



HAL
open science

Synthèse de terrain à l'échelle planétaire

Yann Cortial

► **To cite this version:**

Yann Cortial. Synthèse de terrain à l'échelle planétaire. Modélisation et simulation. Université de Lyon, 2020. Français. NNT : 2020LYSEI094 . tel-03186765

HAL Id: tel-03186765

<https://theses.hal.science/tel-03186765>

Submitted on 31 Mar 2021

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.



N° d'ordre NNT : 2020LYSEI094

THÈSE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE LYON

opérée au sein de

l'INSA Lyon

École Doctorale ED512

InfoMaths

Spécialité de doctorat : Informatique

Soutenue publiquement le 12/11/2020 par :

Yann CORTIAL

Synthèse de terrain à l'échelle planétaire

Devant le jury composé de :

M. Loïc BARTHE, Professeur des Universités, Université Paul Sabatier de Toulouse,

Rapporteur

M. Marc DANIEL, Professeur des Universités, Polytech Marseille,

Rapporteur

Mme. Céline ROUDET, Maître de Conférences, Université de Bourgogne,

Examinatrice

M. Éric GALIN, Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1,

Examineur

M. Éric GUÉRIN, Maître de Conférences, INSA Lyon,

Directeur de thèse

M. Adrien PEYTAVIE, Maître de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1,

Co-Directeur de thèse

Département FEDORA – INSA Lyon - Ecoles Doctorales – Quinquennal 2016-2020

SIGLE	ECOLE DOCTORALE	NOM ET COORDONNEES DU RESPONSABLE
CHIMIE	CHIMIE DE LYON http://www.edchimie-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage secretariat@edchimie-lyon.fr INSA : R. GOURDON	M. Stéphane DANIELE Institut de recherches sur la catalyse et l'environnement de Lyon IRCELYON-UMR 5256 Équipe CDFA 2 Avenue Albert EINSTEIN 69 626 Villeurbanne CEDEX directeur@edchimie-lyon.fr
E.E.A.	ÉLECTRONIQUE, ÉLECTROTECHNIQUE, AUTOMATIQUE http://edeea.ec-lyon.fr Sec. : M.C. HAVGOUDOUKIAN ecole-doctorale.eea@ec-lyon.fr	M. Gérard SCORLETTI École Centrale de Lyon 36 Avenue Guy DE COLLONGUE 69 134 Écully Tél : 04.72.18.60.97 Fax 04.78.43.37.17 gerard.scorletti@ec-lyon.fr
E2M2	ÉVOLUTION, ÉCOSYSTÈME, MICROBIOLOGIE, MODÉLISATION http://e2m2.universite-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : H. CHARLES secretariat.e2m2@univ-lyon1.fr	M. Philippe NORMAND UMR 5557 Lab. d'Ecologie Microbienne Université Claude Bernard Lyon 1 Bâtiment Mendel 43, boulevard du 11 Novembre 1918 69 622 Villeurbanne CEDEX philippe.normand@univ-lyon1.fr
EDISS	INTERDISCIPLINAIRE SCIENCES-SANTÉ http://www.ediss-lyon.fr Sec. : Sylvie ROBERJOT Bât. Atrium, UCB Lyon 1 Tél : 04.72.44.83.62 INSA : M. LAGARDE secretariat.ediss@univ-lyon1.fr	Mme Sylvie RICARD-BLUM Institut de Chimie et Biochimie Moléculaires et Supramoléculaires (ICBMS) - UMR 5246 CNRS - Université Lyon 1 Bâtiment Curien - 3ème étage Nord 43 Boulevard du 11 novembre 1918 69622 Villeurbanne Cedex Tel : +33(0)4 72 44 82 32 sylvie.ricard-blum@univ-lyon1.fr
INFOMATHS	INFORMATIQUE ET MATHÉMATIQUES http://edinfomaths.universite-lyon.fr Sec. : Renée EL MELHEM Bât. Blaise PASCAL, 3e étage Tél : 04.72.43.80.46 infomaths@univ-lyon1.fr	M. Hamamache KHEDDOUCI Bât. Nautibus 43, Boulevard du 11 novembre 1918 69 622 Villeurbanne Cedex France Tel : 04.72.44.83.69 hamamache.kheddouci@univ-lyon1.fr
Matériaux	MATÉRIAUX DE LYON http://ed34.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction ed.materiaux@insa-lyon.fr	M. Jean-Yves BUFFIÈRE INSA de Lyon MATEIS - Bât. Saint-Exupéry 7 Avenue Jean CAPELLE 69 621 Villeurbanne CEDEX Tél : 04.72.43.71.70 Fax : 04.72.43.85.28 jean-yves.buffiere@insa-lyon.fr
MEGA	MÉCANIQUE, ÉNERGÉTIQUE, GÉNIE CIVIL, ACOUSTIQUE http://edmega.universite-lyon.fr Sec. : Stéphanie CAUVIN Tél : 04.72.43.71.70 Bât. Direction mega@insa-lyon.fr	M. Jocelyn BONJOUR INSA de Lyon Laboratoire CETHIL Bâtiment Sadi-Carnot 9, rue de la Physique 69 621 Villeurbanne CEDEX jocelyn.bonjour@insa-lyon.fr
ScSo	ScSo* http://ed483.univ-lyon2.fr Sec. : Véronique GUICHARD INSA : J.Y. TOUSSAINT Tél : 04.78.69.72.76 veronique.cervantes@univ-lyon2.fr	M. Christian MONTES Université Lyon 2 86 Rue Pasteur 69 365 Lyon CEDEX 07 christian.montes@univ-lyon2.fr

RÉSUMÉ

La synthèse de terrains virtuels à la fois vastes, détaillés, hétérogènes et explorables en temps-réel, constitue un des défis de la modélisation de scènes naturelles. Les nombreuses méthodes de l'état de l'art ne proposent en général que de traiter des scènes d'étendues limitées en topologie planaire. Dans cette thèse nous abordons la modélisation de terrain à l'échelle maximale, c'est-à-dire planétaire. Peu de choses ont été proposées pour traiter ce problème qui dépasse, en termes de taille du domaine, ce qui se fait classiquement, de quatre ordres de grandeur. Pour répondre à ce défi, nous proposons une solution découplée originale à même de générer des planètes à l'échelle 1/1 présentant un bon niveau de réalisme. Notre architecture prend tout d'abord en compte la géologie des planètes telluriques en mettant en œuvre une simulation guidée de tectonique des plaques. Celle-ci permet la génération des caractéristiques à grande échelle des planètes telles les continents, le relief océanique, les arcs d'îles ou encore les chaînes de montagnes. Ce modèle macroscopique est dans un second temps donné en entrée d'une méthode d'hyper-amplification capable de produire des vues continues, détaillées, en temps-réel du terrain. Cette seconde méthode procédurale s'appuie sur une pré-structuration du modèle macroscopique pour générer à la volée le modèle détaillé final, dépendant de la vue caméra courante. Celui-ci est produit intégralement sur GPU par un procédé massivement parallèle de subdivision stochastique, opérant à partir de règles dépendantes du niveau de détail. Notre solution résout mieux certains problèmes inhérents aux quelques méthodes précédentes, toutes fractales, comme l'auto-similarité, l'absence de variété des paysages produits et l'absence de contrôle utilisateur. Au final, les modèles planétaires que nous produisons sont jugés plus réalistes, tout en étant plus contrôlables par des artistes.

Mots-clés : informatique graphique, modélisation de terrain, modélisation de planètes, modélisation procédurale, tectonique, amplification de terrain, modélisation de rivières

ABSTRACT

Allowing the real-time exploration of huge, detailed, heterogeneous synthetic terrains remains an unsolved challenge in computer graphics, despite forty years of research. In general, existing methods only handle terrains of limited extent, defined over a planar topology. In this thesis, we explore terrain modeling at maximum-scale, *i.e.* at planetary scale - a scale which exceeds by four orders of magnitude the extent of the domain of classical terrain synthesis. However, this problem has been largely neglected, only a couple of modeling methods have been proposed in past research. To tackle this challenge, we propose a novel decoupled solution, capable of generating true-to-scale planets. Our architecture takes first into account the geology of terrestrial planets by deploying a guided plate tectonics simulation. This simulation allows the generation of large-scale planetary features such as continents, oceanic relief, islands arcs and mountain ranges. This macroscopic model is then forwarded as an input to an hyper-amplification method capable of producing continuous, detailed real-time views of the terrain. To handle the size of the domain, the procedural amplification method relies on the pre-structuration of the tectonic model, allowing on-the-fly generation of the final detailed model, restricted to the current camera view. The model is produced entirely on the GPU by relying on a massively parallel stochastic subdivision scheme, guided by level-of-detail dependent rules. Overall, our method better handles certain problems tied to previous fractal methods, such as the self-similarity of homogeneous landscapes and the lack of user-control, by producing planets that show more variety, appear more realistic and can be more efficiently designed by artists.

Keywords: computer graphics, terrain modeling, planet modeling, procedural modeling, tectonics, terrain amplification, river networks

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
2	ÉTAT DE L'ART	7
2.1	Synthèse de terrain classique	9
2.1.1	Aperçu du domaine	10
2.1.1.1	Familles d'approches	10
2.1.1.2	Modes de synthèse	11
2.1.1.3	La question du réalisme	11
2.1.1.4	Représentation des terrains	12
2.1.1.5	Contrôle utilisateur, contraintes sur les modèles	13
2.1.2	Méthodes physiques mono-échelles	14
2.1.2.1	Érosion thermique	15
2.1.2.2	Érosion hydraulique	15
2.1.2.3	Reliefs éoliens	17
2.1.2.4	Autres simulations	19
2.1.3	Méthodes multi-échelles	20
2.1.3.1	Modélisation fractale	21
2.1.3.2	Méthodes procédurales avec pré-structuration	23
2.1.3.3	Méthodes procédurales volumiques	25
2.1.3.4	Synthèse à partir d'exemples	26
2.1.4	Conclusion	30
2.2	Passage à l'échelle planétaire	32
2.2.1	Applications émergentes	32
2.2.2	Recherche académique	34
2.2.2.1	Modélisation	34
2.2.2.2	Stratégies de rendu	36
2.2.3	Conclusion	37
3	MODÉLISATION DE PLANÈTES PAR REPRODUCTION D'UNE TECTONIQUE	39
3.1	Observations préliminaires	40
3.1.1	État des connaissances géophysiques	41
3.1.2	Éléments de tectonique des plaques classique	42
3.2	Aperçu de la méthode	47
3.2.1	Phénomènes reproduits	48

3.2.2	Modèle de plaque	49
3.2.3	Aspect numérique	52
3.2.4	État initial de la simulation	54
3.3	Modèle tectonique dynamique	56
3.3.1	Convergence	56
3.3.1.1	Subduction	56
3.3.1.2	Collisions continentales	59
3.3.1.3	Implémentation	61
3.3.2	Divergence	65
3.3.2.1	Génération du plancher océanique	65
3.3.2.2	Fragmentation de plaque	66
3.3.2.3	Implémentation	67
3.3.3	Érosion continentale et affaissement océanique	69
3.4	Résultats	70
3.4.1	Validation	70
3.4.2	Performance	72
3.4.3	Contrôle utilisateur	72
3.4.4	Limitations	73
4	AMPLIFICATION DE PLANÈTES POUR LE RENDU DÉTAILLÉ TEMPS-RÉEL	77
4.1	Approche par collage de modelés	78
4.1.1	Méthode	79
4.1.1.1	Pré-traitement des cartes de hauteur	79
4.1.1.2	Données planétaires basse-résolution	80
4.1.1.3	Amplification temps-réel	82
4.1.2	Résultats	84
4.2	Approche par hyper-amplification	85
4.2.1	Aperçu de la méthode	86
4.2.2	Calcul du modèle basse résolution	87
4.2.3	Subdivision adaptative	91
4.2.3.1	Schéma de subdivision	91
4.2.3.2	Paramètres des sommets	94
4.2.3.3	Relief spécifique	97
4.2.4	Injection de modelés	98
4.2.5	Implémentation GPU	100
4.2.6	Résultats	102
5	CONCLUSION	107
	BIBLIOGRAPHIE	115

INTRODUCTION



Figure 1 : Vue de la botte italienne depuis la Station Spatiale Internationale (ISS), orbitant à 400 km d'altitude. En insert, photographie de la Terre réalisée durant la mission Apollo-8, prise en 1968 par l'astronaute William Anders. (Source : NASA)

On ne trébuche pas sur une montagne. On trébuche sur une pierre.

— Proverbe Indien

Les grecs anciens, dont Aristote, aimaient contempler la nature, autrement dit la *physis*, pour en déduire les lois de leur philosophie naturelle. On peut supposer que certains parmi eux avaient déjà sans doute formulé une sorte de rêve incongru, une chimère à jamais inaccessible, inatteignable du fait de la limitation de la condition humaine, au regard des étendues du cosmos qu'ils pouvaient déjà estimer par le calcul : voir la Terre, contempler le monde depuis la voûte céleste, dans sa globalité – une vision sans doute réservée aux dieux. Mais voilà, à peine quelques millénaires plus tard, ce rêve parmi les plus vieux rêves de l'humanité a fini pourtant par se réaliser. Grâce aux pionniers de l'astronautique, il est désormais possible de contempler la Terre dans son entièreté (figure 1), et il ne reste guère de surface de ce monde qui n'ait été explorée. Mais rares sont les hommes et femmes autorisés à assister à ce spectacle cosmique, les astronautes ne sont pas légions ; cependant, il reste le pouvoir de l'image, pour que les autres, nous tous, puissions nous émerveiller à notre tour. C'est là que l'informatique graphique peut jouer un rôle d'importance. Car, à défaut de contempler nous-même ces spectacles naturels, nous pouvons transmettre des images, les animer, les

explorer virtuellement et pourquoi pas même les synthétiser, afin de montrer ce qui demeure encore inaccessible à l'homme, d'autres planètes.

1

Tout comme l'astronautique, l'informatique graphique est jeune. Depuis sa naissance au lendemain de la seconde guerre mondiale à aujourd'hui, beaucoup de chemin a été parcouru, beaucoup a été proposé, pour parvenir à créer, visualiser, interagir avec, et explorer des constructions numériques particulières qui nous intéressent de près : les mondes virtuels. Des débuts balbutiants – on citera le travail de Sutherland en 1968, permettant avec un casque rudimentaire d'explorer des salles virtuelles représentées en simple géométrie fil-de-fer – aux effets spéciaux du cinéma moderne, photoréalistes, la route a été jalonnée de découvertes en modélisation, en animation et en rendu. Les mondes virtuels, des représentations tri-dimensionnelles du monde physique perceptible, sont peuplés d'objets multiples. Parmi eux, des objets considérés comme essentiels pour leur crédibilité sont bel et bien les composantes des paysages naturels, notamment le terrain, les nuages, les rivières et/ou la végétation ; c'est-à-dire, la *physis*. La modélisation de ces éléments, et même leur synthèse, forme l'objet de sous-domaines à part entière de l'informatique graphique. Jusqu'à il y a peu, et que ce soit concernant les terrains, les nuages ou la végétation, les efforts n'ont porté que sur des étendues limitées en topologie planaire : c'est-à-dire qu'on ne considère que des paysages sur des étendues planes, de quelques kilomètres, très loin donc de l'étendue et de la sphéricité de planètes entières. Toutefois depuis dix ans environ, à travers les jeux vidéo et le cinéma, l'échelle planétaire suscite une attention particulière. C'est qu'entre temps la science-fiction est devenue un genre extrêmement populaire, et que le besoin de voir, d'explorer, des planètes complètes surgit avec force, parallèlement à ce que *Google Maps/Google Earth*, la *NASA*, nous donnent à voir quotidiennement et qui rejoint ce qui a été évoqué en préambule : ce vieux rêve de voir le monde.

Mais, une planète du point de vue numérique, virtuel, est un objet complexe à traiter. La Terre est recouverte, sur un demi-milliard de kilomètres carrés, de reliefs (lithosphère), d'eau (hydrosphère) et de nuages animés caractéristiques (atmosphère). Modéliser et rendre des paysages planétaires, à toutes échelles, est un défi numérique majeur. Il rejoint les verrous de l'étendue et de la précision des modèles de terrains (ou de nuages) lorsque ceux ci s'attachent à dépasser les étendues conventionnelles. Le premier problème est donc celui de la taille du domaine : l'*échelle*. Le second, lié au premier, est celui de la *variété* ou multi-modalité : en effet, plus on s'attaque à de grandes étendues plus il faut prendre en compte une variété élevée de paysages ; à l'instar de notre planète qui figure aussi bien des plaines, des vieux massifs, des ergs sableux ou des regs en zone aride, que des vallées alpines ou des formations karstiques ravinées toutes deux travaillées par de fortes hydrographies.

Face à ces défis la recherche académique n'a proposé curieusement que peu de choses. On compte seulement deux méthodes de modélisation capables de traiter des planètes entières à l'échelle 1/1, Musgrave [Ebe+98] et Derzapf *et al.* [Der+11]. Ce sont deux méthodes fractales qui, par essence, abordent plutôt bien le problème de l'étendue vaste des planètes, mais par contre produisent des terrains extrêmement homogènes qui ne répondent pas au second défi,

celui de la variété. Ces méthodes ne sont donc pas satisfaisantes. Du côté de la recherche industrielle, bien entendu, les problèmes sont les mêmes, mais les solutions apportées varient. Dans le cinéma, on évite généralement la question de l'exploration de planètes en introduisant des scènes découplées pour les vues orbitales et les vues près du sol, *i.e.* sans continuité entre les deux. Dans les jeux vidéo le problème est résolu de manière similaire, sauf pour un jeu en particulier qu'il convient de mentionner, *Star Citizen*. Ce jeu a la particularité d'avoir obtenu un budget participatif record de plusieurs centaines de millions de dollars et propose aux joueurs l'exploration continue de planètes (comme le montre la figure 2). Le jeu est toujours en développement, bien qu'ayant débuté en 2013, toutefois une version alpha est déjà jouable en ligne. L'ambition du jeu est forte, et le problème de la variété des paysages est relativement bien traité, par l'emploi de cartes de hauteur pré-calculées ; le problème de l'étendue et de la précision est lui réduit en modélisant à l'échelle 1 : 10 les planètes (donc une surface réduite d'un facteur 100, ce qui est considérable).



Figure 2 : Les terrains à l'échelle maximale, planétaire, du jeu *Star Citizen*. (source : © CIG)

Dans cette thèse, nous allons nous concentrer sur la modélisation de terrains planétaires à l'échelle 1/1 et ce de manière à permettre l'exploration continue, temps-réel des modèles. En premier lieu, nous présentons un État de l'Art (**chapitre 2**) dans lequel nous précisons plus avant ce qui a été produit en matière de synthèse de terrains classiques, c'est-à-dire des terrains à étendue limitée et en topologie planaire. Ceci permettra d'explicitier des notions, des techniques, des problématiques communes sur lesquelles construire la modélisation de terrains planétaires : en un mot de passer à l'échelle en fonction de l'existant. Les méthodes de la littérature sont donc d'abord présentées en regard de l'approche classique, avant de s'intéresser spécifiquement à ce qui a été fait en matière de terrains planétaires. Les rares méthodes existantes qui traitent l'échelle planétaire sont toutes procédurales, et même fractales : d'essence phénoménologique, elles ne s'intéressent pas aux causes physiques de la formation des terrains, et leur nature fractale ne produit pas la variété essentielle au réalisme (comme le montre la figure 3).

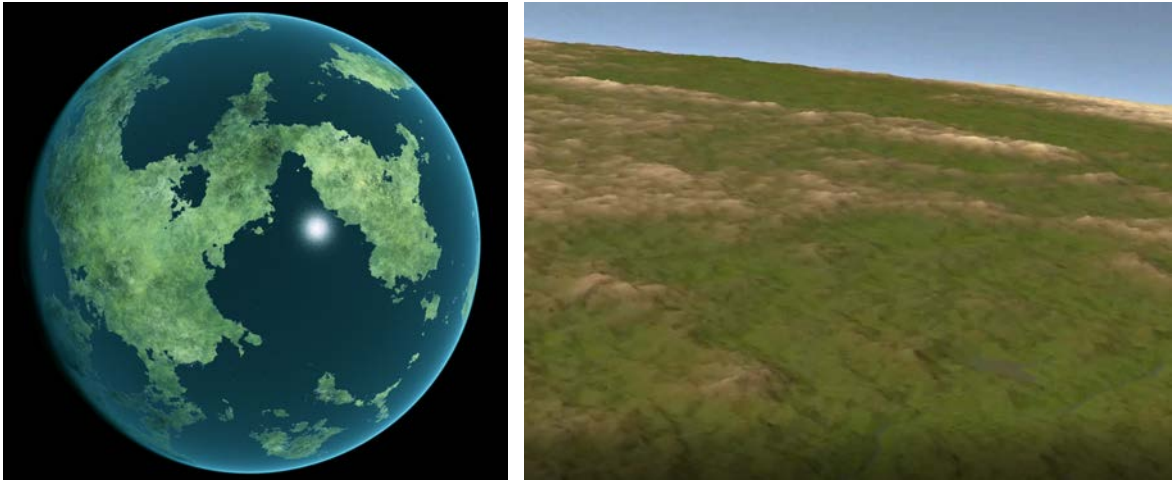


Figure 3 : Méthodes existantes de modélisation de planètes : (gauche) instance générée par combinaison de bruits procéduraux, à la façon de [Ebe+98], et rendue par le logiciel *Terragen* (Source : nvseal @ deviant-art) ; (droite) exemple de terrain généré à la volée par la méthode de Derzopf *et al.* [Der+11] (Source : [Der+11]).

Pour pallier à ces deux défauts tout en prenant en compte le problème particulier de l'étendue considérable de planètes modélisées à l'échelle 1/1, nous proposons dans un second temps une approche de synthèse originale, combinant à la fois représentation physique et techniques procédurales. Les méthodes fractales échouant à produire l'hétérogénéité à grande échelle des planètes, nous proposons d'abord (chapitre 3) de traiter l'échelle macroscopique en simulant une physique géologique : à cette échelle il s'agit principalement de phénomènes tectoniques, qui permettent d'engendrer correctement des formes de continents intéressantes, des distributions d'arcs d'îles et d'archipels, des chaînes montagneuses plausibles. La méthode opère sur une représentation triangulée de plaques tectoniques, animées dans une boucle de simulation selon un pas de temps de plusieurs millions d'années. Lors de la simulation les modes d'interaction tectoniques sont détectés et reproduits. Ces modes comptent, en convergence, la subduction de plaques et les collisions continentales, donnant lieu à des orogénies (formations de montagnes), et en divergence la formation de plancher océanique le long des dorsales ainsi que le *rifting*, c'est-à-dire la fragmentation des plaques. La méthode offre des capacités de contrôle à l'utilisateur, celui-ci peut en temps interactif durant la simulation réorienter les plaques ou bien les re-paramétrer. Une fois le modèle tectonique produit, la planète décrite par sa croûte avec une précision de quelques dizaines de kilomètres, est donnée en entrée d'une seconde méthode d'amplification dont le rôle est de créer les détails du terrain à la volée, à mesure que la caméra commence son exploration en temps réel. Nous proposons (chapitre 4) deux méthodes d'amplification : la première par mélange de cartes de hauteurs réelles, et la seconde, baptisée *hyper-amplification*, qui opère par subdivision stochastique. L'*hyper-amplification* est inspirée du travail de Derzopf *et al.* et permet de dépasser les limitations de notre première méthode, laquelle ne permet pas une bonne précision du terrain et n'offre aucun élément hydrographique structurant ; *a contrario* l'*hyper-amplification* permet la génération à la volée de terrains variés en sus de réseaux hydrographiques cohérents. Elle

fonctionne par génération d'un réseau hydrographique à grande échelle, suivit d'un raffinement adaptatif, parallèle et intégralement implémenté sur GPU, du terrain. Le raffinement se fait par subdivision stochastique d'arêtes et de faces, et est guidé par des règles conditionnées par le typage du terrain et l'échelle courante de subdivision. Une fois la subdivision opérée nous la faisons suivre par un post-traitement des sommets du terrain visant à re-créeer les modelés hydrographiques caractéristiques que sont les lits de rivières et les vallées. Par le couplage de l'approche tectonique, qui produit les grandes structures du relief planétaire, avec l'hyper-amplification nous démontrons la possibilité d'explorer des planètes à l'échelle 1/1 de manière continue, en temps réel, présentant un réalisme et une variété de paysages à de multiples échelles (figure 4) plus élevés que les méthodes existantes. Nous concluons par un rappel du contexte et des enjeux auxquels nous avons tenté de répondre dans cette thèse, tout en offrant des perspectives de recherche et des considérations sur l'avenir du domaine.

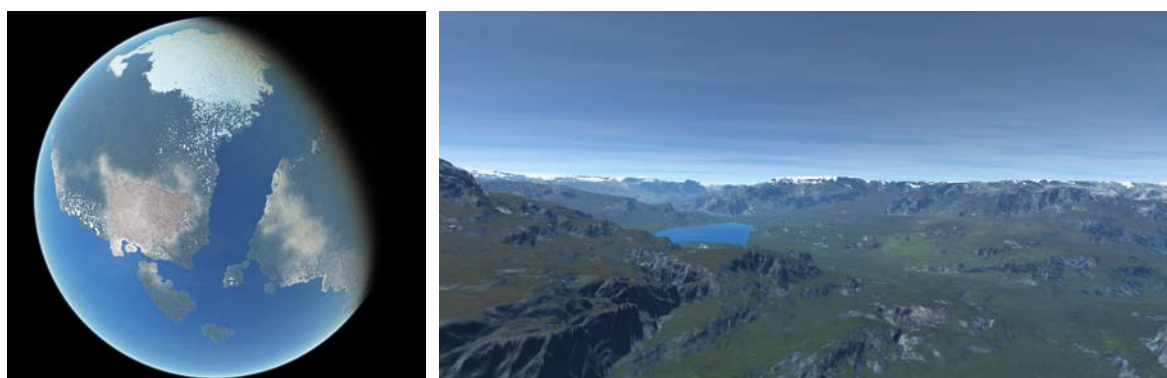


Figure 4 : Résultats du couplage des méthodes tectonique et d'hyper-amplification, donnant les grandes structures planétaires (gauche) et le relief détaillé (droite).

ÉTAT DE L'ART

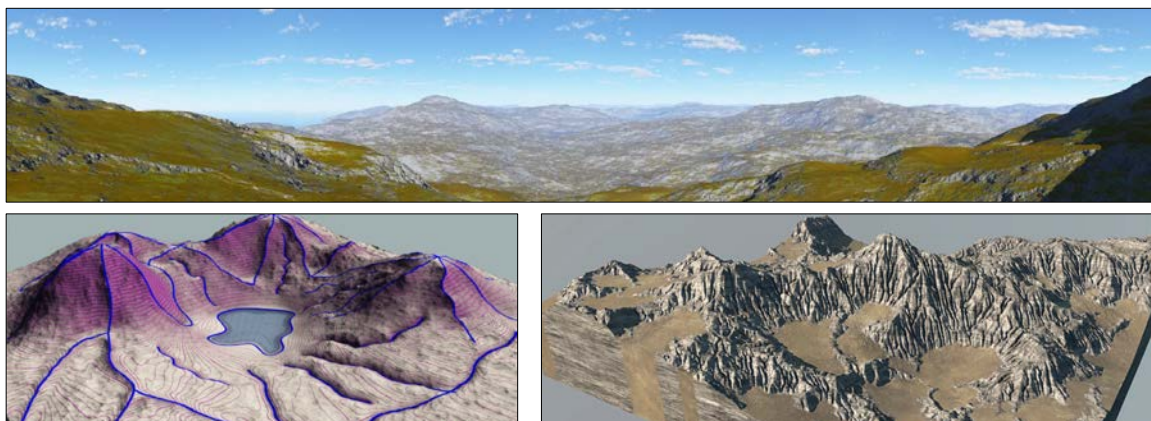


Table des matières

2.1 Synthèse de terrain classique	9
2.1.1 Aperçu du domaine	10
2.1.1.1 Familles d'approches	10
2.1.1.2 Modes de synthèse	11
2.1.1.3 La question du réalisme	11
2.1.1.4 Représentation des terrains	12
2.1.1.5 Contrôle utilisateur, contraintes sur les modèles	13
2.1.2 Méthodes physiques mono-échelles	14
2.1.2.1 Érosion thermique	15
2.1.2.2 Érosion hydraulique	15
2.1.2.3 Reliefs éoliens	17
2.1.2.4 Autres simulations	19
2.1.3 Méthodes multi-échelles	20
2.1.3.1 Modélisation fractale	21
2.1.3.2 Méthodes procédurales avec pré-structuration	23
2.1.3.3 Méthodes procédurales volumiques	25
2.1.3.4 Synthèse à partir d'exemples	26
2.1.4 Conclusion	30
2.2 Passage à l'échelle planétaire	32
2.2.1 Applications émergentes	32
2.2.2 Recherche académique	34
2.2.2.1 Modélisation	34
2.2.2.2 Stratégies de rendu	36
2.2.3 Conclusion	37

2

Les terrains sont une composante essentielle des paysages, car ce sont des éléments structurant et support de la scène sur lesquels viennent se greffer les autres éléments (végétation, bâtiments, véhicules, etc.). Ils occupent donc une place particulièrement importante dans toute application numérique figurant de manière visuelle des scènes extérieures 3D. Parmi ces applications on compte celles qui s'appuient fortement sur les terrains de *synthèse*, et qui se distinguent des applications de type SIG (*GIS, Geographic Information System*), plus orientées vers l'analyse et la visualisation de terrains *réels* et de données affiliées (comme par exemple l'occupation des sols). La synthèse de terrain a des applications importantes, pour les simulateurs d'entraînement, lorsque ceux-ci nécessitent des reliefs spécifiques aux missions d'entraînement, et surtout dans les industries du jeu vidéo et du cinéma. Dans ces trois types d'applications, on constate au fil des ans et à mesure que le matériel informatique gagne en capacités de traitement un accroissement de la taille des terrains ainsi que de leur réalisme. Par exemple, les simulations de vol ou d'opérations de projection longue portée (civiles ou militaires) peuvent couvrir des étendues de plusieurs milliers de kilomètres. Ou encore, les jeux vidéo dits « mondes ouverts » peuvent présenter des terrains extrêmement détaillés tout en étant étendus (par exemple le titre sorti en 2016 *Final Fantasy XV* offre un terrain de 42 × 42 km entièrement explorable en continu et au niveau du sol, à comparer avec *The Elder Scrolls IV* sorti en 2007, à l'époque révolutionnaire, qui offrait un terrain de taille 6 × 6 km). Enfin, le cinéma, avec la science-fiction devenue genre très populaire, propose désormais souvent des paysages spectaculaires à l'échelle planétaire.

Tous ces terrains de synthèse sont générés par des méthodes dédiées, automatiques ou semi-automatiques, qui s'appuient à des degrés divers sur les connaissances que nous avons du monde géologique réel. En préambule de cet état de l'art il est donc souhaitable de rappeler quelques éléments essentiels de géomorphologie. Sur Terre, la variété des paysages s'explique par la rencontre interdépendante de nombreux facteurs qui donnent naissance aux modelés géomorphologiques qui nous sont familiers comme les massifs montagneux, les systèmes de collines érodées, les falaises côtières, ou tous les modelés dérivés de l'hydrographie comme les vallées fluviales, les gorges et les canyons, les étendues de sédiments ou les criques. Intuitivement nous caractérisons les terrains par leur *forme*. Mais un terrain n'est pas juste un modelé statique. La forme s'explique par un *historique* de processus, lequel peut s'étaler sur des échelles de temps extrêmement variables, pouvant être comptées en jours (par exemple pour une dune ou un cratère volcanique), en milliers d'années (le delta d'un fleuve) ou encore en millions d'années (une montagne). Les géomorphologues pensent ces processus en terme d'analyse systémique : un terrain est un système ouvert, en équilibre dynamique plus ou moins stable et figurant des boucles de rétroactions positives ou négatives. Au-delà de leur complexité intrinsèque, ces terrains-systèmes peuvent être vus en première approximation comme des antagonismes entre *facteurs endogènes*, plutôt générateurs (les forces géologiques, tectoniques ou volcaniques) et *facteurs exogènes* plutôt destructeurs (les forces climatiques, le vent, les précipitations, la température et les radiations solaires, induisant notamment l'érosion) [Hug16]. Globalement, les forces génératrices de la tectonique agissent sur de grandes échelles spatiales et temporelles pour façonner notamment les chaînes de montagnes, donc des grands

plissements s'étendant sur des centaines voire des milliers de kilomètres. Inversement, les forces exogènes qui altèrent le terrain agissent sur de plus petites échelles, jusqu'au mètre pour l'érosion hydraulique (écoulement des eaux de surface) ou l'érosion thermique (formation de talus en bas des pentes). Mais plus petite échelle ne signifie pas effets négligeables, bien au contraire : l'oeil humain est, par la force de l'évolution biologique, capable de discerner avec une très grande efficacité les éléments d'un paysage naturel, notamment le relief. Ajoutons que cette capacité de discernement s'opère généralement sur une gamme d'échelles étendue, fonction de la portée de la vue ($10^0 - 10^5$ m) et du point d'observation choisi.

Nous souhaitons dans cette thèse mettre l'accent sur l'échelle des terrains synthétisés. Par le mot « échelle » et à défaut d'autres termes en français, nous désignons à la fois l'étendue et la précision du domaine spatial sur lequel s'opère la synthèse – étendue, comme taille absolue du domaine, et précision, comme niveau de détail. À ces deux aspects pris de manière combinée vient s'adjoindre naturellement la notion de résolution, qui serait, dans le cas discret, le nombre global d'échantillons représentant le terrain. Toutes les méthodes classiques de génération de terrains ne se valent pas, et notamment sur cette question de l'échelle. Nous allons organiser la présentation des méthodes en deux grands groupes : les méthodes mono-échelle, c'est-à-dire dédiées à représenter des phénomènes à une échelle donnée, ce sont souvent des méthodes recréant la physique sous-jacente, et les méthodes multi-échelles qui peuvent s'appliquer à divers objets de modélisation de manière relativement indépendante de l'échelle, et ce sont comme on le verra souvent des méthodes phénoménologiques recréant l'apparence des modèles sans prendre en compte véritablement la physique. Nous souhaitons explorer le potentiel de ces méthodes quant au passage aux grandes échelles et, surtout, au passage à l'échelle maximale des terrains, à savoir l'échelle planétaire.

2.1 Synthèse de terrain classique

Avant d'aborder directement la synthèse de terrains à l'échelle maximale, il est judicieux de présenter un panel des travaux précédents en matière de synthèse de terrains classiques. En effet, pendant plus de quarante ans, la recherche académique s'est intéressée à produire des techniques permettant de générer des paysages naturels virtuels, en topologie planaire et sur des étendues limitées certes, mais le passage à l'échelle se fera nécessairement sur la base de ces travaux, par continuité logique et technique. La section 2.1.1 est donc une introduction au domaine de la synthèse classique de terrains, elle présente rapidement les grands axes de recherche, les thématiques et les contraintes sous-jacentes.

2.1.1 Aperçu du domaine

L'informatique graphique est née dans les années 50 plus ou moins du versement vers le domaine civil, notamment l'industrie aéronautique, automobile, les universités (avec les premiers travaux sur les interfaces homme-machine), de technologies produites par les militaires au lendemain de la seconde guerre mondiale et impliquant notamment le radar, le tube cathodique, les premiers ordinateurs. Cependant, des années 50 au milieu des années 70, et bien que le domaine se soit fort développé (l'ACM crée SIGGRAPH en 1969) et que des personnalités telles Sutherland, Evans, Catmull, Clark, Blinn, *etc.*, aient émergé, la modélisation 3D ignore dans l'ensemble la *synthèse* de phénomènes naturels. À cela une des raisons concernaient le bagage mathématique standard : les primitives de modélisation étaient des points, des lignes, des surfaces lisses, linéaires dans le cas de polygones, au mieux des *patches* polynomiaux (Bézier, B-splines, NURBS), le tout étant complètement déterministe. Or, les phénomènes naturels, dans leur forme, sont tout au contraire engendrés par des non-linéarités, ce qui sera nommé le *chaos* [TS02] – des phénomènes en apparence aléatoires et figurant un haut niveau de désordre et d'irrégularité, du fait d'une dynamique extrêmement sensible aux conditions initiales. En fait, il faudra attendre que les travaux du mathématicien Benoît Mandelbrot, sa théorie des fractales et ses intuitions concernant la "géométrie de la nature" [MVN68 ; Man75 ; Man82], versent dans l'informatique graphique, avec les premiers modèles stochastiques de terrains [FFC82]. Ainsi le véritable essor de la génération de terrains en tant que sous-domaine de l'informatique graphique date du début des années 80, et la modélisation fractale sera d'abord à l'honneur, avant que ne soit explorées d'autres pistes, notamment l'introduction progressive de méthodes reposant sur la physique.

2.1.1.1 Familles d'approches

On divise conceptuellement et classiquement le domaine en trois familles de méthodes [Gal+19]. Premièrement, les méthodes dites procédurales, qui reposent sur des modèles phénoménologiques, c'est-à-dire des modèles s'attachant à recréer l'apparence du réel sans prendre en compte les causes physiques sous-jacentes. Les méthodes reposant sur les modèles fractals sont typiques de cette catégorie (section 2.1.3.1). On trouvera en second lieu la famille des méthodes de synthèse à partir d'une base d'exemples (section 2.1.3.4) : souvent des terrains réels, encodant tout un réalisme géologique, dont on extrait des éléments qui seront réassemblés et mélangés pour générer un nouveau terrain. Enfin la troisième catégorie est celle des simulations (section 2.1.2) qui s'attachent à modéliser, avec plus ou moins de finesse, les processus physiques qui déterminent la forme des terrains. On notera au regard de la question de l'échelle, une séparation assez bien formée entre les méthodes de simulation en grande majorité très limitées sur cet aspect (mono-échelle), et les méthodes procédurales et de synthèse à partir d'exemples plutôt adaptables et capables de s'appliquer à de multiples échelles. Nous ajouterons aussi que la répartition des méthodes en ces trois catégories

(procédurales, exemples et simulations) classiquement faite dans les états de l'art précédents [Nat+13 ; Gal+19], n'est pas selon nous totalement satisfaisante : il faudrait se contenter en fait de deux types d'approches, l'approche phénoménologique, regroupant procédural et construction à partir d'exemples, et l'approche physique pour toute méthode prenant en compte les causes physiques à l'origine des terrains. Comme ce découpage sémantique rejoint celui de la question de l'échelle, c'est celui que nous proposons dans cet état de l'art.

2.1.1.2 Modes de synthèse

La modélisation de terrain se décline classiquement selon plusieurs modes : synthèse pure, amplification, embellissement et reconstruction. On parlera de *synthèse pure* lorsqu'une méthode est dédiée à la génération *ex nihilo* de terrains : le terrain est créé, sur toute son étendue, comme sortie d'un algorithme paramétré. Mais on peut aussi envisager la modélisation comme une modification d'un terrain existant. Ce peut être l'augmentation de la précision, donc l'ajout de détails, auquel cas le terme à employer est celui d'*amplification*. La modification d'un terrain peut également être d'un autre ordre, plus structurel. On peut vouloir ainsi ajouter des caractéristiques, absentes du terrain original, et c'est le cas notamment avec toutes les méthodes recréant les divers phénomènes érosifs ; le terrain est modifié, on parle souvent d'*embellissement*, car ces méthodes ajoutent au réalisme perçu du terrain. Enfin un dernier mode de modélisation consiste en la *reconstruction* de parties manquantes d'un terrain de façon cohérente. Notons que dans tous les cas on parle bien de synthèse, car tous ces modes génèrent des objets, que ce soit un terrain entier [Zho+07 ; Gén+13 ; GMM15 ; Cor+18], des détails [Gu16 ; Zha+19], des caractéristiques [MDH07 ; Par+19a] ou des zones à reconstruire [WSG07].

2.1.1.3 La question du réalisme

Il existe une problématique importante liée intrinsèquement au domaine, qui est celle de l'évaluation des terrains générés par les diverses approches de la littérature. Cette évaluation devrait s'opérer sur les qualités attendues du modèle : cela peut être le réalisme, ou encore l'attrait visuel. Quelques travaux existent en matière de classification et de perception des terrains, mais uniquement établis au croisement de la psychologie et de la géomorphologie [DB06 ; HPT04]. Contrairement à d'autres domaines en informatique graphique (synthèse de texture, modélisation 3D, qualité vidéo, etc.), où une riche littérature en lien avec la perception visuelle existe et ayant produit notamment des métriques utiles, rien de tel n'a été proposé en ce qui concerne les terrains virtuels. Par exemple, aucun ensemble de données comparatif n'existe à l'heure actuelle permettant de distinguer terrains réels et synthétiques.

On soulignera donc l'unique travail récent de Rajasekaran *et al.* [Raj+19], où les auteurs ont introduit une toute première métrique pour quantifier le réalisme perçu d'un terrain. La

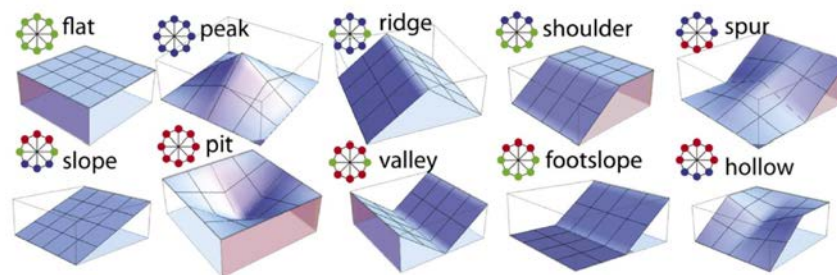


Figure 5 : Les 10 géomorphons possibles sur le voisinage de Moore. (Source : [JS13]).

méthode s'applique à des terrains planaires représentés par cartes de hauteur et s'appuie sur le concept de *geomorphon* [JS13] (Figure 5), des éléments de classification de la courbure du terrain réalisée sur le voisinage de Moore. Cette approche n'est qu'un premier pas pour évaluer la qualité perceptuelle d'un terrain, car les geomorphons ne caractérisent celui-ci que localement et ne permettent pas à eux seuls d'évaluer les grandes structures, telles les réseaux de rivières ou la distribution des vallées en zone montagneuse.

2.1.1.4 Représentation des terrains

En termes de modèles, il existe des représentations communes des terrains partagées par les méthodes. Tout d'abord, on peut voir un terrain comme un champ de hauteur (*heightfield*) sur, typiquement, une topologie planaire¹ auquel cas la représentation est dite $2.5D$. Un champ de hauteur peut être donné par une fonction évaluable en tout point du domaine, ou par une carte de hauteur (*heightmap*) que l'on stocke numériquement sous la forme d'une grille. La première forme est très compacte, cependant c'est la seconde qui est la plus commune aux méthodes de l'art, pour des raisons d'efficacité calculatoire, l'accès à une grille se faisant en temps constant. Mais notons que le coût de stockage est en sa défaveur puisqu'en $O(N^2)$, ce qui est un facteur limitant pour la résolution des terrains. En terme d'expressivité un champ de hauteur représente bien 95% des modèles géomorphologiques existants en termes d'occurrences naturelles, mais du fait de sa nature $2.5D$ n'est pas capable de représenter certaines formes $3D$ spécifiques et localisées comme des surplombs sur une falaise, des arches de roche ou des systèmes de grottes. Notons enfin, qu'un champ de hauteur peut être par contre augmenté verticalement de couches distinctes, on parle alors de multi-champ de hauteur, pour modéliser par exemple conjointement l'eau, le sable, la roche friable ou la roche dure, ce qui s'est montré utile pour certaines méthodes, notamment les simulations inspirées de la physique. Au-delà des champs de hauteur et des multi-champs de hauteur, il existe aussi des représentations volumiques, donc complètement $3D$, des terrains. Le volume de matière peut être défini de la même façon par une fonction (par exemple des volumes implicites)

1. Mais pas uniquement, un champ de hauteur peut aussi être défini sur d'autres topologies, comme la topologie sphérique pour une planète.

ou être discrétisé sur une grille en voxels. Cette dernière forme est peu utilisée au final car extrêmement coûteuse en stockage.

2.1.1.5 Contrôle utilisateur, contraintes sur les modèles

Beaucoup des méthodes de la littérature proposent de donner des capacités de *contrôle*, c'est-à-dire des capacités d'édition de la synthèse à utilisateur. Ceci est à mettre en regard avec les champs applicatifs de la synthèse de terrain, où souvent ce sont des artistes qui contrôlent le processus créatif (dans le cinéma, dans les jeux video). On trouve classiquement les paradigmes de contrôle suivant : l'entrée de paramètres algorithmiques (typique des méthodes fractales), qui est la forme la moins intuitive de contrôle ; la spécification de schémas graphiques vectoriels (par exemple une ligne de crête, le lit d'une rivière, la présence d'un pic) qui servent à décrire en filigrane l'aspect du terrain à synthétiser ; la spécification de terrains sources, qui peuvent servir à un mécanisme de transfert de style ; enfin, par peinture ou sculpture virtuelle avec un dispositif de pointage, ou par interface haptique (voir, à ce propos, le travail original de Cordonnier *et al.* [Cor+18], section 2.1.2.4). Une méthode de modélisation de terrain ne peut être conçue sans prendre en compte son intégration potentielle dans un contexte numérique de production. Ce contexte applicatif, même s'il est réduit au prototypage et à l'évaluation de la méthode dans le cadre de la recherche, comprend *de facto* l'étape de visualisation du terrain généré. Il peut aussi impliquer comme nous venons de l'évoquer une boucle d'édition en temps interactif de la part d'un ou plusieurs utilisateurs. Numériquement cela implique l'existence d'un *pipeline*, même minimal, comprenant plusieurs étapes qui doivent être liées. Ceci génère des contraintes sur les représentations numériques et les modèles qui opèrent sur celles-ci. Par exemple la visualisation finale, que ce soit par procédé *offline* de raytracing ou *online* de rasterisation temps-réel sur GPU, attend souvent une représentation du terrain sous formes d'une collection de triangles, attribués au minimum d'information de normales. Si on souhaite offrir des capacités d'édition et de contrôle à une méthode il faudra que la boucle modélisation-visualisation-édition soit performante, et c'est une contrainte directe sur la méthode. Autre exemple, et dans le cas des jeux vidéo, les terrains doivent permettre des requêtes spatiales évaluables rapidement afin de réaliser les tests d'intersection et de collision du moteur physique. Des conversions peuvent être opérées entre les étapes du *pipeline* mais elles ont un coût temporel et spatial qui peut s'avérer impactant, et c'est le cas dans les contextes de production interactifs. De ce fait, le potentiel d'une méthode sera évalué aussi par son intégrabilité dans un contexte applicatif donné. Notons que cet aspect est d'autant plus prégnant que l'échelle de modélisation du terrain est grande.

2.1.2 Méthodes physiques mono-échelles

Dans la catégorie des méthodes mono-échelle on trouvera naturellement toutes les méthodes dédiées à la production de modèles spécifiques, lesquels de par leur caractéristiques géomorphologiques n'existent que sur une certaine plage restreinte d'étendues. Également, les méthodes reposant sur la simulation de processus physiques précis tombent dans cette catégorie. De manière intéressante, ces simulations intègrent généralement la dimension temporelle dans leur formulation. Il s'agit d'une modélisation dynamique permettant de reproduire le jeu complexe des facteurs géomorphologiques exogènes et endogènes ; c'est-à-dire, comme nous le disions en préambule, une modélisation considérant l'historique tout autant que la forme des terrains. Le réalisme physique impose cependant des limitations, communes à toute méthode travaillant sur des équations aux dérivées partielles par le choix du pas de temps et de la précision spatiale. Notons qu'en sus de l'échelle fixe, la complexité calculatoire contraint également, pour des raisons de performance, à opérer sur des terrains de faible étendue ou de faible précision.

Érosion. La majorité des méthodes physiques se concentrent sur les facteurs géomorphologiques exogènes, c'est-à-dire les diverses formes d'altération destructrice des terrains. Cette altération peut être de deux ordres : météorisation ou érosion. Dans le domaine de la modélisation de terrains, la seconde catégorie de phénomènes a fait l'objet de beaucoup plus d'attention, car ayant, de loin, le plus d'impact visuel. La météorisation regroupe tous les processus physico-chimiques d'altération *in situ* de la roche, tandis que l'érosion implique l'action d'un *agent tiers* (l'eau, le vent, etc.) sur la roche et le *transport* de matériaux, puis leur *déposition*. On se reportera à l'état de l'art suivant [MG08] pour évaluer ce qui a été fait en informatique graphique pour prendre en compte les effets de la météorisation, qui opère sur de petites échelles et modélisée classiquement par texturage ou conception de BRDF particulières pour le rendu. Les deux formes d'érosion qui ont rencontré le plus d'attention de la part des chercheurs en informatique graphique sont certainement l'érosion thermique (section 2.1.2.1) et l'érosion hydraulique (section 2.1.2.2). Bien entendu, d'autres phénomènes géomorphologiques sont d'importance dans le monde réel, mais n'ont pas fait l'objet d'autant d'efforts : c'est le cas de l'érosion/construction éolienne (section 2.1.2.3), de la relation végétation-relief (section 2.1.2.4) ou encore de la tectonique (section 2.1.2.4). Notons enfin le grand absent, qui est l'érosion glaciaire, pour des raisons mal expliquées (peut être un problème de l'ordre de l'échelle du phénomène, justement, temporel et spatial) alors que ces effets sont assez marqués et caractéristiques, comme les vallées en forme de U, les amas de sédiments (moraines), la striation et les vallées suspendues.

2.1.2.1 Érosion thermique

Techniquement, l'action de la température et l'ajustement des roches qui en résulte serait plutôt une forme de météorisation. Cependant la thermoclastie² provoque la fragmentation de la roche et donc le transport de matériaux (par gravité généralement) et est donc généralement vue comme un phénomène d'érosion. En informatique graphique le premier à avoir introduit l'érosion thermique a été Musgrave [MKM89]. Dans ce modèle l'érosion thermique est regroupée avec d'autres formes d'érosion (mécanique notamment) dans une approche générique permettant de rendre compte de la modification des pentes d'un terrain. L'idée est que, par gravité et friction, des talus se forment au pied des collines, falaises, montagnes. Le modèle procède par relaxation, à chaque pas de temps la pente s locale du terrain est calculée, si $s > \tan(\theta)$ pour un certain angle limite θ alors une certaine quantité de matière est enlevée puis distribuée sur le voisinage inférieur immédiat. Dans [RPP93] l'érosion (thermique et hydraulique) est modulée par la résistance de la roche ρ , modélisée par une fonction volumique sur le domaine. Le modèle est simple à implémenter et de plus se parallélise bien. Il est souvent utilisé en complément d'autres approches plus complexes comme l'érosion hydraulique. Cependant le schéma eulérien itératif explicite le limite à des pas de temps faibles ce qui pose un problème pour le passage à des échelles plus étendues. De plus il souffre aussi de sa simplicité, en effet le talus généré est généralement uniforme, et en particulier ne présente pas de pierriers³; pour obtenir des terrains plus réalistes il faut soit accepter des méthodes graphiques d'étendue très limitée comme dans [Pey+09b] ou alors se tourner vers des méthodes issues de la géologie qui dépassent la simple érosion thermique pour inclure aussi bien les glissements de terrain, l'érosion des pentes (*hillslope evolution*) ou encore les laves torrentielles [HSR94].

2.1.2.2 Érosion hydraulique

L'hydrographie détient un caractère déterminant sur les modelés de terrain, l'eau étant un agent d'érosion puissant, que ce soit par l'action à grande échelle des fleuves ou plus localement par le ruissellement de surface des eaux de pluie. Naturellement, beaucoup de ces phénomènes ont fait l'objet d'une attention soutenue de la part des chercheurs en informatique graphique, et notamment le ruissellement de surface. Ce dernier est même devenu, par abus de langage, quasiment synonyme d'*érosion*, dans le domaine de la modélisation de terrain car son effet visuel est très caractéristique (Figure 6) et que les méthodes ont été bien popularisées.

