



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

MODÉLISATION D'OBJETS
SÉDIMENTAIRES PAR DES SURFACES
PARAMÉTRIQUES ET APPLICATION À
L'ANALYSE D'IMAGE

THÈSE

Spécialité Géosciences

Université de Lorraine

École doctorale RP2E (n° 410)

par

Jérémy RUIU

Composition du jury :

Rapporteurs :

Isabelle COJAN
Brigitte DOLIGEZ

Examineurs :

Marie-Odile BERGER
Yves GERAUD
Gérard MASSONNAT

Directeurs de thèse :

Guillaume CAUMON
Sophie VISEUR

"La connaissance est une perpétuelle aventure à la lisière de l'incertitude"
Frank Herbert, le cycle de Dune tome 3 : Les enfants de Dune

À mon père,

Remerciements

L'écriture d'une thèse est une épreuve difficile qui vient ponctuer trois (voire un peu plus) années qui représentent, malgré les embûches, une belle et grande expérience. Pour moi ce qui aura fait de cette période de ma vie un précieux souvenir, outre la satisfaction de travailler sur un sujet passionnant, ce sont toutes les personnes que j'ai eu le privilège et le plaisir de côtoyer. Il est temps pour moi de remercier tous ceux qui par leurs conseils, leur aide, leur amitié et leur bonne humeur m'ont non seulement aidé à tenir le coup dans les moments difficiles mais aussi et surtout à avancer pour obtenir mon doctorat (qui semblait parfois hors de portée).

Je voudrais tout d'abord remercier Guillaume Caumon pour m'avoir fait confiance en me donnant ce sujet de thèse ainsi que pour son aide et ses précieux conseils tout au long de cette aventure. Merci aussi à ma seconde directrice de thèse Sophie Viseur pour l'aide qu'elle m'a apportée et pour m'avoir accueilli dans son fief Marseillais.

Je remercie ensuite tous les gens avec qui j'ai partagé mon bureau pendant ces quelques années, tout d'abord Romain et Christophe qui ont été les premiers à m'accueillir dans ce que l'on appelait alors la "Grotte". Ensuite lorsque le besoin de revoir la lumière du soleil s'est fait ressentir, j'ai pu compter sur de nouveaux colocataires, tout d'abord merci à Pablo et Théophile. Merci beaucoup aussi, à Jeanne qui m'a accompagné dans mon dernier bureau et avec qui j'ai pu écouter beaucoup (beaucoup beaucoup) de Johnny Cash. Je remercie Arnaud pour les discussions que nous avons partagées sur la géométrie pour faire de jolies maillages. Merci aussi à Benjamin et aux petites notes de kitsch qu'il a ajouté à notre lieu de travail. Je remercie en particulier la dernière arrivée dans ce bureau, Marion Parquer qui en plus d'avoir été une élève de Master très agréable à encadrer, a été d'un grand secours dans la dernière ligne droite de cette thèse.

Je remercie ensuite tous les autres membres du Gocad Research Group (il ne s'appelait pas RING à ce moment là), Fatima qui a toujours été présente pour m'aider à traverser les dédales administratifs de l'université de Lorraine. Je remercie Pierre pour toute son aide sur les petits aléas de l'informatique. Merci à Florent pour avoir encadré mon premier projet au sein de cette équipe. Merci à tous mes autres co-thésards, Fifi (et par extension Julie et Némó) pour les soirées que tu as organisées, Gauthier pour avoir été un valeureux concurrent aux de tournois mousse pong. Merci à Charline qui a commencé sa thèse en même temps que moi. Merci aussi à Jon pour m'avoir fait découvrir le St Germain. Je remercie également Guillaume Rongier avec qui nous partageons l'amour des chenaux. Et enfin merci aux nouveaux, Gabi et Antoine. Je remercie aussi les membres plus permanents du laboratoire, Pauline, Paul, Christine et Jean-Jacques. Je remercie également tout le personnel de l'ASGA.

Un grand merci à toute ma famille pour leur soutien et leurs encouragements tout

au long de cette thèse (et avant aussi). Merci en particulier à ma mère pour son aide et à mon père pour m'avoir transmis son intérêt pour les sciences. Je regrette qu'il n'ait plus été là pour voir la fin de cette thèse.

Il m'est impossible de finir ces remerciements sans parler de Deborah, le mot merci n'est pas assez fort, pour elle qui est restée à mes côtés et m'a accompagné dans les bons moments mais aussi dans les mauvais et surtout dans les pires. Merci surtout pour m'avoir supporté même quand la fatigue et le stress de l'écriture m'ont rendu insupportable.

Je voudrais finalement remercier tous les membres du jury, Isabelle COJAN, Brigitte DOLIGEZ, Marie-Odile BERGER, Yves GERAUD et Gérard MASSONNAT, d'avoir évalué et validé mon travail.

Merci enfin à tous ceux qui m'ont apporté leur aide et leur soutien mais que pars oublié, ou manque de place je n'ai pas cités (et j'en suis désolé).

Table des matières

Introduction Générale	1
1 Contexte géologique et méthodes de modélisation des environnements sédimentaires	7
1.1 Introduction	7
1.2 Description conceptuelle des structures sédimentaires	8
1.2.1 Dépôts fluviaux	8
1.2.1.1 Contexte de dépôt	8
1.2.1.2 Style des chenaux en milieu fluvial	9
1.2.1.3 Organisation hiérarchique des structures sédimentaires	10
1.2.2 Dépôts turbiditiques	13
1.3 Impact à l'échelle du réservoir	15
1.3.1 Conséquences sur les phénomènes de déplacement liés à l'injection d'eau	15
1.3.2 Conséquences sur la connectivité	17
1.3.3 Conséquences sur l'estimation du facteur de récupération et du volume d'huile en place	18
1.4 Méthodes de modélisation des objets sédimentaires en intégrant les hétérogénéités locales	19
1.4.1 Approches basées objets	19
1.4.1.1 Exemple d'une méthode basée objets	19
1.4.1.2 Exemple d'une méthode basée surfaces	20
1.4.2 Modélisation reproduisant les processus de dépôts	21
1.4.2.1 Méthode de modélisation du long terme	21
1.4.2.2 Approches de modélisations pseudo-processus	21
1.5 Conclusion et approche proposée	25
2 Construction de modèles d'objets géologiques	27
2.1 Introduction	27
2.2 Éléments mathématiques des NURBS	28
2.2.1 Généralités sur les surfaces paramétriques	28
2.2.2 Éléments constitutifs des NURBS	29
2.2.3 Équations générales des courbes et surfaces	31
2.2.3.1 Évaluation d'un point sur une NURBS	31
2.2.3.2 Fonctions de base	32
2.2.3.3 Propriétés fondamentales	33

2.2.4	Dérivation	34
2.2.5	Raffinement de la NURBS	34
2.2.6	Manipulation directe d'une NURBS	34
2.2.6.1	Projection de l'espace cartésien dans l'espace paramétrique	35
2.2.6.2	Modification de la NURBS	35
2.2.7	Intérêts et limites pour la modélisation d'objets sédimen- taires	36
2.3	Représentation par frontières basées sur les NURBS de structures sédimentaires	37
2.3.1	Formes chenalissantes	37
2.3.1.1	Caractéristiques sédimentaires	37
2.3.1.2	Construction	38
2.3.1.3	Branchement de chenaux	40
2.3.2	Levées	43
2.3.2.1	Caractéristiques sédimentaires	43
2.3.2.2	Construction	43
2.3.2.3	Cohérence chenal-levée	44
2.3.3	Figures d'accrétion latérale	46
2.3.3.1	Caractéristiques sédimentaires	46
2.3.3.2	Construction	46
2.3.4	Lobes	47
2.3.4.1	Caractéristiques sédimentaires	47
2.3.4.2	Construction	47
2.4	Construction de grilles et modélisation de faciès	48
2.4.1	Construction des grilles	48
2.4.2	Géométrie de remplissage des chenaux	49
2.4.3	Application à la modélisation de faciès dans les chenaux turbidiques	51
2.5	Utilisation en milieux déformés	53
2.5.1	Milieux plissés	53
2.5.2	Gestion des discontinuités	53
2.6	Conclusion	57
3	Simulation de systèmes chenalissants	59
3.1	Introduction	59
3.2	Génération stochastique de chenaux	60
3.2.1	Initialisation de l'axe	61
3.2.1.1	Simulation séquentielle gaussienne 1D	61
3.2.1.2	L-systèmes	62
3.2.2	Croissance de la forme initiale	62
3.2.3	Méandres abandonnés	65
3.2.3.1	Intersection de segments dans le plan	66
3.2.3.2	Construction des méandres abandonnés	66
3.2.4	Raffinement de l'axe du chenal	67
3.2.5	Simulation de paramètres de forme	71
3.2.6	Considération sur différents types de chenaux fluviaux	71

3.2.7	Simulation de chenaux en tresses ou anastomosés	73
3.2.8	Prise en compte de l'avulsion	73
3.3	Génération de cliniformes à partir de la croissance des chenaux	74
3.4	Considérations sur le conditionnement	74
3.4.1	Approches proposées et limites	77
3.4.2	Pistes d'améliorations du conditionnement	77
3.4.2.1	Rétro-migration des chenaux	78
3.4.2.2	Déformation des chenaux	79
3.5	Exemples de modélisation de propriétés	79
3.5.1	Simulation de propriétés dans les grilles des objets sédimentaires	79
3.5.2	Simulation de propriétés surfaciques	81
3.6	Erosion entre objets sédimentaires et mise à l'échelle de la grille réservoir	81
3.6.1	Impact de l'érosion	81
3.6.2	Exemples d'application des méthodes de mise à l'échelle	83
3.6.3	Rastérisation des structures sédimentaires	83
3.6.3.1	Rastérisation des surfaces	85
3.6.3.2	Rastérisation des volumes	85
3.6.3.3	Principe des multiplicateurs de transmissibilité	85
3.6.3.4	Transfert des propriétés de surface à la grille	86
3.6.3.5	Test sur une image d'entraînement	90
3.7	Conclusion	90
4	Application des modèles sédimentaires à l'analyse d'image	93
4.1	Abstract	96
4.2	Introduction	96
4.3	Object-based edge detection	97
4.3.1	Model of sedimentary objects	97
4.3.2	Edge filtering based on the distance to interpreted objects	99
4.4	Channel optimization using active contours	101
4.4.1	Active contour model principle	101
4.4.2	Adaptation for channel interpretation from geological images	102
4.4.3	Results and discussion	103
4.5	Point bar estimation	108
4.5.1	Retro-migration process	108
4.5.2	Results and discussion	108
4.6	Conclusions	108
4.7	Acknowledgements	110
Appendix A	110
A.1	Image pre-processing	110
A.2	Canny Edge	111
Conclusion Générale		115
Annexe A. : Article publié dans Mathematical Geosciences		131

