps) pour le rendu du substrat rocheux et de la surface de l'eau sur le GPU.

Pour les scènes montrées dans les Figures 9 et 16, nous avons tenté de créer une atmosphère paisible avec seulement quelques tourbillons et de petites cascades. Notez que la rivière plus raide (Figure 9) avec le type Rosgen **A +** a plus de primitives que son homologue plus plat de type **B** car notre modèle procédural a réduit le rayon de l'eau primitives pour mieux capturer les dynamiques les plus vigoureuses.



FIGURE 17 : L'impact de la vitesse et de l'effervescence sur un paysage fluvial. Une feuille flottante est portée de manière cohérente en fonction du champ de vitesse. Il y a aussi de la mousse à la surface de la rivière près des obstacles.

Un autre exemple dans la Figure 17 montre comment les valeurs de vitesse et d'effervescence peuvent être exploitées pour améliorer un paysage fluvial avec des débris, tels que des feuilles, qui flottent en aval, et de la mousse et des bulles s'accumulant autour des obstacles et après les cascades.

2.5.1 Performance

Le tableau 2.1 rapporte les temps et les statistiques de notre méthode pour quelques exemples. Notre implémentation prend en charge à la fois le GPU en temps réel et le rendu photoréaliste de haute qualité. Le modèle final a une empreinte mémoire compacte : nous sommes capables de représenter

des rivières sinueuses de plusieurs kilomètres de long avec des effets d'eau complexes en moins de quelques mégaoctets. La consommation de mémoire est aussi faible que 22 kilo-octets pour les rivières courtes (de 50 m) jusqu'à 2,7 mégaoctets pour les rivières plus longues (≈ 4 km). Même sans optimisation de la mémoire, les primitives individuelles vont de 50 octets à au plus 90 octets.

Nous avons développé une implémentation GPU qui utilise une structure d'accélération de grille régulière et un shader de tessellation. Une primitive de flux unique est centrée dans chaque cellule de la grille, avec un rayon cohérent qui chevauche ses voisins immédiats. Au plus quatre primitives de flux empiètent sur un point donné et elles sont combinées avec l'opérateur de fusion. Ensuite, un patch de terrain est défini pour couvrir une région carrée de cellules de grille (généralement, 10×10 cellules par patch). Au moment de l'exécution, notre shader de tessellation effectue une sélection des patches visibles (frustum patch culling), une tessellation adaptative des patches en fonction de la distance de vue et le calcul de la hauteur finale des sommets. Cette implémentation permet d'obtenir un rendu interactif supérieur à 70 fps à une résolution de 1920×1080 pour des scènes avec des dizaines de milliers de primitives.



FIGURE 18 : Rendu en temps réel d'un réseau fluvial avec 698 milliers de primitives de terrain et d'eau. Nous avons atteint 20 – 80 fps avec le calcul de rayons réfléchis et réfractés et des instances d'herbe et de roches et 48 – 195 fps sans ces fonctionnalités.

2.5.2 Contrôle

Notre méthode permet de calculer automatiquement les trajectoires des rivières, suivie d'un placement procédural des primitives et de l'arbre de construction. Néanmoins, l'utilisateur peut vouloir contrôler la création d'une scène plus directement. Cela peut être entrepris à différentes étapes du processus, en : a) modifiant le type et les paramètres des primitives individuelles, b) éditant l'arborescence du construction en ajoutant, supprimant ou remplaçant des nœuds ou des sous-arbres, c) modifiant les entrées.

Les Figures 16 et 19 ont été affinés pour améliorer leur impact visuel et servir ainsi d'exemples d'édition dans la pratique. La Figure 16 a été conçue comme un test de l'efficacité du contrôle réalisé par notre approche primitive. Pour obtenir l'effet dramatique souhaité, il faut basculer entre les primitives turbulentes et vortex et ajuster certains paramètres, ce qui a pris ≈ 10 minutes d'édition au total. La Figure 19 démontre le rôle important de l'opérateur de remplacement dans l'amélioration d'une scène, avec un utilisateur localisant les tourbillons principaux dans le sillage des arbres et des obstacles rocheux.

Notre méthode génère automatiquement le substrat rocheux et les primitives de l'eau en fonction du type de rivière. Bien que l'utilisateur puisse modifier les paramètres ou régler les détails à des endroits spécifiques, il serait nécessaire de mettre en œuvre un éditeur pour modifier intuitivement la structure de la rivière à des échelles plus larges, par exemple pour changer le cours de la rivière entière.

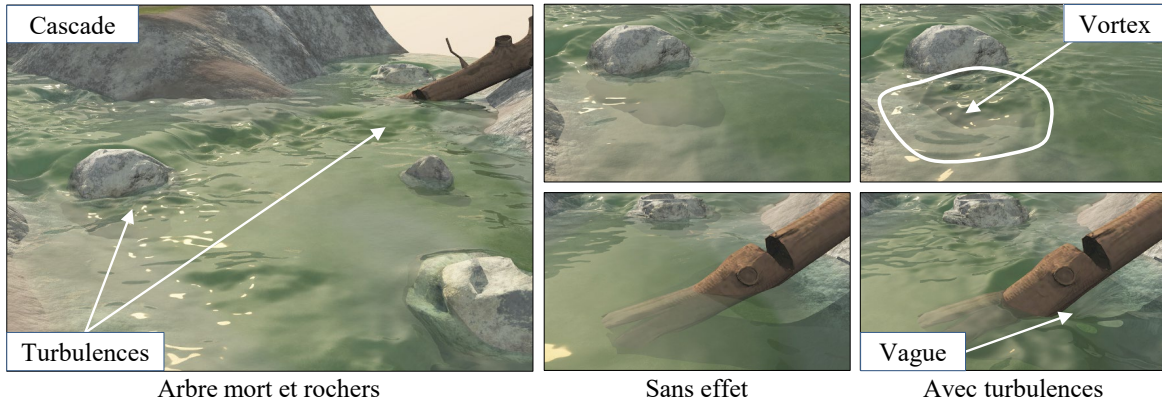


FIGURE 19 : Des tourbillons en aval de roches et un arbre mort créés par l'insertion de turbulences et de vortex. Ces effets ont été créés à l'aide d'un opérateur de remplacement pour remplacer l'animation par défaut de la rivière.

2.5.3 Comparaison avec d'autres techniques

À la lumière des détails techniques fournis jusqu'à présent, il convient de revoir les techniques les plus étroitement liées et de fournir une comparaison plus approfondie. Une telle comparaison doit, forcément, se concentrer sur l'animation de l'eau, car aucun système existant ne prend en charge la combinaison de la modélisation du lit et de l'animation de la rivière.

Alors que la simulation rapide de l'eau [JW17 ; Jes+18] pourrait remplacer le composant d'animation de rivière de notre modèle, cela négligerait le couplage entre la génération du lit de la rivière et l'animation de la surface de l'eau et les avantages de création que cela apporte.

Yu *et al.* [Yu+09] définissent leur dynamique de l'eau procédurale comme une fonction lisse basée sur la distance à la rive du fleuve la plus proche. L'avantage de nos primitives est qu'elles ne sont pas limitées dans leur placement ou leur paramétrage, ce qui permet un plus grand réalisme et un meilleur contrôle. En particulier, la variété des phénomènes réalisables dans notre méthode se compare favorablement à la simulation vectorielle basée sur les caractéristiques des vagues d'eau décrite dans Yue *et al.* [YNS11].

Nous avons également mis en place une **comparaison expérimentale** entre notre méthode et une simulation de particules physiques. L'expérience s'est déroulée comme suit : à partir d'un premier terrain nu, un artiste professionnel a été chargé de créer une scène virtuelle qui se rapprochait d'un exemple fourni de $30 \times 30 \text{ m}^2$. Cela impliquait la sculpture de terrain et la simulation de fluide à l'aide de la méthode de résolution FLIP (FLuid-Implicit Particle). Les simulations ont été calculées sur un serveur avec 64 Go de RAM et 2 processeurs Xeon E5-2630 V2 fonctionnant à 2,6 GHz.

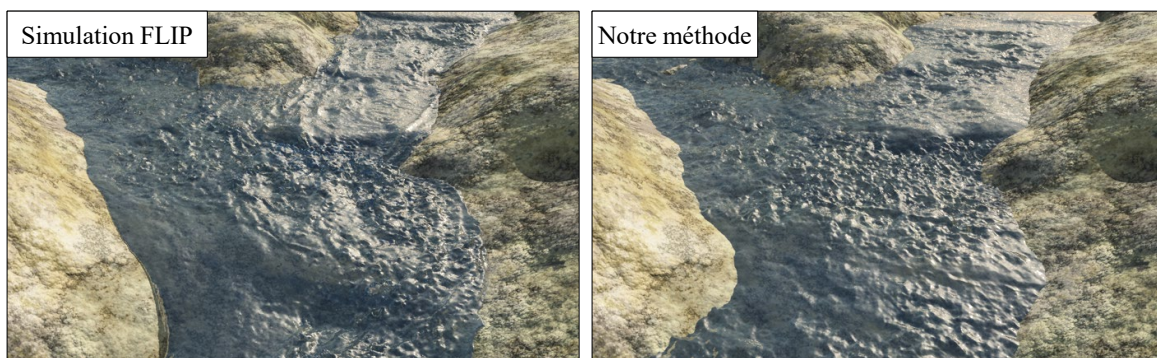


FIGURE 20 : Une comparaison directe entre la simulation de fluide et notre approche. [A Gauche] Une simulation FLIP qui nécessite 9h de calcul (hors itérations de modélisation). [A droite] notre méthode calculée en temps réel.

Au cours de chaque cycle de conception, l'expert a passé environ 2 heures à sculpter le lit de la rivière, à ajuster les paramètres de simulation et à exécuter des tests de modélisation de terrain individuels, puis 9 heures passées à exécuter la simulation. Ce dernier comprenait l'initialisation des particules, la simulation de la stabilisation des particules pour obtenir un état pseudo-périodique pour la rivière, puis la génération de 20 secondes d'animation fluide. La précision de la simulation a été fixée à 3 cm, ce qui donne un total de 4.5 millions de particules et de 200 millions de voxels. Nous avons essayé de réduire la précision pour réduire les temps d'itération, mais cela a introduit des artefacts importants et les surfaces d'eau approximatives et précises étaient si peu corrélées que la création était impossible. La finalisation de la scène a nécessité 15 itérations, chacune avec 2 heures de montage de scène et 9 heures de simulation, pour un total de 165 heures. Notre méthode représente une amélioration considérable en termes de temps de production et d'empreinte mémoire.

En comparaison, notre méthode permet de modifier interactivement les paramètres des primitives (fréquence, amplitude, hauteur et vitesse). Le processus de création de notre système, y compris toutes les itérations, s'est terminé en une heure. La Figure 20 montre le résultat de la simulation FLIP par rapport à notre modèle.

2.6 Conclusion et perspectives

Ces travaux ont permis d'introduire une nouvelle approche pour générer et animer de manière interactive des réseaux fluviaux à grande échelle pouvant s'étendre sur plusieurs kilomètres tout en présentant simultanément des détails à des résolutions fines. Utiliser une méthode procédurale a permis de modélisation de grandes étendues de rivières avec un temps de création maîtrisé, et l'utilisation de primitives locales permet d'obtenir des temps d'animation interactifs. De tels cours d'eau sont un élément pittoresque courant dans de nombreuses applications. Bien que le cadre puisse être utilisé dans des films pour des scènes à grande échelle avec un budget de rendu serré, la principale cible est les applications en temps réel, telles que les jeux vidéo (y compris les mondes générés automatiquement),

les environnements virtuels et les visualisations dans un Système d'Information Géographique (comme Google Maps).

Cette étude a établi un cadre conceptuel pour la modélisation et l'animation de cours d'eau à grande échelle. Le modèle permet de définir efficacement une structuration à différentes échelles et une modélisation locale adaptée à des traitements spécifiques et par l'occasion efficaces. Plusieurs axes d'amélioration peuvent être explorés au sein de ce cadre afin d'accroître le réalisme de la modélisation et de l'animation de l'eau, tout en équilibrant les objectifs de contrôle, de performance et d'expérience utilisateur. De nouvelles recherches doivent être menées à différentes échelles :

- Les cours d'eau peuvent emprunter des trajectoires beaucoup plus complexes que la simple descente de la pente la plus raide. Bien qu'une analyse préliminaire grossière soit possible, il est essentiel d'examiner le comportement des rivières avec une plus grande précision, en se concentrant sur les différents segments de ces cours d'eau. Par exemple, une étude [Par+23] a été réalisée pour modéliser le comportement des rivières sur des terrains avec peu de pente, montrant comment elles peuvent former des méandres et créer des bras morts, avec des effets d'érosion marqués qui modifient rapidement la géométrie du lit de la rivière en raison de la nature sédimentaire du sol. Ainsi, il est crucial d'analyser divers phénomènes en tenant compte de la composition du sol, qu'il soit rocheux ou sédimentaire, car cela influence considérablement la trajectoire des cours d'eau. De plus, il est important d'examiner d'autres caractéristiques, telles que la gestion des multiples trajectoires d'une rivière, y compris les deltas et les dénivelés importants, ainsi que l'introduction de cascades et leurs comportements distincts. Pour améliorer ces analyses de manière efficace, des simulations physiques localisées, en segmentant le réseau de rivières, permettraient d'obtenir des résultats beaucoup plus réalistes en un temps raisonnable.
- L'un des défis actuels de la simulation des rivières réside dans le fait que l'on se concentre uniquement sur le comportement de l'eau, bien que ce soit déjà un problème complexe en soi. Cependant, dans le cas des rivières peu profondes, l'interaction entre l'eau et le terrain est cruciale, car l'eau a un impact significatif sur la géométrie de la rivière. Plusieurs études sur l'érosion ont été réalisées à une échelle beaucoup plus vaste, mais elles ne sont pas adaptées à l'érosion à l'intérieur des rivières, où les forces en jeu peuvent être d'une toute autre échelle. De nombreux phénomènes doivent être pris en compte, comme l'eau qui érode la roche ou le sol, transporte des matériaux granuleux tels que le sable ou même des rochers, en fonction de la force exercée. De plus, les rivières présentent de nombreuses turbulences et vortex qui créent des effets localisés importants, tels que des phénomènes d'affouillement. Il est donc nécessaire d'approfondir la modélisation des lits de rivières en améliorant les modèles existants par l'intégration de matériaux variés et de végétation, afin de mieux représenter les impacts visuels et physiques des interactions entre l'eau et le terrain.

SIMULATION D'ÉCOSYSTÈMES



Table des matières

3.1	Principe général	25
3.2	Réalisation des modèles	27
3.3	Simulation améliorée de l'écosystème	29
3.4	Correspondance des modèles	38
3.5	Résultats	40
3.6	Conclusion et perspectives	45

La modélisation de la végétation en informatique graphique est une thématique récurrente depuis plusieurs décennies. Les premières tentatives de modélisation de plantes individuelles se sont concentrées sur les questions de génération procédurale, mais l'attention s'est rapidement portée sur la sensibilité au contexte comme moyen de produire des formes plus réalistes par l'adaptation à l'environnement [MP96 ; Pru+01 ; BAS09 ; Had+17]. Les méthodes par simulation ont permis une exploration plus approfondie de la variété des formes en prenant en compte par exemple l'impact de l'environnement ou d'évènements naturels [Pir+17 ; Pir+14 ; Pir+12]. Pour générer des écosystèmes à grande échelle l'approche la plus courante consiste à dériver une distribution statistique sous-jacente, par analyse, puis à synthétiser les positions des plantes en conséquence [Deu+98 ; LP02a ; AD06a ; And+14 ; Li+18]. Bien que ces méthodes soient efficaces et donc applicables à des scènes de grande taille, elles ne simulent pas toujours l'intégralité du cycle de vie des plantes et ont donc du mal à capturer la variabilité et la complexité inhérentes aux écosystèmes réels.

Mon objectif de recherche est d'améliorer le réalisme de ces scènes en augmentant la diversité et la complexité des modèles, tant au niveau de la création des écosystèmes que de leur apparence finale. L'apport principal de cette recherche a été d'enrichir la simulation en intégrant le processus de la mort de la végétation, sa décomposition au fil des années, ainsi que l'impact de cette décomposition sur l'environnement, un aspect qui n'avait pas encore été exploré jusqu'à présent. Dans les forêts non régulées, la végétation morte et en décomposition représente généralement 30% de la surface terrière, ce qui la rend visuellement marquante et a donc une influence significative sur l'apparence finale. Cette étude se concentre à la fois sur la simulation des écosystèmes et sur la modélisation des éléments

3

susceptibles d'être affectés par des perturbations telles que les incendies de forêt, les tempêtes de vent, les infestations d'insectes et les maladies, ainsi que par les processus de mort naturelle et de décomposition.

Au sein de l'équipe, j'ai initié et porté cette thématique de recherche sur la végétation en renforçant les collaborations avec l'Université de Cape Town en Afrique du Sud et l'Université Polytechnique de Catalogne. Ces travaux ont été publiés dans le journal ACM Transactions On Graphics [Pey+24] et présentés à la conférence SIGGRAPH en 2024.

3.1 Principe général

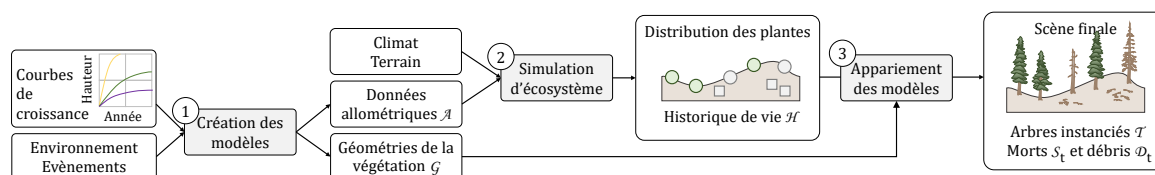


FIGURE 21 : Aperçu de la création d'un écosystème : des simulations de croissance d'arbres individuels (1) sont effectuées sur la base des courbes de croissance des espèces et d'une série d'événements perturbateurs. Les données obtenues sous forme d'allométries, ainsi qu'un scénario environnemental qui prescrit les conditions climatiques, l'environnement et les événements de perturbation dans le temps, sont utilisés pour une simulation d'écosystème (2). Le résultat est transmis à un processus d'instanciation correspondant (3), qui tient compte du cycle de vie des plantes \mathcal{H} et de la géométrie \mathcal{G} des simulations de croissance pour réaliser une scène finale.

Notre cadre pour la création de scènes naturelles avec des histoires de vie par spécimen et la variation émergente qui en découle comporte trois étapes principales (Figure 21) :

1. *Réalisation de modèles individuels* - Tout d'abord, nous générons une grande variété d'arbres individuels par une simulation de croissance structurale (Section 3.2). Ces simulations sont conçues pour échantillonner la variation des espèces, différentes conditions environnementales de croissance et les événements perturbateurs dont le vent, les maladies et les incendies. Cette approche nous permet de : a) construire un atlas de géométries pour une utilisation lors de l'instanciation, et b) dériver des statistiques sur les relations de forme au sein des spécimens de plantes individuels (allométries).
2. *Simulation améliorée de l'écosystème* - Ensuite, une simulation d'écosystème à grande échelle (Section 3.3) est réalisée. Outre les processus normaux d'ensemencement, de croissance et de mort, cette simulation est améliorée pour tenir compte des perturbations et des processus de décomposition au niveau des chicots et des troncs d'arbres. Le résultat obtenu est une histoire de vie complète pour chaque spécimen dans l'écosystème résultant.
3. *Correspondance d'instanciation* - Enfin, une étape de mise en correspondance (Section 3.4) est utilisée pour lier les histoires de vie des plantes avec les entrées de l'atlas de référence. On obtient ainsi un ensemble d'instances de modèle pour peupler la scène résultante. Si nécessaire, par exemple lorsqu'un sous-ensemble de la scène a une importance particulière, des modèles uniques supplémentaires peuvent être générés à la demande.

Cette structure de composants vise à assurer une forme de correspondance entre la simulation et la création des modèles, afin que toute la gamme des histoires de vie puisse être représentée tout en limitant la simulation aux limites de la géométrie réalisable. Malheureusement, s'il peut sembler à première vue que le passage de la simulation à l'instanciation du modèle peut être réalisé par un simple processus de transmission, il est en réalité chargé de complications potentielles. La principale d'entre elles est le risque d'inadéquation entre la simulation et l'instanciation, lorsque la simulation fournit des modèles qui ne sont pas réalisables dans le cadre de la création du modèle, parce qu'ils sont trop larges ou trop hauts, ou trop ramifiés ou trop peu ramifiés, ou une combinaison de ces facteurs et d'autres encore.

Cette situation est encore compliquée par la nature de notre simulation, qui utilise un modèle relativement abstrait basé sur les individus, représentant les arbres comme des disques pour les besoins de la compétition abiotique. Cela signifie que, si des caractéristiques telles que la hauteur et l'étendue de la canopée sont immédiatement disponibles, d'autres attributs, tels que le diamètre du tronc à hauteur de poitrine et le nombre de branches primaires, nécessaires pour représenter avec précision les processus de mort et de décomposition et les événements perturbateurs, ne font pas partie de la simulation.

Heureusement, la littérature en biologie et en botanique fournit une solution unique à ces deux problèmes sous la forme d'allométries [SIK07 ; Sit+08 ; Hen+13]. Ces allométries spécifient les relations d'échelle caractéristiques entre les attributs des organismes vivants. Par exemple, pour la plupart des espèces d'arbres, en l'absence de perturbations, il existe une relation à peu près linéaire entre l'augmentation de la hauteur des arbres et l'étendue de la canopée [Pre+15]. Dans notre cas, lors de la simulation, étant donné la hauteur d'un arbre d'une espèce particulière, nous devons dériver le rayon de la canopée, le diamètre à hauteur de poitrine et le nombre de branches primaires (et leur diamètre moyen).

Pour résoudre ce problème, nous créons un ensemble d'allométries par espèce (s), en fonction de l'âge de l'arbre (t) et limitée par les extrêmes de la densité des arbres environnants (densité maximale ou isolement). Ainsi :

$$\mathcal{A}_d(s, t), \mathcal{A}_i(s, t) = \{h, r, \phi, p, \psi\}, \quad (3.1)$$

où les fonctions d'allométrie dense (\mathcal{A}_d) et isolée (\mathcal{A}_i) pour une espèce et un âge donnés renvoient un tuple de hauteur (h), de rayon de la canopée (r), de diamètre à hauteur de poitrine (ϕ), de nombre de branches primaires (p) et de diamètre moyen des branches primaires (ψ). Pour dériver ces fonctions, nous effectuons une simulation de croissance géométrique, comme décrit dans la Section 3.2 pour chaque espèce et chaque cas (dense ou isolé). En mesurant certains aspects de la géométrie des arbres individuels, nous sommes en mesure de déduire tous les attributs requis (h, r, ϕ, p, ψ), qui peuvent être regroupés en un ensemble de courbes d'allométrie.

L'une des difficultés réside dans le fait que même si les allométries sont cohérentes à un âge donné, puisque les modèles d'arbres correspondent visuellement à l'apparence du monde réel, le taux de croissance ne l'est pas, les arbres étant plus grands ou plus courts que ce qui est attendu pour leur âge. Pour résoudre ce problème, nous rééchantillonons les allométries pour les ajuster à une courbe de croissance en hauteur logistique idéalisée et utilisée largement dans la littérature en botanique [TW02] :

$$h(t) = \left(\frac{2}{1 + e^{(t/\hat{\ell}_s)q}} - 1 \right) \hat{h}_s, \quad (3.2)$$

où $\hat{\ell}_s$ est l'âge maximal réalisable de l'arbre, \hat{h}_s est la hauteur maximale de l'arbre (qui varie en fonction de la densité des arbres environnants), et q est un paramètre d'ajustement qui permet une meilleure adaptation aux valeurs de hauteur mesurées dans le monde réel.

Notez que ces quantités sont toutes spécifiques aux espèces (Tableau 3.3). Les allométries qui en résultent sont essentielles à la fois pour notre simulation améliorée, établissant des limites de croissance et permettant la dérivation d'attributs secondaires, et pour la réalisation du modèle, garantissant une correspondance aux modèles géométriques.

3.2 Réalisation des modèles

Nous avons besoin d'une méthode de génération de plantes individuelles qui fournisse à la fois des statistiques d'allométrie pour la simulation complète de l'écosystème et une géométrie pour l'instanciation du modèle. Cette méthode doit tenir compte du cycle de vie d'une plante, qui englobe les processus de décomposition, les événements perturbateurs et les facteurs biotiques et abiotiques qui influencent la croissance. Pour ce faire, nous appuyons sur le modèle d'arbre de Palubicki *et al.* [Pal+09]. Le système original s'inspire de la biologie, avec des bourgeons et des branches en compétition pour la lumière et l'espace. La structure globale de l'arbre est donc une propriété émergente. Nous améliorons ce modèle de plusieurs façons. Tout d'abord, nous adaptons le taux de croissance dans des conditions idéales de sorte que les incréments annuels de hauteur suivent une courbe de croissance logistique par espèce [TW02]. Cela permet d'aligner la croissance entre la simulation et la création des modèles (Figure 22). Deuxièmement, nous améliorons l'évaluation de l'auto-ombrage en lançant des rayons de visibilité sur une demi-sphère sous-échantillonnée de manière aléatoire. La proportion d'intersection directe avec les feuilles existantes fournit une mesure de l'auto-ombrage qui affecte la probabilité de générer de nouvelles branches aux nœuds et tient compte de la dynamique des interstices. Nous ajoutons finalement des indicateurs d'état aux branches pour prendre en charge la mort, la décomposition et la destruction en fonction de la vigueur et des différentes perturbations.

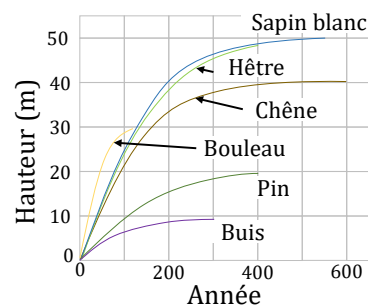


FIGURE 22 : Courbes logistiques de hauteurs de croissance pour différentes espèces d'arbres.

3.2.1 La mort et le dépérissement des branches

Notre modèle doit représenter visuellement un processus graduel de mort et de décomposition. Pour cela, nous utilisons une décomposition en classes défini par les botanistes permettant de mettre l'accent sur les distinctions visuelles et permettant de définir une transition entre les bois morts et les troncs (Figure 25 et Tableau 3.1). Nous avons associé la classification d'Aakala *et al.* [Aak+08] à la classification des bûches de l'Inventaire forestier national des États-Unis [WM08].

Il est courant de mesurer la décomposition quantitativement par la densité ou la perte de masse, où 1 représente le moment de la mort et 0 représente la décomposition totale. Pour nos besoins, la densité moyenne d_i d'un spécimen d'arbre mort ou de bille est plus simple et plus utile que la

Classe	Détail de l'arbre	Détail des branches	Densité
(1) Intact	Commence complètement intact avec des feuilles ; perd progressivement ses feuilles, ses rameaux et ses branches secondaires	Ecorce intacte, encore verte	0.9 – 1.0
(2) Nu	Pas de feuilles ni de rameaux et peu de branches secondaires ; perd progressivement ses branches primaires	Ecorce intacte, avec quelques branches latérales	0.7 – 0.9
(3) Débranché	Il reste des souches et des branches primaires cassées, l'arbre a encore toute sa hauteur	Écorce inégale, pas de rameaux	0.5 – 0.7
(4) Cassé Ovale	Le tronc principal est réduit en hauteur	Dernières traces d'écorce, section transversale ovale	0.3 – 0.5
(5) Souche Ef- fondrée	Il reste moins de 2m de tronc	Pas d'écorce, texture poudreuse	0.0 – 0.3

TABLE 3.1 : Détails des classes de décomposition, y compris l'apparence des bois morts et des troncs et la plage de densité du bois occupée.

masse totale, car elle peut être suivie pour les arbres sur pied même lorsque les branches tombent, ce qui représenterait autrement une perte de masse soudaine et discontinue. Les transitions entre les classes de décomposition se produisent à des valeurs spécifiques de densité d_i comme indiqué dans le tableau 3.1.

Outre la mort de l'arbre dans son ensemble et le passage de l'arbre vivant au bois mort qui en résulte, nous modélisons également la mort au niveau des branches individuelles. Celle-ci peut être déclenchée par un manque de ressources, suivi à l'aide d'un score de vigueur v_i , ou par une perturbation, par le vent, le feu et la maladie. Ces branches cessent de croître, sont sujettes à la décomposition et tombent pour former des troncs, soit au fil du temps, soit immédiatement, en fonction de la cause première de la mort. Dans ce cas, nous paramétrons le taux de décomposition Δd_i en fonction du diamètre de la branche ψ afin de prendre en charge la dégradation différentielle dans différentes sous-parties de l'arbre.

3.2.2 Perturbations de l'environnement

Il est possible d'effectuer une simulation approfondie de l'impact des perturbations, telles que les tempêtes de vent et les incendies de forêt, sur des arbres individuels. De telles simulations impliquent une combinaison complexe de facteurs extrinsèques (tels que la force du vent et l'intensité du feu et leurs directions influencées par le terrain) et de facteurs intrinsèques (tels que la profondeur d'enracinement, la santé de l'arbre et les résistances spécifiques à l'espèce). Pour des raisons de simplicité et d'efficacité de calcul, nous adoptons plutôt une approche phénoménologique. Une perturbation donnée est graduée de 0 (aucun effet) à 1 (destruction complète), avec des dommages graduels aléatoires et croissants entre les deux (Figure 30). Par exemple, lorsque la force du vent

augmente, des branches plus nombreuses et plus grosses sont soit partiellement cassées et laissées en suspension, soit complètement détachées et dispersées sur le sol en fonction de la direction et de la pente du vent. Dans les cas les plus extrêmes, le tronc entier est fendu ou déraciné. Le feu, quant à lui, entraîne une destruction et un noircissement itératifs par ordre croissant du diamètre des branches.

3.3 Simulation améliorée de l'écosystème

Le choix du niveau d'abstraction est l'un des principaux facteurs de différenciation entre les modèles de simulation des écosystèmes. Il peut s'agir de modèles de végétation globale, où les espèces sont regroupées en types fonctionnels de plantes, ou de modèles plus fins, basés sur des individus, qui capturent les processus internes, tels que la photosynthèse et la transpiration.

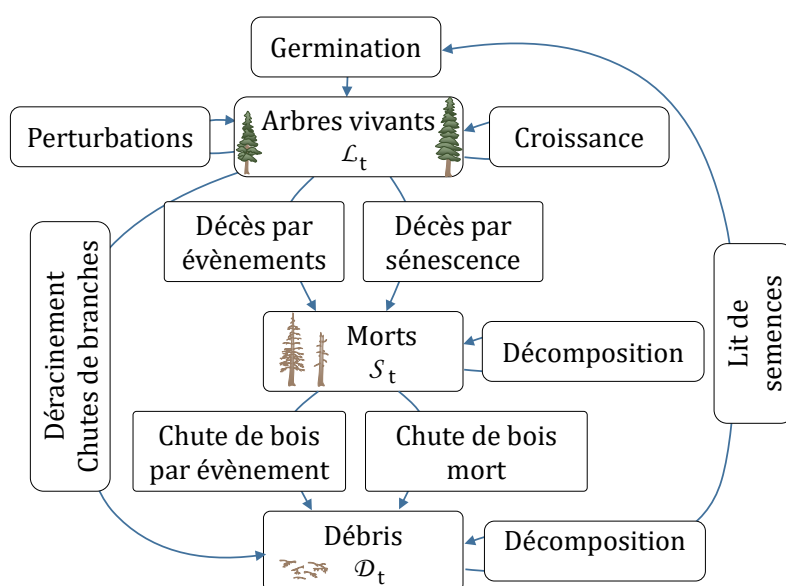


FIGURE 23 : Vue d'ensemble de la simulation améliorée des arbres. Les arbres poussent et grandissent tout en étant influencés par les perturbations. Ils peuvent mourir de vieillesse, de stress ou de perturbations et se transformer en arbres morts. Parallèlement, les branches qui tombent des arbres vivants ou morts créent des débris. Les arbres morts et les troncs sont sujets à la décomposition, et les troncs en décomposition constituent un terrain fertile pour la germination des graines.

Nous avons choisi d'adapter un modèle individuel relativement abstrait [Cor+17a ; Gai+17 ; Kap+20] qui représente la canopée et les systèmes racinaires des arbres à l'aide de disques à des fins de concurrence pour la lumière et l'humidité. Cela permet une instanciation géométrique ultérieure des arbres individuels. Cette séparation entre la simulation et la réalisation du modèle est principalement motivée par des considérations de mémoire et d'efficacité de calcul. Nous améliorons ce cadre pour tenir compte explicitement de la décomposition au niveau des arbres morts sur pied et des débris (branches), ainsi que des perturbations, telles que les maladies, les incendies et les tempêtes. Pendant la simulation, nous stockons un historique d'attributs physiques, noté \mathcal{H} , comprenant la hauteur, le rayon de la canopée, la vigueur, l'impact des perturbations et la décomposition, sous la forme d'un tuple par étape temporelle pour chaque plante.

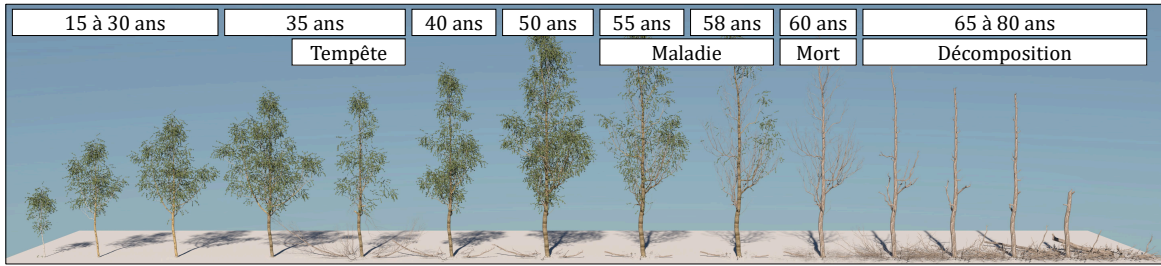


FIGURE 24 : Une séquence typique de modèles d'arbres générés par notre processus de réalisation de modèles au cours d'un cycle de vie qui comprend des perturbations, la mort et la décomposition.

3.3.1 Processus de base

Notre simulation d'écosystème étend le modèle individuel de Kapp [Kap+20] au-delà du domaine du sous-bois et inclut les processus de perturbation et de décomposition. Je fournis ici une brève introduction au modèle original, suffisante pour mettre en évidence les notations importantes et indiquer où les changements sont nécessaires.

Le paysage est discrétisé en une grille grossière (à une résolution de 1 à 3 m) afin de capturer les facteurs abiotiques, tels que l'altitude (à partir de laquelle la pente m et la température τ sont dérivées), l'exposition au soleil e , et l'humidité du sol w , conformément à Cordonnier *et al.* [Cor+17a] et Gain *et al.* [Gai+17]. Cette grille est superposée à une grille de sous-cellules fines afin de gérer la concurrence directe entre les plantes pour l'accès à la lumière du soleil et à l'eau. La vigueur de chaque plante est évaluée sur une base mensuelle et contribue à une réserve de carbone qui est utilisée, en cas d'abondance, pour stimuler la croissance ou, en cas d'appauvrissement, pour modéliser le stress et éventuellement la mort. Les processus de mort, de décomposition et de germination sont pris en compte une fois par an.

Nous allons maintenant aborder plus en détail les processus fondamentaux de la croissance, de la germination et de la mort, comme le montre la Figure 23. Dans la présentation qui suit, l'indice i désigne les plantes individuelles, tandis que l'indice s est réservé aux espèces spécifiques.

Croissance : Les racines et les canopées des arbres sont représentées par des disques triés en fonction de leur hauteur relative. L'accès à la lumière du soleil et à l'humidité est ensuite calculé en moyenne sur les sous-cellules traversées par ces disques. Pour la lumière du soleil, la valeur reçue est atténuée en fonction de la transparence des feuilles spécifique à l'espèce, dans l'ordre du plus haut au plus court à l'intérieur d'une sous-cellule. Pour l'humidité, un minimum déterminé est alloué en commençant par le système racinaire le plus profond, et tout excédent est partagé de manière égale, une seule part étant réservée à l'ensemencement. D'autres facteurs abiotiques, tels que la pente et la température, sont accessibles directement et ne sont pas atténués. La vigueur d'une plante $v_i(\mathbf{p})$ en position cellulaire \mathbf{p} est calculée comme un minimum sur les facteurs abiotiques contributifs, selon Kapp *et al.* [Kap+20] :

$$v_i(\mathbf{p}) = \min(f_\tau \circ \theta(\mathbf{p}), f_w \circ \bar{w}(\mathbf{p}), f_e \circ \bar{e}(\mathbf{p}), f_m \circ \mathcal{S}(\mathbf{p})), \quad (3.3)$$

où \bar{w} et \bar{e} sont l'exposition à l'humidité et à la lumière du soleil soumise à une concurrence locale, et f_r, f_m, f_e et $f_w \in [-a, 1]$ sont des fonctions d'adaptation lisses en plateau prenant la forme $f = g \circ d$, avec :

$$g(d) = (1 + a) e^{(d/r_s)^{4.5} \ln(0.2)} - a, \quad d(x) = |x - c_s|. \quad (3.4)$$

Ici, a indique la valeur maximale du stress (nous utilisons généralement $a = 0, 2$) obtenue à une distance abiotique r_s de l'idéal c_s et au-delà. Les paramètres c_s et r_s sont ajustés pour chaque espèce (Tableau 3.3).

Par la suite, cette valeur de vigueur est ajoutée à la réserve de carbone actuelle \mathcal{R}_i pour l'arbre. La réserve de carbone a une capacité unitaire, ce qui signifie qu'une plante ayant des réserves optimales peut survivre à $1/a = 5$ mois de dommages maximums avant de devenir stressée. Si le réservoir de carbone déborde pendant la saison de croissance, l'excédent $o_i = \mathcal{R}_i - 3a$ contribue à la croissance. Inversement, si la réserve de carbone devient négative, cela contribue à la mortalité potentielle.

Au cours des mois de croissance, l'âge idéal du spécimen est avancé en proportion o_i . Cet âge est idéalisé en ce sens qu'il ne suit pas l'âge calendaire mais plutôt la croissance cumulative par rapport à l'âge idéal. Cela permet à des circonstances variables d'entraîner des poussées ou des retards de croissance. Enfin, à partir de l'âge idéalisé actuel et de son augmentation, ainsi que de la densité relative des arbres environnants, nous obtenons la variation de la hauteur de l'arbre (h), du rayon de la canopée (r), du diamètre à hauteur de poitrine (ϕ) et des attributs des branches primaires en utilisant les fonctions d'allométrie ($\mathcal{A}_d(s, t), \mathcal{A}_i(s, t)$) dérivées lors de la réalisation du modèle.

Germination : La dispersion des semences n'est pas modélisée explicitement dans notre système. Par souci d'efficacité, nous adoptons plutôt une approche de type banque de semences. Chaque année, chaque cellule de notre grille de simulation qui ne contient pas encore de tronc est testée pour l'établissement potentiel de semis avec l'une des deux probabilités de germination γ_{logs} ou γ_{bare} , en fonction de la présence ou de l'absence de troncs en décomposition, qui agissent comme un abri et favorisent l'établissement de la plante.

Après avoir passé ce test, nous devons encore tenir compte de l'adéquation du site. Ainsi, pour la saison de croissance précédente, à un emplacement particulier de la sous-cellule \mathbf{p} , la lumière du soleil qui atteint le sol de la forêt après avoir été filtrée par les canopées et l'humidité restante après avoir été allouée aux racines sont utilisées pour calculer la vigueur $\bar{v}_s(\mathbf{p})$ de chaque espèce candidate. La germination est autorisée avec une probabilité égale à $\max_s(\bar{v}_s(\mathbf{p}))$, ce qui permet d'éviter la surpopulation des sites dépourvus de ressources.

Enfin, si la germination est confirmée, une espèce particulière est attribuée à l'aide d'une sélection basée sur la probabilité suivante [Kap+20] :

$$w_s = \max(\alpha_s \cdot \bar{v}_s(\mathbf{p}) / \hat{\ell}_s^\beta, 0), \quad (3.5)$$

où $\hat{\ell}_s$ est la durée de vie maximale attendue spécifique à l'espèce, β est un exposant établissant un équilibre entre les plantes à courte et à longue durée de vie, et α_s est un multiplicateur basé sur la

propension d'une espèce à s'enraciner dans un sol riche en matières organiques. Dans la pratique, nous avons constaté que $\beta = 1.2$ reflète de manière adéquate la proportion plus élevée de graines générées par les plantes à courte durée de vie, qui atteignent plus rapidement la maturité d'ensemencement.