Le ruissellement de surface implique la présence d'eau en surface du terrain laquelle, après détachement mécanique de matériaux (action abrasive sur la roche), transporte ces matériaux jusqu'à leur déposition par action de la gravité (là où le flot est calme) ou suite à son évaporation : le terrain est donc essentiellement modifié par transport de matière. La

2. Action répétée du gel et de la chaleur qui avec le temps fait éclater la roche.

3. Amas de pierres, gravas et blocs de roche.

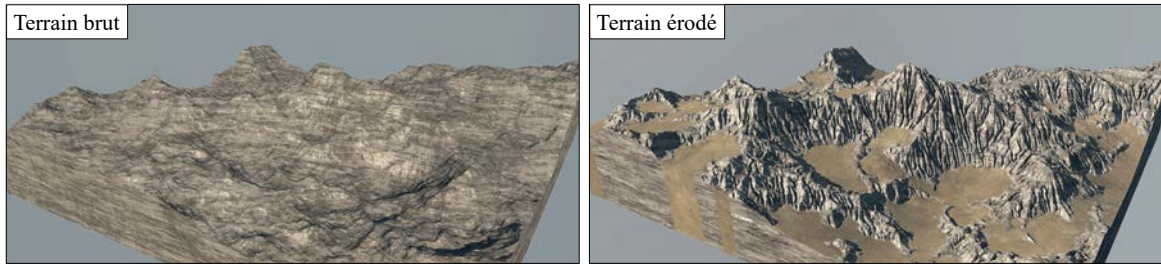


Figure 6 : Effet marqué typique d'érosion hydraulique par ruissellement, appliquée à un terrain brut. (Source : [Gal+19]).

première proposition pour modéliser un tel phénomène est apparue dans [MKM89]. Les auteurs ont proposé une solution simple, un modèle qualifié généralement de *ad hoc* mais efficace de dissociation/déposition de matériaux et de mouvement de l'eau par diffusion à partir du gradient d'élévation. Par la suite et pendant environ quinze ans des raffinements ont été proposés jusqu'à tendre vers des modèles de plus en plus fidèles à la physique et à la géologie : différents matériaux (plus ou moins résistants) ont été ajoutés [RPP93], Chiba *et al.* [CMF98] ont été les premiers à introduire un champ de vitesse de l'eau ainsi qu'un terme d'énergie de collision, les forces étant dépendantes du gradient d'élévation. Benes *et al.* [BF02] ont opté, pour un gain de performance, pour un découplage des étapes d'érosion, de transport, de déposition et d'évaporation de l'eau, introduite pour la première fois (ce qui permet de générer des étendues lisses de sédiments) ; le transport demeurant toutefois simple, s'effectuant par distribution sur le voisinage de Moore de chaque pixel d'élévation. Neidhold *et al.* [NWD05] ont affiné le modèle physique de transport en prenant en compte l'accélération du fluide et proposent un système d'équations différentielles du premier ordre qui se rapproche des standards en simulation numérique de fluide (*computational fluid dynamics*) reposant sur les équations de Navier-Stokes [Bri15]. Ceci permet de dépasser les problèmes inhérents aux méthodes précédentes, plus éloignées de la physique, nécessitant le réglage fin de paramètres *ad hoc* et sujettes à des instabilités. Dans [ASA07] les auteurs conservent globalement ce même modèle mais le parallélisent sur GPU pour de meilleures performances.

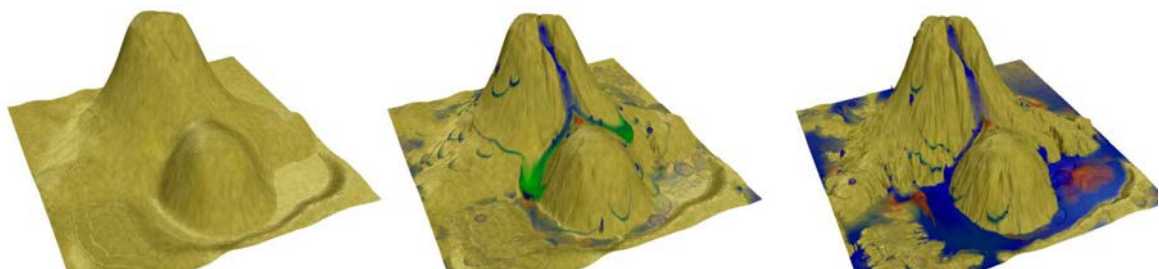


Figure 7 : Érosion hydraulique [MDH07] reproduite par un modèle de *shallow water* issu de la dynamique des fluides adjoint d'un modèle simplifié de détachement/déposition de matériau issu de la géologie. (Source : [MDH07]).

Les équations de Navier-Stokes sont finalement introduites pour la modélisation de l'érosion hydraulique de terrains avec [Ben+06]. Il s'agit d'une approche eulérienne – le fluide est

observé à des points fixes d'une grille, par opposition à une approche lagrangienne où le fluide est modélisé par des particules en mouvement libre – pour un fluide incompressible et incluant les deux équations de préservation de la masse et du moment. Cependant le modèle opère sur une représentation volumique, des voxels d'air, d'eau et de roche, et par conséquent est gourmand en ressources (temps processeur et mémoire), même pour des étendues de terrain très limitées. Plusieurs auteurs ont ensuite [Ben07 ; MDH07] introduit un outil bien adapté aux terrains et issu de la mécanique des fluides, le modèle de *shallow water*. Ce modèle correspond à une pré-intégration selon la direction verticale des équations de Navier-Stokes, sous condition que l'épaisseur verticale du fluide soit négligeable par rapport à son étendue horizontale. Parce que la résolution est essentiellement 2D ces méthodes atteignent des temps de simulation interactifs, et particulièrement [MDH07] (Figure 7) car leur solution est entièrement parallélisable sur GPU. Par la suite, l'érosion sur GPU, grâce au modèle de *shallow water*, a été explorée plus avant : dans [Št'08] des terrains de taille plus conséquente sont érodés grâce à un partitionnement du terrain en tuiles (avec synchronisation aux frontières) tout en couplant deux modèles de sédimentation distincts (un pour l'eau agitée et l'autre pour l'eau calme), la même approche par tuiles sera encore améliorée dans [Van+11] par une approche multirésolution à partir de *mip-mapping* GPU. Pour finir, la grande majorité des méthodes d'érosion hydraulique ont opté pour le paradigme eulérien, probablement car en correspondance avec la représentation des terrains la plus adoptée, les cartes de hauteur (*heightmaps*), qui sont effectivement des grilles d'élévations. On citera le travail de Kristof *et al.* [Kri+09] qui passent à la représentation duale, à savoir la représentation lagrangienne d'un fluide, avec l'introduction pour l'érosion hydraulique de la méthode de *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH), introduite par Gingold et Monaghan pour des problèmes d'astrophysique [GM77 ; Mon05]. Rappelons qu'en représentation lagrangienne le fluide est modélisé par des particules en mouvement ; ceci permet dans la méthode de Kristof *et al.* de concentrer les calculs d'érosion uniquement là où l'eau est présente et de négliger toutes les zones arides du terrain, qui peuvent être potentiellement étendues. Ceci offre un gain de performance intéressant, d'autant plus que l'approche par SPH est essentiellement 3D (et permet donc en théorie d'obtenir des surplombs du terrain, absents des méthodes 2D, par exemple celles de *shallow water*), même si l'article [Kri+09] ne propose de traiter que des cartes de hauteur.

2.1.2.3 Reliefs éoliens

Le terme éolien réfère à l'action du vent sur la roche et/ou les sédiments, par érosion ou construction. En général en géomorphologie l'action de l'eau domine largement celle du vent. Toutefois, la Terre est couverte à 25% de zones arides dans lesquelles la pauvreté de la végétation et l'absence d'eau laissent entièrement la place aux processus éoliens qui dès lors caractérisent le relief : déflation plus ou moins marquée de la roche selon sa résistance, formation de dunes par saltation du sable, abrasion de la roche par le sable. Ces reliefs

désertiques, intéressants et répandus, ont été largement étudiés en géologie alors que très peu de travaux en informatique graphique ont tenté de les reproduire.



Figure 8 : Structures caractéristiques de l'érosion éolienne en cheminées de fée, très localisées. (Source : [Bea+07 ; Jon+09 ; TJ10])

Onoue *et al.* [ON00] ont modélisé des dunes couvertes d'ondelettes de sable en réutilisant, dans un modèle procédural, les équations de saltation et de charriage du sable, issues de la physique. Dans [BR04] la méthode a été étendue pour prendre en compte des obstacles (végétation, roches) au déplacement du sable. Bien que capables de générer des ondelettes à la surface du terrain, ainsi qu'une forme particulière de dune assez générique, ces méthodes échouent à reproduire des formes de dunes importantes car répandues, telles les barkhanes (dunes en demi-lune) ou les ghourds (dunes en étoile) ; de plus elles ne prennent pas en compte l'interaction sable/roche (abrasion du relief). Sur ce dernier point il faut aller vers d'autres travaux pour trouver des propositions spécifiques, ainsi [Bea+07 ; Jon+09 ; TJ10] où une estimation de la courbure du terrain et de son accessibilité permettent de calculer une approximation de l'érosion éolienne sur la roche. En général cette approche est limitée à produire des structures localisées et très particulières, telles les cheminées de fée (anglais *hoodoos* ou *goblins*) de la figure 8.

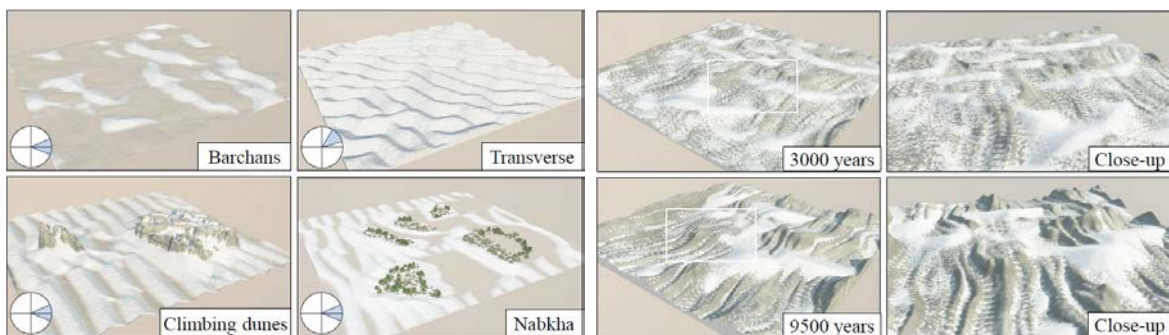


Figure 9 : Résultats obtenus dans [Par+19b] par une simulation éolienne, démontrant la capacité de la méthode à générer divers types réalistes de dunes (gauche) par saltation du sable, ainsi que l'abrasion de la roche (droite). (Source : [Par+19b])

Le seul travail qui tente de prendre en compte et de reproduire fidèlement la multiplicité des effets érosifs et constructifs du vent sur un terrain est récent et a été proposé par Paris *et al.* [Par+19b] (Figure 9). Les auteurs apportent deux contributions : un modèle procédural

d'écoulement du vent autour de la roche à de multiples échelles, qui sert de base à une simulation interactive et contrôlable de transport du sable par le vent (par saltation et charriage), laquelle produit des phénomènes jugés réalistes, tels la formation de dunes ou la sculpture de la roche (yardangs).

2.1.2.4 Autres simulations

Végétation et terrain. Une publication récente de Cordonnier *et al.* [Cor+17a] a proposé la modélisation conjointe d'agents géomorphologiques et écologiques pour la formation de terrains. Leur approche consiste à prendre en compte des boucles de rétroaction entre végétation et terrain, suite à des actions environnementales comme la pluie, la gravité, le vent, le feu et les éclairs. Les rétroactions sont multiples, par exemple l'eau est absorbée par la végétation mais en même temps, lors d'une inondation, peut déraciner des plantes, ou encore un glissement de terrain peut être à la fois modéré par la présence de végétation tout en détruisant par ailleurs celle-ci. La modélisation employée est originale, stochastique, des événements sont déclenchés selon des lois de probabilité données, et le terrain est représenté par couches (de roches diverses, dont l'humus, ainsi que de divers types de végétation). La méthode offre des capacités de contrôle intéressantes pour une simulation, car permettant d'agir sur les événements et/ou leur loi directement. En revanche les terrains sont d'étendue modeste (quelques kilomètres) car un grand nombre d'événements est requis, proportionnel à la surface du terrain, pour obtenir des effets significatifs.

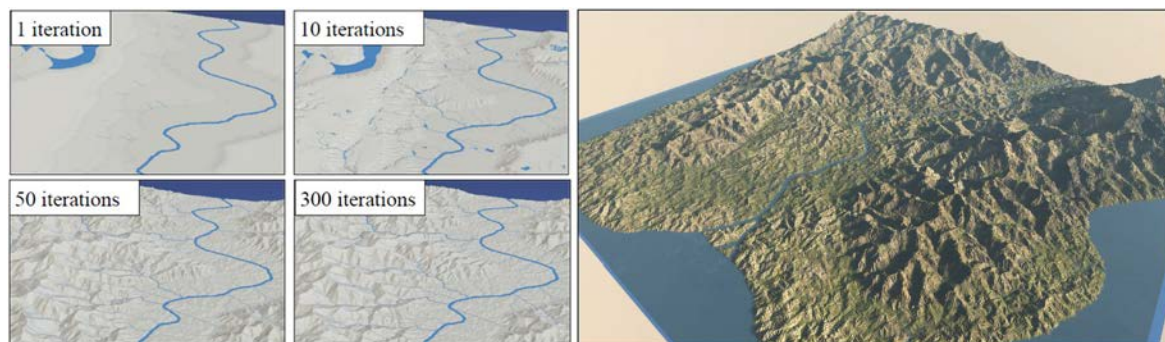


Figure 10 : Terrain étendu généré à partir de soulèvement tectonique combiné à une érosion fluviale. (Source : [Cor+16])

Tectonique. L'érosion hydrique pour la modélisation de terrain opère généralement sur des étendues modestes (quelques kilomètres au mieux). Dans [Cor+16] pour la première fois les auteurs tentent d'aborder des terrains beaucoup plus vastes (de l'ordre de la centaine de kilomètres). À cette échelle l'érosion hydrique est essentiellement fluviale, et entre en jeu un autre facteur géomorphologique essentiel et jusqu'ici négligé en informatique graphique : la tectonique des plaques. Dans ce travail, Cordonnier *et al.* ont combiné l'influence d'une carte de soulèvement tectonique local (en anglais *uplift*) avec une érosion fluviale modélisée par

l'équation de *stream power* [Lag14] ; cette dernière étant une formulation heuristique issue de la géologie exprimant le taux d'érosion en fonction de lois de puissance de la pente et de l'aire de drainage du terrain. La méthode travaille sur une représentation vectorielle sous la forme d'un graphe hydrologique et permet de générer des chaînes de montagnes avec une précision suffisante pour déterminer les vallées et ravines principales (Figure 10).

La méthode a été significativement étendue par les mêmes auteurs dans [Cor+18]. Elle a été décomposée en deux étapes, une simulation tectonique qui s'exécute en temps interactif et un post-traitement érosif. L'aspect tectonique est modélisé finement et avec plus de contrôle. L'utilisateur, par interface tactile, pousse avec les mains les plaques qui se rencontrent, et l'algorithme évalue le transport et la contrainte exercée sur la croûte, modélisée comme un fluide visqueux incompressible. La croûte est par ailleurs stratifiée procéduralement en couches de roches de résistances et d'épaisseurs variables et une heuristique de plissements multi-échelle est appliquée. Le post-traitement érosif est le même que dans [Cor+16], à savoir une érosion fluviale, cependant augmentée de glissements de terrain. Les deux méthodes ont le même objet, la génération de chaînes de montagnes réalistes sur plusieurs centaines de kilomètres (Figure 11).

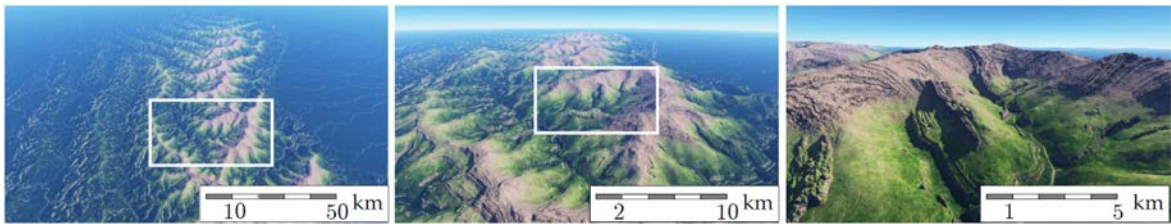


Figure 11 : Terrain étendu généré à partir de soulèvement tectonique, méthode étendue de [Cor+18]. (Source : [Cor+18])

2.1.3 Méthodes multi-échelles

Cette section est dédiée aux méthodes multi-échelles, que nous pourrions qualifier d'agnostiques vis-à-vis de l'échelle. Cela signifie qu'elles sont indépendantes de la notion d'étendue et de précision du domaine sur lesquelles elles travaillent. Cela ne signifie aucunement que ces méthodes seraient affranchies de l'échelle, qu'elles seraient capable d'étendue ou de précision infinie ; c'est un point important à soulever car on a eu l'habitude par le passé de présenter certaines de ces méthodes comme tel, et notamment les méthodes fractales. En fait, il s'agit d'indépendance théorique. La mise en œuvre pratique de ces méthodes les contraignent à une résolution bien définie : que ce soit par le spectre limité de la synthèse par bruit, ou la résolution limitée des exemples dans les méthodes à base d'exemples.

2.1.3.1 Modélisation fractale

Les méthodes fractales reposent sur les observations initiales du mathématicien Benoît Mandelbrot, sur une catégorie de modèles stochastiques susceptibles d'imiter ou reproduire des phénomènes naturels d'apparence chaotique. En 1968 Mandelbrot et Van Ness [MVN68] introduisirent le terme de mouvement fractionnaire Brownien (*fractional Brownian motion*, abrégé *fBm*) pour décrire une famille de processus stochastiques Gaussiens unidimensionnels, qui plus tard furent étudiés en dimensions supérieures, notamment 2D et dans le but de générer des terrains virtuels. Un fBm appartient à la classe des bruits dite $1 : f$, c'est-à-dire aux signaux dont la contribution de chaque fréquence au spectre de puissance est quasiment inversement proportionnelle à la fréquence. Un fBm est de plus statistiquement auto-similaire : les échantillons du signal préservent leurs caractéristiques statistiques indépendamment de l'échelle d'observation, d'où le terme *fractal*⁴.

Coupures aléatoires. Mandelbrot a proposé trois approches pour réaliser numériquement le calcul d'un fBm, celle qui a perduré jusqu'à nous est une méthode prenant le fBm comme limite d'un champ de Poisson fractionnaire [Man75 ; Man82]. Cette méthode, remise au goût du jour par Voss puis Ebert [Vos85 ; Ebe+98], est celle de l'algorithme dit de *faulting*, c'est-à-dire qu'il procède par coupes aléatoires dans le domaine : un n -champ fractionnaire de Poisson est un champ où $F(\mathbf{p})$ est en tout point \mathbf{p} la somme d'une infinité de fonctions *step* dont la direction, la localisation et l'amplitude sont trois séquences de variables aléatoires mutuellement indépendantes (Figure 12).

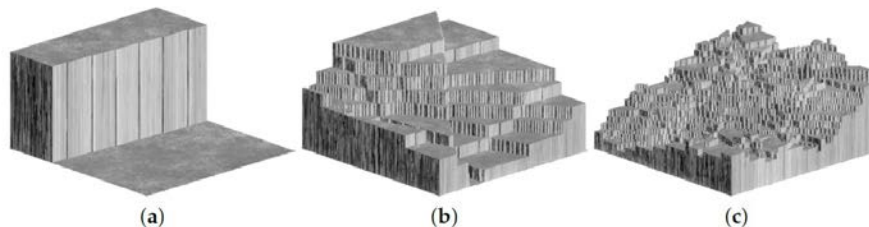


Figure 12 : Illustration de l'algorithme de *faulting* : (a) 1 itération, (b) 10 itérations, (c) 50 itérations. (Source : [WNM19])

La méthode repose sur une fondation théorique solide mais souffre malheureusement d'une très mauvaise complexité ($O(N^3)$). Elle a été toutefois remise en oeuvre récemment et adaptée pour la génération de modèles spécifiques tels les *mesas* [WNM19].

Subdivision stochastique. Fournier *et al.* ont proposé également une façon de produire l'approximation d'un fBm numériquement [FFC82], et ce en temps linéaire, par subdivisions itératives et stochastiques d'une n -grille de départ. Chaque itération consiste à introduire de

4. Le terme *fractal* est également à attribuer à Mandelbrot.

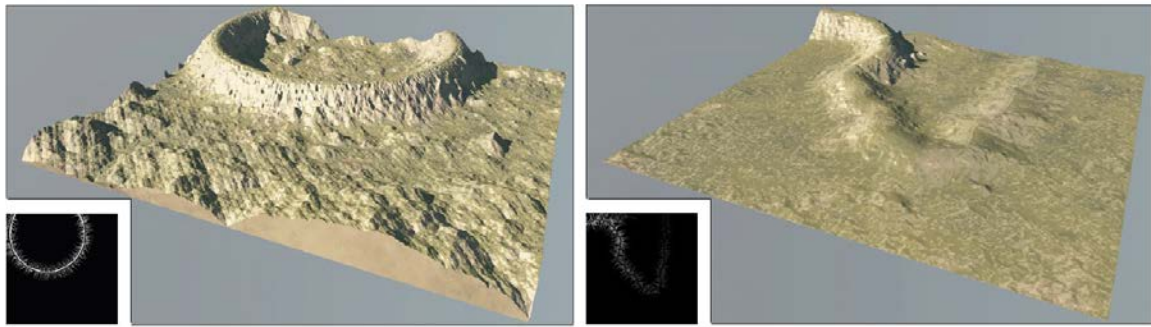


Figure 13 : Terrains produits par subdivision stochastique contrainte : méthode de Belhadj *et al.*, [BA05a] à gauche, et [Bel07] à droite. (Source : [Gal+19])

nouveaux sommets par interpolation du voisinage local et ajout d'une perturbation aléatoire dont l'amplitude est dépendante du niveau de détail (de manière à garantir la dimension fractale souhaitée pour le modèle). D'autres auteurs ont par la suite proposé soit des améliorations soit des adaptations de la méthode initiale de l'algorithme *diamond-square* [Mil86 ; Lew87 ; DKW94]. En particulier, il a été montré que la subdivision pouvait être contrôlée dans le but de respecter des contraintes spécifiques. Dans [PH93] les auteurs proposent la modélisation d'un terrain avec une rivière entièrement par subdivision ; cependant la rivière n'a pas de tributaire et son altitude est zéro, c'est donc un modèle très sommaire (mais le premier à montrer l'extensibilité de la méthode). Par la suite, cette approche gagna en maturité avec [BA05a ; BA05b ; Bel07] où la subdivision suit des contraintes entrées par l'utilisateur telles des lignes de crêtes ou des rivières (Figure 13). Enfin, Derzaf *et al.* [Der+11] montre que l'approche par subdivision stochastique possède un réel potentiel pour traiter de grandes échelles efficacement puisqu'ils proposent la génération de réseaux hydrographiques en temps réel sur toute une planète ; nous exposerons dans le Chapitre 4 une méthode d'hyper-amplification qui s'en inspire mais qui permet en plus de générer différents modelés géomorphologiques en sus des rivières.

Fonctions de bruit. Le mouvement fractionnaire Brownien peut aussi être approximé par une somme à bande limitée de fonctions de bruit, dits bruits cohérents. De tels bruits ont été proposés en 1985 par Ken Perlin [Per85], travail séminal qui a introduit un des outils de modélisation procédurale les plus utilisés. La version initiale du Bruit de Perlin est un bruit de gradient (Figure 14), *i.e.* une fonction calculée en tout point d'un domaine n -dimensionnel par l'interpolation *spline* de gradients pseudo-aléatoires assignés aux sommets de la grille discrète entière couvrant l'espace. La formulation initiale de Perlin a été par la suite étendue [PH89] ou améliorée [Per02 ; Ken+08], notamment par adaptation à la grille simplicielle pour une meilleure performance en haute dimension [Ola+02]. D'autres types de bruit ont été également proposés : Bridson propose le *curl-noise* pour la simulation de fluide, basé sur le calcul du rotationnel d'un bruit de gradient [BHN07], Worley introduit le bruit cellulaire inspiré des diagrammes de Voronoï [Wor96]. Des bruits basés sur la convolution discrète

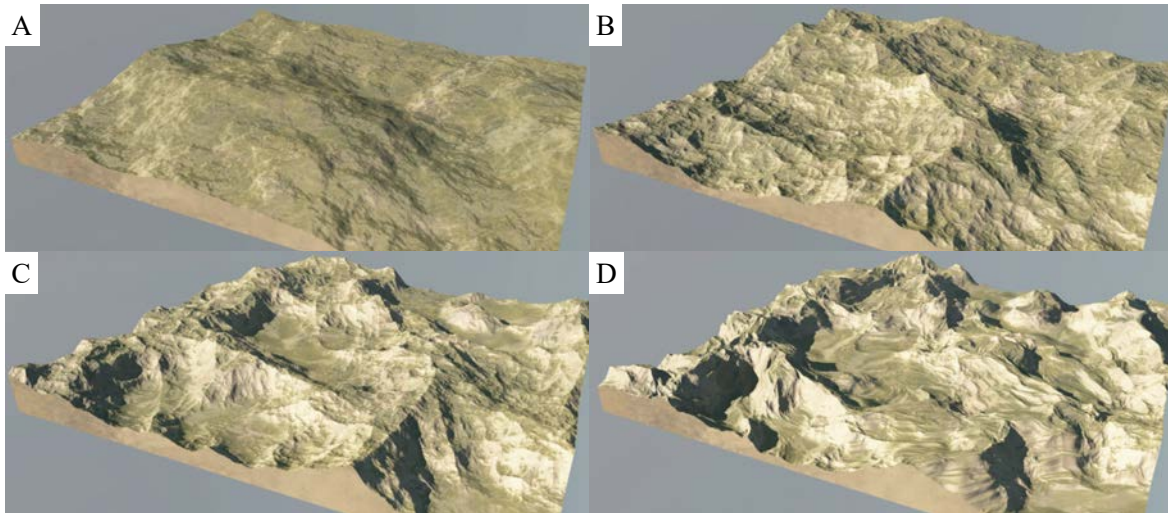


Figure 14 : Synthèse à partir de somme de bruits cohérents : (A) bruit de gradient, (B) *ridge noise* calculé comme complément de la valeur absolue sur chaque octave d'un bruit de gradient, (C) *multifractal*, chaque octave est modulée en amplitude d'après la somme des octaves précédentes, (D) *multifractal* augmenté d'une déformation, calculée par un bruit auxiliaire appliquée aux positions avant évaluation de la fonction. (Source : [Gal+19])

parcimonieuse (une somme pondérée finie de noyaux aléatoirement positionnés autour du point d'évaluation) ont été conçus [Lew89 ; Lag+09]. Il existe enfin d'autres types de bruits non-procéduraux⁵, précalculés et stockés, comme le bruit d'ondelettes [CD05], ou le bruit anisotrope [GZD08].

2.1.3.2 Méthodes procédurales avec pré-structuration

Les méthodes procédurales, si on entend généralement par là les diverses formes de synthèse fractale classique, n'offrent que peu de contrôle à l'utilisateur ou alors sous la forme rudimentaire de paramétrage des algorithmes et ne produisent souvent que des formes de terrain très auto-similaires, homogènes. Naturellement, des auteurs ont tenté de circonvenir ces limitations. Les deux méthodes présentées dans cette section proposent d'augmenter le modèle par de la sémantique, c'est-à-dire, pour un terrain, d'informations structurelles supplémentaires.

Arbres de construction et hydrographie. Génevaux *et al.* [Gén+15] ont proposé une approche procédurale à même de prendre en compte l'hétérogénéité des terrains. Un terrain réel est souvent une composition complexe de diverses caractéristiques, distribuées à diverses échelles, pics, lacs, falaises, collines, *etc.*. Leur méthode prend en compte ces éléments, en les modélisant individuellement par des primitives de construction définies sur un support compact, lesquelles sont combinées dans un arbre dont les noeuds intermédiaires sont des opérateurs, pour former

5. Qu'on ne peut pas évaluer à la volée par un algorithme direct en tout point de l'espace

un terrain continu. Les feuilles de l'arbre sont des éléments implicites (squelettes ponctuels ou courbes) référençant soit des fonctions de bruit soit des portions de cartes de hauteur réelles, possiblement déformées horizontalement. Les opérateurs sont ceux classiques des arbres de construction de formes implicites (*Blob-Tree*, [WGG99]). La représentation est relativement compacte et rapidement évaluable, y compris sur GPU. Cette méthode généralise une méthode précédente des mêmes auteurs, introduite pour la synthèse de terrains comportant un réseau de cours d'eau [Gén+13]. Dans ce précédent travail le focus porte sur l'hydrographie du terrain : celle-ci est d'abord représentée par un graphe de drainage portant des informations de flot hiérarchique, notamment le nombre d'Horton-Strahler [Hor45] qui caractérise les jonctions symétriques et asymétriques. Le graphe est construit par conquête sous contraintes du terrain depuis les embouchures des rivières, jusqu'aux sources. Le domaine est ensuite décomposé en cellules de Voronoï associées aux noeuds du graphe, ce qui permet d'évaluer l'aire de drainage en chaque noeud ainsi que de positionner les crêtes environnantes. De ces données, et notamment la pente, la méthode extrait les types de Rosgen [Ros94] qui caractérisent les lits des rivières (méandres, divisions, etc.). Enfin, le terrain final est généré en distribuant des primitives de bruit autour des rivières en fonction des données précédentes, combinées en arbre selon la méthode présentée plus haut.

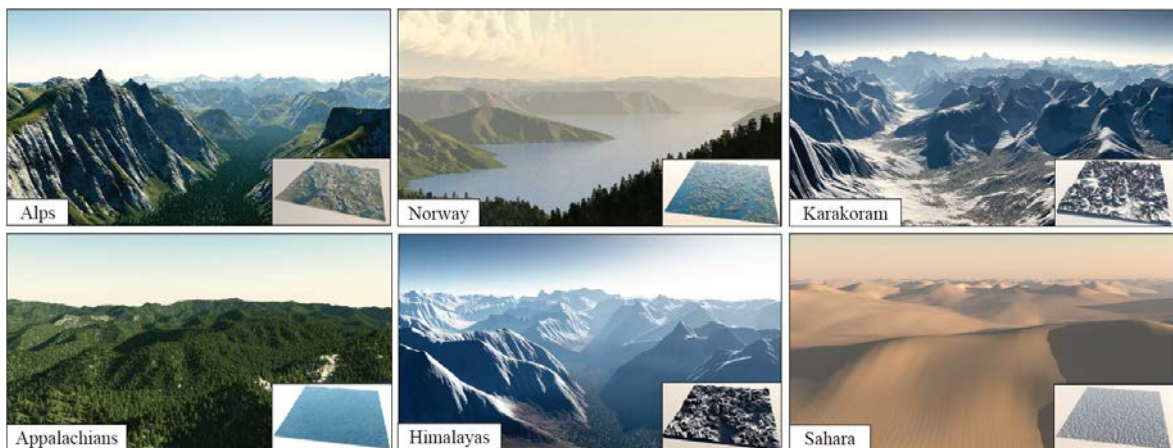


Figure 15 : Divers paysages synthétisés par la méthode présentée dans [Arg+19] reposant sur la métrique géomorphologique d'orométrie. La méthode est capable d'opérer à diverses échelles, de petites étendues de dunes ou collines, aux grands ensembles montagneux. (Source : [Arg+19])

Orométrie. Un autre travail atypique, novateur et récent est celui d'Argudo *et al.* [Arg+19] reposant sur les métriques géomorphologiques d'orométrie caractérisant les reliefs et notamment montagneux. Ce travail est partiellement relié à la thématique de l'évaluation quantifiée du réalisme des terrains évoquée en section 2.1.1. En effet les auteurs montrent qu'avec une métrique simplifiée basée sur l'orométrie il est possible de classer automatiquement les zones montagneuses de la Terre et de distinguer les chaînes de montagnes selon leurs zones d'appartenance. Ils proposent également une méthode de synthèse de terrain travaillant à partir d'un *sketch* utilisateur et qui place des points pics, des points selles (*saddles points*) et

des lignes de crête selon une distribution orométrique cohérente. Les points saillants du relief sont connectés en graphe, puis un graphe hydrographique dual de rivières est construit. La résolution (quelques kilomètres) est ensuite augmentée drastiquement en introduisant de nombreux points, en subdivisant les arêtes des graphes et par échantillonnage de disques de Poisson dans le reste du domaine. Les élévations des nouveaux points sont déterminées en accord avec une loi géomorphologique prenant en compte l'aire de drainage de chaque point. Tous les échantillons sont connectés en une triangulation irrégulière (*triangular irregular network*, TIN) en utilisant un schéma de Delaunay contraint (qui préserve les arêtes crêtes et rivières). Le terrain final (figure 15) est enfin obtenu en comblant les zones sans information par du bruit, suivi d'un calcul d'érosion hydraulique. Ce dernier se doit de préserver les informations orométriques, aussi une version adaptée de la méthode de Cordonnier *et al.* [Cor+16] (section 2.1.2.4) est utilisée, le soulèvement tectonique agissant spécifiquement pour contrer les modifications orométriques non-désirées.

2.1.3.3 Méthodes procédurales volumiques

Les modèles générateurs de terrains s'appuient le plus souvent sur une représentation par champ de hauteur en $2.5D$ du terrain. Cette approche est en effet très efficace, dans le cas des cartes de hauteur (*heightmaps*) l'accès se faisant en temps constant. *A contrario* les représentations $3D$, volumiques, sont en général coûteuses en temps de calcul et en capacité de stockage, si l'on se réfère au pendant des grilles de hauteur, les grilles de voxels. Toutefois, une représentation pleinement $3D$ offre des avantages qu'on ne peut entièrement négliger : notamment la possibilité de modéliser des aspects de terrains réels impossible à transcrire sous forme $2.5D$, comme les arches de pierre, les surplombs de falaises et les systèmes de grottes. De ce fait, certains auteurs ont proposé des approches volumiques de synthèse permettant de reproduire ces phénomènes précis.

Dans [Pey+09a] une méthode efficace est proposée pour représenter des terrains volumiques. Elle prend en compte différents types de matériaux organisés en couches, l'encodage ne se faisant pas en terme de voxels mais plutôt d'empilement des couches en colonnes ; l'aspect volumique est rendu possible par l'ajout du matériau « air » permettant de créer des cavités entre couches. Ce modèle stratifié est converti en représentation fonctionnelle implicite : la surface du terrain est vue comme une surface de convolution, définie par l'intégration d'un noyau convolutif à support compact cubique, appliqué au volume local de matière. Cette représentation implicite permet de proposer divers opérateurs d'édition du terrain, en temps interactif, permettant de sculpter le terrain en volume. Un va-et-vient est fait entre la représentation implicite fonctionnelle et la représentation des matériaux stratifiés afin de stabiliser ces derniers, de manière similaire aux méthodes d'érosion thermique (section 2.1.2.1).

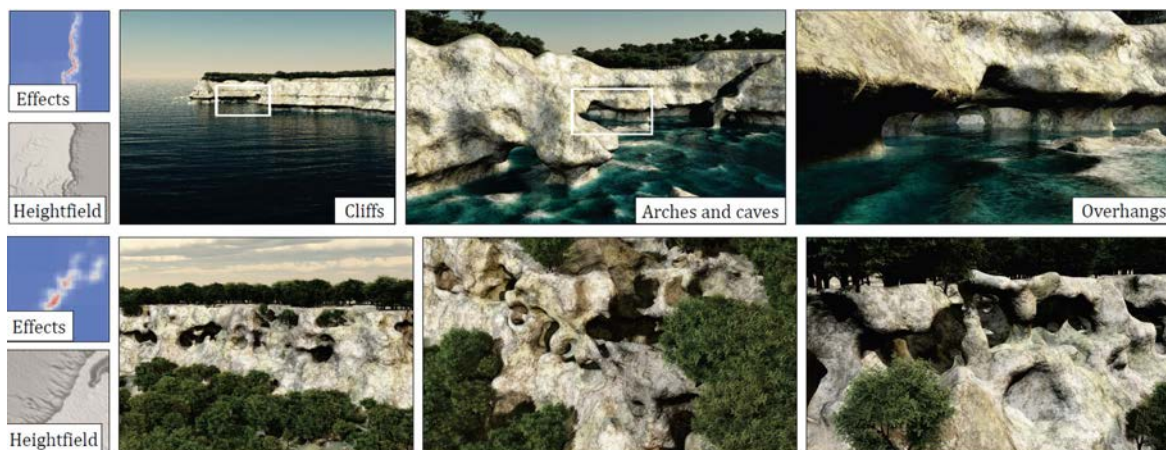


Figure 16 : Paysages complexes produits par la méthode de [Par+19a] reposant sur la combinaison de primitives implicites volumiques. La méthode permet de reproduire de manière efficace et phénoménologique notamment l'érosion côtière (haut), ou karstique (bas). (Source : [Par+19a])

Dans [Par+19a] les auteurs ré-utilisent les arbres de formes implicites pour modéliser des caractéristiques pleinement 3D des terrains. Il s'agit d'une méthode essentiellement d'embellissement qui accepte en entrée un terrain spécifié sous forme de fonction ou de carte de hauteur. Le terrain est d'abord converti entièrement en représentation implicite, laquelle est adjointe d'un second arbre implicite encodant la résistance de la roche. La représentation est volumique et permet, par le jeu d'opérateurs de combinaison, dont des opérateurs spécifiques permettant de reproduire des failles et des plissements dans les couches de résistances diverses de la roche, de reproduire certains effets d'érosion (figure 16) : notamment l'érosion côtière des falaises ou l'érosion karstique qui produit des systèmes de grottes. Le jeu des opérateurs permet aussi la synthèse d'éléments localisés comme des *hoodoos* (cheminées de fée, figure 8) ou des surplombs, toutes sortes de caractéristiques volumiques par ailleurs impossible à reproduire par la grande majorité des méthodes travaillant uniquement sur champs de hauteur. L'approche est complètement procédurale, donc phénoménologique, mais permet de s'attaquer à des phénomènes jusqu'ici largement ignorés comme par exemple l'érosion côtière. De plus, la représentation en arbre de formes implicites se prête bien au contrôle utilisateur, comme démontré dans des précédentes méthodes. Enfin cette représentation est multi-échelle, l'inclusion de *hoodoos* (quelques dizaines de mètres) combinée à des systèmes de falaises (quelques dizaines de kilomètres) le démontre également.

2.1.3.4 Synthèse à partir d'exemples

À mi-chemin entre la génération procédurale qui tente d'imiter la nature et la simulation physique qui tente de la reproduire, on trouve une famille d'approches intermédiaires, la synthèse à partir d'exemples. Comme la génération fractale elle est, en théorie, capable de s'appliquer à de multiples échelles et ne s'occupe pas des processus physiques. Pourtant, l'idée

et la force essentielle de ces méthodes est de justement tirer partie de la richesse géologique encodée dans les exemples, qui servent de point de départ à la synthèse. Plus les exemples utilisés sont riches et expressifs plus la synthèse sera réussie ; logiquement, les exemples choisis sont le plus souvent des cartes de hauteur réelles de régions de la Terre. De nombreuses bases de données en libre accès sont disponibles, on citera USGS (*U.S Geological Survey*, [Ges+02]) à une résolution de 10 m couvrant le territoire américain, ou encore le programme SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) soit à une résolution d'une seconde d'arc (environ 30 m), soit à trois secondes d'arc (environ 90 m) mais couvrant la majorité des terres émergées du globe.



Figure 17 : Synthèse à partir d'un terrain exemple et d'un *sketch* utilisateur : à gauche une formation montagneuse synthétisée à partir de l'exemple du Mont Jackson (USA), à droite une formation encaissée synthétisée à partir de l'exemple du Grand Canyon (USA). (Source : [Zho+07])

Synthèse de texture. Les premières approches proposées de synthèse de terrains à partir d'exemples sont à l'origine issue de travaux précédents et voisins en synthèse de texture classique. La synthèse de texture couleur a fait l'objet de nombreuses propositions, on se référera à l'état de l'art suivant pour plus d'informations [Wei+09]. La transposition de ces techniques aux cartes de hauteur (qui peuvent être vues comme des images encodant la hauteur du relief) n'est toutefois pas immédiate. Par nature les terrains opposent certaines contraintes qui empêchent l'application directe de ces techniques : (1) les terrains sont caractérisés par de grandes structures (montagnes, vallées) qui échappent aux méthodes génériques de synthèse de textures gaussiennes, (2) la plupart des méthodes se concentrent sur la synthèse de grandes images couleur à partir d'une petite zone exemple, ceci en contraste avec les terrains étendus où le contrôle utilisateur est demandé pour spécifier l'hétérogénéité et les grandes structures sur toute l'étendue, (3) les données couleur peuvent être plus facilement raccordées et mélangées que les données hauteur, la moindre discontinuité étant immédiatement visible dans le terrain.

La méthode spécifiquement dédiée aux terrains de Zhou *et al.* [Zho+07] est la plus connue, elle a ouvert la voie aux méthodes de synthèse à partir de cartes de hauteur (Figure 17). Elle fonctionne par sélection de *patches* dans un terrain exemple et leur ré-ordonnancement dans le terrain cible. Les *patches* sont d'abord placés autour de caractéristiques vectorielles

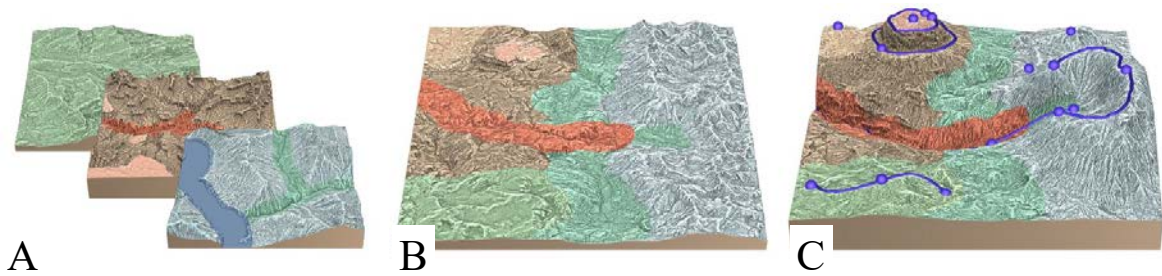


Figure 18 : Méthode de synthèse de Gain *et al.* [GMM15] : dictionnaire d'exemples (A), terrain synthétisé à partir des exemples et de spécification utilisateur par des *brushes* (B) et/ou par des contraintes vectorielles (C). (Source : [GMM15])

spécifiées par l'utilisateur qui figurent vallées et crêtes, la méthode offre donc une forme de contrôle sur les grandes distributions du terrain. Un algorithme de coupure de graphe délimite les coutures entre *patches* (lesquels sont possiblement déformés pour un meilleur *fit*), suivi de la résolution d'une équation de Poisson pour ajuster les élévations de part et d'autre des coutures. Cette méthode propose la synthèse globale de terrain, d'autres existent pour des modes de synthèse plus particuliers, comme l'amplification par ajout de détails [BSS07], ou la reconstruction de zones manquantes dans une carte de hauteur [WSG07]. Tasse *et al.* [TGM12] ont amélioré la méthode de Zhou, en proposant une parallélisation au niveau des *patches* ainsi que l'emploi d'une interpolation de gradients de Shepard au lieu du lissage de Poisson, qui prend en compte non seulement les hauteurs mais leur gradient (*i.e.* la pente du terrain). Gain *et al.* [GMM15] améliorent encore les performances en utilisant une approche parallélisée dérivée de la synthèse de texture couleur où les extractions depuis les exemples se font par pixel et non par *patch* ; la méthode est capable de temps interactifs grâce à une implémentation GPU multi-exemple et travaillant sur des hiérarchies d'images, tout en offrant de bonnes capacités d'édition à l'utilisateur (Figure 18).

Modélisation parcimonieuse. Des avancées en traitement du signal comme l'*acquisition comprimée* ont été utilisées pour la modélisation de terrains. L'*acquisition comprimée* (en anglais *compressed sensing*) vise, dans des conditions adéquates, à reconstruire un signal à partir de peu d'échantillons, lorsque ceux-ci comptent moins que le nombre d'échantillons minimal donné par le théorème de Nyquist-Shannon⁶. Une telle reconstruction en général opère par la résolution de systèmes linéaires sous-déterminés. En traitement du signal, l'*acquisition comprimée* est possible sur une certaine catégorie de signaux comme les signaux parcimonieux, ce qui rend possible l'encodage parcimonieux (*sparse coding*). Un tel encodage consiste à apprendre d'abord un dictionnaire d'*atomes* sur lequel opérer la reconstruction – les atomes jouant le rôle de base (par analogie avec la base de Fourier par exemple) mais ne sont pas nécessairement orthogonaux – l'encodage est parcimonieux dans le sens où une combinaison linéaire d'un nombre restreint d'atomes est suffisante pour reconstruire de manière satisfaisante le signal

6. Auquel cas la reconstruction reste possible car le théorème d'échantillonnage de Nyquist-Shannon donne des conditions suffisantes, mais non nécessaires, pour une reconstruction parfaite d'un signal.

localement. Les applications sont nombreuses et démontrées efficaces en traitement d'image, de vidéo, de sons, en synthèse de texture et en apprentissage non-supervisé. Guérin *et al.*

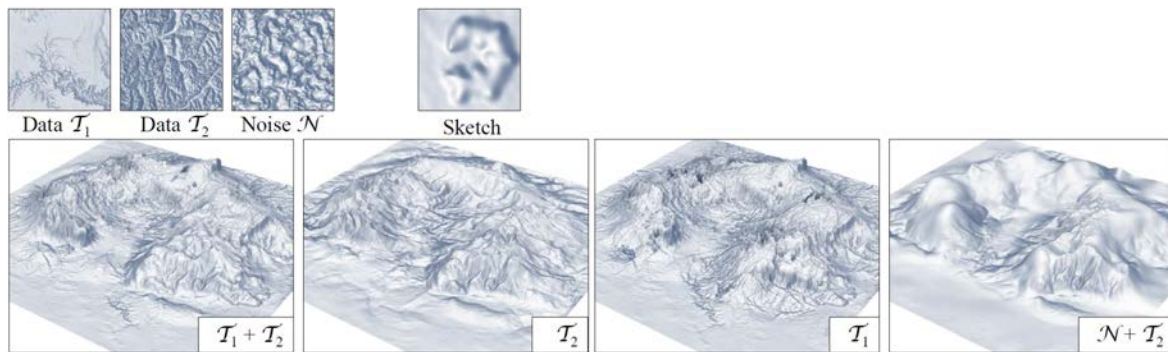


Figure 19 : Diverses amplifications d'un même *sketch* utilisateur à partir de multiples exemples, d'après la méthode de modélisation parcimonieuse de Guérin *et al.* [Gu16]. (Source : [Gu16])

[Gu16] ont été les premiers à appliquer ce bagage théorique à la modélisation de terrain. Ils démontrent des possibilités pour la synthèse, l'amplification, la modélisation procédurale inverse et la représentation compacte de terrains (Figure 19). Dans [Arg+17] l'approche a été étendue pour prendre en compte, toujours dans le contexte d'encodage parcimonieux, de multiples couches d'information comme l'humidité, la pente, l'orientation, l'aire de drainage, ou encore des statistiques de distribution de végétation.

Apprentissage automatique. Les réseaux adverses génératifs (*generative adversarial networks*, abrégé *GAN* [Goo+14]) récemment introduits par Goodfellow sont des outils puissants appartenant à la classe générale des modèles génératifs et pervasivement utilisés en apprentissage non-supervisé, mais aussi en apprentissage semi-supervisé, supervisé et par renforcement. Les GANs reposent sur le jeu en opposition d'un réseau neuronal générateur et d'un réseau neuronal discriminateur : le premier, généralement déconvolutif, est entraîné à produire des données depuis un espace latent, lesquelles données sont ensuite discriminées par le second, généralement convolutif, qui apprend à les distinguer de la vraie distribution. L'idée est que, à travers la *backpropagation* durant l'entraînement, les deux réseaux deviennent de plus en plus performants dans leurs tâches respectives, jusqu'à ce que le réseau générateur puisse délivrer des données de qualité.

Dans [Gué+17] les auteurs démontrent le potentiel des GANs appliqués à la modélisation de terrain. L'utilisation d'un cGAN (*conditional GAN*, [Iso+17]) permet de faire apprendre la relation entre des cartes de hauteur réelles et leurs annotations (par exemple des lignes de crête ou des pics) de sorte que le réseau générateur puisse produire des cartes de hauteur de synthèse à partir de nouvelles annotations entrées par l'utilisateur (Figure 20). Ils démontrent aussi la possibilité d'amplification de terrains, en créant, toujours avec des GANs, une sorte de filtre d'érosion artificiel capable de haute fidélité tout en étant plus rapide de 3 ordres de

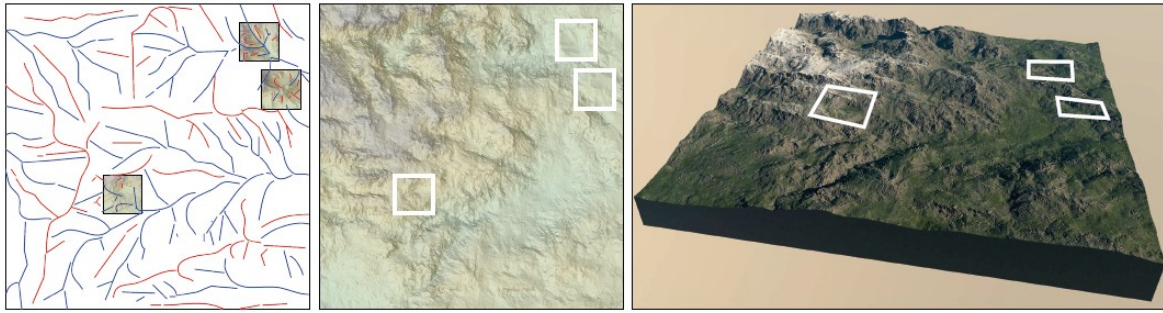


Figure 20 : Synthèse par cGAN [Gué+17] : inférence automatique d'un terrain à partir d'annotations utilisateur. Le modèle final détaillé (droite) est produit par amplification d'après la méthode d'encodage parcimonieux [Gu16], les GAN ne travaillant que sur des tailles de terrain modestes (256x256). (Source : [Gué+17])

grandeur que les méthodes de simulation. D'autres auteurs ont exploré les outils d'apprentissage profond dans le contexte des terrains : dans [Zha+19] des GANs sont utilisés pour réaliser l'amplification de terrains selon potentiellement plusieurs thèmes exemples, et dans [ACA18] des réseaux neuronaux convolutifs plus classiques sont dédiés également à l'amplification, par un système de super-résolution travaillant sur des cartes de hauteur grossières adjointes d'ortho-photographies aériennes couleurs en haute résolution, la correspondance entre données couleur et données d'élévation étant apprise par le réseau neuronal.

2.1.4 Conclusion

La table 2.1 rassemble les méthodes importantes de l'état de l'art que nous venons de présenter sur la synthèse de terrain classique, et restreint à l'informatique graphique. Nous les présentons d'abord sous l'angle de l'échelle, c'est-à-dire à la fois de l'étendue (taille) et de la précision (niveau de détail) du domaine de synthèse. Cette table permet de rassembler les informations essentielles relatives aux résultats atteignables par ces méthodes : échelle donc, mais aussi performance et expressivité. Toutes les méthodes physiques (simulations), à l'exception de [Cor+16 ; Cor+18], sont limitées en terme spatial à des étendues faibles (au mieux 10 km) et une précision limitée (le plus souvent discrète avec une résolution de 1000 échantillons dans une dimension donnée). Pour le reste, *i.e.* les méthodes multi-échelles, les résultats de la synthèse sont assez variables. Les méthodes de synthèse à partir d'exemples sont capables globalement de traiter de grandes étendues (> 1000 km), mais ne proposent pas une bonne précision (le niveau de détail reste faible). Certaines méthodes procédurales sont capables d'atteindre des étendues arbitraires (donc en particulier l'échelle maximale, *i.e.* planétaire) tout en conservant une bonne précision, avec une bonne performance, mais cependant ne présentent qu'une expressivité limitée. Comme on peut s'y attendre, chaque méthode a ses spécificités et aucune n'est idéale pour traiter tout problème. Il s'agira, au regard de la question de cette thèse, la synthèse de planètes détaillées, de retenir les bonnes approches parmi ces méthodes classiques qui soient transposables à notre problème.