Table des figures

1	Synthèse de l'approche proposée pour la modélisation de structures sédimentaires	6
1.1	Organisation des dépôts méandriiformes, modifiée d'après [Miall, 1996]	9
1.2	Différents styles de chenaux, modifié d'après [Miall, 1977]	11
1.3	Lien entre la forme des chenaux fluviatiles et les facteurs principaux gouvernant les dépôts des sédiments d'après Church [2006]	12
1.4	Schéma de l'évolution continue entre les types de chenaux, modifié d'après Reineck et Singh [1973]	13
1.5	Hierarchie des dépôts sédimentaires [Miall, 2010]	14
1.6	Synthèse de l'organisation multi-échelle des dépôts turbiditiques [Mayall <i>et al.</i> , 2006]	14
1.7	Différents types de drapage de base de chenaux observés sur les affleurements de dépôts de chenaux turbiditiques	16
1.8	Variations des structures des chenaux et des géométries des drapages d'argiles au sein d'un profil longitudinal de dépôts turbiditiques [Alpak <i>et al.</i> , 2013]	16
1.9	Étape de génération de l'axe d'un chenal [Howard, 1996]	22
1.10	Éléments de chenaux et levée en coupe ainsi que leurs paramètres géométriques relatifs [Pyrzcz <i>et al.</i> , 2009]	24
2.1	Courbe NURBS de troisième degré	29
2.2	Impact du degré de la fonction d'interpolation sur la forme de la courbe NURBS	30
2.3	Influence de la multiplicité d'un nœud sur la continuité d'une courbe NURBS	31
2.4	Surface NURBS bi-cubique avec un poids $w = 10$ aux points noirs et $w = 1$ aux points gris	32
2.5	Fonctions de base de degré trois	33
2.6	Manipulation directe d'une courbe NURBS	36
2.7	Manipulation directe d'une surface NURBS	37
2.8	Étapes de construction des sections de chenaux	39
2.9	Modèle d'un chenal asymétrique construit par des surfaces NURBS	40
2.10	Processus de branchement de deux chenaux	41

2.11	Application du processus de branchement de chenaux et de manipulation interactive des objets : interprétation tridimensionnelle d'image satellite (avec une valeur d'épaisseur des chenaux arbitraire) [Google Earth, October,29 2012]	42
2.12	Formation des levées par des inondations successives d'après Mount [1995]	43
2.13	Modèle d'une levée construite en utilisant quatre surfaces NURBS	44
2.14	Extraction d'une portion de surface paramétrique	45
2.15	Levées construites en association avec un chenal	45
2.16	Schéma des motifs de vitesse d'écoulement dans un chenal méandrique	46
2.17	Modèle de clinoforme construit en utilisant 6 surfaces NURBS	47
2.18	Modèle de lobe construit en utilisant 3 surfaces de NURBS	48
2.19	Connexions entre des lobes et un chenal	49
2.20	Grilles hexaédriques construites à partir de représentations par frontières des différents objets sédimentaires	50
2.21	Trois types de remplissage de chenaux (d'après Reineck et Singh [1973] basé sur McKee [1957])	51
2.22	Grilles hexaédriques construites à partir des représentations par frontières des chenaux avec différents types de remplissages Reineck et Singh [1973]	52
2.23	Modification de la grille progradante afin de mieux reproduire le modèle théorique de Reineck et Singh [1973]	52
2.24	Modélisation de faciès turbiditiques à partir de modèles théoriques de remplissages turbiditiques [Barton <i>et al.</i> , 2010]	54
2.25	Modèles de chenaux plissés	55
2.26	Modèle plissé de chenaux érosifs	57
3.1	Construction de l'axe d'un chenal en utilisant des L-systèmes et habillage avec un modèle de chenal basé sur des NURBS	63
3.2	Construction de dix chenaux en utilisant un processus de génération stochastique	65
3.3	Formation d'un bras mort au cours de la croissance d'un méandre	65
3.4	Construction des bras-mort	68
3.5	Tri des auto-intersections d'un chenal	70
3.6	Résultat de la croissance d'un chenal incluant la formation de bras-mort	71
3.7	Impact du raffinement de l'axe du chenal sur sa forme finale	72
3.8	Simulation des paramètres de forme	72
3.9	Exemples de simulations de chenaux connectés avec différents paramètres de forme	73
3.10	Exemple de modélisation d'avulsion totale [Slingerland et Smith, 2004], combinée avec une croissance du chenal	75
3.11	Extraction des clinofformes des barres d'accrétion latérale à partir de la croissance d'un chenal	76
3.12	Clinofformes extraits de la simulation des chenaux	76

3.13	Réalisation d'un environnement de dépôt fluviatile présentant quatre chenaux (en jaune) avec leurs barres d'accrétion latérale (en orange) et leurs levées (en vert)	77
3.14	Tentative de conditionnement des chenaux	78
3.15	Estimation des barres d'accrétion latérale d'un chenal	80
3.16	Application de la rétro-migration à un chenal	80
3.17	Édition d'un chenal pour honorer les données	81
3.18	Porosité simulée sur une grille de chenal	82
3.19	Exemple de modélisation de propriétés sur plusieurs types des structures sédimentaires (le chenal, les levées et les cliniformes)	82
3.20	Simulation des hétérogénéités de surfaces	83
3.21	Mise à l'échelle de la porosité du réservoir, simulée par une SGS non conditionnée sur des chenaux (dans ce cas, la même graine stochastique a été utilisée pour la simulation de la porosité de chaque chenal)	84
3.22	Illustration de la rastérisation de plusieurs chenaux en prenant compte de l'ordre de dépôt et du processus d'érosion	85
3.23	Remplissage de la rastérisation des structures sédimentaires	86
3.24	Réalisation d'un environnement de dépôts fluviatiles représentant des chenaux avec leurs barres d'accrétion latérale et leurs levées dans une grille rastérisée	87
3.25	Localisation des multiplicateurs de transmissibilité comme définis dans le simulateur d'écoulement Eclipse, pour une cellule ijk	87
3.26	Différents cas d'intersection entre une surface NURBS et des cellules de la grille	88
3.27	Illustration de la rastérisation d'un chenal en prenant pour exemple une section de ce chenal	88
3.28	Calcul de la valeur assignée à la face rastérisée	89
3.29	Technique de rastérisation de surface dans la grille	89
3.30	Simulation de faciès d'un chenal (en gris) en utilisant une méthode statistique multi-points	90
4.1	Approach proposed to automatically retrieve sedimentary structures from images.	98
4.2	Principle of a NURBS and model of a channel constructed using NURBS surfaces (a) Third degree part degree NURBS curve with control points. (b) Channel model constructed using NURBS surfaces.	99
4.3	Impact of the guiding object on the Edge detection result. (a) Original image [Google Earth, October,10 2010]. (b) Edge obtained with the Canny Edge. (c) Original image with a user-defined guiding channel (in blue). (d) Result of a Canny Edge that takes into account the guiding channel.	100
4.4	Impact of the power of the <i>proxy</i> value in Equation 4.2 on the edge detection result. (a) Power value of 1. (b) Power value of 3. (c) Power value of 5.	101

4.5	Example of a Snake with an internal energy that shrinks model and the edge of an object as external energy (in red) used to stop the process. (a) Snake initialization. (b) Optimization in progress. (c) Final state of the Snake.	102
4.6	Results of the current semi-automatic optimization of a channel based on image energy. (a) Initial picked center-line of the channel. (b) Initialization of the 3D channel form by choosing a width and depth value. (c) Channel geometry after 20 iterations. (d) Result of the optimization process (40 iterations).	104
4.7	3D channels extracted from images. (a) South-Aligator river [Google Earth, July,7 2012]. (b) Sonshua river [Google Earth, October,10 2010]. (c) Orinoco delta [Google Earth, April,10 2013].	106
4.8	Application of active contours to extract objects from two different seismic time slices. (a) Extraction of non-intersecting channels. (b) Extraction of intersecting channels.	106
4.9	2D Snake optimization using edges extracted from a 3D seismic data set. (a) The time slice used for the channel initialization and optimization. (b) 3D edges extracted from the seismic data. The detail shows the shape of the channel underlined by the edges. (c) Resulting channel. The detail shows that the 2D optimization and a good initialization produce a result close to the actual shape.	107
4.10	Modeling of an optimized channel's point bars using a retro-migration process inspired by the migration process presented by Ruiu <i>et al.</i> [2014a]. (a) Optimized channel on the Sonshua river [Google Earth, October,10 2010]. (b) Point bars with the retro migration process (10 steps).	109
4.11	Comparison between the retro-modeling and the forward simulation of a channel point bar. (a) Simulation of a channel with its oxbow lakes (in dark blue) and its point bars [Ruiu <i>et al.</i> , 2014a]. (c) Retro-migration of the simulated channel.	109
A.1	Image pre-processing	111
A.2	Steps of the Canny edge detector[Google Earth, July,7 2012]	113
A.3	Impact of pre-processing on Sobel edge filter results	113

Liste des tableaux

1.1	Hiéarchie des éléments architecturaux fluviaux, d'après Miall [1996]. Les ordres sédimentaires étudiés sont en gras	15
-----	---	----

Liste des Algorithmes

3.1	Algorithme de tri des auto-intersections d'un chenal	69
-----	--	----

Introduction Générale

Contexte et problématique

La représentation et l'estimation des hétérogénéités géométriques et pétrophysiques est une étape clé dans l'exploration et l'exploitation des ressources naturelles, telles que l'eau, les hydrocarbures et les minerais. L'organisation de ces hétérogénéités est contrôlée par des phénomènes physiques et chimiques complexes. La plupart des réservoirs clastiques sont formés par un agencement géométrique, à plusieurs échelles, de faciès avec des proportions de sable et d'argile variables impactant sur la très grande hétérogénéité des dépôts sédimentaires. Ils sont largement décrits dans la littérature en termes de géométrie et de hiérarchie d'unités structurelles élémentaires [Miall, 1996, Bridge et Tye, 2000, Rabelo *et al.*, 2007, Howell *et al.*, 2008]. En particulier Miall [1996] décrit les règles hiérarchiques ainsi que les relations entre les structures à différentes échelles en se basant sur l'organisation et les relations des surfaces limitantes des éléments entre niveaux hiérarchiques. L'impact des géométries et de l'organisation des différentes structures sur les propriétés réservoir des sédiments est également largement discuté [Haldorsen et Lake, 1984, Desbarats, 1987, Novakovic *et al.*, 2002]. Par exemple Jackson et Muggeridge [2000] traitent de l'influence des drapages d'argile discontinus dans les réservoirs clastiques. Ils rappellent que dans le cas d'un écoulement monophasique, ces argiles augmentent la tortuosité de l'écoulement du fluide ce qui diminue la perméabilité globale de la couche réservoir. Avec un écoulement diphasique, les argiles discontinues peuvent aussi avoir un effet négatif si elles sont présentes sur une large zone. Jackson *et al.* [2009] discutent enfin de l'impact des cliniformes sur le contrôle des réservoirs marins peu profonds et concluent que leurs géométries ont une influence sur la prévision des volumes en place, d'autant plus si les épaisseurs de faciès peu perméables situées entre les cliniformes ne sont pas bien estimées. L'abondance de faciès argileux peut également ralentir ou détourner l'écoulement du fluide, car ils agissent comme des barrières de perméabilité.