Mort : Pour des raisons d'efficacité, nous vérifions la mortalité des plantes sur une base annuelle plutôt que mensuelle. Chaque plante est testée par rapport à une probabilité de décès $\mu \in [0, 1]$ qui combine des termes pour la mortalité de fond (en contrôlant la durée de vie spécifique à l'espèce) et la mortalité induite par le stress, où :

$$\mu = \min(\mu_b + \mu_s, 1), \quad (3.6)$$

$$\mu_b = 1 - \hat{p}^{1/\hat{\ell}_s}, \quad (3.7)$$

$$\mu_r = \max(-\mathcal{R}_i, 0). \quad (3.8)$$

Le paramètre μ_b avec $\hat{p} = 0,01$ utilise des statistiques de survie discrètes pour permettre à une proportion attendue de 1% de l'espèce de survivre dans des conditions raisonnables jusqu'à un âge maximum $\hat{\ell}_s$. Le terme de stress μ_r est basé sur la mesure dans laquelle la réserve de carbone est surchargée au cours de l'année en raison de l'accès aux ressources, de la concurrence et des perturbations. Une fois qu'un arbre meurt, il passe au cycle de décomposition (Figures 24 et 25).

Les principaux changements apportés à l'algorithme de base sont les suivants : le traitement révisé des allométries, l'inclusion de termes de germination riches en désintégration (γ_{log} et α_s), et l'impact des perturbations sur la réserve de carbone \mathcal{R} et donc sur la mortalité basée sur le stress μ_r .

3.3.2 Décomposition

Notre traitement de la décomposition reflète celui de la croissance. Il s'agit de deux processus biologiques qui se déroulent dans le temps et qui sont soumis à des influences biotiques et abiotiques particulières. Une distinction est faite entre les arbres qui meurent mais qui restent enracinés et debout, appelés chicots, et les troncs et les branches qui sont tombés, appelés volis ou débris ligneux abattus. Du point de vue de la simulation, les deux catégories subissent des processus de décomposition similaires, bien qu'accélérés dans le cas des branches tombées. D'une manière générale, notre simulation de décomposition se déroule comme suit : au moment de la mort, nous calculons la durée prévue de la décomposition en tenant compte de l'espèce et du diamètre du bois mort ou des branches. Ensuite, chaque année, nous augmentons le temps nominal écoulé depuis la mort tout en l'ajustant aux conditions d'humidité et de température. Au lieu de mesurer directement la décomposition, nous combinons la densité du bois ($d_i \in [1, 0]$) comme indicateur, et le vieillissement nominal défini par une fonction sigmoïdale. Pour la réalisation du modèle, nous empruntons la pratique botanique courante qui consiste à séparer le continuum de la décomposition en classes pour les bois morts et les branches tombées [Rus+15]. Ces classes représentent des étapes visuellement distinctes, comme l'illustre la Figure 25, et comme le montrent les rendus des modèles d'arbres instanciés à partir de la base de données géométriques dans la Figure 26.

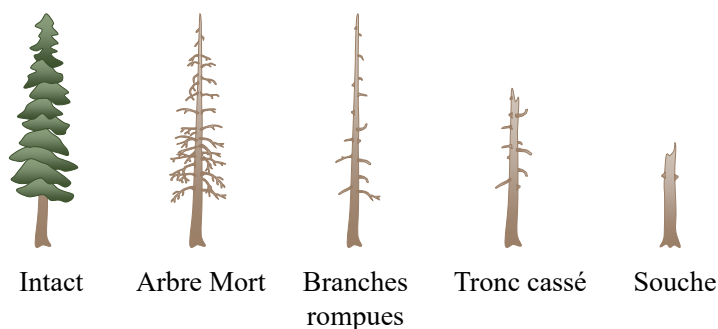


FIGURE 25 : Les cinq stades de décomposition suivant la mort de l’arbre, utilisés pour classer les arbres morts sur pied (chicots).

Nous utilisons les données suivantes pour modéliser la décomposition comme un processus annuel : la température moyenne annuelle $\bar{\tau}(\mathbf{p})$ à l’emplacement \mathbf{p} , en tenant compte de l’altitude et des changements climatiques ; l’humidité moyenne annuelle $\bar{w}(\mathbf{p})$ arrivant à l’emplacement \mathbf{p} , avant l’absorption et l’utilisation par les plantes voisines ; le diamètre maximal du tronc ou de la souche (ϕ), qui est dérivé de l’allométrie, et l’espèce s . Certaines quantités biotiques (telles que la hauteur et le diamètre du tronc) sont figées au moment de la mort de l’arbre ou de la chute du tronc et peuvent donc être utilisées pour calculer l’espérance de vie au début de la simulation de la décomposition :

$$\delta_i = \alpha_\phi \cdot \phi_i \cdot \hat{\delta}_s, \tag{3.9}$$

où $\hat{\delta}_s$ est le temps le plus rapide pour achever la décomposition d’un arbre de l’espèce s ayant un diamètre de 10 cm, et α_ϕ pondère l’impact du diamètre sur l’espérance de vie.



FIGURE 26 : Exemple d’une petite scène forestière avec des arbres à différents stades de décomposition.

Ensuite, sur une base annuelle, le temps nominal écoulé depuis la mort est incrémenté. Cependant, il faut encore tenir compte de l’évolution des conditions abiotiques annuelles. Nous calibrons δ_i pour représenter la durée de vie soumise à une décomposition maximale et retarder ce processus lorsque les conditions sont sous-optimales d’un point de vue fongique, microbien et d’invertébrés. Pour modéliser cela, l’incrément de temps est ajusté selon une fonction de minimum de viabilité, comme cela a été fait pour la vigueur des plantes :

$$\Delta t = \min(f_\tau \circ \bar{\tau}, f_w \circ \bar{w}). \tag{3.10}$$

La différence ici est que la fonction de viabilité a une plage comprise dans $[0,1]$ et que les viabilités ne sont pas spécifiques à une espèce contrairement à la vigueur.

Enfin, nous devons enregistrer la densité de l'arbre mort ou de la bille en décomposition puisque c'est cette métrique, et sa corrélation avec la classe de décomposition [Rus+15], qui est utilisée pour la réalisation du modèle. La densité est fixée à 1 au moment de la mort et atteint 0 à la fin de la période de mort. En ce qui concerne la perte de densité au fil du temps, il existe plusieurs choix de fonctions [ZKH09 ; Rus+15], notamment linéaire, exponentielle, par morceaux et sigmoïdale. Bien que les fonctions exponentielles soient les plus courantes, probablement en raison de leur applicabilité dans la régression, nous adoptons une fonction sigmoïde, qui est censée fournir un meilleur ajustement [Fre+12], parce que le processus de désintégration commence généralement lentement au début avant d'accélérer, avec un ralentissement progressif à la fin.

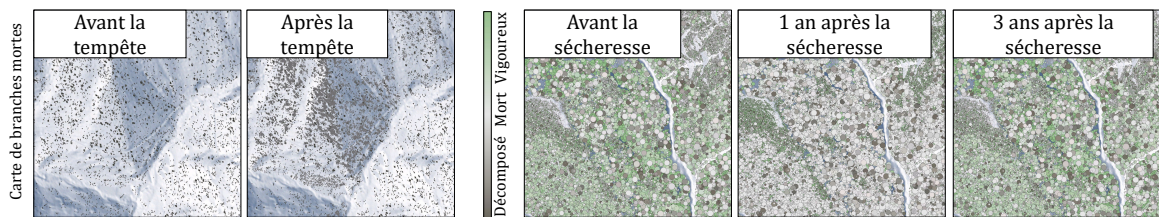


FIGURE 27 : L'impact des perturbations sur l'état de l'écosystème. (À gauche) Dans une forêt mature non perturbée, les troncs sont répartis uniformément, alors qu'ils sont regroupés dans la trajectoire d'une tempête de vent. (À droite) Une sécheresse sévère de courte durée supprime la vigueur des plantes, mais le rétablissement est rapide une fois que les précipitations se normalisent.

Nous choisissons donc une fonction sigmoïdale (en utilisant le pas lisse $s(x) = (-2x^3 + 3x^3)$, $x \in [0, 1]$ en raison de son inversibilité) qui relie le temps écoulé depuis la mort d'un arbre ou d'une branche détachée ($t_i \in [0, \delta_i]$) à sa densité ($d_i \in [1, 0]$) :

$$d_i = s(t/\delta_i) \quad (3.11)$$

Il peut sembler que l'utilisation de valeurs fixes pour la transition des classes de décomposition néglige l'impact des facteurs abiotiques et biotiques, mais ceux-ci sont pris en compte dans les processus de pas de temps des équations 3.9 et 3.10.

3.3.3 Événements perturbateurs

Si les facteurs de stress abiotiques et les facteurs de sénescence jouent un rôle dans les dommages et la mort finale des arbres, les perturbations, telles que le vent, la neige, le gel, le feu, la sécheresse, les glissements de terrain, les inondations, le pâturage des animaux et l'intervention humaine, sont tout aussi importantes dans la formation d'un écosystème.

Dans notre système, nous intégrons différentes formes de perturbations en tant que modules externes (Figures 27, 28 et 29). Ces modules ont un impact sur l'état de l'écosystème en fonction des événements perturbateurs qui sont soit programmés selon un scénario temporel, soit déclenchés sur la base d'une

distribution stochastique. Pour démontrer ce mécanisme, nous avons mis en œuvre trois catégories de perturbations, dont la durée, la localisation et l'impact sur les espèces, à savoir : les incendies de forêt, les tempêtes de vent et les maladies.

Incendies de forêt

Nous nous appuyons sur un modèle de simulation existant d'automates cellulaires (AC) basé sur une grille [Ale+08], qui s'aligne bien sur la discrétisation existante des influences abiotiques et des processus de croissance.

Dans la grille de l'AC, chaque cellule peut prendre l'un des quatre états suivants : ininflammable, non enflammé, en feu ou brûlé. Au départ, le feu est semé à un ou plusieurs endroits et les cellules situées à une distance seuil sont marquées comme étant en feu. Les règles de propagation sont ensuite appliquées de manière itérative jusqu'à ce qu'il ne reste plus de cellules en feu. Tout d'abord, les cellules en feu deviennent brûlées après une seule itération. Ensuite, à chaque itération, les cellules en feu se propagent aux huit voisins non allumés, selon la probabilité de combustion suivante :

$$P_{\text{burn}} = P_0 (1 + P_{\text{veg}}) (1 + P_{\text{den}}) P_b P_m P_w P_h. \quad (3.12)$$

P_0 représente la probabilité de base de propagation du feu sur un terrain plat en l'absence de vent ; $P_{\text{veg}}, P_{\text{den}} \in [-1, 1]$ représentent respectivement le type et la densité de la végétation dans une cellule ; P_b modélise l'effet de la vitesse du vent V et de l'angle θ_b entre la direction du vent et la propagation de l'incendie ; P_m saisit l'influence de l'angle de la pente m , puisque le feu se propage plus agressivement sur les pentes raides ; P_w tient compte de l'impact du pourcentage d'humidité C_w sur la vitesse de propagation, et $P_h = h^d$ modélise la façon dont la hauteur du houppier affecte la propagation du feu. Plus précisément,

$$P_b = e^{V(c_1+c_2(\cos \theta_b-1))} \quad P_s = e^{aS} \quad P_w = a e^{-bC_w}, \quad (3.13)$$

où c_1, c_2, a, b et d sont des paramètres de réglage [Ale+08].

Nous nous tournons vers la grille de simulation pour dériver les quantités nécessaires à la probabilité de combustion P_{burn} . La densité de la végétation pour P_{den} est estimée par cellule à partir du volume des troncs, des canopées, des arbres morts et des troncs incidents, modéré par la réduction de la densité due à la décomposition. Le taux d'humidité C_w est dérivé de la viabilité (réserves de carbone) et de la décomposition des arbres vivants et morts, respectivement. Enfin, la hauteur de la canopée h est la hauteur du plus grand spécimen dans une cellule, ou zéro si elle est vide.

Une fois la simulation terminée, nous calculons la valeur des dommages causés par le feu $\mathcal{F}(\mathbf{p})$ à un endroit \mathbf{p} en interpolant de manière bilinéaire le masque binaire brûlé ou non brûlé. Ces dommages sont appliqués aux arbres vivants en réduisant proportionnellement les réserves végétales (ce qui entraîne un stress et une mort potentielle) et aux bois morts en faisant avancer proportionnellement la décomposition. Dans tous les cas, l'incendie et la valeur des dommages sont enregistrés dans l'historique de vie d'un spécimen \mathcal{H} pour être utilisés dans la création du modèle.

Tempêtes de vent

Les tempêtes puissantes peuvent modifier radicalement un paysage forestier en provoquant l'arrachement généralisé de branches et de troncs, ainsi que le déracinement (Figure 28). Pour intégrer cette forme de perturbation, nous suivons les travaux de Seidl *et al.* [SRB14] et calculons les vitesses de vent critiques pour le déracinement et la rupture des troncs et des branches (w_u , w_s et w_b , respectivement) pour les arbres se trouvant sur la trajectoire d'une tempête :

$$w_u = \left(\frac{C_s \cdot GW_i}{\kappa_i} \right)^{1/2} \quad w_s = \left(\frac{MOR_s \cdot \phi_i^3 \cdot \pi}{32 \cdot \kappa_i} \right)^{1/2}, \quad (3.14)$$

et $w_b = 65$ km/h conformément à l'échelle de vent de Beaufort. Dans ces équations, C_s est un coefficient par espèce obtenu à partir d'expériences de traction, MOR_s est le module de rupture de l'espèce, GW_i est le poids de la tige verte, et κ_i est le coefficient de moment de rotation de l'échantillon en fonction de la hauteur et du diamètre [Hal+15] :

$$\kappa_i = 111.7 \cdot \phi_i^2 \cdot h \quad (3.15)$$

Pour calculer le poids de la branche vivante, on multiplie le volume approximatif de l'arbre par la densité du bois de l'espèce (ρ) :

$$GW_i = \rho \cdot f_w \cdot V = \rho \cdot f_w \cdot \frac{\pi}{4} \phi_i^2 h_i f_V. \quad (3.16)$$



FIGURE 28 : Impact d'une tempête de vent : les arbres sont déracinés et les branches sont fracturées et cassées.

Dans cette approximation, f_w est le facteur de biomasse humide (fixé à 1 pour les arbres morts et à 1,85 pour les arbres vivants) et f_V est un facteur de forme de volume par espèce.

Seidl *et al.* [SRB14] incorpore des coefficients adimensionnels supplémentaires dans leur formulation pour tenir compte des effets de l'ombre du vent, où les arbres sont protégés du vent par la masse d'une forêt ou la topographie du terrain. Au lieu de cela, nous utilisons le champ de hauteur du terrain et les hauteurs de la canopée pour calculer une carte d'occlusion directionnelle par rapport à la direction du vent, en utilisant une stratégie similaire à l'occlusion directionnelle de l'espace écran [RGS09]. Pour obtenir une force de vent par arbre w_i , nous mettons à l'échelle la vitesse maximale du vent de la tempête en fonction de cette occlusion.

Enfin, les dommages causés aux arbres peuvent être déterminés : si $w_i > w_u$ ou $w_i > w_s$, l'arbre sera soit déraciné, soit cassé. Sinon, pour les vitesses de vent comprises dans l'intervalle $w_b < w_i < \min(w_u, w_s)$, nous appliquons une probabilité linéairement croissante de rupture des branches primaires.

Maladies

Il existe une pléthore d'agents pathogènes susceptibles d'affecter la santé d'un arbre, allant des bactéries aux champignons et ayant des répercussions diverses sur des espèces et des composants spécifiques de l'arbre (tels que les feuilles, les racines et les tiges). Prenons, par exemple, le cas de la maladie de l'orme hollandais, une infection fongique spécifique à l'espèce qui a détruit la moitié des ormes d'Europe et les trois quarts de ceux d'Amérique du Nord.

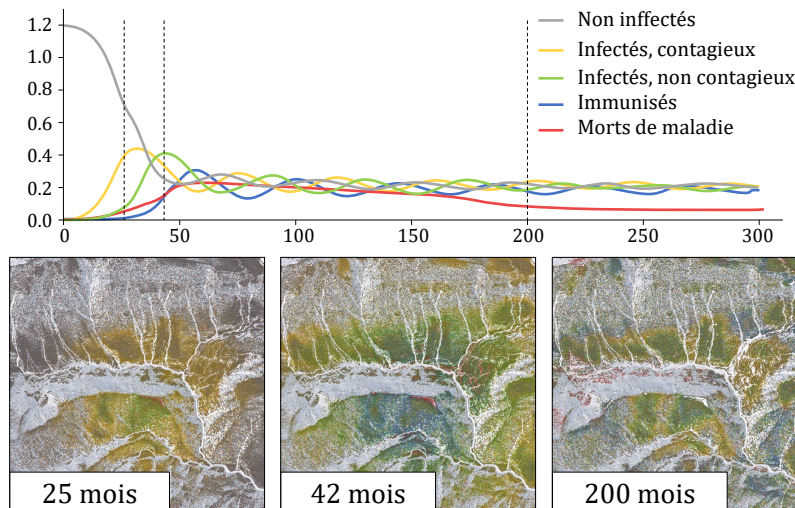


FIGURE 29 : Progression de la maladie : (ci-dessus) un graphique montrant le nombre d'arbres (en millions) pour différentes classes de maladies sur une période de 300 mois, et (ci-dessous) des images des écosystèmes correspondants à 25, 42, et 200 mois. La progression montre une poussée typique de l'infection initiale et de la mort, avec des vagues ultérieures qui s'atténuent progressivement jusqu'à un état endémique.

Pour inclure cette importante source de perturbation, nous adoptons le cadre Susceptible-Infecté-Récouvert (SIR) utilisé pour les maladies contagieuses [TL20 ; Bjø+20]. Notre mise en œuvre est relativement simple : les individus de l'espèce cible d'une maladie sont marqués comme étant

sensibles, puis un sous-échantillon aléatoire est déplacé vers *infectés* et sert de vecteur de départ pour la maladie. Au cours d'une période initiale de contagion de $m_{\text{contagious}}$ mois, un individu infecté propage la maladie aux individus sensibles adjacents dans un rayon de r_{spread} selon une probabilité de transmission P_{spread} . Au cours de chaque mois d'infection, la réserve de carbone d'un spécimen infecté est réduite d'une valeur constante de $-v_{\text{disease}}$, le stress qui en résulte pouvant entraîner la mort. Si une plante survit pendant m_{recover} mois, elle est classée comme *récupérée*, l'infection permanente étant obtenue en fixant $m_{\text{recover}} = \infty$. Les plantes rétablies peuvent acquérir une immunité temporaire ou permanente contre la maladie, en fonction de la valeur du paramètre m_{immune} .

Dans notre application, plusieurs maladies peuvent coexister au sein d'une même espèce cible. À chaque étape mensuelle de la simulation et pour chaque maladie active, les individus sensibles interrogent leurs voisins infectés \mathcal{N}_i à une distance de r_{spread} et testent un tirage aléatoire par rapport à une probabilité d'infection $P_i = P_{\text{spread}} \mathbb{N}, s(d_i)$, où $s(x)$ est la fonction de pas lisse et d_i la densité des voisins infectés :

$$d_i = \frac{1}{\pi r_{\text{spread}}^2} \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \pi r_j^2$$

Malgré sa simplicité, cette approche est suffisante pour modéliser de manière générale de nombreuses maladies infectieuses des plantes spécifiques à une espèce et leur impact sur les individus les plus faibles.

3.4 Correspondance des modèles

S'il est possible, dans les petites scènes, de générer une géométrie unique qui capture avec précision le développement spécifique de chaque arbre, cela n'est pas réalisable du point de vue de la mémoire et du calcul pour les grandes scènes contenant plus de quelques milliers d'arbres. Au lieu de cela, nous appliquons une stratégie d'instanciation et de quantification qui remonte aux premiers jours du rendu des écosystèmes [Deu+98]. En effet, nous sélectionnons des échantillons dans l'espace des paramètres biotiques et abiotiques englobant les espèces, la hauteur, le rayon de la canopée, les perturbations et le stade de vie sur la base du caractère distinctif visuel. Le modèle de correspondance pour un spécimen particulier est alors obtenu en sélectionnant simplement l'échantillon le plus proche dans l'espace des paramètres. Cette méthode présente l'avantage de pouvoir construire un atlas de référence hors ligne et de l'appliquer à toutes les simulations partageant un même biome (Figures 30 et 31).

Dans nos expériences, basées sur la région des Pyrénées, nous avons cherché à atteindre un équilibre entre la variété et la complexité de l'atlas en utilisant les paramètres de quantification suivants :

1. *Espèces* : Sept espèces endémiques de la région ont été choisies sur la base de leur prévalence et de leur niche écologique, représentant un mélange d'arbres et d'arbustes (Tableau 3.3).
2. *Hauteur* : Les formes d'arbres ont été sélectionnées à quatre hauteurs clés différentes pour chaque espèce, afin d'illustrer les différents stades de développement, depuis les formes arbustives jusqu'à la maturité de la cime. Il convient de noter que la hauteur est une meilleure base de quantification que l'âge, car la croissance et la forme sont fortement influencées par des facteurs

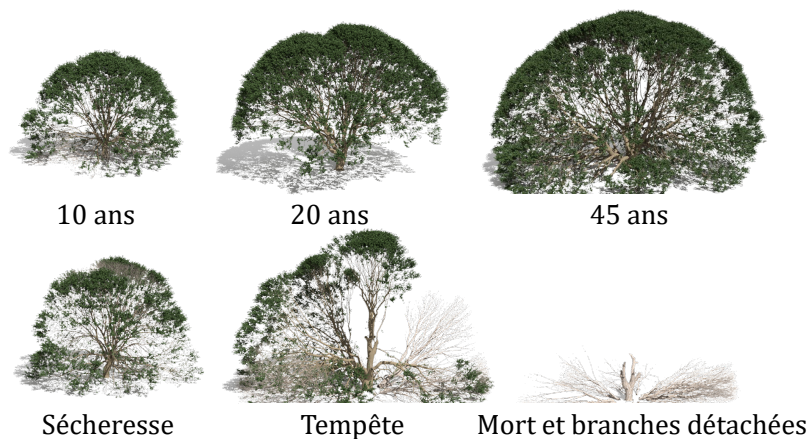


FIGURE 30 : Quelques exemples typiques de géométries d’arbres \mathcal{G} stockées dans l’atlas de référence.

environnementaux. Par exemple, un arbre qui manque de lumière dans le sous-bois et qui est par conséquent rabougri pendant la majeure partie de sa vie peut connaître une poussée de croissance soudaine en raison d’une ouverture dans la canopée (ce que l’on appelle en botanique les modèles de trouées forestières) et ce comportement est plus fortement corrélé à l’accès aux ressources qu’à l’âge.

3. *Rayon de canopée* : Pour chaque hauteur, deux versions de l’arbre ont étéinstanciées avec une étendue minimale et maximale de la canopée, sur la base d’un cycle de vie caractérisé par une concurrence solaire locale dense ou éparse.
4. *Stade de vie et perturbation* : L’impact visuel des perturbations causées par le feu et le vent et les différents stades de décomposition étant très particulier, nous avons décidé de créer des instances distinctes pour les dommages causés par le feu (3) et le vent (3) et pour les différents niveaux de décomposition (8).

Au total, cela donne un atlas de référence avec 784 modèles d’arbres 3D uniques (7 espèces \times 4 hauteurs \times (6 événements de perturbation + 8 stades de vie) \times 2 rayons). Pour peupler le sol de la forêt, nous déterminons la densité et la hauteur de l’herbe sur la base de l’humidité résiduelle et de la lumière du soleil après l’ombrage de la canopée, puis nous utilisons ces données pour sélectionner les parcelles d’herbe appropriées.

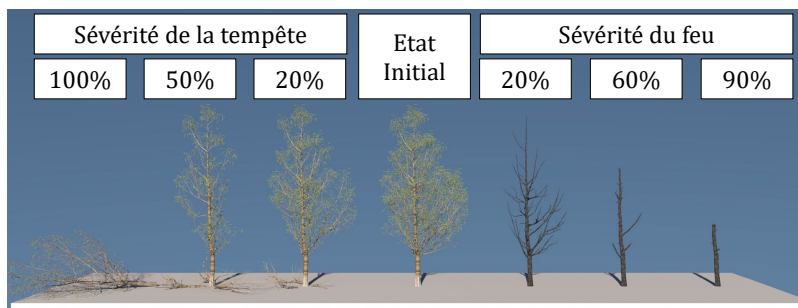


FIGURE 31 : Exemples de géométries d’arbres endommagés par le vent et le feu $c\mathcal{G}$ dans notre atlas de référence. Ils proviennent du même arbre initial et illustrent les gradients de dommages en fonction de la gravité du feu et du vent.

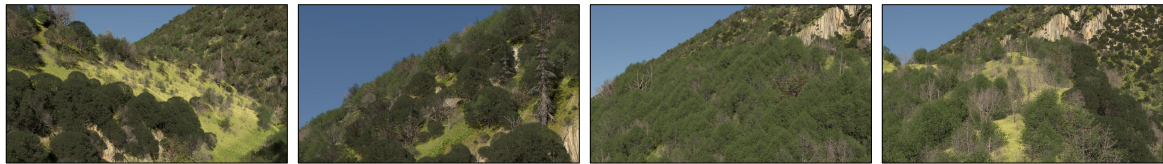


FIGURE 32 : Vues variées d'une forêt relativement dense sur un terrain en pente (terrain de 2×2 km, avec 1.14 millions d'arbres).

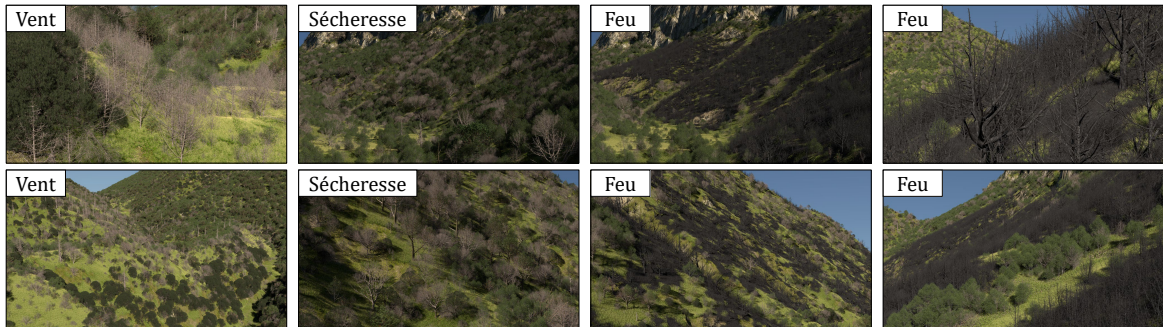


FIGURE 33 : Vues montrant les conséquences visuelles des dégâts importants causés par le vent, la sécheresse et les incendies.

Dans l'ensemble, notre stratégie de quantification a l'avantage de permettre le calcul préalable, mais elle n'est pas idéale à d'autres égards. Elle ne s'adapte pas à la répartition et au regroupement réels des spécimens dans l'espace des paramètres, qui sont évidents dans une simulation particulière. En outre, notre choix de paramétrisation pour les grandes scènes ne tient pas compte de l'ensemble du cycle biologique. Par exemple, seul l'événement de perturbation le plus récent est pris en compte. Cependant, une paramétrisation plus nuancée combinée à une sélection et à une mise en correspondance d'instances à la demande nécessiterait un moyen automatisé efficace d'échantillonnage sur une base perceptuelle. En outre, la variété et le réalisme des gros plans sont améliorés par l'ajout d'herbe, de feuilles, de petites branches et de plaques de roche en fonction de la densité des arbres (Figure 28).

3.5 Résultats

Nous avons inclus plusieurs exemples pour indiquer l'impact de la topographie sur la distribution des espèces et des densités, de la dégradation progressive de l'apparence de la scène dans les champs moyen et lointain (Figure 32), et des événements perturbateurs, y compris la sécheresse, le vent et le feu (Figure 33).

3.5.1 Validation

Nous avons choisi de valider notre modèle de simulation en utilisant la vallée du Gresolet dans les Pyrénées du nord-est de l'Espagne. La zone en question présente un mélange de climats, subméditerranéen et eurosibérien, en raison de la topographie locale qui s'étend sur une gamme d'altitudes allant

de 1200 à 1600m. Une variété d'espèces d'arbres et de plantes typiquement européennes prospèrent dans la région, principalement le hêtre européen, le pin de montagne, le chêne sessile, le sapin blanc et le buis (Tableau 3.3).

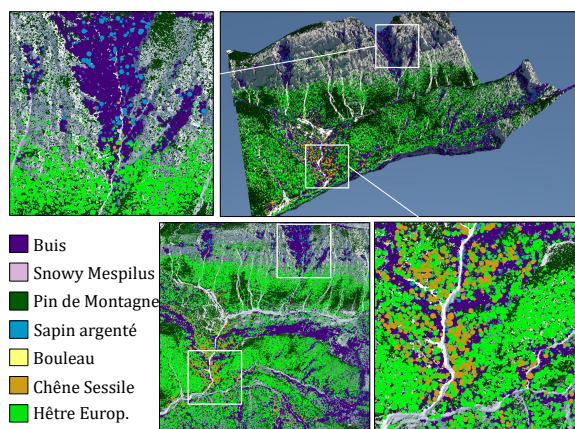


FIGURE 34 : Carte en fausses couleurs montrant la prévalence des espèces à l'année 800 de notre expérience de validation sans perturbation. Notez la prédominance du hêtre et du chêne dans les vallées bien arrosées, par rapport au buis, au pin de montagne et au sapin blanc à des altitudes plus élevées.

Pour affiner et valider notre modèle, nous avons mené une expérience sur une période suffisante pour atteindre la maturité (800 ans) sur une zone du Gresolet d'une superficie de $2 \times 2\text{km}^2$, contenant à la fois des vallées et des pentes abruptes. Nous avons validé le modèle final sur la base suivante :

1. *Répartition des espèces* - La distribution des espèces dans la région obéit généralement aux schémas suivants [MP00] : le pin de montagne est présent à des altitudes plus élevées et sur les pentes, le hêtre domine dans les vallées fraîches et humides, et le chêne et le sapin sont mélangés dans la forêt de hêtres en fonction du microclimat. Ces schémas de présence sont reproduits dans nos expériences, comme le montre le rendu symbolique de la Figure 34, qui met en évidence les espèces par leur couleur.
2. *Surface terrière des espèces* - L'occupation des espèces est souvent enregistrée à l'aide de la surface terrière, qui est la somme de la surface transversale de tous les arbres d'une espèce spécifique et d'un seuil de diamètre (7,5cm dans le cas présent), mesurée à hauteur de poitrine (environ 1,3m), puis normalisée par hectare. Compte tenu des données disponibles sur une parcelle voisine de l'inventaire forestier national espagnol ¹, on s'attend à ce que le pin de montagne, le sapin d'Europe et le sapin blanc dominant à environ 16.2, 17 et 8.5m²/ha, respectivement. Nous obtenons des proportions similaires d'espèces (pin de montagne et hêtre européen à parts égales à 12.7 et 12.3m²/ha, avec le sapin blanc à la moitié de ce niveau (6.4m²/ha) à l'âge de 800 ans).
3. *Comportement en matière de succession* - Il convient de noter que le sapin blanc sert d'espèce pionnière dans certains biomes et ce rôle est confirmé par sa dominance initiale avant le seuil des 150 ans, après quoi il est dépassé par le pin européen et, plus tard, par le pin de montagne.
4. *Proportion de chicots et de débris* - Les proportions rapportées de chicots et de débris dans les forêts tempérées sont les suivantes : Mesurés en surface terrière, les chicots représentent environ

1. Parcelle P_00018, obtenue sur https://laboratoriforestal.creaf.cat/nfi_app/

10% de tous les troncs sur pied (la fourchette typique est de 8 à 12%) et 30% de l'ensemble du bois mort (fourchette de 20 à 40%). La figure 35 montre comment, en l'absence de perturbation, les arbres en décomposition sont répartis sur l'ensemble du domaine de simulation, comme cela est prévisible pour les cohortes d'âge homogène.

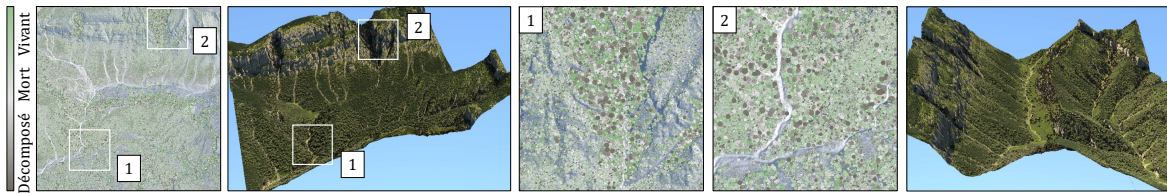


FIGURE 35 : L'état de vie de l'écosystème est visualisé à l'aide d'un spectre bicolore allant de la pleine vigueur (vert) à la mort (blanc) et à la décomposition complète (noir). Le scénario mature et non perturbé illustré ici montre la cooccurrence d'arbres dans toute la gamme d'états.

Pour valider nos modules de perturbation, nous avons appliqué un scénario incorporant un mélange de maladies, de sécheresses, de tempêtes de vent et d'incendies de forêt à la configuration de la scène du Gresolet. L'impact de ces perturbations sur la surface de base est indiqué dans la Figure 36.

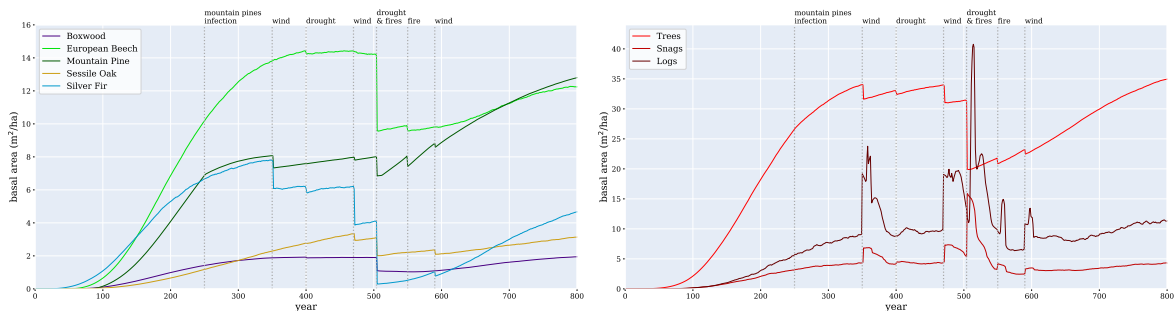


FIGURE 36 : Trajectoires normalisées de la surface terrière dans une scène soumise à une série de maladies, de sécheresses, d'incendies et de tempêtes de vent, avec indication de l'espèce (en haut) et du stade de vie (en bas).

Maladies Au bout de 250 années, nous avons lancé une maladie infectieuse spécifique au pin de montagne, conçue pour imiter la chenille processionnaire du pin. Cette maladie a été modélisée avec une période $m_{\text{contagieuse}} = m_{\text{récupération}} = m_{\text{immunité}} = 12$ mois, un impact faible à modéré sur la vitalité et une réinfection possible. Si la croissance de la surface terrière des pins de montagne ralentit, il n'y a pas d'augmentation perceptible des chicots et des troncs, comme on peut s'y attendre d'une maladie dont l'effet principal est la défoliation plutôt que la mort de l'arbre.

Comme le montrent les Figures 29 et 37, après une première vague prononcée de la maladie, les vagues successives tendent à s'aplanir et à converger vers une situation d'équilibre endémique, telle qu'elle est modélisée dans les épidémies dans lesquelles les individus rétablis peuvent redevenir sensibles en raison d'une perte d'immunité [Bjø+20].

Tempêtes Le scénario incorpore trois tempêtes de vent sévères suffisamment puissantes pour déraciner les arbres et fendre les troncs : (1) vents de 92 km/h provenant du sud-est à l'année 350 ;

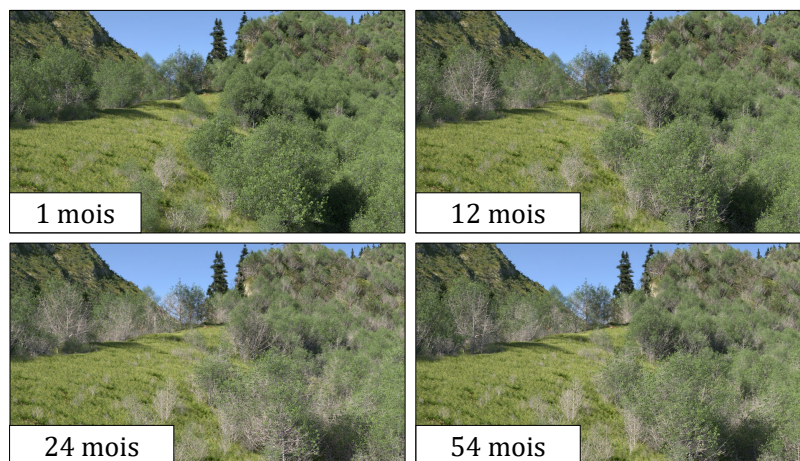


FIGURE 37 : Apparition de la maladie et rétablissement : au cours de la maladie, la vigueur de la plante est affectée (ce qui se traduit par une perte de feuillage), mais avec le temps, les arbres se rétablissent et développent une immunité.

(2) vents de 117 km/h provenant du nord-ouest à l'année 470, et (3) vents de 102 km/h provenant du nord-est à l'année 590. Il convient de noter que l'impact de ces tempêtes de vent sur la surface terrière varie d'une espèce à l'autre, en fonction des valeurs de leur module de rupture (MOR). Un double pic dans les courbes des chicots et des troncs est également évident, coïncidant avec l'événement, puis 5 à 10 ans après, correspondant aux dommages initiaux suivis de la décomposition secondaire des chicots et des arbres endommagés.

Sécheresse Le scénario prévoit deux périodes de sécheresse : (1) à partir de l'année 400, une période de sécheresse d'un an avec des précipitations de 10 à 30% par rapport aux niveaux normaux, et (2) à partir de l'année 504, une période de deux ans avec des niveaux de précipitations de 20 à 40%, combinée à un incendie au cours de l'année 505. L'écosystème présente une résistance moyenne à la sécheresse, les sapins et les hêtres étant les plus sensibles, probablement à la limite de leur zone d'adaptation.

Feux de forêt En août de l'année 504, après 19 mois de sécheresse, nous avons simulé un incendie de forêt avec trois sources, dont deux fusionnent en un seul front de feu. Cet incendie brûle une superficie totale de 41 ha et représente l'événement le plus dommageable de la chronologie. En revanche, un incendie ultérieur dans l'année 550 avec une intensité similaire mais tombant en dehors de la période de sécheresse ne brûle que 11 ha.

Enfin, la Figure 38 présente une comparaison côte à côte d'une ortho-image satellite de la région du Gresolet et de notre scène générée par ordinateur. Bien que la coloration soit différente, notamment parce que le buis apparaît presque noir et que les zones fluviales sont laissées à nu dans la scène générée par ordinateur, les schémas de croissance sont à peu près similaires.

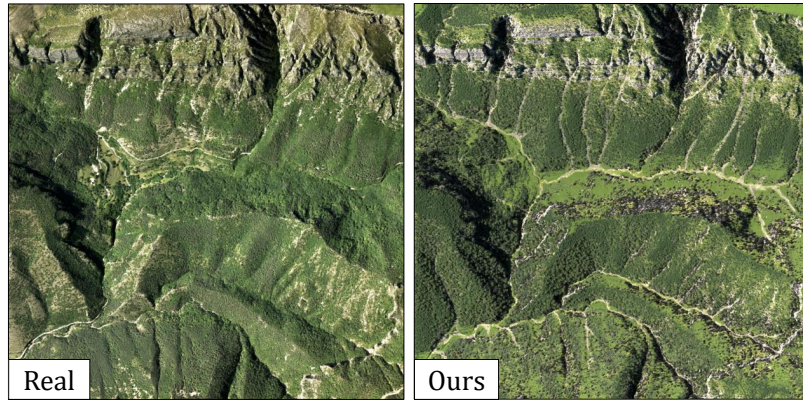


FIGURE 38 : Comparaison côte à côte d’orthoimages réelles (à gauche) et simulées (à droite) de la région du Gresolet dans les Pyrénées.

3.5.2 Performance

Le tableau 3.2 montre les statistiques de performance de notre simulateur, y compris les temps d’exécution, pour des scènes de différentes tailles, allant de $0.5 \times 0.5 \text{ km}^2$ à $2 \times 2 \text{ km}^2$, sur une période de 500 années. Cette période de simulation est suffisante pour que notre cas test des Pyrénées atteigne une maturité précoce. Bien que notre simulateur soit capable de suivre le cycle de vie de millions d’arbres sur de grands terrains, il faut reconnaître que les temps de calcul sont longs dans de tels cas. Une grille uniforme est utilisée pour accélérer les tests d’interaction avec le voisinage. Cependant, notre implémentation est actuellement basée sur le CPU et une réimplémentation sur GPU, pour laquelle une telle approche basée sur une grille est bien adaptée, améliorerait probablement les temps d’exécution de manière substantielle. À titre de comparaison des performances, le système Sylviculture basé sur le GPU [Mak+19] prend environ deux fois plus de temps (7, 1s par an pour 462k arbres, à leur taille d’écosystème maximale déclarée). C’est tout à fait normal puisqu’ils considèrent les arbres à un niveau de détail plus fin.