Publication	Étendue	Précision	Perf.	Expressivité	Modèle
[FFC82 ; Mil86 ; Lew87]	max.	< 1 m	r	M	<i>subdivision</i>
[Vos85]	max	< 1 m	s	M	<i>faulting</i>
[MKM89 ; Ebe+98]	max.	< 1 m	r	M	<i>noise</i>
[Der+11]	max.	< 1 m	r	R	<i>subdivision</i>
[PH93]	10 – 100 km	10 – 100 m	s	M, R	<i>subdivision</i>
[BA05a ; Bel07]	10 – 100 km	10 – 100 m	r	M, R	<i>subdivision</i>
[KU07]	1 – 100 km	< 1 m	i	M	<i>faulting</i>
[WNM19]	4 – 400 km	1 – 100 m	i	T	<i>faulting</i>
[DMS05]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	m	M	<i>texture</i>
[Zho+07]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	m	M	<i>texture</i>
[TGM12]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	m	M	<i>texture</i>
[GMM15]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	m	M	<i>texture</i>
[Gu16]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	s	M	<i>sparse</i>
[Arg+17]	4 – 4000 km	1 – 1000 m	s	M	<i>sparse</i>
[Gué+17]	1 – 1000 km	1 – 1000 m	i	M	<i>deep</i>
[ACA18]	1 – 10 km	1 – 10 m	s	M	<i>deep</i>
[Zha+19]	1 – 10 km	1 – 10 m	s	M	<i>deep</i>
[Cor+16]	10 – 100 km	10 – 100 m	s	M, R	<i>simulation</i>
[Cor+18]	10 – 100 km	10 – 100 m	i	M, R	<i>simulation</i>
[Cor+17a]	1 – 10 km	1 – 10 m	m	M, R	<i>simulation</i>
[NWD05 ; MDH07]	1 – 10 km	1 – 10 m	i	M, R	<i>simulation</i>
[Van+11]	1 – 10 km	1 – 10 m	i	M, R	<i>simulation</i>
[Št'+08 ; Kri+09]	1 – 10 km	1 – 10 m	i	M, R	<i>simulation</i>
[MKM89 ; RPP93 ; BF02]	1 – 10 km	1 – 10 m	i	M, R	<i>simulation</i>
[CMF98]	1 – 10 km	1 – 10 m	s	M	<i>simulation</i>
[Kur12]	1 – 10 km	1 – 10 m	s	R	<i>simulation</i>
[Ben+06]	1 – 10 km	1 – 10 m	h	M, R	<i>simulation</i>
[Par+19b]	1 – 10 km	1 – 10 m	m	D	<i>simulation</i>
[KMN88]	10 – 100 km	10 – 100 m	m	M, R	<i>special</i> ¹
[RME09]	10 – 100 km	10 – 100 m	s	M	<i>short-path</i>
[Hna+10]	1 – 10 km	1 – 10 m	i	M, R	<i>diffusion</i>
[Gén+13 ; Gén+15]	10 – 1000 km	1 – 10 m	s	M, R	<i>primitives</i>
[DC+14]	1 – 10 km	< 1 m	m	R, C	<i>special</i> ²
[Bec+17]	100 m	1 m	i	V	<i>diffusion</i>
[Par+19a]	0.1 – 10 km	0.1 – 10 m	s	V	<i>special</i> ³
[Arg+19]	40 – 400 km	10 – 100 m	m	M, R	<i>special</i> ⁴

Table 2.1 : Table des méthodes de l'état de l'art. Performance (r : temps-réel < 50 ms, i : interactif < 500 ms, s : secondes, m : minutes, h : heures), Expressivité (M : relief montagneux, R : rivières, C : canyons, D : dunes et zones arides, T : mesas, V : effets volumétriques (arches, etc.)).

¹ : génération d'un réseau hydrographique cohérent puis calcul par minimisation du terrain vu comme une surface en tension. ² : diverses méthodes de *clustering* et d'*image processing* appliquées sur une base de bruit. ³ : génération de caractéristiques volumiques à partir de primitives à squelette. ⁴ : construction de graphes à partir de données géomorphologiques (orométrie).

2.2 Passage à l'échelle planétaire

Le thème que nous explorons dans cette thèse est la synthèse de terrains à l'échelle maximale, tout en offrant une bonne précision. Dans l'univers, les paysages, le relief, ont des étendues naturellement bornées, celles de leur planète hôte. Toute la question est de savoir comment, à partir des techniques existantes, permettant de générer des terrains plats et de taille limitée, passer à cette échelle particulière caractérisée d'abord par un changement topologique (sphérique), mais aussi une étendue considérable. Ajoutons que plus l'étendue est grande plus cela implique potentiellement une diversité élevée de paysages, ce qui ajoute au défi.

Les mondes qui orbitent les étoiles ne sont pas plats. Ce sont des objets quasiment sphériques, car positionnés en équilibre hydrostatique, *i.e.* en équilibre interne entre gravité et pression. Une planète tellurique comme la Terre comporte plusieurs couches sphériques : un noyau actif, un manteau, et une lithosphère pour le domaine géologique, adjoints d'une hydrosphère (eau liquide couvrant 71% du globe) et d'une atmosphère (qui empêche notamment la formation de cratères d'impact d'éventuels astéroïdes). Ces sphères n'existent que parce que la Terre est un astre différencié, du fait de sa masse mise en rapport avec son moment angulaire. La géomorphologie terrestre est conditionnée, nous l'avons dit, par le jeu opposé des forces géologiques et climatiques. Les formes des continents, les distributions d'arcs d'îles, les chaînes de montagnes résultent de la tectonique des plaques, observées sur Terre comme un effet de surface de la convection du manteau, elle-même activée par le noyau. Mais en détail, les forces climatiques érosives de l'atmosphère et de l'hydrosphère viennent sculpter plus avant ces grands reliefs : vallées, réseaux de drainage, lacs, deltas, monts et collines érodés, *etc.* Notre Terre a un rayon moyen de 6370 km, soit une surface totale d'environ un demi milliard de kilomètres carrés (150.10^6 km^2 de surface continentale). Pour donner un ordre d'idée, en terme de modélisation, un échantillonnage grossier à 1 km de précision nécessiterait donc 500 millions d'échantillons. Descendre à l'échelle du mètre, comme cela se fait de manière standard en synthèse de terrain classique, demanderait un million de fois plus de données, c'est-à-dire, si on triangule et qu'on attribue ces échantillons par une couleur, une élévation et une normale (maillage de rendu minimal, sans informations topologiques ni de BRDF), environ entre 10 et 20 Péta-octets de données (10^{15}) seraient requis, soit plusieurs milliers de serveurs de stockage de dizaines de Téra-octets chacun : c'est tout-à-fait considérable.

2.2.1 Applications émergentes

Depuis environ dix ans, des applications industrielles voient peu à peu le jour qui tentent d'aborder l'échelle planétaire. Ceci pour plusieurs raisons : la capacité de traitement croissante du matériel (notamment mémoires et cartes graphiques), la pression opérant sur les directeurs artistiques les poussant à produire toujours plus et toujours plus grand, et la science-fiction

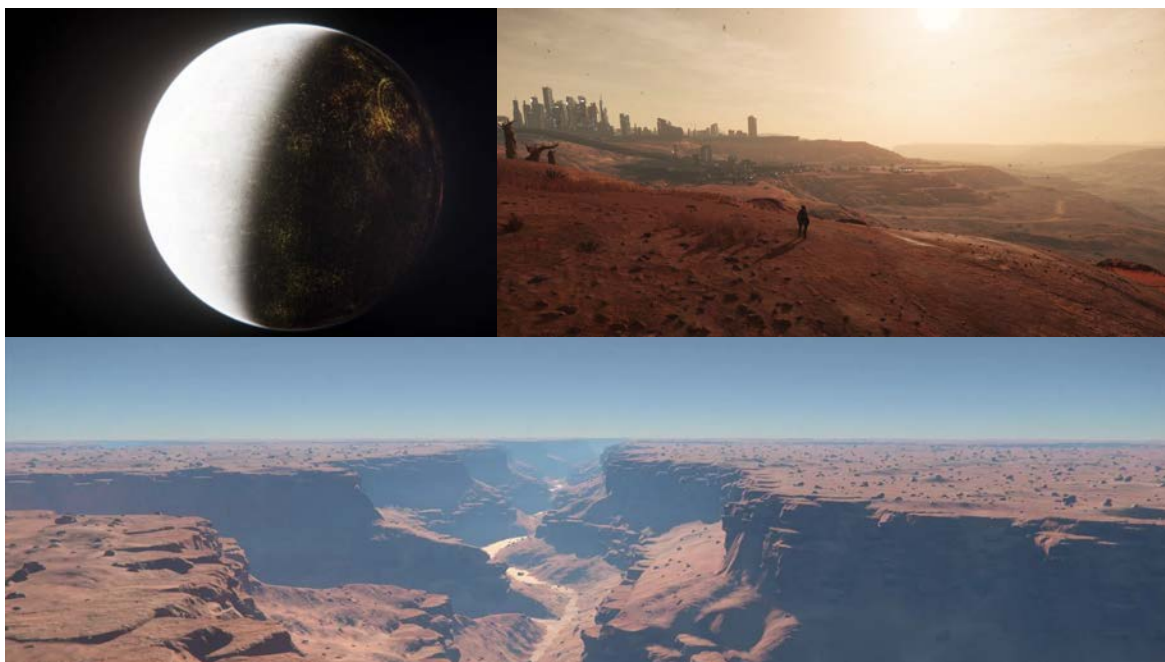


Figure 21 : Captures d'écran du jeu en développement *Star Citizen* permettant l'exploration continue de planètes. (Source : © *Cloud Imperium Games*).

qui est devenue un genre culturel très populaire à travers le cinéma et les jeux vidéo. Dans ce dernier secteur, on a assisté parallèlement au développement des jeux dits à "mondes ouverts", où le joueur est libre d'explorer de vastes étendues extérieures et donc de vastes terrains. L'exemple extrême est certainement le jeu *Star Citizen* (© *Cloud Imperium Games*), jeu d'aventure spatiale multi-joueur où il est possible d'explorer des planètes entières, depuis orbite jusqu'au sol (Figure 21). Ce jeu, toujours en développement mais très attendu, a fait l'objet d'un financement participatif record de plusieurs centaines de million de dollars. La branche allemande du studio CIG est en charge de trouver des solutions nouvelles pour répondre au défi technologique de la modélisation et du rendu temps-réel de planètes complètes. Pour l'heure et d'après les informations distillées par le studio, il semble que les planètes soient modélisées à l'échelle 1/10 (1/6 pour les lunes) pour des raisons de performance et de précision (voir section 2.2.2.2) ; la technologie utilisée pour le terrain est le collage multi-échelle, semi-automatisé, sur un cuboïde sphérique, de cartes de hauteur prétraitées (notamment avec des algorithmes d'érosion) et augmentées de données telles que l'humidité, le biome (pour la végétation) et les informations de textures (couleur, normale, BRDF, etc.). Notons que le mélange de cartes de hauteur ne permet pas d'obtenir des réseaux hydrographiques cohérents, et de fait, d'après les images du jeu disponibles, il semble que les cours d'eau soient complètement absents des planètes représentées. Également, les développeurs ne disent pas comment ils traitent les singularités de pavage aux huit coins du cuboïde et sur les huit arêtes horizontales.

Dans un autre domaine plus orienté Systèmes d'Information Géographiques, on citera également les applications *Virtual Globe*, comme *Google Earth* (© Google Inc.), *ArcGIS* (© Esri), *NASA World Wind* (open-source, NASA) ou *Marble* (open-source, KDE), parmi les plus

connues, qui permettent la visualisation multi-échelle et temps-réel de la Terre. Là les données ne sont pas synthétisées, bien entendu, mais sont extraites de bases de données d'élévation, d'imagerie satellite et de caractéristiques vectorielles (pour les routes par exemple). Ce sont donc des applications orientées *out-of-core streaming* d'un point de vue architecture de rendu, reposant typiquement sur un système de projection entre l'ellipsoïde géodétique, comme par exemple la projection de Mercator, et le plan pour plaquer les données 2D multi-résolution (généralement organisées en *quadtree*) sur le modèle 3D. L'architecture de rendu est pensée essentiellement en terme d'efficacité et de bande passante par rapport à l'importation à la volée des données du terrain visibles par l'utilisateur.

2.2.2 Recherche académique

Jusqu'ici, de la part de la recherche académique, la modélisation de terrains à l'échelle planétaire (section 2.2.2.1) n'a pas fait l'objet de beaucoup d'attention du fait de la problématique de l'étendue. On compte uniquement deux méthodes fractales : le travail de Musgrave [Ebe+98] et celui de Derzapf *et al.* [Der+11]. En revanche, le domaine, intermédiaire entre modélisation et rendu, de la tessellation adaptative de planètes, dérivée des méthodes classiques de tessellation de terrains étendus, a été plus exploré (section 2.2.2.2).

2.2.2.1 Modélisation



Figure 22 : Planètes générées par Musgrave *et al.*, [Ebe+98] à partir de combinaisons de fonctions de bruit. (Source : [Ebe+98])

Dans le livre référence de la modélisation procédurale, *Texturing & Modeling, a Procedural Approach* [Ebe+98], Kenton Musgrave expose ses travaux sur *Mojoworld*, un logiciel commercial de sa conception qui permet de produire des images de planètes fractales, à toute échelle (Figure 22). Le modèle de planète repose intégralement sur une combinaison de bruits 3D cohérents (section 2.1.3.1) pour produire à la fois la couche nuageuse, l'élévation du terrain et la couleur/texture du terrain. La combinaison de ces bruits est sophistiquée, à un point qu'il est impossible de contrôler le modèle, de l'aveu même du créateur de *MojoWorld*.

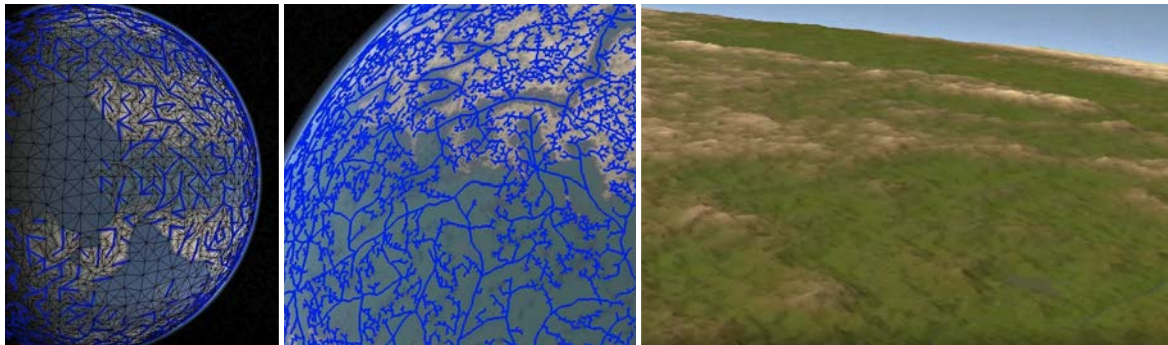


Figure 23 : Méthode de Derzpf *et al.* [Der+11] procédant par subdivision stochastique d'un maillage de base attribué d'un réseau hydrographique (gauche). Le réseau est raffiné à la volée à mesure que la caméra descend vers la planète (milieu), cependant le terrain environnant les rivières (droite) est trop homogène pour être jugé réaliste. (Source : [Der+11])

L'approche prise par Derzpf *et al.* [Der+11] est toute aussi procédurale et même fractale mais repose sur une subdivision stochastique sous contrainte pour produire le modèle planétaire. L'objectif de la méthode est de créer à la volée, en temps-réel, un réseau hydrographique couvrant la planète qui soit cohérent d'un point de vue écoulement de l'eau, depuis les sources des rivières, aux embouchures des fleuves. La méthode procède en deux étapes. La première est un pré-calcul du maillage planétaire de base par insertion de sommets dans un octaèdre ; les continents sont définis par marche aléatoire (*random walk*) sur les triangles, puis un réseau hydrographique est construit à partir des embouchures des fleuves ; les altitudes des sommets sur les cours d'eau sont définies de manière croissante. Tous les sommets continentaux appartiennent au réseau, aussi des sommets crêtes intermédiaires d'élévation élevée sont introduits dans le maillage afin de séparer les cours d'eau. La seconde et principale étape consiste à raffiner le maillage de façon adaptative (*i.e.* de manière dépendante à la vue-caméra courante) par des séquences d'opérations parallèles impliquant soit la subdivision d'arêtes (*split*), soit la fusion de sommets (*merge*) (Figure 24). Cette tessellation adaptative repose sur les maillages progressifs (*progressive meshes*) introduits par [Hop96 ; Hop98a], mais adaptée dans [HSH09 ; DMG10] pour être massivement parallélisable ; cette méthode est complexe à mettre en oeuvre, du fait des informations topologiques spécifiques aux opérations *split/merge* et des structures de données et de l'ordonnancement qui doivent être ajoutés du fait de la parallélisation. La tessellation adaptative de Derzpf *et al.* opère sous contraintes,

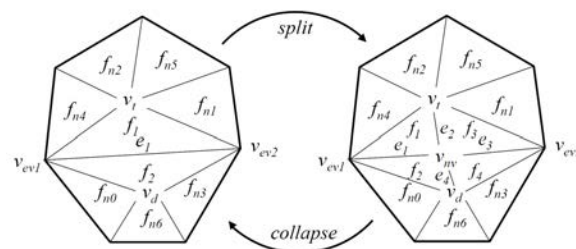


Figure 24 : Schéma de tessellation adaptative de Derzpf *et al.*. (Source : [Der+11])

celles de la préservation du réseau hydrographique planétaire ; elle permet le raffinement de celui-ci (*i.e.* la création à la volée de cours d'eau tributaires) par un ensemble précis de règles. Cependant, la méthode ne propose rien concernant le terrain environnant les rivières, tout étant laissé à l'auto-similarité homogène et répétitive de la subdivision classique (Figure 23) : le modèle géomorphologique apparaît donc comme globalement déficient même si présentant une hydrographie intéressante.

2.2.2.2 Stratégies de rendu

Le rendu de planètes à l'échelle 1/1 pose en soi des défis particuliers. Il y a tout d'abord un problème de précision numérique qui surgit lorsque l'on souhaite faire du rendu temps-réel ou que l'on souhaite utiliser le GPU comme processeur massivement parallèle, notamment pour la tessellation adaptative du modèle planétaire. Les flottants IEEE-754 encodés en 32 bits ne possèdent que 7 chiffres significatifs. Pour être stable à travers les calculs les positions doivent être capable de variations à l'échelle du centimètre, or, la Terre faisant environ 6000 km de rayon, cela requiert au moins 9 chiffres significatifs. Sans stratégie palliative, la plus immédiate étant de recourir aux flottants encodés sur 64 bits, ce qui se fait bien en rendu *offline* mais pose problème dès qu'on utilise le GPU⁷, on s'expose à des artefacts de rendu caractéristique tels le *z-fighting* (irrésolution des triangles en profondeur) ou le *jittering* (sauts des positions géométriques dû aux troncatures). Pour prévenir le jittering plusieurs parades ont été proposées. La première est de positionner l'origine du monde à la position de la caméra et de translater tous les objets inversement, de sorte que les triangles proches de la caméra aient des coordonnées petites [Tho07 ; CR11] ; l'opération peut être réalisée en double précision sur CPU mais implique le transfert répété de la géométrie à mesure que la caméra bouge, ou directement dans le *vertex shader* par émulation de double précision à partir de deux nombres flottants encodés sur 32 bits [Tha06]. Concernant le problème de l'irrésolution en profondeur (*z-fighting*), deux solutions sont possibles [CR11], la première est de décomposer le rendu sur plusieurs frustums, mais avec des problèmes potentiels de raccord de géométrie entre les frustums, ou d'appliquer une fonction de transfert à progression logarithmique sur les valeurs de profondeur (*log-z buffering*), ce qui est plus robuste.

Ces problèmes de précision numérique existent bel et bien mais sont relativement bien gérés avec les techniques que nous venons de mentionner. Cependant, quand on souhaite rendre une planète à plusieurs échelles, se pose la question de comment générer la géométrie de rendu (typiquement une triangulation). Il est bien entendu impossible de pré-calculer l'entièreté du maillage planétaire au plus haut niveau de détail et de le stocker. La solution est potentiellement la même que pour le rendu de terrains à haute précision et étendus. Elle consiste à générer à la volée une représentation adaptée à la vue courante de sorte que

7. OpenGL n'intègre les *double* que depuis la spécification 4.0 (2010), et encore partiellement puisque les étapes fixes du pipeline entre *shaders* n'accepte que des *floats* ; la situation pour l'API DirectX est encore plus restrictive.

seuls les triangles visibles soient présents et raffinés de manière à respecter une métrique de qualité visuelle (typiquement la taille du triangle en pixels). La littérature sur les tessellations adaptatives est riche, que ce soit pour les terrains [PG07] ou pour les modèles 3D plus généraux [Gar99 ; Lue+03]. En général, pour les terrains les techniques génériques reposant sur la multirésolution discrète (*i.e.* plusieurs versions simplifiées du maillage détaillé) ne fonctionnent pas car un terrain est souvent vu avec un angle rasant où géométries proches et lointaines sont toutes deux visibles ; il faut donc plutôt recourir à un niveau de détail continu (CLOD, *continuous level of detail*) [Lin+96 ; Duc+97 ; Hop98b]. Cependant, ces méthodes CLOD, travaillant à la granularité du triangle, ne sont plus adaptées aux architectures graphiques modernes, où on souhaite désormais réduire les transferts vers le GPU ainsi que le travail CPU. De fait, aujourd'hui on préfère les méthodes intermédiaires de niveau de détail hiérarchique (HLOD, *hierarchical level-of-detail*) [EMBI01 ; Cig+03a], où le travail CPU ne consiste plus qu'à déterminer la profondeur locale d'un arbre de type *quad-tree* ou *bin-tree*, chaque feuille représentant une tuile maillée de plusieurs milliers de triangles ; les tuiles résident en mémoire vidéo et ne sont jamais mises à jour, leur rendu se faisant en mode instancié. Quelques auteurs ont exploré la topologie sphérique pour les planètes et proposé des adaptations de méthodes précédentes, ainsi Cignoni *et al.* [Cig+03b] étendent la méthode BDAM [Cig+03a] (une méthode HLOD) des mêmes auteurs, Duchaineau *et al.* adaptent leur propre algorithme ROAM [Duc+97] en version HLOD et pour la topologie sphérique [HDJ05]. On citera enfin une alternative aux approches par tessellation adaptative consistant à créer le maillage de rendu par projection du plan caméra sur le terrain [Mah10], c'est-à-dire en associant directement les sommets de la triangulation de rendu aux pixels et en procédant par *raycasting* pour trouver les élévations du terrain correspondantes. L'avantage est que la triangulation peut être stockée sans être modifiée sur le GPU, ni raffinée à la volée, cependant il faut prendre en compte des configurations gênantes (comme le relief à l'horizon, ou le relief proche hors-champ occultant potentiellement la vue) et le grand problème de la méthode est la tendance à l'instabilité visuelle du terrain rendu dès que la caméra bouge ; cependant, cette méthode peut être utile pour d'autres cas de figures, notamment le rendu adaptatif de la surface de l'eau d'un océan en mouvement.

2.2.3 Conclusion

Jusqu'ici, seules des méthodes procédurales fractales ont été proposées pour modéliser des planètes, avec représentation en champ de hauteur adapté à la sphère, par sommes de bruits pour Musgrave, ou par subdivision stochastique contrainte pour Derzapf. Nous l'avons dit, les méthodes physiques sont plutôt mono-échelles et coûteuses en temps de calcul et en besoins de stockage. Sur ces bases nous serions tentés de considérer le problème de la modélisation détaillée de planètes en nous cantonnant à l'approche procédurale, et même fractale. Pour autant, nos propositions dans cette thèse relèvent d'une approche combinée : à la fois prenant en compte la physique, et en offrant une résolution procédurale pour des raisons essentielles

de performance par rapport à l'étendue, telles que mentionnées plus haut. Cette combinaison repose sur une analyse directe du problème, dont les éléments ont été introduits tout au long de cet état de l'art. Il existe en effet deux échelles importantes pour le rendu détaillé d'une planète, et que l'on peut distinguer : l'échelle macroscopique, orbitale, figurant ses caractéristiques de terrain propres (arcs d'îles, continents, massifs montagneux, zones arides, etc.) et l'échelle mésoscopique, celle de l'humain, figurant les détails géomorphologiques perceptibles par ce dernier. Or il s'avère que l'échelle macroscopique est gouvernée, transformée, modelée presque exclusivement par les forces tectoniques endogènes. Tandis que l'échelle intermédiaire est *donnée* par la tectonique mais transformée, modelée, *in situ* par les forces climatiques exogènes. Notre proposition donc, face au problème de l'étendue, est de découpler ces deux échelles puisque répondant à deux mécanismes distincts : nous proposons une approche physique pour l'échelle orbitale, reposant sur une re-création itérative, simulée, d'une tectonique des plaques afin de reproduire la structuration grande-échelle de la planète (Chapitre 3) ; que nous faisons suivre d'une hyper-amplification par une méthode découplée procédurale qui permet le passage adaptatif de l'échelle macroscopique à mésoscopique, et donc l'exploration continue, avec une bonne performance, de planètes synthétiques présentant un bon niveau de réalisme (Chapitre 4).

MODÉLISATION DE PLANÈTES PAR REPRODUCTION D'UNE TECTONIQUE

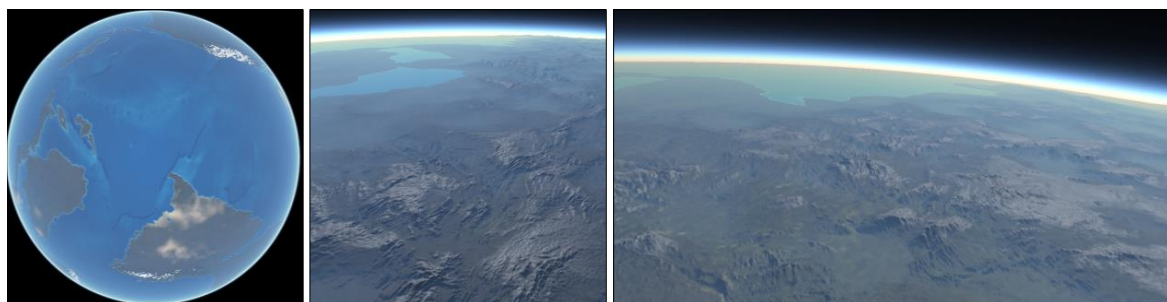


Table des matières

3.1 Observations préliminaires	40
3.1.1 État des connaissances géophysiques	41
3.1.2 Éléments de tectonique des plaques classique	42
3.2 Aperçu de la méthode	47
3.2.1 Phénomènes reproduits	48
3.2.2 Modèle de plaque	49
3.2.3 Aspect numérique	52
3.2.4 État initial de la simulation	54
3.3 Modèle tectonique dynamique	56
3.3.1 Convergence	56
3.3.1.1 Subduction	56
3.3.1.2 Collisions continentales	59
3.3.1.3 Implémentation	61
3.3.2 Divergence	65
3.3.2.1 Génération du plancher océanique	65
3.3.2.2 Fragmentation de plaque	66
3.3.2.3 Implémentation	67
3.3.3 Érosion continentale et affaissement océanique	69
3.4 Résultats	70
3.4.1 Validation	70
3.4.2 Performance	72
3.4.3 Contrôle utilisateur	72
3.4.4 Limitations	73

Après avoir exposé le contexte de recherche nous développons dans ce chapitre une réponse à la problématique de la modélisation de terrains à l'échelle planétaire, à la fois efficace et réaliste. Nous souhaitons dépasser les limitations inhérentes aux approches fractales usuelles, c'est-à-dire leur auto-similarité, leur homogénéité, et l'absence de contrôle artistique induit, pour aboutir à un modèle plus riche, au sens géologique, et offrant plus de capacités d'édition aux artistes. Nous proposons comme solution une architecture interactive capable de générer des planètes de type terrestre. Sa spécificité est de s'appuyer intégralement sur une compréhension des facteurs générateurs des terrains classiquement décrits en géomorphologie. L'observation clé est qu'ils apparaissent tous comme une déclinaison des forces tectoniques. En prenant donc comme référentiel notre planète, la Terre, car objet tectonique réel de loin le plus décrit et étudié, et en intégrant une dynamique tectonique dans notre modèle, nous montrons qu'il est possible de dépasser les limitations mentionnées des méthodes procédurales classiques.

Notre contribution principale est la création d'un modèle efficace et original, inspiré par la géologie, qui approxime la déformation de la croûte induite par les forces tectoniques pour obtenir *in fine* des planètes exhibant des caractéristiques géomorphologiques convaincantes. Ce modèle, itératif et géométrique, est une simulation intégralement construite sur des heuristiques performantes ; en cela elle diffère d'une approche géophysique précise qui chercherait à minimiser l'erreur avec les observations du réel. Notre méthode procure à l'utilisateur différents moyens pour contrôler l'évolution d'une planète et prescrire les zones de continents, de montagnes, d'archipels. Enfin, elle représente une synthèse guidée du macro-relief d'une planète, et peut être source de données a posteriori pour une méthode d'*amplification* : ce peut-être les deux propositions propres à cette thèse (Chapitre 4), ou bien une technique connue de l'art, par exemple [Ebe+98], [Gu16] ou [Cor+17a].

3.1 Observations préliminaires

Nous voulons répondre au problème du contrôle de la synthèse des caractéristiques à grande échelle des planètes virtuelles, c'est-à-dire de l'édition interactive du processus générateur des continents, des arcs d'îles et archipels, des grandes chaînes de montagnes, et même du relief océanique tel les dorsales. Or, d'une part les approches fractales ([Ebe+98], [Der+11]) échouent à reproduire ces caractéristiques géomorphologiques, car trop localisées (distribuées non uniformément) et/ou trop anisotropes. D'autre part quand on accroît la sophistication des méthodes fractales pour pallier à ce fait, on dégrade généralement fortement le contrôle utilisateur qu'elles offrent. Dans les deux cas ces facteurs limitant, réalisme et contrôle, apparaissent trop importants dans le contexte applicatif retenu. Bien que l'accent actuel sur les techniques fractales provienne essentiellement de leur grande efficacité computationnelle, nous décidons donc de réviser en bonne partie ce modèle, au moins pour la synthèse des macro-structures constituant la surface planétaire. Nous choisissons donc sciemment de

revenir à la racine physique des éléments constitutifs du relief : qu'est-ce qui conditionne l'apparition, la forme, la distribution, des cordillères montagneuses, des arcs d'îles, et même des côtes des continents ? La réponse est connue en géologie, nous savons que tous les modelés géomorphologiques, *i.e.* tous les types de terrains, résultent d'un processus *endogène* commun, la tectonique [Hug16]. Bien sûr les facteurs *exogènes*, par exemple l'érosion hydrique, viennent façonner plus avant et localement le relief généré - mais à grande échelle le processus dominant, en propre, reste la tectonique des plaques.

En s'appuyant sur cette observation fondamentale, nous chercherons donc à introduire les forces tectoniques comme élément principal d'un nouveau type de modèle permettant la synthèse de surfaces planétaires.

3.1.1 État des connaissances géophysiques

La Tectonique des Plaques est un modèle théorique de la croûte terrestre qui a émergé progressivement au fil du XX^{ème} siècle, supplantant les explications précédentes plutôt partielles rangées sous le terme-ombrelle de « Dérive des Continents », pour s'imposer finalement dans les années soixante par deux publications séminales [Mor68 ; LP68]. Pendant longtemps le modèle se limitait à expliquer qualitativement les phénomènes. Cependant, depuis deux décennies la recherche en géophysique s'est orientée, comme beaucoup d'autres disciplines, vers les outils de simulation numérique. On parle aujourd'hui de tectonophysique, et le focus porte actuellement sur le manteau terrestre, le consensus scientifique étant que ce dernier joue un rôle prépondérant, et plutôt méconnu. Il semble qu'on ne puisse pas se contenter de voir la convection du manteau comme le mécanisme moteur des plaques tectoniques, mais que les plaques elles-même seraient en fait l'*expression* de surface du système convectif auto-organisé du manteau terrestre [BTR15]. Cependant, même avec les capacités de calcul modernes, la recherche sur ces simulations, récente, se heurte à des défis substantiels. Par exemple décrire par le bon jeu d'équations les rhéologies complexes et profondes des roches en fusion [Com+12], dont la connaissance directe ne peut être obtenue que par sondages sismiques, ou par échantillons métamorphiques ramenés à la surface par volcanisme. Ou encore et à l'instar des modèles climatiques, concevoir des modèles numériques performants transverses à de nombreuses disciplines (pétrologie expérimentale, physique des minéraux, séismologie, géodynamique, etc.). Par ailleurs, le problème du coût computationnel se pose, car contrairement aux simulations climatiques qui opèrent sur des grilles géodésiques de faible épaisseur, une simulation du manteau doit se déployer sur toute la profondeur du globe (on passe de 2.5D à 3D) : en pratique, une exécution d'un modèle moderne requiert plusieurs mois de calcul sur un cluster dédié [CS17]. Enfin, et bien que ces modèles numériques soient parmi les plus complexes jamais écrit par l'homme, pour autant, nous ne sommes toujours pas en mesure de répondre à des questions simples, comme, quelle serait l'origine des plaques tectoniques ?

Dans le cadre de notre problème adopter une approche géophysique complète et précise pour simuler une tectonique serait fortement inadapté. Pour offrir ne serait-ce que l'interactivité, donc une garantie de performance, à l'utilisateur, le modèle se doit d'être rapidement calculable. Notre proposition pour ce dernier s'appuiera donc sur des heuristiques choisies pour leur performance et leur plausibilité. Notons qu'il n'existe par ailleurs aucune formule directe pour quantifier la déformation des plaques ou le soulèvement de la croûte : les modèles tectonophysiques reposant sur des équations aux dérivées partielles, ils requièrent des solutions numériques coûteuses et ne peuvent fournir d'expressions directes sur lesquelles s'appuyer. C'est sous cette contrainte que nous nous plaçons, et nous proposerons donc une approche simplifiée pour la recreation des effets tectoniques principaux. Ceux-ci seront ceux décrits par la tectonique des plaques, c'est-à-dire par le modèle géologique classique, qualitatif, mais pour autant, sans garanties vis-à-vis du comportement physique du manteau.

3.1.2 Éléments de tectonique des plaques classique

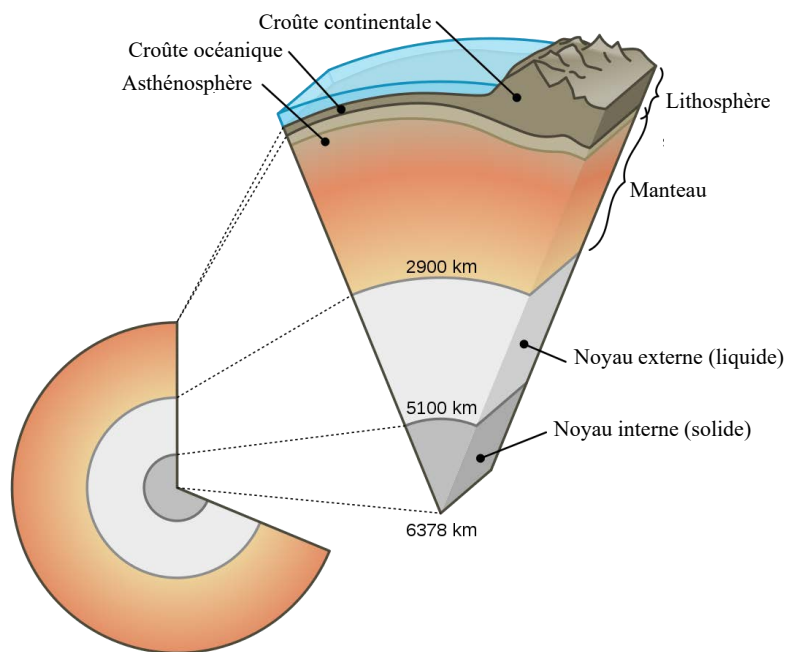


Figure 25 : Vue en coupe schématique de la Terre. La lithosphère comprend la croûte terrestre et la partie supérieure solide du manteau. (Source : USGS, public domain)

Dans le modèle classique, les *plaques tectoniques* sont décrites comme une partition de la lithosphère, la couche planétaire supérieure (figure 25). Comme la lithosphère est plus froide et moins dense que l'asthénosphère, la couche sous-jacente, les plaques peuvent être vues comme des fragments rigides, ou des "dalles" flottantes, dérivant au-dessus d'un manteau en fusion. La *croûte terrestre* proprement dite, c'est-à-dire la partie supérieure de la lithosphère, peut être de deux types : océanique ou continentale. La croûte continentale est toujours plus âgée, moins dense et plus épaisse que la croûte océanique, et cela induit une différenciation

dans le comportement dynamique. À mesure que les plaques dérivent à la surface, elles se séparent ou collisionnent ce qui façonne la croûte, et donc le relief de la planète. Il est important de réaliser que l'intégralité des effets tectoniques apparaissent sur les *frontières* des plaques, et non en leur sein. Le relief d'une planète tectonique émerge ainsi des interactions locales en bordure des plaques.

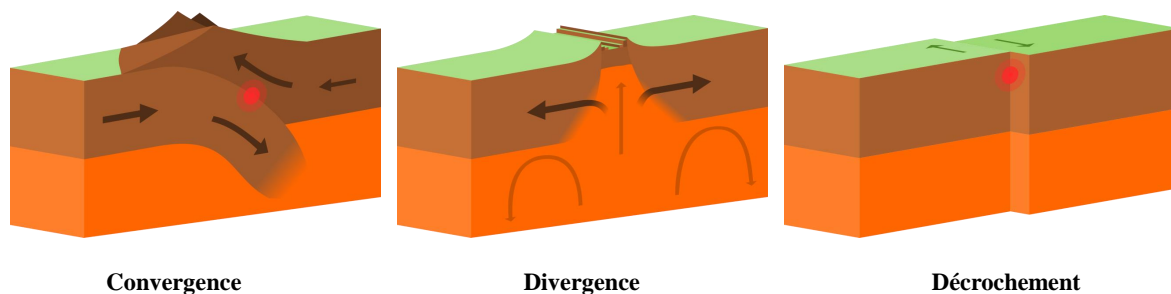


Figure 26 : Les trois modes canoniques d'interaction des plaques tectoniques : zones de convergence, zones de divergence et zones de décrochement (cisaillement). (Source : Domdomegg 2016, contributeur wikipedia)

Il existe trois types d'interactions dynamiques, ou modes tectoniques : convergence, divergence et cisaillement (Figure 26). La convergence de plaques conditionne l'apparition des chaînes montagneuses (*orogénie*), et des fosses océaniques. La divergence provoque systématiquement l'émergence de plancher océanique, par effusion magmatique, ce qui vient combler le vide laissé entre les plaques. Enfin, le cisaillement a lieu le long de zones dites de décrochement transformantes. Le nom est trompeur, car ce mode dynamique n'engendre pas de macro-relief caractéristique a contrario des zones de convergence et de divergence, mais uniquement des séismes et des failles transformantes locales (comme par exemple la faille de San Andreas en Californie). Nous laisserons donc d'emblée de côté les zones de décrochement, pour nous intéresser essentiellement à la convergence et à la divergence. Ces deux modes d'interaction induisent eux-même des phénomènes essentiels (Figures 27 et 31) qu'il sera intéressant de chercher à reproduire, car générateurs en propre du relief.

Convergence de plaques. La rencontre catastrophique de deux plaques convergentes peut engendrer plusieurs phénomènes tectoniques. En première approximation, nous choisissons de les décliner selon deux types distincts, qui dépendent des caractéristiques des plaques observées vers le front de convergence : on parlera ainsi tantôt de subductions/obductions, tantôt de collisions continentales. Nous commencerons par bien définir les subductions, dans le cas idéal, avant d'introduire obductions et collisions.

Subduction simple. Une subduction implique typiquement la rencontre d'une plaque océanique \mathcal{P}_i avec une autre plaque \mathcal{P}_j . Si \mathcal{P}_j est de type continental, alors la plaque océanique entrera en subduction. Inversement, si \mathcal{P}_j est océanique, alors la plus âgée des deux plaques

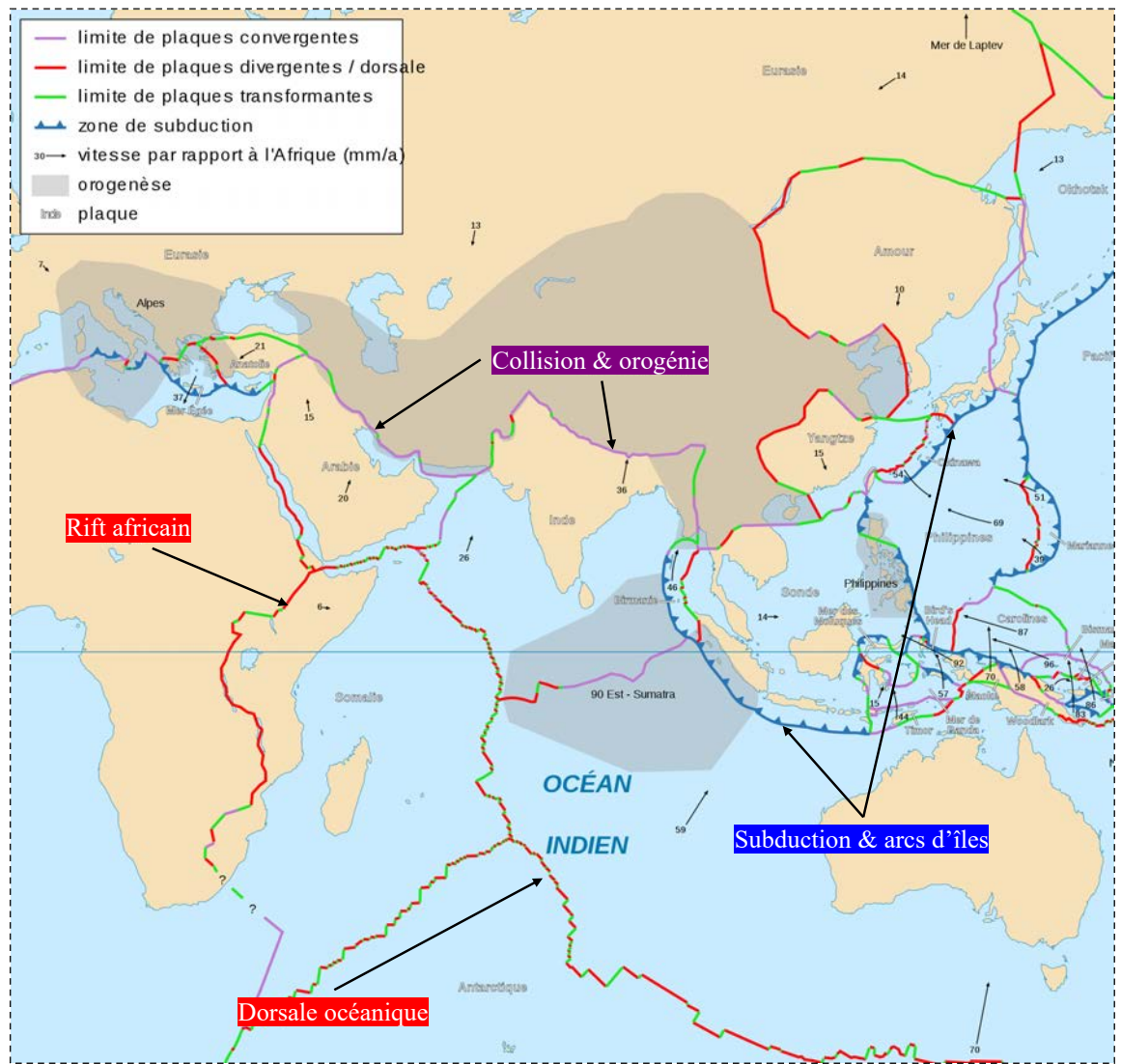


Figure 27 : Gros plan sur une carte tectonique de la Terre, montrant les zones de divergence, de convergence et de décrochement ainsi que les ordres de grandeur du mouvement tectonique. En couleur et fléchés, les phénomènes que nous souhaitons prendre en compte dans notre modèle. (Image de fond et données : *NGDC World Coast Line data*, Peter Bird, Eric Gaba)

entrera en subduction sous l'autre. L'âge des fonds marins est important car formant un indicateur de densité : une plaque océanique âgée est plus dense qu'une plaque océanique jeune, a tendance à s'affaisser, et c'est ce qui détermine l'entrée en subduction. Le phénomène de subduction à proprement parler implique une succion progressive de la plaque la plus dense (Figure 28), qui plonge sous la plaque rencontrée (dite supérieure ou chevauchante) et se retrouve à terme aspirée dans le manteau en fusion où elle y est recyclée (sur des échelles de temps considérables). Le long du front de subduction une fosse océanique, ou fosse abyssale, se forme. Sous la plaque supérieure les fortes contraintes induisent en remontée du volcanisme et du plissement en surface, ce qui occasionne soit l'apparition d'un arc d'îles volcaniques si la plaque chevauchante est océanique, soit une orogénie, c'est-à-dire la formation d'une chaîne de montagnes, si elle est continentale. L'exemple canonique est la formation des Andes en Amérique du Sud, du fait de la subduction de la plaque de Nazca, océanique, sous le continent sud-américain. Le moteur principal des subductions est décrit par le terme anglais de *Slab Pull*, c'est-à-dire la force d'entraînement et de traction exercée par la portion plongeante de la plaque sur elle-même. Ce mécanisme est plus important d'un ordre de grandeur que la poussée le long des dorsales océaniques (voir Divergence).

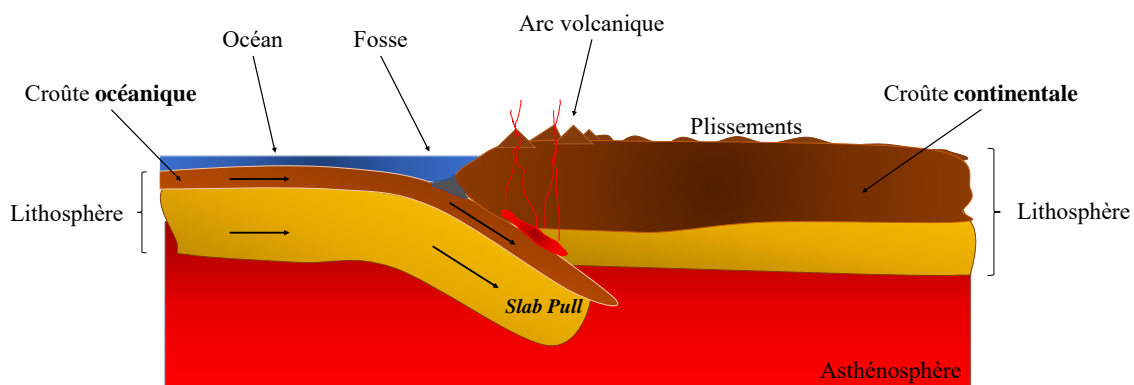


Figure 28 : Illustration d'une zone de subduction pour le cas d'une convergence entre une plaque océanique et une plaque continentale. La subduction induit une déformation de la surface de la plaque chevauchante, par volcanisme et plissement.

Obduction, et collision continentale. La subduction telle que décrite précédemment est relativement bien définie. Pour autant, une subduction peut évoluer, si les conditions s'y prêtent, vers d'autres types de phénomènes qu'il convient de distinguer. On introduira d'abord pour ce faire le terme de *terrane*. En géologie les terranes sont des portions de croûte continentale ou des systèmes d'îles transportés par la croûte océanique environnante vers les zones de subduction, à la façon d'un tapis roulant (lui-même entraîné par le Slab Pull). Lorsque les terranes entrent dans la zone de subduction, on observe alors un phénomène dit d'*obduction*, temporaire, qui n'est autre que le forçage de la croûte continentale sous l'autre plaque. L'obduction de terranes produit une plus grande déformation de la plaque chevauchante, que lors d'une subduction classique [Clo93 ; Dom+98]. À terme, comme la

croûte continentale est de densité plus faible que le manteau asthénosphérique dans lequel elle s'enfonce, les terranes résistent à la subduction. Si la plaque adverse supérieure est océanique, alors le mode tectonique se complexifie, et on parle de subduction inversée. En revanche, si la plaque chevauchante est continentale, on assiste alors à la rupture des terranes d'avec leur support (*Slab Break*), puis leur agrégation (suture) sur la frontière de la plaque adverse. L'exemple canonique est la formation des Montagnes Rocheuses, constituées d'un patchwork de terranes transportés avec le temps par la plaque Pacifique, en subduction, vers l'Amérique du Nord. Lorsque la taille d'un terrane est substantielle, ou même représente un continent entier, on parle de collision continentale : c'est le cas de l'Inde qui rencontre et se suture progressivement au continent eurasiatique. Les collisions continentales occasionnent de fortes orogénies, principalement par plissement dû à la compression, comme l'Himalaya.

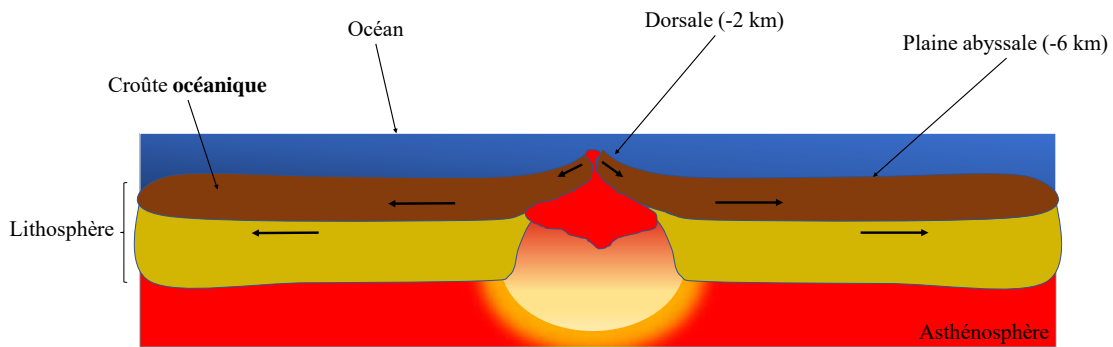


Figure 29 : Zone de divergence entre plaques : une dorsale océanique (profondeur moyenne 2 km) se forme et se maintient par production magmatique continue venue du manteau. A mesure que la croûte océanique s'étend et se refroidit, celle-ci se densifie et s'affaisse, formant de grandes plaines abyssales.

Divergence de plaques. Les diverses zones de subduction d'une planète recyclent à terme dans le manteau et en moyenne en moins de 200 millions d'années (Ma) l'intégralité de la croûte océanique. Comme la lithosphère maintient parallèlement sa couverture, *i.e.* on n'observe pas de « trous » dans la planète, c'est qu'il existe un mécanisme symétrique qui génère de la croûte océanique. Ce rôle est rempli par les *dorsales océaniques*, lieu d'effusion magmatique qui assure la création de plancher océanique. À mesure que les plaques divergent (car attirées à l'autre bout par leurs fronts de subduction), la nouvelle croûte émerge, suit et s'étend, depuis les dorsales, dans un processus continu de remontée du basalte, refroidi au contact de l'eau et affleurant du fait de la séparation divergente des plaques (Figure 29). Le magma solidifié constitue le nouveau plancher océanique ; et les dorsales forment des structures de relief linéaire sous-marin, caractéristiques, qui s'élèvent à plusieurs kilomètres au-dessus de la plaine abyssale. L'exemple typique de dorsale sur Terre est la dorsale des Atlantiques nord et sud.

Fragmentation. Le recyclage des plaques océaniques amène nécessairement en contact de nombreuses portions de croûte continentale, par le phénomène de collision continentale décrit plus haut. L'agrégation de ces terranes, super-terrane et continents tend à former des super-continent. Cela semble être le cas, cycliquement, dans le passé tectonique de la Terre. Mais ces super-continent ne persistent pas, ils sont systématiquement brisés, par le phénomène de fragmentation. Le long de ces brisures apparaissent des *rifts*, lesquels progressivement feront remonter le magma de l'asthénosphère pour former de la jeune croûte océanique : la dépression laissée entre les portions séparées continentales sera comblée par l'eau, à terme un nouvel océan apparaîtra. La figure 27 montre ainsi l'exemple du jeune rift africain.