Afin de pouvoir prédire les comportements dynamiques de ce type de réservoir, il est nécessaire de modéliser le plus précisément possible l'organisation géométrique des dépôts sédimentaires. Les modélisations de dépôts sédimentaires visent parallèlement à reproduire les caractéristiques géométriques des structures et à honorer les données.

Diverses méthodes ont déjà été développées afin de reproduire la géométrie et l'organisation spatiale des structures sédimentaires. Deux grandes familles d'approches peuvent être distinguées, les méthodes visant à reproduire les processus de dépôt et les méthodes qui s'attachent à reproduire les structures [Koltermann et Gorelick, 1996]. Les méthodes basées sur la reproduction des processus sédimentaires reposent sur la modélisation des processus physiques qui gouvernent la mise en place des dépôts sédi-

mentaires [Haldorsen et Lake, 1984, Wen *et al.*, 1998, Lopez, 2003, Salles *et al.*, 2008]. Ces méthodes permettent de produire des modèles réalistes des dépôts mais peuvent être difficiles à conditionner à des données denses [Karssenberg *et al.*, 2001]. Les méthodes basées sur la reproduction de structures reposent quant à elles sur des relations spatiales entre les dépôts sédimentaires. Au sein de cette approche deux méthodes peuvent être distinguées, les approches basées pixel et les méthodes basées objet. Les méthodes basées objets reposent sur la répartition spatiale des structures. Par exemple, Guardiano et Srivastava [1993a], Strebelle [2002], Liu *et al.* [2004] utilisent des géostatistiques multi-points (approches basées pixels) afin de modéliser des géométries de chenaux. Ce type de méthode permet d'honorer précisément les données de puits. Elles sont cependant limitées dans la reproduction des géométries multi-échelles de structures sédimentaires, comme les cliniformes et les drapages d'argile. D'un autre côté les méthodes basées objets reposent sur la reproduction des géométries des structures sédimentaires. Deutsch et Wang [1996a], Viseur [2001], Deutsch et Tran [2002], Hassanpour *et al.* [2013] traitent de la modélisation orientée objets en se basant sur une description théorique des différentes structures sédimentaires. Les objets sédimentaires peuvent être organisés en se basant sur des concepts de dépôts [Pyrzcz *et al.*, 2009, McHargue *et al.*, 2011, Pyrcz *et al.*, 2012], afin de définir des relations hiérarchiques entre les différents objets. Ces méthodes permettent de reproduire des géométries complexes de dépôts sédimentaires à plusieurs échelles. Elles peuvent être conditionnées par des données douces et dures comme les données de puits. Cependant, un biais dans la position des structures par rapport aux données peut être induit si le nombre de puits à respecter est important [Hauge *et al.*, 2007]. Ces différentes approches utilisent en générale une grille comme support de la représentation des modèles sédimentaires, il est donc nécessaire de procéder à la mise à l'échelle de la maille du modèle de réservoir de ces données. Cela peut conduire à des pertes d'information en particulier pour la modélisation de propriétés discrètes telles que les faciès.

Ces différentes approches de modélisation reposent en générale sur des grilles pour la représentation des objets sédimentaires ce qui permet de gérer facilement les contacts et les intersections entre les objets. Il est néanmoins nécessaire de changer l'échelle des données pour les mettre à celle des mailles de la grille. Certaines approches proposent toutefois de modéliser les structures sédimentaires indépendamment d'une grille [Fisher et Wales, 1992, Wietzerbin, 1994, Viseur, 2004].

En particulier, les méthodes de reproduction de structures permettent de reproduire des dispositions géométriques des faciès et sont adaptées pour simuler différents scénarios en fonction d'informations des puits qui peuvent être peu abondantes et répartis de façon hétérogènes. Cependant, les données disponibles ne se limitent pas uniquement aux puits. En effet, les technologies d'imagerie (modèles numériques d'élévation de terrain, modèles numériques d'affleurements, sismique haute résolution, géoradar) peuvent capturer un grand nombre d'informations y compris à très petite échelle (jusqu'à 25 centimètres pour les acquisitions sismiques 2D peu profondes [Posamentier et Kolla, 2003, Reijenstein *et al.*, 2011]). Des méthodes ont été développées afin de pouvoir extraire des informations de ce type de données. Par exemple, Syversveen *et al.* [2011] utilisent des modèles paramétriques d'objets extraits de la sismique, couplés avec des données de puits afin de modéliser les corps géologiques potentiellement réservoirs. Fisher et Wales [1992] suggèrent d'utiliser des surfaces déformables paramétriques afin de capturer le schéma des corps fluviaux et d'en créer des re-

présentations par surfaces limitantes. Cela consiste par exemple pour un chenal au couplage de deux surfaces, une pour le toit de celui-ci et l'autre pour sa base. Sprague et de Kemp [2005] utilisent ce type d'approche de modélisation par des surfaces paramétriques déformables pour reproduire la forme de dômes de sel. En plus de ces approches adaptées à la géologie, Montagnat *et al.* [2001] réalisent un récapitulatif des différents modèles de surfaces déformables en soulignant leurs intérêts dans le contexte de la reconnaissance automatique de formes à partir d'images médicales. Les premiers développements dans ce domaine sont réalisés par Kass *et al.* [1988] qui établissent la méthode des Modèles par Contours Actifs, aussi appelée Snake. Elle consiste à minimiser l'énergie d'une courbe. La forme de cette courbe est déterminée par des forces issues de l'image qui attirent les nœuds de la courbe. Basées sur ce principe, un grand nombre de références s'appliquent à reproduire des formes issues de la segmentation d'images en 3D [McInerney *et al.*, 2002, McInerney et Dehmshki, 2003, Grove *et al.*, 2011]. La plupart reposent sur une l'utilisation d'une série de coupes transversales de l'objet et sur la segmentation de ces images en 2D. Par exemple Shen *et al.* [2009], dans le cadre de l'imagerie médicale, extraient les surfaces limitantes de différents organes à partir d'images radiographiques en utilisant des surfaces déformables.

L'objectif de cette thèse est ainsi de fournir un modèle d'objets sédimentaires qui puisse être utilisé pour simuler plusieurs scénarios de dépôt et qui soit suffisamment flexible pour pouvoir être conditionné par des données denses issues, en particulier, d'images géologiques telles que les images satellites et les acquisitions sismiques.

Contributions de la thèse

Le but de ces travaux est de définir une bibliothèque de modèles volumétriques de structures sédimentaires en se basant sur leurs caractéristiques géométriques. Ces modèles sont construits pour être adaptables aussi bien aux simulations basées objets qu'à l'extraction de formes à partir d'images géologiques. Trois questions sont ainsi abordées :

- Comment définir des objets sédimentaires en termes géométriques afin de construire des modèles volumétriques ?
- Quels sont les processus de dépôt à retranscrire et comment adapter les modèles d'objets à ces mécanismes ?
- Dans le cas de données denses telles que des images géologiques, comment extraire les informations utiles et les appliquer pour construire des modèles de structures sédimentaires ?

Pour la formulation mathématique des modèles de structures sédimentaires nous proposons une représentation volumétrique générale des corps sédimentaires définis par leurs surfaces limitantes. Chacune de ces surfaces est réalisée sous la forme d'une surface paramétrique déformable. Les surfaces paramétriques proposées ici sont les Splines non-uniformes rationnelles, dites NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) qui sont communément utilisées dans la conception assistée par ordinateur (CAO). Dans le cadre de ces travaux les NURBS sont intéressantes car elles présentent une très grande flexibilité et permettent donc de construire tous types de formes. Les NURBS sont, de plus très flexibles ce qui permet de les déformer pour les adapter à des points de données. La formulation des modèles reposant sur l'utilisation de surfaces paramétriques construites indépendamment du support géométrique

du réservoir (p.ex. grille de simulation) les données sont directement intégrables sans nécessité de changement d'échelle.

Le premier chapitre introduit le contexte général de ces travaux. Il traite dans un premier temps des concepts géologiques en termes de dépôt des sédiments en milieu alluvial et turbiditique. La description de l'environnement sédimentaire, en question, devra, en particulier, tenir compte de la hiérarchisation des structures sédimentaires afin de reproduire la géométrie de l'environnement à différentes échelles et de façon cohérente. Ensuite, l'impact des structures sédimentaires sur les hétérogénéités et les caractéristiques réservoir de ces dépôts est discuté. Finalement un récapitulatif des différentes méthodes de représentation des hétérogénéités sédimentaires est présenté.

Le second chapitre décrit la construction de nouveaux modèles de structures sédimentaires par des surfaces limitantes en se basant sur des NURBS. Ces modèles sont focalisés sur les éléments constitutifs des environnements alluviaux. Dans un premier temps, un rappel sur les bases mathématiques des NURBS est réalisé. L'approche adoptée pour construire les modèles de structures sédimentaires est ensuite décrite. Ces représentations par frontières sont utilisées pour construire des grilles conformes aux surfaces limitantes qui reproduisent l'organisation interne des structures afin de pouvoir représenter les hétérogénéités à petite échelle. La prise en compte des déformations structurales qui ont impacté sur les formes sédimentaires est également discutée (Figure 1 - A).