Aire du Terrain (km^2)	Nombre d’instances			Surface terrière (m^2)	Temps		Proportion passé sur la		
	Vivant	Chicots	Volis		Année	Total	Décomposition	Semence	Croissance
0.5×0.5	108k	9k	10k	987	0.8s	0.1h	0.095	0.023	0.882
1.0×1.0	508k	38k	43k	3679	3.7s	0.45h	0.158	0.019	0.823
1.5×1.5	1120k	83k	94k	7462	8.9s	1.11h	0.248	0.017	0.735
2.0×2.0	2073k	144k	165k	11317	18.22s	2.9h	0.355	0.015	0.63

TABLE 3.2 : Performances de la simulation sur des terrains de différentes étendues, en comparant : le nombre moyen d’arbres vivants, de chicots et de branches dans l’écosystème ; la surface terrière moyenne totale non normalisée des arbres vivants par an ; le coût de calcul moyen d’une seule année de simulation en secondes ; le temps d’exécution total de la simulation jusqu’à 500 années en heures, et la proportion de temps consacrée à la mort et à la décomposition, à l’ensemencement, et à la croissance. Notez que les moyennes sont calculées sur la période allant de 100 à 500 ans afin d’éviter toute variabilité précoce.

En termes d’évolutivité, nous avons constaté que le nombre absolu d’arbres dans le domaine de simulation pour un pas de temps donné n’est pas un prédicteur totalement précis du coût de calcul.

Alors que le sous-système de mort et de décomposition s'adapte linéairement au nombre total de chicots et de troncs, ce n'est pas le cas pour la croissance. La surface terrière totale (la somme des surfaces terrières de tous les arbres vivants de la simulation) est un meilleur indicateur pour cette composante. En effet, une grande partie du calcul de la croissance implique l'évaluation de la transmission de la lumière et de l'absorption de l'eau dans les cellules de la canopée et des racines, et l'occupation des cellules varie en fonction de la surface terrière. Cette relation est évidente dans le tableau 3.2, qui est basé sur des cultures concentriques du terrain du Gresolet. La région centrale de ce terrain (échelle de $0.5 \times 0.5\text{km}$) est plus favorable à la croissance, de sorte que les arbres vivent plus longtemps et deviennent plus grands, avec une proportion plus élevée de temps consacré à la croissance. Lorsque la périphérie moins favorable est incluse à des échelles plus grandes ($2 \times 2\text{km}$), conduisant à des surfaces terrières plus faibles, la proportion de temps consacrée à la mort et à la décomposition augmente.








	Nom	$\hat{\ell}_s$	$\hat{\delta}_s$	\hat{h}_s	$\hat{\phi}_s$	q	α_s	Trmsp.	C	MOR	Bois ρ	Soleil		Humidité		Temp.		Pente		Période croiss.
		c	r	c	r							c	r	c	r					
	Buis	300	100	9	0.2	-5	1	0.7	162	45	600	3.75	4.25	27.5	12.5	11.75	23.25	0	80	L
	Mespilus	50	30	6	0.1	-4	1	0.52	162	45	600	7	5	31	9	19.25	15.75	0	80	S
	Pin	400	50	20	1	-4	5	0.43	162	44	505	7	5	21.5	18.5	11.75	23.25	0	80	L
	Sapin	550	50	50	2	-6	2	0.47	145	42	415	5	3	31	9	11.75	23.25	0	80	L
	Bouleau	120	30	30	0.6	-4	30	0.3	162	63	640	8.25	3.75	27.5	12.5	19.25	15.75	0	70	S
	Chêne	600	120	40	3	-7	6	0.35	162	59	710	5	3	37.5	22.5	19.25	15.75	0	70	S
	Hêtre	400	30	50	3	-4	0.3	0.37	162	65	710	5.75	6.25	37.5	22.5	19.25	15.75	0	70	S

TABLE 3.3 : Résumé des paramètres des espèces utilisés dans nos simulations des Pyrénées, indiquant la couleur du rendu symbolique, les noms communs, les maxima pour la durée de vie ($\hat{\ell}_s$), la durée de vie mortelle ($\hat{\delta}_s$), la hauteur (\hat{h}_s) et le diamètre du houppier ($\hat{\phi}_s$) ; l'accord en hauteur (q) ; le multiplicateur d'ensemencement des troncs (α_s) ; la transparence du houppier ; le coefficient de traction (C), le module de rupture (MOR) et la densité du bois (ρ). Sont également incluses les réponses paramétriques (valeurs c, r) pour l'ensoleillement, l'humidité, la température et la pente, ainsi que la période de croissance (S = 6 mois, L = 9 mois). Sources : transparence du houppier [RCC10], ensemencement des grumes [BD11], densité du bois [Har+04], traction et rupture [Sei+12], et réponses abiotiques [Com+16].

3.6 Conclusion et perspectives

Les écosystèmes végétaux sont affectés par une grande variété de perturbations d'origine humaine et naturelle, notamment les maladies, les sécheresses, les tempêtes de vent et les incendies de forêt. En combinaison avec les processus de décomposition, qui transforment les arbres morts en humus décomposé, ils représentent une source majeure de variété visuelle dans les environnements naturels. En conséquence, nous avons présenté un cadre à plusieurs composantes pour la simulation et la modélisation des écosystèmes, qui met l'accent sur les processus de décomposition et les événements perturbateurs.

Cette recherche a mis en lumière les défis associés à ce domaine ainsi que les lacunes diverses dans l'état actuel de la recherche, ouvrant ainsi la voie à plusieurs pistes d'amélioration. Ces pistes visent notamment à accroître le réalisme des scènes végétales en améliorant la modélisation des instances

d'arbres et surtout de casser la limitation actuelle de l'étendue des écosystèmes. Tout comme les travaux précédemment présentés, de nouvelles recherches doivent être entreprises à différentes échelles :

- La dimension des scènes simulées est actuellement limitée à plusieurs millions d'individus, en raison du nombre d'instances à simuler et des contraintes en matière de visualisation. Nous avons présenté un algorithme qui permet d'atteindre une taille de l'ordre de 2 kilomètres. Notre objectif est d'étendre la portée de ces écosystèmes pour atteindre des dizaines de kilomètres, ce qui permettra de simuler la cohabitation de différents biomes dans une simulation commune. Nous développons actuellement une approche hybride qui combine une simulation par spécimen pour les individus matures avec un modèle eulérien pour les plus petites tailles. Cette méthode permet de réduire considérablement le nombre d'individus à gérer simultanément dans la scène. Des défis en matière de visualisation émergent également, mais sur de telles échelles, pourront être résolus en sélectionnant les arbres situés dans le cône de vision de l'utilisateur.
- Notre approche de modélisation des arbres individuels est adaptée pour créer des arbres génériques visibles dans une forêt. Bien que les paramètres puissent être ajustés pour obtenir une plus grande variété de modèles, les événements peuvent également être mieux modélisés pour influencer l'arbre et sa croissance. Même avec l'amélioration des phénomènes et des paramètres, la simulation d'un arbre se concentre principalement sur sa croissance primaire, qui détermine sa structure architecturale. La croissance secondaire, ainsi que la prise en compte de l'historique de l'arbre dans la modélisation de sa surface, sont peu ou pas étudiées dans la littérature. L'objectif est de pousser le concept pour modéliser des arbres uniques très réalistes en intégrant l'ensemble des événements possibles au cours des années sur un arbre. Des travaux sur la modélisation de la croissance secondaire doivent être entrepris, en particulier pour les branches mortes et leur cicatrisation, ainsi que pour améliorer l'apparence général de l'arbre.
- Une autre problématique inhérente à la simulation d'un écosystème réside dans la complexité à définir l'intégralité des paramètres nécessaires à la reproduction d'un biome. L'interaction entre toutes les espèces maintient un équilibre fragile, et la moindre modification peut engendrer des répercussions considérables sur l'ensemble de l'écosystème. L'objectif de mes recherches demeure de concevoir des modèles intuitifs à l'intention des artistes, leur permettant de reproduire aisément un biome déterminé. À cette fin, des études sur des simulations inverses doivent être entreprises afin de fournir aux professionnels des outils adaptés.

DÉSERTS



Table des matières

4.1	Principe général	49
4.2	Calcul du vent en surface	51
4.3	Simulation du sable	53
4.4	Amplification	58
4.5	Résultats	58
4.6	Conclusion et perspectives	61

L'objectif de cette recherche était d'enrichir les scènes virtuelles en y ajoutant des matériaux granulaires, notamment le sable présent dans les paysages désertiques. Plusieurs études ont été menées pour incorporer du sable à travers des processus d'érosion hydraulique [Šř08], mais peu ont utilisé les phénomènes éoliens comme vecteurs de modélisation de ces scènes virtuelles en informatique graphique. Toutefois, en géomorphologie, l'étude des évolutions des paysages désertiques [PT09 ; Lan95 ; LBS13] est un domaine en constante progression. L'étude de la formation de roches dans les déserts [Bea+07 ; Jon+10] ou des ondulations de sable [ON00 ; BR04] a été abordée, mais principalement sur des échelles très restreintes de quelques mètres où le vent reste linéaire. Cela souligne la nécessité de développer des méthodes spécifiques pour des étendues plus vastes. Malgré son importance, le vent, en tant qu'agent d'érosion majeur dans les déserts, a été largement négligé dans le domaine de la conception graphique assistée par ordinateur. Notre cadre de travail surmonte cette lacune en permettant la génération de divers types de dunes de sable, comprenant des barkhanes, des dunes longitudinales et des dunes en forme de croissant, tout en simulant l'abrasion qui altère la roche et sculpte des formes topographiques complexes pour refléter l'impact d'un matériau granulaire sur le paysage. En tenant compte d'un champ de vent à haute altitude qui varie dans le temps, nous calculons le champ de vent à la surface du terrain en tenant compte de son relief, et nous simulons le déplacement du sable transporté par le vent. Une contrainte importante de ce travail était de permettre à l'utilisateur de modéliser de manière interactive des paysages désertiques complexes et de contrôler leur évolution dans le temps, soit en utilisant une gamme de brosses interactives, soit en programmant des événements le long d'une ligne temporelle définie par l'utilisateur.

Ces recherches, initiées et réalisées dans le cadre de la thèse d’Axel Paris et validées par une publication à Pacific Graphics [Par+19], ont abouti à une collaboration avec l’Institut de Physique du Globe de Paris (IPGP) par le lancement d’un projet ANR EOLE à la fin de 2023, axé sur la modélisation des phénomènes éoliens.

4.1 Principe général

Les déserts chauds sont des régions à faible approvisionnement en eau. En fonction de la quantité de précipitations, ils peuvent être classés comme hyper-arides, arides ou semi-arides. Les déserts hyper-arides et arides, qui reçoivent moins de 250 mm de précipitations par an, représentent près de 25% de la surface terrestre et ont été largement étudiés en géomorphologie [Hug03].

Phénomènes géomorphologiques Les déserts sont composés de différentes formes de relief créées par les processus éoliens : érosion, transport et dépôt de matériaux par le vent. Les effets de l'érosion éolienne comprennent la déflation (enlèvement des particules lâches à grain fin sous l'action turbulente du vent) et l'abrasion (usure de la roche-mère par l'action de broyage des particules de sable transportées par le vent). Le transport et l'accumulation des particules de sable conduisent à la formation de dunes de sable.

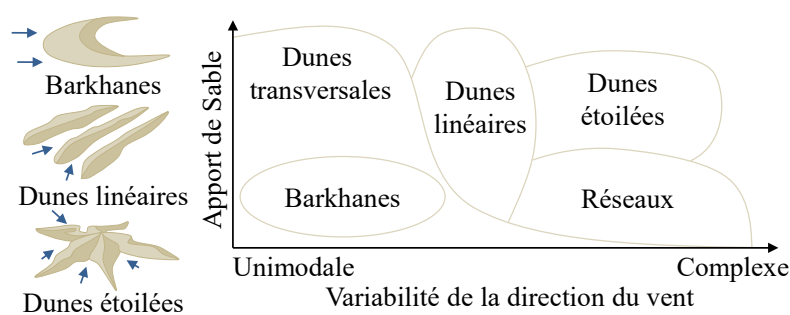


FIGURE 39 : Différents types de dunes, en fonction de la variabilité de la direction du vent et de l'apport en sable.

La complexité et la variabilité de la direction du vent jouent un rôle important dans la formation des différentes dunes (Figure 39) : les dunes transversales et les barkhanes sont formés par des vents unimodaux, c'est-à-dire des vents soufflant d'une seule direction principale, tandis que les dunes en étoile et les réseaux de dunes présentant des structures et des motifs compliqués sont connus pour être façonnés par des régimes de vent complexes, avec des turbulences et des tourbillons locaux, même si le processus exact reste un domaine de recherche actif. Le relief du terrain et la présence de végétation influencent également le transport du sable, et donc les différents types de dunes formées [LBS13]. Les dunes ancrées comme les nabkhas sont celles créées sous l'influence de la végétation [Baa02], par opposition aux dunes libres comme les transversales, les barkhanes et les étoilées.

Représentation du terrain Notre modèle de terrain en couches, désigné par \mathcal{T} , est une grille régulière discrète de taille $n \times n$ cellules. Il est combiné à une structure de données ordonnée multicouche pour représenter les différents matériaux du terrain et la densité des plantes dans chaque cellule (Figure 40). La couche de sable \mathcal{S} représente l'épaisseur des matériaux au-dessus d'une couche de roche \mathcal{B} , qui définit l'altitude de base. Les plantes sont représentées à l'aide d'une couche de densité de végétation générique \mathcal{V} qui prend des valeurs dans $[0, 1]$ et représente la couverture végétale. La résistance du substratum rocheux $\rho : \mathbb{R}^2 \rightarrow [0, 1]$ définit la résistance à l'érosion ; les régions

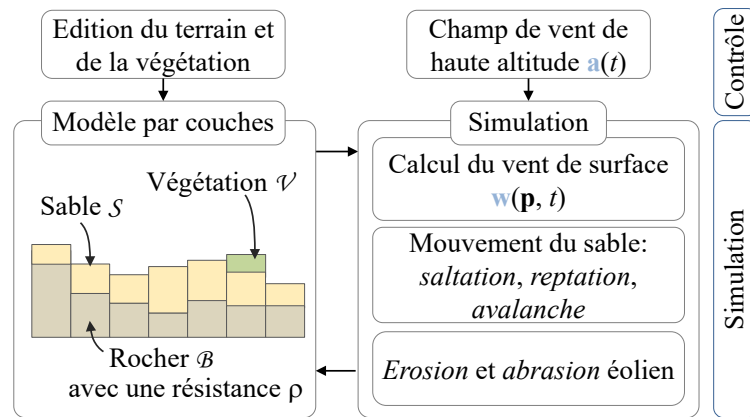


FIGURE 40 : Aperçu synthétique de la simulation.

présentant une résistance élevée à l'érosion ($\rho = 1.0$) sont érodées plus lentement que celles présentant une faible résistance ($\rho = 0.0$).

Simulation du vent et du transport du sable Au cœur de notre méthode se trouve un algorithme de transport de sable basé sur le calcul du vent à la surface du terrain prenant en compte son relief. A chaque pas de temps, l'évolution du modèle de terrain $\mathcal{T}(t + \Delta t)$ est calculé en fonction des conditions de vent $\mathbf{w}(\mathbf{p}, t)$. La Figure 40 présente un aperçu de notre simulation. Étant donné une représentation initiale du terrain en couches et un champ de vent de haute altitude \mathbf{a} , nous calculons un champ de vent variant dans le temps \mathbf{w} sur la surface du terrain (Section 4.2), qui est utilisé pour calculer le mouvement du sable.

Le transport et la collision du sable avec le relief et la végétation forment différents types de dunes (Section 4.3.1), et en même temps érodent le terrain par abrasion (Section 4.3.2). La couche de végétation joue un rôle dans la formation des dunes ancrées comme le nabkha, qui ne se forme qu'autour des plantes, et influence grandement la forme des dunes en empêchant le sable d'être emporté par le vent. Puisque la simulation est effectuée à une échelle de 1 à 10 m par cellule, nous ajoutons finalement des détails procéduraux à la couche de sable pour tenir compte des accumulations autour des plantes et des ondulations du sable (Section 4.4). De manière similaire à [Wer95], notre simulation est effectuée sur un domaine torique : le sable déplacé au-delà d'une limite est transporté vers la limite opposée, ce qui préserve le volume global de sable pendant la simulation. Il est à noter que la couche rocheuse doit être tuilable afin d'éviter les artefacts causés par des élévations différentes sur les côtés opposés.

Contrôle Le régime de vent à haute altitude est défini par une rose des vents qui prescrit la distribution de la direction et de la vitesse du vent dans le temps. À tout moment de la simulation, l'utilisateur peut modifier le champ de vent à haute altitude \mathbf{a} et éditer le champ de vent à la surface du terrain en ajoutant des primitives de vent procédurales locales telles que des tourbillons. De plus, tout au long de la simulation, l'utilisateur a la possibilité d'ajouter ou de supprimer du sable, de sculpter la roche sous-jacente et de modifier la densité de la végétation.

4.2 Calcul du vent en surface

Nous définissons le champ de vent à la surface du terrain $\mathbf{w} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ en construisant un champ de vent de haute altitude, noté \mathbf{a} et calculé à partir d'une distribution de vent (rose des vents), puis en le déformant à différentes échelles en fonction du relief \mathcal{T} . Nous définissons le champ de vent \mathbf{w} comme :

$$\mathbf{w}(\mathbf{p}, t) = \sigma(\mathbf{p}, t) \omega \circ \mathbf{a}(t) + \mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$$

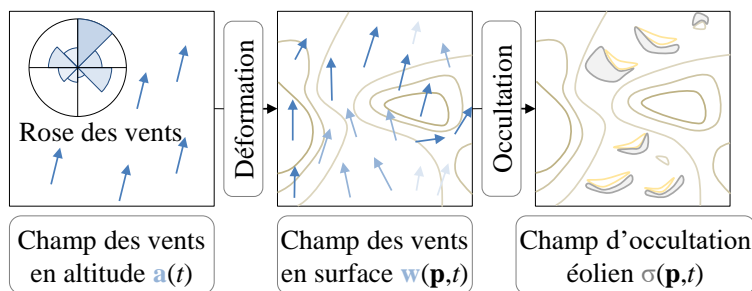


FIGURE 41 : Vue d'ensemble du calcul du champ de vent.

La fonction $\omega : \mathbb{R}^2 \rightarrow \mathbb{R}^2$ désigne une déformation du vent en prenant en compte le relief du terrain à différentes échelles (Figure 41). La fonction $\sigma : \mathbb{R}^3 \rightarrow [0, 1]$ met à l'échelle la vitesse en calculant les effets de protection générés par les caractéristiques d'élévation à petite échelle telles que les dunes de sable et les petites falaises abruptes. Enfin, $\mathbf{u} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ est une perturbation locale du vent contrôlée par l'utilisateur qui lui permet de modifier \mathbf{w} localement, par exemple en ajoutant des tourbillons ou des turbulences. La résolution finale de \mathbf{w} est de $n \times n$, ce qui est identique aux autres couches de sable et de roche de notre simulation.

4.2.1 Champ de vent à haute altitude

Le vent de haute altitude $\mathbf{a} : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}^2$ est approximé comme un vent variant dans le temps de direction et de vitesse uniformes sur le terrain, puisque nous nous sommes concentrés sur des domaines relativement petits (jusqu'à $10 \times 10 \text{ km}^2$).

Dans notre cadre, les utilisateurs peuvent soit spécifier la variation de la direction et de la vitesse dans le temps, soit s'appuyer sur des modèles génériques de régime de vent. Les régimes de vent sont spécifiés par une rose des vents qui représente les distributions des vitesses et des directions du vent (Figure 42). Le diagramme de la rose des vents présente également les plages de vitesse du vent.

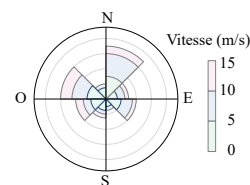


FIGURE 42 : Rose des vents.

4.2.2 Déformation

Le champ de vent de haute altitude \mathbf{a} est ensuite déformé en fonction du relief du terrain à différentes échelles. Par conséquent, nous calculons la fonction d'élévation lissée du terrain à différentes résolutions : si R est un rayon de lissage, nous définissons $\tilde{\mathcal{T}}_i = \mathcal{T} \otimes g_{R_i}$ comme une convolution entre le terrain \mathcal{T} et le noyau gaussien g de rayon R_i .

Nous tenons d'abord compte des effets Venturi, qui accélèrent le vent en altitude, en fonction de l'altitude de base :

$$\mathbf{v}(\mathbf{p}, t) = \mathbf{a}(t) (1 + k_W \mathcal{T}(\mathbf{p}))$$

Le terme k_W est un paramètre d'échelle, fixé à 5×10^{-3} dans notre modèle. Bien que cette équation linéaire ne soit qu'une approximation d'un phénomène physiquement plus complexe, elle se prête à nos objectifs interactifs car elle est efficace et facilement contrôlable.

Nous modifions ensuite la direction du vent en fonction du gradient de la surface du terrain à plusieurs échelles. Nous définissons le vent à la surface comme une somme pondérée :

$$\sum_{i=0}^{i=n} c_i \omega_i \circ \mathbf{v}(\mathbf{p}, t)$$

Le terme $\omega_i \circ \mathbf{v}$ désigne la déformation de \mathbf{v} à l'échelle i pondérée par le coefficient c_i . L'opérateur de déformation est à son tour défini comme suit :

$$\omega_i \circ \mathbf{v}(\mathbf{p}, t) = (1 - \alpha) \mathbf{v}(\mathbf{p}, t) + \alpha k_{\mathcal{T}_i} \nabla \tilde{\mathcal{T}}_i^\perp(\mathbf{p}) \quad \alpha = \|\nabla \tilde{\mathcal{T}}_i(\mathbf{p})\|$$

Le terme $k_{\mathcal{T}_i}$ est un coefficient de déviation fixé par l'utilisateur, et α la pente normalisée du terrain lissé. Le terme $\nabla \tilde{\mathcal{T}}_i^\perp(\mathbf{p})$ désigne le vecteur orthogonal au gradient du terrain dans la direction de \mathbf{v} , donc $\mathbf{v} \cdot \nabla \tilde{\mathcal{T}}_i^\perp(\mathbf{p}) > 0$. Dans nos expériences, nous avons utilisé $n = 2$: les rayons de convolution ont été fixés à 200 m et 50 m, avec des poids correspondants de 0.8 et 0.2, et des coefficients de déviation de 30.0 et 5.0 respectivement. Cela nous permet de rediriger le vent par rapport aux montagnes et aux petites falaises ou mesas.

Ombre du vent

L'ombre du vent se produit en protection du relief ou de la végétation, c'est-à-dire dans les zones où le flux du vent a été suffisamment ralenti pour supprimer tout transport supplémentaire de sable. Ce phénomène complexe est fondamental dans la formation de toutes les dunes de sable [Baa02].

Dans notre simulation, nous nous conformons aux expériences en géomorphologie démontrant que l'ombrage du vent a lieu sous un angle

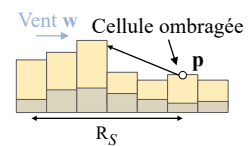


FIGURE 43 : Ombrage de la dune.

d'accessibilité de 15 degrés. Par conséquent, l'ombre du vent en un point \mathbf{p} est approximée à l'aide d'une fonction d'amortissement $\sigma(\mathbf{p})$, calculée comme suit. En partant de \mathbf{p} , nous marchons dans la direction opposée de $\mathbf{w}(\mathbf{p}, t)$ et vérifions l'intersection avec le terrain (Figure 43). La distance maximale est définie par un rayon de contrôle R_s , fixé à 10 m dans notre simulation, et le pas de marche est fixé à 0.5 m. Nous conservons le point \mathbf{q} présentant la différence d'élévation maximale par rapport à \mathbf{p} , et calculons l'angle α comme suit :

$$\tan \alpha = (\mathcal{T}(\mathbf{p}) - \mathcal{T}(\mathbf{q})) / (\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|)$$

Nous calculons finalement l'ombrage comme l'interpolation linéaire entre 10 et 15 degrés de l'angle α .

Notez que le calcul de \mathbf{w} est effectué à chaque étape de la simulation afin de prendre en compte le champ de vent de haute altitude variable dans le temps \mathbf{a} , ainsi que le mouvement constant des dunes de sable, qui entraîne différents effets de déformation et d'ombrage au fur et à mesure de l'évolution du paysage. Bien que cette mise à jour soit gourmande en calculs, notre approche multi-échelle génère des effets de transport de sable réalistes en pondérant les obstacles en fonction de leur taille : une petite colline n'a pas le même impact sur la direction du vent qu'un sommet de montagne.

4.2.3 Contrôle

Le champ de perturbation contrôlé par l'utilisateur $\mathbf{u} : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}^2$ est construit en combinant des primitives de vent procédurales variant dans le temps, comme présenté dans [BHN07]. Cette approche permet un bon contrôle de l'utilisateur sur le processus de simulation et garantit que $\mathbf{u}(\mathbf{p}, t)$ est sans divergence. Le champ de perturbation offre à l'utilisateur un contrôle local et lui permet d'ajouter des tourbillons ou des turbulences à des endroits prescrits, ce qui est important pour certains phénomènes spécifiques tels que les dunes asymétriques transversales ou en étoile (Section 4.5).

4.3 Simulation du sable

Notre modèle de transport de sable implique trois mouvements de sable différents : la *saltation*, la *reptation* et l'*avalanche* qui sont modélisés comme des processus stochastiques (Figure 44). Le processus fondamental de transport du sable conduisant à la formation des dunes est la *saltation* (Section 4.3.1).

Selon sa force, le vent peut soulever et transporter le sable dans sa direction, rebondissant éventuellement plusieurs fois avant de se déposer à un autre endroit. À leur tour, ces rebonds et dépôts produits par la *saltation* peuvent déclencher la *reptation*, également appelée *creep*, qui est le mouvement des grains de sable vers des positions adjacentes lors de l'impact d'autres grains de sable. Enfin, lorsque le sable déposé crée une pente locale supérieure au seuil de l'angle de repos, des événements d'*avalanche*

sont déclenchés. Notez que la *saltation* déplace le sable dans la direction du vent, alors que la *reptation* et l'*avalanche* peuvent le transporter dans des directions différentes.

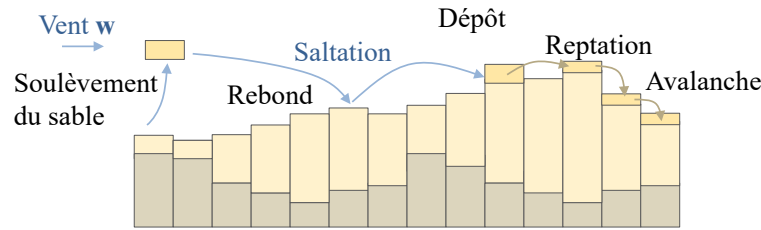


FIGURE 44 : Processus impliqués dans le transport du sable : la saltation soulève le sable dans l'air et le transporte sur quelques mètres, éventuellement avec de multiples rebonds. Le dépôt se fait finalement selon des règles stochastiques impliquant la présence de sable, de végétation et d'ombrage par le vent. La reptation est déclenchée par le dépôt de sable à la fin de la saltation.

Le vent érode également la surface du terrain par des processus de déflation et d'abrasion. Dans notre modèle, l'érosion éolienne se produit chaque fois qu'une petite quantité de sable soufflé par le vent est transportée sur un substrat rocheux nu (Section 4.3.2).

4.3.1 Transport du sable

Pour chaque cellule C de la grille, nous déclenchons successivement une série d'événements en fonction du vent de surface $\mathbf{w}(\mathbf{p})$ à l'emplacement de la cellule en commençant par la saltation. Une petite quantité fixe de sable, souvent appelée *slab* en géomorphologie [Wer95], est soulevée et déplacée sur la grille par des rebonds successifs de saltation, déclenchant à leur tour des événements de reptation jusqu'à ce que le sable soit finalement déposé au sol, ce qui pourrait engendrer des événements d'avalanche.

La Saltation est approximée comme un événement stochastique en trois étapes sur une cellule donnée C . Tout d'abord, une étape de *soulèvement* enlève une petite quantité de sable ϵ_S . Ensuite, le vent transporte cette quantité ϵ_S vers une cellule cible appelée \mathcal{N} située à $\mathbf{q} = \mathbf{p} + d \circ \mathbf{w}(\mathbf{p}, t)$ où d représente la fonction de distance de saltation du vent. Dans notre modèle, la distance de saltation est linéaire par rapport à l'intensité du vent $\|\mathbf{w}(\mathbf{p}, t)\|$ et transporte le sable dans sa direction. Lorsque cette plaque de sable touche le sol, elle peut soit rebondir, soit se déposer sur le sol selon une probabilité β . Cette probabilité dépend de l'ombre du vent $\sigma(\mathbf{q})$, de la présence de sable $\mathcal{S}(\mathbf{q}, t)$ et de la densité de végétation $\mathcal{V}(\mathbf{q}, t)$ de la cellule cible \mathcal{N} :

$$\beta = \sigma(\mathbf{q}) + f_S(\mathcal{S}(\mathbf{q}, t)) + f_V(\mathcal{V}(\mathbf{q}, t))$$

Notez que nous fixons la valeur de β dans l'intervalle $[0, 1]$. Les fonctions de transfert f_S et f_V sont définies comme suit. Suivant [Wer95], nous modélisons f_S comme la fonction échelon $f_S(0) = 0.4$ et $f_S(x) = 0.6$ pour $x > 0$. L'action de la saltation est plus intense dans les endroits où la végétation est plus clairsemée puisque les grains de sable sont non consolidés, nous avons donc utilisé une fonction

décroissante linéaire : $f_V(x) = 1 - x$ pour le terme de densité de végétation. Dans notre modèle, la valeur de ϵ_S est fixée à 0.1.

La Reptation est un processus par lequel les grains de sable entrent en collision avec d'autres grains lors des rebonds dans la saltation, ce qui les incite à se déplacer dans la direction de la pente. La reptation est le deuxième processus clé du transport de sable, après la saltation. C'est aussi, avec l'*avalanche*, un processus par lequel les grains de sable peuvent se déplacer latéralement dans la direction du vent. Nous modélisons la reptation comme un événement stochastique qui est déclenché par les rebonds et les dépôts de sable pendant le transport par saltation. Dans les mouvements de reptation, une petite quantité de sable ϵ_R est déplacée vers des positions voisines en fonction de la pente. Dans notre modèle, nous transportons le sable vers les n voisins les plus pentus de la cellule actuelle, et distribuons la quantité ϵ_R (fixée à 0.1 dans notre simulation) à chaque voisin proportionnellement à leur pente, de sorte que les voisins les plus pentus reçoivent plus de sable par reptation. Nous avons constaté empiriquement que $n = 2$ était suffisant pour rendre compte de la nature chaotique de ce phénomène ; l'ajout de plus de voisins peut entraîner des oscillations et des artefacts visuels. La végétation influence également la *reptation* puisqu'elle protège et retient le sable contre le vent. Dans notre implémentation, la probabilité β_R d'un événement *reptation* est définie comme : $\beta_R = 1 - \mathcal{V}$.

L'avalanche se produit lorsque la pente locale $s(\mathbf{p})$ du sable est supérieure à un seuil donné défini par l'angle de repos : $s(\mathbf{p}) > \tan \alpha$ (Figure 45). Le sable glisse uniquement dans la direction de la pente la plus raide, ce qui fait de l'avalanche un processus déterministe par opposition à la saltation et à la reptation. Le processus d'avalanche participe à la formation de dunes et d'éboulis lors de falaises abruptes (Figure 47). Lorsque la *saltation* a transporté du sable d'une cellule à l'autre, nous vérifions la stabilité des deux cellules et déclenchons des glissements de sable si nécessaire. Nous modélisons ce processus de la même manière que le processus de stabilisation du matériau granulaire décrit dans [Cor+17b] en vérifiant la stabilisation de chaque cellule, en propageant le matériau vers les cellules voisines et en déclenchant des événements d'avalanche sur ces mêmes cellules.

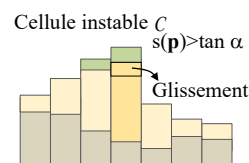


FIGURE 45 : Avalanche.

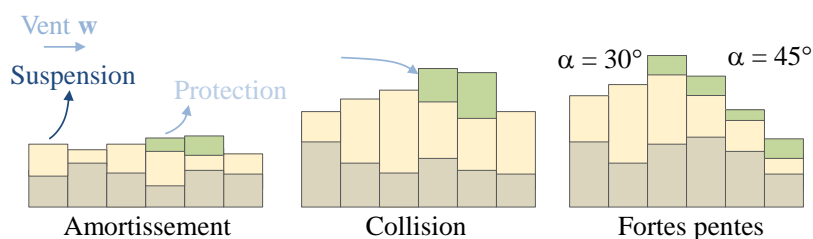


FIGURE 46 : La végétation limite le soulèvement des particules de sable lors de la saltation, diminue la probabilité de rebond et empêche l'avalanche et la reptation.

La végétation empêche l'avalanche en retenant le sable (Figure 46). Dans notre modèle, la densité de la végétation modifie la valeur seuil de l'angle de repos : nous interpolons linéairement entre $\alpha = 30$ pour le sable nu et $\alpha = 45$ pour le sable couvert de végétation ($\mathcal{V} = 1$).

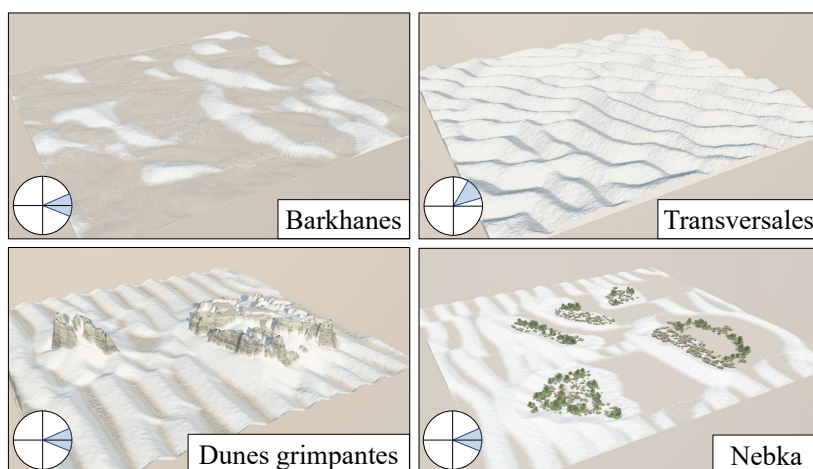


FIGURE 47 : Notre méthode génère différents types de dunes : les dunes libres telles que les barkhanes et les dunes transversales (rangée du haut) se forment avec des conditions de vent uniformes, les dunes ancrées sont influencées par leur environnement, les dunes grimpantes apparaissent au pied de petites falaises, et les nabkhas sont créées près de la végétation.

Paramètres Les modèles existants en géomorphologie sont souvent sans dimension, ce qui leur permet de reproduire différents phénomènes se produisant à différentes échelles, comme les dunes de sable et les ridules sur de sable. Nous avons examiné plusieurs études en géomorphologie pour déterminer les paramètres de nos simulations. Dans les déserts, les grains de sable sont soulevés par le vent et ensuite transportés sur de courtes distances. En fixant un pas de temps $\Delta t = 10$ jours et une distance maximale de saltation de $d_0 = 8$ m (par itération), une dune barkhane entière se déplace de ≈ 25 mètres en un an, ce qui est cohérent avec les observations faites sur ce type de dunes [Gro+08]. Notez que ce paramètre dépend fortement du régime de vent et de l'approvisionnement moyen en sable et n'est valable que dans le contexte des déserts arides.

4.3.2 Abrasion de la roche

L'abrasion est l'érosion de la roche par le vent, plus précisément par le sable qui frappe la surface et rebondit pendant la *saltation*. Les formes de relief typiques du désert, comme les yardangs et les ventifacts présents dans le désert de Gobi, sont produites par l'action du vent. Un yardang est une protubérance profilée creusée dans le substrat rocheux par l'action du vent. Dans les zones où l'approvisionnement en sable est faible et la vitesse du vent élevée, le sable transporté par le vent frappe la roche-mère, érodant ainsi la surface. La roche-mère plus tendre s'érode plus rapidement, ce qui entraîne la création d'un relief caractéristique, comme le montre la Figure 49.

Nous simulons l'abrasion du substrat rocheux pendant l'étape de *saltation* où le sable se déplace d'une cellule à l'autre avec éventuellement de multiples rebonds (Figure 48). Si un rebond se produit sur une cellule C avec une faible épaisseur de sable ($s(\mathbf{p}) < 25$ cm), nous déclenchons un événement d'abrasion pour cette cellule.

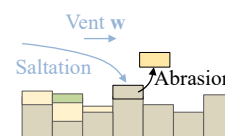


FIGURE 48 : Abrasion.

Le processus d'abrasion transforme une petite quantité ϵ de substrat rocheux en sable, qui peut être transporté par le vent dans les étapes de saltation futures et se stabiliser selon le processus d'*avalanche*. La quantité de matériau érodé ϵ est calculée en fonction de la vitesse du vent, de la résistance du substrat rocheux et de la densité de la végétation :

$$\epsilon = k_a (1 - \rho(\mathbf{p})) \|\mathbf{w}(\mathbf{p})\| (1 - \mathcal{V}(\mathbf{p}))$$

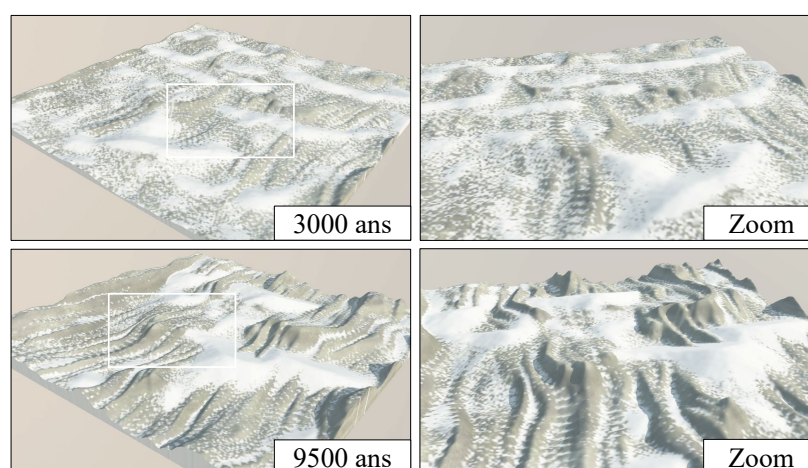


FIGURE 49 : Des Yardangs modélisés dans notre simulation avec de grands pas de temps. L'abrasion façonne la couche rocheuse en lignes parallèles à la direction principale du vent pendant la saltation, en fonction de la résistance du substratum rocheux (définie ici par un bruit), montrant l'empreinte du vent.

L'abrasion est plus importante lorsque la vitesse du vent de surface \mathbf{w} est élevée. Le terme $(1 - \rho(\mathbf{p}))$ indique que l'abrasion est moins intense car la roche-mère est plus résistante. La végétation amortit l'abrasion et agit comme un bouclier, protégeant la surface du substratum rocheux. L'abrasion peut éroder jusqu'à 4 millimètres de roche par an [CWG06], et agit donc sur une plus grande échelle de temps que la saltation et la reptation. La constante k_a , fixée à 12.5 dans notre modèle, est un facteur défini par l'utilisateur utilisé pour accélérer les effets de l'abrasion dans notre simulation ($\Delta t = 125$ jours dans le cas de l'abrasion). Dans notre modèle, l'abrasion ne tient pas compte de l'angle entre le vent et la surface et notre cadre permettrait des modèles plus complexes prenant en compte la courbure ou la pente du terrain.

4.4 Amplification

Rappelons que notre simulation génère une représentation multicouche des paysages désertiques à une résolution de 1 à 10 m par cellule de grille. Les détails plus petits, tels que les ondulations du sable ou l'accumulation de sable à la base d'obstacles plus petits, comme les plantes, sont générés de manière procédurale en tant qu'étape de post-traitement. Par conséquent, l'élévation finale du sable est définie comme suit : $\tilde{S} = S + \mathcal{R} + \mathcal{B}$ où \mathcal{R} et \mathcal{B} désignent les ondulations du vent et les bosses de sable causées par les petits obstacles.

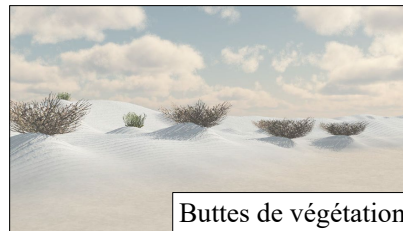


FIGURE 50 : Des buttes de sable procédurales situées autour des plantes.

Les ondulations sur le sable sont plus petites que les dunes, avec une largeur comprise entre 1 et 20 cm. Dans notre implémentation, nous définissons la présence et la forme des ridules en fonction de la direction du vent. Nous établissons une relation linéaire entre la taille de l'ondulation r et la vitesse du vent $\|\mathbf{w}\|$. Des profils d'ondulations asymétriques sont observés lorsque le vent souffle dans une seule direction, alors que des ondulations symétriques se forment lorsque le vent souffle dans plusieurs directions (Figure 51 à droite). Des ondulations parallèles asymétriques sont générées et orientées orthogonalement à la direction du vent $\mathbf{u} = \mathbf{w}^\perp$. Nous pondérons également la présence de ridules en fonction de l'effet d'ombre du vent sur le relief des dunes.