3.2 Aperçu de la méthode

À partir de ces descriptions géologiques qualitatives de premier ordre de la croûte terrestre, nous pouvons commencer à élaborer un modèle approximant une tectonique des plaques. Notre objectif est, par reproduction des effets tectoniques principaux, de générer les éléments constitutifs du macro-relief planétaire : des côtes continentales exhibant une variété de formes, dont la symétrie et la linéarité, des distributions de chaînes montagneuses plausibles, dont des cordillères en bordure des continents, des arcs d'îles qui suivent les fronts de subduction, ainsi que du relief sous-marin, notamment des grandes dorsales médianes, des plateaux immergés, des plaines abyssales et des fosses océaniques.

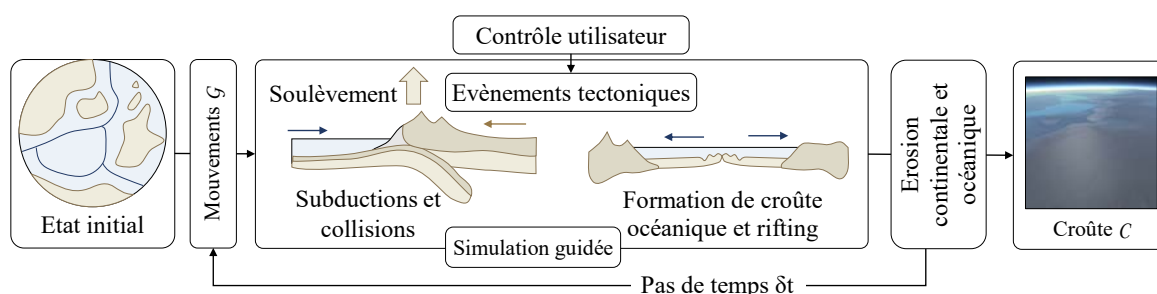


Figure 30 : Aperçu de la méthode : étant donné une planète initiale décrite par ses plaques $\mathcal{P}(0)$, nous calculons le mouvement tectonique des plaques $\mathcal{P}(t)$ et traitons les évènements tectoniques tels la subduction, la collision ou encore la génération de croûte océanique. Ces évènements façonnent la croûte terrestre C .

La méthode proposée (Figure 30) consiste en une simulation approchée de tectonique, basée sur un pas de temps géologique δt de plusieurs millions d'années, qui mettra en mouvement les plaques. À chaque pas de temps, nous nous attacherons à détecter et reproduire les phénomènes tectoniques dû à la convergence et à la divergence des plaques. La simulation est guidée, au sens d'une intervention possible de l'utilisateur pendant celle-ci. Il peut ainsi librement prescrire les mouvements des plaques, déclencher des évènements, tel la fragmentation d'une plaque, ce qui permet d'éditer et de contrôler en temps réel la simulation. Cette

interactivité est rendue possible par la bonne performance du modèle, la simulation reposant exclusivement sur un traitement heuristique efficace des interactions tectoniques.

Cette section présente maintenant le modèle numérique sous-jacent à la méthode, la description détaillée et complète de la résolution des phénomènes simulés se trouvant en section 3.3.

3.2.1 Phénomènes reproduits

Des trois modes d'interaction tectonique, pour rappel convergence, divergence et cisaillement, nous ne retenons que la convergence et la divergence de plaques. Ceci car ces deux modes engendrent l'essentiel des reliefs terrestres et sous-marins, a contrario du troisième. Lorsque les plaques convergent ou divergent, divers phénomènes peuvent se produire. De la variété des phénomènes tectoniques que l'on observe dans le monde réel, nous conceptualiserons quatre grands archétypes : subduction/obduction, collision continentale, génération de croûte océanique, et fragmentation de plaque (Figure 31).

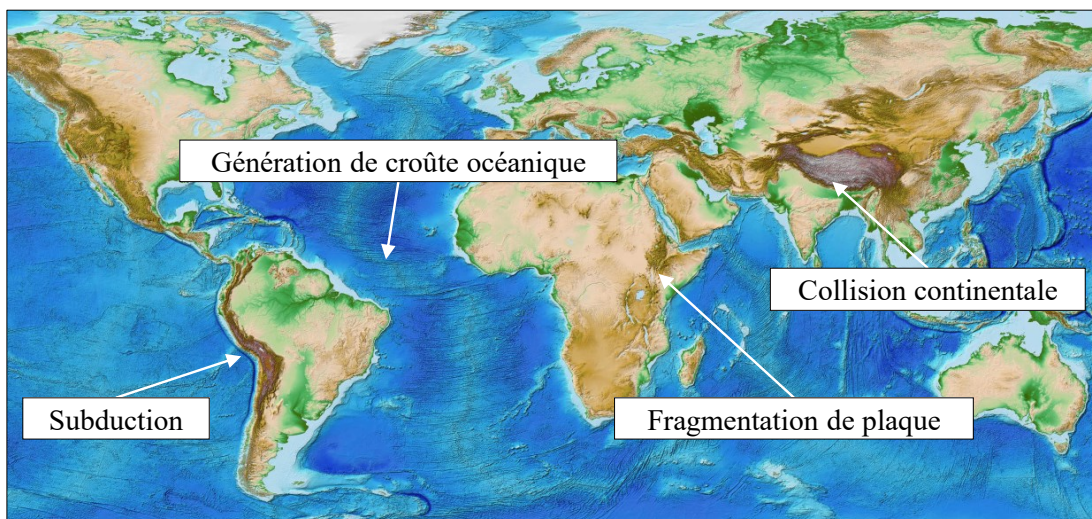


Figure 31 : Exemples terrestres des quatre phénomènes tectoniques majeurs reproduits dans notre modèle : subduction, collision continentale, génération du plancher océanique et fragmentation de plaque.

1. **Subduction.** Les subductions résultent de la convergence de plaques et de présence de croûte océanique, laquelle par sa densité élevée a tendance à plonger aisément sous la plaque rencontrée. Nous traiterons indifféremment la subduction et l'obduction de terranes tant qu'aucune masse continentale substantielle n'est rencontrée sur la plaque chevauchante. Ceci car ces deux types d'interaction dynamique présentent la même configuration, *i.e.* l'engloutissement d'une portion de plaque sous une autre et la genèse de relief par soulèvement/volcanisme. Nous simplifierons par ailleurs ces deux derniers aspects pour les unifier sous le terme unique de soulèvement (*uplift* en anglais). La

subduction (ou obduction) engendre donc une déformation de la croûte de la plaque supérieure (plus marquée pour l'obduction), c'est-à-dire potentiellement une orogénie de type *Andéen* pour une plaque supérieure continentale, ou bien l'apparition d'arcs d'îles pour une plaque chevauchante océanique.

2. **Collision continentale.** Les subductions et obductions seront traitées de manière unifiée ; toutefois une obduction sous une plaque continentale pourra se transformer en une collision si l'aire des terranes subduits est importante. Une telle collision provoquera le détachement des terranes de la plaque subduite (*Slab Break*), leur agrégation au continent rencontré et fera apparaître une forte orogénie sur ce dernier, de type *Himalayen*.
3. **Nouvelle croûte océanique.** La divergence de plaques fait apparaître du nouveau plancher océanique, au niveau de dorsales que nous nous attacherons également à modéliser.
4. **Rift.** Toute plaque aura une probabilité de rupture d'autant plus élevée qu'elle sera continentale et de taille conséquente. Nous introduirons des rifts, c'est-à-dire des lignes de fragmentation, afin de briser la plaque. Par la suite, de la nouvelle croûte océanique apparaîtra naturellement le long des nouvelles zones de divergence, tel que décrit en 3.

Précisions. Dans les éléments préliminaires de tectonique classique exposés au début de ce chapitre, nous avons mentionné régulièrement la présence de plaques « océaniques » et de plaques « continentales ». En fait dans la réalité, bien que certaines plaques soient presque purement d'un type ou de l'autre, une plaque tectonique peut en général avoir des portions continentales comme des portions océaniques. C'est aussi le cas dans notre modèle, et c'est uniquement par abus de langage et dans un souci de simplification que nous parlerons de plaques océaniques (resp. continentales) pour évoquer des plaques à dominante océanique (resp. continentale). Par ailleurs et alors qu'en géologie un *terrane* est une portion de croûte continentale peu étendue ou un système d'îles, nous étendrons ce concept dans notre modèle de plaque, et définirons un terrane comme étant une portion continentale connexe (au sein d'une plaque). À noter qu'avec cette définition un continent entier peut donc être vu comme un terrane.

3.2.2 Modèle de plaque

Notre but est de générer le macro-relief d'une planète. Nous nous appuyerons donc sur l'observation suivante : les structures d'intérêt émergent des interactions en bordure des plaques tectoniques, à mesure que celles-ci dérivent. Pour les raisons évoquées en observations préliminaires de ce chapitre, nous nous cantonnerons au cadre de la tectonique des plaques classique, nous ne nous intéresserons pas aux phénomènes profonds de la planète, *i.e.* à la convection du manteau, laquelle n'intervient pas directement dans la génération du relief.

Nous proposons ainsi de représenter une planète exclusivement par sa croûte terrestre, c'est-à-dire sa couche la plus externe. Il s'agit d'une représentation essentiellement surfacique ; cette approche permet la bonne performance du modèle en terme de temps d'exécution, donc d'offrir l'interactivité souhaitée pour l'utilisateur. Nous voudrions partitionner la croûte afin de produire l'état initial du processus itératif : cette partition représentera directement les plaques du modèle.

Plus formellement, la surface d'une planète est définie par l'union, notée \mathcal{P} , de plaques tectoniques \mathcal{P}_i (Figure 32). Chaque plaque \mathcal{P}_i est une portion de la croûte terrestre \mathcal{C} .

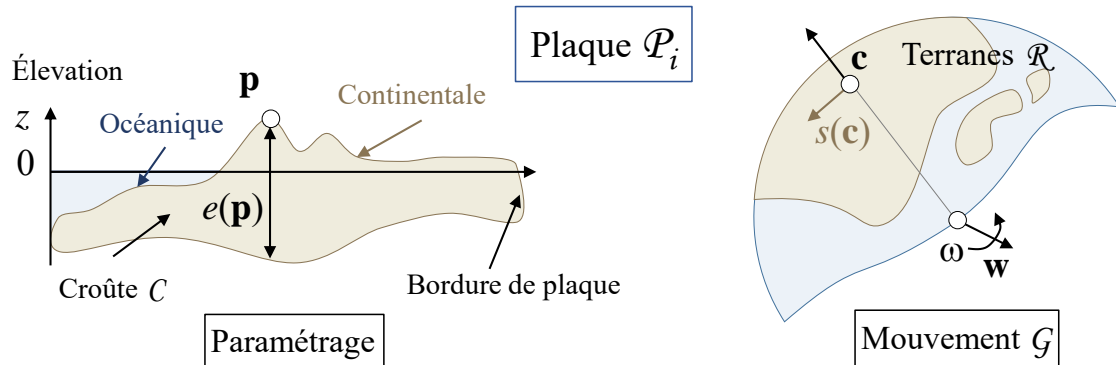


Figure 32 : Modèle de plaque : croûte \mathcal{C} , élévation z et épaisseur e , mouvement géodésique \mathcal{G} .

Symbole	Description
$x_{\mathcal{C}}$	Type de la croûte (océanique ou continentale)
e	Épaisseur de la croûte
z	Élévation de surface (relief)
a_o	Âge de la croûte (si océanique)
\mathbf{r}	Direction locale de dorsale (si océanique)
a_c	Âge de l'orogénie (si continentale)
o	Type d'orogénie (si continentale)
\mathbf{f}	Direction locale de plissement (si continentale)

Table 3.1 : Paramétrage de la croûte terrestre, défini à la surface de la sphère.

Paramétrage. Une plaque est paramétrée continument par les fonctions suivantes, définies en un point \mathbf{p} de la sphère (Table 3.1) : type de croûte $x_{\mathcal{C}}(\mathbf{p})$, épaisseur de la croûte $e(\mathbf{p})$ et élévation $z(\mathbf{p})$ (fonction de relief). Selon le type de croûte $x_{\mathcal{C}}$, qui peut être soit *océanique* soit *continental*, nous ajoutons les paramètres suivants : âge de la croûte $a_o(\mathbf{p})$ et direction locale de dorsale $\mathbf{r}(\mathbf{p})$ pour la croûte océanique - et type d'orogénie $o(\mathbf{p})$, direction locale de plissement $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ et âge de l'orogénie $a_c(\mathbf{p})$ pour la croûte continentale. L'âge de la croûte océanique représente le temps écoulé depuis sa formation le long d'une dorsale océanique. La direction locale de dorsale est un vecteur normalisé orienté parallèlement à la dorsale océanique la plus proche. Le type d'orogénie o , pour une zone continentale, peut être soit *Andéen* soit *Himalayen* et résulte respectivement d'une subduction ou d'une collision continentale, il s'agit

d'un nombre sans dimension, $o \in [0, 1]$, 0 marquant le type *Andéen* pur et 1 le type *Himalayen* pur. La direction locale de plissement indique l'orientation de la convergence tectonique ayant donné lieu à l'orogénie, c'est donc un vecteur orthogonal aux barres montagneuses et aux grandes vallées qui les séparent. Ces paramètres sont impliqués dans la simulation de l'évolution d'une planète, et sont par ailleurs disponibles dans le résultat final pour permettre son amplification (Chapitre 4).

Mouvements. Chaque plaque évolue sur la sphère selon un mouvement rigide géodésique, noté \mathcal{G} . Comme en première approximation nous considérons la surface de la planète identique à une sphère parfaite¹, ce mouvement géodésique est donc une rotation définie par un axe \mathbf{w} passant par le centre de la planète. Soit ω la vitesse angulaire, on définit la vitesse de surface en tout point \mathbf{p} comme $s(\mathbf{p}) = \omega \mathbf{w} \times \mathbf{p}$. La vitesse moyenne d'une plaque est de l'ordre d'une dizaine de millimètres par an, la vitesse maximale observée sur Terre est de $\approx 100 \text{ mm.a}^{-1}$ (vitesse de la plaque Pacifique).

Constantes. Le modèle repose enfin sur un ensemble de constantes. Le tableau 3.2 montre les valeurs utilisées pour l'expérimentation. Le niveau de la mer a été posé égal à 0, et sert d'élévation référence. Certaines de ces valeurs sont propres au modèle et ont été choisies après essais répétés pour leur plausibilité ; d'autres sont simplement celles observées sur Terre.

Symbole	Description	Valeur
δt	Pas de temps	2 Ma
R	Rayon planétaire	6 370 km
z_r	Élévation maximale des dorsales	-1 km
z_a	Élévation moyenne des plaines abyssales	-6 km
z_t	Élévation moyenne des fosses océaniques	-10 km
z_c	Altitude continentale maximale	10 km
r_s	Distance de subduction de référence	1 800 km
r_c	Distance de collision de référence	4 200 km
Δ_c	Coefficient de collision	$1.3 \times 10^{-5} \text{ km}^{-1}$
v_s	Constante de <i>Slab Pull</i>	8 mm.a^{-1}
v_0	Vitesse de plaque maximale	100 mm.a^{-1}
ϵ_o	Affaissement océanique	$4 \times 10^{-2} \text{ mm.a}^{-1}$
ϵ_c	Érosion continentale	$3 \times 10^{-2} \text{ mm.a}^{-1}$
ϵ_t	Accrétion sédimentaire	$3 \times 10^{-1} \text{ mm.a}^{-1}$
u_o	Soulèvement par subduction	$6 \times 10^{-1} \text{ mm.a}^{-1}$

Table 3.2 : Constantes utilisées dans le modèle de génération tectonique. Les valeurs indiquées ont été utilisées pour générer tous les exemples montrés dans le manuscrit. Notez que les vitesses sont définies en mm.a^{-1} de sorte que les déplacements soient effectués en km sur une durée de 1 million d'années (1 Ma).

1. Une planète réelle est en fait un géoïde oblongue, approximable par un ellipsoïde défini par un rayon équatorial et un rayon polaire. Introduire cet aplatissement, de moins de 1% pour la Terre, rendrait la géométrie du modèle complexe et impacterait donc grandement les performances, pour un très faible gain en réalisme.

3.2.3 Aspect numérique

Échantillonnage. Comme évoqué en introduction, la surface d'une planète s'étend sur plusieurs centaines de millions de km^2 , il faut donc faire un choix d'échelle et de résolution pour la représentation numérique du modèle. En pratique, nous échantillons la croûte par un ensemble fini de points (entre 50 000 et 500 000 points au maximum², afin de préserver les performances). Cette distribution de points est idéalement de faible discrétance vis-à-vis de l'aire couverte par chaque élément. Alors qu'en topologie plane la grille hexagonale est optimale en terme d'aire, rappelons qu'il n'existe pas de distribution parfaite de points sur la sphère, au-delà de 20 points³. Il existe cependant des solutions quasi-optimales, et un bon candidat pour un tel échantillonnage, simple à construire de surcroît, est le treillis de Fibonacci sphérique. Le treillis de Fibonacci appartient à la famille des treillis en spirale ; il est généré par une spirale de Fermat et son mouvement angulaire entre deux points est relié directement au Nombre d'Or [Gon10], [Kei+15]. Étant donné N_F points, N_F impair, on peut déduire les coordonnées sphériques de chaque sommet i du treillis, avec $i \in [-P, P]$ et $N_F = 2P + 1$,

$$\begin{aligned} \text{lat}_i &= \arcsin \frac{2i}{2P + 1} \\ \text{lon}_i &= 2\pi i \phi_c \end{aligned}$$

Où ϕ_c est le complémentaire du Nombre d'Or, $\phi_c = \phi - 1 = \frac{1+\sqrt{5}}{2} - 1$.

Les sommets de Fibonacci construits forment autant de points d'échantillonnage de la croûte terrestre : en chacun nous stockons des valeurs pour les paramètres décrits précédemment (3.2.2, Tableau 3.1).

Triangulation. Pour passer de l'échantillonnage discret par un ensemble de sites à une représentation continue de la croûte, nous choisissons de trianguler ces échantillons : nous procéderons donc par la suite par interpolation barycentrique en tout point \mathbf{p} de la sphère, afin de pouvoir évaluer continument la croûte. Il s'agit de construire une triangulation bien formée au sens de la maximisation de l'angle minimum interne des triangles. Cette triangulation \mathcal{T} , en fait optimale, est définie par les triangles planaires sous-jacents aux triangles sphériques de la Triangulation de Delaunay Sphérique (TDS) des échantillons. Une TDS (Figure 33) est la transposition en géométrie sphérique (donc non-euclidienne) d'une triangulation de Delaunay [Ren97]. Comme la littérature n'abonde pas sur le sujet et qu'il n'existait (en 2018) que la seule implémentation en FORTRAN90 de STRIPACK pour la construction d'un tel objet, nous décrivons ici succinctement comment procéder. La distance euclidienne est remplacée par la

2. Soit une résolution moyenne de 110 km ou 35 km respectivement, pour un rayon planétaire de 6370 km similaire au rayon terrestre.

3. Qui sont les 20 sommets d'un dodécaèdre.

distance géodésique δ_g , définie entre deux points \mathbf{p} and \mathbf{q} sur une sphère de rayon R et de centre \mathbf{c} par :

$$\delta_g(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = R \arccos \frac{(\mathbf{p} - \mathbf{c}) \cdot (\mathbf{q} - \mathbf{c})}{\|\mathbf{p} - \mathbf{c}\| \|\mathbf{q} - \mathbf{c}\|}$$

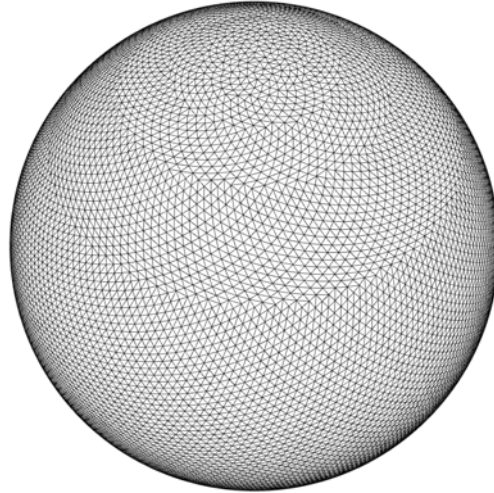


Figure 33 : Triangulation de Delaunay Sphérique de 20,000 échantillons de Fibonacci, représentée par les triangles planaires sous-jacents.

La condition de Delaunay dépend de l'évaluation de cercles circonscrits aux triangles. Dans notre cas, le centre \mathbf{G} du cercle sphérique circonscrit au triangle sphérique \mathbf{ABC} est aisé à trouver : \mathbf{G} est sur la sphère et colinéaire avec le centre de la sphère et le centre \mathbf{H} du cercle circonscrit au triangle planaire sous-jacent. Comme le segment radial connecté à \mathbf{H} est orthogonal au plan contenant ce cercle, nous trouvons \mathbf{G} (en supposant la sphère centrée sur l'origine) :

$$\mathbf{G} = R \frac{\mathbf{AB} \times \mathbf{AC}}{\|\mathbf{AB}\| \|\mathbf{AC}\|}$$

Globalement nous construisons la TDS en utilisant des algorithmes classiques de construction de triangulations de Delaunay euclidiennes [CDS12] mais adaptés à la sphère. Nous partons d'un ensemble de triangles de départ, les 8 triangles sphériques associés aux 8 triangles planaires d'un octaèdre régulier inscrit dans la sphère. Les 6 sommets de l'octaèdre font partie de l'ensemble final d'échantillons, adjoints des sommets de Fibonacci qui n'en sont pas trop proches. Nous commençons par construire une triangulation naïve par insertion d'un sous-ensemble de ces points dans les triangles sphériques, puis nous appliquons l'algorithme de bascule d'arêtes pour transformer cette triangulation naïve en TDS. Enfin nous insérons les points restant par une approche incrémentale classique, également par bascules d'arêtes, lesquelles préservent la condition de Delaunay à chaque insertion.

3.2.4 État initial de la simulation

Spécification et contrôle. L'échantillonnage de Fibonacci et la construction de la triangulation \mathcal{T} constituent des étapes génériques : elles sont donc pré-calculées une fois pour toutes, et ré-utilisées de nombreuses fois (y compris en cours de simulation pour le re-maillage épisodique de la planète, Section 3.3.2.1). La session d'édition commence à proprement parler pour l'utilisateur par la spécification de l'état initial de la simulation, c'est-à-dire N plaques paramétrées et dotées de leurs mouvements \mathcal{G} respectifs. Nous proposons pour ce faire soit une spécification intégrale/partielle par l'utilisateur, soit une génération automatique (Figure 34) :

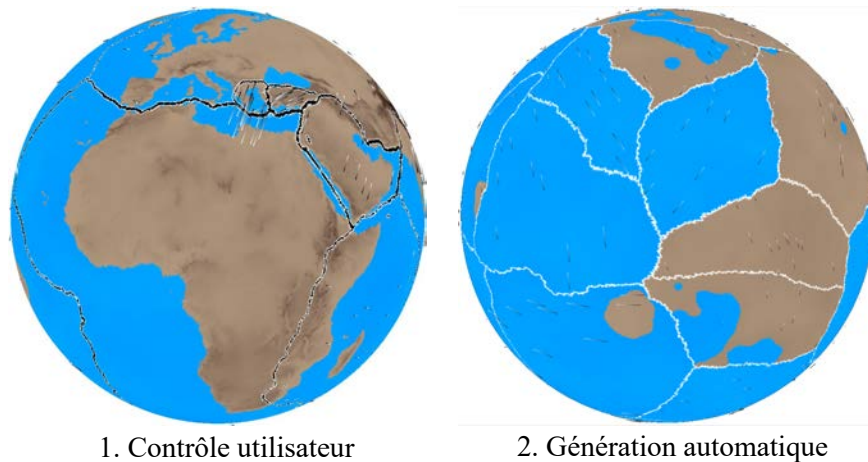


Figure 34 : Plaques tectoniques initiales : générées automatiquement par partition de Voronoi bruitée (gauche), ou spécifiées par l'utilisateur (droite). Les petits vecteurs représentent les mouvements géodésiques initiaux de chaque plaque.

1. **Spécification utilisateur.** Ce mode est possible *via* l'entrée de cartes projetées de la planète⁴, qui peuvent comprendre : une carte du découpage des plaques, chaque plaque étant représentée par une couleur indexée, une carte de type *bitmap* (*i.e.* 0 ou 1) représentant le type de croûte (ce qui définit les zones continentales et océaniques), et une carte d'élévations de surface (le relief initial). L'utilisateur, s'il le souhaite, peut également spécifier les mouvements tectoniques initiaux \mathcal{G} de chaque plaque : soit en cliquant directement sur la sphère pour indiquer (approximativement) les directions et les amplitudes des mouvements, soit de manière plus précise sous la forme d'un fichier texte comprenant la liste, par index de plaque, de paires de positions (en pixels) et d'une vitesse en mm.a^{-1} (chaque paire de pixel représentant la direction du mouvement géodésique).
2. **Génération automatique.** Dans ce mode l'utilisation de cartes projetées est remplacée par une partition automatisée de la sphère pour obtenir des plaques, avec paramètres et mouvements aléatoires. Nous générons un ensemble de sites de Voronoi uniformément

4. L'implémentation propose deux projections cartographiques à l'utilisateur : Wagner VI ou Équirectangulaire.

distribués sur la sphère. Un bruit cohérent est appliqué afin de distordre l'évaluation des distances géodésiques pour la construction de la partition de Voronoi. Ceci permet d'obtenir des frontières de plaques légèrement irrégulières tout en préservant la convexité naturelle des cellules. Chaque cellule de Voronoi représente l'étendue d'une plaque :

$$\mathcal{P}_i = \{\mathbf{q} \in \mathcal{S}^2 \mid \delta_g(w(\mathbf{q}), \mathbf{p}_i) \leq \delta_g(w(\mathbf{q}), \mathbf{p}_j), j \neq i\}$$

Où δ_g est la distance géodésique, et où w est une fonction de déformation appliquant un vecteur de somme de bruits de gradient f_k (de type *Perlin Noise* ou *Simplex Noise*) au point évalué :

$$w(\mathbf{q}) = \mathbf{q} + \epsilon \left(\sum_k f_k^x(\mathbf{q}), \sum_k f_k^y(\mathbf{q}), \sum_k f_k^z(\mathbf{q}) \right)$$

$k \in [1, N]$, où N est le nombre d'octaves de la somme fBm (*fractional Brownian motion*, terme que l'on doit à B. Mandelbrot et introduit en section 2.1.3.1 de l'état de l'art) ; chaque octave ayant une fréquence deux fois plus élevée et une amplitude deux fois moindre que l'octave précédente. En pratique N est petit (entre 3 et 8), le nombre d'octaves exact n'est pas déterminant et seul compte ici l'effet de la distorsion, la précision du maillage reste assez grossière (35 km au mieux) et l'objectif est simplement d'obtenir des frontières de plaques aléatoirement irrégulières. Le paramètre ϵ est un coefficient d'ajustement qui modère l'effet de la perturbation ; en pratique sa valeur est obtenue par réglage empirique.

Avec cette approche, les plaques générées automatiquement n'ont pas toutes la même taille ; le nombre de plaques étant petit (entre 10 et 50), une variation en aire d'un facteur 10 entre la plus petite et la plus grande plaque générée est observée en moyenne, ce qui est suffisant pour représenter une variété de plaques initiales. Une fois les plaques créées, nous leur assignons un paramétrage aléatoire, notamment le type de croûte (océanique ou continentale), ce qui peut d'ailleurs être guidé par un ratio global de couverture continentale donné par l'utilisateur. Le mouvement géodésique \mathcal{G} est également aléatoire, cependant l'amplitude ω initiale est gardée faible (entre 5 et 20 mm.a⁻¹ en vitesse de surface équivalente), mais elle grandira dès que les plaques commenceront leurs transformations, et notamment les subductions *via* le mécanisme de *Slab Pull*.

Construction numérique. Quel que soit le mode de spécification, utilisateur ou automatique, il s'agit ensuite de construire la représentation numérique des plaques. Partant de la triangulation de Delaunay sphérique globale pré-calculée, nous extrayons des sous-triangulations, une pour chaque plaque (Figure 35). Pour ce faire nous repérons et recopions les triangles et sommets associés de la TDS globale dans des triangulations sphériques dédiées. Ces opérations de création de plaques impliquent de dupliquer, de ré-indexer et de re-compacter les tableaux stockant la topologie de la TDS globale, tout en ajoutant le voisinage vide aux frontières des plaques. Au final, et étant donné N plaques partitionnant la croûte, nousinstancions N triangulations de Delaunay sphériques, qui serviront de support numérique au modèle.

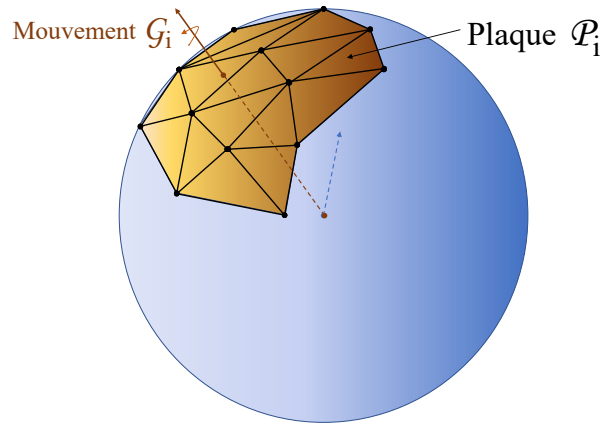


Figure 35 : Une plaque tectonique est représentée dans le modèle par une triangulation de Delaunay sphérique partielle, chaque sommet portant le paramétrage de la croûte.

3.3 Modèle tectonique dynamique

Une fois l'état initial spécifié, le cœur de la méthode consiste en une simulation approximant les phénomènes tectoniques principaux. Ce processus itératif est basé sur un pas de temps δt , fixé dans l'implémentation à deux millions d'années (2 Ma). Nous modélisons les interactions suivantes entre plaques tectoniques : subductions/obductions (3.3.1.1), collisions (3.3.1.2), génération de plancher océanique (3.3.2.1), et fragmentations (3.3.2.2). Chaque phénomène modifie les caractéristiques de la croûte globale. À chaque pas de temps nous ajoutons aussi une passe d'ajustement des élévations de surface (3.3.3), afin de reproduire sur ces échelles de temps étendues une érosion continentale et une évolution des élévations sub-océaniques. En pratique une simulation typique s'étend sur plusieurs minutes pendant lesquelles l'utilisateur peut intervenir : il peut mettre en pause la simulation à tout pas de temps pour rediriger les plaques et/ou les transformer, puis reprendre le processus automatisé de résolution tectonique.

3.3.1 Convergence

La convergence de deux plaques peut induire une subduction, ou une collision continentale, en fonction de la configuration locale. Nous exposons d'abord la méthode de résolution des subductions, avant d'aborder les collisions.

3.3.1.1 Subduction

La simulation déclenche une subduction d'après un ensemble limité de règles opérant sur les paramètres globaux de chaque plaque. Deux plaques océaniques convergentes impliquent

toujours la subduction de la plaque la plus âgée. Une plaque océanique amorce toujours une subduction si elle est face à une plaque continentale. Enfin, nous permettons l'entame d'une obduction dans le cas continental-continental, quelque soit la taille des terranes subduits ; cette obduction deviendra collision si et seulement si la masse continentale adverse est significative. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si aucune masse continentale adverse n'est rencontrée, l'obduction se déroule jusqu'à son terme, nous ne traitons pas les subductions inverses et permettons simplement l'engloutissement des terranes et de la plaque porteuse, *i.e.* une subduction complète.

En pratique, le modèle gère de manière unifiée les subductions et les obductions. Tant que les masses continentales chevauchantes ne sont pas significatives, on autorise la subduction de terranes. Sur le plan des traitements, une obduction sera identique à une subduction, au facteur d'impact près : la plaque chevauchante subira ainsi un soulèvement plus important dans le cas d'une obduction. Si les terranes subduits finissent par rencontrer une portion continentale adverse suffisamment grande, alors et uniquement alors, nous déclenchons une collision continentale. Une telle collision forme un évènement simulé discret ponctuel, donc traité intégralement sur un unique pas de temps donné ; contrairement aux subductions qui sont des processus continus, évoluant sur plusieurs pas de temps consécutifs.

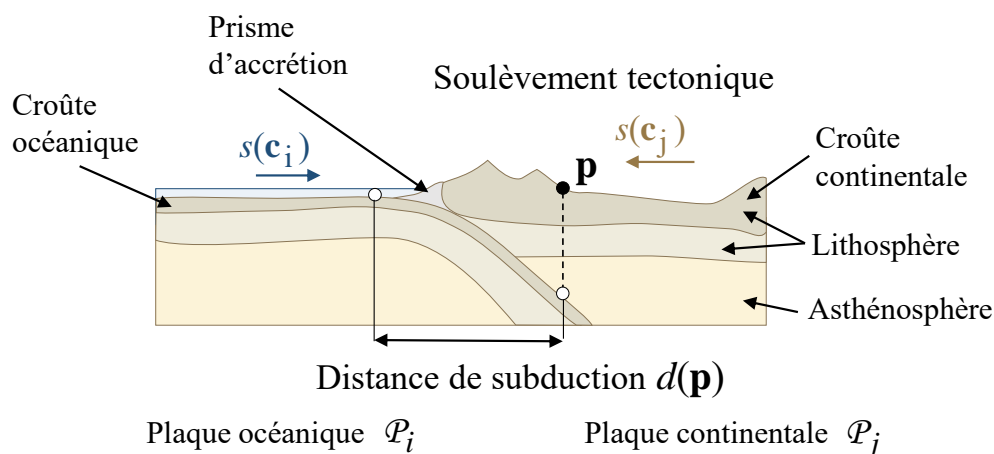


Figure 36 : Convergence dans le cas océanique-continental : la plaque océanique \mathcal{P}_i entre en subduction, induisant le soulèvement de la croûte continentale de la plaque chevauchante \mathcal{P}_j .

Modèle. En nous restreignant sans perte de généralité à un front unique de subduction entre deux plaques, nous calculons l'évolution de la croûte par soulèvement induit dans la région chevauchante. Soit \mathbf{p} un point de la plaque supérieure \mathcal{P}_j , et soit $d(\mathbf{p})$ la distance au front de subduction (*i.e.* à la zone d'amorce de la subduction, Figure 36). Soit $v(\mathbf{p}) = \|s_i(\mathbf{p}) - s_j(\mathbf{p})\|$ la vitesse de surface relative des deux plaques en ce point. Nous définissons le soulèvement \tilde{u}_j de la plaque \mathcal{P}_j comme la combinaison de trois fonctions de transfert opérant chacune sur :

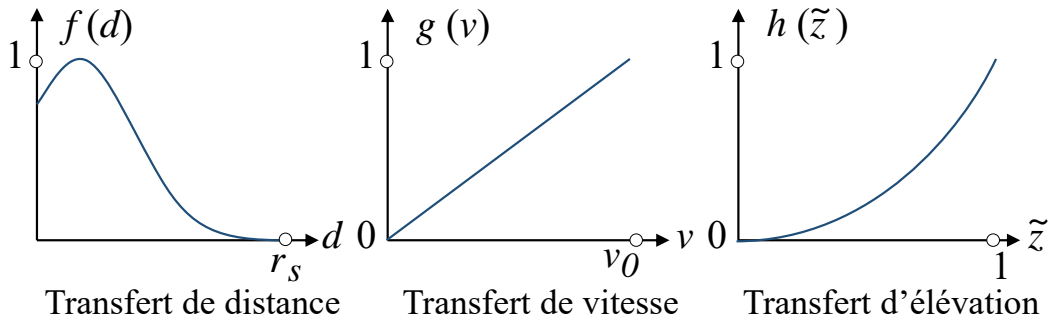


Figure 37 : Courbes de transfert pour le soulèvement de type *Andéen* (i.e. par subduction) : f prend en compte la distance au front, g prend en compte la vitesse relative des plaques, et h le relief porté par la plaque plongeante.

distance au front de subduction, la vitesse relative des deux plaques, et l'élévation moyenne locale de la plaque subduite \mathcal{P}_i (Figure 37) :

$$\tilde{u}_j(\mathbf{p}) = u_0 f \circ d(\mathbf{p}) g \circ v(\mathbf{p}) h \circ \tilde{z}_i(\mathbf{p})$$

u_0 est le coefficient constant de soulèvement du modèle (Tableau 3.2). Les fonctions de transfert f et g définissent la déformation normalisée par rapport à la distance au front de subduction $d(\mathbf{p})$ et à la vitesse relative des plaques $v(\mathbf{p})$. Dans notre implémentation, f est donnée par un produit d'exponentielles. L'important est le profil du graphe (Figure 37), avec un maximum à une certaine distance du front puis une asymptote vers zéro à partir d'un certain seuil, i.e. quand $d(\mathbf{p}) \approx r_s$, avec r_s la distance maximale d'effet des subductions (définie comme constante du modèle dans la table 3.2) :

$$f \circ d(\mathbf{p}) = e^{3d(\mathbf{p})/r_s} e^{-9d^2(\mathbf{p})/r_s^2}$$

La fonction g est définie par une simple forme linéaire croissante : $g(v) = v/v_0$. Ici, v_0 est une constante représentant la vitesse maximale autorisée des plaques (table 3.2).

Si $\tilde{z}(\mathbf{p})$ dénote l'élévation normalisée par rapport à la profondeur maximale des fosses océaniques z_t et à l'élévation continentale maximale z_c du modèle, alors l'influence du relief de la portion de croûte en subduction de la plaque \mathcal{P}_i à hauteur de \mathbf{p} est :

$$h(\tilde{z}_i) = \tilde{z}_i^2 \quad \tilde{z}_i(\mathbf{p}) = (z_i(\mathbf{p}) - z_t)/(z_c - z_t)$$

Ceci signifie, intuitivement et comme nous l'avons évoqué en préambule, que les élévations marquées ont un impact plus important sur le soulèvement. C'est le cas pour des formations océaniques (plateaux immergés) et encore plus pour des systèmes continentaux (îles, terranes), alors qu'inversement la plaine abyssale nue n'apporte que peu de soulèvement. Notons qu'en pratique du fait de l'emploi systématique d'heuristiques le modèle est entièrement

paramétrable dans ses effets ; même si nous ne l'avons pas fait, il suffirait pour cela d'introduire des poids modulant l'importance respective des fonctions de transfert.

L'âge de l'orogénie engendrée sur la plaque chevauchante, du fait du soulèvement, est simplement initialisé à zéro, *i.e.* $a_c(t + \delta t) = 0$.

La nouvelle élévation de surface de la croûte sur \mathcal{P}_j est donc :

$$z_j(\mathbf{p}, t + \delta t) = z_j(\mathbf{p}, t) + \tilde{u}_j(\mathbf{p}) \delta t$$

La direction de plissement dans la zone d'orogénie est mise à jour d'après la direction relative de convergence des deux plaques :

$$\mathbf{f}_j(\mathbf{p}, t + \delta t) = \mathbf{f}_j(\mathbf{p}, t) + \beta(s_i(\mathbf{p}) - s_j(\mathbf{p})) \delta t$$

La direction est normalisée a posteriori. Comme une subduction est un évènement continu étalé sur plusieurs pas de temps, on modifie graduellement la direction de plissement, et β est une constante pondérant l'influence pour un pas de temps de la vitesse relative.

Enfin, le modèle prends en compte et reproduit le phénomène de *Slab Pull*. Il se calcule le long du front de subduction, et permet d'intensifier la vitesse de déplacement de la plaque subduite, tout en la réorientant vers la zone de convergence. Ainsi, on met à jour le mouvement géodésique \mathcal{G} de la plaque subduite \mathcal{P}_i en modifiant son axe de rotation (normalisé après coup) :

$$\mathbf{w}_i(t + \delta t) = \mathbf{w}_i(t) + \epsilon \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\mathbf{c}_i \times \mathbf{q}_k}{\|\mathbf{c}_i \times \mathbf{q}_k\|} \delta t$$

Les points \mathbf{q}_k sont localisés sur le front de subduction. La transformation de l'axe rapproche la plaque \mathcal{P}_i de ce dernier. La modification du mouvement géodésique est proportionnée par le paramètre ϵ ; en pratique $\epsilon \ll 1$ de telle sorte qu'en un pas de temps un point \mathbf{q}_k aura une influence très limitée sur le mouvement de la plaque, alors que des fronts de subduction étendus, *i.e.* composés de nombreux points, auront une influence notable.

3.3.1.2 Collisions continentales

La convergence de deux plaques avec une présence suffisante de masse continentale de part et d'autre peut résulter, après une phase d'obduction initiale, en une collision continentale. Les terranes portés par la plaque subduite se détachent de celle-ci (*Slab Break*) et viennent se suturer au continent rencontré sur la plaque chevauchante.

Modèle. Nous considérons ici une plaque océanique \mathcal{P}_i comportant un terrane \mathcal{R} , convergeant vers une plaque continentale \mathcal{P}_j . Contrairement aux subductions, qui sont des processus continus (*i.e.* s'étendant sur de nombreux pas de temps consécutifs), une collision est un

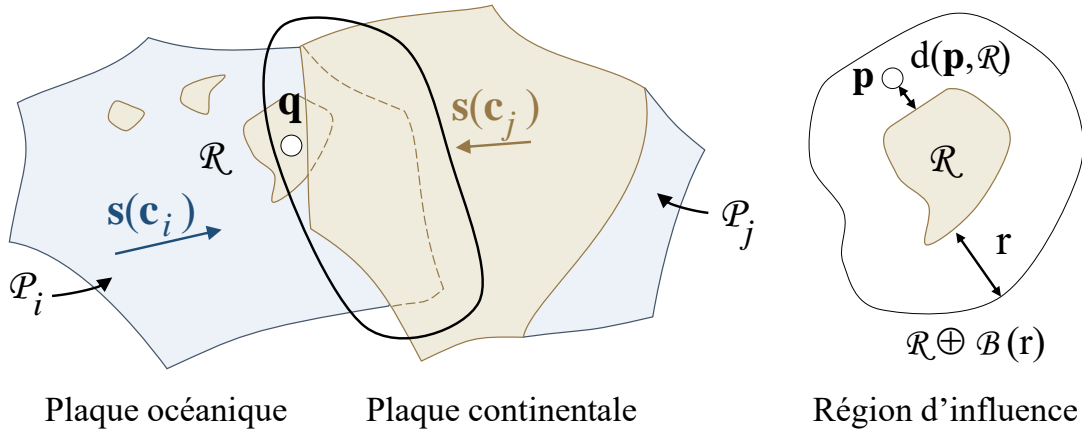


Figure 38 : Convergence entre une plaque océanique \mathcal{P}_i et une plaque continentale \mathcal{P}_j : un terrane \mathcal{R} se détache de \mathcal{P}_i , se suture à \mathcal{P}_j et provoque un soulèvement dans son voisinage.

évènement discret : à un certain temps t , le terrane \mathcal{R} arrête sa migration propre et se soude au continent adverse percuté. La collision engendre une orogénie sur \mathcal{P}_j , définie par une région d'influence $\mathcal{R} \oplus \mathcal{B}(r)$, *i.e.* l'aire du terrane augmentée morphologiquement d'un rayon r représentant la distance maximum d'influence (Figure 38). Si \mathbf{q} est le centroïde de \mathcal{R} , le rayon d'influence augmentera avec l'aire du terrane \mathcal{A} , et avec la vitesse relative des deux plaques. Nous définissons ainsi la loi de puissance suivante :

$$r = r_c \sqrt{v(\mathbf{q})/v_0} \mathcal{A}/\mathcal{A}_0$$

La constante r_c est globale au modèle et est homogène à une distance ; \mathcal{A}_0 est également une constante du modèle représentant l'aire moyenne initiale d'une plaque tectonique.

Dans la région d'influence de \mathcal{R} nous appliquons un soulèvement instantané Δz à la croûte, par une fonction de la distance au terrane compacte :

$$\Delta z(\mathbf{p}) = \Delta_c \mathcal{A} f \circ d(\mathbf{p}, \mathcal{R}) \quad f(x) = \left(1 - \left(\frac{x}{r}\right)^2\right)^2$$

Où Δ_c dénote le coefficient de collision du modèle (voir précédemment 3.2).

L'élévation de surface au point \mathbf{p} est instantanément augmentée :

$$z(\mathbf{p}, t + \delta t) = z(\mathbf{p}, t) + \Delta z(\mathbf{p})$$

La nouvelle direction locale de plissement pour cette orogénie est :

$$\mathbf{f}(\mathbf{p}, t + \delta t) = \left(\mathbf{n} \times \frac{\mathbf{p} - \mathbf{q}}{\|\mathbf{p} - \mathbf{q}\|}\right) \times \mathbf{n}$$

Avec \mathbf{n} la normale à la sphère en \mathbf{p} , et \mathbf{q} le centroïde du terrane.

3.3.1.3 Implémentation

En tout début de chaque pas de temps nous appliquons les mouvements géodésiques. Sur chaque sommet de chaque triangulation représentant les plaques, nous appliquons ainsi la rotation \mathcal{G} . Nous prenons également soin de faire évoluer le paramétrage vectoriel des sommets : direction locale de plissement f et direction locale de dorsale r sont toutes deux transformées par la rotation, afin de préserver la cohérence géométrique du modèle. Ce traitement appliqué à chaque sommet est parallélisé afin de préserver les performances. Une fois le mouvement appliqué à la croûte, nous passons au cœur des traitements consistant en la détection et l'application des effets de la convergence des plaques.

Les interactions entre plaques ne sont que rarement binaires dans la pratique. Ainsi une plaque peut sans problème entrer en subduction sous plusieurs autres plaques, formant ainsi autant de fronts de subduction. Réciproquement une plaque donnée peut chevaucher plusieurs plaques subduites. Il en va de même pour les collisions continentales, qui de surcroît, non seulement évoluent depuis les obductions, mais interviennent potentiellement en même temps que des subductions, sur une plaque donnée. La complexité du modèle vient essentiellement de son aspect dynamique. C'est pourquoi il comporte une phase importante, à chaque pas de temps, de détection et de suivi des interactions convergentes.

Suivi. Pour chaque plaque nous procédons au suivi d'une liste de ses triangles susceptibles d'interaction. Cette liste est initialement créée à partir des triangles frontières de la plaque. Dès qu'un triangle est par la suite repéré activement convergent (*i.e.* en subduction ou en collision), chacun de ses voisins est examiné et s'il est également actif est ajouté à la liste, et ceci récursivement. La liste est maintenue en mémoire et évolue à chaque pas de temps. Cette approche permet de restreindre le coût de la détection des convergences à $\mathcal{O}(\sqrt{N})$ en moyenne, si N est le nombre de triangles de la plaque, par rapport à une approche *brute force* en $\mathcal{O}(N)$ où on testerait systématiquement tous les triangles. En sus du suivi individuel des triangles des plaques, nous procédons aussi au suivi des évènements globaux entre plaques. Nous instancions ainsi en début de simulation une matrice de subduction, laquelle est en charge de marquer les paires de plaques en subduction. Cette matrice est valide et maintenue en mémoire pendant un certain nombre de pas de temps, un intervalle associé au remaillage épisodique de la planète (voir divergence, Section 3.3.2.3), après quoi elle est réinitialisée.

Détection de la convergence. Les plaques tectoniques dérivent et fatalement se rencontrent : il s'agit d'être en mesure de détecter ces zones de convergence. Comme notre modèle repose numériquement sur des triangulations partielles de la sphère (pour rappel, chaque plaque est représentée par une triangulation sphérique), nous allons procéder à des tests d'intersection entre plaques afin de détecter leur chevauchement. Pour préserver la bonne performance de la simulation, nous associons à chaque plaque une structure accélératrice tri-dimensionnelle. La façon la plus efficace de répertorier et de tester spatialement de façon accélérée un ensemble

de triangles est de construire une *Bounding Volume Hierarchy* (BVH) ⁵. Nous construisons donc, à chaque pas de temps, une telle hiérarchie de volumes englobants pour chacune des plaques, et ce de manière parallélisée.

Traitement de la convergence. Dans le même pas de temps nous testons ensuite itérativement chaque triangle inclut dans les listes de suivis des plaques. Nous mémorisons un certain nombre d'informations pour un tel triangle, à commencer par la distance au front de convergence. Cette distance est en fait une approximation, nous procédons par sur-estimation de la distance réelle en calculant $d(\mathbf{p}, t + \delta t) = d(\mathbf{p}) + s(\mathbf{p})\delta t$, c'est-à-dire que nous incrémentons simplement la distance selon la vitesse de la plaque, avec $d(\mathbf{p}) = 0$ pour un triangle qui entre dans la liste de suivi (donc situé sur le front de convergence). Ce calcul est bien sûr inexact, cependant procéder autrement induirait une dégradation des performances de la simulation, en effet il faudrait calculer la distance au triangle le plus proche situé sur le front de subduction, donc parcourir le maillage (pour chaque triangle), tout en discriminant entre les possibles multiples plaques chevauchantes. Au final et en pratique nous retenons cette approximation, s'avérant extrêmement rapide et produisant de bons résultats. Pour un triangle T_i appartenant à une plaque \mathcal{P}_i , la première chose à faire est de tester s'il est déjà marqué comme étant en subduction et si $d(p) > r_s$. Si tel est le cas il n'a plus aucune influence sur la tectonique, un tel triangle représentant une partie de la croûte entièrement engloutie dans le manteau, il peut donc disparaître des traitements. Sinon, nous procédons aux tests d'intersection : nous émettons un rayon connectant le centre de la planète au barycentre du triangle T_i , et nous testons l'intersection avec tous les triangles des autres plaques, ceci de manière accélérée grâce aux multiples BVH. Pour chaque intersection trouvée, il faut ensuite la valider.

- Si le triangle intersecté est lui-même en subduction l'intersection est rejetée (une subduction ne peut avoir lieu que sous une plaque dominante).
- Si le triangle T_i n'est pas encore marqué comme étant en subduction (*i.e.* il commence à entrer dans la zone de convergence) et que la subduction entre la plaque \mathcal{P}_i et la plaque intersectée \mathcal{P}_j n'est pas autorisée, l'intersection est également rejetée. Le modèle autorise une subduction entre deux plaques, soit en lisant l'état de la matrice de subduction, soit en testant les règles présentées précédemment (3.3.1.1) si l'entrée n'est pas présente dans la matrice.
- Sinon et avant d'accepter la subduction/obduction, nous vérifions si les trois sommets du triangle T_i et si les trois sommets du triangle intersecté T_j sont tous continentaux : si tel est le cas nous changeons le mode de suivi de T_i en celui de collision continentale et nous mémorisons l'indice j de la plaque rencontrée ainsi que l'indice du triangle intersecté.

5. Procédé standard dans le domaine du rendu par tracé de rayons, pour traiter la géométrie des scènes et réaliser des intersections rayon-triangle rapides.

Mode de subduction Dans les autres cas et s'il ne s'agit pas d'une collision nous procédons à la subduction/obduction du triangle. La subduction du triangle T_i consiste au calcul du soulèvement induit sur le triangle T_j et à la mise à jour de certaines données de T_i et de sa plaque \mathcal{P}_i . Le soulèvement est calculé comme présenté dans le modèle (3.3.1.1) au barycentre de T_i et distribué sur les trois sommets du triangle intersecté T_j . Si ces sommets sont continentaux, le type d'orogénie évolue vers le type *Andéen* par $o(t+\delta t) = \max(0, o(t) - \epsilon)$, avec ϵ petit⁶. Ensuite nous mettons à jour l'axe et la vitesse du mouvement \mathcal{G}_i de \mathcal{P}_i pour refléter le *Slab Pull* exercé sur la plaque. Le triangle T_i ainsi que ses sommets sont marqués comme étant en subduction, nous pouvons donc examiner à leur tour ses trois voisins immédiats. Enfin, pour le rendu visuel de la croûte, nous ajustons les élévations de tous les triangles en subduction qui portent de la croûte océanique et qui sont situés le long d'un front de convergence (ayant donc une valeur de d petite) pour les transformer en fosses océaniques, ou fosses abyssales. En pratique donc, chaque sommet d'un tel triangle porte deux élévations : l'élévation réelle pour le rendu (en l'occurrence une fosse), et l'élévation historique qui est préservée uniquement pour le calcul du soulèvement, induit par ce triangle lorsqu'il passera sous la plaque chevauchante et qu'il quittera le front de convergence (et ne sera plus visible).