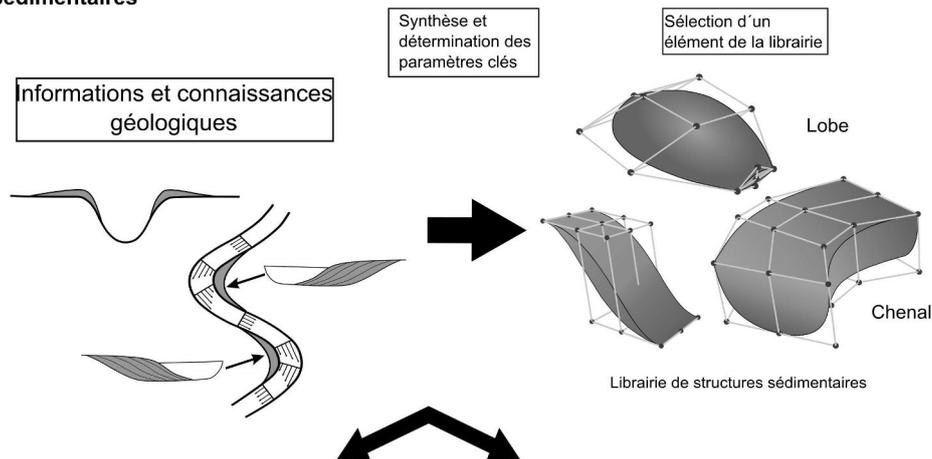
Dans une première application des modèles d'objets sédimentaires, le troisième chapitre aborde l'intégration de ces modèles dans un processus de simulation stochastique des systèmes chenalisants. La simulation utilisée s'oriente autour de la génération aléatoire des chenaux qui sont les structures organisant le dépôt des autres structures sédimentaires autour d'elles. Elle se base sur la génération de l'axe de chenaux à partir de paramètres géométriques [Viseur, 2004]. Les axes sont ensuite habillés avec des surfaces NURBS. La simulation des chenaux bien que principalement géométrique est adaptée pour intégrer des processus de dépôts tels que les avulsions et les abandons de méandres, qui changent la géométrie et la topologie des modèles. En particulier, la gestion de ces objets géologiques de façon explicite au niveau des surfaces limitantes des modèles est discutée. Les structures sédimentaires associées au chenal sont ensuite construites autour de celui-ci en assurant la conformité entre les objets. Les différents modèles de structures sédimentaires sont finalement utilisés comme cadre pour des simulations de propriétés pétrophysiques qui peuvent alors être mises à l'échelle de la grille réservoir en respectant les relations d'érosion entre les différentes structures (Figure 1 - B).

Dans le cadre de la seconde application des modèles d'objets sédimentaires, le dernier chapitre traite du conditionnement de modèles d'objets sédimentaire à des données denses dans le cas particulier de l'interprétation de structures à partir d'images géologiques comme des images satellites et des sections sismiques. Ce travail est orienté sur l'adaptation d'un processus de détection semi-automatique de formes, basé sur des algorithmes d'analyse développés en premier lieu pour des images médicales. Cette approche permet, en se basant sur des concepts a priori sur les géométries des structures sédimentaires, de concevoir des modèles d'objets qui sont ensuite déformés afin de restituer la géométrie tridimensionnelle des structures (Figure 1 - C).

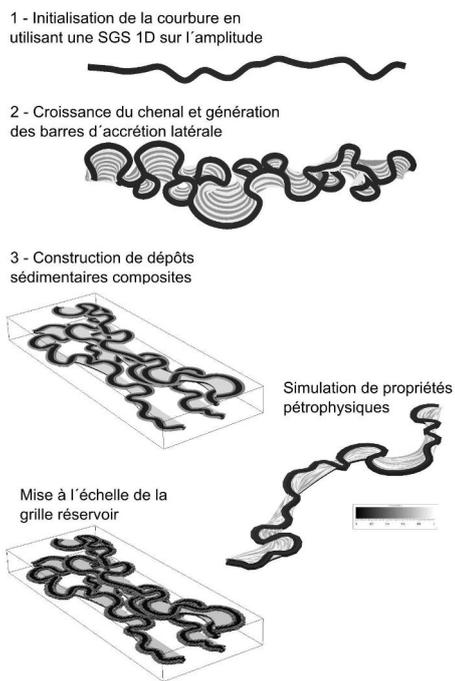
Au travers de ces quatre chapitres cette thèse présente une méthodologie qui permet de modéliser des environnements sédimentaires en alliant les connaissances

géologiques a priori et le respect des données (en particulier les données issues d'images géologiques). L'ensemble du projet a été réalisé dans le cadre du consortium Gocad. Une grande partie de ces travaux a été orientée sur l'implémentation d'une librairie indépendante écrite en langage C++ qui regroupe les NURBS et les modèles de structures sédimentaires. Cette librairie a été intégrée dans un nouveau plugin du logiciel Gocad dans lequel les processus de simulations et d'analyses d'images ont été implémentés. Ces travaux de thèses ont donné lieu à plusieurs publications, en particuliers dans le cadre des actes de congrès (IAMG, Petroleum Geostatistics) [Ruiu *et al.*, 2014a, Parquer *et al.*, 2015, Rongier *et al.*, 2015], un article dans *Mathematical Geosciences* [Ruiu *et al.*, 2015a] et un article dans *Interpretation* [Ruiu *et al.*, 2015b].

A - Construction d'une bibliothèque de structures sédimentaires



B - Simulation d'environnements sédimentaires



C - Analyse automatique d'images géologiques

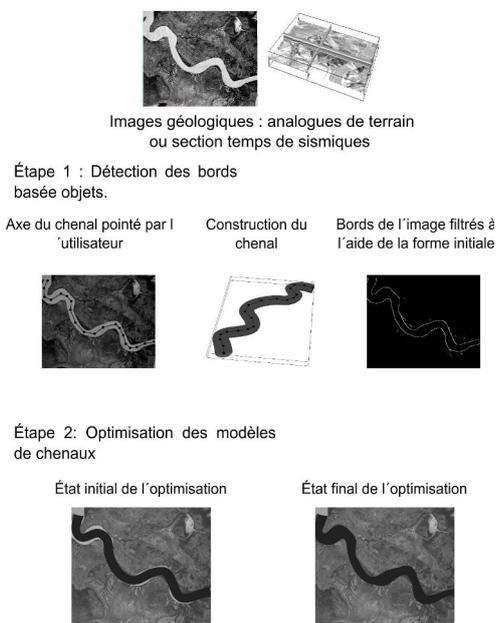


FIGURE 1 – SYNTHÈSE DE L'APPROCHE PROPOSÉE POUR LA MODÉLISATION DE STRUCTURES SÉDIMENTAIRES.

Chapitre 1

Contexte géologique et méthodes de modélisation des environnements sédimentaires

Sommaire

1.1	Introduction	7
1.2	Description conceptuelle des structures sédimentaires	8
1.2.1	Dépôts fluviaux	8
1.2.2	Dépôts turbiditiques	13
1.3	Impact à l'échelle du réservoir	15
1.3.1	Conséquences sur les phénomènes de déplacement liés à l'injection d'eau	15
1.3.2	Conséquences sur la connectivité	17
1.3.3	Conséquences sur l'estimation du facteur de récupération et du volume d'huile en place	18
1.4	Méthodes de modélisation des objets sédimentaires en intégrant les hétérogénéités locales	19
1.4.1	Approches basées objets	19
1.4.2	Modélisation reproduisant les processus de dépôts	21
1.5	Conclusion et approche proposée	25

1.1 Introduction

La plupart des réservoirs clastiques sont caractérisés par une architecture interne complexe due à l'histoire et aux processus de dépôt qui leur sont liés. Ces géométries complexes sont constituées par des agencements de faciès qui impliquent une grande variabilité en termes de propriétés pétrophysiques telles que la porosité et la perméabilité. En matière de simulation d'écoulement dans les réservoirs, ce type de variation peut conduire à des imprécisions. En effet ces hétérogénéités ont un fort impact sur les propriétés réservoirs (p.ex. huile initialement en place, facteur de récupération, etc...) [Jackson *et al.*, 2005, 2009].

Plusieurs méthodes permettent de modéliser les hétérogénéités dans les structures réservoirs, telles que les approches géostatistiques à deux points [Journel, 1996, Jour-

nel *et al.*, 1998], les simulations multi-points [Guardiano et Srivastava, 1993b, Strebelle, 2002], les modélisations basées objets ou processus [Deutsch et Wang, 1996a, Deutsch et Tran, 2002, Pyrcz *et al.*, 2009]. Les différentes méthodes sont caractérisées par leur capacité à reproduire des formes complexes et à honorer des données. Par exemple les approches géostatistiques basées pixel permettent un conditionnement précis mais sont limitées pour reproduire des formes géométriques complexes. En revanche les méthodes basées objets produisent des modèles plus réalistes des dépôts sédimentaires mais sont difficilement conditionnables à des données denses.

Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur la description de deux environnements de dépôts présentant des chenaux, les systèmes fluviaux et turbiditiques (Section 1.2). Les impacts de ces structures sédimentaires sur différentes propriétés des réservoirs, tels que l'efficacité des déplacements de fluides, la connectivité entre les corps géologiques et l'estimation des facteurs de récupération, sont ensuite discutés (Section 1.3). Finalement, différentes méthodes de modélisations des hétérogénéités sédimentaires sont présentées en se concentrant sur les approches visant à reproduire les géométries et les processus de dépôts des corps sédimentaires (Section 1.4).

1.2 Description conceptuelle des structures sédimentaires

Les modélisations des environnements sédimentaires, en particulier les modèles objets, reposent sur une description conceptuelle des éléments architecturaux formant les dépôts sédimentaires ainsi que de leur organisation dans la séquence de dépôt. Nous proposons une description succincte des dépôts fluviaux et turbiditiques afin de définir le cadre de l'approche de modélisation proposée dans cette thèse.

1.2.1 Dépôts fluviaux

1.2.1.1 Contexte de dépôt

Dans les environnements continentaux, les rivières sont les principaux agents de transport de la charge sédimentaire depuis la source jusqu'aux zones côtières. Les formations correspondantes aux dépôts alluviaux sont formées par l'érosion, le dépôt et le transport de sédiments par les chenaux [Reineck et Singh, 1973, Knighton *et al.*, 1998, Miall, 1996, Bridge et Tye, 2000, Miall, 2010].

Miall [1985, 1996] décrit les dépôts des rivières comme une organisation en huit éléments architecturaux élémentaires (chenaux, barres et lits gravier, lits sableux, macroformes d'accrétion en aval, dépôts d'accrétion latérale, dépôts sédimentaires d'écoulement gravitaire, dépôts de lamines de sable et particules fines d'inondation). La taille de ces éléments est équivalente à celle du remplissage des chenaux, et ils sont identifiables par leurs différences en termes de formes externes, de géométries internes et d'associations de faciès (Figure 1.1).

Ces types de dépôts peuvent être caractérisés par de bonnes porosités et perméabilités, ce qui en fait des candidats pour l'exploration et la production de ressources pétrolières, minéralogiques et hydrologiques. Cependant, leurs hétérogénéités internes étant très élevées, ces types de réservoirs peuvent être très compartimentés [Miall, 2010]. En particulier la présence de drapages d'argile à l'interface entre les différentes structures sédimentaires, peut constituer des barrières à l'écoulement. Les effets de ces hétérogénéités à petite échelle sont discutées dans la Section 1.3.