Les petites accumulations de sable qui se forment près des rochers et des plantes résultent de la collision entre le sable transporté par le vent et les obstacles. Le sable s'accumule aux alentours des obstacles, le déplacement du sable et les ondulations sont atténués derrière ces obstacles. Dans notre modèle, nous approximations ces effets en générant procéduralement le déplacement du sable selon les champs de vent et de sable \mathbf{w} et s respectivement. Les bosses de sable asymétriques sont définies en mélangeant deux primitives ponctuelles (Figure 50).

4.5 Résultats

Nous avons mis en œuvre notre méthode en C++. Les expériences ont été réalisées sur un ordinateur de bureau équipé d'un Intel® Core i7, cadencé à 4GHz avec 16GB de RAM, et d'une carte graphique NVidia GTX 970.

Notre méthode est la première capable de générer une variété de paysages désertiques en informatique graphique. Les figures 47 et 51 montrent la variété des dunes de sable qui peuvent être

Scène	Figure	Taille	Grille	Temps étape	Temps
Dunes	47	0.5×0.5	512	0.12	36
Yardangs	49	1×1	512	0.53	371
Montagnes	51	4×4	1024	0.60	300

TABLE 4.1 : Statistiques pour les scènes présentées : Taille de la scène (en km), discrétisation de la grille, temps moyen d'une étape de simulation (en secondes) et temps total de la simulation (en secondes).

obtenues avec notre simulation. Les figures 49 et 52 montrent des interactions complexes entre le substrat rocheux et le sable avec différentes conditions de régime de vent prescrites par l'utilisateur. La figure 53 montre plusieurs étapes temporelles d'une session d'édition et démontre les capacités de notre modèle en ce qui concerne l'édition interactive et le réglage fin par un utilisateur expérimenté. Le tableau 4.1 présente les statistiques pour les différentes scènes présentées dans le chapitre. Les simulations ont été réalisées avec des cellules d'une taille comprise entre 1 et 10 m. La scène du yardang (Figure 49), qui présente une abrasion du substrat rocheux, a nécessité le calcul du vent w en fonction de la variation du substrat rocheux à chaque itération, d'où un temps d'itération plus élevé.

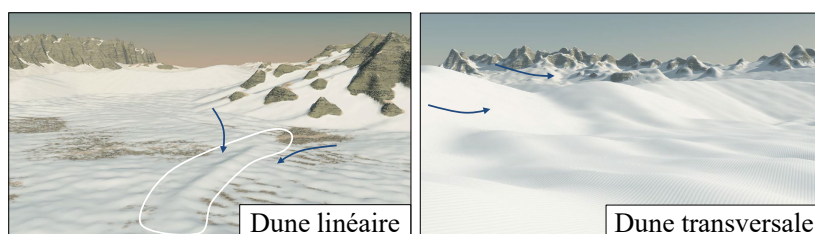


FIGURE 51 : Dune linéaire formée par des vents de directions opposées, et vue rapprochée d'une méga-dune transversale.

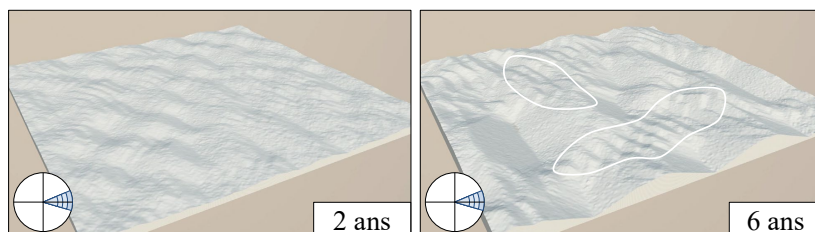


FIGURE 52 : En utilisant un régime de vent à grande vitesse augmentant linéairement avec le temps, nous sommes en mesure de produire des dunes à plusieurs échelles comme celles que l'on trouve dans la nature.

4.5.1 Contrôle

L'utilisateur peut modifier de manière interactive l'apport de sable à n'importe quelle cellule, ainsi que la densité de la végétation pendant la simulation. La direction du vent, qui est l'élément clé des paysages éoliens, peut également être modifiée à tout moment. Une simulation interactive est une composante nécessaire de notre modèle : les dunes de sable émergent et disparaissent rapidement en fonction du régime des vents, ce qui rend nécessaire un retour visuel interactif pour permettre à l'utilisateur d'atteindre son objectif particulier.

La figure 53 présente une variété de mécanismes de contrôle et les paysages désertiques qui en résultent. Ici, le concepteur a modélisé un terrain aride recouvert d'une couche de sable peu épaisse, créant ainsi des dunes de barkhanes. Elle a ensuite déclenché une abrasion qui a produit des yardangs, qui ont ensuite été recouverts en ajoutant plus de sable pour obtenir des dunes transversales. Des nabkhas ont été créées en augmentant la densité de la végétation, et enfin des dunes étoilées complexes en jouant avec différents régimes de vent.

L'utilisateur peut également modifier l'élévation de la couche rocheuse pour créer des caractéristiques telles que des dunes qui retombent ou qui grimpent d'un socle rocheux (Figure 47).

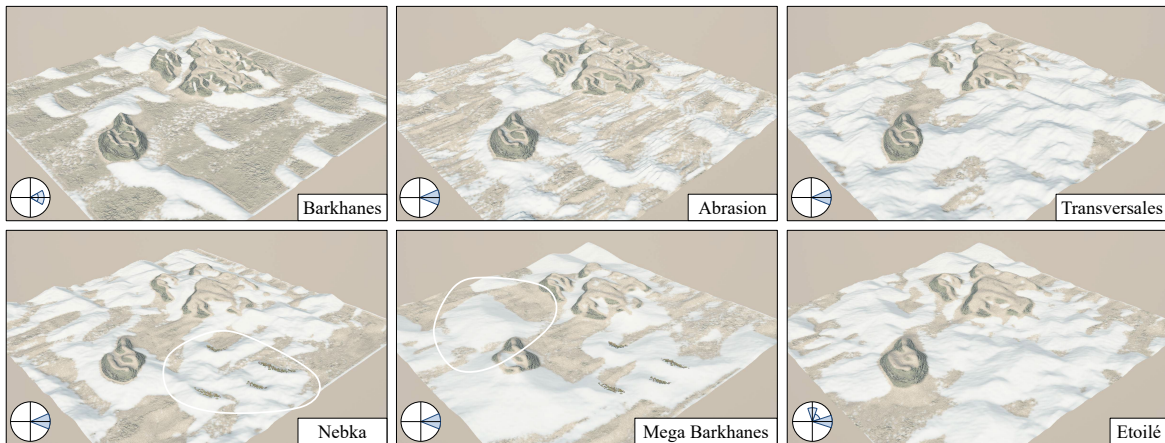


FIGURE 53 : À partir d'un socle rocheux nu recouvert d'une petite quantité de sable, des barkhanes sont apparues en raison de la faible quantité de sable et de l'uniformité des conditions de vent. L'utilisateur a ensuite déclenché l'abrasion qui a formé des formes parallèles à la direction du vent. Ensuite, du sable a été ajouté uniformément sur l'ensemble de la scène, ce qui a transformé les barkhanes en dunes transversales. De la végétation a ensuite été ajoutée sur le côté droit de la scène, ce qui a donné naissance à la nabkha. Des méga-barkhanes ont commencé à apparaître après de nombreuses itérations, comme on peut l'observer dans la nature. Enfin, l'utilisateur a retiré du sable pour obtenir une couche de sable plus uniforme, a détruit la végétation et a créé de grandes dunes en modifiant les paramètres de la rose des vents.

4.5.2 Validation

La figure 54 montre une comparaison entre des dunes de barkhanes réelles et synthétisées. Bien que notre méthode manque de crêtes nettes en raison de la résolution insuffisante de la grille, nous parvenons à capturer la forme générale et l'emplacement des dunes. En outre, nous sommes en mesure de recréer un grand nombre de caractéristiques du désert : dunes transversales, barkhanes, linéaires, grimpantes et étoilées, ainsi que les yardangs produits par l'abrasion, comme le montrent les figures 47, 49, 51 et 53. Cela valide qualitativement la cohérence globale de notre simulation. Nous avons réussi à reproduire des phénomènes complexes et les résultats sont cohérents avec les observations et les simulations numériques réalisées en géomorphologie [Wer95 ; Baa02 ; Mom+00].

Une validation quantitative plus complète de l'approche est difficile : les données d'élévation actuellement disponibles ne sont pas suffisamment précises pour capturer les formes détaillées des



FIGURE 54 : Comparaison des dunes de Barkhanes réelles (à gauche) et synthétisées (à droite) ; aucune interaction avec l'utilisateur n'a été nécessaire pour créer cette scène.

reliefs désertiques. Une comparaison avec des élévations réelles denses et précises serait une piste de recherche intéressante qui mériterait d'être étudiée.

4.5.3 Comparaison avec d'autres techniques

Notre modèle était le premier à capturer une telle variété de reliefs désertiques. Les méthodes précédemment publiées se concentrent sur l'érosion hydraulique ou thermique générique générant principalement des chaînes de montagnes alpines.

Les travaux antérieurs traitant directement du processus de saltation [ON00 ; BR04] ciblent l'application spécifique des ondulations de sable à une échelle bien inférieure à celle de notre méthode. En revanche, notre approche est plus générale et permet donc d'obtenir un plus large éventail de caractéristiques du désert. D'autres travaux spécifiques ne s'appliquent qu'à une gamme limitée de ventifacts tels que les Gobelins [Bea+07 ; Jon+10] qui appartiennent également à la classe des phénomènes à petite échelle. Dans un sens, ces travaux peuvent être considérés comme complémentaires aux nôtres, car ils pourraient être utilisés pour amplifier les paysages désertiques avec des détails.

Le travail de [Cor+17b], qui combine l'érosion du terrain (hydraulique, thermique et foudre) et la simulation de l'écosystème dans un cadre unifié, est plus proche de l'esprit de notre approche. Notre méthode prolonge ces travaux et pourrait s'y intégrer de manière transparente car elle repose également sur la définition d'événements stochastiques.

Des travaux récents [Ros+24] peuvent également compléter nos recherches en se concentrant sur des échelles plus réduites pour examiner la déposition de sable autour des obstacles. Les auteurs ont développé un modèle volumique du vent plus complexe à évaluer permettant de capturer des phénomènes issus de vortex, mais augmente le coût en temps de calcul et réduit ainsi la taille des scènes à modéliser.

4.6 Conclusion et perspectives

Notre modèle est polyvalent et est capable de générer différents types de dunes ainsi que les effets d'abrasion sur le substrat rocheux. Cependant, l'obtention d'une scène de conception spécifique à

partir d'une simulation reste une tâche difficile de part le contrôle indirect qui est offert, nécessitant de nombreux essais et erreurs, en particulier pour les formes de dunes complexes.

Notre modèle présente encore certaines limitations. La grille de simulation est restreinte à une résolution de 1024×1024 dans le but de maintenir un temps de calcul acceptable et de permettre une édition ainsi qu'un contrôle interactifs simultanés. Bien que l'implémentation soignée de l'algorithme sur du matériel graphique puisse accélérer la simulation, elle demeurera cependant limitée à un ordre de grandeur similaire. Pour progresser, de nouvelles approches doivent être envisagées afin d'améliorer la capacité de modélisation pour des scènes de plus grande taille, ou encore pour atteindre un niveau de précision et de réalisme supérieur. Voici quelques axes d'amélioration pour faciliter le travail à plusieurs échelles, prendre en compte les matériaux transportés par des vents différents, ou encore intégrer la représentation de formes volumiques :

- Les simulations actuelles présentent deux lacunes majeures : une complexité de calcul considérable pour produire des résultats réalistes et un manque de finesse dans les détails, dû à leur application à une résolution fixe. Tandis que les calculs intensifs entravent toute forme d'interactivité, le manque de détails restreint intrinsèquement la perception du réalisme dans les scènes virtuelles. Une piste de recherche envisagée vise à simplifier les processus de simulation des dunes afin de permettre une création interactive des scènes sur des échelles plus importantes, tout en conservant un contrôle précis sur les détails à une échelle réduite. Une stratégie consiste à modifier la dynamique de la simulation en exploitant les capacités du matériel graphique pour accélérer les calculs, puis à combiner cette simulation avec des détails procéduraux. Cette approche implique d'enregistrer les propriétés de simulation à une échelle donnée et de les utiliser pour générer de manière cohérente les niveaux de détail inférieurs.
- Un aspect nécessitant une étude plus approfondie concerne la modélisation des ventifacts à différentes échelles, allant des yardangs à méso-échelle jusqu'aux méga-yardangs à grande échelle. Il ne suffit pas de simplement générer des protubérances profilées largement érodées par le vent ; il est également essentiel de définir dans le modèle l'apparence des roches vieilles et altérées au fil du temps, ainsi que les divers épisodes d'érosion. Dans ce contexte, les représentations volumétriques joueront un rôle central pour améliorer la précision, en utilisant des objets géométriques à méso-échelle enrichis de textures localisées plus petites. Une représentation volumétrique de la scène exige une modélisation volumique du vent, et par conséquent, des simulations bien plus complexes. L'objectif demeure de fournir aux artistes des méthodes contrôlables et physiquement cohérentes pour générer des ventifacts, des yardangs et des hoodoos, nécessitant ainsi des ajustements et des paramètres de contrôle adaptés aux différentes échelles.

GLACIERS

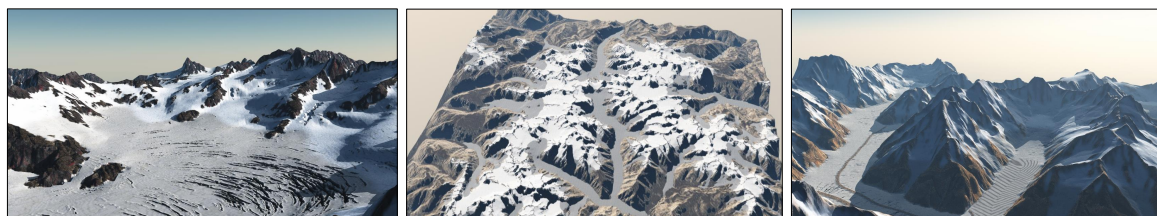


Table des matières

5.1	Principe général	64
5.2	Dynamique des glaciers	65
5.3	Simulation de glaciers	68
5.4	Modélisation des caractéristiques des glaciers	71
5.5	Résultats	76
5.6	Conclusion et perspectives	81

Les glaciers font partie des éléments les plus attrayants et les plus pittoresques des régions froides et des paysages de haute montagne. Bien que les terrains couverts de neige aient déjà fait l'objet d'une attention particulière dans le domaine de l'infographie [Nis+97 ; Fea00 ; Moe+05 ; Sto+13 ; Cor+18], nos travaux ont visé à obtenir un suivi de l'évolution temporelle des glaciers ainsi que la modélisation de leur large éventail de caractéristiques.

La méthode proposée permet de gérer interactivement la création du glacier en combinant une simulation par une méthode d'approximation de glaces peu profondes (Shallow Ice Approximation ou SIA) combiné avec un processus d'amplification procédurale pour créer des glaciers réalistes à haute résolution. Cette approche multi-résolution autorise la simulation interactive de la formation et de l'évolution des glaciers sur plusieurs centaines d'années. Toujours soucieux du contrôle utilisateur, j'ai mis en place des paramètres de contrôle permettant de modifier les variables environnementales telles que la température moyenne ou le taux de précipitation, afin de réguler la croissance du glacier, ou d'utiliser directement des pinceaux pour façonner la glace ou le substrat rocheux avec un retour interactif.

Ces recherches ont été publiées dans le journal TOG [Arg+20] et ont été présentées lors de la conférence Siggraph Asia. Des travaux additionnels ont été entrepris pour prendre en considération l'érosion du terrain [Cor+23], cependant cette partie n'est pas détaillée dans ce chapitre car non orientée sur l'amplification de paysages.

5.1 Principe général

Un glacier est un corps de glace dense, formé dans des endroits où l'accumulation de neige est plus importante que l'ablation. La neige fraîche accumulée exerce une pression sur les couches de neige plus anciennes, ce qui la compacte et la transforme finalement en bloc de glace. Cette glace se déforme en raison des contraintes induites par la gravité, et descend donc constamment sous l'effet de son propre poids.

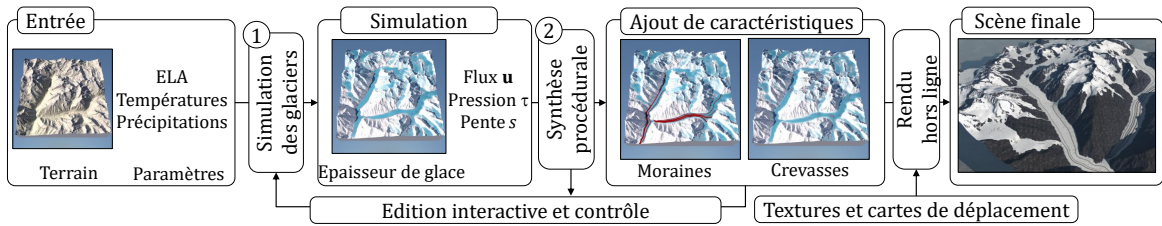


FIGURE 55 : Aperçu de notre méthode : étant donné un terrain d'entrée \mathcal{T} , des paramètres climatiques tels que la température moyenne et le gradient de température, des régions de contrôle prescrites par l'utilisateur pour l'amortissement et l'amplification de la fonte, notre méthode génère une couche de glace à basse résolution (≈ 120 m par cellule) à l'aide d'une simulation SIA. Cette représentation est amplifiée de manière procédurale pour obtenir un modèle de glace à haute résolution (≈ 30 m par cellule) comportant des détails tels que les chutes de glace, les crevasses et les moraines.

Les glaciers peuvent être classés en différentes catégories en fonction de leur morphologie. Les glaciers de vallée ou glaciers de montagne se forment sur de nombreuses chaînes de montagnes et sont contraints par la topographie du terrain : ils prennent naissance sur les pentes supérieures des montagnes et dans les cirques (têtes de vallée en forme de bol) et s'écoulent le long de la vallée (Figure 56). Les champs de glace sont de plus grandes zones de glaciers interconnectés qui s'étendent sur les crêtes des montagnes, seuls les sommets et les crêtes les plus élevés sont exposés. En revanche, les calottes et les nappes glaciaires submergent complètement le terrain sous-jacent, créant une forme de dôme qui s'étend à partir du centre. Ce travail s'est concentré principalement sur les glaciers de montagne et les champs de glace, bien que les calottes et les nappes glaciaires puissent également être générées.

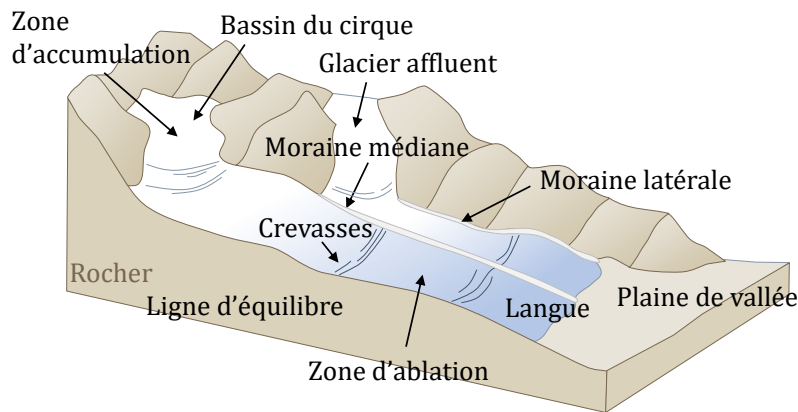


FIGURE 56 : Représentation symbolique d'un glacier et de ses principales caractéristiques.

Notre méthode calcule l'évolution temporelle d'un champ de glace $\mathcal{H}(t)$ représentant le glacier couvrant un terrain statique \mathcal{T} sous l'influence de la température et des précipitations. Deux étapes sont combinées (Figure 55) : une simulation basée sur la physique pour calculer l'évolution du glacier dans le temps, dont la sortie est directement transmise à un algorithme de génération procédurale pour synthétiser la couche de glace haute résolution amplifiée par la création de détails tel que des crevasses, des moraines ou des ogives.

Simulation Notre modèle utilise un champ d'altitude en couches : à chaque pas de temps, la scène est constituée d'une couche de roche discrète \mathcal{B} et d'une couche de glace variable dans le temps $\mathcal{H}(t)$ composée de $n \times n$ cellules. À partir d'une carte d'élévation (réelle ou synthétique) et éventuellement d'une couche initiale d'épaisseur de glace \mathcal{H} , la simulation calcule l'évolution du champ de glace $\mathcal{H}(t + \delta t)$ à partir de $\mathcal{H}(t)$ selon les paramètres de contrôle et en utilisant le modèle SIA (Section 5.2). Nous employons une méthode multirésolution pour accélérer les calculs et obtenir une couche de glace haute résolution couvrant le terrain. La simulation étant interactive, à tout moment, l'utilisateur peut faire une pause, reprendre, redémarrer ou ajuster les paramètres.

Modélisation des caractéristiques des glaciers La simulation de l'interaction entre la glace et l'écoulement pour créer des caractéristiques complexes telles que les crevasses serait impossible à calculer sur de grandes étendues. Par conséquent, nous proposons une approche procédurale pour modéliser les caractéristiques détaillées des glaciers. À partir des données de simulation, de la couche de glace \mathcal{H} de la simulation et d'autres informations utiles telles que la direction de l'écoulement de la glace ou la contrainte de cisaillement, nous dérivons des cartes de densité pour les différentes caractéristiques glaciaires telles que les crevasses, les ogives ou les moraines (Section 5.4). Nous utilisons ensuite ces cartes pour localiser les caractéristiques et synthétiser le paysage final à haute résolution.

Contrôle Du point de vue de la création, nous proposons deux modes de contrôle. L'utilisateur peut modifier les paramètres de simulation qui ont une influence très intuitive sur la forme des glaciers. Plus précisément, il est possible de modifier la ligne d'équilibre, qui est le principal paramètre influençant la forme du glacier : l'utilisateur peut changer la ligne à tout moment de la simulation ou spécifier une carte de déviation pour créer des effets localisés intéressants. L'utilisateur peut également modifier de manière interactive les cartes de densité des éléments, ce qui lui permet de contrôler directement le placement final des éléments.

5.2 Dynamique des glaciers

Je présente maintenant certains des concepts fondamentaux nécessaires à la simulation de l'évolution d'un glacier. Pour une compréhension plus approfondie, je renvoie le lecteur aux manuels de glaciologie tels que [BG11 ; CP10].

Les glaciers se forment dans des régions où la quantité de neige accumulée est supérieure à la quantité de neige retirée (c'est-à-dire fondue ou sublimée) au cours d'un cycle annuel. La neige accumulée est progressivement compactée en glace, qui se déforme ensuite sous son propre poids, provoquant une lente descente. La différence entre l'accumulation et l'ablation à une position \mathbf{p} est appelée le bilan massique $\dot{m}(\mathbf{p})$, et varie sur la surface \mathcal{G} d'un glacier définissant la zone d'accumulation $\mathcal{G}_A = \{\mathbf{p} | \dot{m}(\mathbf{p}) > 0\}$, la zone d'ablation $\mathcal{G}_B = \{\mathbf{p} | \dot{m}(\mathbf{p}) < 0\}$ et l'altitude de la ligne d'équilibre ELA = $\{\mathbf{p} | \dot{m}(\mathbf{p}) = 0\}$ (Figure 57).

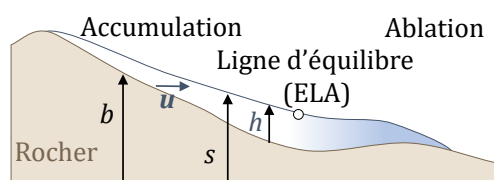


FIGURE 57 : Notations pour les différentes régions d'un glacier.

La gravité entraîne la déformation de la glace, créant une contrainte de cisaillement. En réponse, la glace s'écoule selon trois mécanismes [BG11] : la déformation interne, le glissement basal et la déformation du socle rocheux. Cet écoulement peut être modélisé à l'aide des équations complètes de Stokes pour un fluide incompressible, visqueux et non-newtonien comme suit :

$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{u} &= 0 \\ 0 &= -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau}_{ij} + \rho g \\ \dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij} &= A \tau^{n-1} \boldsymbol{\tau}_{ij}\end{aligned}\tag{5.1}$$

où \mathbf{u} est la vitesse, p la pression, ρ la densité de la glace et g l'accélération de la gravité. La première équation est la condition d'incompressibilité. La seconde représente l'équilibre des forces : la glace est un fluide qui se déplace très lentement et l'inertie est négligeable. La dernière équation est connue sous le nom de loi d'écoulement de Glen-Nye [GP55 ; Nye57] et modélise la viscosité non linéaire en utilisant une loi de puissance qui relie le tenseur des contraintes déviatoriques $\boldsymbol{\tau}_{ij}$ au tenseur de la vitesse de déformation $\dot{\boldsymbol{\epsilon}}_{ij}$, avec $\tau = \frac{1}{2}[\text{tr}(\boldsymbol{\tau}_{ij})^2 - \text{tr}(\boldsymbol{\tau}_{ij}^2)]$ le second invariant de $\boldsymbol{\tau}_{ij}$. La constante A dépend de la composition et de la température de la glace ; l'exposant n est généralement fixé à 3 pour la plupart des glaciers. Enfin, notez qu'il n'y a pas de dérivée temporelle dans cet ensemble d'équations : nous n'avons pas besoin de la quantité de mouvement ou de la vitesse précédente pour modéliser l'évolution de la glace [Bue16].

Résoudre directement les équations précédentes est à la fois complexe et coûteux en termes de calcul. Des modèles numériques plus simples ont été proposés. La *Shallow Ice Approximation* (SIA) est un modèle particulier d'ordre zéro qui néglige les contraintes longitudinales et transversales, ainsi que les gradients de contrainte verticale. Il a été développé pour modéliser les nappes glaciaires, où l'épaisseur du glacier est beaucoup plus petite que son étendue latérale [Hut83]. Cependant, en raison de sa simplicité et de son efficacité, il est largement utilisé même sur des terrains montagneux complexes [KAS06 ; HRH12].

En suivant [KOC96], et en ignorant la déformation du substrat rocheux, l'évolution temporelle de l'épaisseur de la glace en utilisant la SIA peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \dot{m} - \nabla \cdot F = \dot{m} - \nabla \cdot h(\bar{\mathbf{u}}_d + \mathbf{u}_s) \quad (5.2)$$

F représente le flux de glace ou le débit volumique, et dépend de la vitesse de déformation interne moyenne en profondeur $\bar{\mathbf{u}}_d$ et de la vitesse de glissement basal \mathbf{u}_s . Nous désignons le substrat rocheux b , la surface de glace s et l'épaisseur de la glace $h = s - b$ (Figure 57) comme des fonctions de l'espace ($\Omega \subset \mathbb{R}^2$ se réfère au domaine du terrain) et du temps. Pour calculer la vitesse de déformation $\bar{\mathbf{u}}_d$, considérons la contrainte de cisaillement τ à une certaine altitude z sous la surface :

$$\tau = \rho g(s - z)\nabla s \quad (5.3)$$

Pour le cas particulier de $z = b$, on obtient la contrainte de cisaillement basale $\tau_b = \rho g h \nabla s$.

La relation entre la contrainte τ et la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}$ est exprimée par la loi d'écoulement de Glen : $\dot{\epsilon} = A\tau^n$ où τ^n est défini comme $\tau^n = \|\tau\|^n \cdot \tau/\|\tau\|$, τ étant un vecteur. En intégrant $\dot{\epsilon}$ verticalement, nous pouvons obtenir la vitesse de déformation interne moyennée en profondeur :

$$\bar{\mathbf{u}}_d = \frac{2A}{n+2} h \tau_b^n = -\Gamma_d h^{n+1} \|\nabla s\|^{n-1} \nabla s \quad \Gamma_d = \frac{2A(\rho g)^n}{n+2} \quad (5.4)$$

Le terme Γ_d est couramment utilisé pour regrouper les termes constants.

Lorsque le lit de glace est gelé, la vitesse de glissement \mathbf{u}_s est égale à zéro. Cependant, dans les glaciers tels que ceux que l'on trouve dans les chaînes de montagnes continentales, elle a un effet non négligeable sur l'écoulement de la glace. La modélisation du glissement reste un problème ouvert et difficile en glaciologie et différentes formulations existent. Une possibilité est de modéliser \mathbf{u}_s comme étant proportionnel à une certaine puissance p de la contrainte basale τ_b [Bin83] :

$$\mathbf{u}_s = -k_s \tau_b^p N^{-1} \quad (5.5)$$

où k_s est un coefficient de glissement, et $N = \tau_b - P_w$ est la pression effective : la différence entre la pression de la glace τ_b et la pression de l'eau P_w à l'interface glace-lit. En utilisant $p = n$ et en regroupant les termes constants dans un facteur Γ_s , on obtient la formulation trouvée dans [HRH12] :

$$\mathbf{u}_s = -\Gamma_s h^{n-1} \|\nabla s\|^{n-1} \nabla s \quad (5.6)$$

En assemblant les équations 5.2, 5.4 et 5.6, on obtient l'équation décrivant l'évolution de la hauteur du glacier au cours du temps :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \dot{m} - \nabla \cdot h^n (\Gamma_d h^2 + \Gamma_s) \|\nabla s\|^{n-1} \nabla s \quad (5.7)$$

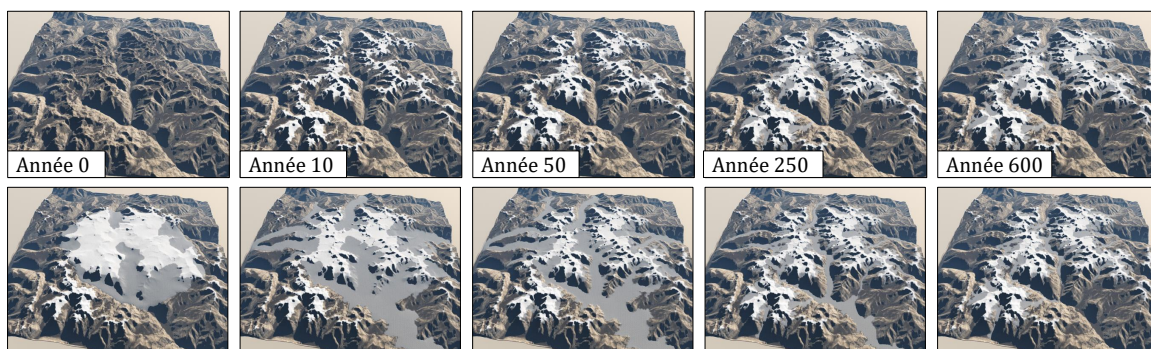


FIGURE 58 : Évolution de la couverture de glace sur un terrain, à partir du socle rocheux nu (en haut) ou d'une calotte glaciaire dessinée par l'utilisateur (en bas). L'état d'équilibre est atteint après 630 ans et 583 ans, respectivement.

On dit qu'un glacier est en régime permanent lorsqu'il n'avance ni ne recule, c'est-à-dire que $\partial h / \partial t = 0$.

5.3 Simulation de glaciers

Compte tenu des couches initiales de roche et de glace, et d'une fonction \dot{m} définie sur le domaine de simulation Ω , nous visons à calculer l'évolution de la masse du glacier au fil du temps. Tout d'abord, nous abordons les calculs numériques sur une résolution de grille fixe, puis nous présentons un schéma multirésolution qui accélère l'algorithme de plusieurs ordres de grandeur tout en maintenant des erreurs faibles.

5.3.1 Modèle numérique

Nous devons résoudre l'Equation 5.2 pour simuler l'évolution de la couverture de glace. Contrairement aux équations de fluide, il n'y a pas de terme de vitesse : la vitesse et la direction de la masse de glace en mouvement sont dérivées de l'épaisseur de la glace et du gradient de surface. Ainsi, une approche commune consiste à réécrire l'équation comme un processus de diffusion :

$$\frac{\partial h}{\partial t} = \dot{m} - \nabla \cdot (D \nabla s) \quad (5.8)$$

où

$$D = \Gamma_d h^{n+2} \|\nabla s\|^{n-1} + \Gamma_s h^n \|\nabla s\|^{n-1} \quad (5.9)$$

et la résoudre en utilisant une grille en quinconce (Figure 59), telle que $h_{i,j}$ désigne l'épaisseur de la glace au centre de la cellule (i, j) et $h_{i+\frac{1}{2},j}$ la valeur interpolée pour le milieu de son bord droit.

Puisque la diffusivité ou le flux est calculé aux bords de la grille, les simulations SIA peuvent souffrir de problèmes de conservation de la masse sur les terrains montagneux, car les gradients abrupts peuvent créer un flux sortant sur la cellule en amont qui sera plus grand que la quantité de glace à l'intérieur. Fixer les épaisseurs de glace négatives résultantes à 0 créerait de la masse, et la simulation deviendrait numériquement instable après quelques itérations à cause du terme h^{n+2} dans l'Equation 5.9.

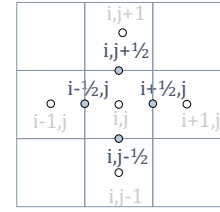


FIGURE 59 : Indices de grille échelonnés.

Pour résoudre ce problème, Jarosch *et al.* [JSA13] a proposé d'utiliser un schéma MUSCL du second ordre, une méthode de volumes finis qui donne des solutions précises et stables même avec de grands gradients ou des discontinuités [Lee79]. Le concept clé est d'utiliser une reconstruction contrainte par la pente et de calculer le terme de diffusion aux bords de la cellule. Nous détaillons le calcul du terme de diffusion sur le bord droit, $D_{i+\frac{1}{2},j}$, comme l'a fait [JSA13], sauf qu'ils n'ont pas utilisé de terme de vitesse de glissement (*i.e.* $\Gamma_s = 0$). La diffusion sur les autres bords est calculée de manière analogue.

Tout d'abord, nous extrapolons deux valeurs d'épaisseur de glace au niveau du bord droit de la cellule $i + \frac{1}{2}$, désignées par les exposants $i + \frac{1}{2}^-$ et $i + \frac{1}{2}^+$:

$$\begin{aligned} h_{i+\frac{1}{2}^-,j} &= h_{i,j} + \frac{1}{2}\phi(r_{i,j})(h_{i+1,j} - h_{i,j}) \\ h_{i+\frac{1}{2}^+,j} &= h_{i+1,j} - \frac{1}{2}\phi(r_{i+1,j})(h_{i+2,j} - h_{i+1,j}) \end{aligned} \quad (5.10)$$

où la pente :

$$r_{i,j} = \frac{h_{i,j} - h_{i-1,j}}{h_{i+1,j} - h_{i,j}}$$

est limitée par une fonction $\phi(r)$ qui empêche les oscillations près des fissures ou des discontinuités. En particulier, nous avons utilisé le limiteur Superbee de Roe [Roe86] : $\phi(r) = \max(0, \min(2r, 1), \min(r, 2))$.

Nous calculons les deux valeurs de flux $D_{i+\frac{1}{2}^-,j}$ et $D_{i+\frac{1}{2}^+,j}$ en utilisant l'Equation 5.9 avec $h_{i+\frac{1}{2}^-,j}$ et $h_{i+\frac{1}{2}^+,j}$ respectivement. Enfin, le flux sur ce bord de cellule est obtenu comme :

$$D_{i+\frac{1}{2},j} = \begin{cases} D_{i+\frac{1}{2},j}^{\min} & \text{if } s_{i+1,j} \leq s_{i,j} \text{ and } h_{i+\frac{1}{2}^-,j} \leq h_{i+\frac{1}{2}^+,j} \\ D_{i+\frac{1}{2},j}^{\max} & \text{if } s_{i+1,j} \leq s_{i,j} \text{ and } h_{i+\frac{1}{2}^-,j} > h_{i+\frac{1}{2}^+,j} \\ D_{i+\frac{1}{2},j}^{\max} & \text{if } s_{i+1,j} > s_{i,j} \text{ and } h_{i+\frac{1}{2}^-,j} \leq h_{i+\frac{1}{2}^+,j} \\ D_{i+\frac{1}{2},j}^{\min} & \text{if } s_{i+1,j} > s_{i,j} \text{ and } h_{i+\frac{1}{2}^-,j} > h_{i+\frac{1}{2}^+,j} \end{cases} \quad (5.11)$$

où :

$$\begin{aligned} D_{i+\frac{1}{2},j}^{\min} &= \min(D_{i+\frac{1}{2}^-,j}, D_{i+\frac{1}{2}^+,j}) \\ D_{i+\frac{1}{2},j}^{\max} &= \max(D_{i+\frac{1}{2}^-,j}, D_{i+\frac{1}{2}^+,j}) \end{aligned}$$

Les mêmes équations sont utilisées pour calculer la diffusivité sur les autres bords de la cellule. Enfin, l'Equation 5.2 est résolue en utilisant l'intégration d'Euler directe avec le pas de temps adaptatif suivant :

$$\Delta t = \frac{1}{2(n+1)} \frac{\min(\Delta x^2, \Delta y^2)}{\max(D_{i+\frac{1}{2},j}, D_{i-\frac{1}{2},j}, D_{i,j+\frac{1}{2}}, D_{i,j-\frac{1}{2}})} \quad (5.12)$$

Enfin, une observation intéressante est que l'état d'équilibre d'un glacier dépend entièrement de la morphologie du substrat rocheux et de la fonction d'accumulation m . La Figure 58 montre deux cas d'évolutions temporelles sur le même terrain et des conditions initiales différentes : socle rocheux nu et calotte glaciaire dessinée par l'utilisateur. Le premier cas montre que le glacier commence à se former dans des zones d'accumulation, puis converge progressivement vers un état stable caractérisé par des bassins connectés. Dans le second cas, la forme et les pentes du glacier évoluent et se stabilisent au cours des premières années, s'adaptant aux vallées. L'excès de glace est ensuite éliminé, forçant certaines langues glaciaires à reculer ou à disparaître et produisant le même état d'équilibre final que le premier cas.

5.3.2 Multirésolution

La simulation du processus de diffusion de la glace est complexe et demande beaucoup de temps. De plus, le pas de temps Δt pour le schéma d'intégration directe (Equation 5.12) est proportionnel à la surface de la cellule de la grille. Comme la plupart du corps du glacier a une surface lisse, une simulation à résolution grossière produit une bonne approximation de la couverture du glacier à haute résolution ; nous ajustons l'excès ou le manque de glace par la même simulation après suréchantillonnage. Par conséquent, nous utilisons une approche multirésolution qui accélère le calcul de plusieurs ordres de grandeur. Bien que ce schéma puisse être interprété comme la moitié d'un cycle en V d'une méthode multigrille, nous ne résolvons pas nécessairement l'Equation 5.2 pour son état d'équilibre, car nous pouvons être intéressés par une étape intermédiaire de l'évolution du glacier.

Tout d'abord, nous sous-échantillonnons le substrat rocheux du terrain donné \mathcal{B} plusieurs fois $\mathcal{B} = \mathcal{B}^0, \mathcal{B}^1, \dots, \mathcal{B}^n$ jusqu'à ce que la plus grande dimension de la grille dans \mathcal{B}^n ait environ 250 cellules. Nous simulons l'évolution du glacier dans \mathcal{B}^n jusqu'à ce qu'une couche de glace stable \mathcal{H}^n soit atteinte ou que l'utilisateur arrête la simulation, avec $\epsilon^n = \partial h / \partial t$. Ensuite, nous rééchantillonnons itérativement la couche de glace et appliquons une étape de correction jusqu'à ce que nous atteignons la résolution originale \mathcal{H}^0 .

Pour calculer \mathcal{H}^{i-1} à partir de \mathcal{H}^i , nous utilisons l'interpolation bilinéaire pour suréchantillonner la surface de la glace $\mathcal{S}^i = \mathcal{B}^i + \mathcal{H}^i$ et calculer \mathcal{H}^{i-1} comme :

$$\mathcal{H}^{i-1} = (\mathcal{S}^{i-1} - \mathcal{B}^{i-1}) \cdot \mathcal{M}^{i-1}$$

\mathcal{M}^{i-1} est une carte de présence de glace interpolée de manière bilinéaire à partir de la carte binaire $\mathcal{M}^i = \mathcal{H}^i > 0$. Notez que nous devons introduire \mathcal{M} pour empêcher la création de glace à des emplacements sans glace \mathbf{p} de \mathcal{H}^i tels que $b^{i-1}(\mathbf{p}) < b^i(\mathbf{p})$.

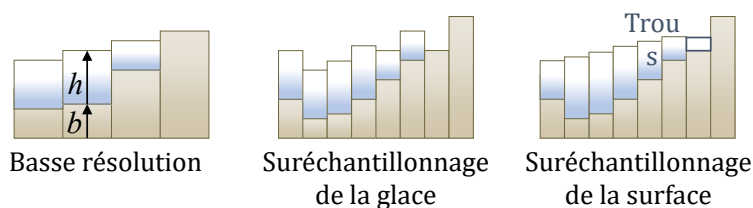


FIGURE 60 : Suréchantillonnage de la couche d'épaisseur de la glace à partir d'une résolution inférieure (à gauche) en interpolant directement la couche d'épaisseur de la glace \mathcal{H} (au milieu), et en interpolant la surface de la glace \mathcal{S} (à droite). Le carré souligné illustre un exemple de minimum local rempli après le processus de suréchantillonnage.