Mode de collision À chaque pas de temps, une fois les BVH construits, le suivi des convergences effectué et les subductions traitées par triangle, nous procédons au traitement spécifique des collisions continentales. Nous examinons ainsi séquentiellement chaque plaque \mathcal{P}_i :

1. D'après la liste de suivi des triangles de \mathcal{P}_i nous construisons, pour chaque plaque adverse \mathcal{P}_j , une liste de triangles de \mathcal{P}_i impliqués dans la collision avec \mathcal{P}_j .
2. Pour chaque plaque \mathcal{P}_j , nous acceptons la collision uniquement si au moins un triangle de \mathcal{P}_i a dépassé la distance minimale de collision, fixée à 300 km dans l'implémentation. Il s'agit d'un test sur d la distance au front de convergence, *i.e.* l'interpénétration minimale des deux plaques est à garantir avant de procéder au traitement de la collision.
3. La première plaque \mathcal{P}_j qui passe le test est traitée :
 - a) *Calcul des terranes.* Nous détectons par exploration du maillage de \mathcal{P}_i tous les terranes impliqués dans la collision. Chaque terrane est une collection de triangles connexes de \mathcal{P}_i qui portent de la croûte continentale. Un traitement spécifique est également ajouté afin d'inclure dans les terranes toute portion de mer intérieure éventuelle ; il arrive ainsi que des mers intérieures se forment lors de la rencontre de deux continents, la collision emprisonnant une étendue de croûte océanique : il s'agit de bien inclure cette zone dans le terrane/continent résultant lorsque celui-ci entre à nouveau en collision.
 - b) *Vérification de la zone de collision.* À partir des données de convergence mémorisées lors du suivi, nous procédons à l'évaluation de la masse continentale rencontrée. En partant des triangles de \mathcal{P}_i en collision nous cherchons à calculer le nombre de

6. 0.1 dans l'implémentation

triangles continentaux de \mathcal{P}_j atteignables depuis les triangles intersectés. Si cette portion continentale n'est pas assez étendue par rapport aux terranes calculés nous arrêtons le traitement pour \mathcal{P}_j ⁷ ; sinon nous poursuivons l'algorithme de collision.

- c) *Slab Break*. Cette étape consiste à extraire les terranes de leur plaque porteuse \mathcal{P}_i . À partir des indices des triangles, nous construisons un duplicata du maillage restreint aux terranes, avant de supprimer ces triangles de la triangulation de \mathcal{P}_i . En terme de structures de données il s'agit de ré-indexer correctement les tableaux stockant la topologie de la triangulation ; la suppression des triangles de \mathcal{P}_i suit le même principe de re-topologie et de re-compactation.
- d) *Soulèvement*. Nous procédons au calcul du soulèvement induit sur le continent rencontré sur la plaque adverse \mathcal{P}_j en suivant le modèle présenté en 3.3.1.2. En pratique toutefois nous ne calculons pas directement la région de collision globale car l'implémentation opère sur la granularité d'un triangle : nous parcourons donc le maillage de \mathcal{P}_j depuis les intersections trouvées avec les terranes adverses, c'est-à-dire que nous passons de triangle en triangle, par voisinage, cette propagation se fait pour chaque triangle en collision appartenant aux terranes, jusqu'à atteindre le rayon de collision calculé ; au passage nous appliquons le soulèvement aux sommets.
- e) *Suture*. Le traitement s'achève par l'augmentation du maillage de \mathcal{P}_j avec les triangles des terranes. Au passage nous ré-initialisons la frontière de la plaque et donc la liste de suivi de convergence de ses triangles. Enfin, pour pallier à de nombreux effets de bord dû aux opérations intensives sur les topologies des deux plaques impliquées dans la collision, nous arrêtons ici le traitement des collisions pour ce pas de temps : *i.e.* nous n'autorisons une seule telle collision par pas de temps, les autres collisions en cours auront une chance d'être traitées aux pas de temps suivants. Ceci permet également de préserver la performance de la simulation, le traitement des collisions étant coûteux.

Au final et sur le plan numérique la convergence repose sur des intersections entre plaques, calculées de manière optimisée grâce à l'usage de structures accélératrices classiques. La difficulté vient de la dynamique induite par la simulation ; pour y faire face nous proposons un ordonnancement des opérations reflétant la phénoménologie de la tectonique : d'abord effectuer le suivi de la convergence générale des plaques, puis traiter subductions/obductions de manière locale (au niveau des triangles) mais d'après des règles globales, enfin ajouter une passe de résolution dédiée au traitement des collisions (qui évoluent naturellement depuis les obductions). Globalement et afin d'assurer un traitement efficace nous procédons à des simplifications qu'il convient de noter à nouveau : sur-estimation des distances aux fronts de convergence et représentation dynamique entièrement surfacique (les plaques sont contraintes

7. En pratique, il est possible que la collision inverse soit acceptée plus loin dans le traitement, *i.e.* la plaque \mathcal{P}_j collisionne avec \mathcal{P}_i ; ceci car nous passons en revue toutes les plaques et que leurs triangles respectifs ont été correctement marqués en collision dans l'étape de suivi. Ceci peut aussi se dérouler lors d'un pas de temps ultérieur.

à la surface de la sphère, nous ne intéressons qu'à leur chevauchement). Enfin, notons que nous modulons légèrement le soulèvement dû à la convergence, à la fois par subduction ou collision, avec du bruit cohérent (somme fBm de bruit de gradient) afin de produire de la variété sur le relief généré.

3.3.2 Divergence

Nous avons présenté les deux modèles de convergence des plaques tectoniques. La divergence est le pendant naturel à la convergence et est nécessairement observée du fait de présence exclusive de mouvements rigides. Les deux phénomènes tectoniques essentiels associés à la divergence sont la génération de croûte océanique, le long des dorsales océaniques, et la fragmentation de plaques. Le premier phénomène s'articule symétriquement aux subductions, quand le second vient contre-balancer les collisions continentales. La section 3.3.2.1 et la section 3.3.2.2 présentent les modèles conceptuels choisis pour recréer respectivement la production de plancher océanique et le *rifting* d'une plaque. La section 3.3.2.3 montre comment procéder en pratique pour implémenter ces deux modèles.

3.3.2.1 Génération du plancher océanique

La croûte océanique se forme le long de la dorsale qui sépare deux ou plus plaques divergentes (Figure 39), quelque soit la nature des plaques séparées. À mesure que la croûte océanique vieillit elle se refroidit et se densifie, ce qui induit la tendance à l'affaissement et la formation de plaines abyssales (par opposition aux dorsales qui sont comme des chaînes de relief, des proéminences sous-marines). Nous voudrions ici combler les vides laissées entre les plaques divergentes par l'introduction d'une nouvelle étendue de croûte, de type océanique.

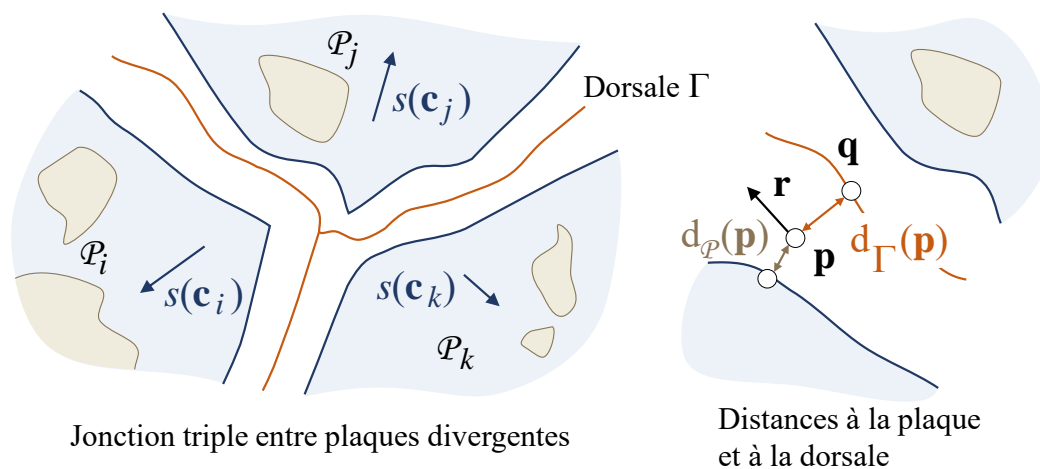


Figure 39 : Divergence de plaques et génération complémentaire de plancher océanique.

Soit un point d'intérêt \mathbf{p} situé dans la zone de divergence. Soit $d_\Gamma(\mathbf{p})$ et $d_{\mathcal{P}}(\mathbf{p})$ les distances depuis \mathbf{p} respectivement à la dorsale et à la plaque divergente la plus proche (Figure 39). Nous définissons le facteur interpolant $\alpha = d_\Gamma(\mathbf{p}) / (d_\Gamma(\mathbf{p}) + d_{\mathcal{P}}(\mathbf{p}))$. L'élévation du point $z(\mathbf{p}, t + \delta t)$ dans la zone divergente est calculée par mélange continu entre l'interpolation linéaire des élévations des plaques \bar{z} et un patron d'élévation représentant un profil générique de dorsale z_Γ (Figure 40) :

$$z(\mathbf{p}, t + \delta t) = \alpha \bar{z}(\mathbf{p}, t) + (1 - \alpha) z_\Gamma(\mathbf{p}, t)$$

Nous calculons la direction parallèle à la dorsale \mathbf{r} , d'intérêt pour l'amplification finale du modèle de la croûte. Soit \mathbf{q} la projection de \mathbf{p} sur la dorsale, nous définissons :

$$\mathbf{r}(\mathbf{p}) = (\mathbf{p} - \mathbf{q}) \times \mathbf{p}$$

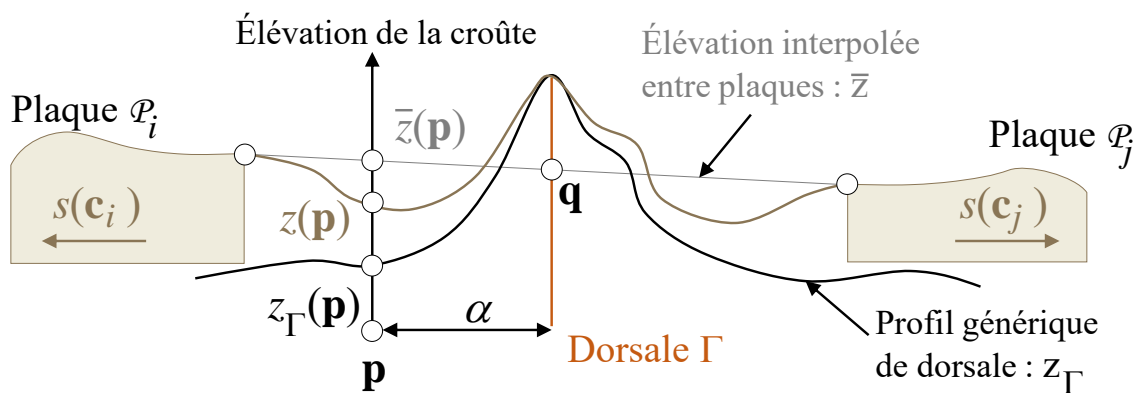


Figure 40 : Calcul du nouveau relief océanique le long de la dorsale et depuis elle : $z(\mathbf{p})$ est défini par mélange entre un profil générique de dorsale z_Γ et les élévations interpolées \bar{z} .

3.3.2.2 Fragmentation de plaque

Le *rifting* d'une plaque est modélisé comme un évènement discret, intervenant à un instant précis t . Il s'agit de la fragmentation de la plaque en plusieurs sous-plaques, lesquelles auront tendance par la suite à diverger les unes des autres. Ce phénomène occupe un rôle important dans le réalisme global des planètes virtuelles générées car il empêche la formation trop rapide des super-continentes (dû aux collisions continentales).

Le modèle fracture une plaque \mathcal{P}_i en n sous-plaques \mathcal{P}_{ij} . Nous fixons n petit, en pratique $n \in [2, 4]$. La ligne de fracture et donc la forme des nouvelles plaques \mathcal{P}_{ij} est calculée par la distribution uniforme de n centroïdes \mathbf{c}_j sur la plaque \mathcal{P}_i suivi de la construction des cellules de Voronoi correspondantes, qui donneront l'étendue des nouvelles plaques. Nous ajoutons une déformation aux cellules dans l'idée d'obtenir des lignes de fractures irrégulières entre plaques : le procédé pour y parvenir est le même que celui décrit pour la création des plaques tectoniques (Section 3.2.4), pour rappel nous appliquons simplement du bruit cohérent dans

l'évaluation de Voronoi. Pour finir, nous donnons des directions aléatoires, mais globalement divergentes, aux nouvelles plaques \mathcal{P}_{ij} :

$$\mathbf{w}_{ij} = \mathbf{q}_j \times \mathbf{c}_j \quad \mathbf{q}_j = \frac{1}{n-1} \sum_{k=0, k \neq j}^n \mathbf{c}_k$$

L'axe est bien entendu normalisé a posteriori, \mathbf{q}_j représente le barycentre des centroïdes autre que celui de la plaque considérée. La vitesse de divergence aléatoire est initialement faible (quelques millimètres par an), mais grandira avec la survenue de futures subductions.

La fragmentation d'une plaque \mathcal{P}_i est représentée par une variable aléatoire, laquelle suit une loi de Bernouilli de paramètre p_i :

$$p_i = \min(1, p \overline{x_c} A / A_0)$$

L'espérance p_i dépend d'une constante p , du ratio de couverture continentale de la plaque $\overline{x_c}$ et de l'aire de la plaque rapportée à l'aire moyenne des plaques (une constante du modèle). La probabilité de fragmentation d'une plaque évolue⁸ donc avec elle au cours de la simulation, selon l'étendue de ses zones continentales et de son aire, deux paramètres modifiés par les subductions.

L'utilisateur peut librement influencer sur la constante p pour modifier le comportement de la simulation : par exemple poser $p = 0$ désactive complètement les fragmentations, ce qui favorisera l'apparition de super-continents. Enfin, il peut alternativement décider d'une fragmentation arbitraire à un pas de temps donné ; pour cela il lui suffit de mettre en pause la simulation et de cliquer sur une plaque de son choix, un *rifting* est ensuite automatiquement appliqué à la plaque.

3.3.2.3 Implémentation

Le modèle de divergence tel que présenté semble d'emblée complexe à mettre en œuvre en terme de temps de calcul. En effet, et pour la seule génération de plancher océanique, il faudrait repérer les zones de vide laissées entre plaques, donc faire des calculs de distance entre frontières, puis augmenter les triangulations par de nouveaux échantillons tout en prenant soin de ne pas introduire de chevauchement entre plaques (qui seraient détectés comme des zones de convergence par l'algorithme) tout assurant l'étanchéité de la planète, *i.e.* la couverture complète des zones de vide. Si on souhaite préserver l'interactivité de la simulation, calculer à chaque pas de temps l'augmentation des TDS tout en garantissant ces contraintes est en fait une tâche difficile.

8. Notons que si les paramètres associés aux plaques étaient constants, la somme des variables aléatoires suivrait de manière approximée une loi de Poisson de paramètre $\lambda = \sum_i p_i$, qui décrirait donc le comportement global de la planète par la probabilité d'observer un ou plus événements de *rifting* dans une certaine fenêtre de temps.

En lieu et place de cette approche, nous proposons une alternative. Elle consiste à laisser pendant un certain nombre de pas de temps les plaques dériver, donc laisser se développer les zones de vide entre elles ; puis de procéder à la résolution de la divergence globalement sur toute la planète, en une fois. Il s'agit d'un traitement épisodique, de période variable $\Delta T = (1 - \alpha)M + \alpha m$, dépendant du facteur interpolant $\alpha = \min(1, v_m/v_0)$ calculé à partir de la vitesse de plaque maximale observée v_m ; la période varie entre $m = 32$ Ma et $M = 128$ Ma, dans l'implémentation.

Au terme de chaque période nous procédons au traitement global de la divergence. Plutôt que de réaliser des augmentations de triangulations de Delaunay coûteuses, nous proposons de re-mailler complètement la planète. L'idée est de ré-utiliser à bon escient la Triangulation de Delaunay Sphérique globale qui a servi à la création de l'état initial de la simulation ; pour chaque sommet de la TDS : soit il tombe dans une des plaques existantes à l'instant t , auquel cas nous allons lui attribuer les données courantes de la croûte, soit il tombe dans une zone de divergence auquel cas nous lui attribuerons de nouveaux paramètres, ceux exposés par le modèle de génération de croûte océanique en 3.3.2.1. Plus en détails, voici l'algorithme :

1. *Pré-traitement des plaques.* Pour chaque plaque, en parallèle : nous re-calculons sa frontière en ne prenant pas en compte ses triangles en subduction, si la plaque est entièrement subduite, nous la détruisons, sinon nous construisons un BVH sur ses triangles.
2. *Échantillonnage.* Pour chaque sommet \mathbf{p} de la TDS globale :
 - a) Nous construisons un rayon passant par le centre de la planète et \mathbf{p} . Pour chaque plaque existante, nous testons l'intersection rayon-triangle via le BVH. Si l'intersection se fait avec un triangle en subduction ou en collision, nous ne la prenons pas en compte. Sinon et s'il y a intersection, nous procédons à l'interpolation barycentrique des paramètres de la croûte dans le triangle intersecté et nous les attribuons au sommet. Nous mémorisons pour ce sommet l'indice de la plaque intersectée.
 - b) Si aucune intersection valide n'est trouvée, c'est que le sommet tombe dans une zone de divergence entre plaques. Les plaques sont donc passées en revue et nous calculons le point \mathbf{q}_1 le plus proche du sommet situé sur une frontière de plaque. Nous calculons au passage le second point \mathbf{q}_2 le plus proche, également situé sur une frontière de plaque mais sur une autre plaque que la plus proche (une zone de divergence est entourée par au moins deux plaques). À partir de ces deux points, nous pouvons procéder au calcul de la nouvelle croûte océanique en \mathbf{p} tel que décrit conceptuellement en 3.3.2.1. Pour ce faire nous avons besoin d'une estimation du point le plus proche situé sur la dorsale médiane : nous prenons simplement le milieu du segment sphérique reliant les deux points frontière, *i.e.* $\mathbf{q}_\Gamma = R \frac{\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2}{\|\mathbf{q}_1 + \mathbf{q}_2\|}$. Pour finir, nous mémorisons pour le sommet global \mathbf{p} l'indice de la plaque existante la plus proche.
3. *Nouvelles plaques.* Il s'agit ensuite de partitionner l'ensemble des triangles de la TDS globale afin de re-créeer les plaques tectoniques. Nous nous servons pour cela des

assignations précédentes d'indices de plaque, que nous avons attribués à chaque sommet \mathbf{p} de la TDS globale. Nous dupliquons donc des sous-triangulations de la TDS, d'après l'assignation des triangles aux plaques : de la même façon que pour la création de l'état initial de la simulation, chacun de ces groupes de triangles deviendra (par duplication/ré-indices) une nouvelle plaque tectonique. L'effet global est de préserver la forme des plaques au pas de temps précédant le remaillage tout en les augmentant pour couvrir les zones de divergence, et ce de manière étanche. Chaque plaque conserve son mouvement géodésique précédent. Notons que les subductions sont en pratique réinitialisées car tous les triangles subduits disparaissent lors du remaillage ; la matrice de subduction est donc au passage invalidée et reconstruite pour les pas de temps suivants.

Enfin, après le remaillage global et la reconstitution de la planète, nous procédons à une phase de test stochastique pour autoriser la fragmentation des plaques. Pour une plaque donnée, si le test réussi, nous appliquons son *rifting* en procédant exactement comme décrit en 3.3.2.2. En pratique, avant de détruire la plaque, nous procédons encore une fois à la partition de ses triangles et à la création des sous-plaques par duplication, ré-indices et re-compaction de sa topologie.

3.3.3 Érosion continentale et affaissement océanique

À chaque pas de temps et outre la reproduction des quatre phénomènes tectoniques principaux, nous appliquons une passe d'ajustement des élévations de surface, c'est-à-dire du relief continental et sous-marin. Ceci est nécessaire afin de préserver le réalisme global de la simulation : en effet sur ces grandes échelles de temps (pour rappel, le pas de temps est de deux millions d'années) les orogénies continentales subissent une érosion significative. De plus, le relief sous-marin évolue, avec le temps la croûte océanique se densifie et s'affaisse, ce qui tend à former des plaines abyssales. Dans les deux cas il est important de parvenir à recréer ces effets.

Érosion continentale. Le relief des continents est sculpté par une grande variété de phénomènes érosifs notamment hydrauliques, thermiques, glaciaires et éoliens. Comme, problématiquement, de tels facteurs géomorphologiques *exogènes* agissent surtout localement sur le relief (en-deçà de 10 km) pour le sculpter en détail, que par ailleurs nous travaillons sur une planète complète, avec une résolution de ≈ 50 km, et que la granularité temporelle est grande (2 Ma), nous ne pouvons appliquer aux élévations qu'un modèle d'érosion simple. Nous ajustons donc à chaque pas de temps les élévations continentales selon la formule suivante :

$$z(\mathbf{p}, t + \delta t) = z(\mathbf{p}, t) - \frac{z(\mathbf{p}, t)}{z_c} \epsilon_c \delta t$$

Évolution océanique. La croûte océanique émerge et s'étend depuis les dorsales à des vitesses géologiques ; cependant à mesure que les millions d'années passent, elle prend plus de densité et son élévation moyenne décroît. Pour reproduire cela, nous appliquons l'affaissement suivant :

$$z(\mathbf{p}, t + \delta t) = z(\mathbf{p}, t) - \left(1 - \frac{z(\mathbf{p}, t)}{z_t}\right)\epsilon_o\delta t$$

Par ailleurs, les fosses océaniques, qui sont les lieux les plus profonds de la planète, tendent à se remplir avec ces millions d'années de sédiments, notamment par la présence du prisme d'accrétion créé par la subduction entre les deux plaques délimitant la fosse. Nous approximons cet effet en modifiant l'élévation des points situés dans des fosses ainsi :

$$z(\mathbf{p}, t + \delta t) = z(\mathbf{p}, t) + \epsilon_t\delta t$$

Les trois constantes ϵ_c , ϵ_o et ϵ_t quantifient pour le modèle l'érosion continentale, l'affaissement océanique et le dépôt sédimentaire (Table 3.2).

Enfin, nous appliquons à nouveau un peu de bruit cohérent afin de moduler localement l'importance de ces trois effets d'ajustement, pour plus de variété sur le modèle final.

3.4 Résultats

Notre méthode a été implémentée en C++ et testée sur un Intel Core i7 – 6700 K à 4 GHz avec 16 Go de RAM. Les planètes montrées ici ont été générées par notre algorithme de re-création tectonique. Sauf mention contraire, nous avons utilisé 500 000 échantillons pour le modèle sur une planète de rayon 6 370 km, similaire à la Terre, soit une précision moyenne de ≈ 35 km.

3.4.1 Validation

Comparaison avec d'autres méthodes. Alors que beaucoup de méthodes ont été proposées pour la modélisation et la génération de terrains et de paysages virtuels, bien peu d'approches existent pour la synthèse de planètes complètes. Ces approches sont pour l'instant toutes fractales et s'appuient soit sur des combinaisons de bruits procéduraux [Ebe+98], soit sur une variante de l'algorithme de *mid-point displacement* [Der+11].

Les approches fractales mettent naturellement une emphase sur l'auto-similarité, et de ce fait échouent à produire des structures de relief caractéristiques, à la fois sur la forme et sur la distribution, telles que des groupes d'îles près de continents, ou des cordillères le long des côtes. La Figure 41 montre une comparaison que nous avons réalisé entre une planète procédurale synthétique produite par un algorithme basé bruit et notre approche tectonique.

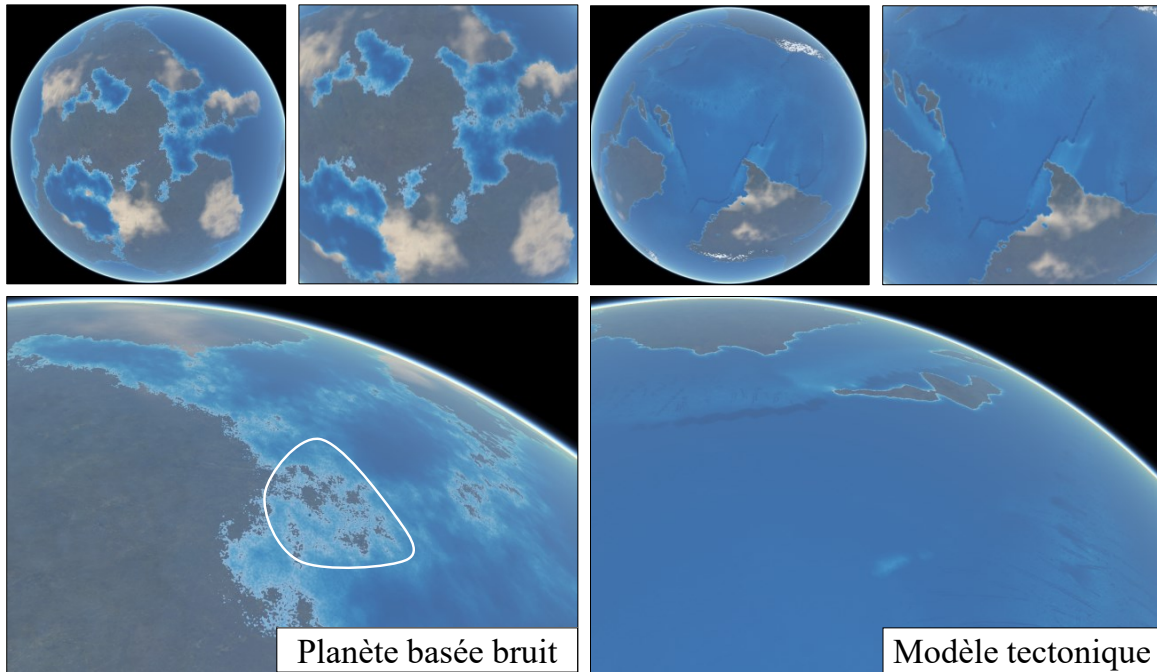


Figure 41 : Comparaison entre (à gauche) une planète générée par une somme fBm de bruit et (à droite) notre méthode. Les modèles basés bruit exhibent des formes continentales homogènes car fractales, de hautes fréquences dans les élévations océaniques, les montagnes ne sont pas distribuées en chaînes et sont mal localisées, plutôt situées au centre des continents. De manière contrastée, notre méthode produit des structures océaniques et continentales distinctes, incluant notamment une symétrie des côtes, des cordillères côtières et des fosses océaniques.

Étude. Nous avons mené une étude utilisateur à étendue limitée afin d'estimer le réalisme perçu des planètes de synthèse générées par notre modèle tectonique en comparaison avec l'approche fractale à base de bruits [Ebe+98]. Nous avons choisi de comparer les résultats en utilisant une expérience à choix forcé à deux alternatives. Les participants de l'expérience ont été confrontés à 6 paires d'images, et nous leur avons demandé de choisir la plus réaliste dans chaque cas. L'ordre global de présentation, ainsi que l'ordre des paires, ont été tirés au hasard. Dans l'expérience, le rendu graphique des deux planètes effectué par nos soins a été strictement identique, dans le but d'éliminer ce biais de perception. 24 personnes, âgées entre 22 and 28 ans, ont participé à l'étude. Notre modèle tectonique a reçu un total de 97 votes, comparé aux 47 reçus pour le modèle fractal classique. Ceci produit un χ^2 de 8.3 et une p -value de moins de 0.4%, ce qui penche en faveur de notre modèle.

Nous avons enfin fait valider le résultat de notre simulation par Nicolas Coltice, géophysicien français renommé et expert en tectonophysique. Il s'est montré très positif sur le réalisme global de l'animation des planètes virtuelles et a confirmé que les effets produits par notre modèle lui apparaissaient plausibles. De plus, l'expert a relevé quelques défauts mineurs qui devraient être pris en compte pour améliorer la méthode, ce qui permet d'envisager des extensions et corrections futures intéressantes.

3.4.2 Performance

Globalement, le calcul du modèle géométrique dynamique est implémenté intégralement sur CPU. Le GPU n'intervient que pour la visualisation de l'état de la croûte à un instant t .

Résolution planétaire	102 km	78 km	50 km	35 km
Échantillons	60k	100k	250k	500k
Subductions	0.08	0.14	0.26	0.65
Collision continentale	0.02	0.04	0.69	0.63
Opérations parallèles	0.09	0.10	0.29	0.62
Total	0.19	0.28	1.24	1.90
Plancher océanique	0.58	1.22	3.58	13.10
Fragmentation	0.23	0.21	1.50	7.70

Table 3.3 : Temps moyens d'exécution, sur un pas de temps, en secondes et pour différentes résolutions planétaires ; la planète a un rayon de 6 370 km. Les opérations parallèles (par plaque) comprennent : la passe d'ajustement des élévations, le calcul des mouvements géodésiques et la construction d'un BVH.

Le tableau 3.3 rassemble des temps d'exécution moyens pour la génération dynamique de la croûte. La planète a, en état initial, 40 plaques tectoniques et un ratio de couverture continentale de 0.3. La génération de la croûte océanique et la fragmentation (divergence) représentent les étapes les plus lourdes, mais ne sont effectuées qu'épisodiquement, entre 32 et 128 Ma d'après la vitesse de plaque maximum observée ; les autres phénomènes (convergence) peuvent être calculés à fréquence interactive à chaque pas de temps. L'application des mouvements géodésiques des plaques, le contrôle des élévations de surface, le calcul des données globales des plaques et la construction des BVH sont parallélisés sur plusieurs threads CPU du fait de la nature indépendante de ces opérations.

3.4.3 Contrôle utilisateur

L'originalité de notre approche consiste à combiner un modèle géométrique dynamique pour l'approximation et la simulation de phénomènes tectoniques déterminants, avec la possibilité de guider interactivement la simulation.

L'intervention de l'utilisateur n'est toutefois pas requise, et notre méthode peut générer d'elle-même des planètes synthétiques possédant une dimension temporelle. Étant donné une distribution initiale de plaques dotées de mouvements, une couverture initiale océanique et continentale, le modèle calcule leur évolution et peut synthétiser automatiquement une planète comportant des structures émergentes caractéristiques telles des dorsales océaniques, des fosses, des plaines abyssales, et des formes continentales plausibles arborant linéarité et symétrie des côtes, des arcs d'îles, ainsi que des distributions géologiquement cohérentes de chaînes montagneuses. L'expérimentation montre que de telles planètes réalistes sont obtenues au bout de quelques centaines d'itérations, soit en moyenne ≈ 250 Ma.

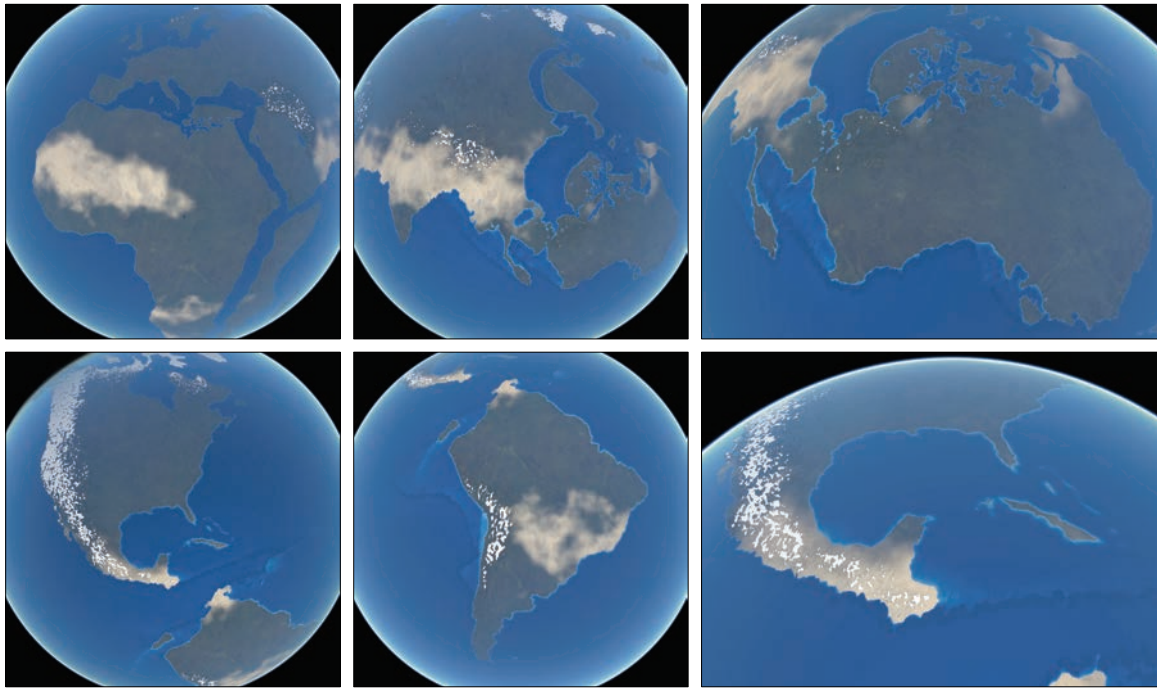


Figure 42 : Exemple de spécification utilisateur de l'état initial de la simulation. L'évolution de la Terre a travers notre modèle part des données actuelles d'élévation et de mouvement des plaques. À 80 Ma les continents ont dérivé et collisionné par endroits, et se sont fragmentés en d'autres.

L'utilisateur peut s'il le souhaite malgré tout intervenir. Il peut prescrire partiellement ou complètement l'état planétaire initial. À titre d'exemple nous avons reproduit la Terre, avec ses mouvements tectoniques actuels, et avons observé le *rifting* du continent africain et la collision de l'Australie avec l'Asie (Figure 42). L'utilisateur peut également intervenir temporellement, durant la simulation, pour prescrire des scénarios de contrôle (Figure 43, 44). À tout moment il peut sélectionner des plaques, ajuster leur mouvement, les fragmenter (Figure 45) ou changer directement les paramètres de la croûte.

Notre méthode ne reposant pas sur une physique précise, nous ne sommes pas en mesure de prédire l'évolution d'une planète réelle telle la Terre, toutefois la méthode offre la possibilité de contrôle et est suffisamment plausible pour envisager l'application intéressante de conception de scénarios de fiction et d'effets spéciaux.

3.4.4 Limitations

Contrôle. Dans l'implémentation actuelle l'utilisateur peut contrôler le mouvement des plaques tectoniques et intervenir globalement sur chaque plaque (fragmentation, changement du type de croûte, etc.). Toutefois, ce type de contrôle n'est qu'indirect. Au final, il n'a pas de capacité d'agir précisément, localement sur la forme finale des continents, ou sur, par exemple, des îles prises isolément. Cependant cette limitation peut être levée, on pourrait

ainsi envisager une extension de la méthode, orientée édition, où l'utilisateur pourrait peindre à l'aide du dispositif de pointage, localement les caractéristiques de la croûte, notamment l'élévation et le type de croûte.

Réalisme. Dans notre méthode les phénomènes tectoniques ne sont reproduits qu'au premier ordre et de manière phénoménologique, en s'appuyant sur des heuristiques efficaces mais simples. Toutefois l'approche reste plausible, ainsi que confirmée par M. Coltice. Dans ses observations, il nous a fait parvenir une liste de limitations principales que nous examinons ici.

Dans le monde réel, le *rifting* déchire progressivement la croûte au lieu de procéder par fracture directe de la croûte continentale ; la cause principale étant la localisation des pôles de rotation le long du rift⁹. Dans notre modèle nous nous appuyons sur une divergence directe et franche des fragments de la plaque afin d'éviter des artefacts de collision entre les sous-plaques initialement proches. La collision des sous-plaques par rotation les aurait suturées et donc aurait annulé le processus de fragmentation. Notons que si nous souhaitions nous montrer particulièrement réaliste, *i.e.* reproduire ce déchirement progressif de la plaque, il faudrait un algorithme de suivi dédié particulier de la fragmentation et qui court-circuiterait la détection de la convergence.

Notre modèle de convergence tend à générer beaucoup d'obductions de masses continentales avec une ampleur qui diffère des observations physiques. La raison est essentiellement calculatoire : la détection des obductions massives, leur interdiction et leur transformation en subductions inverses ajouteraient des étapes de calcul lourdes dans la boucle de simulation ; nous avons souhaité à la place préserver les performances afin de garantir l'interactivité à l'utilisateur, quitte à autoriser l'obduction de masses continentales sous des plaques océaniques.

Pour des raisons similaires d'efficacité nous n'avons pas pris en compte les marges passives et plus généralement les régions continentales immergées telles les plateaux continentaux. Cependant il serait intéressant de les inclure dans le modèle, car jouant un rôle important visuellement pour le réalisme final des planètes.

Enfin, nous n'avons pas inclus les Points Chauds (en anglais *Hot Spots*) dans notre modèle. L'exemple canonique est la chaîne d'îles volcaniques hawaïenne, où un lieu fixe (par rapport au mouvement des plaques) de la planète induit volcanisme et souvent génération linéaire d'îles sur une plaque océanique. Ce phénomène pourrait être facilement intégré au modèle et implémenté, comme des points fixes de production magmatique ; nous ne le proposons pas toutefois car l'occurrence des points chauds est rare et l'impact visuel reste mineur à l'échelle planétaire.

9. Le pôle de rotation est l'intersection de l'axe de rotation géodésique avec la sphère

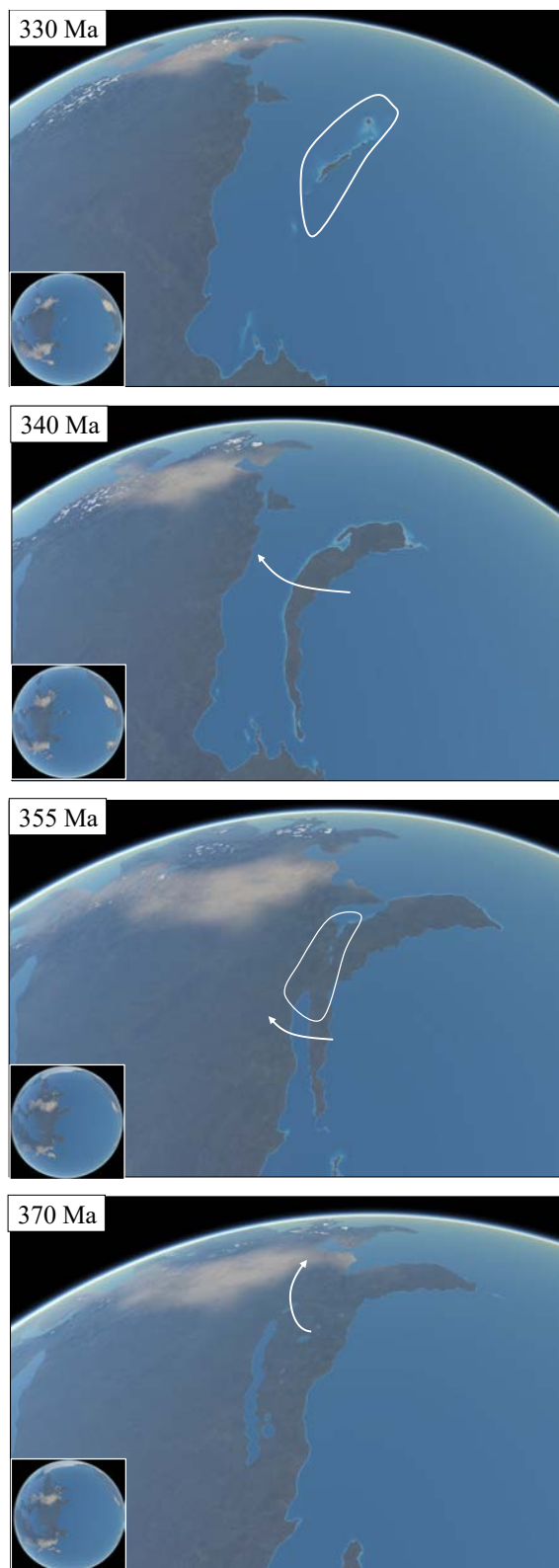


Figure 43 : Exemple de scénario d'accrétion d'un terrane sur un continent. À $t = 330$ Ma, la plaque océanique à l'est converge vers la plaque continentale, et initie une subduction ; le soulèvement induit l'émergence d'un arc d'îles. À $t = 340$ Ma l'arc est devenu une grand île, orientée le long du front de subduction et de sa fosse. À $t = 355$ Ma l'utilisateur réoriente le mouvement de la plaque océanique vers le nord-ouest, et la collision à $t = 370$ Ma engendre l'accrétion complète de l'île sur le continent principal.

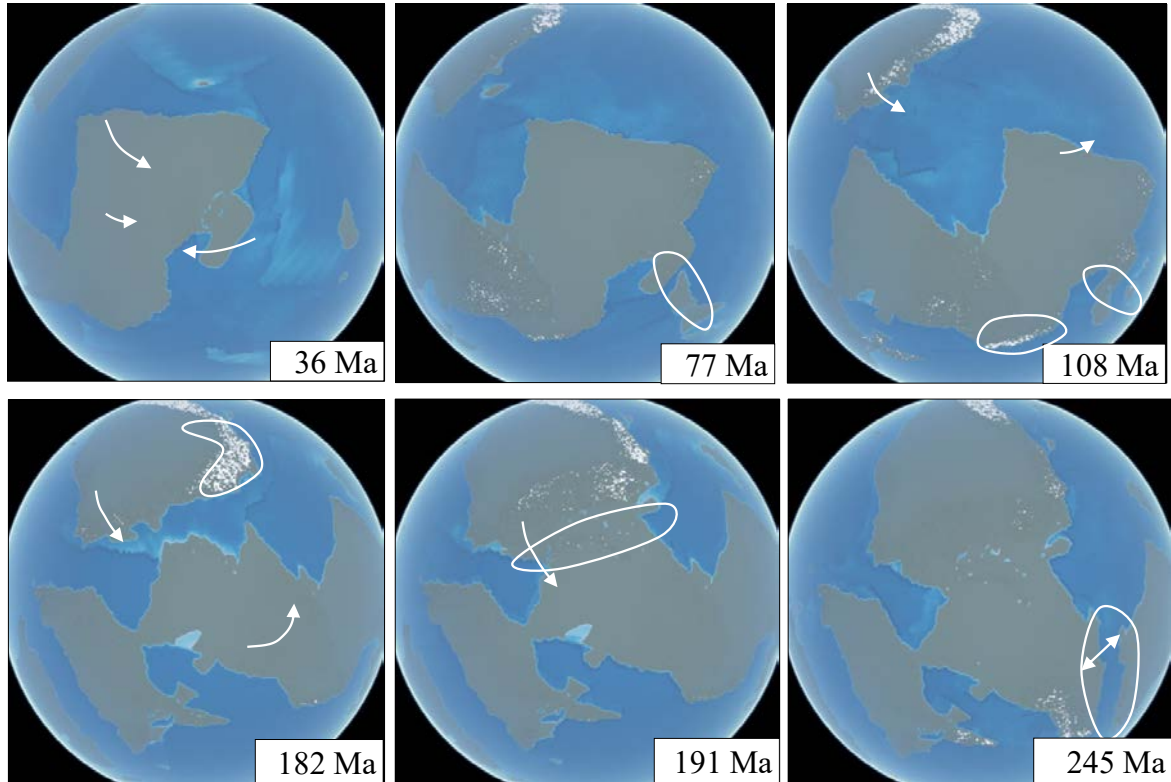


Figure 44 : Exemple de scénario utilisateur définissant l'évolution des continents d'une planète. À $t = 36$ Ma, l'utilisateur modifie le mouvement géodésique de la plaque océanique contenant l'île à l'est, de telle sorte qu'elle se déplace vers le continent. La collision a lieu à $t = 77$ Ma. À $t = 108$ Ma le continent au nord accélère vers le centre, une subduction est initiée à $t = 182$ Ma impliquant la bordure océanique des deux plaques. La subduction devient obduction des masses continentales, qui à son tour se transforme en collision des deux plaques à 191 Ma. Enfin, l'utilisateur sélectionne le nouveau super-continent et déclenche un événement de *rifting*, qui se traduit par la fragmentation de la masse continentale et l'apparition d'une nouvelle mer à $t = 245$ Ma.

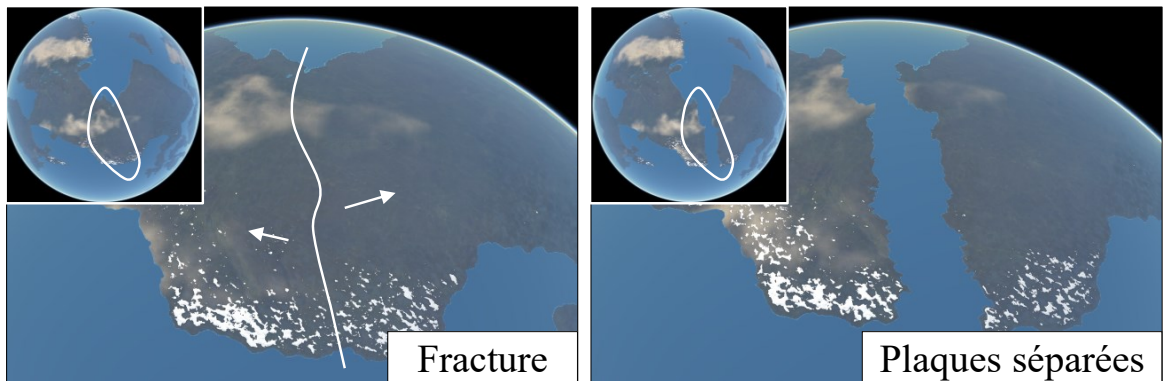


Figure 45 : Exemple d'une plaque se fracturant en 2 sous-plaques : l'image de gauche montre la plaque avant la fragmentation, l'image de droite montre deux continents séparés et divergents après 15 Ma.

AMPLIFICATION DE PLANÈTES POUR LE RENDU DÉTAILLÉ TEMPS-RÉEL

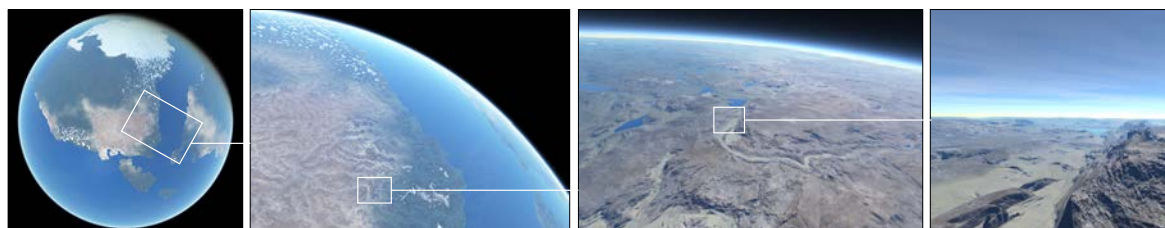


Table des matières

4.1	Approche par collage de modelés	78
4.1.1	Méthode	79
4.1.1.1	Pré-traitement des cartes de hauteur	79
4.1.1.2	Données planétaires basse-résolution	80
4.1.1.3	Amplification temps-réel	82
4.1.2	Résultats	84
4.2	Approche par hyper-amplification	85
4.2.1	Aperçu de la méthode	86
4.2.2	Calcul du modèle basse résolution	87
4.2.3	Subdivision adaptative	91
4.2.3.1	Schéma de subdivision	91
4.2.3.2	Paramètres des sommets	94
4.2.3.3	Relief spécifique	97
4.2.4	Injection de modelés	98
4.2.5	Implémentation GPU	100
4.2.6	Résultats	102

La méthode exposée au chapitre précédent permet de synthétiser les caractéristiques à grande échelle de planètes – côtes et continents, chaînes montagneuses, groupes d'îles, relief sous-marin – le tout par une recreation d'une dynamique tectonique. Dans les divers cadres applicatifs retenus, pour mémoire simulations, applications ludiques ou encore effets spéciaux, il est toutefois requis d'obtenir plus qu'une macro-représentation d'une planète : on souhaite pouvoir explorer le modèle virtuel, depuis un point de vue orbital jusqu'au plus près de la surface ; et la plupart des applications citées demandent la capacité de produire une telle exploration détaillée en temps réel.

Pour pouvoir répondre à ce défi et compléter tout en le dépassant le modèle tectonique précédent, nous proposons son amplification adaptative en temps interactif. *Amplifier* signifie générer des détails à partir d'un modèle de base. Le caractère *adaptatif* est lui nécessaire, requis par la forte contrainte du rendu temps réel ; rappelons qu'une planète terrestre représente des centaines de millions de kilomètres carrés, avec les capacités des machines grand public actuelles il est inconcevable de générer l'entièreté d'un modèle au plus haut niveau de détail, de le stocker et de le rendre, ce qui représenterait à l'échelle 1/1 pour la Terre des dizaines de péta-octets de données. L'adaptation renvoie donc à une stratégie de modélisation et de rendu spécifique applicable au problème ; essentiellement il s'agit de circonscrire les calculs au strict nécessaire requis pour l'affichage final, *i.e.* à la zone visible par l'utilisateur. Cela signifie bien entendu que le modèle doit être complètement re-généré à chaque fois que le point de vue de l'utilisateur change, c'est-à-dire à mesure que la caméra se déplace.

Nous proposons donc dans ce chapitre deux approches pour répondre à ce problème. Elles viennent compléter la méthode tectonique précédente, et sont à même de produire des points de vue détaillés et cohérents des planètes synthétisées. La première approche (Section 4.1) repose sur une injection de modelés de terrain réels, par collage guidé et aléatoire. La seconde (Section 4.2) souhaite dépasser la première approche et notamment produire des terrains géomorphologiquement cohérents par génération d'un réseau hydrographique totalement absent de celle-ci. La présence de cours d'eau, de rivières et de fleuves influence de manière déterminante le relief continental par l'empreinte des lits et des vallées. Les deux méthodes s'appuient sur les unités de calcul graphiques (GPU) pour être à même de s'exécuter en temps réel, et ce de manière fortement couplée avec le *pipeline* de rendu graphique.

4.1 Approche par collage de modelés

La génération de détails par collage de modelés consiste à construire un maillage adaptatif, relatif à la caméra, chaque sommet étant positionné en altitude d'après un mélange local de cartes de hauteur. Les cartes sont des cartes de hauteur réelles de la Terre et leur combinaison locale dépend du type de terrain spécifié par la simulation tectonique.

4.1.1 Méthode

L'amplification consiste à générer à la volée les détails du relief planétaire. Il s'agit donc d'une modélisation partielle, fortement couplée au *pipeline* de rendu temps-réel. Avant d'entamer ce processus, toutefois, il est nécessaire d'effectuer un pré-traitement qui comporte : une passe d'extraction d'informations depuis chaque carte de hauteur utilisée (section 4.1.1.1), notamment l'angle de la direction principale des plis géologiques, puis une passe de construction de données basse-résolution de la planète (section 4.1.1.2). Ensuite et seulement ensuite pouvons nous procéder au mélange des cartes de hauteur pour déterminer l'altitude de chaque sommet du maillage raffiné final (section 4.1.1.3).