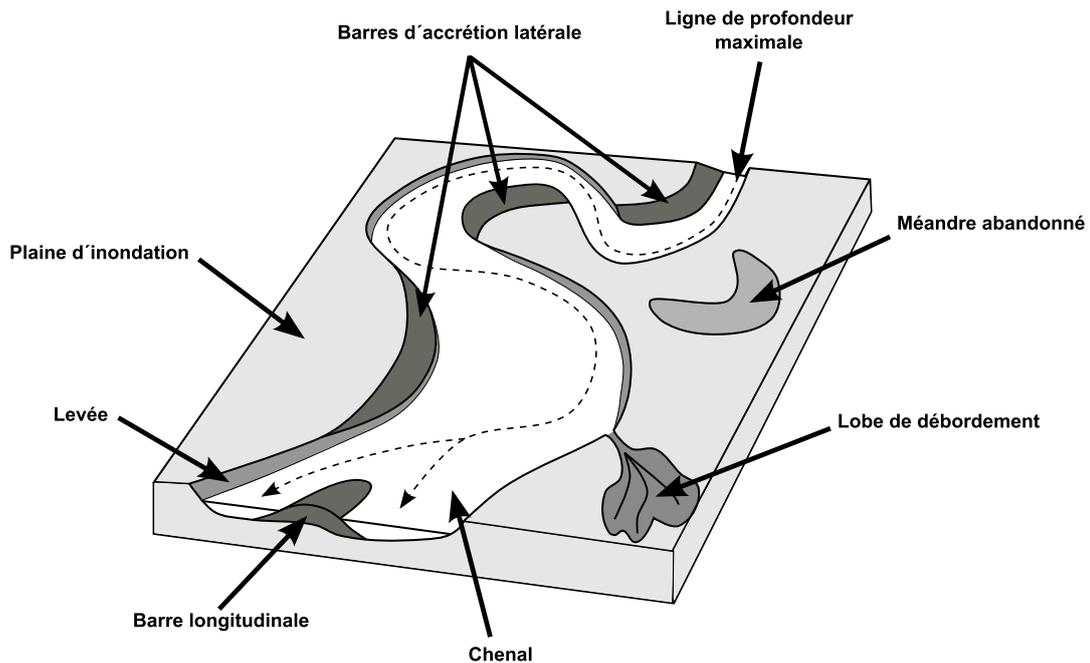


FIGURE 1.1 – ORGANISATION DES DÉPÔTS MÉANDRIFORMES, MODIFIÉE D'APRÈS [MIALL, 1996].

1.2.1.2 Style des chenaux en milieu fluvial

Les dépôts fluviaux sont formés par les écoulements de fluides au sein des chenaux, qui sont ainsi les éléments qui structurent et organisent la disposition des autres types de dépôts. Les rivières peuvent présenter différentes configurations qui peuvent être classiquement classées en quatre principaux types selon leur indice de sinuosité : en tresses, droit, méandriforme et anastomosé. Il est important de noter que des classifications plus sophistiquées se basent sur des caractéristiques de pente, charge sédimentaire et capacité de transport (p.ex Schumm [1981], Bridge [1985], Miall [1985], Church [2006]). Toutefois la classification en quatre grands types permet de résumer les caractéristiques géométriques des différents systèmes fluviaux.

Chenaux en tresses

Les chenaux en tresses sont caractérisés par une ceinture chenalante constituée de plusieurs chenaux qui se divisent et se rejoignent régulièrement. En période de basses eaux, les chenaux sont séparés par des barres fluviales mobiles qui divisent l'écoulement global (Figure 1.2(a)). En période de crue ces barres sont submergées. Ainsi les rivières en tresses présentent une variation rapide de la position des chenaux et des barres sableuses. Ce type fluvial peut avoir une largeur importante (kilométrique) pour une profondeur faible, de l'ordre de la dizaine de mètres. Il se trouve généralement dans la partie amont des bassins sédimentaires avec un gradient topographique fort (pente forte). Les dépôts des rivières sont caractérisés par une granulométrie élevée correspondant à des sables ou à et des conglomérats [Miall, 1977, 1996].

Chenaux faiblement sinueux

Les chenaux droits possèdent une sinuosité très faible (Figure 1.2(b)). Ils sont

généralement observables uniquement sur de courtes distances qui excèdent rarement dix fois la largeur du chenal [Reineck et Singh, 1973]. Les mécanismes de dépôt dans les chenaux droits se font sous la forme de barres sableuses dans les parties internes de la sinuosité.

Chenaux méandriformes

Les chenaux méandriformes sont caractérisés par une grande sinuosité et sont formés par un processus de migration latérale qui conduit également au dépôt de barres d'accrétion latérale. La migration latérale est due à des courants hélicoïdaux dans la partie externe des méandres et à des dépôts de sédiments dans la partie interne de ceux-ci. Ces barres de méandre sont caractérisés par des dépôts sableux en litages obliques. La migration d'un chenal dont la sinuosité augmente considérablement peut conduire à l'abandon de certains méandres alors appelés bras morts dans lesquels les dépôts se font par précipitation de faciès fins (silts, argiles) (Figure 1.2(c)). Le chenal peut être bordés par des levées qui sont formées par des dépôts fins. Les chenaux méandriformes sont également associées à la formation de lobes de débordement qui se développent suite à des ruptures de berges lors de crues et sont formés par des faciès sableux qui se déposent dans la plaine d'inondation. Ce phénomène peut conduire au détournement définitif de l'écoulement, le chenal changeant ainsi de lit. Ce processus est appelé avulsion [Reineck et Singh, 1973, Miall, 1985, 2010].

Chenaux anastomosés

Les caractéristiques des rivières anastomosées sont établies par Smith et Smith [1980]. Les systèmes anastomosés sont constitués par un réseau de chenaux sinueux interconnectés au sein d'une plaine d'inondation très développée. Ces chenaux se forment en aval des bassins sédimentaires en contexte de faible gradient hydrodynamique (pente faible) mais où l'aggradation verticale est rapide. Ils sont caractérisés par une grande stabilité avec peu de migration ce qui empêche la formation de barres d'accrétion latérale et de méandres abandonnés. Ils sont toutefois limités par des levées bien développées [Miall, 1996, 2010]. Les successions de migration et d'abandon peuvent créer des arrangements complexes dans les dépôts de barres d'accrétion. Les dépôts de chenaux consistent en des rubans de sable fin isolés par des formations d'éléments fins (silts, argiles) issus de la plaine d'inondation [Miall, 1996] (Figure 1.2(d)).

Les différents types de chenaux dépendent de la charge sédimentaire, la capacité de transport du cours d'eau et la pente (Figure 1.3) [Church, 2006]. Des transitions continues existent entre les motifs de chenaux [Reineck et Singh, 1980, Miall, 1996, Church, 2006] (Figure 1.4), par exemple [Leopold *et al.*, 1957] démontre qu'une transition naturelle existe entre les chenaux méandriformes et en tresses pour une pente donnée lorsque la capacité de transport augmente.

1.2.1.3 Organisation hiérarchique des structures sédimentaires

Miall [1996] décrit une classification hiérarchique des structures sédimentaires alluviales, basée sur la hiérarchisation de leurs surfaces limitantes. On parle également de séquence, chacune étant caractérisée par ses limites, son contenu (faciès) et la nature et le sens des ses variations. Ces différentes structures sont définies par des assemblages multi-échelles de microformes (p.ex. ride de courant), de mésoformes (p.ex.

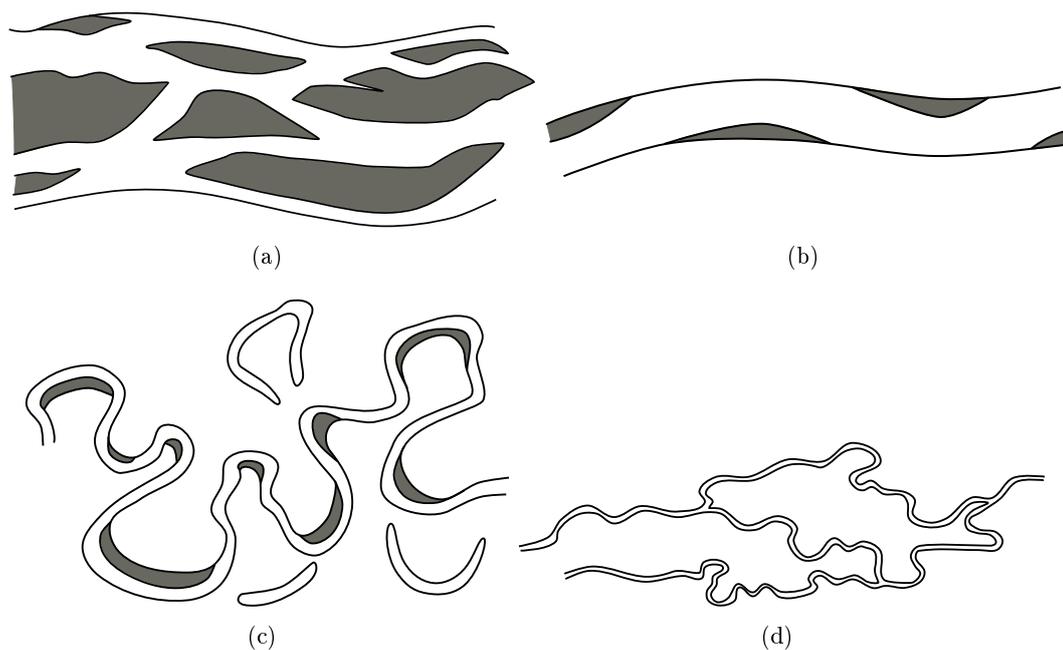


FIGURE 1.2 – DIFFÉRENTS STYLES DE CHENAUX, MODIFIÉ D'APRÈS [MIALL, 1977]. (a) Chenaux en tresses avec ces barres fluviales. (b) Chenal droit et ses barres sableuses. (c) Chenal méandrique et ses barres d'accrétion latérale (d) Chenaux anastomosés.

dune) et de macroformes (p.ex. barre d'accrétion, levée, lobe de crevasse...)(Figure 1.5) (Table 1.1).

Le premier ordre et le second ordre des surfaces limitantes sont respectivement les microformes et les mésoformes qui sont constitués de surfaces à litages obliques avec peu ou pas d'érosion. Les surfaces de troisième ordre sont des surfaces érosives à litages obliques avec un angle de pendage allant jusqu'à 15° . Elles sont en général enveloppées par des dépôts argileux. Les surfaces de quatrième ordre sont les surfaces limitantes supérieures des macroformes. Les surfaces de cinquième ordre sont les limites majeures de dépôts de sable telles que les limites de remplissage de chenaux. Les éléments architecturaux relatifs aux dépôts de rivière vont du 3^{ème} au 5^{ème} ordre [Miall, 1996] (Figure 1.1).

Des règles sont définies pour ces surfaces limitantes [Miall, 1996]. Une surface peut éroder une surface de même ordre ou d'ordre inférieur. Ainsi, une surface délimite toujours un ensemble imbriqué de surfaces de plus petits ordres. De plus, les surfaces peuvent changer d'ordre latéralement, et peuvent également disparaître à cause de l'érosion.

D'autres classifications de l'organisation des dépôts fluviaux ont été proposées [Bridge et Diemer, 1983, Allen, 1983, Ford et Pyles, 2014]. Par exemple, Ford et Pyles [2014] décrivent l'architecture des environnements fluviaux en trois niveaux classant par taille croissante les thèmes, les éléments et les archétypes. Les thèmes sont les différents volumes de roche séparés par des surfaces d'érosion à l'intérieur et à l'extérieur des chenaux. Les éléments permettent de séparer les dépôts dans les chenaux et dans les plaines d'inondation. Enfin les archétypes représentent les différents styles fluviaux (méandrique, droit, en tresses).