L'étape de correction sert à stabiliser et à ajuster la couche de glace \mathcal{H}^{i-1} à la géométrie plus détaillée du substrat rocheux \mathcal{B}^{i-1} . Nous exécutons l'algorithme de simulation en commençant par \mathcal{H}^{i-1} jusqu'à ce que $\epsilon^{i-1} = k\epsilon^i$, avec k étant un facteur de proportionnalité. Le fait de doubler la résolution permet non seulement de quadrupler le nombre de cellules mais aussi de réduire le pas de temps maximal Δt d'un facteur quatre (Equation 5.12). Cependant, seules quelques itérations sont nécessaires jusqu'à ce que $\partial h / \partial t \leq \epsilon^{i-1}$.

5.4 Modélisation des caractéristiques des glaciers

Les glaciers incluent une grande variété de formes de terrain à petite et moyenne échelle qui ne sont pas facilement saisies par la simulation de glacier elle-même : crevasses, moraines, rimayes, séracs et cascades de glace. Notre approche consiste à générer de manière procédurale ces caractéristiques en fonction des données simulées (telles que la contrainte, la direction du flux, l'accélération du flux, la température) et des données du terrain (élévation, pente). Pour chaque type de caractéristique, nous calculons une carte de probabilité définissant leur présence et leur densité (Figure 61). Le champ de glace haute résolution final est généré à partir de ces cartes de densité en appliquant des modèles de relief texturés (Section 5.5).

5.4.1 Crevasses

Les crevasses sont des fractures à la surface d'un glacier, s'ouvrant de quelques centimètres à quelques mètres de large, et atteignant des profondeurs allant jusqu'à 50 m. Étant donné que la pression augmente avec la profondeur sous la surface du glacier, la partie supérieure de la masse du glacier se comporte comme un matériau solide stratifié, alors qu'en profondeur, lorsque les pressions sont supérieures à 50 kPa, elle commence à se comporter comme un flux plastique visqueux. Par conséquent,

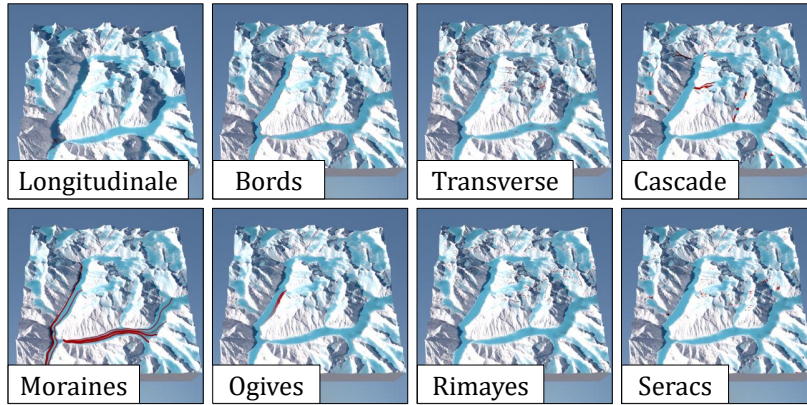


FIGURE 61 : Cartes de présence de diverses caractéristiques des glaciers (en rouge) calculées à partir de l'épaisseur de la glace (en bleu) et des données de simulation.

les accélérations de cette masse mobile, les changements soudains de pente ou les obstacles dans le substrat rocheux peuvent provoquer la fracture des couches supérieures.

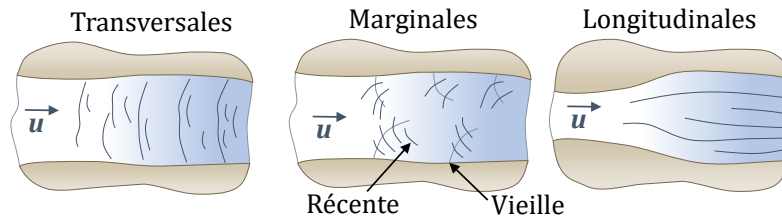


FIGURE 62 : Différents types de crevasses (adapté de [CC87]) : les crevasses transversales sont perpendiculaires à la direction de l'écoulement, les crevasses marginales comprennent les anciennes crevasses pliées dans le sens de l'écoulement de la glace et celles récemment formées, et les crevasses longitudinales apparaissent lorsque la vallée devient plus large et que la glace s'élargit pour la remplir.

Pour chaque type de crevasse (voir la Figure 62 et les détails dans les paragraphes suivants), nous calculons une carte de probabilité sur la surface du glacier en fonction de ses propriétés physiques et des observations faites par les glaciologues. Ces cartes sont utilisées pour placer et modéliser stochastiquement les crevasses sur le champ de glace.

Les processus sous-jacents de formation des crevasses se déroulent à des échelles de temps beaucoup plus petites que la simulation complète du glacier. De plus, la modélisation des crevasses reste un axe de recherche actif en glaciologie, avec des prototypes basés sur la mécanique des fractures ou la mécanique des dommages en continu [Col+16]. Par conséquent, nous nous appuyons sur un ensemble de règles de placement procédurales inspirées des observations en fonction du type et de l'apparence du glacier.

Les crevasses transversales sont les plus courantes. Elles se forment en travers des glaciers, perpendiculairement à la direction de l'écoulement, en raison de contraintes de traction lorsque la glace accélère ou que la pente s'accroît. Les marges du corps du glacier sont généralement exemptes de ce type de crevasse. Soit $\nabla_{\hat{u}}$ la dérivée directionnelle dans la direction de l'écoulement $\hat{u} = \mathbf{u}/\|\mathbf{u}\|$. Nous calculons une carte de

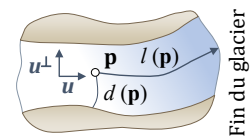


FIGURE 63 : Notations pour la génération de crevasses.

probabilité \mathcal{P}_τ à travers la surface de la glace en prenant en compte l'accélération de l'écoulement $\nabla_{\hat{\mathbf{u}}}\mathbf{u}(\mathbf{p})$, les changements de pente du substrat rocheux dans la direction de l'écoulement $\nabla_{\hat{\mathbf{u}}}^2 b(\mathbf{p})$, l'angle de pente de la surface de la glace $\alpha(\mathbf{p})$, et la distance à la marge la plus proche $d(\mathbf{p})$ (Figure 63) :

$$\mathcal{P}_\tau(\mathbf{p}) = (f_a(\nabla_{\hat{\mathbf{u}}}\mathbf{u}(\mathbf{p})) + f_b(\nabla_{\hat{\mathbf{u}}}^2 b(\mathbf{p})) + f_s(\alpha(\mathbf{p}))) \cdot f_d(d(\mathbf{p}))$$

si $\tau(x) > 50$ kPa, et $\mathcal{P}_\tau(\mathbf{p}) = 0$ sinon. Les différents f_i sont des fonctions qui mettent en correspondance les différents domaines de chaque grandeur avec l'intervalle unitaire.

Les crevasses longitudinales se forment lorsque la vallée s'élargit et que la glace ralentit, en raison des contraintes de compression dans le sens de l'écoulement et d'expansion dans le sens perpendiculaire. La fracture est parallèle à la direction de l'écoulement.

Les crevasses marginales se forment en raison de la contrainte de cisaillement dans la glace près des marges du glacier, car elle se déplace plus lentement que la glace au centre du glacier en raison de la friction avec les parois rocheuses. Elles s'ouvrent à des angles obliques par rapport à la direction de l'écoulement, à environ 45 degrés.

5.4.2 Rimayes

Une rimaye, également connue sous le nom de *bergsbrund*, est un type particulier de crevasse qui se forme dans la partie supérieure d'un cirque, à l'interface entre le corps en mouvement du glacier et la glace stagnante attachée au mur de tête abrupt (Figure 64). Comme elles se sont formées en raison de l'écoulement descendant du corps du glacier, l'ouverture est parallèle aux parois et forme un angle droit avec la direction d'écoulement du glacier.

Contrairement à d'autres types de crevasses qui sont distribuées de manière stochastique sur leur région de présence, nous contraignons les modèles de rimaye aux emplacements \mathbf{p} satisfaisant les conditions suivantes : (1) \mathbf{p} est situé dans la zone d'accumulation : $\dot{m}(\mathbf{p}) > 0$, (2) l'angle de pente de la surface est fort : $\alpha(\mathbf{p}) > 30$, (3) la contrainte basale se situe dans une plage intermédiaire entre la glace statique et la glace en écoulement : $30 \text{ kPa} < \tau(\mathbf{p}) < 60 \text{ kPa}$, (4) au moins 3 des 8 cellules voisines sont situées en amont et sont également abruptes, (5) au moins 2 des 8 cellules voisines ont une pente inférieure à un seuil donné, 30 degrés dans notre implémentation.

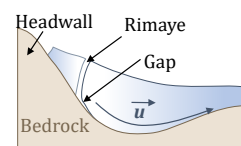


FIGURE 64 : Représentation symbolique d'une rimaye.

5.4.3 Moraines

Les moraines sont l'accumulation de roches, de débris et de sédiments transportés par le glacier qui émergent à la surface. Il est possible de différencier différents types de moraines : les moraines *latérales* apparaissent aux limites du glacier, les moraines *médianes* se forment à l'interface entre deux

flux glaciaires qui se rencontrent dans une vallée et se déplacent côte à côte, et les moraines *terminales* se forment à la limite d'un glacier lorsque la glace fond et dépose les matériaux transportés.

Pour situer les moraines médianes, il faut identifier les différents flux tributaires d'un glacier et détecter leur point de rencontre. Les moraines n'apparaissent que dans la zone d'ablation car de la glace fraîche est continuellement produite au-dessus de la zone d'accumulation, recouvrant les débris.

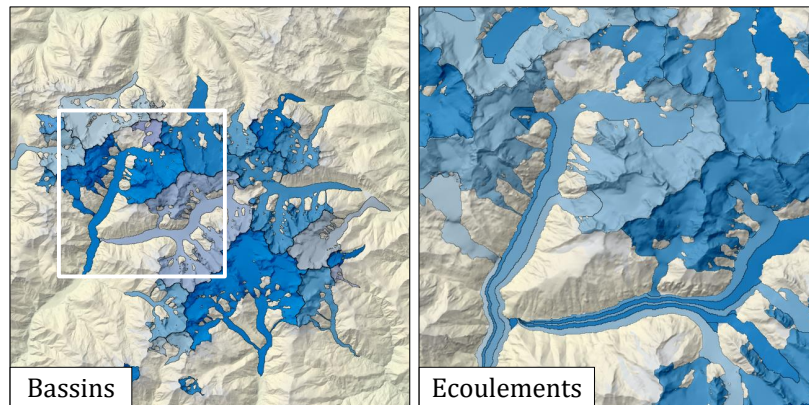


FIGURE 65 : Segmentation des bassins de glaciers (à gauche) et écoulements identifiés sur une des zones (à droite).

Tout d'abord, nous segmentons et séparons les différents bassins de drainage des glaciers, c'est-à-dire chaque sous-ensemble de la surface de la glace qui atteint la même limite du glacier. Les algorithmes existants de calcul des bassins de drainage [BLM14] ont été conçus pour les bassins versants et ne sont donc pas adaptés à l'écoulement de la glace. Notre méthode peut être décrite comme suit : en partant du point non étiqueté le plus bas sur la surface de la glace, nous attribuons un nouvel indice de bassin de glace à ce point et le propageons à tous les voisins plus élevés du glacier jusqu'à ce que plus aucun point ne puisse être atteint. En itérant ce processus, nous séparons tous les différents bassins de glace (Figure 65, à gauche).

Ensuite, nous subdivisons chaque bassin glaciaire en différents flux (Figure 65, à droite). Cette opération est plus difficile car nous ne pouvons pas nous appuyer sur une stratégie d'inondation comme auparavant : deux flux tributaires peuvent avoir pris naissance dans la même zone supérieure - par exemple, le sommet d'une montagne glaciaire s'écoulant vers deux vallées qui se rejoignent en aval - ou un flux peut se diviser et se retrouver en aval pour créer une moraine à partir de là, nous voulons donc identifier les deux branches.

Pour séparer efficacement les différents flux dans un bassin, nous calculons le squelette morphologique S_G du masque binaire représentant le glacier en zone d'ablation plus le glacier sous un régime d'écoulement plastique : $\{m(\mathbf{p}) < 0\} \vee \{\tau(\mathbf{p}) > 50 \text{ kPa}\}$. Contrairement aux réseaux de rivières, l'élévation de la surface d'un glacier ne diminue pas nécessairement de façon monotone vers l'aval, nous ne pouvons donc pas construire l'arbre des affluents à partir de l'élévation du squelette. Nous définissons le sous-affluent principal du glacier comme le plus long chemin minimal dans S_G entre son nœud le plus bas (près de la langue du glacier) et tout autre nœud dans S_G . Ensuite, nous classons itérativement les glaciers tributaires comme le plus long chemin minimal entre un nœud non visité

dans S_G et l'ensemble des nœuds visités qui forment le réseau de glaciers actuel. Ce processus s'arrête lorsqu'un nombre maximal de sous-flux est atteint (10 dans nos expériences), ou lorsque le plus long sous-flux possible est inférieur à un seuil (3 à 5 km dans nos scènes).

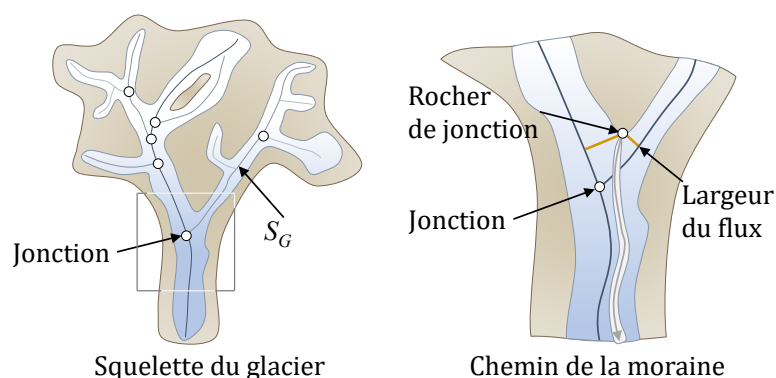


FIGURE 66 : Subdivision de la zone d'intersection de deux écoulements glaciaires : la division est proportionnelle au rapport entre les largeurs des sous-écoulements aux points tributaires.

Une fois les glaciers tributaires et leurs points de jonction correspondants identifiés (Figure 66), nous visitons récursivement ces jonctions dans un ordre de bas en haut, *i.e.* en commençant par celle qui est la plus proche de la langue du glacier. Nous localisons la paroi rocheuse en amont qui est la plus proche du point de jonction, et nous divisons la surface du glacier en aval en deux parties telles que les largeurs respectives sont proportionnelles aux largeurs de chaque affluent avant la fusion. Ces largeurs sont estimées comme étant deux fois la distance minimale entre le point de la paroi rocheuse amont et le squelette de chaque sous-affluent. Enfin, une moraine médiane est placée à chaque interface entre les différents sous-affluents.

5.4.4 Séracs et cascades de glace

Les séracs sont des blocs de glace fracturés, formés à l'intersection de plusieurs crevasses ou de discontinuités abruptes et de pentes raides à la surface du glacier, telles que des falaises ou des chutes de glace.

Nous définissons une carte de probabilité proportionnelle au nombre de voisins d'une cellule qui présentent des discontinuités de glace dans la représentation de la grille empilée. En particulier, il existe une discontinuité entre une cellule \mathbf{p} et sa voisine \mathbf{n} si $\mathcal{S}(\mathbf{p}) < \mathcal{B}(\mathbf{n})$. Les chutes de glace sont définies comme les régions de la surface de la glace dont la pente et la contrainte basale τ sont supérieures à un seuil donné (nous utilisons 15 degrés pour la pente, et 100 kPa pour la contrainte basale).

5.4.5 Ogives

Les ogives, également appelées bandes de Forbes, sont des crêtes et des vallées de vagues alternées en forme d'arc sur la surface de la glace qui forment visuellement des bandes claires et sombres.

Toujours formées sous les chutes de glace, bien que toutes les chutes de glace ne produisent pas d'ogives, elles se propagent le long du glacier jusqu'à ce qu'elles finissent par s'estomper ou atteindre la limite du glacier [CP10]. La période entre deux bandes consécutives λ correspond à la distance parcourue par le glacier en un an (Figure 67).

Nous utilisons la carte des chutes de glace (Section 5.4.4) pour estimer la localisation des ogives. Une ogive se forme si la base d'une chute de glace est suffisamment large (> 100 m dans notre implémentation) et si la direction d'écoulement de la chute de glace est alignée avec celle du glacier situé en dessous. Nous utilisons la distance géodésique à la base de la chute de glace $l(\mathbf{p})$ pour paramétrer le motif de la bande, et nous la combinons avec la distance à l'axe médian de l'ogive $d(\mathbf{p})$ pour la déformer vers l'arrière et obtenir des motifs en forme d'arc. Leur effet disparaît progressivement au fur et à mesure que les ogives se déplacent vers le bas du courant.

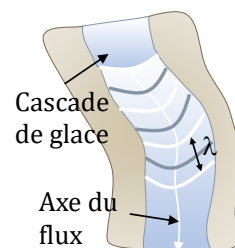


FIGURE 67 : Représentation symbolique des ogives.

Les ogives qui se forment sur un sous-écoulement du glacier n'affectent pas les autres écoulements parallèles séparés par des moraines : nous utilisons donc la segmentation utilisée pour placer les moraines médianes (Section 5.4.3) pour limiter l'étendue latérale des ogives.

5.5 Résultats

Nous avons implémenté notre simulation de glacier dans un shader de calcul intégré dans une application C++ et OpenGL, permettant une simulation interactive et contrôlable. L'utilisateur peut interrompre, reprendre ou redémarrer la simulation à tout moment, modifier les paramètres physiques (ligne d'équilibre, taux d'accumulation) à tout moment et observer la croissance ou le recul du glacier, et interagir avec des outils permettant de sculpter la couche rocheuse, d'ajouter ou d'enlever de la glace localement ou d'éditer les cartes de contrôle. Les cartes de caractéristiques ont été utilisées pour définir les matériaux, les textures et les cartes de déplacement, qui à leur tour ont été transmises au logiciel E-on Vue[®] pour produire les rendus photoréalistes (58, 70, 68, 72, 73). Les caractéristiques ont été instanciées en utilisant une approche de bombardement de texture pour changer l'albédo des crevasses, des rimayes et des ogives, sculpter l'élévation de la surface (moraines, crevasses), ajouter du bruit à la surface (séracs, chutes de glace), ou changer le matériau (moraines).

Dans notre contexte, le bombardement de textures consiste à apposer des caractéristiques sur une carte (profondeur, albédo) en utilisant des masques de fusion alpha pour délimiter l'empreinte des caractéristiques. Les tampons de texture utilisés pour le bombardement de crevasses ont été générés manuellement à partir d'images réelles, tandis que les autres caractéristiques des glaciers ont été générées de manière procédurale.

5.5.1 Performance et validation

Connues pour leur intensité de calcul, les simulations de glaciers sont généralement limitées à de petits domaines avec des grilles de taille restreinte. Notre approche interactive multirésolution accélère les calculs de plusieurs ordres de grandeur et génère des données d'épaisseur de glace à haute résolution au prix d'approximations négligeables, par rapport à une mise en œuvre directe par force brute (Figure 68). Cela permet à la fois de traiter de grands terrains et d'utiliser des résolutions de grille plus élevées.

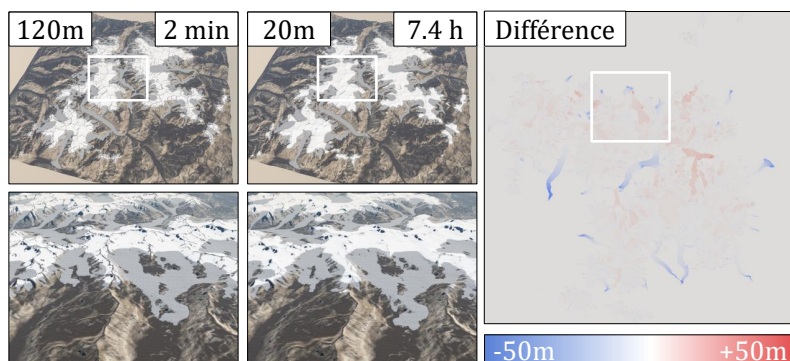


FIGURE 68 : Comparaison entre le glacier calculé avec une grille grossière (120 m cellules) et affiné en utilisant notre approche multirésolution, et le glacier directement calculé sur une grille précise (20 m cellules). L'image de droite montre la différence d'épaisseur de glace entre les grilles multirésolution et les grilles précises.

Le tableau 5.1 indique les délais et les erreurs pour différentes résolutions initiales (la résolution finale est toujours de 20 m) et démontre l'efficacité de l'approche multirésolution. À partir d'une résolution cellulaire initiale donnée, nous avons simulé l'évolution de la glace jusqu'à ce qu'elle atteigne un état stable tel que $\partial h / \partial t \leq \epsilon^n = 1$ mm. Pour les étapes de correction successives pendant le suréchantillonnage, nous avons assoupli la condition d'état stable à $\epsilon^i = r^n / r^i \cdot \epsilon^n$, où r^n fait référence à la taille de la cellule à basse résolution (120 m dans nos expériences) et r^i à la taille de l'échantillonnage supérieur. Ce facteur linéaire sert de compromis entre des étapes de correction coûteuses si nous conservons $\epsilon^i = \epsilon^n$, et une précision médiocre si ϵ^i est mis à l'échelle de façon quadratique comme le nombre de cellules. De plus, nous simulons toujours au moins une année d'évolution pendant l'étape de correction.

Rés.	Grille	Années	$t_s(s)$	$t_{up}(s)$	RMSE	Volume
120 m	250^2	631	17	103	2.38 m	+1.2%
60 m	500^2	629	287	62	1.69 m	-0.6%
40 m	750^2	632	1530	55	0.95 m	-0.3%
20 m	1500^2	635	26722	—	—	—

TABLE 5.1 : Comparaison du temps d'exécution et de l'erreur relative en fonction de la résolution initiale. t_s indique le temps de calcul pour atteindre l'état stable pour la simulation au départ, tandis que t_{up} indique le temps des étapes de rééchantillonnage. L'erreur quadratique moyenne (RMSE) et la différence de volume ont été calculées par rapport à la couche de glace obtenue à partir de la simulation 20 m.

Comme prévu, l'erreur diminue lorsque l'on utilise des résolutions plus élevées, mais à un rythme beaucoup plus lent que l'augmentation du temps de calcul. La Figure 68 montre une comparaison entre la couverture de glace obtenue à l'aide de notre simulation multirésolution et une simulation directe à haute résolution par force brute. Bien que les couvertures de glace diffèrent légèrement, l'erreur reste faible ($\approx 1\%$) et la multirésolution est plus rapide de plusieurs ordres de grandeur ($\times 220$).

Figure : terrain	km	ELA (m)	β	γ	Grille	Années	t_s (s)	Grille fine	t_{up} (s)
70 : Chartreuse	50	1400 \pm 50	3	1	250 (200)	946	76	1250 (40)	152
70 : Canyon	30	2000 \pm 150	2	1	250 (120)	1407	145	1500 (20)	366
70 : Ecrins	84	2600 \pm 100	1	1	350 (240)	671	109	2800 (30)	2032
70 : Pyrenees	30	2500 \pm 150	2	1	250 (120)	416	25	1500 (20)	218
70 : Ruapehu	30	2000 \pm 150	4	2	250 (120)	323	23	1500 (20)	242
70 : Smokies	30	1400	1	1	250 (120)	902	19	1500 (20)	52
70 : St Helens	20	2000 \pm 100	5	1	250 (80)	256	21	1000 (20)	74
70 : Sweden	60	1400	5	1	200 (300)	3209	94	2400 (25)	815
73 : left	30	2500	2	1	250 (120)	667	24	1500 (20)	126.8
73 : middle	30	2500	2	1	250 (120)	642	22	1500 (20)	148.8
73 : right	30	2500	2	1	250 (120)	544	21	1500 (20)	111.3

TABLE 5.2 : Paramètres d'exécution, délais et résultats pour les différents glaciers simulés, taille de la grille en mètres (m).

Le tableau 5.2 présente quelques performances des simulations présentées dans le chapitre, en indiquant le temps t_s jusqu'à ce que l'état d'équilibre soit atteint dans la grille de résolution initiale, ainsi que le temps t_{up} nécessaire pour les étapes de suréchantillonnage et de correction. Dans tous les cas, nous avons utilisé 2 ou 3 étapes de rééchantillonnage.

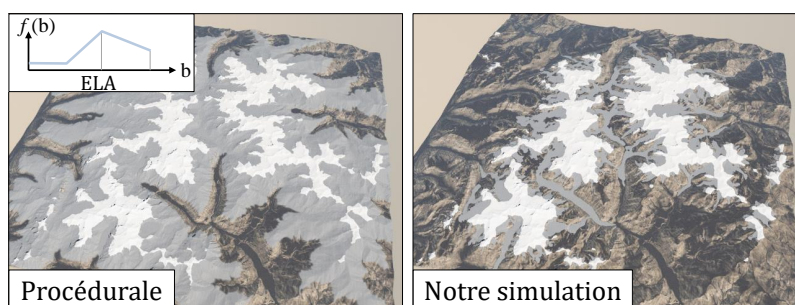


FIGURE 69 : Comparaison de notre méthode avec une approche procédurale.

La Figure 69 compare notre méthode à une approche procédurale définissant l'épaisseur de la glace comme $h(\mathbf{p}) = f(b(\mathbf{p})) \cdot g(\alpha(\mathbf{p}))$, où $f(b(\mathbf{p}))$ est une fonction linéaire en deux étapes avec un maximum atteint pour $b(\mathbf{p}) = ELA$, et $g(\alpha(\mathbf{p})) \in [0, 1]$ réduit linéairement l'épaisseur de la glace à 0 au fur et à mesure que la pente du socle rocheux augmente et atteint une limite de $\alpha \geq 60$ degrés. La méthode procédurale caractérisant l'épaisseur de la glace uniquement en fonction de la position, de l'élévation et de la pente ne permet pas de saisir le flux descendant des langues de glace contraintes par les parois de la vallée.

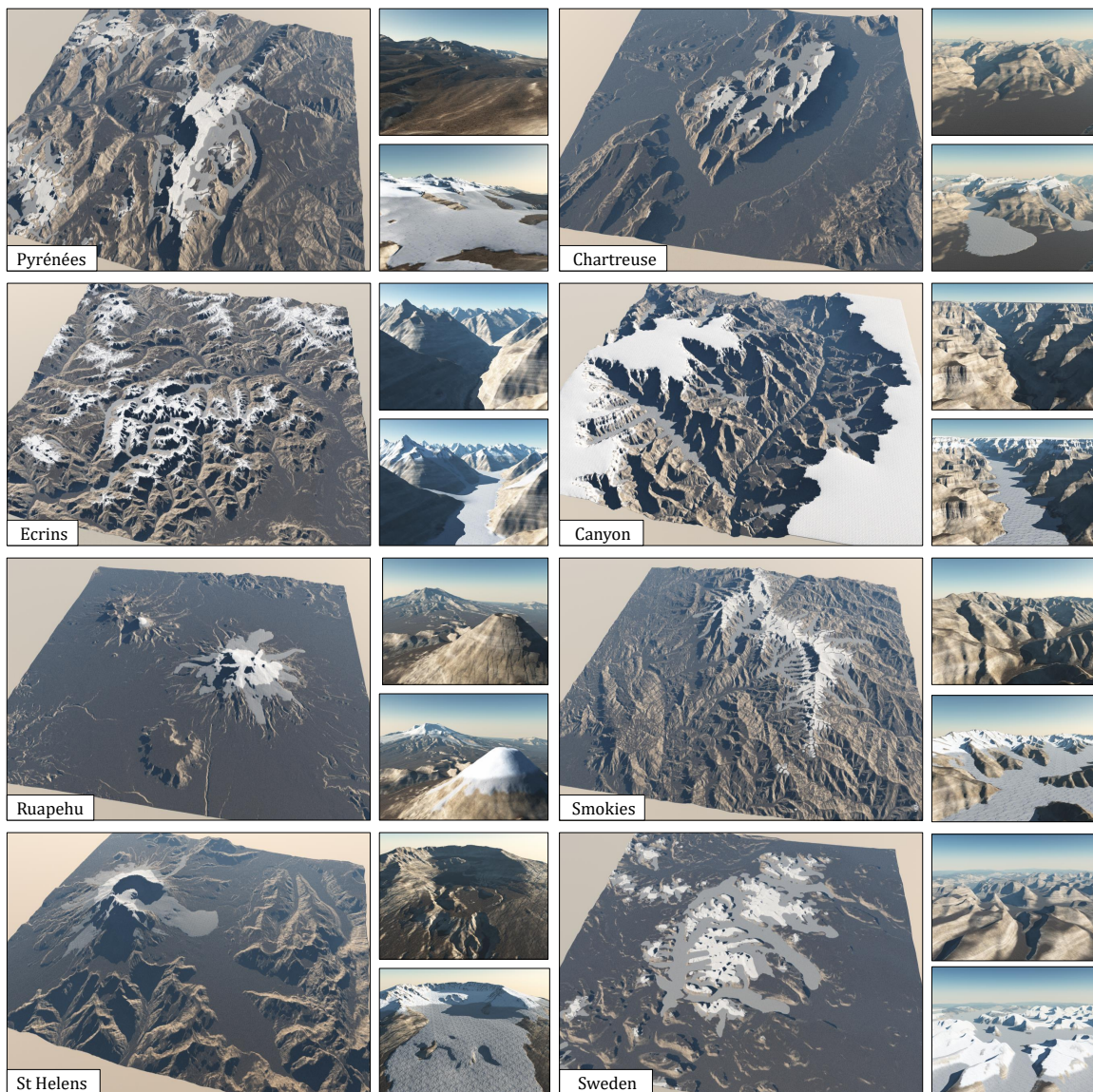


FIGURE 70 : Glaciers simulés sur une variété de reliefs : les gros plans montrent le terrain nu (en haut) et avec la couche de glace générée par notre simulation (en bas).

D'un point de vue visuel, notre méthode est capable de générer des glaciers d'aspect réaliste sur une variété de terrains, comme illustré dans la Figure 70. Selon le choix des paramètres, nous pouvons obtenir des glaciers de montagne (Écrins, Pyrénées, Smokies), des champs de glace (Chartreuse, Suède) ou des calottes glaciaires (Ruapehu). Les règles pour le placement des éléments ont été améliorées après quelques itérations avec un expert en glaciologie, afin de générer des cartes de placement aussi cohérentes que possible avec la réalité.

5.5.2 Contrôle

Du point de vue de la création, nous offrons deux formes de contrôle à l'utilisateur : les paramètres de simulation et la sculpture de la glace et du terrain.

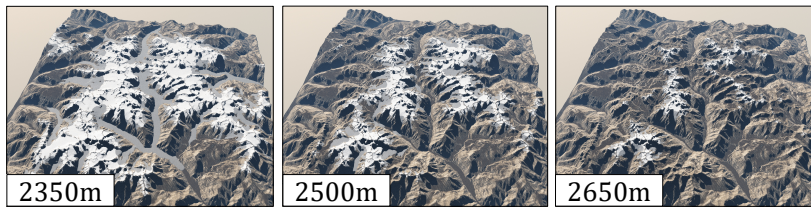


FIGURE 71 : Influence des valeurs de ELA sur la forme finale du glacier : de légères modifications changent radicalement l'étendue du glacier dans les vallées.

Le paramètre ayant l'impact le plus important est l'altitude de la ligne d'équilibre (*equilibrium line altitude* ELA) qui détermine l'altitude au-dessus de laquelle la neige s'accumule et crée des glaciers. Il est possible de contrôler ce paramètre en fixant une valeur constante ou en fournissant une carte de contrôle qui permet de s'écarter de cette valeur. De légères modifications de la ligne d'équilibre ont des effets considérables sur la forme finale du glacier, comme le montre la Figure 71. La carte de contrôle peut être fournie par l'utilisateur ou calculée à partir de l'irradiation solaire annuelle sur le terrain. Les études en glaciologie estiment que les écarts dus à l'orientation sont de l'ordre de 70 à 320 m [EC05], c'est pourquoi nous avons utilisé des fourchettes similaires.

La fonction de bilan de masse \dot{m} a également un impact significatif, car elle détermine jusqu'où un glacier s'étend en dessous de la ligne d'équilibre. Bien que cette fonction puisse être très complexe pour tenir compte de tous les phénomènes qui causent l'accumulation et l'ablation, nous avons choisi l'approche de [Oer86] et défini une fonction linéaire en deux étapes :

$$\dot{m}(\mathbf{p}) = \begin{cases} \beta \cdot (s(\mathbf{p}) - e(\mathbf{p})) & \text{if } s(\mathbf{p}) > e(\mathbf{p}) \\ \gamma \cdot (s(\mathbf{p}) - e(\mathbf{p})) & \text{if } s(\mathbf{p}) < e(\mathbf{p}) \end{cases}$$

où les constantes β et γ sont les gradients de taux d'accumulation et d'ablation, au-dessus et au-dessous de ELA, respectivement. Ceci découle de l'intuition selon laquelle la neige s'accumule davantage en altitude, tandis que la glace fond à plus basse altitude.

L'étendue du glacier dépend principalement du rapport entre ces deux pentes. Une forte accumulation conduit à des langues glaciaires plus longues s'étendant sous la zone d'accumulation, alors qu'une forte ablation produit des glaciers fondant rapidement et disparaissant après avoir quitté la zone d'accumulation. La mise à l'échelle des deux paramètres par la même constante produit des couvertures glaciaires similaires, simplement avec une masse globale de glace plus importante (Figure 72). Il est également possible de définir des variations locales de β en utilisant une *carte de précipitation* $\mathcal{P}(\mathbf{p})$ pour mettre à l'échelle le taux d'accumulation $\beta(\mathbf{p}) = \beta \cdot \mathcal{P}(\mathbf{p})$, comme illustré dans Figure 73.

La plupart des exemples n'ont pas nécessité d'intervention ou d'édition de la part de l'utilisateur. Cependant, nous avons développé des outils de brosse pour contrôler et modifier la couche rocheuse, la couche de glace et les cartes de ELA et d'accumulation directement sur le terrain pendant que la simulation est en cours. Rappelons que l'état d'équilibre d'un glacier ne dépend pas de la quantité initiale ou actuelle de glace (Figure 58), mais seulement de la morphologie du relief et des constantes

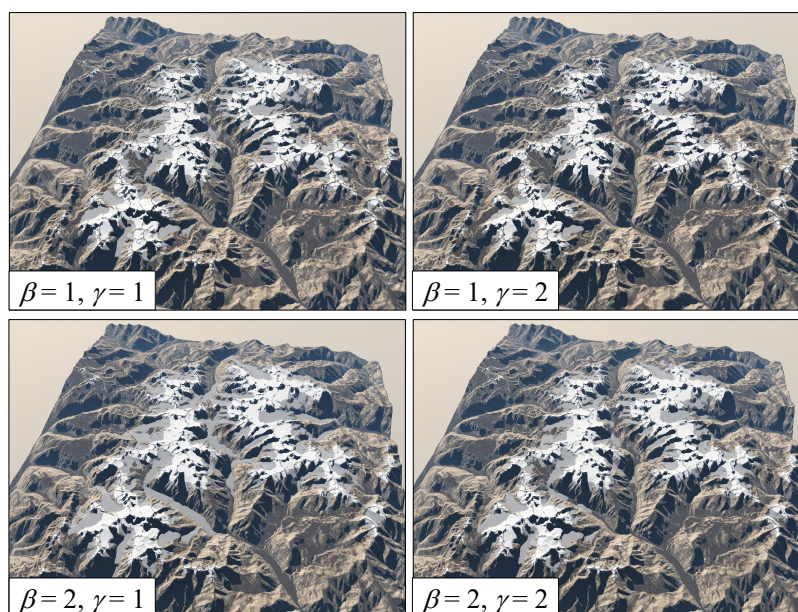


FIGURE 72 : Effets des ratios d'accumulation et d'ablation β et γ : des valeurs d'accumulation plus élevées conduisent à des langues glaciaires plus longues, tandis que des valeurs d'ablation élevées conduisent à des glaciers plus petits en accélérant la fonte. Valeurs en $\text{mm} \cdot \text{year}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

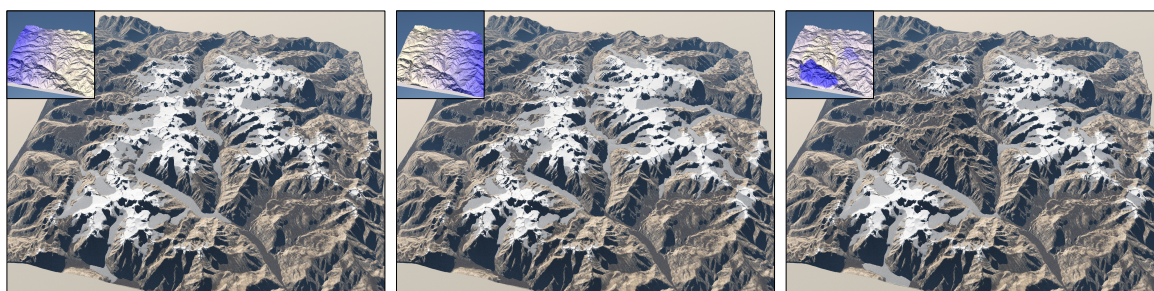


FIGURE 73 : Influence des cartes d'accumulation : les rampes linéaires de gauche et du milieu représentent les conditions dans lesquelles les fronts de neige entrent par le nord ou par le sud. La carte de droite a été peinte comme une esquisse pour modifier l'accumulation localement sur chaque massif, confirmant la capacité de création de notre méthode.

de la glaciologie. Par conséquent, l'impact de l'outil glaciaire disparaît progressivement au fil du temps.

5.6 Conclusion et perspectives

Afin de modéliser des glaciers de grande tailles, une technique hybride combinant une nouvelle méthode SIA multirésolution avec des méthodes procédurales a été proposée. Cette méthode permet de générer interactivement des glaciers haute résolution présentant des détails réalistes tels que des moraines, des ogives, des chutes de glace et des crevasses. La glace ayant un impact important sur la morphologie du terrain comme présenté lors de la création des moraines, des études complémentaires ont été menées suite à ces travaux pour intégrer l'érosion du terrain lors de la simulation de l'évolution

5

du glacier [Cor+23]. Ces travaux prennent en compte des échelles de temps plus grandes afin d'obtenir des formes de relief spécifiques telles que les vallées suspendues ou encore des lacs par l'accumulation de débris.

Plusieurs pistes de recherche restent à explorer pour améliorer cette thématique, qu'il s'agisse de la représentation de différents types de glaciers, des champs de glace et de neige exposés au vent comme dans les déserts secs, tout en tenant compte des propriétés d'adhérence de la neige. Il est également crucial d'obtenir une modélisation finale plus précise en intégrant le caractère volumétrique des glaciers :

- L'une des principales limites du modèle SIA pour les glaciers est qu'il ne représente que le socle rocheux et les couches de glace, ce qui rend impossible la simulation de blocs de glace en surplomb, tels que les séracs. La géométrie complexe des crevasses et des séracs nécessiterait des modèles tridimensionnels spécifiques pour obtenir des résultats plus précis et réalistes. Plusieurs pistes peuvent être envisagées pour tendre vers une modélisation volumétrique. En restant dans un cadre procédural, il est possible d'utiliser un modèle basé sur des surfaces implicites pour sculpter en 3D les effets désirés. Une autre option consiste à passer à des simulations volumiques plus complexes et coûteuses, mais beaucoup plus localisées, permettant ainsi d'atteindre des niveaux de réalisme plus élevés.
- Les glaciers ne se limitent pas aux zones montagneuses avec leurs caractéristiques propres. Un champ de recherche s'ouvre dans ce domaine avec la simulation des plates-formes glaciaires, qui sont des nappes de glace s'étendant dans l'océan et formant des plates-formes flottantes tout en restant attachées à la glace de fond. Cette exploration nécessiterait de prendre en compte les interactions entre l'eau de l'océan et la glace afin de produire des paysages polaires scéniques contenant des icebergs. Cette voie reste non explorée en informatique graphique et offre un vaste terrain de recherche entièrement ouvert.

PAVAGES FANTÔMES



Table des matières

6.1	Principe général	84
6.2	Génération du Ghost Tile	85
6.3	Instantiation	89
6.4	Résultats	93
6.5	Conclusion et perspectives	99

Dans les précédents chapitres, j'ai présenté des méthodes destinées à gérer les éléments homogènes dans une scène, afin de représenter des phénomènes tels que le sable, l'eau ou la glace. Cependant, peu de méthodes se révèlent efficaces pour modéliser des environnements hétérogènes, où des objets de différentes natures et formes se mêlent. Bien qu'il soit possible de simuler le dépôt d'objets dans la scène [HK10 ; Des+06] en ajoutant l'objet à la scène et en simulant la gravité pour le déposer, cette approche, malgré sa simplicité apparente, reste difficile à contrôler et inefficace en termes de temps de calcul. Des méthodes procédurales ont été proposées [LD06 ; AD06b ; Jia+15] pour distribuer de manière stochastique des éléments dans la scène, mais elles ne permettent souvent pas de créer des empilements cohérents d'objets en contact. Une des principales difficultés de cette problématique réside dans l'intense interaction entre ces divers éléments, particulièrement au niveau de la couche de surface où s'accumulent terre, rochers, végétation, feuilles et branches. Dans cette étude, notre objectif était de concevoir une méthode générique permettant de gérer un grand nombre d'éléments variés et enchevêtrés, tout en offrant aux graphistes un contrôle précis sur le choix des éléments et leur distribution.