4.1.1.1 Pré-traitement des cartes de hauteur

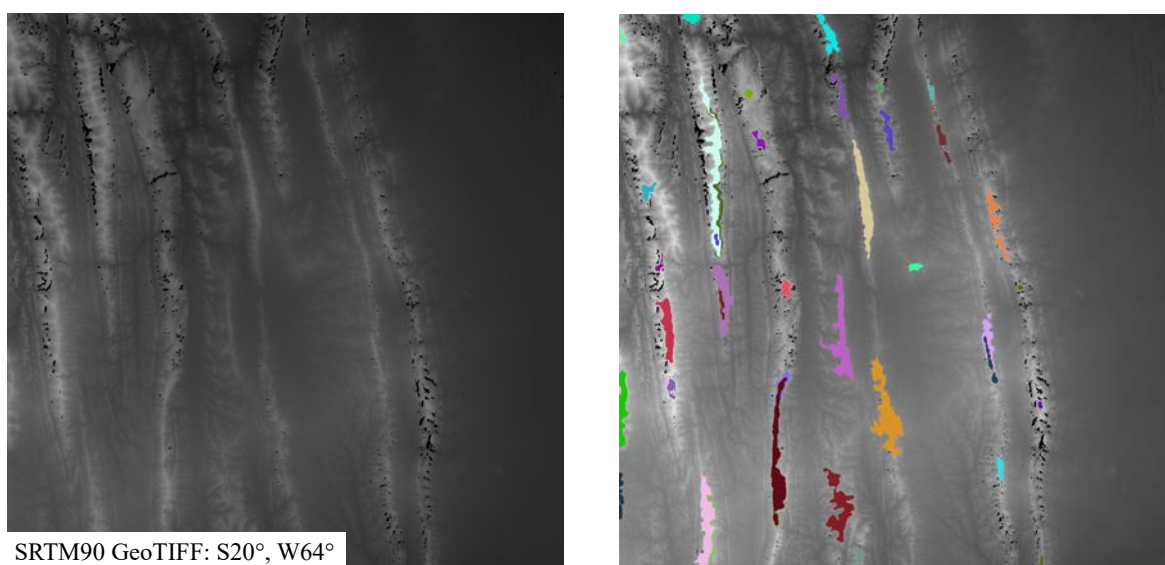


Figure 46 : Exemple de carte de hauteur brute issue du jeu de données SRTM90 (gauche), ici une portion des Andes, et son traitement (droite) visant à détecter l'orientation des crêtes. Dans cet exemple, l'élévation maximale est de 2253 mètres et l'angle des crêtes moyen est calculé égal à 92.63 deg.

Les cartes de hauteur utilisées dans l'implémentation sont issues de la base de données publique SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) maintenue par le centre EROS de l'USGS [USG]. Le sous-ensemble retenu est le *SRTM Void Filled 3 arcsecs*, c'est-à-dire le programme couvrant 80% de la surface continentale terrestre, à précision 3 secondes d'arc (environ 90 mètres) et avec post-traitement comblant les zones de vide. Nous avons extrait de cette base plusieurs ensembles de cartes, au format GeoTIFF : un pour représenter les zones de collisions continentales, un autre pour les orogénies engendrées par subduction et un dernier pour tous les massifs anciens et érodés. Chaque carte a fait l'objet d'un pré-traitement (figure 46) avant de pouvoir être utilisée pour le rendu de la planète :

- Conversion du format GeoTIFF au format PNG niveaux de gris 16 bit, par l'outil GDAL, et détection des élévations maximale et minimale. Chaque carte a une résolution de 1201x1201 pixels, chaque pixel encodant l'élévation du terrain : par exemple, pour la carte Sud-20/Ouest-65 l'élévation minimale est de 661 mètres et l'élévation maximale 4282 mètres, il s'agit d'une carte d'une région de la cordillère des Andes.
- Application d'un filtre passe-bas, moyennant sur un noyau de 9x9 pixels, afin de préparer l'extraction des données, les hautes-fréquences n'étant pas nécessaires.
- Détection des maximums locaux : un pixel est retenu comme maximum local s'il représente la plus haute élévation dans une fenêtre de 120x120 pixels centrée sur lui, et s'il est plus haut que l'altitude seuil de la carte (déterminée comme la moyenne entre les altitudes maximale et minimale de la carte).
- Segmentation des crêtes : à partir de chaque maximum local l'algorithme essaye de marcher d'un pixel à l'autre selon le voisinage de Moore, en respectant deux contraintes d'altitude et en marquant tous les pixels ainsi accessibles (le marqueur étant l'index du maximum local). Un pixel voisin est accessible s'il est plus haut que 96% de l'altitude du pixel considéré, et s'il est plus haut que 70% de l'altitude du maximum local courant. Chaque crête est ainsi définie par une collection de pixels connexes ; la fenêtre englobante de la crête est stockée au passage.
- Détection de l'orientation de chaque crête retenue : une crête est retenue si et seulement si sa fenêtre englobante est suffisamment grande, en pratique si la longueur de la diagonale D est supérieure à $1/10$ de la taille de la carte. L'algorithme procède, pour chaque crête retenue, par tirage aléatoire de lignes au sein de sa fenêtre englobante : un premier point est tiré, puis un second et le segment de longueur d les connectant est valide si et seulement si $d > \frac{D}{2}$; l'angle du segment par rapport à l'horizontale est mesuré et cumulé, la moyenne des angles par rapport au nombre de segments tirés donne une approximation de l'angle de la crête. L'angle global représentant l'orientation moyenne de toutes les crêtes de la carte est approximé enfin par moyenne des angles de chaque crête, pondérée par le poids de chaque crête correspondant à son étendue.

Pour finir, chaque carte est transcrite dans un format binaire susceptible d'être consommé par l'application hôte. L'en-tête du fichier comporte les meta-données qui nous intéressent pour pouvoir procéder à l'amplification planétaire : le type de terrain (himalayen, andéen, ancien), la résolution et la précision de la carte, et l'angle moyen détecté des plis géologiques (crêtes). Les élévations sont normalisées de telle sorte que l'élévation maximale de chaque carte soit égale à 1.

4.1.1.2 Données planétaires basse-résolution

Pré-traitement du modèle tectonique. Le modèle tectonique \mathcal{M} est donné en entrée de l'application sous la forme d'un maillage basse résolution, une Triangulation de Delaunay

Sphérique. Cette TDS relie des sommets, attribués de données tectoniques, et espacés au mieux dans l'implémentation de 35 km. En pré-calcul nous construisons d'abord une structure spatiale accélératrice sur ce modèle, en l'occurrence un BVH, laquelle permettra des requêtes rapides. Puis nous calculons et stockons deux vecteurs représentant les axes d'un repère tangent à la sphère en chaque sommet de \mathcal{M} : ceci afin de préparer le calcul d'alignement des cartes sur la direction de plissement tectonique. Enfin, nous assignons donc une carte de hauteur à chacun des sommets du modèle, choisie aléatoirement parmi plusieurs sous-ensembles de cartes, lesquels sont distingués d'après le paramètre tectonique o , qui permet de discriminer entre orogénie¹ produite par subduction et orogénie produite par collision continentale, ou bien d'après l'âge a de la croûte dans le cas des massifs anciens. Pour plus de variété de relief, chaque assignation de carte est aléatoirement excentrée sur le sommet affilié, et nous stockons deux offsets exprimés en coordonnées uv (espace texture) ; rappelons que la distance moyenne entre sommets est de 35 km et que chaque carte couvre une surface de $108 \times 108 \text{ km}^2$, supérieure à l'aire d'un triangle.

Triangulation de rendu. Pour le rendu de la surface amplifiée de la planète, nous nous appuyons sur une seconde triangulation dédiée, dont les triangles sont consommés par le GPU pour produire l'image finale. Cette triangulation de rendu est distincte de la TDS associée au modèle tectonique : la première sera re-créeée et détruite de nombreuses fois à mesure que la caméra se déplacera, alors que la seconde est persistante et conservera les données du modèle sur lesquelles nous effectuerons des requêtes. Partant d'une triangulation de base, les huit triangles d'un octaèdre régulier, un pré-calcul commence donc par construire une triangulation initiale \mathcal{L} , par subdivisions successives de l'octaèdre produisant une hiérarchie de triangles susceptibles d'être consommée par l'algorithme de subdivision (section suivante, 4.1.1.3). La précision est d'environ 40 km, longueur moyenne d'une arête de \mathcal{L} .

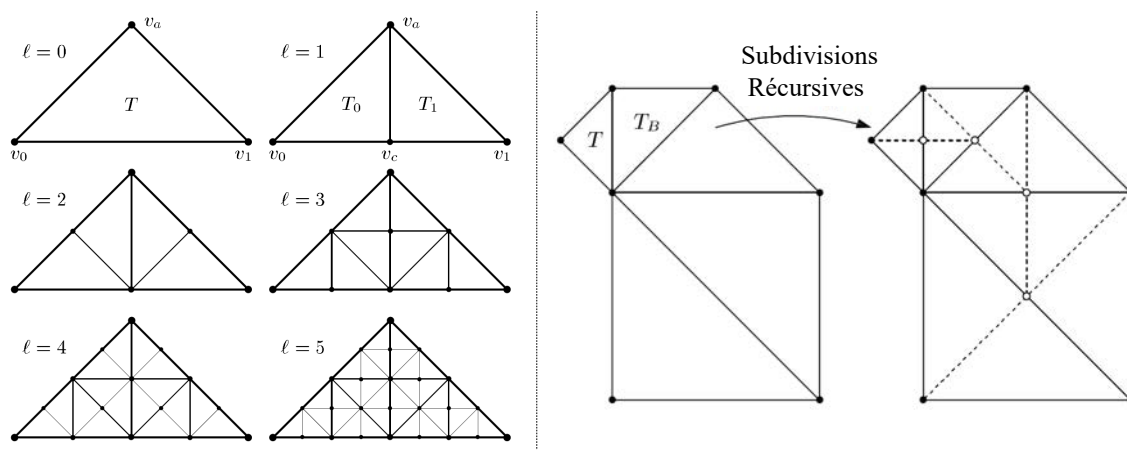


Figure 47 : Illustration de la technique de subdivision ROAM [Duc+97] : à gauche le principe de l'organisation en hiérarchie binaire de triangles, à droite le déclenchement de subdivisions récursives pour garantir l'absence de trous dans le maillage. (Source : [Duc+97])

1. Zone de montagnes

4.1.1.3 Amplification temps-réel

Algorithme de subdivision. L'algorithme de subdivision appliqué est un dérivé de l'algorithme ROAM [Duc+97] reposant sur un raffinement adaptatif d'un *bin-tree*, c'est-à-dire d'une hiérarchie binaire de triangles (figure 47, gauche). Lorsque \mathcal{L} est prête, un fil d'exécution (*thread*) est lancé, dédié au calcul des tessellations adaptatives \mathcal{H} , c'est-à-dire des versions raffinées de \mathcal{L} en fonction du point de vue courant de la caméra. La production de \mathcal{H} implique de garantir l'absence de trous entre triangles de niveaux de détail différents : l'algorithme ROAM résout ce problème en déclenchant des raffinement successifs sur le voisinage jusqu'à garantir une différence maximale de niveau de détail entre deux triangles adjacents de 1 (figure 47, droite). La triangulation finale \mathcal{H} est essentiellement sphérique, *i.e.* les sommets sont contraints sur la sphère par simple projection, le calcul des élévations ne se fera que dans un second temps et sur GPU.

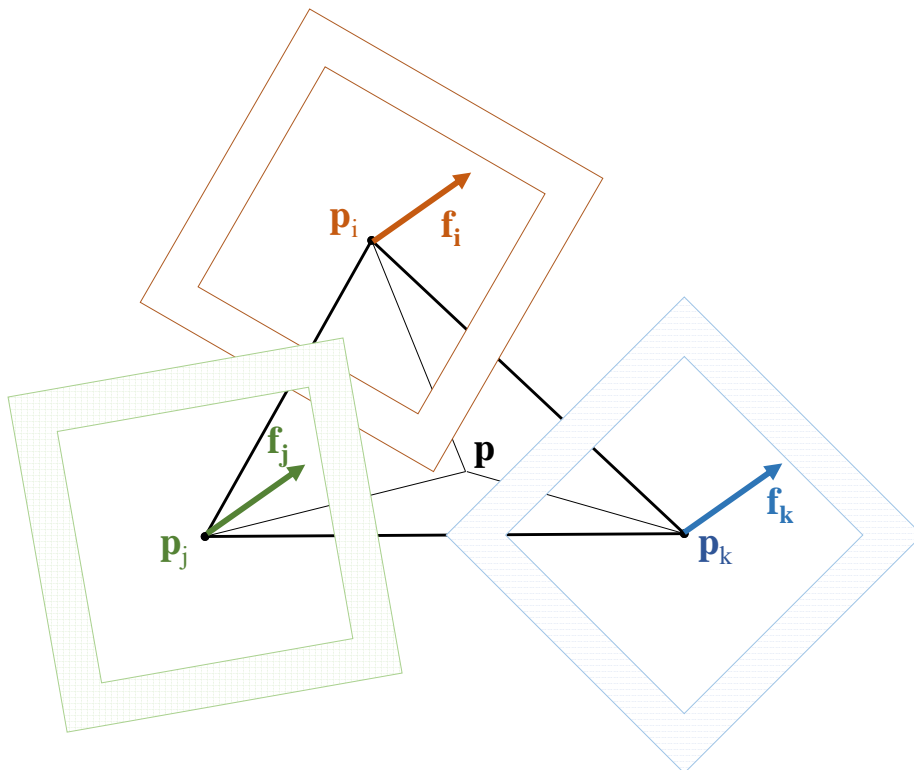


Figure 48 : Représentation schématique du procédé de mélange des cartes de hauteur en tout point p de la surface, pondéré barycentriquement. Les sommets p_i , p_j et p_k sont trois sommets de la TDS du modèle tectonique. Les cartes associées (en rouge, vert et bleu) sont orientées au préalable selon la direction locale de plissement f tectonique. Nous nous assurons que l'étendue de chaque carte couvre suffisamment chaque triangle du modèle. Par précaution le *texturing* sur GPU est répété en miroir pour éviter des zones vides (*i.e.* en dehors de la texture).

Production du relief final. Une fois la triangulation de rendu \mathcal{H} calculée, c'est-à-dire raffinée sur CPU selon le point de vue de la caméra, elle est augmentée des données du modèle tectonique, avant d'être transférée au GPU pour le positionnement final des sommets avant leur projection sur l'écran et les calculs d'illumination. Pour chacun de ses sommets \mathbf{p} nous procédons à l'intersection entre un rayon passant par le centre de la planète et par \mathbf{p} avec les triangles du modèle \mathcal{M} , de manière accélérée grâce au BVH². Le sommet \mathbf{p} intersecte un unique triangle du modèle \mathcal{M} . Par interpolation barycentrique il est donc possible d'attribuer \mathbf{p} avec les informations suivantes : direction de contrainte tectonique (\mathbf{f} direction de plissement pour une zone continentale, ou \mathbf{r} direction parallèle à la dorsale la plus proche pour une zone océanique), élévation z moyenne locale (élévation grande-échelle de la croûte), et âge géologique a de la croûte. En sus, nous ajoutons les données relatives au placage des cartes de hauteur sur la sphère. L'opération suivante est répétée pour chacun des trois sommets du triangle du modèle intersecté : \mathbf{p} est projeté dans le plan tangent à la sphère associé au sommet du modèle, ensuite une anti-rotation, d'angle donné par l'alignement de la carte (qui correspond à sa direction locale de plissement tectonique), est appliquée au sommet projeté, ceci permet ensuite de déduire, par changement d'échelle, les coordonnées uv du sommet dans la carte de hauteur alignée (figure 48).

Au final, la triangulation \mathcal{H} est composée de sommets \mathbf{p} triangulés et attribués des informations suivantes : élévation, âge et orientation des plis tectoniques, plus les trois références aux trois sommets du triangle du modèle \mathcal{M} dans lequel se trouve \mathbf{p} . Ces références sont composées : d'un couple de coordonnées (u, v) en espace texture, d'un index de texture référençant la carte de hauteur, et de la coordonnée barycentrique associée au sommet du triangle intersecté. Sur GPU, une pré-passe avant le rendu est dédiée au calcul des élévations finales de chacun des points \mathbf{p} en mélangeant les trois informations de hauteur récupérées depuis les cartes de hauteur, et ce de manière pondérée par les coordonnées barycentriques du point \mathbf{p} dans le triangle du modèle (figure 48). Enfin, les normales en chaque sommet \mathbf{p} sont calculées par une seconde pré-passe, d'après les informations de connectivité du maillage de rendu \mathcal{H} ; le rendu final a lieu en mode déferé (*deferred shading*) pour composer la géométrie du terrain avec le rendu de l'atmosphère et de l'eau.

Relief océanique. Notons que ceci vaut pour les points continentaux du modèle tectonique. Pour le relief océanique, la direction de plissement \mathbf{f} est remplacée par la direction locale parallèle à la dorsale océanique la plus proche \mathbf{r} , et au lieu de procéder par placage de cartes de hauteur nous reproduisons les fonds marins plus simplement de manière directement procédurale (fractale) : nous utilisons du bruit de gradient [Per85] pour la majorité de la surface sous-marine, excepté près des dorsales où du bruit de Gabor [Lag+09] est employé pour simuler les striations caractéristiques des dorsales (figure 50) dû aux failles transformantes (orthogonales à la dorsale).

2. Les requêtes sur le modèle se doivent d'être rapides car cette étape se répète de nombreuses fois lors de l'exploration continue de la planète

4.1.2 Résultats

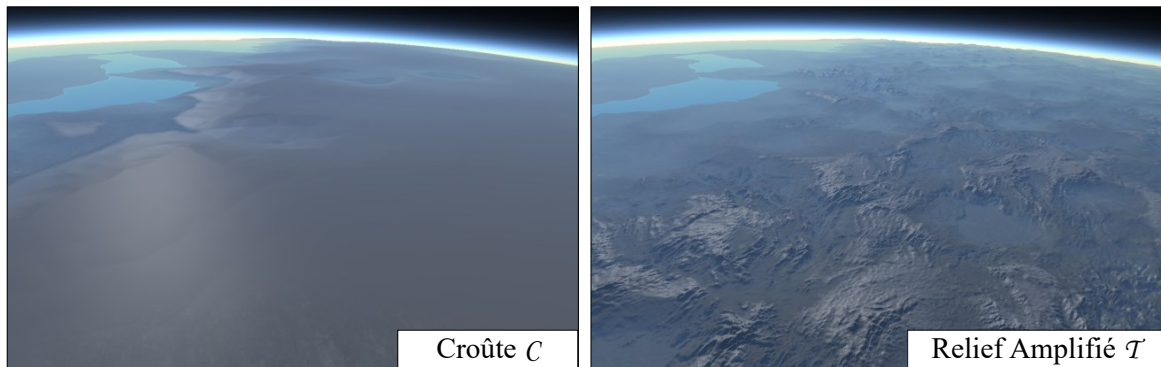


Figure 49 : Visualisation de la croûte \mathcal{C} donnée en entrée, générée à grande échelle par la simulation tectonique (gauche), et du relief détaillé \mathcal{T} (droite) obtenu par l'amplification par collage de cartes de hauteur réelles.

La méthode a été implémentée en C++ et testée sur un processeur Intel Core i7 – 6700 K couplé à 16 Go de mémoire vive et une carte graphique Nvidia GTX 1080. La méthode opère sur la sortie de la simulation tectonique présentée au chapitre 3. Sur cette machine le programme offre une fréquence d'affichage variable, entre 37 et 145 Hz, selon l'altitude de la caméra. L'océan est modélisé par son propre maillage, duplicata du maillage du terrain (le raffinement adaptatif sert aux deux maillages) ; la surface de l'eau est animée à chaque *frame*. L'atmosphère est rendue par *raymarching* pour reproduire la perspective aérienne et la dispersion atmosphérique de la lumière (*scattering*).

Données. Les modelés utilisés dans l'implémentation sont issus de la mission *SRTM90* répertoriée dans la base de données *USGS*. Ce sont des cartes de hauteur (*DEM, Digital Elevation Model*) de régions de la Terre ; nous avons extrait 3 ensembles de cartes : 7 DEM pour les zones Himalayennes, 11 pour les régions Andéennes et 6 pour les anciennes orogénies (tirées de la région de l'Atlas marocain). Chaque DEM a une précision de 90m et une étendue d'environ 108km.

Limitations. Même si le prototype remplit les objectifs principaux initialement fixés, à savoir produire des images détaillées et cohérentes du modèle tectonique à grande échelle, il souffre de nombreuses limitations, que nous relevons ici.

Premièrement, l'intervalle de temps entre deux mises à jour du terrain, c'est-à-dire le calcul du maillage de rendu adaptatif déclenché par le déplacement de la caméra, n'apparaît pas entièrement satisfaisant : la tessellation effectuée dans un *thread* CPU met plusieurs secondes à être calculée, ce qui induit un changement brusque du terrain visible par l'utilisateur. Par ailleurs, l'utilisation de cartes de hauteur limite fortement la précision au sol du terrain amplifié (en l'état environ 90m). Augmenter drastiquement la précision des cartes de hauteur

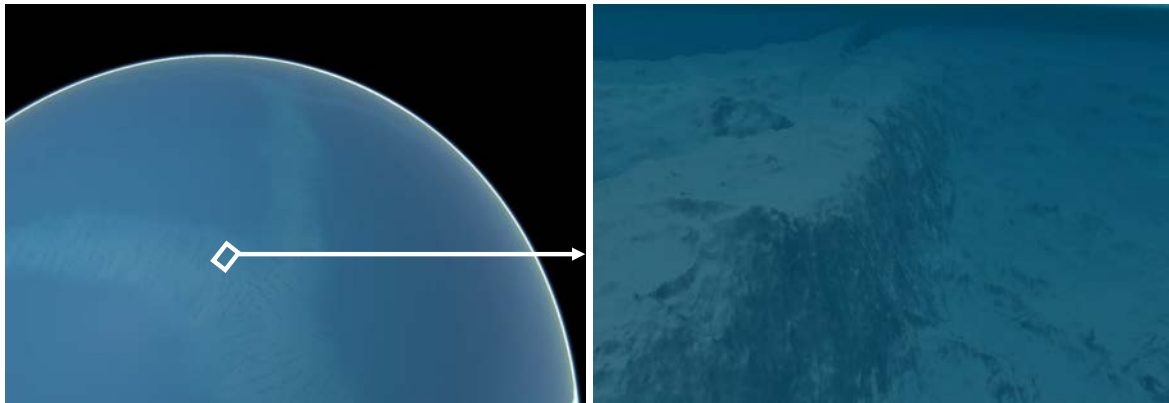


Figure 50 : Captures d'écran montrant l'amplification procédurale du relief sous-marin : à gauche, vue depuis orbite, une jonction triple entre dorsales océaniques; à droite, une vue rapprochée d'une des failles transformantes orthogonales aux dorsales.

utilisées n'est pas envisageable du fait de la quantité limitée de mémoire embarquée des GPU. Une solution serait une deuxième passe d'amplification avec ajout de bruits procéduraux ; mais cela ajouterait significativement au temps de calcul car il faudrait produire de la variété en multipliant les combinaisons de bruits, sans compter qu'en sus, il faudrait interpoler quadratiquement (au minimum) les DEM, au lieu de bilinéairement, pour masquer l'effet d'escalier produit entre les *texels* d'élévation. Enfin, le collage de modelés, bien que donnant l'illusion de réalisme du fait de l'injection de données de hauteur réelles, ne permet pas de générer des terrains pleinement réalistes. En effet, ce qui caractérise les terrains sur Terre sont surtout les cours d'eau et les vallées et ravines que l'eau sculpte dans le relief. L'hydrographie est une composante essentielle du réalisme d'un terrain, et elle est complètement absente de cette méthode.

Notre seconde méthode d'amplification, présentée dans la section suivante, permet de lever ces deux dernières limitations (précision, réalisme), tout en améliorant la première concernant la fréquence de rafraîchissement du maillage adaptatif (à peu près d'un ordre de grandeur).

4.2 Approche par hyper-amplification

La méthode d'*hyper-amplification* consiste en la synthèse de détails géomorphologiques hydrologiquement structurés d'une surface planétaire, avec une grande plage d'échelles spatiales. Elle attend en entrée une description basse résolution de la planète : dans notre implémentation et dans les résultats présentés, nous avons couplé l'*hyper-amplification* à la sortie produite par la synthèse tectonique (Chapitre 3). La méthode demeure cependant entièrement compatible avec d'autres formats d'entrée, par exemple avec une représentation par cartes de contrôle (nous démontrons une telle application par la reproduction de la Terre) ou encore par fonctions fractales [Ebe+98]. L'utilisateur est libre de fournir le modèle planétaire à grande échelle de son choix à partir du moment où celui-ci demeure échantillonnable en tout point.

4.2.1 Aperçu de la méthode

L'objectif de la méthode est la production à la volée d'un modèle planétaire détaillé susceptible d'être rendu en temps réel et continuellement explorable. Elle est, par contrainte, fortement couplée au *pipeline* de rendu. Elle travaille donc directement sur une représentation compatible, c'est-à-dire triangulée. L'*hyper-amplification* se découpe en trois grandes phases. La première phase est un calcul *offline* d'un modèle planétaire de travail, qu'on nommera modèle basse-résolution \mathcal{L} . La seconde phase a lieu *online* et est essentiellement un calcul massivement parallèle, adaptatif, du maillage surfacique local ; il s'agit d'un procédé de subdivision par règles. La troisième phase est également *online*, massivement parallèle, et consiste en un post-traitement de la subdivision afin d'injecter des modelés spécifiques, par déplacement vertical paramétré du maillage.

Génération du modèle basse résolution. Que ce soit à partir de cartes de contrôle, d'une représentation fonctionnelle ou du modèle tectonique, nous commençons par construire en amont le modèle basse résolution \mathcal{L} (section 4.2.2) : une triangulation sphérique irrégulière stockant les données de contrôle dans chacun de ses sommets $\{p_i\}$. A minima il s'agit de l'élévation moyenne de la croûte terrestre, et optionnellement de son âge géologique, de l'humidité locale et/ou de la présence de modelés spécifiques. Le modèle basse résolution \mathcal{L} est en essence une structure de données géométrique qui maintient tous les paramètres de contrôle requis pour ensuite procéder à l'amplification temps-réel locale de la planète. Un des aspects forts de la méthode est sa capacité à produire une structuration hydrologique du relief : \mathcal{L} contiendra donc non seulement les informations de côtes et de présence montagneuse mais aussi un réseau hydrographique à grande échelle complet, que nous construirons avant d'entamer la subdivision temps-réel.

Subdivision. Dès que l'utilisateur enclenche l'exploration visuelle de la planète, le modèle basse résolution \mathcal{L} est récursivement subdivisé pour atteindre une forme haute résolution \mathcal{H} (section 4.2.3). La subdivision est effectuée de manière massivement parallèle, d'après un ensemble de règles \mathcal{S} de production de modelés. Les informations de contrôle stockées principalement dans les sommets, mais aussi dans les arêtes, du modèle basse résolution orientent la sélection et l'application des règles de raffinement du maillage, jusqu'à atteindre, localement, un niveau de détail λ satisfaisant. La figure 51 illustre la notion de niveau de détail (LOD).

Injection de modelés. Le post-traitement de la subdivision, d'un point de vue limité à la stricte modélisation, permet l'injection de modelés par ajustement final des élévations de surface de \mathcal{H} (section 4.2.4). Nous appliquons un déplacement vertical aux sommets de la triangulation, guidé par les paramètres continus qu'elle contient. L'application principale est la synthèse finale des lits des rivières et des vallées qui les environnent. L'application secondaire,

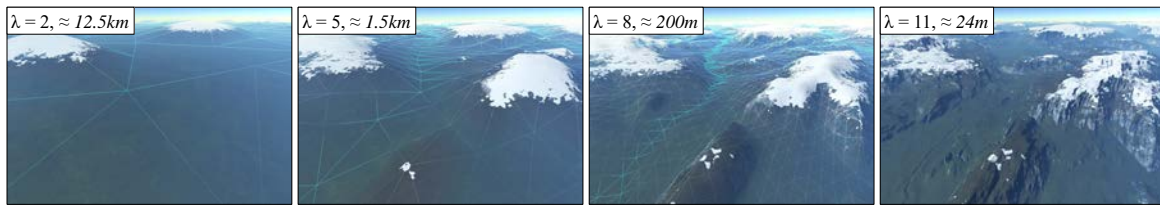


Figure 51 : Hyper-amplification : visualisation pour le même point de vue de différents niveaux de détails λ .

non développée dans cette thèse, est la possibilité théorique d'injection de terrains locaux, sous forme de cartes de hauteurs spécifiées par l'utilisateur, afin de produire certains modèles spécifiques.

4.2.2 Calcul du modèle basse résolution

La figure 52 présente les grandes étapes de la construction du modèle basse résolution \mathcal{L} . Elles se déroulent à partir de la spécification de l'entrée par l'utilisateur, c'est-à-dire des données planétaires de base qui peuvent comprendre la répartition des continents, l'élévation moyenne de la croûte, l'âge de la croûte, la direction des plis géologiques, etc..

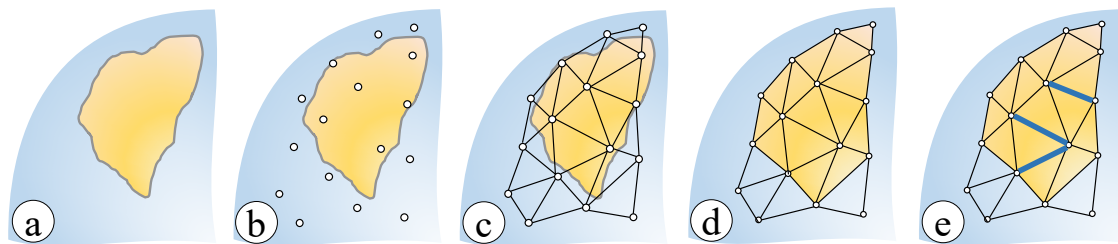


Figure 52 : Étapes de pré-calcul : (a) entrée utilisateur, (b) échantillonnage par disques de Poisson, résultant en un ensemble de sommets p_i , (c) construction d'une triangulation de Delaunay sphérique, (d) lissage des côtes, (e) génération du réseau hydrographique et calcul de ses caractéristiques locales, telles l'index d'Horton-Strahler, le flot ϕ_i et l'élévation de l'eau.

Irrégularité. Notre objectif dans cette phase de pré-calcul est de produire une triangulation de travail \mathcal{L} , susceptible d'être ultérieurement raffinée, et marquée par une forte irrégularité. Ce dernier point est d'importance, il est en effet préférable d'éviter une structuration linéaire du maillage, qui serait visible et gênante pour l'oeil, notamment pour la construction des cours d'eaux principaux, des fleuves majeurs, où tout schéma régulier est à éviter sous peine d'apparaître artificiel. Nos expériences ont montré que si nous partions d'un octaèdre ou icosaèdre initial auquel nous appliquerions un schéma dyadique de subdivision, même avec un fort *jittering*³ des sommets nous n'obtiendrons pas de cours d'eau réalistes du fait de motifs géométriques toujours clairement détectables par l'oeil. Nous procédons donc par

3. Perturbation appliquée aux positions

un échantillonnage stochastique par disques de Poisson [Bri07] de la planète, suivi d'une triangulation de Delaunay sphérique des sommets produits. L'échantillonnage de Poisson produit l'irrégularité souhaitée, tandis que la propriété de Delaunay garantit des triangles bien formés, ce qui est important car ils subiront de nombreuses subdivisions dans le processus ultérieur.

Paramètres de contrôle. L'échantillonnage des données fournies par l'utilisateur crée les positions des sommets du maillage \mathcal{L} . C'est aussi à cette étape que l'on évalue et stocke dans ces sommets les paramètres de contrôle de l'*hyper-amplification*. L'*élévation moyenne de la croûte terrestre* $\mathcal{C} \in [-10^4, 10^4]$ définit les altitudes du relief basse résolution de la planète, et circonscrit les continents, les océans, les plaines, les massifs et grandes zones montagneuses. À mesure que la subdivision aura lieu, les élévations détaillées seront produites, contraintes par \mathcal{C} et caractériseront le relief final, local, de la planète. L'*âge géologique* $\mathcal{A} \in [0, 10^8]$ concerne principalement les orogénies et permettra de distinguer entre jeunes et anciens massifs. Ce paramètre joue un rôle important dans le choix des règles de subdivision, produisant des monts arrondis et érodés pour les massifs anciens ou *a contrario* anguleux et hauts pour les montagnes jeunes. L'*humidité* $\mathcal{W} \in [0, 1]$ est un paramètre normalisé, et peut être vu comme une distribution d'indice de précipitation moyenne; elle définit les zones arides ou humides et contrôle la distribution des lacs ainsi que d'autres modèles spécifiques comme les mesas et les terrasses dans les déserts rocheux. Enfin, la présence de *plateaux* et de *collines*, est déterminée par les paramètres normalisés $\mathcal{P} \in [0, 1]$ et $\mathcal{B} \in [0, 1]$ respectivement.

Lissage des côtes et placement des estuaires. Cette étape survient après la construction du maillage \mathcal{L} , c'est-à-dire après les étapes *a*, *b* et *c* de la figure 52. Nous prenons soin de lisser les côtes des continents afin de préparer la génération du réseau hydrographique tout en garantissant l'absence d'artefact. Voici en détail les opérations consécutives mises en œuvre :

1. Marquage des côtes : nous procédons à un typage des triangles de \mathcal{L} . Si un triangle possède entre 1 et 2 sommets typés *mer*, nous le typons à *côte*. Les autres triangles sont typés soit *continent* soit *mer*. Nous mémorisons dans une liste de travail tous les triangles côtiers possédant exactement 2 sommets *mer*. Par la suite nous ne travaillerons que sur ces triangles.
2. Lissage : pour chaque triangle de la liste, nous modifions les sommets *mer* en les élevant à l'altitude de l'unique sommet *continent* du triangle, et en changeant leur type de *mer* à *côte*.
3. Placement des estuaires : pour chaque triangle de la liste de travail, nous procédons à des tests préalables, si un des tests échoue nous passons au triangle suivant. Le premier test consiste à vérifier qu'aucun sommet *rivière* n'existe dans le triangle. Le second test consiste à vérifier qu'aucun sommet *rivière* n'est atteignable par une arête incidente à un des sommets du triangle. Enfin nous vérifions que le voisinage donne suffisamment sur

la mer : partant des 3 sommets du triangle, nous examinons récursivement chaque arête incidente à chacun des sommets, si une arête compte un sommet *mer* il est ajouté à la liste des sommets à examiner et on incrémente un compteur ; le test est positif si plus de 8 sommets *mer* ont été comptés. Si ces tests préalables réussissent, nous cherchons alors 1 parmi 6 configurations où un unique triangle *mer*, voisin du triangle *côte* en cours, existe. Il y a 6 configurations, 3 pour les 3 voisinages de face et 2 sous-configurations pour les arêtes. Nous passons donc en revue algorithmiquement les configurations, dans le but de trouver un sommet estuaire candidat : ce dernier, déterminé par la configuration, est retenu si et seulement si il donne bien sur la mer (directement), nous cherchons pour cela l'existence d'au moins un sommet voisin de type *mer*. Une fois un tel sommet candidat détecté, nous le retenons ce qui instanciera dans la phase suivante l'embouchure d'un fleuve.

Génération du réseau hydrographique. Une fois les côtes lissées et les embouchures des fleuves placées correctement, nous construisons le réseau hydrographique à la façon de [Gén+13], par conquête et sous contraintes des paramètres de contrôle, notamment l'élévation moyenne continentale.

En partant des estuaires, nous remontons vers les sources, arête par arête. L'itération principale consiste à choisir un des cours d'eau et à lui ajouter un nouveau noeud primaire ainsi que potentiellement un nouveau noeud secondaire, un noeud dit secondaire représentant un cours d'eau tributaire et la création d'une jonction en "Y". Le choix du cours d'eau parmi tous les cours d'eau en cours d'agrandissement est basé sur un système de priorités : dans notre implémentation test, nous ne prenons en compte que l'altitude moyenne normalisée du terrain, la priorité d'un cours d'eau étant plus élevée pour une altitude faible de plaine. Ceci permet de bien couvrir les continents ; on se reportera à [Gén+13] pour une discussion sur d'autres possibles stratégies de conquête. Chaque cours d'eau choisi est donc potentiellement augmenté par 1 ou 2 noeuds. Un noeud candidat est choisi parmi les sommets adjacents d'après un coût que nous cherchons à minimiser : pour un noeud primaire, l'angle du cours d'eau doit être minime, il tendra à ne pas se situer dans une zone de plateau et une forte pente est privilégiée, *i.e.* plus la différence d'altitude est forte plus le coût sera petit. Optionnellement, pour le cas où un modèle tectonique est utilisé et où la direction de plissement de la croûte terrestre est disponible, nous privilégions les cours d'eau orthogonaux à cette direction, afin de marquer les vallées principales dans le bon sens. Notons que nous ajoutons une composante aléatoire dans le coût calculé afin de ne pas systématiser artificiellement la génération du réseau. Pour un noeud secondaire, donc marquant la création d'un cours d'eau tributaire, le coût est calculé de manière similaire, excepté que l'angle de la jonction devra être inférieur à 90°. Le choix de créer un noeud secondaire est guidé par une probabilité, plus élevée à mesure que le fleuve grandit.

Si aucun noeud candidat n'est trouvé, nous mettons fin à l'accroissement du fleuve courant en créant sa source, ce qui consiste simplement à fixer l'élévation de l'eau égale à celle du

terrain. Tous les sommets ajoutés au réseau hydrographique sont typés *rivière*, il en est de même pour les arêtes. Les élévations de lit de rivière suivent une progression croissante depuis les embouchures. Tant que l'élévation du lit de la rivière demeure inférieure à celle du terrain environnant, nous autorisons son accroissement par de nouveaux nœuds ; dans le cas contraire, nous terminons l'accroissement en instanciant la source de la rivière.

Une fois le réseau construit, prenant la forme d'une collection d'arbres (une forêt) portés par un sous-ensemble des arêtes et des sommets du maillage, on le parcourt à nouveau afin de calculer des informations importantes pour la suite de l'algorithme. En premier lieu nous calculons l'index d'Horton-Strahler caractérisant l'importance schématique de chaque tributaire [Hor45]. Dans un second temps nous déterminons le flot de chaque cours d'eau. En remontant depuis les embouchures, et à partir de l'information de longueur depuis l'embouchure jusqu'à chaque nœud visité, ainsi que la longueur maximale détectée sur toute la planète des cours d'eau, nous assignons l'amplitude normalisée du flot en chaque nœud. Trois cas se présentent pour un nœud donné : (1) aucune jonction n'est présente, et le flot est préservé, (2) une jonction symétrique est présente, auquel cas le flot est divisé en deux, (3) une jonction asymétrique est présente, auquel cas le flot est distribué de manière pondérée par les index d'Horton-Strahler. Enfin, nous procédons au calcul final des élévations de l'eau. Pour cela, nous parcourons le réseau en sens inverse depuis les sources, et affectons un *offset* depuis l'élévation du lit de la rivière, calculé inversement proportionnellement à la longueur du cours d'eau (du nœud courant à l'embouchure) rapportée à sa longueur totale (de la source à l'embouchure).

Dimensionnement et performance. Dans l'implémentation la distance moyenne entre deux sommets de la triangulation \mathcal{L} est de $\approx 50\text{km}$, pour une planète de rayon 6370km similaire à la Terre, environ 230 000 sommets sont générés et triangulés en approximativement 460 000 triangles. L'échantillonnage de Poisson et la triangulation de Delaunay sont des processus de géométrie algorithmique intensifs, ils prennent en moyenne 9.2 secondes de temps de calcul sur CPU. Toutefois ils peuvent être réalisés une seule fois, et stockés pour être réutilisés à chaque nouveau besoin, par exemple lorsque l'utilisateur édite ou modifie le modèle planétaire en entrée du processus. Le lissage des côtes et la construction du réseau hydrographique ne prennent, en moyenne, que 500 millisecondes : ce temps d'exécution rapide permet l'édition interactive des données planétaires d'entrée et d'observer leur *hyper-amplification* presque instantanément.

4.2.3 Subdivision adaptative

L'amplification planétaire débute par un raffinement adaptatif du maillage \mathcal{L} . Il s'agit d'un schéma de subdivision hiérarchisé qui s'appuie sur des règles opérant à différentes échelles.

4.2.3.1 Schéma de subdivision

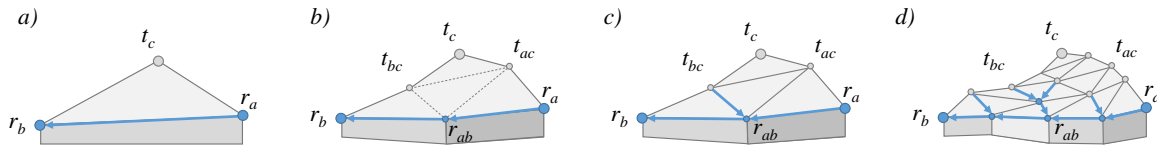


Figure 53 : Illustration des deux étapes de la subdivision : a) triangle de départ, b) subdivision dyadique et insertion de 3 nouveaux sommets, c) création des arêtes internes et instantiation d'un cours d'eau tributaire, d) le processus se répète récursivement, à mesure que le niveau de détail λ croît.

Le coeur du processus de subdivision se découpe en deux phases (Figure 53). Ces deux phases sont séquencées et se répètent jusqu'à atteindre un niveau de détail λ satisfaisant pour la vue courante. Premièrement, nous raffinons les triangles du modèle selon un schéma dyadique, c'est-à-dire que nous insérons un nouveau sommet dans chaque arête nécessitant d'être détaillée. Ce processus s'appuie sur des règles de production sémantiques d'éléments du relief, il est contrôlé par les diverses configurations locales trouvées dans la triangulation. La seconde phase implique la création de nouvelles arêtes et de nouvelles faces internes aux triangles, ces nouvelles arêtes relient les sommets créés lors de la phase précédente. Dans cette seconde phase, un autre ensemble de règles spécifique s'applique.

Le raffinement temps-réel de la triangulation \mathcal{L} s'appuie donc sur un ensemble de règles, qui se déclenchent en fonction des configurations locales des sommets et arêtes. Sommets et arêtes sont typés, et leur type sert à identifier ces configurations. Outre les informations de topologie de la triangulation, les arêtes sont caractérisées essentiellement par leur type. Les sommets, eux, ont un type ainsi que les paramètres exposés dans la Table 4.1 et la Section 4.2.3.2.

Symbole	Description
x	Type $\in \{\text{Rivière}, \text{Terrain}, \text{Lac}, \text{Ravine}, \text{Mer}\}$
h	Élévation
h_w	Élévation de l'eau
h_r, d_r	Élévation et distance du lit de rivière le plus proche
ϕ	Flot hydrique
e_r	Index de profile
s_h, s_d	Élévation et distance de la ravine la plus proche

Table 4.1 : Paramétrisation des sommets de la triangulation.

Dans ce qui suit on dénote par \mathcal{R} , \mathcal{T} et \mathcal{U} les types d'arêtes *rivière*, *terrain*, et *inconnu*. De même r , t , l , s , g et u représentent respectivement les types de sommets associés à *rivière*, *terrain*, *lac*, *mer*, *ravine* et *inconnu*.

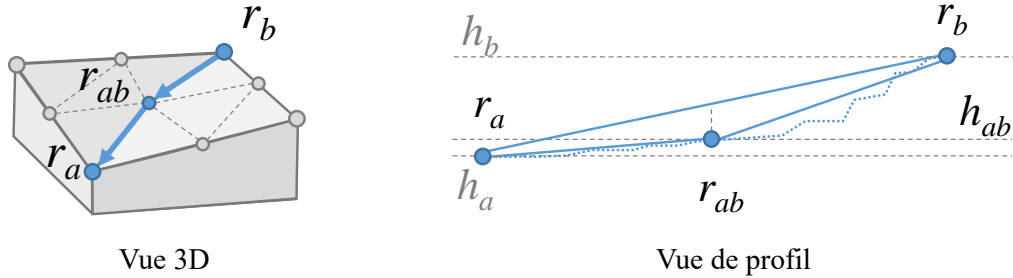


Figure 54 : Illustration de la règle **R1**, où une arête *rivière* est subdivisée et où un nouveau sommet *rivière* apparaît. Le calcul de l'élévation du lit de la rivière ainsi que l'élévation de l'eau au nouveau sommet se doit de respecter le flot de la rivière.

Subdivision d'arêtes. Le schéma dyadique subdivise une arête donnée en deux nouvelles arêtes et ajoute un sommet à la triangulation. Une configuration locale d'entrée, composée d'un triplet $(u_a, \mathcal{U}_{ab}, u_b)$, déclenche une règle spécifique.

Les règles associées aux types de sommet *Rivière* et *Terrain* sont :

R1	$(r_a, \mathcal{R}_{ab}, r_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{R}_{ac}, r_c, \mathcal{R}_{cb}, r_b)$
R2	$(r_a, \mathcal{T}_{ab}, r_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{T}_{ac}, t_c, \mathcal{T}_{cb}, r_b)$
R3	$(r_a, \mathcal{T}_{ab}, t_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{T}_{ac}, t_c, \mathcal{T}_{cb}, t_b)$
R4a	$(r_a, \mathcal{R}_{ab}, t_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{R}_{ac}, r_c, \mathcal{R}_{cb}, t_b)$
R4b	$(r_a, \mathcal{R}_{ab}, t_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{R}_{ac}, r_c, \mathcal{T}_{cb}, t_b)$
R5	$(t_a, \mathcal{T}_{ab}, t_b) \rightarrow (t_a, \mathcal{T}_{ac}, t_c, \mathcal{T}_{cb}, t_b)$

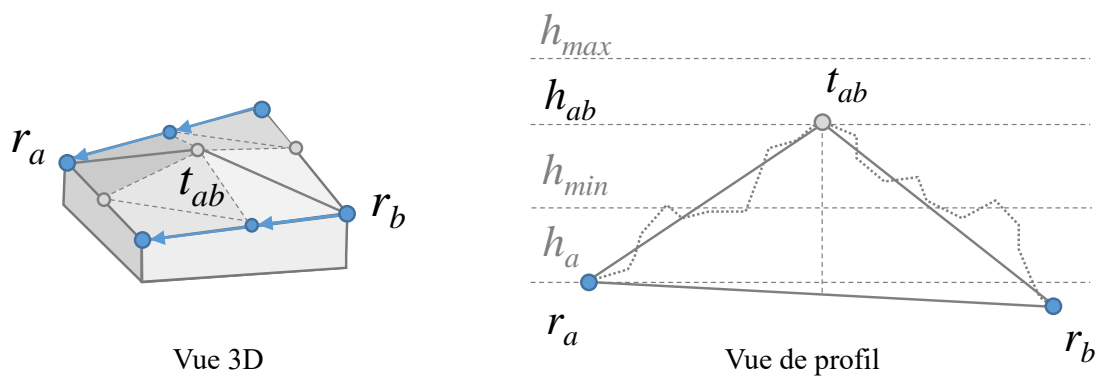


Figure 55 : Illustration de la règle **R2**, où une crête apparaît entre deux vallées. La nouvelle élévation se doit d'être supérieure aux altitudes des deux rivières.

R1 transforme une arête *rivière* en deux sections de rivière (Figure 54), **R2** sert à créer des crêtes entre rivières (Figure 55), et **R3** crée un sommet *terrain* le long de la pente incidente à une rivière (Figure 56). Les règles **R4a** et **R4b** servent à accroître la densité du réseau

hydrographique en finalisant la génération de nouvelles branches par l'ajout de sources aux tributaires instanciés lors de la seconde phase de subdivision, *i.e.* lors de la génération des arêtes internes aux faces. **R4b** est appliquée quand λ atteint un seuil et empêche la source d'être placée trop proche d'un pic montagneux.

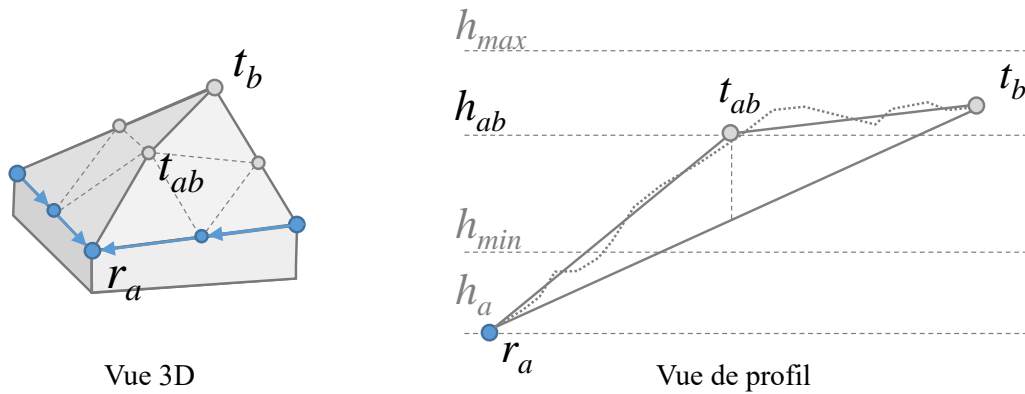


Figure 56 : Illustration de la règle **R3**, où un sommet de type *terrain* apparaît le long de la pente incidente à une rivière.

Subdivision des faces. La subdivision des faces constitue la seconde phase du schéma de subdivision. Trois nouvelles arêtes internes (Figure 57) sont créées et insérées dans chaque triangle dont les arêtes ont été subdivisées, elles relient les trois nouveaux sommets obtenus lors de la phase précédente. Un ensemble de règles spécifiques s'appliquent afin de déterminer le type inconnu \mathcal{U}_{xy} des nouvelles arêtes :

Ia	$(t_a, \mathcal{U}_{ab}, t_b) \rightarrow (t_a, \mathcal{T}_{ab}, t_b)$
Ib1	$(r_a, \mathcal{U}_{ab}, t_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{R}_{ab}, t_b)$ si la condition β est satisfaite
Ib2	$(r_a, \mathcal{U}_{ab}, t_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{T}_{ab}, t_b)$ sinon
Ic	$(r_a, \mathcal{U}_{ab}, r_b) \rightarrow (r_a, \mathcal{T}_{ab}, r_b)$

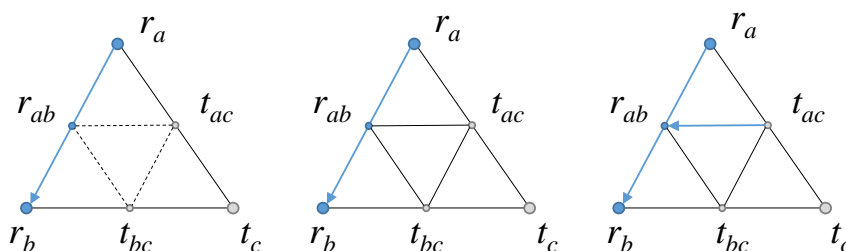


Figure 57 : Arêtes internes : nous subdivisons le triangle par l'ajout de 3 arêtes reliant les 3 nouveaux sommets créés lors de la première phase de subdivision. Le type de l'arête est obtenu après application de règles spécifiques aux arêtes internes. En bleu, les sommets et arêtes de type *rivière*, en gris le type *terrain*. Les 3 arêtes internes s'ajoutent aux 6 nouvelles arêtes introduits par les 3 nouveaux sommets, et en tout 4 faces nouvelles et internes au triangle sont créées.

Les règles **Ib1** et **Ib2** sont des variantes : soit un nouveau cours d'eau tributaire apparaît (Figure 57 droite), ce qui accroît la densité du réseau de rivières, soit un morceau de terrain plein apparaît (Figure 57 milieu). La condition β détermine ce choix. Elle combine plusieurs tests. Un premier test vérifie l'angle entre la rivière existante et le tributaire candidat, qui doit être inférieur à 90° pour éviter un aspect visuel contre-intuitif de la confluence. Un autre test s'assure que l'on se trouve au bon niveau de détail ; en pratique un cours d'eau tributaire apparaît sur une arête interne de longueur dans l'intervalle $\approx [3, 25]$ km. Également, et parce que le calcul est massivement parallèle sur les triangles, l'arête interne *rivière* doit toujours apparaître dans le même triangle incident à la rivière principale, ce qui est garanti par un calcul déterministe décrit en Section 4.2.5. Si la condition β est satisfaite une nouvelle arête *rivière* est créée.

4.2.3.2 Paramètres des sommets

Au cours de la subdivision, chaque nouveau sommet instancié se voit assigner l'ensemble de ses paramètres. Les paramètres de contrôle globaux (\mathcal{A} , \mathcal{W} , \mathcal{P} , \mathcal{B}) sont simplement propagés en moyennant les valeurs attachées aux deux sommets de l'arête subdivisée, pour tout niveau de détail λ . Le calcul des autres paramètres (Table 4.1) résulte aussi d'une moyenne appliquée par défaut, cependant l'application de règles spécifiques de production force le déclenchement de *graphes de calcul* spécifiques sur certains paramètres, dans le but de produire les caractéristiques détaillées du relief.