Dans ces travaux la classification utilisée est celle de Miall [1996]. En effet la

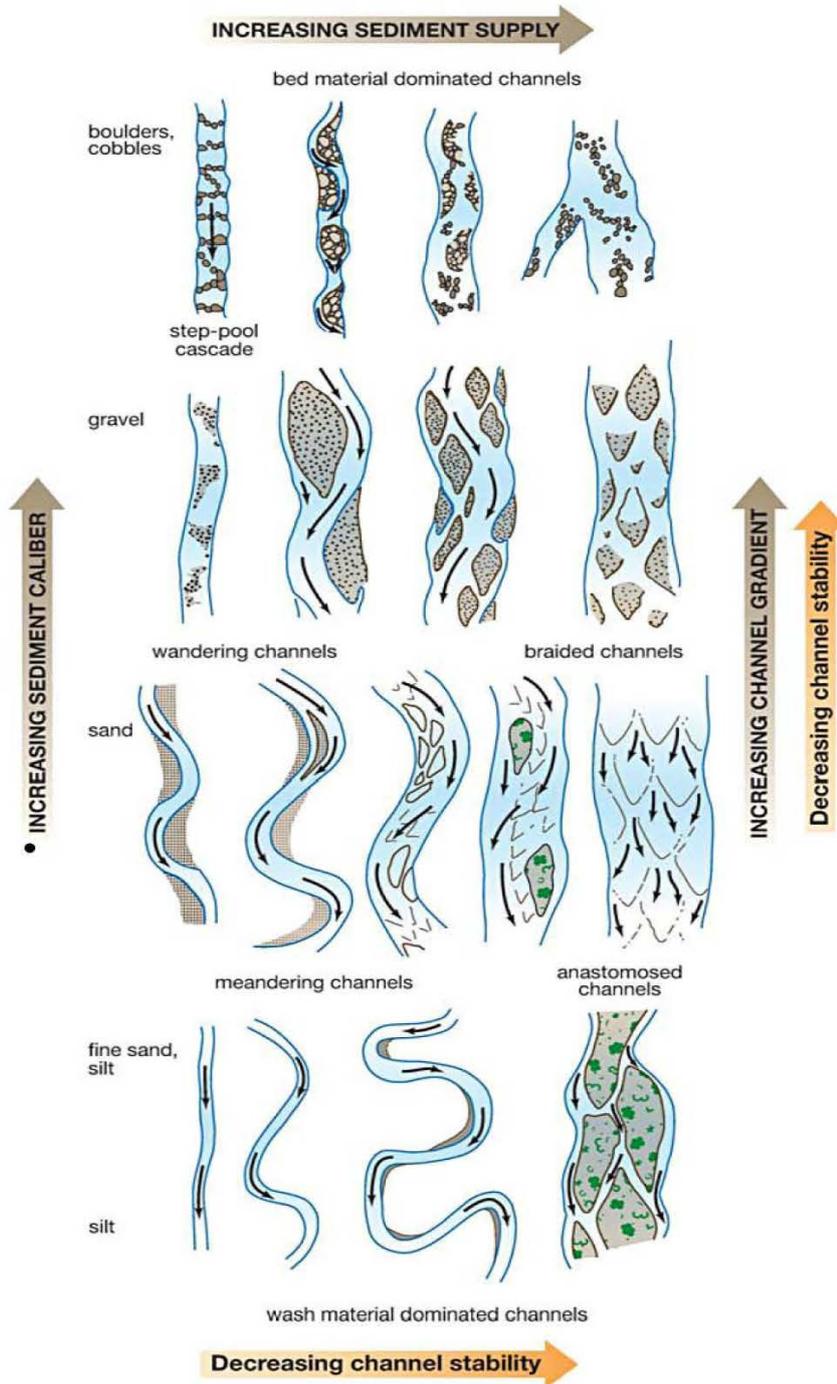


FIGURE 1.3 – LIEN ENTRE LA FORME DES CHENAUx FLUVIATILES ET LES FACTEURS PRINCIPAUX FACTEURS GOUVERNANT LES DÉPÔTS DES SÉDIMENTS D'APRÈS CHURCH [2006].

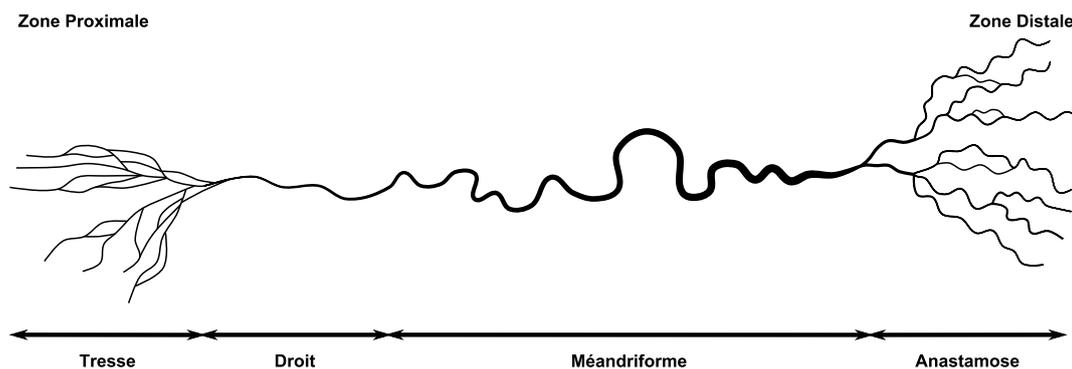


FIGURE 1.4 – SCHÉMA DE L'ÉVOLUTION CONTINUE ENTRE LES TYPES DE CHENAUX, MODIFIÉ D'APRÈS REINECK ET SINGH [1973].

description et la hiérarchisation des dépôts fluviatiles en termes de structures élémentaires à différentes échelles sont bien adaptées à l'approche de modélisation proposée dans cette thèse qui est détaillée dans la [Section 2](#).

1.2.2 Dépôts turbiditiques

Les courants de turbidité sont des écoulements gravitaires dans lesquels le sédiment est maintenu en suspension. Grâce à l'étude de nombreux analogues de surface, [Alpak *et al.* \[2013\]](#) a examiné les hétérogénéités internes à l'architecture des chenaux turbiditiques. Ces sédiments présentent une organisation multi-échelle [[Posamentier et Kolla, 2003](#), [Mayall *et al.*, 2006](#), [Janocko *et al.*, 2012](#), [Alpak *et al.*, 2013](#)]. Ils sont en particulier marqués par des formes chenalisantes dans les turbidites qui peuvent être observées le long des profils depuis le talus sous-marin jusqu'au plancher du bassin océanique. L'architecture des chenaux turbiditiques est multi-échelle avec une hiérarchie des éléments dépendant de leur taille, les plus petits étant incorporés dans les plus grands. Par exemple, [Mayall *et al.* \[2006\]](#) présente une organisation synthétique des dépôts turbiditiques. Dans ce cas, la plus petite échelle correspond au remplissage d'un chenal unitaire avec des tailles qui sont en général comprises entre 3 et 20 mètres d'épaisseur et entre 50 et 400 mètres de largeur. L'échelle supérieure est le remplissage d'un chenal majeur, qui consiste en un empilement de chenaux de petite échelle, de dimensions entre 15 et 60 mètres d'épaisseur et entre 300 et 1000 mètres de largeur. L'échelle la plus grande correspond à un complexe de chenaux reliés entre eux par des dépôts de levées internes délimités par une surface d'érosion ([Figure 1.6](#)).

Les dépôts argileux, qui représentent une source majeure d'hétérogénéités dans les réservoirs turbiditiques, peuvent être présents dans toute la séquence de dépôt. Ils sont en particulier observés le long de la base et des marges de chenaux turbiditiques. La géométrie des enveloppes d'argiles turbiditiques se caractérise par une épaisseur très fine (centimétrique à métrique) et par une extension latérale pouvant aller jusqu'à la moitié de la largeur du chenal soit jusqu'à une centaine de mètres. Leur extension et leur épaisseur sont des paramètres extrêmement variables comme montré sur la [Figure 1.7](#). Ces enveloppes pélagiques de base de chenaux consistent en des argiles d'abandon, des drapages de marges convergentes ou des enveloppes de contournement. La géométrie des enveloppes correspond en général à l'une des possibilités décrites

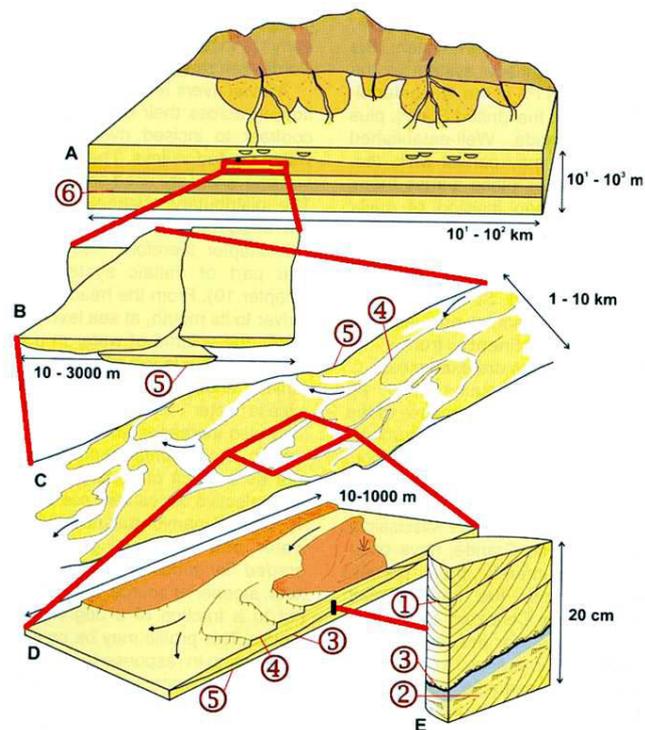


FIGURE 1.5 – HIÉRARCHIE DES DÉPÔTS SÉDIMENTAIRES [MIALL, 2010].