Ces recherches ont été menées pour faire suite à mes travaux de thèse portant sur la conception d'empilements de pierres [Pey+09b], tout en conservant les caractéristiques anisotropes du positionnement des objets, mais définies par un modèle générique combinant divers éléments et offrant un contrôle sur la forme ou le mélange. Cette publication a été diffusée dans la revue Computer Graphics Forum (Pacific Graphics) en 2016.

6.1 Principe général

Notre méthode est basée sur la définition d'une structure Ghost Tile (tuile fantôme), appelée \mathcal{T} , qui est définie comme une collection d'objets candidats $O = \{O_i\}$ et un graphe de collision \mathcal{G} embarqué dans une tuile. La tuile fantôme stocke la position des différents objets candidats dans la tuile. Le graphique de collision encode les intersections entre les objets à l'intérieur de la tuile et avec les tuiles voisines. La densité d'objets candidats étant très élevée, nous sommes en mesure de produire de nombreuses configurations différentes sans collision en sélectionnant uniquement un sous-ensemble d'objets candidats qui ne se croisent pas. Notre méthode peut être divisée en deux étapes (Figure 74).

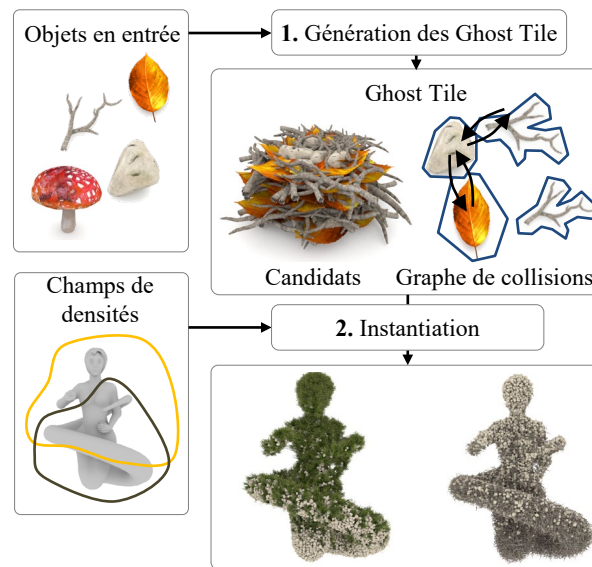


FIGURE 74 : Compte tenu des modèles géométriques d'entrée, la structure de la tuile fantôme regroupe quelques centaines de modèles candidats distribués dans la tuile et se chevauchant, et stocke le graphe des collisions entre les objets dans la tuile de référence. Le processus d'instanciation parcourt la scène, sélectionne et instancie les candidats à la volée à partir de la tuile fantôme précalculée en fonction des champs de densité contrôlés par l'utilisateur.

La génération des pavages fantômes est une étape de prétraitement qui vise à générer une collection d'objets candidats dans une tuile et un ensemble correspondant de contraintes définies comme un graphe de collision entre ces candidats. Les candidats sont générés en distribuant des objets d'entrée à différentes positions et orientations dans la tuile (Figure 75). Notez que les candidats peuvent partiellement chevaucher la limite des tuiles et chevaucher plusieurs tuiles.

L'étape d'instanciation place les détails en parcourant la scène avec la tuile fantôme et en instanciant les objets candidats en fonction du volume et des densités de contrôle définis par l'utilisateur. Cette étape permet de traiter de nombreux volumes et avec des densités de contrôle différents avec la même tuile fantôme. Notez que nous n'avons pas besoin de nous fier aux schémas de pavage apériodiques pour éviter les artefacts de pavage : chaque fois que plusieurs candidats ont des priorités identiques

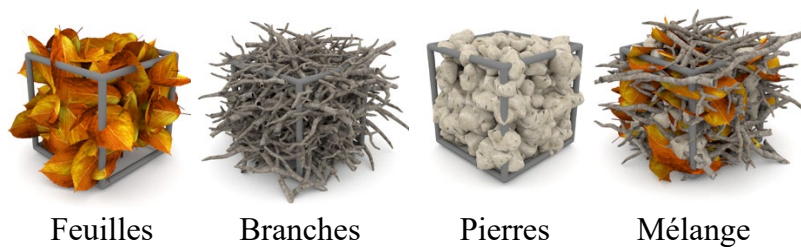


FIGURE 75 : Plusieurs exemples de Ghost Tile, avec un seul type d'objet (feuille, branche et rocher) et avec différents types d'objets.

ou similaires, nous sélectionnons au hasard un candidat afin d'éviter de tels artefacts de pavage. Les instances sont représentées sous forme d'une liste d'index, ce qui est très efficace en termes de mémoire lorsqu'il s'agit de scènes complexes comportant des centaines de milliers d'instances.

6.2 Génération du Ghost Tile

Dans cette section, nous présentons la structure de données des Ghost Tile, les notations utiles utilisées tout au long du chapitre et nous détaillons l'algorithme pour la créer. La Figure 76 montre une version simplifiée de la structure avec seulement quelques objets pour plus de clarté car les Ghost Tiles sont en pratique composés de centaines de milliers de candidats.

6.2.1 Structure du Ghost Tile

Etant donné un ensemble d'objets en entrée $O = \{O_i\}$ représentant les différents détails qui peuvent être créés lors de l'étape d'instanciation, un Ghost Tile \mathcal{T} est composé d'une collection de candidats O_i^j et d'un graphe de collision \mathcal{G} les reliant. Soit $\{O_i\}$ l'ensemble des objets d'entrée qui seront utilisés dans le processus. On note $O_i^j = \mathbf{F}_i^j(O_i)$ le j^{ieme} candidat créé à partir de l'objet O_i avec \mathbf{F}_i^j faisant référence à son cadre associé. Les objets candidats sont liés à une tuile cubique alignée sur l'axe de taille s . Ils peuvent cependant chevaucher partiellement les limites des carreaux cubiques et donc chevaucher plusieurs carreaux. La notation $\mathcal{T} \oplus \mathbf{t}$ fera référence à un carreau \mathcal{T} traduit par un vecteur $\mathbf{t} = s\mathbf{v}$ où s se réfère à la taille du carreau et $\mathbf{v} \in [-1, 0, 1]^3$ est un vecteur d'entiers indiquant le décalage entre deux tuiles.

Pour chaque objet d'entrée O_i , nous définissons une liste de points d'ancrage (Figure 77) notés \mathbf{a}_i^k qui lui sont attachés. Les points d'ancrage seront utilisés pendant le processus d'instanciation pour évaluer si un objet candidat O_i^j doit être instancié ou non. Ceci est réalisé en évaluant les fonctions de densité définies par l'utilisateur $f(\mathbf{a}_i^k)$ aux points d'ancrage des objets candidats (Section 6.3). Dans notre système, les points d'ancrage sont définis par l'utilisateur dans le cadre local de chaque objet O_i .

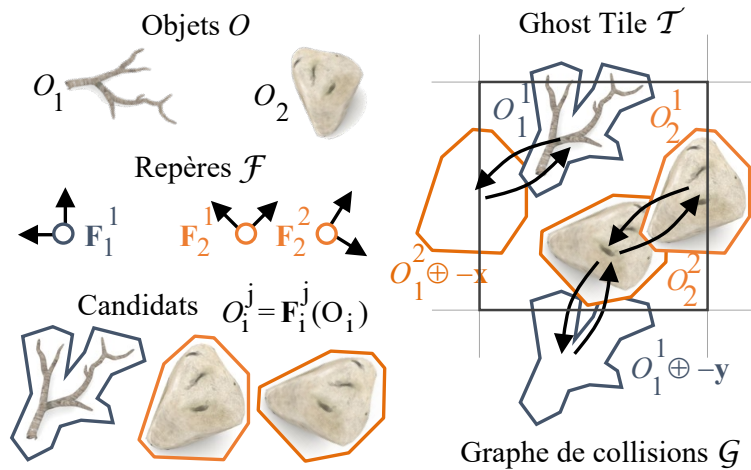


FIGURE 76 : La structure de la tuile fantôme est créée à partir d'un ensemble d'objets d'entrée $O = \{O_i\}$. Elle est composée d'une liste d'objets candidats $O_i^j = F_i^j \circ O_i$, où F_i^j représente les repères, et d'un graphe de collision \mathcal{G} qui encode les relations d'intersection entre les objets candidats.

Ils peuvent également être générés de manière procédurale en échantillonnant le volume ou la surface des objets.

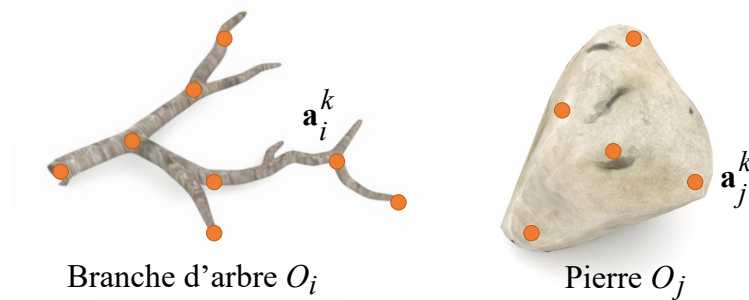


FIGURE 77 : Points d'ancrage pour une branche et une pierre. Les points d'ancrage servent à l'évaluation des champs de densité de contrôle pendant le processus d'instanciation.

Le graphe de collision $\mathcal{G} = (\mathcal{N}, \mathcal{E})$ est composé d'un ensemble de nœuds $\mathcal{N} = \{N_k\}$ qui représentent l'ensemble des objets candidats et des arêtes orientées $\{\mathcal{E}_{ij}\} = \{(N_i, N_j, \mathbf{v})\}$ qui représentent les relations de collision. Plus précisément, une arête (N_i, N_j, \mathbf{v}) code que l'objet au nœud N_i est en collision avec l'objet au nœud N_j situé dans la tuile $\mathcal{T} \oplus \mathbf{t}$.

Ainsi, $\mathbf{t} = \mathbf{0}$ lorsque les deux objets sont en collision dans le même Ghost Tile (Figure 78). Notez que chaque arête (N_j, N_k, \mathbf{v}) du graphe a une paire symétrique $(N_k, N_j, -\mathbf{v})$ par construction.

Les contraintes utilisateur peuvent être utilisées pour prescrire des orientations spécifiques pour certains objets, ce qui réduit le nombre de candidats dans la structure Ghost Tile et accélère le processus global. Par exemple, les branches au sol peuvent avoir des orientations aléatoires dans le plan horizontal et un angle d'inclinaison aléatoire compris dans ± 45 .

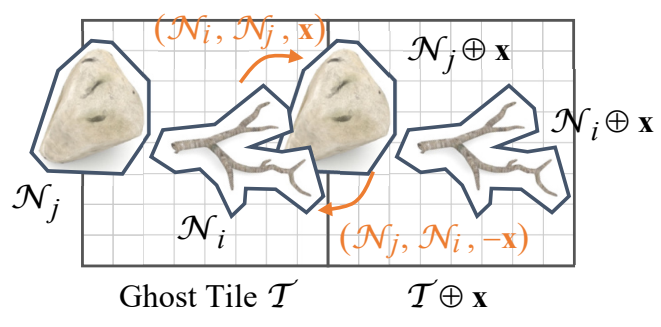


FIGURE 78 : Notations pour les nœuds et les arcs entre les objets candidats, les objets candidats peuvent croiser d'autres objets situés à une position de tuile différente.

6.2.2 Création du Ghost Tile

L'algorithme de création de Ghost Tile se déroule en deux étapes : la distribution des objets candidats et le calcul du graphe de collision. Étant donné un ensemble d'objets d'entrée $O = \{O_i\}$, la première étape crée des candidats dans la tuile cubique en distribuant des objets O_i dans la tuile avec différentes orientations et positions. La deuxième étape calcule le graphe de collision \mathcal{G} entre les candidats précédemment générés. L'algorithme global est le suivant :

1. Pour tous les objets O_i , calculez un repère aléatoire \mathbf{F}_i^j en fonction des contraintes de l'utilisateur, et ajoutez le nouveau candidat $O_i^j = \mathbf{F}_i^j(O_i)$ à l'ensemble des nœuds : $\mathcal{N} \leftarrow \mathcal{N} \cup O_i^j$.
2. Calculez l'intersection entre les nœuds N_k dans la tuile \mathcal{T} avec des tuiles décalées $\mathcal{T} \oplus \mathbf{v}$ et le nouveau nœud O_i^j . Si une intersection se produit, ajoutez les deux arcs (N_k, O_i^j, \mathbf{v}) et $(O_i^j, N_k, -\mathbf{v})$ au graphe \mathcal{G} .

Les candidats O_i^j sont générés en distribuant des objets dans la tuile. L'utilisateur peut contrôler différents types de distribution en fonction du type des objets.

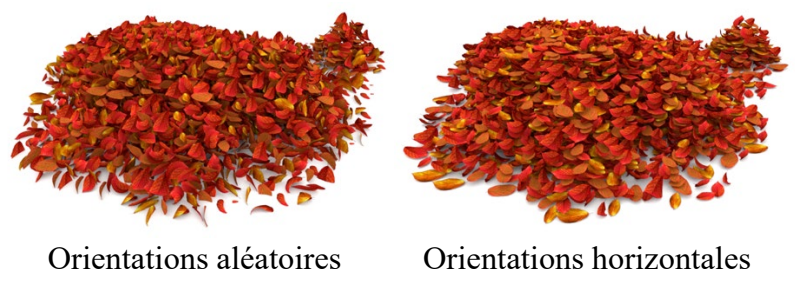


FIGURE 79 : Comparaison des différents résultats obtenus en contrôlant la distribution de l'orientation des objets candidats : l'image de gauche montre des orientations aléatoires et l'image de droite montre 75% de feuilles presque horizontal ($0^\circ - 30^\circ$) et 25% avec une orientation inclinée ($45^\circ - 60^\circ$).

Dans notre système, nous avons implémenté différentes stratégies pour calculer l'orientation des objets distribués. L'*orientation aléatoire* se prête aux piles ou couches épaisses où les objets peuvent

avoir des orientations totalement différentes, telles que des tas de roches ou de cailloux. Les stratégies d'orientation contrainte reposent sur une distribution d'orientations contrôlée par l'utilisateur et se prêtent au placement des feuilles tombées, des branches ou même des touffes d'herbe. La Figure 79 montre différents types d'effets obtenus en modifiant les statistiques de l'orientation des objets candidats. Notez que l'orientation peut également être contrainte pendant le processus d'instanciation (Section 6.3.3).

6.2.3 Calcul du graphe

Pour chaque candidat O_i^j , nous ajoutons un nœud N_k dans le graphe. Nous calculons ensuite les intersections possibles entre des paires de nœuds et stockons ces intersections sous forme d'arêtes dans le graphique.

À la fin de cette étape, nous avons obtenu un graphe de collision \mathcal{G} entre les candidats O_i^j . Une détection de collision par force brute entre toutes les paires de candidats serait exigeante en calcul car la complexité serait en $O(\#N^2)$ et dans notre cas $\#N$ peut être très grande (jusqu'à des dizaines de milliers d'objets candidats). Par conséquent, nous optimisons la détection de collision en utilisant une grille comme structure de données accélératrice.

Détection de collisions Nous traitons l'intersection entre les objets candidats O_i^j en approximant la forme des objets d'entrée en utilisant des ensembles de sphères (Figure 80). Cette représentation peut être calculée automatiquement [WL06 ; SKS12] ou optimisée manuellement avec un éditeur géométrique.



FIGURE 80 : Certains objets d'entrée approchés par des unions de sphères.

Le modèle d'union des sphères se prête à notre algorithme de génération Ghost Tile car les rotations, la translation et la mise à l'échelle uniformes utilisées dans la définition des repères F_i^j des objets candidats O_i^j peuvent être directement appliquées à l'union des sphères. Notez que l'union des sphères se prête à la génération automatique de points d'ancrage. Le test d'intersection consiste à calculer une approximation de la distance d'interpénétration d entre deux ensembles de sphères et à la comparer à un seuil défini par l'utilisateur δ . Soit $S(\mathbf{c}, r)$ une sphère de centre \mathbf{c} et de rayon r . Soit

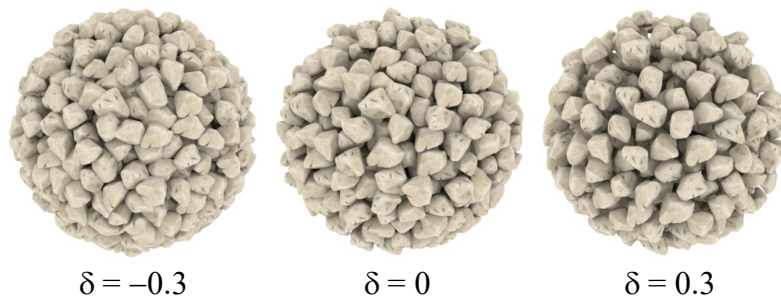


FIGURE 81 : Le seuil d'interpénétration δ permet de contrôler la densité des instances soit en autorisant une légère interpénétration ($\delta < 0$) ou forcer une distance minimale entre les instances ($\delta > 0$).

$\mathcal{A} = \{S(\mathbf{a}_i, r_i)\}, i \in [0, n - 1]$ et $\mathcal{B} = \{S(\mathbf{b}_j, r_j)\}, j \in [0, m - 1]$ deux ensembles de sphères avec leurs centres et rayons correspondants. Nous définissons la distance d'interpénétration $d(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ comme :

$$d(\mathcal{A}, \mathcal{B}) = \min_{i,j} \|\mathbf{b}_j - \mathbf{a}_i\| - (r_i + r_j)$$

On considère que deux candidats se croisent si $d(\mathcal{A}, \mathcal{B}) \leq \delta$. La Figure 81 illustre l'influence du paramètre de seuil δ : une valeur positive peut être utilisée pour forcer les objets à être placés à une distance minimale, alors qu'une valeur négative permet aux instances de s'interpénétrer. De petits seuils de distance négatifs sont recommandés en vue de générer des piles denses d'objets : bien que les instances puissent se croiser, leur interpénétration reste quasi invisible offrant une bonne approximation des objets en contact (Figure 93).

Grid-based acceleration Nous accélérons le processus global de génération du graphe de collision en utilisant une décomposition de l'espace basée sur une grille qui est adaptée à nos distributions d'objets candidats denses dans la tuile fantôme. Les objets sont d'abord projetés sur la grille et la détection de collision est effectuée sur les instances qui ont des voxels communs. Chaque voxel de la grille stocke une liste d'identifiants qui définissent quels candidats \mathcal{O}_i^j croisent le voxel. Nous utilisons (i, j, \mathbf{v}) comme identifiant, où i et j se réfèrent au candidat \mathcal{O}_i^j et \mathbf{v} représente le vecteur de décalage entier vers une tuile voisine qui est nécessaire pour traiter les objets chevauchants à l'extérieur de la tuile (Figure 82).

6.3 Instantiation

L'instanciation est contrôlée par un ensemble de champs de densité $f = \{f_i\}$ qui prescrit la densité relative et l'orientation des différents détails dans l'espace. L'algorithme pave l'espace avec la structure Ghost Tile et instancie les candidats en fonction de la valeur du champ de densité f_i à leurs points d'ancrage et du graphe de collision. Les deux ensembles de candidats rejetés et instanciés seront notés respectivement \mathcal{R} et \mathcal{I} .

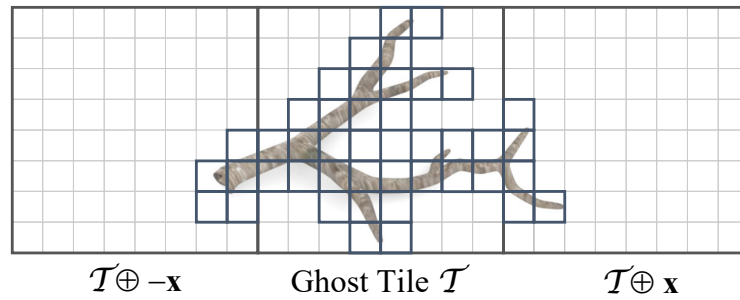


FIGURE 82 : Les objets qui sont en dehors des limites de la tuile de référence sont pris en compte en stockant un index de décalage.

Les champs de densité sont mathématiquement définies comme des fonctions $f_i : \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$. Tout type de fonction peut être utilisé, à condition qu'il soit continu. Dans notre implémentation, nous nous appuyons sur des fonctions de densité créées à partir de primitives squelettiques et d'opérateurs de combinaison comme dans le BlobTree [WGG99]. Ce modèle basé sur les primitives nous permet de contrôler efficacement la densité des détails dans différentes régions de l'espace. Plus précisément, notre approche nous permet de définir des densités volumétriques qui nous permettent de sculpter librement tout type de forme, piles ou couches épaisses qui seront ensuite remplies de détails.

Les candidats de type i ne doivent être instanciés que dans les régions de l'espace où la fonction de densité correspondante f_i est strictement positive. De plus, les valeurs des champs f_i définissent la densité relative de chaque type d'objet. Si la somme des densités est inférieure à 1, le processus d'instanciation ne remplit qu'une fraction de l'espace avec des détails. Sinon, nous créons autant de détails que possible en fonction de la densité moyenne.

Le processus global se déroule en trois étapes : le pavage et le tri des instances, la gestion des priorités entre les objets candidats, et enfin la sélection et la propagation des contraintes.

6.3.1 Pavage et élimination d'instances

La première étape du processus d'instanciation consiste à paver tout le volume de la scène avec la tuile fantôme. Rappelons que les points d'ancrage sont définis dans le cadre local de chaque objet O_i . Par conséquent, les coordonnées du point d'ancrage \mathbf{a}_i^k dans un Ghost Tile traduit par un vecteur \mathbf{t} sont définies comme $\mathbf{t} + \mathbf{F}_i^j \mathbf{a}_i^k$.

Pour chaque tuile de coordonnée \mathbf{t} , chaque objet O_i , chaque instance de cet objet O_i^j , et chaque point d'ancrage \mathbf{a}_i^k , nous évaluons la fonction de densité $f_i(\mathbf{t} + \mathbf{F}_i^j \mathbf{a}_i^k)$. Si $\exists k \mid f_i(\mathbf{t} + \mathbf{F}_i^j \mathbf{a}_i^k) = 0$, alors l'instance $O_i^j \oplus \mathbf{t}$ est considérée en dehors du volume de contrôle et écartée. Sinon, l'instance est ajoutée à la liste prioritaire des candidats (Figure 83). Les points d'ancrage peuvent être utilisés pour contrôler la façon dont les détails peuvent chevaucher ou se trouver strictement à l'intérieur du volume de contrôle (Figure 84). Lorsque vous utilisez un point d'ancrage unique situé au centre de l'objet, il

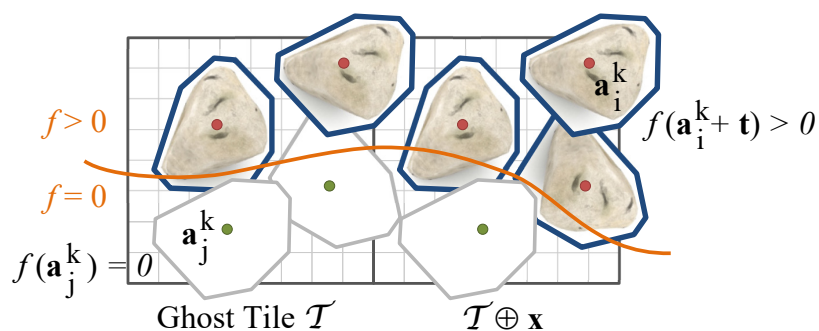


FIGURE 83 : La sélection rejette les candidats O_i^j en fonction de la densité à leurs points d'ancrage $f(\mathbf{t} + \mathbf{F}_i^j \mathbf{a}_i^k) = 0$.

peut chevaucher en dehors du volume de contrôle. En revanche, les contraintes sont mieux appliquées lors de l'utilisation de plusieurs points d'ancrage répartis à l'intérieur et à la surface des objets.

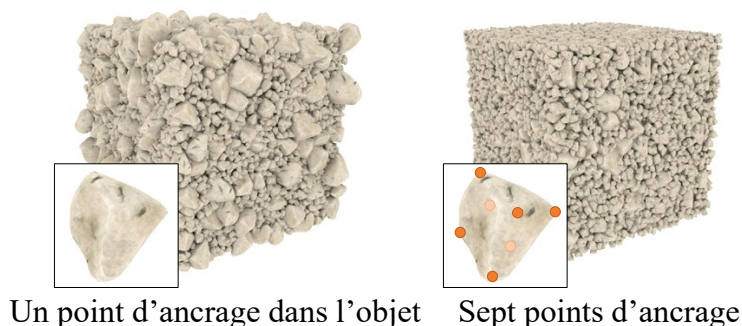


FIGURE 84 : Les points d'ancrage permettent à l'utilisateur de contrôler le remplissage du volume. Lorsque seuls les points d'ancrage se trouvent à l'intérieur du volume de contrôle, les instances peuvent chevaucher hors du volume de contrôle (à gauche). En plaçant quelques points d'ancrage sur la surface de l'objet, ces instances sont supprimées, ce qui permet un contrôle du volume plus serré (à droite).

6.3.2 Stratégie de priorité

Lorsqu'un candidat est sélectionné, il est placé dans une liste de priorité. Chaque type d'objet stocke sa liste de priorités associée. Nous calculons la valeur de priorité pour chaque point d'ancrage du candidat et appliquons le maximum trouvé. Les listes de priorités sont gérées selon trois stratégies différentes spécifiées par l'utilisateur (Figure 85).

La priorité aléatoire sélectionne simplement un candidat aléatoire dans la liste. La priorité aléatoire se prête à la génération de fines couches d'objets ou d'objets clairsemés répartis aléatoirement sur le terrain, comme quelques rochers épars ou quelques feuilles tombées (Figure 90). En revanche cette stratégie n'est pas adaptée à la génération de tas d'objets tels que des tas de roches ou de feuilles car la sélection aléatoire ne génère pas la distribution la plus dense d'objets quasiment en contact.

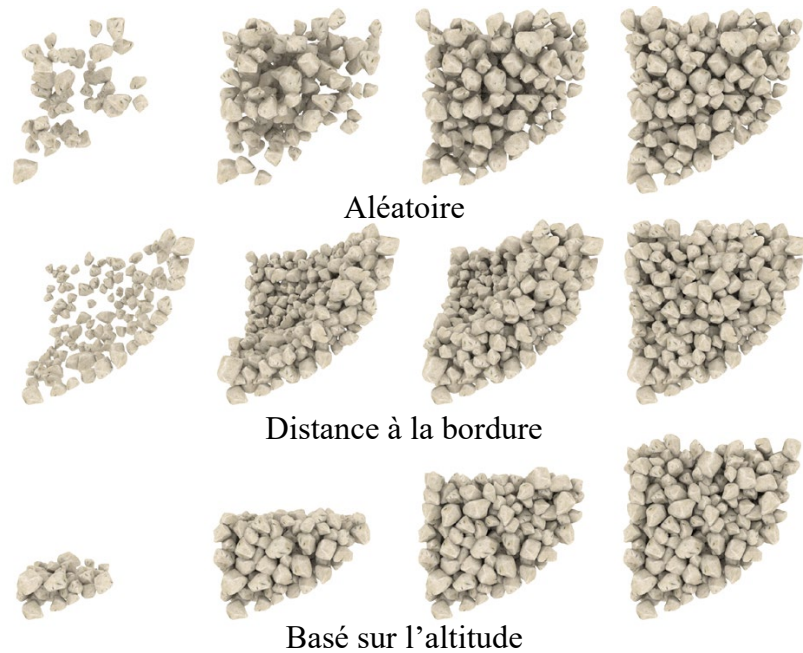


FIGURE 85 : Vue d'ensemble des différentes stratégies d'instanciation d'objets candidats. La priorité aléatoire peut produire de l'espace entre les objets, tandis que les schémas de priorité basés sur l'élévation et la distance aux limites sélectionnent toujours un candidat proche d'objets déjà instanciés, ce qui produit des piles plus compactes.

La priorité basée sur l'élévation est directement calculé comme l'opposé de la composante z de translation associée à \mathbf{F}_i^j . Il remplit les volumes de contrôle avec des détails en commençant par les candidats à des altitudes plus basses. En revanche, la priorité basée sur l'élévation se rapproche efficacement des piles compactes d'objets qui sont en contact par instanciation incrémentielle de couches successives.

La priorité définie par une distance à la frontière commence à placer des instances sur la limite du volume de contrôle avant de remplir l'intérieur. Les champs de densité f_i qui décrivent les volumes de contrôle fournissent une approximation de la distance à la limite du volume. L'algorithme trie les candidats en fonction de la distance par rapport à la limite et sélectionne de manière itérative l'instance la plus proche de la limite tout en invalidant les candidats qui sont en collision avec elle. De plus, cette stratégie permet de réduire le nombre d'objets instanciés en ne générant que quelques couches et en laissant l'intérieur du volume du champ de densité vide.

6.3.3 Sélection des candidats et contrainte de propagation

Afin de respecter les densités relatives de chacun des objets de la tuile, nous évaluons d'abord les densités au centre de la tuile et choisissons un objet O_i aléatoirement en fonction de la probabilité. Nous sélectionnons le candidat O_i^j avec la priorité la plus élevée. Comme la fonction de densité n'est pas constante à l'intérieur de la tuile, nous évaluons les fonctions de densité aux positions d'ancrage



FIGURE 86 : Les champs de densité volumétrique guident la génération de piles de détails enchevêtrés de manière très efficace et intuitive en contrôlant les contributions relatives.

$f(\mathbf{t} + \mathbf{F}_i^j \mathbf{a}_i^k)$). Soit $\|f\|$ la norme \mathcal{L}^1 du vecteur colonne des valeurs de la fonction de densité. Si $\|f\| > 1$ alors l'instance sera sélectionnée. Sinon, soit u , un nombre aléatoire généré uniformément sur un intervalle unitaire, le candidat ne sera instancié que si $u \leq \|f\|$. Cela nous permet de contrôler la densité des détails et de créer des distributions d'objets mixtes comme prescrit par f (Figure 87).



FIGURE 87 : Notre système peut remplir des volumes complexes avec de nombreuses instances. Ici, les champs de densité des roches et des branches ont été définis à l'aide de fonctions de champ implicites à partir d'un squelette pour représenter une statue.

Nous mettons ensuite à jour la liste des candidats dans la tuile considérée en interrogeant le graphe de collision \mathcal{G} . Nous mettons également à jour dans les tuiles voisines la liste des candidats qui doivent être ignorés car ils intersectent l'instance sélectionnée (Figure 88).

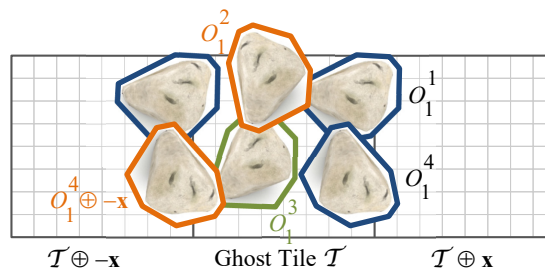


FIGURE 88 : Le candidat avec la priorité la plus élevée (O_1^3 en vert) est sélectionné et le graphe de collision \mathcal{G} rejette les candidats en collision dans la tuile courante (O_1^2 en orange) ainsi que les candidats dans la tuile gauche voisine ($O_1^4 \oplus -\mathbf{x}$ en orange).

6.4 Résultats

Les tuiles fantômes peuvent être utilisées comme outil de génération de détails en combinaison avec des simulations, une génération procédurale et une édition interactive. De plus, notre méthode offre un

Nom	Figure	#O	#N	#E/2	#E/(2#N)	Temps (s)	Mémoire (kB)
Pierres	93	1	0.32 k	14 k	44	0.17	80
Branches, pierres	92	3	1.12 k	990 k	901	93.0	4 770
Feuilles	86	4	0.32 k	102 k	319	31.0	454
Champignons	94	2	0.17 k	137 k	1 370	87.5	559
Aiguilles de pins, feuilles	89	2	0.85 k	941 k	1107	138	4 290

TABLE 6.1 : Statistiques pour l'étape de création de la tuile fantôme, le temps indiqué est en secondes et la mémoire en kilo-octets. La taille de la tuile était ~ 50 cm alors que la taille des objets était ~ 10 cm pour les roches et les feuilles, ~ 15 cm pour les champignons et ~ 30 cm pour les succursales.

contrôle à la fois local et global sur la génération des détails. La Figure 86 montre que notre méthode peut être utilisée pour générer efficacement des piles de différents matériaux, y compris avec différents objets enchevêtrés. Les champs de densité nous permettent de sculpter la forme de piles complexes et de contrôler facilement la densité relative des objets enchevêtrés.

Les paramètres sont définis de sorte que la taille de la tuile fantôme varie de 1 à 3 fois la taille des plus gros objets qu'elle contient. Dans plusieurs exemples illustrés tout au long du document, les touffes et les feuilles d'herbe ont été définies sur ~ 10 cm, les roches et les pierres ont été définies sur $\sim 10 - 20$ cm et les branches sur $\sim 20 - 30$ cm. La taille de la tuile fantôme a été définie sur ~ 50 cm.

La Figure 89 montre un gros plan d'un paysage de sous-bois. Notre méthode prend en compte la forme complexe des objets d'entrée. Le sol est recouvert de différents petits objets, notamment des feuilles, des aiguilles de pin et des touffes d'herbe qui ne se croisent pas. Les petits champignons ont été automatiquement instanciés sous le chapeau des plus grands et sont partiellement recouverts par des feuilles et des aiguilles dans des enchevêtrements très complexes qui seraient difficiles à obtenir avec d'autres techniques existantes.



FIGURE 89 : Scène de sous-bois montrant un empilement et un enchevêtrement très complexes entre des épinges de pins, des feuilles mortes et des champignons. Des couches complexes comportant différents types d'objets ont été créées en combinant plusieurs champs de densité se chevauchant partiellement.

La peinture et sculpture interactive est rendu possible par la performance du processus d'instanciation, qui permet d'utiliser la Ghost Tile dans un environnement d'édition interactif. Nous avons

implémenté un outil de peinture et de sculpture simple pour éditer les primitives de la fonction de densité. La tuile fantôme est pré-calculée une fois pour toutes et stockée en mémoire. Pendant la session d'édition interactive, les champs de densité sont édités en temps réel en fonction des traits saisis par l'utilisateur. Les détails sont générés uniquement à l'intérieur des tuiles où les champs de densité ont été modifiés. Les primitives sont combinées ensemble à l'aide d'opérateurs de fusion et booléens comme décrit dans [WGG99]. Enfin, les champs de densité sont modifiés en calculant la différence avec les autres objets solides de la scène tels que l'arbre et le terrain afin d'éviter l'interpénétration avec les détails.

La figure 90 montre une prairie où le terrain est entièrement recouvert de pierres, d'herbe et de feuilles mortes instanciées à partir d'une seule tuile fantôme. La scène a été créée en quelques minutes et comporte de nombreuses instances ~ 50 k.

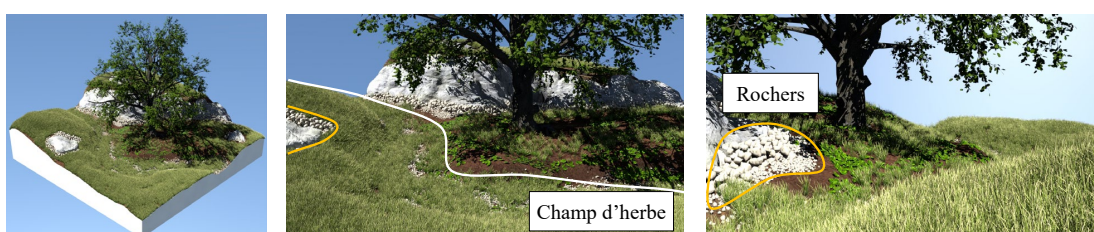


FIGURE 90 : Les couches d'herbe et de feuilles mortes et les tas de roches de la prairie ont été créés en quelques minutes à l'aide de notre éditeur interactif. Les ~ 50 k objets ont été instanciés.

La génération procédurale est une autre approche pour générer les fonctions de densité utilisées pour définir les détails. La Figure 91 montre un terrain généré de manière procédurale avec des meules de foin. Le champ de densité d'herbe séchée était automatiquement calculé à partir du champ de hauteur d'entrée, tandis que les meules de foin étaient sculptées en distribuant de manière aléatoire des primitives cylindriques sur le terrain.



FIGURE 91 : Les meules de foin ont été créées à l'aide de champs de densité en forme de cylindre. Les contraintes d'orientation ont été prescrites à l'aide d'un champ de rotation. La scène comporte ~ 4 260 k instances.

La Figure 92 montre un paysage de rivière avec un barrage de castor sculpté à l'aide de primitives implicites cylindriques généralisées. Les branches enchevêtrées ont été automatiquement créées à

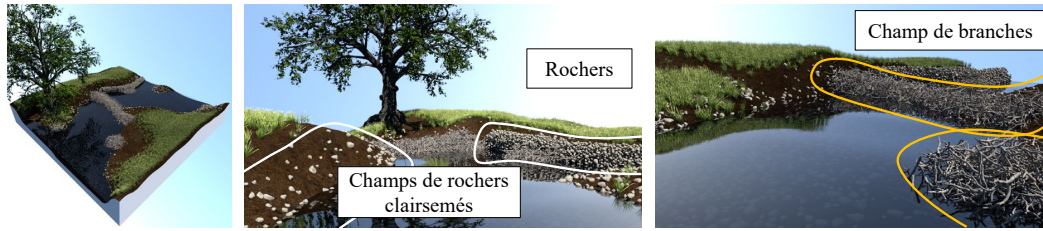


FIGURE 92 : Le barrage de castor a été créé en moins d’une minute en sculptant un champ de densité combiné avec une tuile fantôme pleine de branches de différentes tailles et orientations. La forme du barrage a été obtenue en assemblant des primitives implicites sphères et cylindriques généralisées. Les champs de contrôle des touffes d’herbe et des roches ont été générés de manière procédurale en fonction de la distance par rapport au plan d’eau.

partir de ce volume de contrôle très simple créé par le concepteur. En revanche, les champs de densité pour les touffes d’herbe et les roches ont été automatiquement générés à partir du squelette de la rivière.

6.4.1 Performance

Rappelez-vous que notre méthode fonctionne en deux étapes séparées. Premièrement, la tuile fantôme est pré-calculée une fois pour toutes et stockée en mémoire. Ensuite, les détails sont générés en parcourant la scène avec la tuile fantôme et en instanciant les candidats en fonction des champs de densité.

Génération du Ghost Tile Les performances de cette étape dépendent du nombre de candidats $\#N$ dans la tuile et du nombre d’arcs de collision $\#\mathcal{E}$. Une statistique importante est le nombre moyen de collisions par candidat noté $\rho = \#\mathcal{E}/2\#N$. Notez que $0 \leq \#\mathcal{E} \leq \#N(\#N - 1)$ où la limite supérieure représente le cas où tous les candidats se croisent (graphe complet). La Table 6.1 rapporte des statistiques et des délais pour le calcul des différentes configurations de Ghost Tile. Notez que l’empreinte mémoire du graphe de collision \mathcal{G} est petite, allant de moins de cent kilo-octets pour des arrangements simples avec peu de collisions entre objets, à quelques mégaoctets pour des tuiles fantômes complexes.

Étant donné quelques objets d’entrée ($\#O \leq 4$), nous créons des tuiles fantômes avec des centaines de candidats ($300 \leq \#N \leq 1200$) qui se chevauchent partiellement et se croisent (nombre moyen d’intersections par candidat $35 \leq \rho \leq 1400$). La génération est d’autant plus exigeante en calcul que ρ est élevé et que les objets ont des formes complexes. Cela explique que le temps de prétraitement est élevé pour les feuilles et les branches, car ces objets sont approximés par de nombreuses sphères.

Instanciation Le coût est directement lié à la taille de la scène. La Table 6.2 rapporte des statistiques pour le processus d’instanciation. Les temps montrent que les outils d’édition locaux qui ne fonctionnent que sur quelques tuiles de la scène fonctionnent à des taux interactifs comme démontré dans

	Scène	Figure	# \mathcal{I}	# \mathcal{R}	Temps (s)
Locale	Prairie	90	0.11 k	58 k	0.3
	Prairie	90	0.75 k	320 k	1.2
	Prairie	90	2.0 k	577 k	3.4
	Champignons	94	48	219 k	0.9
Globale	Champ	91	1 990 k	35 000 k	54.6
	Castor	92	36 k	26 300 k	10.7
	Botte de foin	91	81 k	10 400 k	6.8
	Borie	93	63 k	33 800 k	16.8

TABLE 6.2 : Statistiques d’instanciation : l’heure rapportée est donnée en secondes. Rappelons que # \mathcal{R} et # \mathcal{I} représentent le nombre de candidats qui ont été rejetés et instanciés respectivement lors de l’étape de détection de collision du processus d’instanciation.

le pré (Figure 90) et pour une petite scène telle que la figure 89. En revanche, le temps de traitement augmente lors de la génération de détails sur une scène entière, car le nombre de candidats rejetés # \mathcal{R} augmente comme démontré dans les scènes *du barrage de castor* et de *la hutte* (Figure 92 et 93). Les délais montrent que même pour un grand nombre d’instances, le temps de génération est inférieur à une minute.