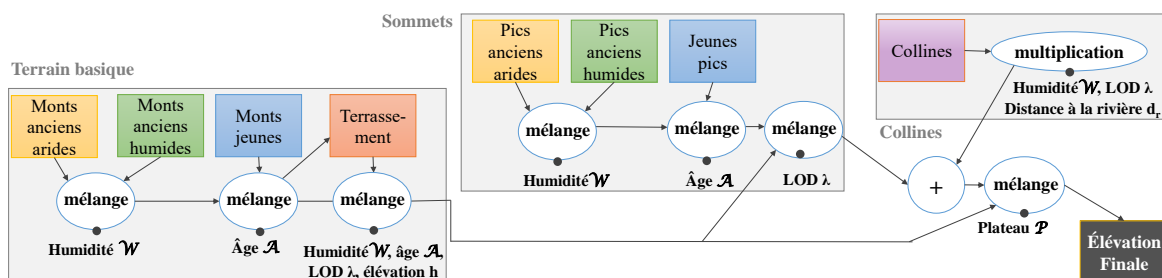


Figure 58 : Graphe de calcul pour le cas (t, \mathcal{T}, t) où une arête *terrain* relie deux sommets *terrain*.

Graphes de calcul. Pour assurer la continuité du modèle tout en contrôlant les caractéristiques du terrain produit, nous combinons en ensemble de nœuds procéduraux dans un graphe, nommé *graphe de calcul*, opérant sur le domaine continu des paramètres attachés aux sommets. Chaque nœud de génération procédurale accepte en entrée les paramètres des deux sommets de l'arête ciblée, et définit des caractéristiques spécifiques du relief, telles que les montagnes, les collines ou encore les plateaux. Des graphes de calcul spécifiques sont exécutés, dépendant de la configuration locale et donc de la règle de production spécifique qui a été déclenchée. La figure 58 montre le graphe appliqué à la configuration (t, \mathcal{T}, t) , la figure 61 à la configuration (r, \mathcal{T}, r) , et la figure 59 au cas (r, \mathcal{T}, t) . Ce sont les configurations les plus

fréquentes rencontrées dans la subdivision. D'autres configurations existent, notamment pour le type *ravine*, mais elles sont similaires (symétriques) ou plus simples.

Nœuds procéduraux. Chaque graphe de calcul combine un ensemble de nœuds procéduraux qui servent au calcul des paramètres. Parmi ces paramètres, l'élévation de sortie h_i du nouveau sommet est dérivée des deux élévations d'entrée h_a et h_b des deux sommets parents t_a et t_b , tel qu'illustré dans les figures 54, 55 et 56. Grâce au typage des sommets (principalement *rivière* et *terrain*), ces nœuds procéduraux génèrent des éléments de forme de relief naturels telles que crêtes et vallées.

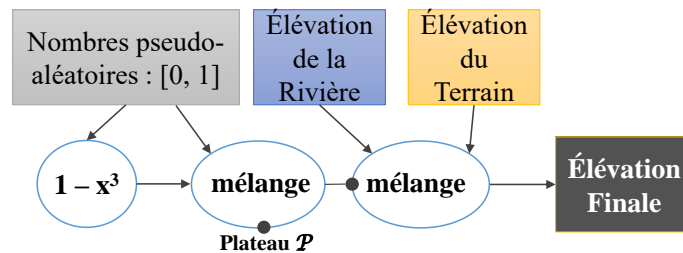


Figure 59 : Graphe de calcul de l'élévation pour le cas (r, \mathcal{T}, t) .

Voici le détail des calculs produits par les nœuds procéduraux du graphe présenté sur la figure 58, pour le cas $(t_a, \mathcal{T}_{ab}, t_b)$. Dans ce qui suit $\xi \in [0, 1]$ désigne un nombre pseudo-aléatoire, généré à partir de la graine attachée au nouveau sommet. Sans perte de généralité nous considérons les sommets parents t_a et t_b ayant des élévations minimale et maximale $h_a < h_b$ respectivement. Soit Δ la dépendance sur l'échelle, λ étant le niveau de détail courant, un entier avec $\lambda = 0$ pour le modèle basse-résolution \mathcal{L} :

$$\Delta = 1 - \frac{2k}{5}, \quad k = \begin{cases} \frac{\lambda}{10}, & \text{si } \lambda < 10 \\ 1, & \text{sinon} \end{cases}$$

Montagne classique. L'élévation h est obtenue par interpolation fractale entre les deux élévations h_a et h_b .

$$h = (1 - \alpha)h_a + \alpha h_b$$

Le coefficient α dépend du type de montagne (jeune, ancien, humide ou aride) :

Ancien aride	$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{2\Delta}{5}(\xi - 1)$
Ancien humide	$\alpha = 1 + \frac{3\Delta}{5}(\xi - 1)$
Jeune	$\alpha = \frac{1}{2} + \frac{\Delta}{2}(\xi^\gamma - 1)$

Pics. Les élévations des pics sont déterminées à partir de l'élévation moyenne de la croûte \mathcal{C} :

Ancien aride $h = \xi\mathcal{C}$
Ancien humide $h = (1 - \xi^2)\mathcal{C}$
Jeune $h = \xi^2\mathcal{C}$

Terrassement. Ce nœud modifie une élévation d'entrée h_i afin de produire un effet de terrassement sur la roche des zones arides :

$$h = T + \beta^2(3 - 2\beta)\tau \quad \text{avec} \quad T = \lfloor \frac{h_i}{\tau} \rfloor \tau, \quad \beta = \frac{h_i - T}{\tau}$$

τ représente la hauteur des terrasses, qui peut être modulée elle-même par d'autres nœuds procéduraux, bien que dans notre implémentation test nous n'avons utilisé qu'une simple constante de 700 mètres. Le facteur de l'interpolation d'Hermite β est contraint entre $[0, 1]$.

Collines. Ces nœuds procéduraux produisent un *offset* H_i appliqué à l'élévation du terrain :

$$H_i = \min(H_{max}, \frac{(1 - \xi^2)\epsilon}{2})\mathcal{B}, \quad \epsilon = \begin{cases} \frac{-\|t_a - t_b\|}{3}, & \text{si } \chi < 0.5 \\ \|t_a - t_b\|, & \text{sinon} \end{cases}$$

$\|t_a - t_b\|$ est la longueur de l'arête courante, H_{max} est une constante indiquant dans notre implémentation la hauteur maximale des collines (800 m), et χ est un nombre pseudo-aléatoire uniformément distribué entre $[0, 1]$.

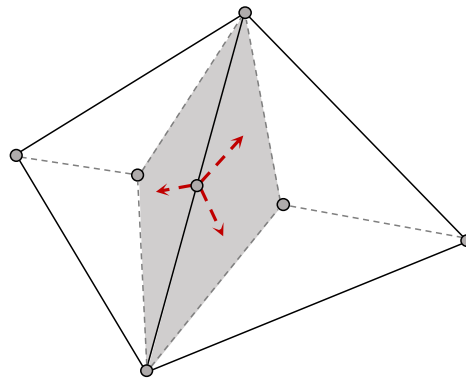


Figure 60 : Décalage horizontal appliqué potentiellement à chaque nouveau sommet, au sein d'une zone définie en coordonnées barycentriques qui garantit le non-croisement du maillage.

Décalage horizontal. Dans le but de masquer la régularité et la linéarité de la triangulation, susceptibles de transparaître dans les paysages générés, nous appliquons un décalage horizontal aléatoire mais déterministe aux nouveaux sommets instanciés. La translation appliquée se fait en coordonnées barycentriques au sein d'un des deux triangles incidents au sommet, choisi aléatoirement. L'opération est délicate car pouvant induire des croisements dans le maillage, qui le rendrait dégénéré pour le modèle et pour le rendu. Une bonne solution à laquelle nous avons abouti est de choisir la nouvelle position du sommet dans un domaine

barycentrique garantissant l'absence de croisement. Chaque arête du triangle choisi pouvant être sujette à un tel déplacement, il s'agit de garantir une zone de sûreté telle que décrite dans la figure 60. Cette étape introduit un caractère chaotique dans le contour du relief, qui apparaît ainsi plus naturel et évident à l'oeil : elle est particulièrement importante pour le tracé des rivières, le pourtour des lacs et les effets dans les zones rocheuses arides.

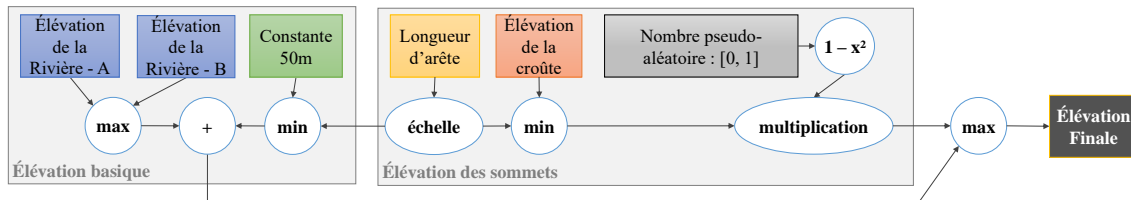


Figure 61 : Graphe de calcul de l'élévation pour le cas où deux sommets rivière sont connectés par une arête terrain (r, \mathcal{T}, r) .

4.2.3.3 Relief spécifique

Ravines. Les ravines donnent sur les rivières et forment un réseau hiérarchisé de rigoles de drainage sèches. Elles ajoutent au réalisme en creusant plus avant le terrain par un certain nombre de sillons. Dans la subdivision, les ravines sont définies par les sommets et arêtes typés g , similaires aux rivières et sont créées à partir de règles de production similaires aux règles **R1**, **R2** et **R3**. Dans la phase de création des arêtes et faces internes aux triangles, lorsque la condition β n'est pas satisfaite et que donc l'instanciation d'une rivière tributaire échoue, nous instancions à la place potentiellement une ravine tributaire.

Lacs. L'*hyper-amplification* que nous proposons permet de générer des étendues d'eau non endoréiques, c'est-à-dire non isolées et connectées localement au réseau des fleuves et rivières.

Sur Terre la grande majorité des lacs est de telle nature. Dans le modèle, les lacs (Figure 62) sont formés par extension du lit des rivières, en s'appuyant fortement sur la seconde phase de l'*hyper-amplification* d'injection de modèles et de prescription de sections transverses aux rivières (Section 4.2.4). La règle de production **R3** est modifiée dans le but spécifique de générer des lacs en remplaçant le sommet terrain en un sommet lac. Ceci s'opère aléatoirement d'après une probabilité calculée à partir de l'humidité locale $\mathcal{W}(\mathbf{p})$. Le sommet lac vient étendre le lit de rivière, en assignant zéro au paramètre d_r qui représente la distance à la rivière la plus proche. Ce paramètre joue un rôle prépondérant dans la prescription des sections transverses et en procédant de la sorte on garantira l'étendue du lac ainsi que les pentes de terrain qui y mènent. Des calculs spécifiques d'élévation de l'eau sont déclenchés pour les lacs dans le but de garantir localement la planéité de l'eau sur toute l'étendue du lac (Figure 63).

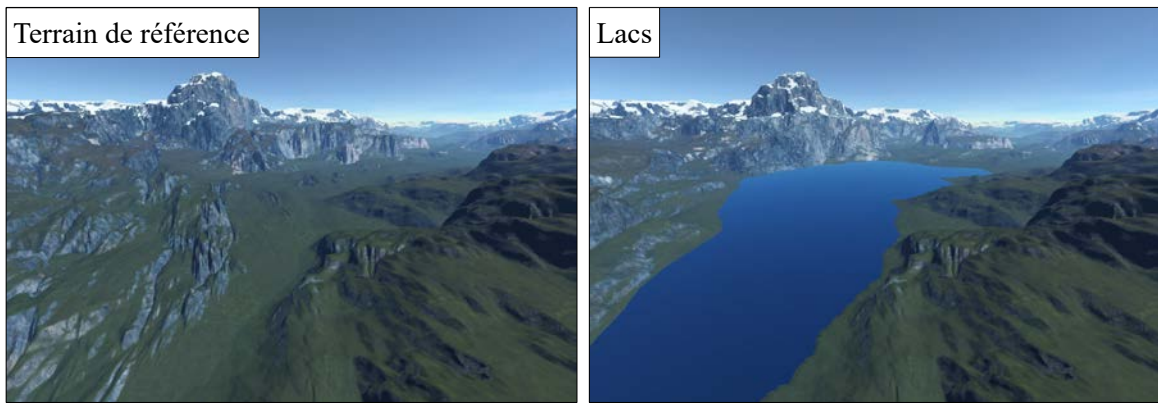


Figure 62 : Notre méthode permet la génération de lacs : l'image de gauche montre un terrain référence produit par l'algorithme d'*hyper-amplification* brut, tandis que l'image de droite montre la même région augmentée de lacs.

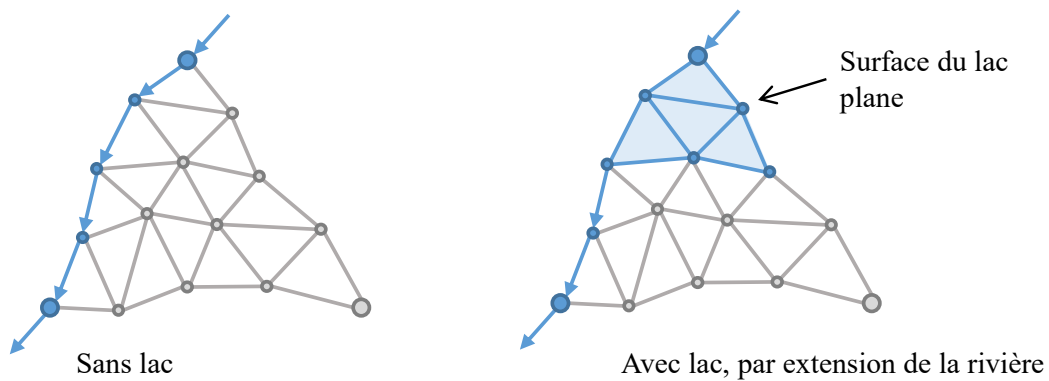


Figure 63 : Les lacs apparaissent comme des extensions des rivières. Un calcul dédié de l'élévation de l'eau permet de garantir la planéité des lacs.

4.2.4 Injection de modelés

Une fois la subdivision complète, c'est-à-dire lorsque la triangulation a été suffisamment détaillée localement, nous procédons à une seconde phase d'amplification : le but est de produire des modelés hydrographiques réalistes, conformes aux archétypes décrits en géomorphologie (Figure 64).

Cette nouvelle phase est un post-traitement de la triangulation raffinée \mathcal{H} , appliqué à chacun de ses sommets. Nous modifions les élévations des sommets produites par la subdivision, d'après les paramètres de distance à la rivière la plus proche d_r , et d'élévation du lit de rivière le plus proche h_r . Le déplacement vertical des sommets permet de sculpter le lit des rivières ainsi que les vallées qui les environnent.

Les caractéristiques de la section transverse d'une vallée, pente locale et largeur, sont calculées à partir d'une estimation du flot hydrique local $|\phi|$, stocké en chaque sommet de la triangulation et transmis par la subdivision. Nous utilisons une loi de puissance [Arg+19] pour la relation entre la valeur du flot et la forme de la vallée, un drainage fort, par exemple celui

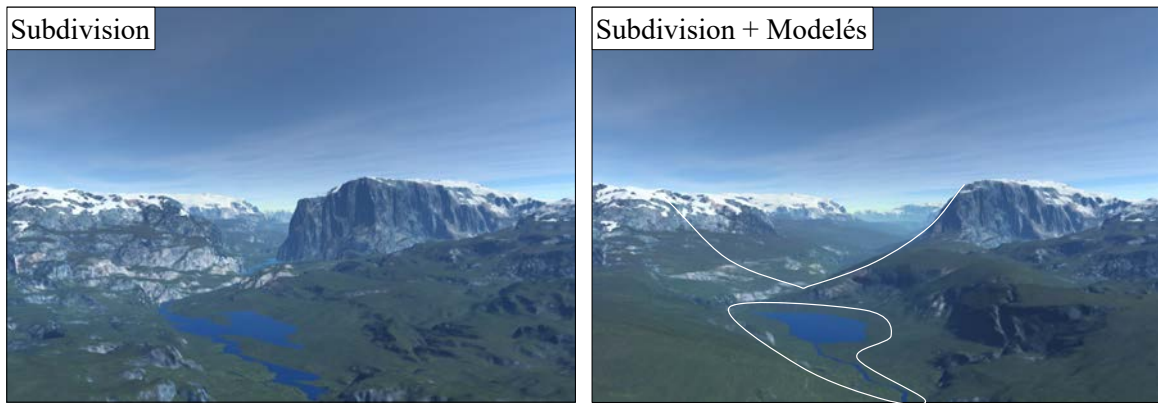


Figure 64 : Comparaison entre l'*hyper-amplification* ne reposant que sur la subdivision (gauche) et l'ajout de modèles permettant la prescription de lits de rivières et de vallées transverses (droite). Ces deux étapes sont réalisées en temps-réel sur GPU.

d'un grand fleuve, induisant moins de pente et une vallée plus large. Nous appliquons une interpolation d'Hermite cubique pour inscrire de manière lisse, sans discontinuités artificielles aux frontières, le profil résultant dans le terrain brut produit par la subdivision (Figure 65).

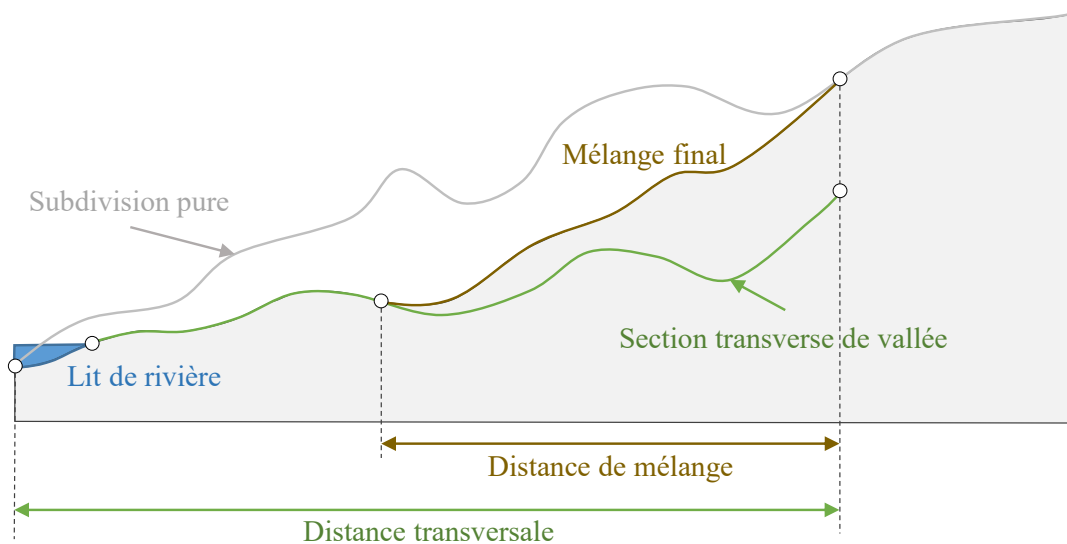


Figure 65 : Illustration du procédé appliqué à chaque sommet et permettant la génération du lit de rivière et de la vallée transverse, paramétré par d_r , h_r et ϕ .

La section transverse de la vallée est interpolée, à partir de l'index e_r , sur N profils génériques, des courbes unidimensionnelles représentant des élévations de vallées normalisées. Des archétypes de sections transverses ont été proposés pour différents types de vallées en géomorphologie et ont été utilisés avec succès pour sculpter des terrains [Arg+19]. Notre implémentation s'appuie sur des modèles paramétriques génériques aisément stockés et évalués sur cartes graphiques. Des sections transverses réelles, issues de données terrestres, pourraient être utilisées à la place, pour plus de réalisme : la difficulté viendrait uniquement de la capacité à extraire ces sections de DEM, et de l'accroissement du coût mémoire de la méthode.

4.2.5 Implémentation GPU

Un aspect clé de notre méthode d'*hyper-amplification* est qu'elle a été pensée pour être massivement parallélisée. Aussi, et afin de permettre l'exploration temps réel des planètes, nous proposons une implémentation intégralement GPU de la méthode. La figure 66 expose le *pipeline* de modélisation temps-réel, et son couplage avec le *pipeline* de rendu.

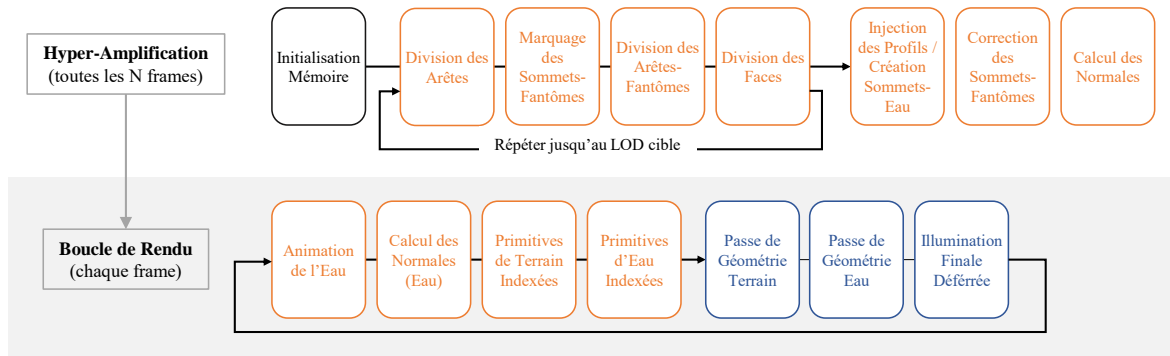


Figure 66 : Aperçu des opérations GPU : (orange) *compute shaders*, (bleu) passes graphiques.

Architecture parallèle. La génération du modèle hyper-amplifié et son post-traitement sont réalisés sur GPU par des *compute shaders*, par un certain nombre d'étapes séquencées. La triangulation demeure tout au long du processus en mémoire video, ce qui élimine des transferts coûteux en bande passante vers le CPU hôte. Le processus de modélisation complet, asynchrone, est effectué une fois toutes les $n \approx 10$ frames de rendu. Le modèle ainsi généré, dès qu'il est prêt, est directement injecté dans le *pipeline* graphique pour être rendu.

Pour chaque instance de modélisation, le niveau de détail cible de la triangulation est d'abord atteint par l'appel itératif de quatre traitements : division d'arêtes, marquage des sommets-fantômes, division des arêtes-fantômes et division des faces. Les opérations dites « fantômes » garantissent une géométrie étanche (*i.e.* un maillage sans trous) aux frontières de différents niveaux de détail : les sommets fantômes sont placés à l'exact milieu des arêtes non divisées appartenant à des faces qui elles nécessitent d'être divisées (*i.e.* des triangles possédant au moins une arête divisée). Ces quatre traitements représentent un unique niveau de subdivision : ils sont donc répétés jusqu'à ce qu'aucune arête ne reste à diviser pour atteindre le niveau de détail cible de la géométrie.

Une fois cette séquence achevée, nous procédons à l'injection des modelés hydrographiques (Section 4.2.4) pour la création des lits de rivière et des vallées attenantes. Ce processus est suivi de la création en masse, de manière parallèle, des sommets représentant la géométrie de l'eau (rivières, lacs, océans) pour chaque sommet terrain où l'élévation de l'eau est supérieure à celui-ci $h_w > h$. Les sommets représentant l'eau sont ensuite connectés entre eux en dupliquant la topologie du terrain sous-jacent. La phase de modélisation s'achève avec le re-positionnement des sommets fantômes affectés par la prescription des sections transverses,

et le calcul des normales. À la toute fin, les étapes du *pipeline* de rendu construisent les primitives graphiques indexées (terrain et eau) d’après le modèle géométrique produit et d’après le frustum caméra courant, puis passent au rendu final par une méthode de *deferred shading*.

Déterminisme. La sortie du *pipeline* de modélisation est déterministe et garantit la reproduction cohérente du terrain à différentes échelles. Toutes les opérations, nombreuses, de nature stochastique doivent donc être reproductibles. Les nœuds de calcul procéduraux produisent des élévations, par exemple, qui doivent être invariantes, *i.e.* ne pas fluctuer d’une instance de modélisation à l’autre. Nous nous assurons de cela par l’emploi d’une graine pseudo-aléatoire unique (un entier non signé) attachée à chaque sommet, et créée lors de l’instanciation d’un nouveau sommet comme la somme circulaire des graines des deux sommets de l’arête, à la façon de [Der+11]. Par ce biais, quel que soit le chemin de traitement amenant à la subdivision d’une arête, les informations pseudo-aléatoires produites pour le nouveau sommet seront invariantes. Le parallélisme des traitements est aussi source de difficultés, le calcul des arêtes internes dans un triangle est délicat car différents triangles voisins peuvent accéder au même sommet de manière concurrente. Pour nous assurer qu’une rivière tributaire soit toujours créée dans le même triangle incident à la rivière principale, nous tirons un nombre pseudo-aléatoire issu de la graine du sommet de jonction et qui permet de choisir de manière déterministe le bon triangle.

Haute précision. Le rendu de planètes sur GPU pose problème en raison de la précision limitée des flottants (32 bits). Le problème de l’échelle est connu et nous utilisons la solution du *log-z depth buffering* [CR11] pour le calcul des profondeurs sans artefacts. Nous utilisons également des flottants double précision partout où cela est possible. Bien que cela soit le cas dans les traitements GPGPU des *compute shaders*, tant qu’on se cantonne à OpenGL, les passes graphiques elles sont limitées à 32 bits dans le *pipeline* pour l’interpolation des paramètres sur les primitives. Notons que l’usage de flottants double-précision est obligatoire dans le contexte du rendu de planètes virtuelles à l’échelle 1/1 : plus de 7 chiffres sont en effet requis pour représenter une position donnée à la précision du centimètre⁴. Nous utilisons des matrices de projection et des positions représentées en double-précision, cependant, du fait de la limitation matérielle évoquée plus haut, nous sommes obligés de trouver une parade pour passer du *vertex shader* au *fragment shader*. Nous proposons d’interpoler et de stocker en 32 bits dans le *buffer* de géométrie la distance du fragment courant à la caméra, puis dans le *fragment shader* de le convertir en double-précision et de reconstruire la position dans le repère monde d’après la matrice double-précision inversée de projection-vue. Ceci permet le texturage tri-planaire, à partir d’une interpolation bi-linéaire en double-précision sur les coordonnées monde et écrite à la main dans le *shader* (celle proposée nativement est en 32 bits au mieux). Dans

4. Pour la Terre, d’un rayon de 6370km, 9 chiffres décimaux sont requis.

nos expérimentations, cette approche originale est valide et produit un texturage stable, sans artefact, du terrain, même pour des détails texturés en deçà du centimètre.

4.2.6 Résultats

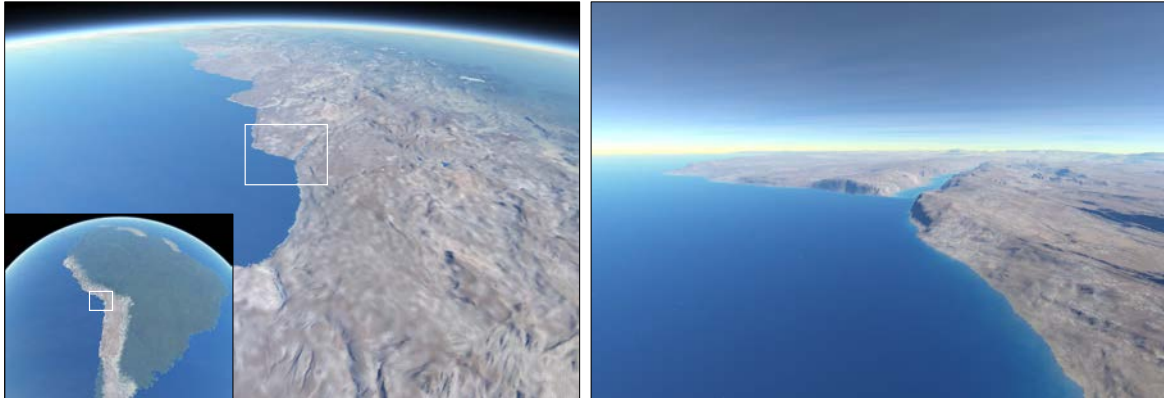


Figure 67 : Instance d'*hyper-amplification* réalisée à partir d'une représentation de la Terre par cartes de contrôle, présentant un zoom progressif sur le continent sud-américain.

Performance. Le prototype développé par nos soins a été testé sur un Intel i7-6700K cadencé à 4.0 GHz, couplé à une carte graphique NVIDIA GTX 1080Ti. Les planètes que nous présentons ont approximativement la taille de la Terre, *i.e.* un rayon de 6370km, la modélisation se fait à l'échelle 1/1 et nous atteignons une résolution en surface de 50 cm au plus haut niveau de détail. La fréquence de calcul et d'affichage du rendu temps-réel est approximativement de 25 Hz pour les cas critiques de vues basse altitude avec calculs intensifs pour l'illumination et l'animation de l'eau, les effets atmosphériques et le texturage double-précision du terrain.

Une instance de modélisation de la surface planétaire, réalisée toutes les 10 *frames* de rendu, incluant subdivision, injection de profils et post-traitements, prend en moyenne 80 ms. Mais cette mesure varie fortement selon que la caméra est plus ou moins proche du terrain, avec des cas critiques pointant au-dessus de 100 ms lorsqu'on s'approche du centimètre de résolution et que le compte des triangles terrain atteint 4 millions. Une instance d'*hyper-amplification* typique peut cependant être évaluée et détaillée de la façon suivante : la subdivision prend ≈ 50 ms (44% étant pris par la division des arêtes, 15% par les opérations dites « fantômes » et 41% par la division des faces), la prescription des lits de rivière et des vallées représente à peine 3 ms, enfin les post-traitements combinés prennent ≈ 30 ms. Le coût de l'*hyper-amplification* est amorti cependant sur les 10 *frames* de rendu, le GPU étant libre de planifier les *compute jobs* au milieu des passes graphiques, ce qui permet en pratique de maintenir l'exploration temps-réel sans à-coup.

Contrôle. La méthode offre des capacités de contrôle à l'utilisateur, à la fois à haut-niveau et localement. Le contrôle haut-niveau se fait pleinement par la spécification de l'entrée du processus, c'est-à-dire par les données planétaires qui définissent à basse-résolution la planète. Le plus commode pour l'utilisateur est de fournir des cartes de contrôle grande échelle : la figure 67 démontre l'usage d'une telle représentation avec la reproduction amplifiée de la Terre, obtenue en entrant simplement le relief des continents et une carte d'humidité à résolution 50 km dans le système. Le contrôle de la synthèse à une échelle locale est également possible, mais non démontré ici. Il s'agirait cependant de ré-écrire le *shader* d'injection de modèles pour que le déplacement vertical des sommets se fasse sur des domaines spatiaux restreints, selon des cartes de hauteurs spécifiques prescrites par l'utilisateur.

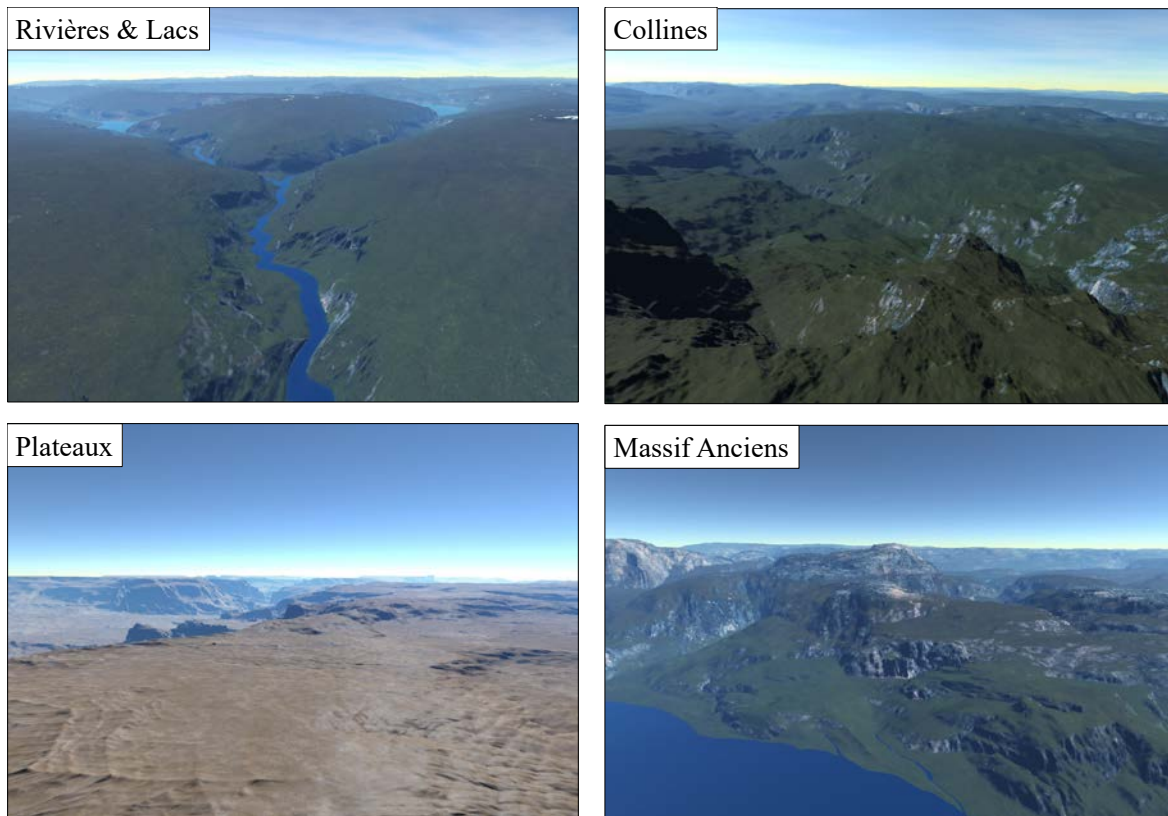


Figure 68 : La méthode permet la génération et le contrôle d'une vaste variété de terrains, tels rivières et lacs (\mathcal{W}), collines (\mathcal{B}), massifs anciens et jeunes (\mathcal{A}) et plateaux (\mathcal{P}).

La figure 68 montre la variété des terrains générés par notre modèle. Les lacs sont généralement produits dans les régions où une grande humidité \mathcal{W} règne. Les plateaux et les collines apparaissent là où les paramètres de contrôle \mathcal{P} et respectivement \mathcal{B} dominent. La continuité des terrains générés est garantie par l'interpolation des paramètres dans le domaine spatial et la combinaison lisse des élévations dans les graphes de calcul. La forme finale des montagnes est influencée par l'âge géologique des orogénies \mathcal{A} , qui donne des pentes plus douces et érodées pour les vieux massifs. Le paramètre humidité joue aussi un rôle important dans la forme détaillée et le rendu des terrains tel que le montre la figure 69. Enfin, ravines et

sillons de drainage interviennent pour ajouter plus de réalisme en travaillant plus avant les terrains (Figure 70).

Pour finir, nous n'avons pas entrepris de tester le potentiel en terme d'édition et de conception de notre système ; mais, à en juger par la bonne performance de la méthode sur machine grand public, une telle approche serait réalisable. On peut librement imaginer la manipulation et l'édition des cartes de contrôle en peignant directement avec un dispositif de pointage sur la planète. Dans notre prototype une demi-seconde est nécessaire pour régénérer le modèle basse résolution \mathcal{L} comprenant le réseau hydrographique de base, alors que la subdivision et le rendu sont quasi-instantanés. Ceci est suffisant pour imaginer un retour interactif permettant des sessions d'édition fluides.

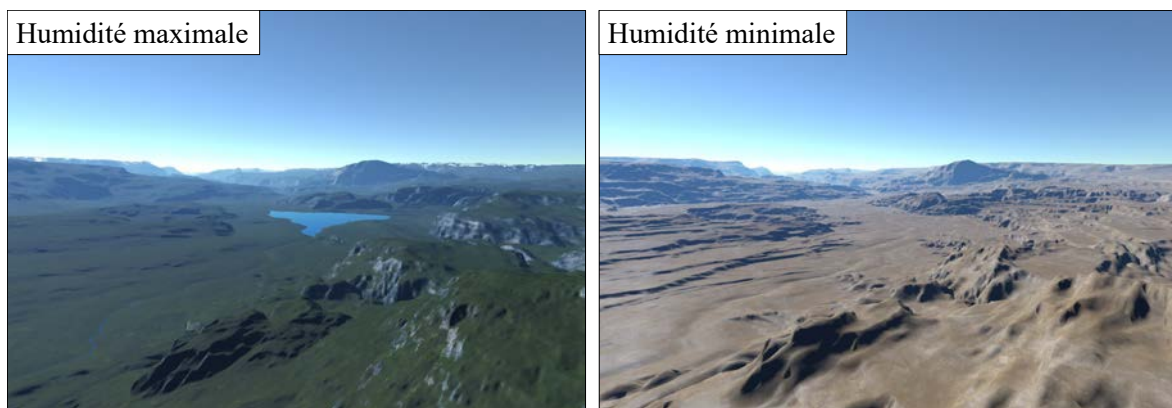


Figure 69 : Influence du paramètre *humidité* \mathcal{W} donnant des paysages différents : (gauche) présence d'eau, pentes du terrain douces en basse altitude, (droite) décalage horizontal marqué suggérant l'érosion éolienne, lits de rivière asséchés et effet de terrassement sur les pentes rocheuses.

Comparaison. Notre méthode se compare favorablement aux techniques de subdivision standards [FFC82], ainsi qu'on peut le voir sur la figure 71, grâce à un procédé adaptatif dépendant de l'échelle et auto-ajusté en fonction des caractéristiques du terrain à produire. Comparée à d'autres méthodes de synthèse planétaire détaillée [Ebe+98 ; Der+11], notre approche propose un cadre unifié pour la synthèse combinée d'une variété de modelés tels que les vallées, les réseaux hydrographiques, les massifs et les plaines. [Der+11] est capable de générer la surface d'une planète avec un réseau de rivières, mais souffre de l'emploi d'un schéma de subdivision standard, simple, appliqué au terrain environnant : le résultat est un relief partout homogène, isotrope, non-réaliste. Enfin, comparée à la première approche d'amplification présentée au début de ce chapitre [Cor+19], l'*hyper-amplification* présente l'avantage considérable de synthétiser un réseau hydrographique à haute précision ainsi que le relief varié qui l'accompagne, tandis que cette première méthode se limitait à une résolution de 100 m sans un tel réseau.

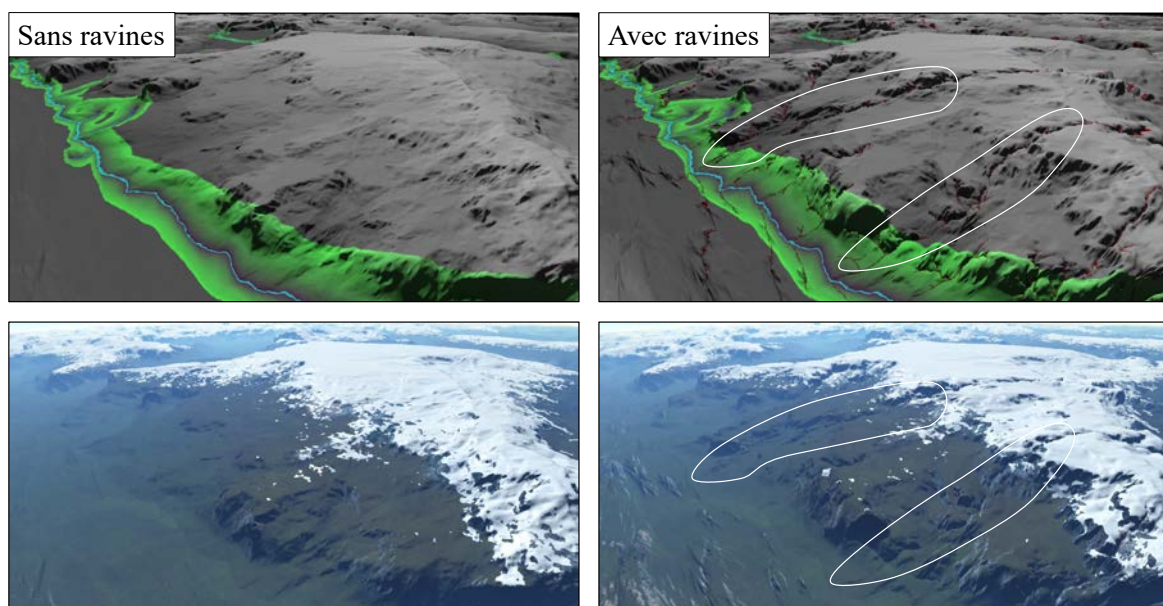


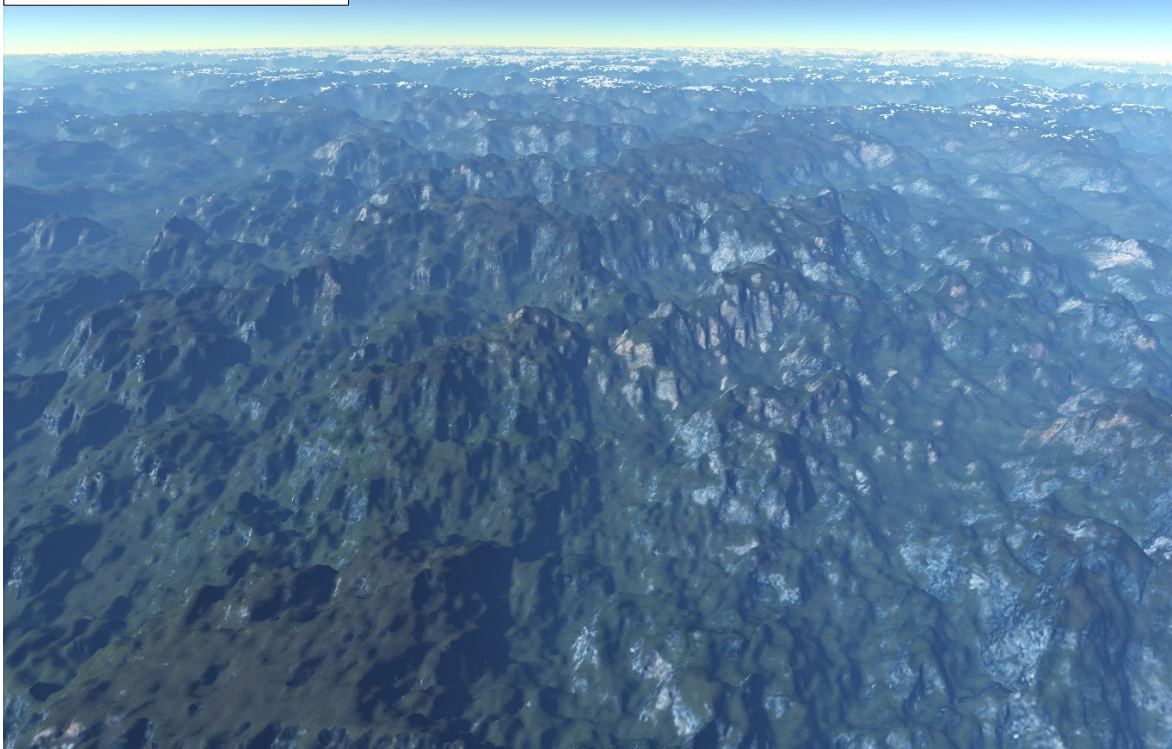
Figure 70 : Comparaison entre un terrain généré près d'une arête *rivière* avec sa région de profil transverse (en vert), sans (gauche) et avec (droite) présence de ravines.

Limitations. Notre méthode est coûteuse en mémoire vidéo, elle requiert plus de 2Go sur la carte graphique. L'algorithme de subdivision s'appuie sur de nombreux paramètres, auxquels il faut ajouter les données de topologie classiques du maillage triangulé. En tout, 32 octets sont utilisés pour stocker une arête, 32 octets pour un triangle, 48 octets pour représenter la topologie d'un sommet et 112 octets pour stocker ses paramètres. L'usage de flottants en double-précision pour les positions a un impact également important. Les tableaux de sommets et d'autres *buffers* spécifiques au rendu accroissent significativement le total de mémoire requise par le prototype. Ce dernier pourrait être optimisé, en compactant efficacement, sur champs de *bits*, quelques uns des paramètres de contrôle comme \mathcal{W} ou \mathcal{P} .

Bien que notre méthode soit efficace et capable de générer des modèles réalistes, elle souffre de la présence d'artefacts visuels indésirables au rendu de la géométrie. Cela se voit surtout sur les hauteurs enneigées, car le rendu de la neige dépend fortement de la pente (normale) en chaque sommet, qui varie d'une subdivision à l'autre toutes les ≈ 10 *frames*. Cela pourrait toutefois être tempéré par l'usage d'une technique d'*antialiasing* temporel de l'art, ou par l'introduction d'un *morphing* progressif de la géométrie entre deux instances de subdivision consécutives.

Finalement, en terme de réalisme, il apparaît que le réseau hydrographique n'est pas suffisamment dense par comparaison aux données réelles dont nous disposons. Cela provient de contraintes géométriques du schéma de subdivision et c'est une limitation qui paraît dure à lever. Par ailleurs, des pics et des crêtes plus réalistes pourraient être obtenus en ré-utilisant des concepts orométriques récemment introduits dans [Arg+19] : il s'agirait de complexifier l'algorithme de subdivision, au niveau des règles et des graphes de calcul, afin de produire une distribution de formes montagneuses plus réalistes qu'actuellement dans le prototype.

Subdivision Classique



Hyper-amplification

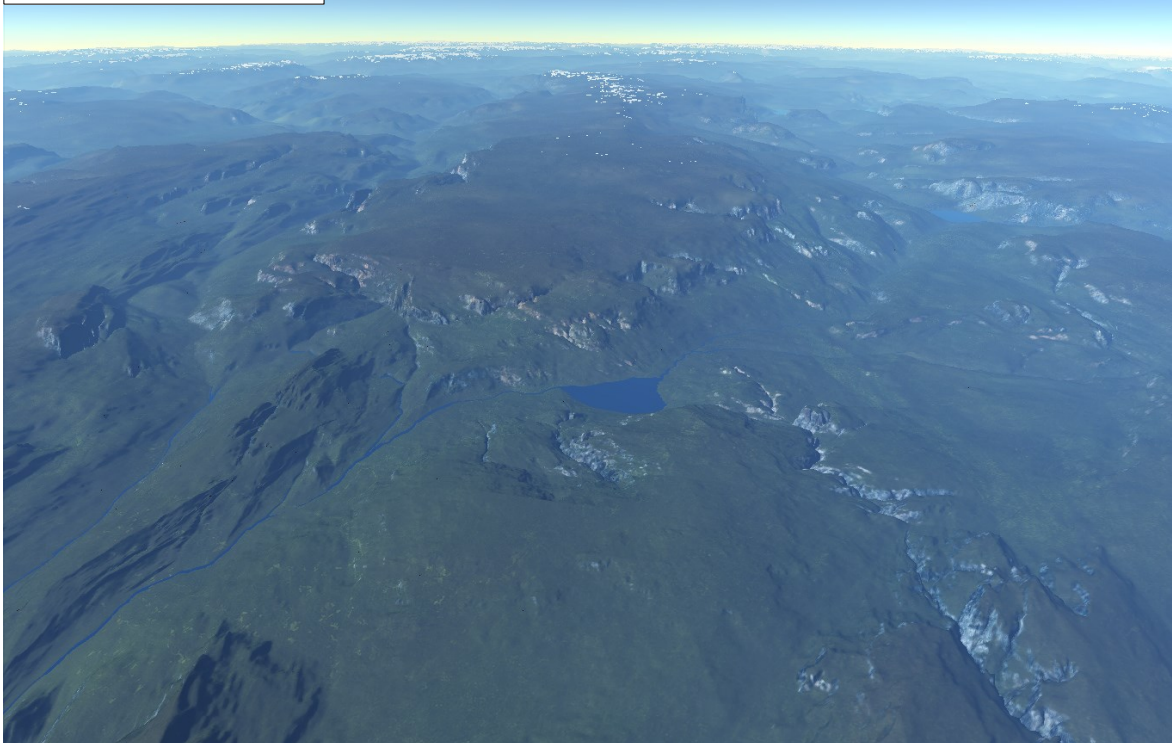


Figure 71 : Notre méthode intègre des caractéristiques du relief telles que rivières, vallées, lacs, plateaux, qui apparaissent au final plus naturel que les modèles générés par des techniques de subdivision classiques.

CONCLUSION

Tout au long de cette thèse, nous avons cherché à aborder la modélisation de terrains à l'échelle maximale, c'est-à-dire couvrant des planètes complètes, selon un axe opposé à l'approche orientée *out-of-core streaming*. Pour rappel, une telle approche est celle appliquée dans *Google Earth* par exemple, où l'application ne s'occupe que de transférer par le réseau et de présenter à l'utilisateur uniquement des données statiques, *i.e.* précalculées et stockées. Ne pas avoir recours à cette approche, c'est essentiellement ne pas procéder au stockage du modèle haute-résolution, ce qui nécessiterait, pour une planète semblable en taille à la Terre, plusieurs dizaines de pétaoctets de mémoire, du fait d'une surface à générer de plusieurs centaines de millions de kilomètres carrés. Ce choix discrimine très fortement le panel des méthodes de l'état de l'art susceptibles d'être employées pour la modélisation. En effet, si l'on disposait d'une telle quantité de mémoire alors le plus simple et direct serait de pré-calculer l'entièreté du modèle synthétique en appliquant de bonnes méthodes adaptées de l'état de l'art, par exemple [Cor+18] pour générer par simulation des chaînes de montagnes travaillées par l'érosion fluviale, ou [Gén+13] pour inscrire des réseaux hydrographiques convaincants de manière procédurale, ou encore et si l'on veut être un peu plus rapide s'orienter vers la synthèse à partir d'exemples avec l'utilisation de réseaux neuronaux générateurs comme dans [Gué+17]. Toutes ces approches seraient parfaitement valides, et même susceptibles de générer des planètes localement fortement réalistes. Cependant, seuls des centres de calcul dédiés joutés à plusieurs milliers de serveurs de stockage seraient capables de synthétiser et de mémoriser de tels modèles.

Mais, même en faisant l'hypothèse que de telles ressources matérielles soient disponibles, il demeure un aspect de modélisation non-élucidé et qui concerne, explicitement, l'échelle macroscopique des planètes telluriques. Les méthodes de la littérature que l'on vient d'évoquer conviennent bien pour les échelles situées en-deçà du macroscopique, mais rien n'a été proposé jusqu'ici pour synthétiser les grandes structures planétaires que sont les continents et leurs côtes, les distributions d'îles et d'arcs d'îles, la forme des chaînes montagneuses, ainsi que les grandes formations sous-marines telles les dorsales ou les fosses – en un mot, tout ce qui est visible depuis l'espace. C'est donc notre première contribution : une méthode (**chapitre 3**) à même de générer automatiquement ces structures de manière convaincante, grâce à une prise en compte des réalités décrites par la théorie de la Tectonique des Plaques. C'est donc une approche physique, recréant les conditions principales donnant lieu aux mouvements de plaques et aux interactions situées en bordure de celles-ci génératrices de relief caractéristique, en convergence comme en divergence. La méthode offre des capacités de contrôle à l'utilisateur

intéressantes pour une simulation, grâce à une implémentation s'exécutant en temps interactif : divers scénarios de mouvements de plaques peuvent être librement façonnés pour répondre à des besoins créatifs précis. En résumé, que l'on soit dans une approche de *streaming out-of-core* ou pas, cet aspect demeurerait jusqu'alors non étudié, et notre méthode est une première solution, un premier pas intéressant pour prendre en compte cette échelle particulière.