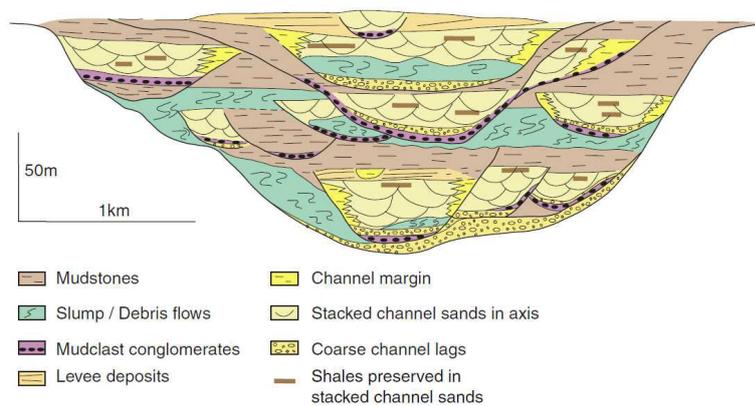


FIGURE 1.6 – SYNTHÈSE DE L'ORGANISATION MULTI-ÉCHELLE DES DÉPÔTS TURBIDITIQUES [MAYALL *et al.*, 2006].

Ordre sédimentaire	Éléments architecturaux fluviaux	Caractéristiques spécifiques
1 ^{er} ordre	microformes (rides)	Ondulations d'échelle centimétrique avec peu ou pas d'érosion apparente.
2 ^{ème} ordre	mésformes (dunes)	Echelle métrique, rides avec peu ou pas d'érosion apparente.
3^{ème} ordre	Structures de croissance de macroformes (clinoforme formé par l'augmentation de l'accrétion latérale d'un chenal)	Pendage dépendant du rapport largeur sur profondeur du chenal, jusqu'à 15° dans la direction d'accrétion.
4^{ème} ordre	macroformes (barre d'accrétion, levée, lobe de crevasse)	Géométries variables dépendant de la nature de l'architecture de l'élément. La taille peut être comprise entre quelques mètres et quelques kilomètres.
5^{ème} ordre	chenaux	Définis par la largeur, la longueur, la profondeur et le rapport largeur/profondeur avec une surface basale concave vers le haut.

TABLE 1.1 – HIÉRARCHIE DES ÉLÉMENTS ARCHITECTURAUX FLUVIAUX, D'APRÈS [MIALL \[1996\]](#). LES ORDRES SÉDIMENTAIRES ÉTUDIÉS SONT EN GRAS.

ci-dessus ou à un mélange de celles-ci selon le ratio entre le processus de dépôt et celui d'érosion tous deux conditionnés par le degré de la pente ([Figure 1.8](#)). D'après l'étude d'affleurements réalisée par [Alpak *et al.* \[2013\]](#), il semble que les enveloppes d'abandon de chenaux soient plus rarement observées que les deux autres types d'enveloppes.

1.3 Impact à l'échelle du réservoir

Comme le montre la description sédimentaire des systèmes fluviaux et turbiditiques, les dépôts clastiques présentent une grande variabilité de géométries et de faciès. Négliger les hétérogénéités telles que les corps d'argiles, peut conduire à une mauvaise connaissance de la connectivité des corps sableux. Dans ce cas, aucune simulation de fluide dans ces éléments ne donnera de modèle fiable. De plus, selon leur nombre, l'orientation, la géométrie et la connectivité entre les corps argileux, leur impact sur les simulations va varier.

1.3.1 Conséquences sur les phénomènes de déplacement liés à l'injection d'eau

Les corps argileux sont souvent des barrières aux écoulements à cause de leur faible perméabilité. Par conséquent, l'effet des éléments argileux discontinus sur les performances du réservoir lors d'injection horizontale d'eau, a été investigué par [Jackson *et al.* \[2000\]](#), [Jackson *et al.* \[2009\]](#). Étant donné que ces drapages d'argile sont

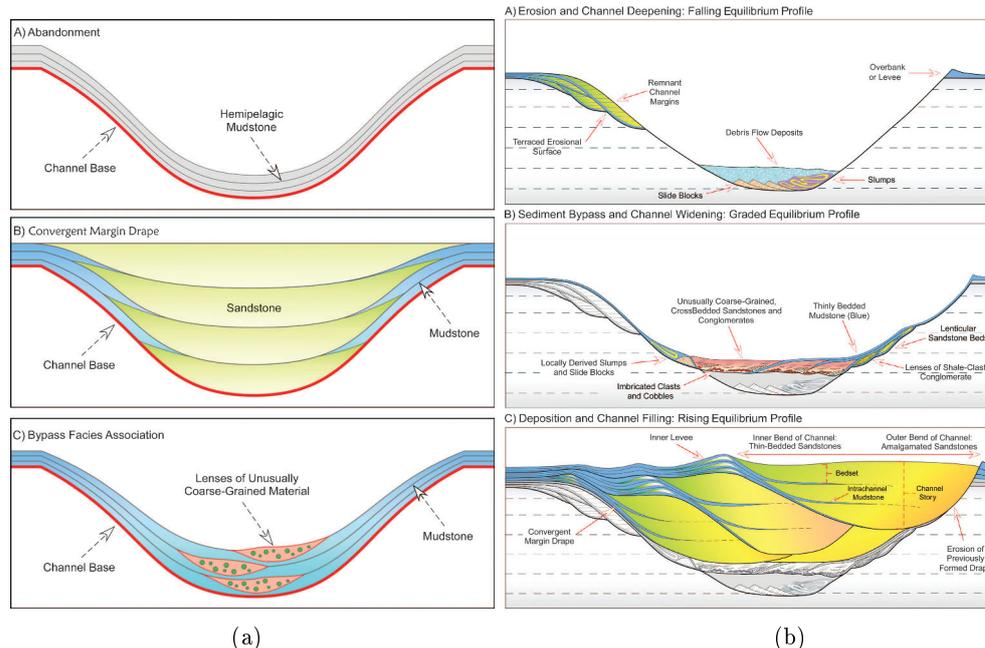


FIGURE 1.7 – DIFFÉRENTS TYPES DE DRAPAGE DE BASE DE CHENAUX OBSERVÉS SUR LES AFFLEUREMENTS DE DÉPÔTS DE CHENAUX TURBIDITIQUES. (a) Les épaisseurs des corps sont comprises entre 1 et 30 mètres, tandis que celle du type B est plus fine (1-2 centimètres à quelques mètres). (b) Evolution et faciès de l'architecture de l'ensemble des niveaux du chenal. Les dépôts dus à des phases précédentes sont en gris. Les dépôts en bleu correspondent au mudstone, les vert, jaune et orange au sandstone. Les trois phases qui sont à l'origine de ces types de drapage dans l'ensemble des niveaux du chenal, sont l'érosion, le contournement de sédiments et le remplissage de chenaux, d'après [Alpak et al. \[2013\]](#).

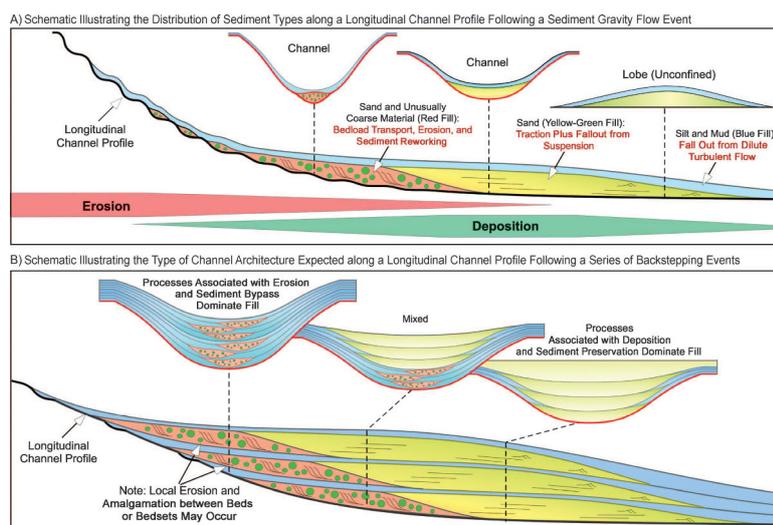


FIGURE 1.8 – VARIATIONS DES STRUCTURES DES CHENAUX ET DES GÉOMÉTRIES DES DRAPAGES D'ARGILES AU SEIN D'UN PROFIL LONGITUDINAL DE DÉPÔTS TURBIDITIQUES [[ALPAK et al., 2013](#)].

pour la plupart discontinus, il est difficile de les modéliser en utilisant la corrélation entre les puits et de reproduire leur variabilité et leur extension. Celles-ci sont donc simulées stochastiquement.

La présence d'éléments argileux augmente la tortuosité de l'écoulement et a pour conséquence de réduire la perméabilité effective du réservoir entier. En effet, d'après les études réalisées sur des modèles génériques 2D et 3D [Jackson et Muggeridge, 2000], durant les injections horizontales d'eau, les argiles discontinues ont un effet significatif sur l'écoulement quand leur extension est suffisamment grande et lorsqu'elles sont suffisamment inclinées pour modifier l'écoulement, soit avec un angle de 10° ou 15° par rapport à l'horizontale.

L'étude de Jackson *et al.* [2009] repose sur un modèle créé en utilisant une approche de modélisation basée sur les surfaces limitantes des hétérogénéités, développée par Sech *et al.* [2009], et montre que l'efficacité des injections d'eau est affectée par les dépôts argileux le long des surfaces des objets géologiques qui pourraient agir comme des barrières à l'écoulement. Toutefois, il semble que même si l'architecture des faciès est fortement contrainte par les surfaces des cliniformes, ces dernières ne semblent pas jouer un rôle significatif dans le facteur de récupération lors d'injection d'eau si elles ne sont pas associées avec des barrières à l'écoulement. Une barrière à l'écoulement peut être un horizon de calcite cimentée, un corps argileux ou silteux, ou encore une couche très concentrée en mica. Cependant, une barrière aura un impact important sur le phénomène d'écoulement seulement si elle est orientée de manière subparallèle à la pente des dépôts. En effet, lorsque l'injection d'eau se fait à la base des dépôts, l'eau s'écoule préférentiellement au travers des faciès sableux de bonne qualité présents dans la partie haute de la séquence sous-jacente, les hydrocarbures situés au pied de chaque cliniforme sont donc contournés.

1.3.2 Conséquences sur la connectivité

La connectivité entre les corps sédimentaires, l'orientation et le dépôt des corps argileux dans le réservoir impactent significativement les écoulements des fluides. En effet, selon la profondeur et l'extension des corps argileux, une compartimentation du volume du réservoir peut se développer. Une partie de l'huile en place peut donc être isolée des puits de production à cause de barrières à l'écoulement.

Jackson *et al.* [2005] ont étudié plus spécifiquement le cas des réservoirs formés par des dépôts sableux liés à la marée qui sont constitués d'une alternance de couches de sable et d'argile. Ces couches sont organisées par des structures sédimentaires caractéristiques des dépôts de marée (tidaux) tels que des rides de vagues (*flaser bedding*) et des rides lenticulaires (*lenticular bedding*). Ces structures ont un fort impact sur des propriétés réservoir comme la connectivité des dépôts sableux, la perméabilité effective et l'efficacité du déplacement. Ces paramètres peuvent être observés à l'échelle des carottes et à l'échelle des affleurements. Cependant, les observations à l'échelle des carottes de puits sont souvent faites sur une surface trop petite pour refléter la variabilité des structures générées par la marée. L'étude 2D des affleurements conduit aussi à des sous-estimations de la connectivité par manque de données dans la troisième dimension.