6.4.2 Comparaison avec d’autres techniques

Cette méthode ressemble en esprit au carrelage aperiodique [Pey+09a] que j’ai présenté dans ma thèse pour générer des tas de roches. Bien que cette méthode ne garantisse pas la cohérence des points de contact entre les objets, les expériences montrent que des piles visuellement plausibles peuvent être créées en réglant le paramètre de distance d’interpénétration δ . Bien que les deux approches reposent sur des algorithmes d’instanciation similaires, cette nouvelle méthode se compare favorablement en termes de polyvalence, de contrôle et d’efficacité. Ce processus permet de créer des piles avec différents types d’objets tels que des touffes d’herbe, des branches ou des rochers ou encore des champignons. De plus, la combinaison de plusieurs champs de densité permet un meilleur contrôle de la densité relative et de l’orientation des détails.

Enfin, le pavage aperiodique doit générer des milliers de modèles géométriques différents pour garantir un contact constant entre les roches. En revanche, notre cadre permet l’instanciation en masse de quelques modèles géométriques, ce qui est considérablement moins gourmand en mémoire. La Figure 93 montre une ancienne cabane en pierre sèche et un mur de pierre modélisés avec seulement deux modèles de roche de référence 2 (~ 63 k instances). En revanche, la même scène créée avec un pavage aperiodique nécessitait 7 355 différents modèles de pierres (~ 28 k instances).

Notre méthode ressemble également aux approches procédurales récentes telles que les textures d’éléments discrets [MWT11] et les méthodes de génération d’agrégats non périodiques [SM14]. Les deux techniques reposent sur une étape de minimisation d’énergie exigeante en termes de calcul, ce



FIGURE 93 : Une ancienne cabane en pierre sèche générée avec notre technique Ghost Tile (~ 63 k pierres plates). La forme de la hutte a été sculptée en définissant un champ de densité pour les roches comme la différence entre une sphère creuse et plusieurs sphères plus petites. L'utilisateur a défini un autre champ pour contraindre la taille des pierres autour des ouvertures.

qui empêche l'édition interactive et limite le nombre d'instances générées à quelques milliers. En revanche, dans notre méthode, la détection de collision est effectuée lors de l'étape de prétraitement de la génération Ghost Tile, ce qui nous permet d'accélérer le processus d'instanciation et de générer des scènes complexes comportant des dizaines de milliers d'objets intriqués.

Notre méthode se compare également favorablement aux techniques de simulation basées sur le vent pour la modélisation des feuilles mortes. L'approche de distribution de feuille présentée dans [Des+06] repose sur des calculs de trajectoire et de collision exigeants en termes de calcul pour chaque feuille. En revanche, cette méthode peut générer des tas de feuilles et des distributions visuellement plausibles. Bien que notre méthode ne puisse garantir un contact précis entre les objets, les résultats restent visuellement plausibles.

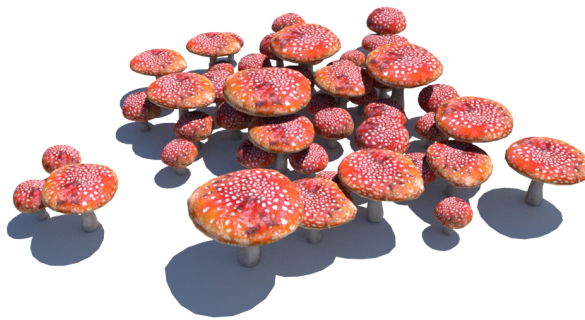


FIGURE 94 : La forme 3D des objets est prise en compte dans notre solveur de collision conduisant à ce placement automatique de champignons.

Les objets environnementaux présentés dans [Gro+16] sont une autre approche pour générer des détails en augmentant une base de données d'objets procéduraux avec des détails sensibles à l'environnement tels que l'herbe, la mousse ou les feuilles. L'utilisateur doit définir le comportement de chaque objet par rapport aux différentes variables d'environnement avant de l'utiliser. En revanche, notre framework peut être directement combiné avec d'autres éditions, simulation de techniques procédurales pour générer des détails sur la surface ou sculpter tout type d'objet volumétrique rempli de détails.

6.5 Conclusion et perspectives

Nous avons introduit une nouvelle approche basée sur les tuiles pour modéliser les détails. Notre approche s'appuie sur des tuiles fantômes précalculées qui stockent un ensemble de candidats qui se chevauchent et un graphe qui représente les collisions entre eux. L'originalité de cette méthode est qu'elle fournit au concepteur un cadre unifié pour créer une grande variété de détails enchevêtrés, tels que des feuilles tombées au sol ou des objets en relief comparé aux autres méthodes de pavages qui proposent des distributions fixes sur une ou plusieurs tuiles. La distribution des détails peut être contrôlée efficacement par des champs de densité qui peuvent être soit obtenus par édition interactive, par simulations ou encore par des techniques procédurales.

L'approche proposée est efficace mais nécessite des améliorations pour passer à des échelles plus importantes avec plusieurs milliards d'instances donc avoir des instanciations à la volée, ou encore améliorer la réalisme de la distribution des objets et surtout de leur interrelation :

- La méthode présentée se révèle très polyvalente, mais elle nécessite un précalcul conséquent et peut consommer plus d'espace mémoire que d'autres techniques de pavage. Il est essentiel de trouver des approches adaptées pour gérer une grande diversité d'objets sur de vastes étendues. Pour résoudre cette problématique et optimiser la rapidité d'instanciation des objets, des stratégies hybrides peuvent être envisagées. De plus, les objets sont tous de tailles comparables car ils sont définis au sein d'une seule entité homogène. Dans la réalité, les objets peuvent avoir des échelles très différentes, ce qui complique les contraintes de placement et d'interaction. Il est donc impératif de mettre en œuvre des approches hiérarchiques ou à niveaux de détail pour mieux gérer cette hétérogénéité et s'assurer que les objets de différentes tailles coexistent et interagissent de manière cohérente dans la scène.
- Les géométries utilisées dans ces algorithmes sont statiques et ne prennent pas en compte le phénomène de vieillissement dans leur comportement. Une approche prometteuse serait d'exploiter les méthodes contemporaines de placement des objets tout en intégrant le processus de vieillissement. Cela permettrait une meilleure intégration de ces objets dans la scène, en rendant leur évolution plus naturelle et réaliste. Par exemple, une étude innovante pourrait viser à modéliser les feuilles tombées au sol de manière à ce qu'elles puissent altérer leur géométrie au fil du temps, se compacter et se décomposer dans le sol, tout en permettant l'accumulation de nouvelles feuilles chaque saison. Cette approche non seulement améliore l'aspect visuel de la scène, mais reflète également les processus écologiques réels, offrant ainsi une représentation plus fidèle et dynamique de l'environnement.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Synthèse scientifique

Dans mon manuscrit, j'ai sélectionné une série de travaux représentatifs axés sur la modélisation de paysages naturels par amplification. L'objectif de ces recherches est de proposer des méthodes permettant d'enrichir un terrain existant avec divers contenus, transformant ainsi un support de scène vide en un paysage complet illustrant la diversité de notre monde.

J'ai d'abord présenté une méthode procédurale permettant d'ajouter des rivières animées sur de vastes étendues, en utilisant le calcul de trajectoires vectorielles des réseaux fluviaux et en animant ces cours d'eau grâce à l'intégration automatique de primitives spécifiques et locales, permettant la modélisation des différents archétypes de rivières définis par la classification de Rosgen. Le modèle proposé permet de gérer de vastes étendues tout en offrant à l'utilisateur la possibilité de modifier les données vectorielles à n'importe quelle échelle.

Ensuite, j'ai proposé une amélioration significative de la diversité des écosystèmes végétaux par rapport à l'état de l'art, en modélisant la complexité du cycle de vie des individus. Cela inclut notamment l'ajout d'arbres morts, de troncs dénudés et de branches mortes, ainsi que leurs interactions avec l'environnement au sein de la simulation globale. Il a été démontré que la variété accrue des modèles d'arbres contribue à un réalisme plus prononcé de la scène.

J'ai également défendu deux méthodes de simulation destinées à ajouter ou gérer des couches de matériaux pour les déserts chauds et les glaciers. La première méthode exploite les phénomènes éoliens pour définir la géométrie des dunes dans les déserts chauds, tandis que la seconde emploie un processus de création et d'évolution des glaciers. Ces deux méthodes mettent en avant des phénomènes distincts, tels que le vent et la gravité, qui ont un impact considérable sur les couches de matière du terrain. Malgré la complexité des calculs, des modèles hiérarchiques peuvent être mis en place pour garantir des temps de calcul interactifs.

Enfin, j'ai terminé en présentant une méthode procédurale permettant de peupler rapidement des espaces avec des objets volumétriques, tout en offrant un contrôle étendu à l'utilisateur pour le placement et la disposition de ces éléments.

Ces travaux ont permis de jeter les bases solides pour la modélisation de divers phénomènes naturels, en offrant des niveaux de contrôle variables selon les applications. Plusieurs techniques de modélisation, allant des méthodes procédurales aux simulations, ont été utilisées pour aborder divers

verrous scientifiques, notamment le réalisme des scènes et le contrôle de la génération, avec pour objectif une utilisation facilitée par des graphistes.

Il existe une abondante littérature portant sur l'amplification des scènes virtuelles. Mon apport réside dans l'introduction de méthodes novatrices pour la modélisation de phénomènes peu explorés jusqu'ici, tels que les glaciers et les déserts, ainsi que dans l'amélioration de méthodes existantes en relevant divers défis scientifiques dans ce domaine. Ces défis comprennent notamment l'augmentation du réalisme des scènes en diversifiant les éléments, l'expansion des échelles de modélisation, l'amélioration du contrôle utilisateur par des outils intuitifs, et l'optimisation du traitement de grandes quantités de données. Ces avancées ont été réalisées tant individuellement que par la convergence de ces différents défis scientifiques.

L'objectif demeure de développer des méthodes adaptées aux contraintes spécifiques de chaque application et aux attentes des utilisateurs. Mes travaux, tout comme ceux présentés dans la littérature actuelle, ne sont pas encore suffisamment avancés pour répondre pleinement à tous les besoins exprimés. De nombreux défis restent à surmonter pour résoudre ces obstacles scientifiques et technologiques.

Perspectives

Dans chaque chapitre de ce manuscrit, j'ai exploré différentes perspectives sur chaque thème. Il reste encore beaucoup à faire dans chaque domaine afin de créer des contenus toujours plus riches et immersifs. Un des défis principaux consiste à générer du contenu à des échelles de plus en plus vastes tout en préservant un réalisme élevé. Il est crucial de concilier la création à grande échelle tout en maintenant une cohérence perceptible à l'échelle humaine.

Voici quelques perspectives communes à l'ensemble des thématiques abordées :

- L'amélioration de l'échelle de modélisation est un enjeu crucial pour la création de scènes virtuelles réalistes et immersives. L'objectif est de développer des algorithmes capables d'étendre la modélisation à des échelles plus grandes tout en maintenant un haut niveau de réalisme.
- La production en fonction de contraintes scénaristiques implique la création de modèles à petite échelle qui s'intègrent de manière harmonieuse et cohérente dans une scène plus vaste. Cette approche vise à garantir une continuité esthétique et fonctionnelle entre les détails locaux et la vue d'ensemble, respectant ainsi les exigences narratives et visuelles de la scène.
- L'interaction utilisateur intuitive est cruciale pour simplifier le contrôle des scènes virtuelles. Elle doit permettre des interactions naturelles et compréhensibles, même à grande échelle, tout en garantissant une rapidité de génération optimale.

Un important défi actuel réside dans l'uniformité avec laquelle la plupart des méthodes sont traitées, souvent définies dans des espaces restreints par commodité. À mesure que les échelles de modélisation augmentent, il devient impératif de gérer l'hétérogénéité des données, ce qui soulève des implications majeures et des problèmes significatifs. Les modèles existants se révèlent souvent inadaptés car ils nécessitent la prise en compte de variables supplémentaires et d'effets imprévus dans

les modélisations. Le défi principal réside dans la modélisation des comportements et des priorités aux interfaces entre différentes méthodes, engendrant des difficultés tant au niveau spatial que temporel de la modélisation. Par exemple, dans la simulation d'écosystèmes, les paramètres de simulation sont souvent très sensibles et peuvent grandement influencer les résultats obtenus. Cela rend complexe l'obtention de résultats cohérents tout en tenant compte de diverses caractéristiques, ce qui complique le contrôle utilisateur nécessitant une expertise approfondie et de nombreux essais, ralentissant ainsi le processus de création.

Mes projets de recherche à venir se focalisent sur deux axes principaux : Le premier axe vise à concevoir des scènes hétérogènes afin de permettre une modélisation à grande échelle tout en garantissant la cohérence entre diverses échelles et méthodes de modélisation. Le second axe concerne l'intégration harmonieuse et unifiée des interactions entre les phénomènes et les différents éléments constitutifs de la scène.

Consistance entre les différentes échelles

La création de contenus numériques extrêmement détaillés et réalistes, représentant des mondes virtuels à grande échelle, demeure un défi crucial pour les industries de production de contenus. Du point de vue scientifique, ce défi réside dans la gestion de volumes de données considérables qui nécessitent création, stockage et traitement tout en maintenant une cohérence à toutes les échelles. Les modèles procéduraux [Cor+19 ; Gue+20] ont été adoptés comme une solution à l'évolutivité de ce problème. Ils permettent de générer des contenus géométriques à grande échelle avec une intervention minimale de l'utilisateur et une efficacité mémoire remarquable. Toutefois, garantir le réalisme et la cohérence des données à toutes les échelles reste complexe. D'autre part, les simulations physiques, ou inspirées de phénomènes naturels [Sch+23 ; Cor+23], offrent la possibilité de créer des environnements virtuels d'un réalisme extrême en respectant les principes de la physique. Cependant, ces simulations requièrent des ressources substantielles et ne sont pas toujours applicables à toutes les échelles, notamment pour des scènes complexes et de grande taille.

Comme je l'ai exposé dans le manuscrit, les scènes virtuelles peuvent être générées en combinant des méthodes de simulation et des techniques procédurales. La modélisation procédurale est employée pour enrichir les résultats des simulations en intégrant des niveaux de détail supplémentaires. Cependant, des discontinuités se manifestent souvent entre les données issues des simulations et celles générées par les processus d'enrichissement. Ces deux approches opèrent de manière distincte à l'aide de cartes de contrôle simplifiées, ce qui limite la cohérence globale entre les différents modèles.

Mon objectif est de surmonter cette limitation en intégrant de manière étroite la simulation physique et la génération procédurale. En manipulant les données obtenues à chaque étape pour les utiliser comme paramètres dans les niveaux suivants, je vise à maintenir une cohérence à toutes les étapes et à toutes les échelles de la production de la scène. Cette intégration peut prendre diverses formes : par exemple, des données générées de manière procédurale peuvent servir de fondement à des simulations qui, à leur tour, harmoniseront ces données. Inversement, la simulation peut être exploitée pour obtenir

des paramètres complexes et temporels qui guideront la génération automatique de contenu procédural. L'objectif est d'établir une synergie entre la simulation et la génération procédurale à travers le temps et les échelles, afin d'atteindre un niveau de réalisme accru.

Pour aborder cette problématique, il sera essentiel de développer des structures de données intégrant une dimension temporelle en complément des données existantes. Il faudra également définir des méthodes appropriées pour générer des données en fonction de cette dimension temporelle. Par exemple, cela pourrait impliquer la modélisation de la géométrie et de la coloration d'un rocher suite à un éboulement, avec une évolution au fil du temps depuis l'événement initial. Ainsi, la transformation progressive de ce rocher, incluant des processus tels que l'érosion ou l'envahissement par la végétation, pourrait être simulée de manière réaliste pour refléter son évolution chronologique.

Il est primordial que l'utilisateur dispose à chaque étape d'outils de contrôle intuitifs permettant d'intervenir sur la géométrie et les paramètres de manière précise, que ce soit localement (par exemple, via une intervention directe) ou avec un effet temporel intégré, afin de maintenir la continuité de la génération. Cette interactivité est essentielle pour effectuer des ajustements précis et garantir que les modifications apportées se reflètent de manière cohérente à travers toute la scène.

Pour parvenir à un niveau de réalisme accru, il sera nécessaire de manipuler des volumes de données considérables et de développer des outils et méthodes complexes tout en préservant une interface utilisateur intuitive. L'objectif est de permettre la création de scènes visuellement riches et d'une grande fidélité, tout en offrant une flexibilité suffisante pour répondre aux besoins spécifiques des utilisateurs et des divers contextes d'application.

En résumé, la recherche se concentrera sur l'intégration harmonieuse des techniques de simulation et de génération procédurale afin de garantir une modélisation cohérente et réaliste à toutes les échelles. Ce processus impliquera de relever plusieurs défis techniques, mais il permettra de créer des environnements virtuels d'une qualité et d'un réalisme inégalés.

Interfaces entre différents matériaux

À plus long terme, un aspect crucial à explorer est l'étude des interfaces entre différents matériaux dans la modélisation des phénomènes naturels. Actuellement, il existe une lacune significative dans la modélisation des interactions entre divers éléments d'une scène, étant donné que les recherches se concentrent principalement sur le sol et les phénomènes spécifiques à traiter, sans prendre pleinement en compte la complexité des interactions avec d'autres matériaux ou objets. Dans la plupart des cas, chaque phénomène présente des caractéristiques distinctes qui nécessitent une analyse approfondie pour être modélisées avec précision. Cette approche limitée pose déjà de nombreux défis, car chaque phénomène exige une compréhension détaillée et une modélisation précise de ses particularités. Par conséquent, de nombreuses recherches se concentrent sur l'étude isolée de phénomènes individuels.

La problématique consiste à étendre la modélisation à l'ensemble des phénomènes naturels, en prenant en compte leurs interactions complexes avec les éléments environnants. Cela requiert le

développement de modèles beaucoup plus complexes que ceux actuellement disponibles, notamment par le biais de la modélisation volumique permettant une représentation précise de la géologie et de la lithologie d'un terrain, afin de capturer la diversité et les propriétés spécifiques de celui-ci. Ensuite, il est crucial d'intégrer ces interactions entre matériaux dans le processus de modélisation, comme j'ai commencé à le faire pour les cours d'eau, bien que cette modélisation soit actuellement réalisée à une échelle trop grossière.

Voici un exemple illustratif concernant la modélisation des cours d'eau et de leurs interactions avec l'environnement : La plupart des recherches se concentrent sur la modélisation et la simulation de la surface animée de l'eau. Cependant, pour une modélisation complète des paysages, il est essentiel de considérer l'ensemble de l'environnement. Cela commence par l'amélioration de la modélisation du terrain pour intégrer la géologie et la lithologie, qui influencent la trajectoire des cours d'eau. Il est nécessaire de modéliser la diversité des éléments environnementaux tels que les rochers, les pierres, les matériaux granulaires comme le sable, ainsi que les détritiques.

Ces éléments ont un impact direct sur la dynamique de l'eau, influencés par le courant qui transporte ces objets en aval. La modélisation précise des berges des cours d'eau est cruciale, car elles subissent un processus continu d'érosion qui affecte les rochers et les matériaux granulaires, parfois protégés par la végétation ou leurs racines.

Cette approche met en lumière la complexité et la diversité des environnements locaux tels que les cours d'eau. Ce principe s'applique également à de nombreux autres contextes et environnements.

La prise en compte de ces interactions implique une augmentation considérable de la complexité de la modélisation et des simulations, ce qui entraîne également des temps de calcul plus importants. Cependant, cette approche a un impact significatif sur le réalisme des scènes. L'œil humain perçoit la cohérence d'une scène en identifiant les relations de cause à effet entre les différents phénomènes, ainsi que la temporalité des événements et leur évolution au fil du temps.

L'objectif n'est pas de fusionner tous les phénomènes en un système unique, mais plutôt de permettre la modélisation d'interactions complexes incluant davantage de phénomènes qu'auparavant, avec des relations mutuelles entre eux.

En résumé, le défi à long terme est de développer des modèles capables de simuler de manière réaliste les interactions complexes entre différents matériaux, en intégrant leurs propriétés volumiques et en tenant compte des impacts réciproques des phénomènes naturels. Cette approche permettra de créer des scènes virtuelles d'une grande richesse visuelle et d'un réalisme accru, répondant ainsi aux exigences croissantes des utilisateurs.

CURRICULUM VITAE

Titres Universitaires

- 2007 - 2010 Doctorat en informatique, Génération Procédurale de Monde
Université Claude Bernard, Lyon 1
- 2005 - 2007 Master Recherche Informatique (Spécialité Image Information Hypermédia)
Université Paul Sabatier, Toulouse III
- 2002 - 2005 Licence Informatique
Université Paul Sabatier, Toulouse III

Fonctions

- 2023 – En cours Maître de Conférences
IUT de Lyon, site de la Doua
- 2011 – 2023 Maître de Conférences (280h TD par an)
IUT de Lyon, site de Bourg en Bresse
- 2010 - 2011 Attaché Temporaire d’Enseignement et de Recherche (192h)
IUT de Lyon, site de Bourg en Bresse
- 2007 - 2010 Monitorat de l’Enseignement Supérieur (192h)
Université Claude Bernard, Lyon 1

Activités administratives et collectives

Je me suis impliqué dans diverses activités administratives afin d’aider la communauté autant au niveau de l’Enseignement que de la Recherche.

- 2023 – En cours Co-responsable BUT 3 Réalisation d’Applications et Licence Professionnelle DEVOPS
- 2023 – En cours Membre élu au conseil du département informatique de l’IUT lyon1- Doua
- 2022 – En cours Membre du comité de direction du GDR IGRV et responsable des écoles de recherche
- 2020 – En cours Responsable de la thématique monde virtuels de l’équipe Origami
Laboratoire LIRIS
- 2019 – En cours Membre élu au CA de l’association EGFR
Trésorier depuis 2022

2018 – 2023	Responsable des projets du DUT/BUT IUT de Lyon, site de Bourg en Bresse, Département informatique
2013 – 2022	Membre élu au CA de l'association AFIG Trésorier de 2017 à 2022
2013 – 2016	Responsable Licence Professionnelle METINET IUT de Lyon, site de Bourg en Bresse
2010 – En cours	Responsable de la plateforme Arches Laboratoire LIRIS

8.1 Enseignements

J'ai principalement dispensé mes cours à l'IUT de Lyon 1, sur le site de Bourg-en-Bresse, de 2010 à 2023, et sur le site de la Doua depuis septembre 2023. Par ailleurs, j'ai également enseigné durant plusieurs années au sein du Master Image du département d'Informatique de l'Université Claude Bernard. Mes enseignements couvrent divers domaines, notamment la programmation d'applications, le développement web, ainsi que la gestion de projets. La formation en IUT étant professionnalisante, j'ai accompagné de nombreux stagiaires et alternants au fil des années, assurant ainsi le lien essentiel entre le monde académique et le milieu professionnel.

Veillez trouver ci-après un résumé de mes enseignements :

Initiation à l'algorithmique	2011-2022	DUT 1A
Algorithmique & programmation	2013-2023	DUT 1A
Gestion de projets et Analyse	2010-2023	DUT et BUT 2A
Développement efficace	2010-2023	DUT et BUT 2A
Qualité de développement	2023-2024	BUT 2A
Bureautique	2010-2023	DUT 1A
HTML	2018, 2020-2024	DUT et BUT
SQL	2010-2015	DUT 1A
PHP	2023-2024	DUT 1A
Imagerie et Multimédia	2018-2022, 2023-2024	DUT et BUT 2A (Doua)
Modélisation procédurale	2015-2017	M2 Image - Dépt informatique Université Lyon1

8.1.1 Co-responsable BUT 3 RA et Licence Professionnelle DEVOPS

À la suite de ma mutation du département Informatique délocalisé de l'IUT Lyon 1 de Bourg-en-Bresse vers celui de la Doua en septembre 2023, j'ai assumé la coresponsabilité de la 3ème année du BUT, parcours Réalisation d'Applications (70 étudiants), ainsi que de la Licence Professionnelle DEVOPS (14 étudiants) axée sur le développement opérationnel. Ces deux parcours en alternance nécessitent une gestion et une coordination rigoureuses de la formation, incluant le suivi et la sélection des étudiants, le recrutement et le suivi des enseignants, ainsi que la gestion de l'ensemble des contrats avec les entreprises. Pour l'année scolaire 2023-2024, bien que je n'aie pas pris en charge la gestion

des affaires courantes des étudiants actuels, je me suis consacré à la préparation de la formation et aux recrutements pour la rentrée 2024.

8.1.2 Responsable de la Licence Pro METINET

De 2013 à 2016, j'ai exercé les fonctions de responsable de la Licence Professionnelle METINET, spécialisée dans la conception et la gestion de sites internet. Cette responsabilité m'a conduit à gérer, pendant trois années, divers aspects relatifs à la formation, notamment le recrutement des étudiants en alternance, le recrutement et la gestion des professionnels vacataires, les relations avec les entreprises, la gestion des emplois du temps, ainsi que la supervision du contenu pédagogique. Au cours de cette période, j'ai également élaboré et obtenu la validation du dossier de nouvelle accréditation de cette licence.

8.1.3 Responsable du C2I sur le Site de Bourg en Bresse

De 2010 à 2018, j'ai été responsable de l'organisation et du déroulement du Certificat Informatique et Internet (C2I) à l'IUT de Lyon, site de Bourg-en-Bresse. Le C2I atteste des compétences d'une personne dans la maîtrise des outils informatiques et des réseaux. Dans le cadre de cette responsabilité, j'ai coordonné et organisé les sessions du C2I, ce qui comprenait les inscriptions, les procédures techniques, le déroulement des épreuves (émargement, surveillance, sujets) ainsi que la gestion des résultats. Cette mission a pris fin en 2018 avec la transformation de ce certificat en vue d'intégrer des compétences définies à l'échelle européenne, donnant ainsi naissance à la certification Pix.

8.1.4 Responsable de projets

À partir de 2017, j'ai repris la coordination des modules de Projets Tuteurés pour les deuxièmes années du DUT et les licences professionnelles. Mon objectif était de créer un pôle "Projet" afin de centraliser la gestion et le déroulement des projets. Ce travail a pleinement pris forme avec la nouvelle organisation en BUT, permettant d'assurer une cohérence et une continuité sur les trois années du cursus. Je poursuis ce développement en assumant, en 2024, la gestion des Projets de la troisième année du BUT, parcours Réalisation d'Applications (RA).

8.1.5 24h info

En mai 2023, l'équipe pédagogique a organisé les « 24h info » de l'ADIUT, une compétition nationale de développement informatique se déroulant sur 24 heures et comprenant trois épreuves : algorithmique et programmation, développement web et sécurité. Cet événement a réuni plus de 200 étudiants provenant des IUT de France ayant un département informatique. Fort de mon expertise

en organisation de conférences et en gestion d'association (voir mes activités scientifiques), j'ai joué un rôle clé dans l'ensemble des aspects organisationnels : mise en place du concours, gestion des inscriptions et des modalités de financement par notre association départementale, ainsi que gestion de la communication et du site web.

8.2 Encadrement doctoral

8.2.1 Encadrement de thèses

- Célian Louis-Itty (2023-2026) : Thèse ministérielle sur la « Modélisation de paysages de végétation ».
- Simon Perche (2021-2025 dont 6 mois de césure Adobe) : Thèse sur le projet ANR Ampli sur l'« Amplification et modélisation procédurale inverse ». Cette thèse a donné lieu à 2 publications et de nouveaux travaux sont en cours de réalisation.
- Yann Cortial (2017-2020) : Thèse ministérielle sur la « Synthèse de terrain à l'échelle planétaire ». Cette thèse a donné lieu à 3 publications.
- Thibault Dupont (2015-2019) : Thèse sur un projet FUI en partenariat avec Ubisoft sur la « Représentation, modélisation et génération procédurale de paysages de rivières naturelles ». Cette thèse a donné lieu à 1 publication et une ouverture thématique de l'équipe.
- Jérémy Gaillard (2015-2018) : Thèse CIFRE en partenariat avec l'entreprise Oslandia sur la « Représentation et échange de données tridimensionnelles géolocalisées de la ville ». Cette thèse a donné lieu à 3 publications.

8.2.2 Encadrement de stages

- Arthur Pradier (2022-2023) : Modélisation volumique de l'évolution de la structure interne d'un arbre.
- Mikel-Ange Barros (2020-2021) : Analyse et modélisation de simulation d'eau.
- Alexis Le Conte (2019-2020) : Création de modèles numériques de bâtiments pour l'impression 3D.
- Thibault Dupont (2014-2015) : Caractérisation et Génération Procédurale de bâtiments (co-supervisé avec Julie Digne).
- Jérémy Gaillard (2013-2014) : Génération de terrain avec écoulement d'eau (co-supervisé avec Eric Guérin et Eric Galin).

8.3 Animation scientifique

8.3.1 Récompenses / Prix

- Best Paper Award - Honourable mention (2023) : Nous avons été récompensés en 2023 avec mention honorable à la conférence Pacific Graphics pour nos travaux intitulés « Interactive Authoring of Terrain using Diffusion Models ».
- Best Paper Award (2020) : Nous avons été récompensés en 2020 par le premier prix des meilleurs papiers du journal The Visual Computer lors de la conférence CGI 2020 pour nos travaux intitulés « Modeling Rocky Scenery using Implicit Blocks ».
- Young Researcher Fellow EGFR (2019) : J'ai été nommé Young Researcher Fellow en 2019 par l'association Eurographics France. Ce titre honorifique est une reconnaissance de ma production scientifique et de mon implication dans la communauté informatique graphique française.
- Concours de couverture CGF (2017-2010 et 2009) : Nous avons obtenu respectivement le 3ème, 1er et 3ème ex aequo prix du concours de couverture de la revue Computer Graphics Forum en 2017, 2010 et 2009 (<http://vcg.isti.cnr.it/cgf/winner.php>). Le 1er prix nous a permis d'avoir une visibilité sur les 8 volumes publiés dans l'année et les conférences associées.

8.3.2 Conférencier invité

- Mission SIGGRAPH (Novembre 2014 et Février 2015) : présentation d'un rapport devant la communauté lors des journées nationales en Informatique Graphique de la conférence SIGGRAPH 2014. Cette présentation se veut généraliste afin de présenter les spécificités scientifiques, artistiques et industriels de ce congrès. La présentation a également été effectuée à Paris à la BNP Paribas devant un public non averti.
- Université de PURDUE – USA (Février 2015) : Présentation des travaux sur la modélisation volumique de terrains en tant que chercheur invité à l'Université de Purdue.
- Labex IMU Projet Bati 3D (Juin 2017) : Présentation de techniques de modélisation de données archéologiques. Cette intervention était également un exercice de vulgarisation pour des acteurs issus du monde de l'archéologie et de la construction.
- Journées jeunes chercheurs du GDR IGRV (Octobre 2017) : j'ai présenté un état des lieux de la recherche sur la modélisation procédurale pour les mondes virtuels ainsi que les défis techniques à venir sur les prochaines années. Cette présentation a été réalisée en collaboration avec des collègues des laboratoires XLIM et ICUBE.
- Journées JF.IG.RV (Octobre 2019) : en tant que Young Researcher Fellow, j'ai été invité à présenter mes travaux de recherche devant toute la communauté du GDR IGRV (Informatique Graphique et Réalité Virtuelle).

- Ubisoft water community (Avril 2024) : présentation de nos travaux sur le modélisation et génération de rivières pour le groupe de travail international autour de la thématique de modélisation et animation de l'eau.

8.3.3 Organisation de conférence/séminaires

2020 – Ecole de recherche du GDR IGRV : J'ai participé à l'organisation de la première école de recherche du GDR IGRV du 2 au 6 Novembre 2020. L'idée de ces écoles de recherche est de proposer à l'ensemble des chercheurs français un cours et des travaux pratiques sur une thématique spécifique de la synthèse d'images. Cette première journée était orientée sur le transport optimal en informatique graphique, géométrie et réalités virtuelles. Cette première école du GDR a attiré une centaine de participant malgré une organisation en distanciel. Je suis depuis 2022 le coordinateur au sein du GDR de l'animation des écoles de recherche au sein du GDR.

2019 – Journées thématique du GDR-IGRV - Modélisation procédurale : L'objectif de cette journée était d'échanger sur la thématique au sens large de la "modélisation procédurale" avec l'ensemble des acteurs Français du domaine. J'ai organisé cet évènement avec un membre de mon équipe de recherche. Des échanges ont eu lieu sur les différents aspects de la modélisation procédurale et sur les dernières avancées du domaine.

2017 - EUROGRAPHICS : J'ai fait partie de l'équipe d'organisation de la conférence internationale Eurographics en Informatique Graphique (sur la période 2014 à 2017) qui a attiré plus de 400 chercheurs. C'est une des conférences les plus réputées du domaine (classée A au CORE2014). J'ai participé à l'ensemble des tâches de gestion nécessaire à l'organisation de conférences d'une telle ampleur (Sponsoring, Subventions, gestion des chairs de papiers, des invités et de la logistique) et j'ai été principalement impliqué dans la gestion de la communication autour de cet évènement (site web, affiches). Dans ce cadre, j'ai été chair des « Short Papers » en collaboration avec Carles Bosch.

2015 - AFIG : J'ai été le responsable de l'organisation des 28èmes Journées de l'Association Française d'Informatique Graphique (AFIG), du Chapitre Français d'Eurographics et du Groupement de Recherche IG-RV qui ont eu lieu à Lyon du 24 au 27 Novembre 2015 qui a attiré plus de 120 chercheurs de la communauté française en Informatique Graphique.

2014 - GTMG : Participation à l'organisation du Groupe de Travail en Modélisation Géométrique se déroulant à Lyon les 26 et 27 mars 2014.

2014 - EGSR/HPG : Participation à l'organisation des 2 conférences internationales EGSR et HPG qui sont colocalisés à Lyon du 23 au 27 Juin 2014.

2012 - Journée de l'Interopérabilité Géospatiale : Participation à l'organisation de la journée de l'Interopérabilité Géospatiale sur le thème « Capteurs, bâtiment et infrastructures : les nouveaux domaines de l'interopérabilité ».

2011 - VRIPhys : Participation à l'organisation du Workshop Vriphys (Virtual Reality Interaction and PHYsical Simulation) qui s'est tenu à Lyon les 5 et 6 décembre.

8.4 Projets de recherche

EOLE (2023-2027) Ce projet ANR collaboratif consiste à proposer de nouvelles méthodes de modélisation autour de l'éolien et notamment la modélisation de paysages désertiques afin de comprendre et simuler l'évolution de ces scènes. Le porteur de ce projet est l'Institut du Globe de Paris qui apporte son expertise terrain et le LIRIS avec ses connaissances dans la modélisation de paysages virtuels.

AMPLI (2021-2024) Ce projet ANR collaboratif vise à utiliser des techniques d'apprentissage et de modélisation procédurale inverse pour créer des mondes virtuels toujours plus étendus et réalistes. Les partenaires de ce projet sont le LIRIS, le CIRAD spécialisé en agronomie, Ubisoft Paris et l'université de Cape Town. Je co-encadre un doctorant sur cet ANR.

HDWORLD (2016-2021) Ce projet de recherche collaborative financé par l'ANR vise la génération procédurale de mondes. Les méthodes que nous souhaitons utiliser s'appuient sur des fonctions et nous comptons mettre en œuvre un lien entre la texture et la géométrie générées. Les partenaires de ce projet sont ICube, le XLIM et le LIRIS. Le projet est porté par le Laboratoire ICube et je suis le responsable scientifique pour le LIRIS. Un Post-doc a été recruté dans notre équipe sur ce projet.

PAPAYA (2015-2019) Ce projet financé par le fonds national pour la société numérique se veut le prolongement de Mango avec des objectifs encore plus ambitieux. Le projet part du constat que les univers de jeux doivent être de plus en plus vaste et précis et qu'on ne peut plus échapper à la modélisation procédurale pour atteindre cet objectif. Nous intervenons dans le cadre de ce projet sur la modélisation de terrains, la modélisation de cours d'eau et de rivières et les effets atmosphériques. Ce projet contient le financement de deux thèses au LIRIS dans l'équipe Geomod.

MANGO (2012-2014) Pour faire face à l'arrivée des nouvelles consoles de salons, Ubisoft a monté un projet dédié à la refonte de leur moteur de jeu afin d'améliorer les performances de la chaîne de production d'un jeu vidéo. Ce projet met en œuvre un certain nombre de collaborations scientifiques académiques. Le LIRIS, équipe GEOMOD, étant historiquement en relation avec Ubisoft depuis 2010 a été contacté pour y participer et le laboratoire LIST du CEA. Dans ce projet, mes travaux

portent sur la réalisation de modèles portant sur le vieillissement procédural d'objets 3D. Des transferts de technologies de mes travaux précédents (publications de 2010 à 2012) ont été effectués dans ce cadre.

Labex IMU (depuis 2012) Le Labex IMU (Intelligence des Mondes Urbains) regroupe des chercheurs en Sciences Humaines et Sociales et en Sciences de l'environnement. Les recherches sont centrées sur la ville, l'urbain, la métropolisation et l'urbanisation. Je suis membre de ce Labex depuis 2012 et j'ai eu l'occasion de participer à l'encadrement de 3 Master dans ce cadre (Archéologie et Informatique) et au projet Bati3D.

Bati3D (2013-2017) Dans le cadre du Labex IMU, nous avons monté avec des membres du laboratoire Archéorient (Maison de l'Orient et de la Méditerranée) un projet sur la modélisation de scènes archéologiques de fouilles sur le site d'Ougarit en Syrie. Sur ce projet, nous travaillons sur la reconstruction d'un secteur de la ville d'Ougarit (capitale d'un royaume levantin au IIe millénaire av. J.-C). Nous envisageons de poursuivre ces travaux par de la génération procédurale de bâtiments afin d'obtenir des simulations et rendus d'une masse de données beaucoup plus importante.

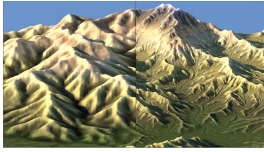
DNA (2007-2010) J'ai participé dans le cadre de ma thèse à l'ANR ARA DNA. Ce projet avait pour but la modélisation de détails dans les scènes naturelles. Les objectifs portaient sur la gestion de la complexité et la diversité d'objets interagissant entre eux et leur environnement. Ce projet a permis de définir un processus unifié entre les partenaires pour modéliser, simuler et interagir avec des scènes naturelles complexes. Sur ce projet, j'ai publié 3 articles dans des revues internationales de rang A.

GENAC II (2007-2010) Dans le cadre du pôle de compétitivité Imaginove, ce projet était une collaboration de l'équipe avec les studios de jeux vidéo WideScreen Games et Eden Games sur la génération automatique de contenu. Ce projet avait pour but de fournir aux studios de jeux vidéo de nouveaux outils pour la génération de contenu graphique. Les échanges avec les partenaires ont permis de définir les problématiques spécifiques de ces entreprises et nous a permis de proposer des solutions adaptées à leurs attentes. Les connaissances humaines et techniques développées lors de ce projet nous ont permis de monter le projet plus ambitieux MANGO.

8.5 Publications

Uniquement les articles internationaux ont été ajoutés dans la liste de publication. 9 articles ont également été présentés à la conférence française JFIG des Journées Française d'Informatique Graphique.