Reste le problème cependant des vastes dimensions des planètes lorsque l'on souhaite proposer leur exploration continue et jusqu'au plus près de celles-ci. Si l'on ne dispose pas de centres de calcul dédiés ni de centres de stockage comme ce fut le cas dans cette thèse, on ne peut pas s'appuyer sur l'approche *out-of-core*, se posent dès lors des problèmes majeurs pour générer les modèles car entrent en scène tous les verrous relatifs au multi-échelle et au multi-modal. Ceci nous a forcé à prendre des chemins de traverse, de trouver une parade, une approche alternative susceptible d'être adaptable à des ressources matérielles limitées. Notre proposition est de prendre le même parti pris pour la modélisation que celui que l'on trouve classiquement dans le domaine du rendu : la génération de modèles adaptatifs. C'est-à-dire, ne calculer idéalement que ce qui est strictement visible depuis un certain point de vue caméra, donc ne générer que des modèles *partiels*. De manière similaire au rendu, du fait des angles rasants typiques de l'observation de terrains, cela signifie être capable de générer des modèles fragmentaires qui soient multi-échelles, *i.e.* avec haut niveau de détail pour les éléments près de la caméra et des versions moins raffinées pour les éléments du paysage lointain. Partant du modèle à grande-échelle produit par la méthode tectonique, nous proposons d'*amplifier* le terrain afin de produire les détails locaux de la planète. Cette amplification permet de passer de manière continue de l'échelle macroscopique à l'échelle mésoscopique ; par construction, elle est circonscrite au point de vue courant de la caméra et la synthèse se fait à la volée. Le **chapitre 4** offre deux telles solutions. La première (**section 4.1**) est similaire en essence à ce qui a été proposé dans l'industrie, comme la solution du studio CIG (développeur du jeu vidéo *Star Citizen*), elle procède par collage de cartes de hauteur sur la surface planétaire, cependant de manière guidée par les paramètres de la croûte produite par le modèle tectonique. Nous prenons en compte notamment l'âge géologique du relief pour produire des monts anciens et des jeunes montagnes, et la direction de plissement afin d'orienter localement les crêtes selon le sens de convergence des plaques tectoniques. Cette méthode possède ses limitations : en termes de précision du terrain final, l'usage de cartes de hauteur ne permet pas de descendre en dessous de plusieurs dizaines de mètres (notons que le studio CIG modélise ses planètes à l'échelle 1/10 ce qui lui permet de s'affranchir de ce problème, alors que nous travaillons à l'échelle 1/1) ; en termes de performance le *thread* CPU en charge de la tessellation et des requêtes sur le modèle tectonique est lent et cause des changements brutaux de topographie très visibles quand la caméra se déplace ; enfin en termes de réalisme l'usage de cartes de hauteur mélangées aléatoirement prévient la prescription d'une hydrographie, ce qui apparaît fortement problématique, l'hydrographie étant un élément quasi-central et structurant des paysages. Pour pallier à ces trois limitations nous proposons une seconde méthode, baptisée *hyper-amplification* (**section 4.2**). Elle s'inspire de la méthode de Derzapf *et al.* [Der+11] car elle instancie un réseau hydrographique de base (*i.e.* des grands fleuves) sur un maillage à

grande échelle de la planète qui est ensuite raffiné par subdivisions stochastiques de manière massivement parallèle. Au contraire de cette méthode de l'état de l'art, nous proposons : (1) d'attribuer le maillage basse résolution avec un ensemble de paramètres de contrôle, spécifiés soit par des cartes entrées par l'utilisateur, soit par le modèle produit par la méthode de recreation tectonique (ou une combinaison des deux), (2) de générer des modelés de terrain spécifiques (crêtes, collines, terrasses, vallées fluviales) grâce à un ensemble de règles guidées par le paramétrage précédent et par le niveau de détail courant, (3) de produire en sus des étendues d'eau non-endoréiques dans les régions humides, c'est-à-dire des lacs de tailles diverses connectés au réseau hydrographique, et (4) un schéma de subdivision dyadique sur les arêtes beaucoup plus simple à mettre en œuvre en terme de synchronisation, entièrement implémenté sous forme d'une séquence de *compute shaders* s'exécutant sur GPU. Au final l'hyper-amplification (figure 72) permet l'exploration en temps-réel avec une bonne performance de planètes structurées à la fois globalement par la tectonique et à l'échelle intermédiaire, locale, par des réseaux de fleuves, d'affluents et de lacs, entourés de reliefs et modelés variés.



Figure 72 : Hyper-amplification d'une planète tectonique.

Limitations et perspectives

Malgré les contributions que nous venons de résumer, il reste toutefois nombre d'éléments d'importance qui peuvent être améliorés ou qui n'ont pas été traités.

Le modèle tectonique tout d'abord, présente des défauts sur le plan du réalisme effectif qui ont été remarqués par l'expert en tectonophysique que nous avons consulté. Notre modèle produit trop d'obductions car nous ne modélisons pas les subductions inverses qui devraient se dérouler en lieu et place de l'engloutissement (impossible) de grandes masses continentales. Cela se produit car notre modèle, bien qu'inspiré de la géophysique, est loin d'atteindre une quelconque forme de justesse physique. Or, il faudrait pour cela prendre en compte la convection du manteau, et réaliser une pleine simulation 3D pour reproduire l'effet de surface que sont les plaques tectoniques – mais, nous l'avons dit, cela nous éloignerait catégoriquement

d'une simulation interactive permettant l'intervention de l'utilisateur. Peut-être qu'une solution intermédiaire serait possible, une simplification drastique d'une tectonophysique, compatible avec les objectifs propres à l'informatique graphique ; cependant nous pensons que cela ne pourra pas se faire avant que les géophysiciens ne parviennent à un bon niveau de connaissance des phénomènes profonds du manteau, *i.e.* que les simulations de tectonophysique n'atteignent des résultats vérifiés convaincants. Au-delà de la tectonique, nous voulons aussi faire remarquer que notre méthode est circonscrite par elle et nous posons donc la question suivante : comment prendre en compte, modéliser, les géologies particulières des exo-planètes ne figurant pas de tectonique des plaques, alors que nous ne les connaissons qu'à peine ? Le problème demeure complètement ouvert.

En second lieu, en deçà de l'échelle de modélisation macroscopique tectonique, se trouve notre méthode d'hyper-amplification. Celle-ci n'est pas exempte de défauts. Nous l'avons souligné, nous n'obtenons pas de résultats complètement satisfaisants à la fois pour les montagnes, et le réseau hydrographique. Ainsi sur le plan du réalisme effectif, il apparaît par construction impossible d'obtenir des réseaux denses de rivières du fait de la configuration géométrique du schéma de subdivision actuel. Il apparaît aussi difficile d'obtenir des pics montagneux réalistes, reliés par une hiérarchie dendritique de crêtes. Le travail d'Argudo *et al.* [Arg+19] a bien exploré la question de l'orométrie (qui est une métrique géomorphologique, associée aux reliefs montagneux), et nous pensons que du travail substantiel reste à mener dans cette direction pour obtenir une distribution de pics et de crêtes intéressante dans le cadre de notre méthode. Mais augmenter par des ajustements orométriques la subdivision stochastique au coeur de celle-ci impliquerait une baisse des performances. Or, ces dernières sont déjà en l'état relativement limitées, en tout cas ne sont pas exploitables dans un contexte applicatif temps-réel, typiquement celui des jeux vidéo. De plus, et au-delà des simples performances d'affichage, se pose aussi la question de l'intégrabilité de la méthode dans un tel contexte de production. En effet, le calcul de l'image visible par le joueur ne représente qu'une toute petite partie du travail réalisé par un système multimédia complexe tel celui d'un jeu vidéo. Il y a notamment classiquement les calculs répétés de collision physique avec le terrain : or, notre méthode apparaît peu compatible avec ces requêtes, le terrain n'étant pas défini par une fonction évaluable arbitrairement en tout point du domaine mais par un procédé hiérarchique de subdivision et de post-traitements. Pour pouvoir intégrer des requêtes de collision physique à notre méthode, il faudrait porter le procédé de raffinement sur CPU et les requêtes, devant passer par toutes les étapes de la subdivision jusqu'à circonscire le point de collision, ne se feraient pas avec une rapidité suffisante.

Ces limitations et ces problèmes spécifiques sont relatifs au réalisme et à l'efficacité de notre méthode. Pour adopter cependant une perspective plus large, il reste des verrous importants à lever avant d'envisager des solutions satisfaisantes au problème général de la modélisation multi-modale de planètes. Par le terme « multi-modal » nous faisons référence aux divers constituants des paysages qui doivent être modélisés de manière combinée afin de produire des mondes convaincants. Ces éléments constitutifs comprennent :

Le terrain. Il n'existe que quatre références de l'état de l'art traitant de la modélisation de terrain planétaires, dont deux apportées par cette thèse. Même si nos contributions sont significatives, elles ne le sont que parce que le problème auquel elles s'attaquent reste relativement peu exploré. En d'autres termes, nos travaux ne sont que des premiers pas et beaucoup reste à faire pour prétendre représenter fidèlement ne serait-ce que les divers modelés géomorphologiques que nous connaissons sur Terre. Même si nous nous cantonnions à cette dernière – et donc que nous oublions momentanément l'extrême variété des reliefs possibles de toutes les exoplanètes – la question est, comment générer des terrains planétaires figurant les modelés familiers qui ont fait l'objet de la recherche en synthèse de terrain classique ? Par exemple, un des aspects non élucidés demeure le relief érodé : le ruissellement de surface produit des striations caractéristiques sur les pentes du relief, et jusqu'ici seules des méthodes de simulation physique localisées permettent de les produire. Ces méthodes ne sont pas transposables sur des modèles planétaires à l'échelle 1/1 (à moins de réduire cette échelle) dans une approche non-orientée *streaming*. La seule façon à notre sens de reproduire ce phénomène serait de proposer un *bruit érosif*, c'est-à-dire une fonction procédurale fractale offrant un aspect dendritique (*i.e.* avec branchements). Notons qu'un tel bruit est un des graal de la modélisation procédurale, mais il n'a pas été produit jusqu'ici, bien qu'un travail récent de Gaillard *et al.* [Gai+19] tende à s'en approcher, cependant le coût calculatoire empêche son application dans un contexte d'exploration temps-réel d'une planète. Le ruissellement de surface n'est qu'un des multiples phénomènes géologiques qu'il faudrait prendre en compte pour atteindre un réalisme effectif dans la modélisation. Demeurent tous les autres, érosion côtière, karstique (grottes), glaciaire, sédimentation fluviale et deltas, lagunes, plages, reliefs éoliens (dunes, yardangs, hoodoos), et ainsi de suite... Proposer une solution intégrant tous ces modelés constitue déjà un des objectifs (inaccessible ?) en modélisation de terrain classique, et la difficulté semble donc particulièrement exacerbée dans le contexte de terrains planétaires générés à la volée.

L'atmosphère. Sur toutes les images de résultat présentées dans ce manuscrit on peut remarquer l'absence évidente de nuages. Or, les nuages constituent un aspect des paysages particulièrement important, pour la qualité dramatique qu'ils apportent du fait du jeu de la lumière qui s'y disperse. La modélisation et le rendu de nuages sont des domaines de recherche à part entière, qui ont fait historiquement l'objet au moins d'autant d'efforts que les terrains. Nous ne développerons pas plus, mais le message essentiel est qu'au contraire des terrains qui sont des surfaces, les nuages présentent un ordre de difficulté supplémentaire par leur aspect volumique – et notamment pour le rendu temps-réel, presque impossible sur de grandes étendues (a fortiori planétaires, ce qui n'a jamais été fait). Outre la difficulté de rendu, il faut compter de plus sur la difficulté de modélisation et d'animation. Il faut en effet, pour obtenir une distribution dynamique réaliste de nuages, un modèle climatique/météorologique. Rappelons qu'à l'instar des modèles tectonophysiques, les modèles climatiques sont parmi les simulations les plus complexes jamais développées par l'homme, et requièrent de ce fait des ressources de calcul et de stockage considérables.

La végétation. La simulation du climat peut de manière intéressante permettre la définition des *biomes* d'une planète, c'est-à-dire les divers climats locaux et donc la végétation associée. Le problème ici, déjà étudié sur des terrains planaires d'étendue limitée, consiste à déterminer à la volée la distribution des plantes sur le paysage d'après les informations climatiques et hydrographiques. Et, outre le problème de la modélisation encore une fois s'ajoute celui du rendu multi-échelle : *i.e.* comment passer de manière continue d'une vue proche, d'un bosquet d'arbres par exemple, à celle d'une forêt entière, de la taille de l'Amazonie lorsque la caméra se situe à des dizaines de kilomètres d'altitude ?

Terrain, nuages, climat, biomes et végétation, ne sont que les éléments naturels composant les paysages, pourtant ils posent déjà de grands verrous qui restent à lever. Mais demeure en sus tout le reste, c'est-à-dire tout ce qu'on peut imaginer dans les divers scénarios applicatifs : routes, véhicules, personnages, créatures, bâtiments, y compris des villes entières. Toutes sortes de problèmes encore une fois déjà étudiés dans les contextes de terrains planaires limités, mais posant de sérieux problèmes lorsque l'on souhaite générer à la volée des modèles *partiels* de grande étendue et figurant de multiples échelles pour un même point de vue caméra. Au regard de tous ces problèmes, nous pensons que la génération procédurale a de beaux jours devant elle, car elle seule pour l'instant démontre les bonnes performances nécessaires à la modélisation à la volée. Toute la question à notre sens est de savoir comment pré-structurer la modélisation afin que la génération procédurale soit enrichie et guidée au moment de son évaluation (*i.e.* lors de l'amplification) afin qu'elle produise plus de variété, de réalisme, de détails.

Enfin, nous concluons en pointant vers un autre horizon, qui se situe bien au-delà d'une simple planète prise isolément. Même si, pour toutes les raisons évoquées en introduction de ce manuscrit, et qui touchent aux fondamentaux de l'être humain, la possibilité d'explorer des planètes virtuelles devrait connaître un engouement croissant de la part du public, nous irions plus loin et dirions que le public devrait être demandeur d'horizons bien plus vastes. Ainsi, dans [Bru20] Eric Bruneton propose un modèle de rendu temps-réel de singularités gravitationnelles hautement réalistes avec effets relativistes de distorsion de la lumière : nous pensons que l'auteur partage avec nous l'intuition que ce sont vers les étoiles qu'il faut se tourner. Le jeu vidéo *Star Citizen* est toujours très populaire malgré les retards incessants pris dans son développement. Sa force, qui rejoint celle de la filmographie de George Lucas avec la « Guerre des Étoiles », est de proposer à tout un chacun d'arpenter les étoiles, de s'immerger dans une représentation vivante du cosmos. L'univers est source d'émerveillement, nous aurions tort de l'oublier. Les étoiles ont toujours fait rêver l'humanité et aujourd'hui, alors qu'elles ont disparu des ciels urbains, elles vivent en force dans les univers virtuels. Le défi ici concernera donc la modélisation et le rendu détaillé de tous les phénomènes astronomiques (figure 73) : nébuleuses, *clusters* d'étoiles, supernovas, galaxies, quasars, systèmes stellaires avec leur cohorte de planètes, *etc.* Comment les futures générations de chercheurs aborderont-elles le problème ? Difficile à dire, car tout dépendra de l'évolution du matériel informatique. Peut-être la révolution quantique changera-t-elle la donne ? En tout cas pour l'heure, seule la

génération procédurale permet d'aborder la génération de détails sur de telles échelles... et c'est tant mieux, car au final sa simplicité est attachante.

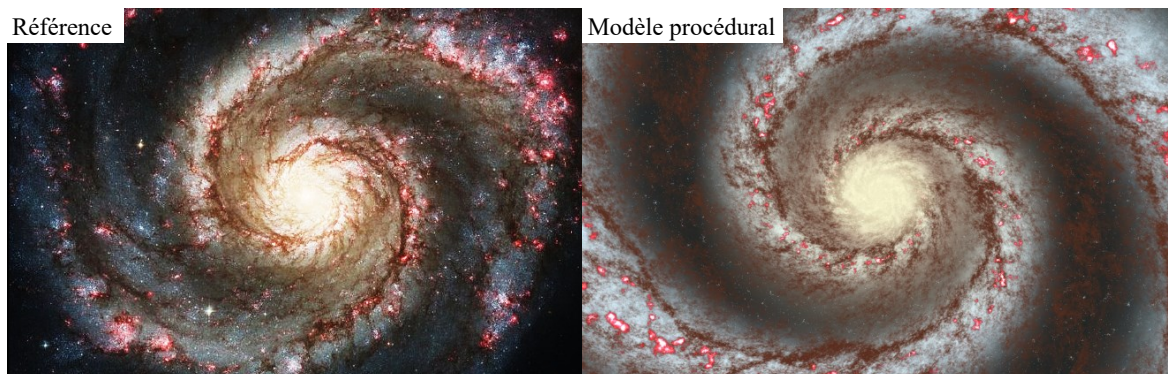


Figure 73 : A gauche, image de référence de la galaxie spirale M51, à droite résultat de la méthode d'un étudiant de Fabrice Neyret *et al.* [BN18] reproduisant cette même galaxie par une combinaison de bruits procéduraux *mappés* sur une spirale logarithmique. (Source : [BN18])

Plutôt que de maudire les ténèbres, tu peux allumer une petite lumière.

— Proverbe Indien

Publications :

- Yann Cortial, Adrien Peytavie, Éric Galin et Éric Guérin. « *Real-time hyper-amplification of planets* ». In : The Visual Computer (CGI'2020). [Cor+20].
- Yann Cortial, Adrien Peytavie, Eric Galin et Eric Guérin. « *Procedural tectonic planets* ». In : Computer Graphics Forum (Eurographics'2019). [Cor+19].
- Adrien Peytavie, Thibault Dupont, Eric Guérin, Yann Cortial, Benes Benes, James Gain et Eric Galin. « *Procedural riverscapes* ». In : Computer Graphics Forum. [Pey+19].
- Antoine Webanck, Yann Cortial, Eric Guérin et Eric Galin. « *Procedural cloudscapes* ». In : Computer Graphics Forum (Eurographics'2018). [Web+18].
- Yann Cortial, Antoine Webanck, Eric Guérin, Adrien Peytavie et Eric Galin. « *Modélisation procédurale de nuages multigenre* ». In : Journées Françaises d'Informatique Graphique (jFIG'2017). [Cor+17b].

BIBLIOGRAPHIE

- [ASA07] Nguyen Hoang ANH, Alexei SOURIN et Parimal ASWANI. "Physically based hydraulic erosion simulation on graphics processing unit". In : *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*. ACM. 2007, p. 257-264 (cf. p. 16).
- [Arg+17] Oscar ARGUDO, Carlos ANDUJAR, Antonio CHICA, Eric GUÉRIN, Julie DIGNE, Adrien PEYTAVIE et Eric GALIN. "Coherent multi-layer landscape synthesis". In : *The Visual Computer* 33.6-8 (2017), p. 1005-1015 (cf. p. 29, 31).
- [ACA18] Oscar ARGUDO, Antoni CHICA et Carlos ANDUJAR. "Terrain Super-resolution through Aerial Imagery and Fully Convolutional Networks". In : *Computer Graphics Forum*. T. 37. 2. Wiley Online Library. 2018, p. 101-110 (cf. p. 30, 31).
- [Arg+19] Oscar ARGUDO, Eric GALIN, Adrien PEYTAVIE, Axel PARIS, James GAIN et Eric GUÉRIN. "Orometry-based terrain analysis and synthesis". In : *ACM Transactions on Graphics* 38.6 (2019), p. 199 (cf. p. 24, 31, 98, 99, 105, 110).
- [Bea+07] Matthew BEARDALL, McKay FARLEY, Darius OUDERKIRK, Jeremy SMITH, Michael JONES et Parris K EGBERT. "Goblins by Spheroidal Weathering." In : *NPH*. 2007, p. 7-14 (cf. p. 18).
- [Bec+17] Michael BECHER, Michael KRONE, Guido REINA et Thomas ERTL. "Feature-based volumetric terrain generation". In : *Proceedings of the 21st ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. 2017, p. 1-9 (cf. p. 31).
- [Bel07] Farès BELHADJ. "Terrain modeling : a constrained fractal model". In : *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics, virtual reality, visualisation and interaction in Africa*. 2007, p. 197-204 (cf. p. 22, 31).
- [BA05a] Farès BELHADJ et Pierre AUDIBERT. "Modeling Landscapes with Ridges and Rivers". In : *Proceedings of the Symposium on Virtual Reality Software and Technology*. Monterey, USA : ACM, 2005, p. 151-154 (cf. p. 22, 31).
- [BA05b] Farès BELHADJ et Pierre AUDIBERT. "Modeling landscapes with ridges and rivers : bottom up approach". In : *Proceedings of the 3rd international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australasia and South East Asia*. 2005, p. 447-450 (cf. p. 22).
- [Ben07] Bedrich BENEŠ. "Real-time erosion using shallow water simulation". In : (2007) (cf. p. 17).
- [BF02] Bedřich BENEŠ et Rafael FORSBACH. "Visual simulation of hydraulic erosion". In : (2002) (cf. p. 16, 31).
- [BR04] Bedřich BENEŠ et Toney ROA. "Simulating desert scenery". In : (2004) (cf. p. 18).
- [Ben+06] Bedřich BENEŠ, Václav TĚŠÍNSKÝ, Jan HORNÝŠ et Sanjiv K BHATIA. "Hydraulic erosion". In : *Computer Animation and Virtual Worlds* 17.2 (2006), p. 99-108 (cf. p. 16, 31).
- [BTR15] D BERCOVICI, P TACKLEY et Y RICARD. "7.07-the generation of plate tectonics from mantle dynamics". In : *Treatise on Geophysics*. Elsevier, Oxford (2015), p. 271-318 (cf. p. 41).

- [BN18] Astor BIZARD et Fabrice NEYRET. “Procedural modeling of multiscale galactic dust”. Mém. de mast. LJK / Grenoble University - INRIA, juin 2018, p. 1-46 (cf. p. 113).
- [Bri07] Robert BRIDSON. “Fast Poisson Disk Sampling in Arbitrary Dimensions”. In : *SIGGRAPH sketches*. New York, NY, USA : ACM, 2007, p. 22 (cf. p. 88).
- [Bri15] Robert BRIDSON. *Fluid simulation for computer graphics*. CRC press, 2015 (cf. p. 16).
- [BHN07] Robert BRIDSON, Jim HOURIHAM et Marcus NORDENSTAM. “Curl-noise for procedural fluid flow”. In : *ACM Transactions on Graphics (ToG)* 26.3 (2007), 46-es (cf. p. 22).
- [BSS07] John BROSZ, Faramarz F SAMAVATI et Mario Costa SOUSA. “Terrain synthesis by-example”. In : *Advances in Computer Graphics and Computer Vision*. Springer, 2007, p. 58-77 (cf. p. 28).
- [Bru20] Eric BRUNETON. *Real-time High-Quality Rendering of Non-Rotating Black Holes*. Rapp. tech. 2020 (cf. p. 112).
- [CDS12] Siu-Wing CHENG, Tamal K DEY et Jonathan SHEWCHUK. *Delaunay mesh generation*. CRC Press, 2012 (cf. p. 53).
- [CMF98] Norishige CHIBA, Kazunobu MURAOKA et Kunihiko FUJITA. “An erosion model based on velocity fields for the visual simulation of mountain scenery”. In : *The Journal of Visualization and Computer Animation* 9.4 (1998), p. 185-194 (cf. p. 16, 31).
- [Cig+03a] Paolo CIGNONI, Fabio GANOVELLI, Enrico GOBBETTI, Fabio MARTON, Federico PONCHIO et Roberto SCOPIGNO. “BDAM—Batched Dynamic Adaptive Meshes for high performance terrain visualization”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 22. 3. Wiley Online Library. 2003, p. 505-514 (cf. p. 37).
- [Cig+03b] Paolo CIGNONI, Fabio GANOVELLI, Enrico GOBBETTI, Fabio MARTON, Federico PONCHIO et Roberto SCOPIGNO. “Planet-sized batched dynamic adaptive meshes (P-BDAM)”. In : *IEEE Visualization, 2003. VIS 2003*. IEEE. 2003, p. 147-154 (cf. p. 37).
- [Clo93] Mark CLOOS. “Lithospheric buoyancy and collisional orogenesis : Subduction of oceanic plateaus, continental margins, island arcs, spreading ridges, and seamounts”. In : *Geological Society of America Bulletin* 105.6 (1993), p. 715-737 (cf. p. 45).
- [CS17] Nicolas COLTICE et Grace E SHEPHARD. “Tectonic predictions with mantle convection models”. In : *Geophysical Journal International* 213.1 (2017), p. 16-29 (cf. p. 41).
- [Com+12] M COMBES, Cécile GRIGNÉ, Laurent HUSSON, CP CONRAD, Sébastien LE YAOUANQ, M PARENTHOËN, Chantal TISSEAU et Jacques TISSEAU. “Multiagent simulation of evolutive plate tectonics applied to the thermal evolution of the Earth”. In : *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 13.5 (2012) (cf. p. 41).
- [CD05] Robert L COOK et Tony DEROSE. “Wavelet noise”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 24.3 (2005), p. 803-811 (cf. p. 23).
- [Cor+16] Guillaume CORDONNIER, Jean BRAUN, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES, Eric GALIN, Adrien PEYTAIVIE et Eric GUÉRIN. “Large scale terrain generation from tectonic uplift and fluvial erosion”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 35. 2. Wiley Online Library. 2016, p. 165-175 (cf. p. 19, 20, 25, 30, 31).

- [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. 11, 13, 20, 30, 31, 107).
- [Cor+17a] Guillaume CORDONNIER, Eric GALIN, James GAIN, Bedrich BENES, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE 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. 19, 31, 40).
- [Cor+19] Yann CORTIAL, Adrien PEYTAUVIE, Eric GALIN et Eric GUÉRIN. “Procedural Tectonic Planets”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 38. 2. Wiley Online Library. 2019, p. 1-11 (cf. p. 104, 113).
- [Cor+20] Yann CORTIAL, Adrien PEYTAUVIE, Éric GALIN et Éric GUÉRIN. “Real-time hyper-amplification of planets”. In : *The Visual Computer* (2020), p. 1-12 (cf. p. 113).
- [Cor+17b] Yann CORTIAL, Antoine WEBANCK, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE et Eric GALIN. “Modélisation procédurale de nuages multigenre”. In : *Journées Françaises d’Informatique Graphique (j.FIG)*. Rennes, France, oct. 2017 (cf. p. 113).
- [CR11] Patrick COZZI et Kevin RING. *3D engine design for virtual globes*. AK Peters/CRC Press, 2011 (cf. p. 36, 101).
- [DMS05] Carsten DACHSBACHER, Martin MEYER et Marc STAMMINGER. “Height-Field Synthesis by Non-Parametric Sampling”. In : *Vision, Modeling and Visualization 2005* (2005), p. 297-302 (cf. p. 31).
- [DC+14] Daniel Michelon DE CARLI, Cesar Tadeu POZZER, Fernando BEVILACQUA et Victor SCHETINGER. “Procedural generation of 3D canyons”. In : *2014 27th SIBGRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images*. IEEE. 2014, p. 103-110 (cf. p. 31).
- [Der+11] Evgenij DERZAPF, Björn GANSTER, Michael GUTHE et Reinhard KLEIN. “River networks for instant procedural planets”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 30. 7. Wiley Online Library. 2011, p. 2031-2040 (cf. p. 2, 4, 22, 31, 34, 35, 40, 70, 101, 104, 108).
- [DMG10] Evgenij DERZAPF, Nicolas MENZEL et Michael GUTHE. “Parallel View-Dependent Refinement of Compact Progressive Meshes.” In : *EGPGV*. 2010, p. 53-62 (cf. p. 35).
- [DKW94] AR DIXON, GH KIRBY et Derek PM WILLS. “A data structure for artificial terrain generation”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 13. 1. Wiley Online Library. 1994, p. 37-48 (cf. p. 22).
- [Dom+98] S DOMINGUEZ, SE LALLEMAND, J MALAVIEILLE et Roland von HUENE. “Upper plate deformation associated with seamount subduction”. In : *Tectonophysics* 293.3-4 (1998), p. 207-224 (cf. p. 45).
- [DB06] Lucian DRĂGUȚ et Thomas BLASCHKE. “Automated classification of landform elements using object-based image analysis”. In : *Geomorphology* 81.3-4 (2006), p. 330-344 (cf. p. 11).
- [Duc+97] Mark DUCHAINEAU, Murray WOLINSKY, David E SIGETI, Mark C MILLER, Charles ALDRICH et Mark B MINEEV-WEINSTEIN. “ROAMing terrain : real-time optimally adapting meshes”. In : *Proceedings. Visualization’97 (Cat. No. 97CB36155)*. IEEE. 1997, p. 81-88 (cf. p. 37, 81, 82).

- [Ebe+98] David S. EBERT, Forest Kenton MUSGRAVE, Darwyn PEACHEY, Ken PERLIN et Steven WORLEY. *Texturing and Modeling : A Procedural Approach*. 3rd. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1998 (cf. p. 2, 4, 21, 31, 34, 40, 70, 71, 85, 104).
- [EMBI01] Carl ERIKSON, Dinesh MANOCHA et William V BAXTER III. “HLODs for faster display of large static and dynamic environments”. In : *Proceedings of the 2001 symposium on Interactive 3D graphics*. 2001, p. 111-120 (cf. p. 37).
- [FFC82] Alain FOURNIER, Don FUSSELL et Loren CARPENTER. “Computer rendering of stochastic models”. In : *Communications of the ACM* 25.6 (1982), p. 371-384 (cf. p. 10, 21, 31, 104).
- [Gai+19] Mathieu GAILLARD, Bedrich BENES, Eric GUÉRIN, Eric GALIN, Damien ROHMER et Marie-Paule CANI. “Dendry : a procedural model for dendritic patterns”. In : *Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*. 2019, p. 1-9 (cf. p. 111).
- [GMM15] James GAIN, Bruce MERRY et Patrick MARAIS. “Parallel, Realistic and Controllable Terrain Synthesis”. In : *Computer Graphics Forum* 34.2 (2015), p. 105-116 (cf. p. 11, 28, 31).
- [Gal+19] Eric GALIN, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE, Guillaume CORDONNIER, Marie-Paule CANI, Bedrich BENES et James GAIN. “A review of digital terrain modeling”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 38. 2. Wiley Online Library. 2019, p. 553-577 (cf. p. 10, 11, 16, 22, 23).
- [Gar99] Michael GARLAND. “Multiresolution modeling : Survey & future opportunities”. In : *State of the art report* (1999), p. 111-131 (cf. p. 37).
- [Gén+13] Jean-David GÉNEVAUX, Éric GALIN, Éric GUÉRIN, Adrien PEYTAUVIE et Bedrich BENES. “Terrain Generation Using Procedural Models Based on Hydrology”. In : *Transaction on Graphics* 32.4 (2013), 143 :1-143 :13 (cf. p. 11, 24, 31, 89, 107).
- [Gén+15] Jean-David GÉNEVAUX, Eric GALIN, Adrien PEYTAUVIE, Eric GUÉRIN, Cyril BRIQUET, François GROSBELLET et Bedrich BENES. “Terrain modelling from feature primitives”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 34. 6. Wiley Online Library. 2015, p. 198-210 (cf. p. 23, 31).
- [Ges+02] Dean GESCH, Michael OIMOEN, Susan GREENLEE, Charles NELSON, Michael STEUCK et Dean TYLER. “The national elevation dataset”. In : *Photogrammetric engineering and remote sensing* 68.1 (2002), p. 5-32 (cf. p. 27).
- [GM77] Robert A GINGOLD et Joseph J MONAGHAN. “Smoothed particle hydrodynamics : theory and application to non-spherical stars”. In : *Monthly notices of the royal astronomical society* 181.3 (1977), p. 375-389 (cf. p. 17).
- [GZD08] Alexander GOLDBERG, Matthias ZWICKER et Frédo DURAND. “Anisotropic noise”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 27.3 (2008), p. 1-8 (cf. p. 23).
- [Gon10] Álvaro GONZÁLEZ. “Measurement of areas on a sphere using Fibonacci and latitude-longitude lattices”. In : *Mathematical Geosciences* 42.1 (2010), p. 49-64 (cf. p. 52).
- [Goo+14] Ian GOODFELLOW, Jean POUGET-ABADIE, Mehdi MIRZA, Bing XU, David WARDE-FARLEY, Sherjil OZAIR, Aaron COURVILLE et Yoshua BENGIO. “Generative adversarial nets”. In : *Advances in neural information processing systems*. 2014, p. 2672-2680 (cf. p. 29).
- [Gu16] Eric GUÉRIN, Julie DIGNE, Eric GALIN et Adrien PEYTAUVIE. “Sparse representation of terrains for procedural modeling”. In : *Computer Graphics Forum* 35.2 (2016), p. 177-187 (cf. p. 11, 29-31, 40).

- [Gué+17] Éric GUÉRIN, Julie DIGNE, Eric GALIN, Adrien PEYTAUVIE, Christian WOLF, Bedrich BENES et Benoît MARTINEZ. “Interactive example-based terrain authoring with conditional generative adversarial networks”. In : *Acm Transactions on Graphics (TOG)* 36.6 (2017), p. 228 (cf. p. 29-31, 107).
- [HPT04] Caroline M HAGERHALL, Terry PURCELL et Richard TAYLOR. “Fractal dimension of landscape silhouette outlines as a predictor of landscape preference”. In : *Journal of environmental psychology* 24.2 (2004), p. 247-255 (cf. p. 11).
- [Hna+10] Houssam HNAIDI, Eric GUÉRIN, Samir AKKOUCHE, Adrien PEYTAUVIE et Eric GALIN. “Feature based terrain generation using diffusion equation”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 29. 7. Wiley Online Library. 2010, p. 2179-2186 (cf. p. 31).
- [Hop98a] Hugues HOPPE. “Efficient implementation of progressive meshes”. In : *Computers & Graphics* 22.1 (1998), p. 27-36 (cf. p. 35).
- [Hop96] Hugues HOPPE. “Progressive meshes”. In : *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1996, p. 99-108 (cf. p. 35).
- [Hop98b] Hugues HOPPE. “Smooth view-dependent level-of-detail control and its application to terrain rendering”. In : *Proceedings Visualization’98 (Cat. No. 98CB36276)*. IEEE. 1998, p. 35-42 (cf. p. 37).
- [Hor45] Robert E HORTON. “Erosional development of streams and their drainage basins; hydro-physical approach to quantitative morphology”. In : *Geological society of America bulletin* 56.3 (1945), p. 275-370 (cf. p. 24, 90).
- [HSH09] Liang HU, Pedro V SANDER et Hugues HOPPE. “Parallel view-dependent refinement of progressive meshes”. In : *Proceedings of the 2009 symposium on Interactive 3D graphics and games*. 2009, p. 169-176 (cf. p. 35).
- [Hug16] Richard HUGGETT. *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, 2016 (cf. p. 8, 41).
- [HSR94] K HUTTER, B SVENDSEN et D RICKENMANN. “Debris flow modeling : a review”. In : *Continuum mechanics and thermodynamics* 8.1 (1994), p. 1-35 (cf. p. 15).
- [HDJ05] Lok M HWA, Mark A DUCHAINEAU et Kenneth I JOY. “Real-time optimal adaptation for planetary geometry and texture : 4-8 tile hierarchies”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 11.4 (2005), p. 355-368 (cf. p. 37).
- [Iso+17] Phillip ISOLA, Jun-Yan ZHU, Tinghui ZHOU et Alexei A EFROS. “Image-to-image translation with conditional adversarial networks”. In : *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*. 2017, p. 1125-1134 (cf. p. 29).
- [JS13] Jarosław JASIEWICZ et Tomasz F STEPINSKI. “Geomorphons—a pattern recognition approach to classification and mapping of landforms”. In : *Geomorphology* 182 (2013), p. 147-156 (cf. p. 12).
- [Jon+09] Michael D JONES, McKay FARLEY, Joseph BUTLER et Matthew BEARDALL. “Directable weathering of concave rock using curvature estimation”. In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 16.1 (2009), p. 81-94 (cf. p. 18).
- [KU07] K Raiyan KAMAL et Yusuf Sarwar UDDIN. “Parametrically controlled terrain generation”. In : *Proceedings of the 5th international conference on Computer graphics and interactive techniques in Australia and Southeast Asia*. 2007, p. 17-23 (cf. p. 31).

- [Kei+15] Benjamin KEINERT, Matthias INNMANN, Michael SÄNGER et Marc STAMMINGER. “Spherical fibonacci mapping”. In : *ACM Transactions on Graphics* 34 (2015), 193 :1-193 :7 (cf. p. 52).
- [KMN88] Alex D KELLEY, Michael C MALIN et Gregory M NIELSON. “Terrain simulation using a model of stream erosion”. In : *Proceedings of the 15th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1988, p. 263-268 (cf. p. 31).
- [Ken+08] Andrew KENSLER, Aaron KNOLL, Peter SHIRLEY, A KENSLER, A KNOLL et P SHIRLEY. “Better gradient noise”. In : *Tech. Rep. UUSCI-2008-001* (2008) (cf. p. 22).
- [Kri+09] Peter KRIŠTOF, Bedrich BENEŠ, Jaroslav KŘIVÁNEK et Ondřej ŠT’AVA. “Hydraulic erosion using smoothed particle hydrodynamics”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 28. 2. Wiley Online Library. 2009, p. 219-228 (cf. p. 17, 31).
- [Kur12] Michał KUROWSKI. “Procedural generation of meandering rivers inspired by erosion”. In : *The 20th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision*. Citeseer. 2012 (cf. p. 31).
- [Lag+09] Ares LAGAE, Sylvain LEFEBVRE, George DRETTAKIS et Philip DUTRÉ. “Procedural Noise Using Sparse Gabor Convolution”. In : *ACM Transactions on Graphics* 28.3 (2009), 54 :1-54 :10 (cf. p. 23, 83).
- [Lag14] Dimitri LAGUE. “The stream power river incision model : evidence, theory and beyond”. In : *Earth Surface Processes and Landforms* 39.1 (2014), p. 38-61 (cf. p. 20).
- [LP68] Xavier LE PICHON. “Sea-floor spreading and continental drift”. In : *Journal of Geophysical Research* 73.12 (1968), p. 3661-3697 (cf. p. 41).
- [Lew87] John P LEWIS. “Generalized stochastic subdivision”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 6.3 (1987), p. 167-190 (cf. p. 22, 31).
- [Lew89] John-Peter LEWIS. “Algorithms for solid noise synthesis”. In : *Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1989, p. 263-270 (cf. p. 23).
- [Lin+96] Peter LINDSTROM, David KOLLER, William RIBARSKY, Larry F HODGES, Nick FAUST et Gregory A TURNER. “Real-time, continuous level of detail rendering of height fields”. In : *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1996, p. 109-118 (cf. p. 37).
- [Lue+03] David LUEBKE, Martin REDDY, Jonathan D COHEN, Amitabh VARSHNEY, Benjamin WATSON et Robert HUEBNER. *Level of detail for 3D graphics*. Morgan Kaufmann, 2003 (cf. p. 37).
- [Mah10] Joseph MAHSMAN. “Projective grid mapping for planetary terrain”. Thèse de doct. 2010 (cf. p. 37).
- [Man75] Benoit B MANDELBROT. “Stochastic models for the Earth’s relief, the shape and the fractal dimension of the coastlines, and the number-area rule for islands”. In : *Proceedings of the National Academy of Sciences* 72.10 (1975), p. 3825-3828 (cf. p. 10, 21).
- [Man82] Benoit B MANDELBROT. “The fractal geometry of nature.” In : *San Francisco, CA* (1982) (cf. p. 10, 21).
- [MVN68] Benoit B MANDELBROT et John W VAN NESS. “Fractional Brownian motions, fractional noises and applications”. In : *SIAM review* 10.4 (1968), p. 422-437 (cf. p. 10, 21).

- [MDH07] Xing MEI, Philippe DECAUDIN et Bao-Gang HU. “Fast hydraulic erosion simulation and visualization on GPU”. In : *15th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG’07)*. IEEE. 2007, p. 47-56 (cf. p. 11, 16, 17, 31).
- [MG08] Stéphane MÉRILLOU et Djamchid GHAZANFARPOUR. “A survey of aging and weathering phenomena in computer graphics”. In : *Computers & Graphics* 32.2 (2008), p. 159-174 (cf. p. 14).
- [Mil86] Gavin SP MILLER. “The definition and rendering of terrain maps”. In : *Proceedings of the 13th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1986, p. 39-48 (cf. p. 22, 31).
- [Mon05] Joe J MONAGHAN. “Smoothed particle hydrodynamics”. In : *Reports on progress in physics* 68.8 (2005), p. 1703 (cf. p. 17).
- [Mor68] W Jason MORGAN. “Rises, trenches, great faults, and crustal blocks”. In : *Journal of Geophysical Research* 73.6 (1968), p. 1959-1982 (cf. p. 41).
- [MKM89] F Kenton MUSGRAVE, Craig E KOLB et Robert S MACE. “The synthesis and rendering of eroded fractal terrains”. In : *ACM Siggraph Computer Graphics* 23.3 (1989), p. 41-50 (cf. p. 15, 16, 31).
- [Nat+13] Mattia NATALI, Endre M LIDAL, Julius PARULEK, Ivan VIOLA et Daniel PATEL. “Modeling Terrains and Subsurface Geology.” In : *Eurographics (STARs)*. 2013, p. 155-173 (cf. p. 11).
- [NWD05] Benjamin NEIDHOLD, Markus WACKER et Oliver DEUSSEN. “Interactive physically based fluid and erosion simulation”. In : *Eurographics workshop on natural phenomena*. 2005 (cf. p. 16, 31).
- [Ola+02] Mark OLANO, John C HART, Wolfgang HEIDRICH, Bill MARK et Ken PERLIN. “Real-time shading languages”. In : *Course Notes. ACM SIGGRAPH 99* (2002) (cf. p. 22).
- [ON00] Koichi ONOUE et Tomoyuki NISHITA. “A method for modeling and rendering dunes with wind-ripples”. In : *Proceedings the Eighth Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*. IEEE. 2000, p. 427-428 (cf. p. 18).
- [PG07] Renato PAJAROLA et Enrico GOBBETTI. “Survey of semi-regular multiresolution models for interactive terrain rendering”. In : *The Visual Computer* 23.8 (2007), p. 583-605 (cf. p. 37).
- [Par+19a] Axel PARIS, Eric GALIN, Adrien PEYTAVIE, Eric GUÉRIN et James GAIN. “Terrain Amplification with Implicit 3D Features”. In : *ACM Transactions on Graphics (TOG)* 38.5 (2019), p. 1-15 (cf. p. 11, 26, 31).
- [Par+19b] Axel PARIS, Adrien PEYTAVIE, Eric GUÉRIN, Oscar ARGUDO et Eric GALIN. “Desertscape Simulation”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 38. 7. Wiley Online Library. 2019, p. 47-55 (cf. p. 18, 31).
- [Per85] Ken PERLIN. “An image synthesizer”. In : *ACM Siggraph Computer Graphics* 19.3 (1985), p. 287-296 (cf. p. 22, 83).
- [Per02] Ken PERLIN. “Improving noise”. In : *ACM Transactions on Graphics*. T. 21. 3. ACM. 2002, p. 681-682 (cf. p. 22).
- [PH89] Ken PERLIN et Eric M HOFFERT. “Hypertexture”. In : *Proceedings of the 16th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1989, p. 253-262 (cf. p. 22).

- [Pey+19] Adrien PEYTAVIE, Thibault DUPONT, Eric GUÉRIN, Yann CORTIAL, Benes BENES, James GAIN et Eric GALIN. “Procedural Riverscapes”. In : *Computer Graphics Forum* 38.7 (2019), p. 35-46 (cf. p. 113).
- [Pey+09a] Adrien PEYTAVIE, Eric GALIN, Jérôme GROSJEAN et Stéphane MÉRILLOU. “Arches : a framework for modeling complex terrains”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 28. 2. Wiley Online Library. 2009, p. 457-467 (cf. p. 25).
- [Pey+09b] Adrien PEYTAVIE, Eric GALIN, Jérôme GROSJEAN et Stéphane MÉRILLOU. “Procedural generation of rock piles using aperiodic tiling”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 28. 7. Wiley Online Library. 2009, p. 1801-1809 (cf. p. 15).
- [PH93] Przemyslaw PRUSINKIEWICZ et Mark HAMMEL. “A fractal model of mountains and rivers”. In : *Graphics Interface*. T. 93. Canadian Information Processing Society. 1993, p. 174-180 (cf. p. 22, 31).
- [Raj+19] Suren Deepak RAJASEKARAN, Hao KANG, Bedrich BENES, Martin ČADÍK, Eric GALIN, Eric GUÉRIN, Adrien PEYTAVIE et Pavel SLAVÍK. “PTRM : Perceived Terrain Realism Metrics”. In : *arXiv preprint arXiv :1909.04610* (2019) (cf. p. 11).
- [Ren97] Robert J RENKA. “Algorithm 772 : STRIPACK : Delaunay triangulation and Voronoi diagram on the surface of a sphere”. In : *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)* 23.3 (1997), p. 416-434 (cf. p. 52).
- [Ros94] David L ROSGEN. “A classification of natural rivers”. In : *Catena* 22.3 (1994), p. 169-199 (cf. p. 24).
- [RPP93] Pascale ROUDIER, Bernard PEROCHE et M PERRIN. “Landscapes synthesis achieved through erosion and deposition process simulation”. In : *Computer Graphics Forum*. T. 12. 3. Wiley Online Library. 1993, p. 375-383 (cf. p. 15, 16, 31).
- [RME09] Brennan RUSNELL, David MOULD et Mark ERAMIAN. “Feature-rich distance-based terrain synthesis”. In : *The Visual Computer* 25.5-7 (2009), p. 573-579 (cf. p. 31).
- [Št’+08] Ondřej ŠT’AVA, Bedřich BENEŠ, Matthew BRISBIN et Jaroslav KŘIVÁNEK. “Interactive terrain modeling using hydraulic erosion”. In : *Proceedings of the 2008 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation*. Eurographics Association. 2008, p. 201-210 (cf. p. 17, 31).
- [TGM12] Flora Ponjou TASSE, James E. GAIN et Patrick MARAIS. “Enhanced Texture-Based Terrain Synthesis on Graphics Hardware”. In : *Computer Graphics Forum* 31.6 (2012), p. 1959-1972 (cf. p. 28, 31).
- [Tha06] Andrew THALL. “Extended-precision floating-point numbers for GPU computation”. In : *ACM SIGGRAPH 2006 research posters*. 2006, 52-es (cf. p. 36).
- [TS02] John Michael Tutill THOMPSON et H Bruce STEWART. *Nonlinear dynamics and chaos*. John Wiley & Sons, 2002 (cf. p. 10).
- [Tho07] Chris THORNE. “Origin-centric techniques for optimising scalability and the fidelity of motion, interaction and rendering”. Thèse de doct. 2007 (cf. p. 36).
- [TJ10] Luther A TYCHONIEVICH et MD JONES. “Delaunay deformable mesh for the weathering and erosion of 3d terrain”. In : *The Visual Computer* 26.12 (2010), p. 1485-1495 (cf. p. 18).

- [USG] USGS, EARTH RESOURCES OBSERVATION AND SCIENCE (EROS) CENTER. *USGS EROS Archive - Digital Elevation - Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Void Filled*. [Online ; accessed 21-July-2020] (cf. p. 79).
- [Van+11] Juraj VANEK, Bedrich BENES, Adam HEROUT et Ondrej STAVA. "Large-scale physics-based terrain editing using adaptive tiles on the GPU". In : *IEEE Computer Graphics and Applications* 31.6 (2011), p. 35-44 (cf. p. 17, 31).
- [Vos85] Richard F VOSS. "Random fractal forgeries". In : *Fundamental algorithms for computer graphics*. Springer, 1985, p. 805-835 (cf. p. 21, 31).
- [WNM19] Korneliusz K WARSZAWSKI, Sławomir S NIKIEL et Marcin MRUGALSKI. "Procedural Method for Fast Table Mountains Modelling in Virtual Environments". In : *Applied Sciences* 9.11 (2019), p. 2352 (cf. p. 21, 31).
- [Web+18] Antoine WEBANCK, Yann CORTIAL, Eric GUÉRIN et Eric GALIN. "Procedural cloudscapes". In : *Computer Graphics Forum*. T. 37. 2. Wiley Online Library. 2018, p. 431-442 (cf. p. 113).
- [WSG07] Lakin WECKER, Faramarz SAMAVATI et Marina GAVRILOVA. "Contextual void patching for digital elevation models". In : *The Visual Computer* 23.9-11 (2007), p. 881-890 (cf. p. 11, 28).
- [Wei+09] Li-Yi WEI, Sylvain LEFEBVRE, Vivek KWATRA et Greg TURK. "State of the Art in Example-based Texture Synthesis". In : *Eurographics 2009, State of the Art Report, EG-STAR*. Munich, Germany : Eurographics Association, mar. 2009, p. 93-117 (cf. p. 27).
- [Wor96] Steven WORLEY. "A cellular texture basis function". In : *Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. 1996, p. 291-294 (cf. p. 22).
- [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*. T. 18. 2. Wiley Online Library. 1999, p. 149-158 (cf. p. 24).
- [Zha+19] Yiwei ZHAO, Han LIU, Igor BOROVNIKOV, Ahmad BEIRAMI, Maziar SANJABI et Kazi ZAMAN. "Multi-theme Generative Adversarial Terrain Amplification". In : *ACM Transactions on Graphics* 38.6 (nov. 2019), 200 :1-200 :14 (cf. p. 11, 30, 31).
- [Zho+07] Howard ZHOU, Jie SUN, Greg TURK et James M. REHG. "Terrain Synthesis from Digital Elevation Models". In : *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 13.4 (2007), p. 834-848 (cf. p. 11, 27, 31).



FOLIO ADMINISTRATIF

THESE DE L'UNIVERSITE DE LYON OPEREE AU SEIN DE L'INSA LYON

NOM : CORTIAL

DATE de SOUTENANCE : 12/11/2020

Prénoms : Yann

TITRE : Synthèse de terrain à l'échelle planétaire

NATURE : Doctorat

Numéro d'ordre : 2020LYSEI094

Ecole doctorale : InfoMaths (ED512)

Spécialité : Informatique

RESUME :

La synthèse de terrains virtuels à la fois vastes, détaillés, hétérogènes et explorables en temps-réel, constitue un des défis de la modélisation de scènes naturelles. Les nombreuses méthodes de l'état de l'art ne proposent en général que de traiter des scènes d'étendues limitées en topologie planaire. Dans cette thèse nous abordons la modélisation de terrain à l'échelle maximale, c'est-à-dire planétaire. Peu de choses ont été proposées pour traiter ce problème qui dépasse, en termes de taille du domaine, ce qui se fait classiquement, de quatre ordres de grandeur. Pour répondre à ce défi, nous proposons une solution découplée originale à même de générer des planètes à l'échelle 1/1 présentant un bon niveau de réalisme. Notre architecture prend tout d'abord en compte la géologie des planètes telluriques en mettant en œuvre une simulation guidée de tectonique des plaques. Celle-ci permet la génération des caractéristiques à grande échelle des planètes telles les continents, le relief océanique, les arcs d'îles ou encore les chaînes de montagnes. Ce modèle macroscopique est dans un second temps donné en entrée d'une méthode d'hyper-amplification capable de produire des vues continues, détaillées, en temps-réel du terrain. Cette seconde méthode procédurale s'appuie sur une pré-structuration du modèle macroscopique pour générer à la volée le modèle détaillé final, dépendant de la vue caméra courante. Celui-ci est produit intégralement sur GPU par un procédé massivement parallèle de subdivision stochastique, opérant à partir de règles dépendantes du niveau de détail. Notre solution résout mieux certains problèmes inhérents aux quelques méthodes précédentes, toutes fractales, comme l'autosimilarité, l'absence de variété des paysages produits et l'absence de contrôle utilisateur. Au final, les modèles planétaires que nous produisons sont jugés plus réalistes, tout en étant plus contrôlables par des artistes.

MOTS-CLÉS : informatique graphique, modélisation de terrain, modélisation de planètes, modélisation procédurale, tectonique, amplification de terrain, modélisation de rivières

Laboratoire de recherche : LIRIS (CNRS UMR 5205)

Directeur de thèse : Éric GUÉRIN

Président de jury : Éric GALIN

Composition du jury : Loïc BARTHE (Professeur des Universités, Université Paul Sabatier de Toulouse - Rapporteur), Marc DANIEL (Professeur des Universités, Polytech Marseille - Rapporteur), Céline ROUDET (Maître de Conférences, Université de Bourgogne - Examinatrice), Éric GALIN (Professeur des Universités, Université Claude Bernard Lyon 1 - Examineur), Éric GUÉRIN (Maître de Conférences, INSA Lyon - Directeur de Thèse), Adrien PEYTAVIE (Maître de Conférences, Université Claude Bernard Lyon 1 – co-Directeur de Thèse)