2024

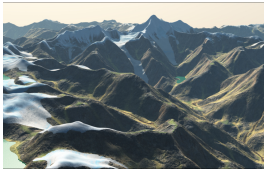


Terrain Amplification using Multi Scale Erosion
Hugo Schott, Eric Galin, Eric Guérin, Axel Paris, Adrien Peytavie
 ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)

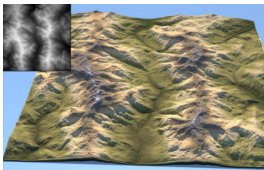


DeadWood : Including disturbance and decay in the depiction of digital nature
Adrien Peytavie, James Gain, Eric Guérin, Oscar Argudo, Eric Galin
 ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)

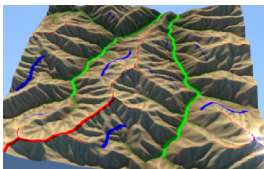
2023



Forming Terrains by Glacial Erosion
Guillaume Cordonnier, Guillaume Jouvét, Adrien Peytavie, Jean Braun, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, Eric Galin, Eric Guérin, James Gain
 ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)

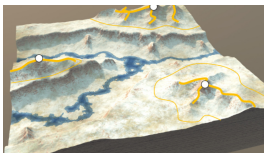


Authoring Terrains with Spatialised Style
Simon Perche, Adrien Peytavie, Bedrich benes, Eric Galin, Eric Guérin
 Computer Graphics Forum, 42(7) (IF 2.116)



Interactive Authoring of Terrain using Diffusion Models
Jochua Lochner, James Gain, Simon Perche, Adrien Peytavie, Eric Galin, Eric Guérin
 Computer Graphics Forum, 42(7) (IF 2.116)

2022



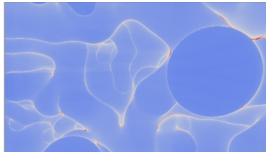
Gradient Terrain Authoring
Eric Guérin, Adrien Peytavie, Simon Masnou, Julie Digne, Basile Sauvage, James Gain, Eric Galin
 Computer Graphics Forum, 41(2) (IF 2.116)

2021

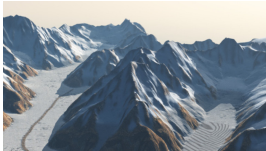


Synthesizing Geologically Coherent Cave Networks
Axel Paris, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Pauline Collon, Eric Galin
 Computer Graphics Forum, 40(7) (IF 2.116)

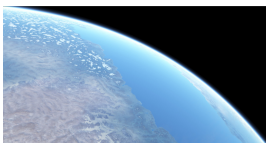
2020



Segment Tracing Using Local Lipschitz Bounds
Eric Galin, Eric Guérin, Axel Paris, Adrien Peytavie
Computer Graphics Forum, 39(2) (IF 2.116)



Simulation, Modeling and Authoring of Glaciers
Oscar Argudo, Eric Galin, Adrien Peytavie, Axel Paris, Eric Guérin
ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)



Real-Time Hyper-Amplification of Planets
Yann Cortial, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Eric Galin
The Visual Computer (IF 1.456)



Modeling Rocky Scenery using Implicit Blocks
Axel Paris, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Jean-Michel Dischler, Eric Galin
The Visual Computer, 36 (10), pp.2251-2261 (IF 1.456)

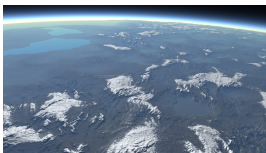


Data-driven Authoring of Large-scale Ecosystems
Konrad Kapp, James Gain, Eric Guérin, Eric Galin, Adrien Peytavie
ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)

2019



Terrain Amplification with Implicit 3D Features
Axel Paris, Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, James Gain
ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)



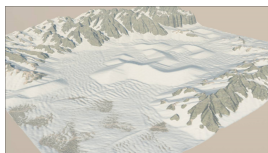
Procedural Tectonic Planets
Yann Cortial, Adrien Peytavie, Eric Galin, Eric Guérin
Computer Graphics Forum (IF 2.116)



Procedural Riverscapes
Adrien Peytavie, Thibault Dupont, Eric Guérin, Yann Cortial, Benes Benes, James Gain, Eric Galin
Computer Graphics Forum (IF 2.116)



Orometry-based Terrain Analysis and Synthesis
Oscar Argudo, Eric Galin, Adrien Peytavie, Axel Paris, James Gain, Eric Guérin
 ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)



Desertscape Simulation
Axel Paris, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Oscar Argudo, Eric Galin
 Computer Graphics Forum (IF 2.116)



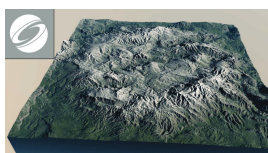
A Review of Digital Terrain Modeling
Eric Galin, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Guillaume Cordonnier, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, James Gain
 Computer Graphics Forum, vol. 38, #2, pp. 553-577

2018

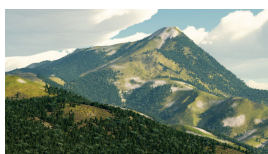


Visualisation and personalisation of multi-representations city models
Jérémy Gaillard, Adrien Peytavie and Gilles Gesquière
 International Journal of Digital Earth, pp. 1-18.

2017



Interactive Example-Based Terrain Authoring with Conditional Generative Adversarial Networks
Eric Guérin, Julie Digne, Eric Galin, Adrien Peytavie, Christian Wolf, Bedrich Benes, Benoît Martinez
 ACM Transactions on Graphics (IF 5.084)



Coherent multi-layer landscape synthesis
Oscar Argudo, Carlos Andujar, Antonio Chica, Eric Guérin, Julie Digne, Adrien Peytavie, Eric Galin
 The Visual Computer (IF 1.456)

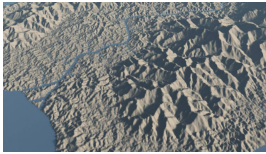


Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation
Guillaume Cordonnier, Eric Galin, James Gain, Bedrich Benes, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Marie-Paule Cani
 ACM Transactions on Graphics, vol. 36, #4, p. 134

2016



Sparse representation of terrains for procedural modeling
Eric Guérin, Julie Digne, Eric Galin, Adrien Peytavie
Computer Graphics Forum, vol. 35, #2, pp. 177-187



Large Scale Terrain Generation from Tectonic Uplift and Fluvial Erosion
Guillaume Cordonnier, Jean Braun, Marie-Paule Cani, Bedrich Benes, Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin
Computer Graphics Forum, vol. 35, #2, pp. 165-175



Environmental Objects for Authoring Procedural Scenes
François Grosbellet, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Eric Galin, Stéphane Mérillou, Bedrich Benes
Computer Graphics Forum, vol. 35, #1, pp. 296-308



Efficient modeling of entangled details for natural scenes
Eric Guérin, Eric Galin, François Grosbellet, Adrien Peytavie, Jean-David Genevaux
Computer Graphics Forum, vol. 35, #7, pp. 257-267

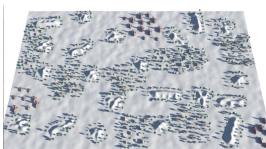


A Data Structure for Progressive Visualisation and Edition of Vectorial Geospatial Data
Jérémy Gaillard, Adrien Peytavie, Gilles Gesquière
3D GeoInfo, pp. 201-209

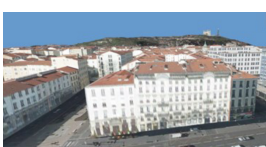
2015



Terrain Modelling from Feature Primitives
Jean-David Genevaux, Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Cyril Briquet, François Grosbellet, Bedrich Benes
Computer Graphics Forum, vol. 34, #6, pp. 198-210

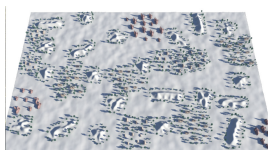


Patch-based Terrain Synthesis
Leandro Cruz, Luiz Velho, Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin
International Conference on Computer Graphics Theory and Applications



Urban data visualisation in a web browser
Jérémy Gaillard, Alexandre Vienne, Rémi Baume, Frédéric Pedrinis, Adrien Peytavie, Gilles Gesquière
Web3D 2015

2014



Landscape Specification Resizing

*Leandro Cruz, Luiz Velho, Djalma Lucio, Eric Galin,
Adrien Peytavie, Eric Guérin*

CLEI, pp. 1-10

2013



Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology

Jean-David Genevaux, Eric Galin, Eric Guérin, Adrien Peytavie, Bedrich Benes

ACM Transactions on Graphics, vol. 32, 143 :1-143 :13

2012



Procedural Generation of Villages on Arbitrary Terrains

*Arnaud Emilien, Adrien Bernhardt, Adrien Peytavie,
Marie-Paule Cani, Eric Galin*

Visual Computer, vol. 28, 6-8, pp. 809-818

2011



Hierarchical Road Networks

Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Bedrich Benes

Computer Graphics Forum, vol. 30, pp. 2021-2030

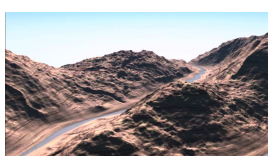
2010



Procedural Generation of Roads

Eric Galin, Adrien Peytavie, Eric Guérin, Nicolas Marechal

Computer Graphics Forum, vol. 29, pp. 429-438



Feature based terrain generation using diffusion equation

*Houssam Hnaidi, Eric Guérin, Samir Akkouche, Adrien Peytavie,
Eric Galin*

Computer Graphics Forum, vol. 29, pp. 2179-2186

2009



Procedural Generation of Rock Piles Using Aperiodic Tiling
Adrien Peytavie, Eric Galin, Jérôme Grosjean, Stéphane Mérillou
Computer Graphics Forum, vol. 28, #7, pp. 1801-1809



Arches : a Framework for Modelling Complex Terrains
Adrien Peytavie, Eric Galin, Stéphane Mérillou, Jérôme Grosjean
Computer Graphics Forum, vol. 28, #2, pp. 457-467

BIBLIOGRAPHIE

- [Aak+08] Tuomas AAKALA, Timo KUULUVAINEN, Sylvie GAUTHIER et Louis DE GRANDPRÉ. “Standing dead trees and their decay-class dynamics in the northeastern boreal old-growth forests of Quebec”. In : *Forest Ecology and Management* 255.3 (2008), p. 410-420 (cf. p. 27).
- [Ale+08] Alex ALEXANDRIDIS, Dimitris VAKALIS, Constantinos I. SIETTOS et George V. BAFAS. “A cellular automata model for forest fire spread prediction : The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990”. In : *Applied Mathematics and Computation* 204.1 (2008), p. 191-201 (cf. p. 35).
- [AD06a] Monssef ALSWEIS et Oliver DEUSSEN. “Wang-tiles for the simulation and visualization of plant competition”. In : *Computer Graphics International*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006, p. 1-11 (cf. p. 23).
- [AD06b] Monssef ALSWEIS et Oliver DEUSSEN. “Wang-Tiles for the Simulation and Visualization of Plant Competition”. In : *24th Computer Graphics International Conference*. 2006, p. 1-11 (cf. p. 83).
- [And+14] Carlos ANDÚJAR, Antonio CHICA, Miguel A. VICO, Sergio MOYA et Pere BRUNET. “Inexpensive Reconstruction and Rendering of Realistic Roadside Landscapes”. In : *Computer Graphics Forum* 33.6 (2014), p. 101-117 (cf. p. 23).
- [Arg+20] Oscar ARGUDO, Eric GALIN, Adrien PEYTAIVIE, Axel PARIS et Eric GUÉRIN. “Simulation, Modeling and Authoring of Glaciers”. In : *ACM Transactions on Graphics* 39 (2020) (cf. p. 63).
- [Baa02] Andreas C.W. BAAS. “Chaos, fractals and self-organization in coastal geomorphology : simulating dune landscapes in vegetated environments”. In : *Geomorphology* (2002), p. 309 -328 (cf. p. 49, 52, 60).
- [BLM14] Richard BARNES, Clarence LEHMAN et David MULLA. “Priority-flood : An optimal depression-filling and watershed-labeling algorithm for digital elevation models”. In : *Computers & Geosciences* 62 (2014), p. 117 -127 (cf. p. 74).
- [Bea+07] Matthew BEARDALL, M. FARLEY, D. OUDERKIRK, C. REIMSCHUSSEL, J. SMITH, M. JONES et P. EGBERT. “Goblins by Spheroidal Weathering”. In : *Proceedings of the Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Eurographics Association, 2007, p. 7-14 (cf. p. 47, 61).
- [BAS09] Bedrich BENES, Nathan ANDRYSKO et Ondrej STAVA. “Interactive Modeling of Virtual Ecosystems”. In : *Eurographics Workshop on Natural Phenomena*. Sous la dir. d’Eric GALIN et Jens SCHNEIDER. Munich, Germany : Eurographics Association, 2009, p. 9-16 (cf. p. 23).
- [BR04] Bedrich BENES et Tony ROA. “Simulating desert scenery”. In : *Journal of WSCG* (2004), p. 17-22 (cf. p. 47, 61).
- [Ben+06] Bedrich BENES, Václav TĚŠÍNSKÝ, Jan HORNÝŠ et Sanjiv K. BHATIA. “Hydraulic erosion”. In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 17.2 (2006), p. 99-108 (cf. p. 7).
- [BG11] Matthew M BENNETT et Neil F GLASSER. *Glacial geology : ice sheets and landforms*. John Wiley & Sons, 2011 (cf. p. 65, 66).

- [Bin83] Robert BINDSCHADLER. “The Importance of Pressurized Subglacial Water in Separation and Sliding at the Glacier Bed”. In : *Journal of Glaciology* 29.101 (1983), p. 3-19 (cf. p. 67).
- [Bjø+20] Ottar N. BJØRNSTAD, Katriona SHEA, Martin KRZYWINSKI et Naomi ALTMAN. “The SEIRS model for infectious disease dynamics”. In : *Nature Methods* 17.6 (2020), p. 557-558 (cf. p. 37, 42).
- [BD11] Nicholas W. BOLTON et Anthony W. D’AMATO. “Regeneration responses to gap size and coarse woody debris within natural disturbance-based silvicultural systems in northeastern Minnesota, USA”. In : *Forest Ecology and Management* 262.7 (2011), p. 1215-1222 (cf. p. 45).
- [Bri15] Robert BRIDSON. *Fluid simulation for computer graphics*. CRC Press, 2015 (cf. p. 7).
- [BHN07] Robert BRIDSON, Jim HOURIHAM et Marcus NORDENSTAM. “Curl-noise for Procedural Fluid Flow”. In : *ACM Trans. Graph.* 26.3 (juill. 2007) (cf. p. 53).
- [Bue16] Ed BUELER. *Numerical modelling of glaciers, ice sheets, and ice shelves (course notes)*. Juin 2016 (cf. p. 66).
- [CC87] Aland CLOWES et Peter COMFORT. *Process and landform : an outline of contemporary geomorphology*. Oliver & Boyd, 1987 (cf. p. 72).
- [Col+16] William COLGAN, Harihar RAJARAM, Waleed ABDALATI, Cheryl McCUTCHAN, Ruth MOTTRAM, Mahsa S. MOUSSAVI et Shane GRIGSBY. “Glacier crevasses : Observations, models, and mass balance implications”. In : *Reviews of Geophysics* 54.1 (2016), p. 119-161 (cf. p. 72).
- [Com+16] European COMMISSION, Joint Research CENTRE, T HOUSTON DURRANT, D DE RIGO, A MAURI, G CAUDULLO et J SAN-MIGUEL-AYANZ. *European atlas of forest tree species*. Sous la dir. de T HOUSTON DURRANT, D DE RIGO, A MAURI, G CAUDULLO et J SAN-MIGUEL-AYANZ. Publications Office, 2016 (cf. p. 45).
- [CWG06] R.U. COOKE, A. WARREN et A.S. GOUDIE. *Desert Geomorphology*. 2006 (cf. p. 57).
- [Cor+16] Guillaume CORDONNIER, Jean BRAUN, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Eric GALIN, Adrien PEYTAVIE et Eric GUÉRIN. “Large scale terrain generation from tectonic uplift and fluvial erosion”. In : *Computer Graphics Forum* 35.2 (2016), p. 165-175 (cf. p. 11).
- [Cor+18] Guillaume CORDONNIER, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Jean BRAUN et Eric GALIN. “Sculpting Mountains : Interactive Terrain Modeling Based on Subsurface Geology”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24.5 (2018), p. 1756-1769 (cf. p. 63).
- [Cor+17a] Guillaume CORDONNIER, Eric GALIN, James GAIN, Bedrich BENES, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAVIE et Marie-Paule CANI. “Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (2017) (cf. p. 29, 30).
- [Cor+17b] Guillaume CORDONNIER, Eric GALIN, James GAIN, Bedrich BENES, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAVIE et Marie-Paule CANI. “Authoring Landscapes by Combining Ecosystem and Terrain Erosion Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (2017), 134 :1-134 :12 (cf. p. 55, 61).
- [Cor+23] Guillaume CORDONNIER, Guillaume JOUVET, Adrien PEYTAVIE, Jean BRAUN, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Eric GALIN, Eric GUÉRIN et al. “Forming Terrains by Glacial Erosion”. In : *ACM Trans. Graph.* 42.4 (2023) (cf. p. 63, 82, 103).
- [Cor+19] Yann CORTIAL, Adrien PEYTAVIE, Eric GALIN et Eric GUÉRIN. “Procedural Tectonic Planets”. In : *Computer Graphics Forum* 38.2 (2019) (cf. p. 103).
- [CP10] Kurt M CUFFEY et William Stanley Bryce PATERSON. *The physics of glaciers*. Academic Press, 2010 (cf. p. 65, 76).

- [Der+11] Evgenij DERZAPF, Björn GANSTER, Michael GUTHE et Reinhard KLEIN. “River Networks for Instant Procedural Planets”. In : *Computer Graphics Forum* 30.7 (2011), p. 2031-2040 (cf. p. 7).
- [Des+06] Brett DESBENOIT, Eric GALIN, Samir AKKOUCHE et Jerome GROSJEAN. “Modeling Autumn Sceneries”. In : *Eurographics Short Papers*. 2006, p. 107-110 (cf. p. 83, 98).
- [Deu+98] Oliver DEUSSEN, Patrick HANRAHAN, Bernd LINTERMANN, Radomir MĚCH, Matt PHARR et Przemyslaw PRUSINKIEWICZ. “Realistic Modeling and Rendering of Plant Ecosystems”. In : *Proceedings of the 25th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '98. New York, NY, USA : ACM, 1998, p. 275-286 (cf. p. 23, 38).
- [Dun78] Thomas DUNNE. “Field studies of hillslope flow processes.” In : *Hillslope hydrology*. (1978), p. 389-227 (cf. p. 11).
- [EC05] Ian S. EVANS et Nicholas J. COX. “Global variations of local asymmetry in glacier altitude : separation of north-south and east-west components”. In : *Journal of Glaciology* 51.174 (2005), p. 469-482 (cf. p. 80).
- [Fea00] Paul FEARING. “Computer Modelling of Fallen Snow”. In : *Proceedings of Siggraph*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000, p. 37-46 (cf. p. 63).
- [Fre91] Graham FREEMAN. “Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid.” In : *Computer and Geoscience* 17.3 (1991), p. 413-422 (cf. p. 10).
- [Fre+12] Grégoire FRESCHET, James WEEDON, Rien AERTS, Jurgen van HAL et Johannes CORNELISSEN. “Interspecific differences in wood decay rates : Insights from a new short-term method to study long-term wood decomposition”. In : *Journal of Ecology* 100 (2012), p. 161-170 (cf. p. 34).
- [Gai+17] James GAIN, Harry LONG, Guillaume CORDONNIER et Marie-Paule CANI. “EcoBrush : Interactive Control of Visually Consistent Large-Scale Ecosystems”. In : *Computer Graphics Forum* 36.2 (2017), p. 63-73 (cf. p. 29, 30).
- [Gén+13] Jean-David GÉNEVAUX, Éric GALIN, Éric GUÉRIN, Adrien PEYTAVIE et Bedrich BENES. “Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology”. In : *ACM Transactions on Graphics (Proceedings of Siggraph)* 32.4 (2013), 143 :1-143 :13 (cf. p. 7).
- [Gén+15] Jean-David GÉNEVAUX, Éric GALIN, Adrien PEYTAVIE, Éric GUÉRIN, Cyril BRIQUET, François GROSBELLET et Bedrich BENES. “Terrain Modeling from Feature Primitives”. In : *Computer Graphics Forum* 34.6 (2015), p. 198-210 (cf. p. 14, 15).
- [GP55] J. W. GLEN et Max Ferdinand PERUTZ. “The creep of polycrystalline ice”. In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 228.1175 (1955), p. 519-538 (cf. p. 66).
- [Gro+08] Christopher GROH, Andreas WIERSCHEM, Nuri AKSEL, Ingo REHBERG et Christof A KRUELLE. “Barchan dunes in two dimensions : Experimental tests for minimal models”. In : *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics* 78 (2008) (cf. p. 56).
- [Gro+16] François GROSBELLET, Adrien PEYTAVIE, Éric GUÉRIN, Eric GALIN, Stéphane MÉRILLOU et Bedrich BENES. “Environmental Objects for Authoring Procedural Scenes”. In : *Computer Graphics Forum* 35.1 (2016), p. 296-308 (cf. p. 98).
- [Gue+20] Pascal GUEHL, Remi ALLÈGRE, Jean-Michel DISCHLER, Bedrich BENES et Eric GALIN. “Semi-Procedural Textures Using Point Process Texture Basis Functions”. In : *Computer Graphics Forum* (2020) (cf. p. 103).

- [Had+17] Torsten HADRICH, Bedrich BENES, Oliver DEUSSEN et Sören PIRK. “Interactive Modeling and Authoring of Climbing Plants”. In : *Computer Graphics Forum* 36.2 (2017), p. 49-61 (cf. p. 23).
- [Hal+15] Sophie E. HALE, Barry GARDINER, Andrew PEACE, Bruce NICOLL, Philip TAYLOR et Stefania PIZZIRANI. “Comparison and validation of three versions of a forest wind risk model”. In : *Environmental Modelling & Software* 68 (2015), p. 27-41 (cf. p. 36).
- [Har+04] Mark HARMON, Jerry FRANKLIN, Frederick SWANSON, Phillip SOLLINS, Stanley GREGORY, John LATTIN, N. H. ANDERSON, Steven CLINE et al. “Ecology of Coarse Woody Debris in Temperate Ecosystems”. In : *Advances in Ecological Research : Classic Papers*. T. 34. Advances in Ecological Research. Academic Press, 2004, p. 59-234 (cf. p. 45).
- [HRH12] Rachel M. HEADLEY, Gerard ROE et Bernard HALLET. “Glacier longitudinal profiles in regions of active uplift”. In : *Earth and Planetary Science Letters* 317-318 (2012), p. 354-362 (cf. p. 66, 67).
- [Hen+13] Mathieu HENRY, Antonio BOMBELLI, Carlo TROTTA, Alfredo ALESSANDRINI, Luca BIRIGAZZI, Gael SOLA, Ghislain VIEILLEDENT, Philippe SANTENOISE et al. “GlobAllomeTree : international platform for tree allometric equations to support volume, biomass and carbon assessment”. In : *iForest - Biogeosciences and Forestry* 6.6 (2013), p. 326-330 (cf. p. 26).
- [Hor45] Robert E HORTON. “Erosional development of streams and their drainage basins ; hydrophysical approach to quantitative morphology”. In : *Geological society of America bulletin* 56.3 (1945), p. 275-370 (cf. p. 11).
- [HK10] Shu-Wei HSU et John KEYSER. “Piles of objects”. In : *ACM Transactions on Graphics* 29.6 (2010), 155 :1-155 :6 (cf. p. 83).
- [Hug03] R.J. HUGGETT. *Fundamentals of Geomorphology*. Fundamentals of Geomorphology. Routledge, 2003 (cf. p. 49).
- [Hut83] Kolumban HUTTER. *Theoretical glaciology ; material science of ice and the mechanics of glaciers and ice sheets*. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, The Netherlands, 1983 (cf. p. 66).
- [Irv+06] Geoffrey IRVING, Eran GUENDELMAN, Frank LOSASSO et Ronald FEDKIW. “Efficient Simulation of Large Bodies of Water by Coupling Two and Three Dimensional Techniques”. In : *ACM Transactions on Graphics* 25.3 (2006), p. 805-811 (cf. p. 7).
- [JSA13] A. H. JAROSCH, C. G. SCHOOF et F. S. ANSLOW. “Restoring mass conservation to shallow ice flow models over complex terrain”. In : *The Cryosphere* 7.1 (2013), p. 229-240 (cf. p. 69).
- [Jes+18] Stefan JESCHKE, Tomáš SKŘIVAN, Matthias MÜLLER-FISCHER, Nuttapong CHENTANEZ, Miles MACKLIN et Chris WOJTAN. “Water Surface Wavelets”. In : *ACM Trans. Graph.* 37.4 (juill. 2018), 94 :1-94 :13 (cf. p. 20).
- [JW17] Stefan JESCHKE et Chris WOJTAN. “Water Wave Packets”. In : *ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH 2017)* 36.4 (2017), 103 :1-103 :12 (cf. p. 20).
- [Jia+15] Min JIANG, Yahan ZHOU, Rui WANG, Richard SOUTHERN et Jian Jun ZHANG. “Blue Noise Sampling Using an SPH-based Method”. In : *ACM Transactions on Graphics* 34.6 (2015), 211 :1-211 :11 (cf. p. 83).
- [Jon+10] Michael D JONES, M FARLEY, Joseph BUTLER et Matthew BEARDALL. “Directable Weathering of Concave Rock Using Curvature Estimation”. In : *Transactions on Visualization and Computer Graphics* 16.1 (2010), p. 81-94 (cf. p. 47, 61).
- [Kap+20] Konrad KAPP, James GAIN, Eric GUÉRIN, Eric GALIN et Adrien PEYTAIVIE. “Data-Driven Authoring of Large-Scale Ecosystems”. In : *ACM Transactions on Graphics* 39.6 (2020) (cf. p. 29-31).

- [KMN88] Alex D. KELLEY, Michael C. MALIN et Gregory M. NIELSON. "Terrain simulation using a model of stream erosion". In : *ACM Transactions on Graphics* (1988), p. 263-268 (cf. p. 7).
- [KAS06] Mark A. KESSLER, Robert S. ANDERSON et Greg M. STOCK. "Modeling topographic and climatic control of east-west asymmetry in Sierra Nevada glacier length during the Last Glacial Maximum". In : *Journal of Geophysical Research : Earth Surface* 111.F2 (2006) (cf. p. 66).
- [KW06] Peter KIPFER et Rüdiger WESTERMANN. "Realistic and Interactive Simulation of Rivers". In : *Proceedings of Graphics Interface 2006*. GI '06. 2006, p. 41-48 (cf. p. 7).
- [KOC96] Wouter KNAP, Johannes OERLEMANS et Martin CABÉE. "Climate sensitivity of the ice cap of King George Island, South Shetland Islands, Antarctica". In : *Annals of Glaciology* 23 (1996), p. 154-159 (cf. p. 67).
- [Kri+09] Peter KRIŠTOF, Bedrich BENES, Jaroslav KŘIVÁNEK et Ondřej ŠŤAVA. "Hydraulic Erosion Using Smoothed Particle Hydrodynamics". In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 219-228 (cf. p. 7).
- [LD06] Ares LAGAE et Philip DUTRÉ. "Poisson Sphere Distributions". In : *Vision, Modeling, and Visualization*. 2006, p. 373-379 (cf. p. 83).
- [Lan95] Nicholas LANCASTER. *The Geomorphology of Desert Dunes*. Physical Environment Series. Routledge, 1995 (cf. p. 47).
- [LBS13] Nicholas LANCASTER, Andreas BAAS et Douglas SHERMAN. "11.1 Aeolian Geomorphology : Introduction". In : *Treatise on Geomorphology*. T. 11. Elsevier Academic Press Inc, 2013, p. 1-6 (cf. p. 47, 49).
- [LP02a] Brendan LANE et Przemyslaw PRUSINKIEWICZ. "Generating spatial distributions for multilevel models of plant communities". In : *Graphics Interface '02*. Calgary, Alberta, Canada : Canadian Human-Computer Communications Society, 2002, p. 69-80 (cf. p. 23).
- [LP02b] Anita LAYTON et Michiel van de PANNE. "A numerically efficient and stable algorithm for animating water waves". In : *The Visual Computer* 18.1 (2002), p. 41-53 (cf. p. 7).
- [LH10] Hyokwang LEE et Soonhung HAN. "Solving the Shallow Water equations using 2D SPH particles for interactive applications". In : *The Visual Computer* 26.6 (2010), p. 865-872 (cf. p. 7).
- [Lee79] Bram van LEER. "Towards the ultimate conservative difference scheme. V. A second-order sequel to Godunov's method". In : *Journal of Computational Physics* 32.1 (1979), p. 101 -136 (cf. p. 69).
- [Li+18] Jiaqi LI, Xiaoyan GU, Xinchin LI, Junzhong TAN et Jiangfeng SHE. "Procedural Generation of Large-Scale Forests Using a Graph-Based Neutral Landscape Model". In : *ISPRS International Journal of Geo-Information* 7.3 (2018), p. 127-142 (cf. p. 23).
- [MWT11] Chongyang MA, Li-Yi WEI et Xin TONG. "Discrete element textures". In : *ACM Transactions on Graphics* 30.4 (2011), 62 :1-62 :10 (cf. p. 97).
- [Mak+19] MILOSZ MAKOWSKI, TORSTEN HÄDRICH, JAN SCHEFFCZYK, DOMINIK MICHELS, SÖREN PIRK et WOJTEK PAŁUBICKI. "Synthetic Silviculture : Multi-Scale Modeling of Plant Ecosystems". In : *ACM Transactions on Graphics* 38.4 (2019), 131 :1-14 (cf. p. 44).
- [MP00] Josep M. MARMI PLANA. "El bosc de Gresolet". In : *L'Erol : revista cultural del Berguedà* 65 (2000), p. 22-25 (cf. p. 41).
- [MDH07] Xing MEI, Philippe DECAUDIN et Baogang HU. "Fast Hydraulic Erosion Simulation and Visualization on GPU". In : *Pacific Graphics*. IEEE, 2007, p. 47-56 (cf. p. 7).

- [Moe+05] Claus MOESLUND, Thomas anvisud MADSEN, Michael AAGAARD et Dennis LERCHE. “Modeling falling and accumulating snow”. In : *Vision, Video and Graphics*. The Eurographics Association, 2005 (cf. p. 63).
- [Mom+00] Hiroshi MOMIJI, Ricardo CARRETERO-GONZALEZ, Steven BISHOP et Andrew WARREN. “Simulation of the effect of wind speedup in the formation of transverse dune fields”. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 25 (2000) (cf. p. 60).
- [MP96] Radomir MĚCH et Przemyslaw PRUSINKIEWICZ. “Visual Models of Plants Interacting with Their Environment”. In : *Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '96. New York, NY, USA : ACM, 1996, p. 397-410 (cf. p. 23).
- [NP01] Fabrice NEYRET et Nathalie PRAIZELIN. “Phenomenological Simulation of Brooks”. In : *Eurographics Workshop on Computer Animation and Simulation*. Eurographics. Springer, 2001, p. 53-64 (cf. p. 7).
- [NB11] Michael NIELSEN et Robert BRIDSON. “Guide Shapes for High Resolution Naturalistic Liquid Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 30.4 (2011), 83 :1-83 :8 (cf. p. 7).
- [Nis+97] Tomoyuki NISHITA, Hiroshi IWASAKI, Yoshinori DOBASHI et Eihachiro NAKAMAE. “A modeling and rendering method for snow by using metaballs”. In : *Computer Graphics Forum* 16.3 (1997), p. 357-364 (cf. p. 63).
- [Nye57] John Frederick NYE. “The distribution of stress and velocity in glaciers and ice-sheets”. In : *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences* 239.1216 (1957), p. 113-133 (cf. p. 66).
- [Oer86] J OERLEMANS. “An attempt to simulate historic front variations of Nigardsbreen, Norway”. In : *Theoretical and applied climatology* 37.3 (1986), p. 126-135 (cf. p. 80).
- [ON00] Koichi ONOUE et Tomoyuki NISHITA. “A method for modeling and rendering dunes with wind-ripples”. In : *Proceedings of the Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. IEEE, 2000, p. 427-428 (cf. p. 47, 61).
- [Pal+09] Wojciech PALUBICKI, Kipp HOREL, Steven LONGAY, Adam RUNIONS, Brendan LANE, Radomír MĚCH et Przemyslaw PRUSINKIEWICZ. “Self-Organizing Tree Models for Image Synthesis”. In : *ACM Transactions on Graphics* 28.3 (2009) (cf. p. 27).
- [Par+23] Axel PARIS, Eric GUÉRIN, Pauline COLLON et Eric GALIN. “Authoring and Simulating Meandering Rivers”. In : *ACM Trans. Graph.* 42.6 (2023) (cf. p. 22).
- [Par+19] Axel PARIS, Adrien PEYTAVIE, Eric GUÉRIN, Oscar ARGUDO et Eric GALIN. “Desertscape Simulation”. In : *Computer Graphics Forum* (2019) (cf. p. 48).
- [Pey+19] Adrien PEYTAVIE, Thibault DUPONT, Eric GUÉRIN, Yann CORTIAL, Benes BENES, James GAIN et Eric GALIN. “Procedural Riverscapes”. In : *Computer Graphics Forum* (oct. 2019) (cf. p. 8).
- [Pey+24] Adrien PEYTAVIE, James GAIN, Eric GUÉRIN, Oscar ARGUDO et Eric GALIN. “Deadwood”. In : *ACM Transactions on Graphics* (2024) (cf. p. 24).
- [Pey+09a] Adrien PEYTAVIE, Éric GALIN, Stéphane MÉRILLOU et Jérôme GROSJEAN. “Arches : a Framework for Modeling Complex Terrains”. In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 457-467 (cf. p. 97).
- [Pey+09b] Adrien PEYTAVIE, Éric GALIN, Stéphane MÉRILLOU et Jérôme GROSJEAN. “Procedural Generation of Rock Piles Using Aperiodic Tiling”. In : *Computer Graphics Forum* 28.7 (2009), p. 1801-1810 (cf. p. 83).

- [Pir+17] Sören PIRK, Michał JARZĄBEK, Torsten HÄDRICH, Dominik L. MICHELS et Wojciech PALUBICKI. “Interactive Wood Combustion for Botanical Tree Models”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.6 (2017), 197 :1-197 :12 (cf. p. 23).
- [Pir+14] Sören PIRK, Till NIESE, Torsten HÄDRICH, Bedrich BENES et Oliver DEUSSEN. “Windy Trees : Computing Stress Response for Developmental Tree Models”. In : *ACM Transactions on Graphics* 33.6 (2014) (cf. p. 23).
- [Pir+12] Sören PIRK, Ondrej STAVA, Julian KRATT, Michel Abdul Massih SAID, Boris NEUBERT, Radomír MĚCH, Bedrich BENES et Oliver DEUSSEN. “Plastic Trees : Interactive Self-adapting Botanical Tree Models”. In : *ACM Transactions on Graphics* 31.4 (juill. 2012), 50 :1-50 :10 (cf. p. 23).
- [Pre+15] Hans PRETZSCH, Peter BIBER, Enno UHL, Jens DAHLHAUSEN, Thomas ROTZER, Juan CALDENTEY, Takayoshi KOIKE, Tran van CON et al. “Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests”. In : *Urban Forestry and Urban Greening* 14.3 (2015), p. 466-479 (cf. p. 26).
- [PH93] Przemyslaw PRUSINKIEWICZ et Mark HAMMEL. “A fractal model of mountains with rivers”. In : *Proceedings of Graphics Interface*. T. 30(4). Canadian Information Processing Society, 1993, p. 174-180 (cf. p. 7).
- [Pru+01] Przemyslaw PRUSINKIEWICZ, Lars MÜNDERMANN, Radoslaw KARWOWSKI et Brendan LANE. “The Use of Positional Information in the Modeling of Plants”. In : *Proceedings of the 28th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*. SIGGRAPH '01. New York, NY, USA : ACM, 2001, p. 289-300 (cf. p. 23).
- [PT09] Kenneth PYE et Haim TSOAR. *Aeolian Sand and Sand Dunes*. Unwin Hyman, London, 2009 (cf. p. 47).
- [RCC10] KaDonna RANDOLPH, Sally CAMPBELL et Glen CHRISTENSEN. *Descriptive statistics of tree crown condition in California, Oregon, and Washington*. Rapp. tech. Southern Research Station, USDA Forest Service, 2010 (cf. p. 45).
- [RGS09] Tobias RITSCHEL, Thorsten GROSCHE et Hans-Peter SEIDEL. “Approximating Dynamic Global Illumination in Image Space”. In : *Proceedings of the 2009 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. I3D '09. Boston, Massachusetts : Association for Computing Machinery, 2009, p. 75-82 (cf. p. 37).
- [Roe86] P L ROE. “Characteristic-Based Schemes for the Euler Equations”. In : *Annual Review of Fluid Mechanics* 18.1 (1986), p. 337-365 (cf. p. 69).
- [Ros94] David ROSGEN. “A classification of natural rivers”. In : *Catena* 22.3 (1994), p. 169-199 (cf. p. 7, 9, 11).
- [Ros+24] Nicolas ROSSET, Regis DUVIGNEAU, Adrien BOUSSEAU et Guillaume CORDONNIER. “Windblown sand around obstacles - simulation and validation of deposition patterns”. In : *Proc. ACM Comput. Graph. Interact. Tech.* 7.1 (2024) (cf. p. 61).
- [Rus+15] Matthew B. RUSSELL, Shawn FRAVER, Tuomas AAKALA, Jeffrey H. GOVE, Christopher W. WOODALL, Anthony W. D'AMATO et Mark J. DUCEY. “Quantifying carbon stores and decomposition in dead wood : A review”. In : *Forest Ecology and Management* 350 (2015), p. 107-128 (cf. p. 32, 34).
- [SM14] K. SAKURAI et K. MIYATA. “Modelling of Non-Periodic Aggregates Having a Pile Structure”. In : *Computer Graphics Forum* 33.1 (2014), p. 190-198 (cf. p. 97).

- [SIK07] Hisashi SATO, Akihiko ITOH et Takashi KOHYAMA. “SEIB–DGVM : A new Dynamic Global Vegetation Model using a spatially explicit individual-based approach”. In : *Ecological Modelling* 200.3-4 (2007), p. 279-307 (cf. p. 26).
- [Sch+23] Hugo SCHOTT, Axel PARIS, Lucie FOURNIER, Eric GUÉRIN et Eric GALIN. “Large-scale Terrain Authoring through Interactive Erosion Simulation”. In : *ACM Trans. Graph.* 42.5 (2023) (cf. p. 103).
- [SRB14] Rupert SEIDL, Werner RAMMER et Kristina BLENNOW. “Simulating wind disturbance impacts on forest landscapes : Tree-level heterogeneity matters”. In : *Environmental Modelling & Software* 51 (2014), p. 1-11 (cf. p. 36, 37).
- [Sei+12] Rupert SEIDL, Werner RAMMER, Robert SCHELLER et Thomas SPIES. “An individual-based process model to simulate landscape-scale forest ecosystem dynamics”. In : *Ecological Modelling* 231 (2012), p. 87-100 (cf. p. 45).
- [Sit+08] Stephan SITCH, C. HUNTINGFORD, N. GEDNEY, P. LEVY, M. LOMAS, S. L. PIAO, R. BETTS, P. CIAIS et al. “Evaluation of the terrestrial carbon cycle, future plant geography and climate-carbon cycle feedbacks using five Dynamic Global Vegetation Models (DGVMs)”. In : *Global Change Biology* 14.9 (2008), p. 2015-2039 (cf. p. 26).
- [SKS12] Svetlana STOLPNER, Paul KRY et Kaleem SIDDIQI. “Medial Spheres for Shape Approximation”. In : *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 34.6 (2012), p. 1234-1240 (cf. p. 88).
- [Sto+13] Alexey STOMAKHIN, Craig SCHROEDER, Lawrence CHAI, Joseph TERAN et Andrew SELLE. “A Material Point Method for Snow Simulation”. In : *ACM Transactions on Graphics* 32.4 (2013), 102 :1-102 :10 (cf. p. 63).
- [SS17] Alexey STOMAKHIN et Andrew SELLE. “Fluxed Animated Boundary Method”. In : *ACM Transactions on Graphics* 36.4 (2017), 68 :1-68 :8 (cf. p. 7).
- [Šř08] Ondřej ŠŤAVA, Bedrich BENES, Matthew BRISBIN et Jaroslav KŘIVÁNEK. “Interactive Terrain Modeling Using Hydraulic Erosion”. In : (2008), p. 201-210 (cf. p. 7, 47).
- [TL20] Juliana TOLLES et ThaiBinh LUONG. “Modeling Epidemics With Compartmental Models”. In : *Journal of the American Medical Association* 323.24 (2020), p. 2515-2516 (cf. p. 37).
- [TW02] An TSOULARIS et James WALLACE. “Analysis of logistic growth models”. In : *Mathematical Biosciences* 179.1 (2002), p. 21-55 (cf. p. 26, 27).
- [WL06] L. WANG et H. LIU. “An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling”. In : *International Journal of Geographical Information Science* 20.2 (2006), p. 193-213 (cf. p. 88).
- [Wer95] B. T. WERNER. “Eolian dunes : Computer simulations and attractor interpretation”. In : *Geology* (1995) (cf. p. 50, 54, 60).
- [WM08] Christopher W. WOODALL et Vicente J. MONLEON. *Sampling protocol, estimation, and analysis procedures for the down woody materials indicator of the FIA program*. Rapp. tech. NRS-22. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, 2008 (cf. p. 27).
- [WGG99] Brian WYVILL, Andrew GUY et Eric GALIN. “Extending the CSG Tree. Warping, Blending and Boolean operations in an Implicit Surface Modeling System”. In : *Computer Graphics Forum* 18.2 (1999), p. 149-158 (cf. p. 90, 95).
- [Yu+09] Qizhi YU, Fabrice NEYRET, Eric BRUNETON et Nicolas HOLZSCHUCH. “Scalable Real-Time Animation of Rivers”. In : *Computer Graphics Forum* 28.2 (2009), p. 239-248 (cf. p. 20).

- [YNS11] Qizhi YU, Fabrice NEYRET et Anthony STEED. “Feature-Based Vector Simulation of Water Waves”. In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 22.2-3 (2011), p. 91-98 (cf. p. 7, 20).
- [ZKH09] Jürgen ZELL, Gerald KÄNDLER et Marc HANEWINKEL. “Predicting constant decay rates of coarse woody debris – A meta-analysis approach with a mixed model”. In : *Ecological Modelling* 220.7 (2009), p. 904-912 (cf. p. 34).