Jackson *et al.* [2005] proposent une technique de reconstruction de l'architecture interne des réservoirs influencés par la marée à partir de données d'affleurements en

utilisant des coupes réalisées sur de grands échantillons de roches (0.5*0.5*0.3 mètres). Cela permet l'intégration de la troisième dimension essentielle pour rendre compte de l'architecture interne complexe des corps géologiques. Cette approche permet aussi d'avoir une meilleure estimation de la connectivité des intercalations de dépôts sableux, de la perméabilité effective et de l'efficacité du déplacement au travers de chaque faciès. De plus, en choisissant cette approche, une détermination de modèles 2D plus réalistes est possible en considérant celui qui a le plus de correspondances avec le modèle 3D.

1.3.3 Conséquences sur l'estimation du facteur de récupération et du volume d'huile en place

Les travaux de [Jackson *et al.* \[2009\]](#) semblent démontrer que le volume d'huile en place est affecté par les variations d'épaisseur des faciès argileux associés aux cliniformes. Néanmoins, en ce qui concerne l'écoulement si ces faciès ne sont pas imperméables à l'écoulement, le facteur de récupération ne semble pas affecté par les surfaces des cliniformes même dans le cas où ces surfaces contrôlent l'architecture des faciès. Les facteurs de récupération sont toutefois très fortement impactés par les cliniformes présentant des barrières à l'écoulement sur leurs surfaces limitantes.

L'objectif de l'étude d'[Alpak *et al.* \[2013\]](#) sur les réservoirs turbiditiques contenant des hydrocarbures légers, est de fournir les paramètres statiques ou dynamiques principaux à choisir pour construire des modèles de réservoirs grossiers selon l'impact relatif de ces paramètres sur le facteur de récupération final. Les paramètres sont classés en trois catégories, haute, moyenne ou faible importance. Leur influence sur le facteur de récupération a été observée selon trois scénarios différents, l'injection d'eau, l'injection de gaz et la diminution de la pression de gaz.

Ces travaux ont montré que certains paramètres géologiques des ceintures méandriformes tels que le nombre de ceintures, leur degré d'amalgamation, le rapport des volumes net sur brut (*Net to Gross (NTG)*) et la quantité de drapage d'argile sont des paramètres importants pour l'estimation des ressources récupérables. Les facteurs d'ingénierie des réservoirs tels que l'espacement entre les puits, la pression de référence et la perméabilité horizontale dans les dépôts sableux, semblent avoir un impact moins important sur le facteur de récupération.

Dans le cadre de l'étude sur la capacité de stockage de CO_2 dans les réservoirs, [Issautier *et al.* \[2014\]](#) se focalisent sur l'influence des hétérogénéités sur la performance de l'écoulement. Le premier aspect consiste à gérer le grand nombre d'échelles d'hétérogénéités depuis l'échelle des pores à celle des structures sédimentaires. L'étude de l'impact des hétérogénéités sur le stockage de CO_2 est analysé en se basant sur des modèles d'architecture de réservoirs constitués de dépôts sableux par migration latérale de chenaux fluviaux, ceux-ci ayant été divisés en deux types de modèles. Le premier type représente les réservoirs homogènes tandis que le second intègre des barrières à l'écoulement à ces réservoirs homogènes sous la forme de méandres abandonnés. Cette analyse indique que la connectivité des ceintures fluviales, ainsi que les corps sableux internes aux méandres abandonnés, jouent un rôle essentiel dans les capacités de stockage d'un réservoir. En effet, selon leur disposition relative, les méandres abandonnés argileux peuvent réduire les capacités de stockage en compartimentalisant le réservoir. Cependant, ces corps argileux améliorent fortement le stockage en créant

des pièges pour les gaz. Grâce à eux, le risque de fuite et la pression exercée sur les roches de couverture sont tous deux réduits.

1.4 Méthodes de modélisation des objets sédimentaires en intégrant les hétérogénéités locales

Au vu de l'impact des structures sédimentaires sur les hétérogénéités des réservoirs clastiques, il est nécessaire d'établir des méthodologies d'évaluation des géométries de ces corps. Ainsi, de nombreuses études ont été réalisées sur la modélisation des hétérogénéités de petites échelles. Ces méthodes peuvent être divisées en deux grands types : Les simulations basées objets qui visent

- Les simulations géostatistiques à deux points qui permettent de simuler plusieurs réalisations des faciès en se basant sur les dépendances spatiales d'un ensemble de données à l'aide d'outils tels qu'un variogramme [Journel, 1996, Journel *et al.*, 1998].
- Les simulations multi-points qui se basent sur une image d'entraînement pour décrire la répartition spatiale d'une variable [Strebelle, 2002]. Cette approche permet la reproduction de formes continues et le conditionnement par des données dures ou secondaires. Toutefois, la continuité des structures n'est pas garantie et un nombre important de corrections des simulations peut être nécessaire. De plus, il est difficile de construire une image d'entraînement qui est considérée comme caractéristique du réservoir.
- Les simulations basées objets qui visent à générer des modèles théoriques des dépôts des corps sédimentaires afin de produire des modèles au plus près de la réalité [Viseur, 2004, Deutsch et Tran, 2002, Pyrcz *et al.*, 2009].

Cette section se concentre essentiellement sur les modélisations basées objets et basées processus en s'appuyant sur quelques exemples afin de définir le cadre de l'approche de modélisation des structures sédimentaires proposée dans ces travaux.

1.4.1 Approches basées objets

Les approches basées objets reposent sur la recherche d'un modèle théorique permettant de reproduire de façon réaliste les formes des corps sédimentaires. Les formes sédimentaires sont ensuite disposées de manière stochastique et guidées par des concepts sur l'organisation des structures [Deutsch et Wang, 1996b, Deutsch et Tran, 2002, Sech *et al.*, 2009, Gai *et al.*, 2012, Hassanpour *et al.*, 2013].

1.4.1.1 Exemple d'une méthode basée objets

Une application de la modélisation basée objets, est présentée par Hassanpour *et al.* [2013] pour les interprétations des faciès dans la formation McMurray dans l'Alberta, Canada. Cette formation est constituée de trois unités formée de complexes chenalisés qui se développent à plusieurs échelles dans un environnement de dépôt fluvial-estuarien. Dans ce cadre, il est nécessaire de modéliser des couches inclinées hétérolithiques (IHS (inclined heterolithic strata)) correspondant à des barres d'accrétion latérale tout en tenant compte du fait que ces chenaux sont imbriqués

sur de nombreux kilomètres carrés. Cette approche permet de respecter la géométrie de toutes les architectures des différents éléments en fournissant une formulation indépendante de la grille.

Hassanpour *et al.* [2013] utilisent une modélisation des faciès sans grille avec des objets et des séquences géologiques stockés sans être associés au système cartésien d'une grille. Une telle définition des objets de façon indépendante de la grille est l'avantage principal de cette technique. La représentation des géométries des objets dans le réservoir nécessite toutefois l'utilisation d'une grille en procédant à la rasterisation des formes sédimentaires. Le processus de modélisation est ainsi divisé en deux étapes, la première est la simulation des composants indépendamment de la grille et la seconde est la rasterisation des composants dans une grille globale. De nombreux éléments architecturaux peuvent ainsi être paramétrisés tels que les barres d'accrétion latérale sableuses, les drapages argileux, les brèches ou les méandres abandonnés.

De plus, il est possible de conditionner ou non la simulation par des données de terrain. Dans le cas d'une simulation non-conditionnée de chenaux méandriformes, les modèles de méandres sont placés alternativement de chaque côté d'une ligne représentant la trajectoire globale d'un chenal. Une perturbation aléatoire est introduite sur les paramètres de forme de chaque méandre. Cette approche est toutefois limitée pour reproduire la complexité de la géométrie des chenaux puisque qu'elle fournit des modèles globalement sinusoïdaux. Si ce modèle doit être conditionné par des données de puits, un algorithme de rejet des réalisations aléatoires de chenaux, qui ne respectent pas les données de faciès, est utilisé. Le modèle choisi devra être celui qui présente le moins de disparités entre la simulation de chenaux et les données de puits. Cependant, il existe des limites à cette méthode comme par exemple dans le cas de données denses, le temps de calcul de l'algorithme conditionnel est long à cause du grand nombre d'inadéquations. De plus toutes les données peuvent ne pas être respectées.

1.4.1.2 Exemple d'une méthode basée surfaces

Les méthodes basées surfaces permettent une approche objets particulière visant à modéliser les surfaces limitantes des structures sédimentaires. Cette approche se base sur le fait que les hétérogénéités sont souvent localisées sur les limites des corps sédimentaires les plus larges. Ainsi, la plupart d'entre elles peuvent être modélisées comme des surfaces plus ou moins étendues [Sech *et al.*, 2009, Gai *et al.*, 2012, Bertonecello *et al.*, 2013]. Dans la méthodologie proposée par Sech *et al.* [2009], la génération de géométries complexes et de distributions de faciès, basée sur la construction de surfaces, précède la création de la grille réservoir. Un avantage de cette méthode est l'efficacité de la construction par surfaces qui contiennent la majorité des informations. Le rendu, proche de celui de la géométrie réelle, n'est pas contraint par la résolution du modèle réservoir qui est limitée par la grille générée. En ce qui concerne le conditionnement aux données l'indépendance à la grille retire la nécessité de changer les données d'échelle pour les mettre à celle du réservoir. Cette méthode est toutefois limitée pour conditionner des données denses [Sech *et al.*, 2009].

1.4.2 Modélisation reproduisant les processus de dépôts

Les approches basées processus de génération de dépôts sédimentaire cherchent à imiter le processus de dépôt qui permet la mise place de structures sédimentaires. Ces méthodes reposent en général sur la génération de l'axe d'un chenal suivie de la génération des structures associés à ces chenaux [Ferguson, 1976, Ikeda *et al.*, 1981, Howard et Knutson, 1984, Lopez, 2003, Viseur, 2004, Pyrcz *et al.*, 2009].

1.4.2.1 Méthode de modélisation du long terme

Ikeda *et al.* [1981], Howard et Knutson [1984] décrivent l'évolution des rivières en termes des processus hydrauliques impliqués en particulier dans l'évolution latérales de la trajectoire du chenal. En particulier, les études de Howard et Knutson [1984], Howard [1996] traitent de la modélisation de l'évolution d'un chenal et de la plaine d'inondation. A cause de l'évolution constante de ces structures et de leur construction sur le long terme par des phénomènes comme l'écoulement des fluides, l'érosion, le transport et les processus de dépôt, une méthode de modélisation qui s'attacherait à reproduire leur évolution sur le long terme paraît intéressante mais nécessite quelques hypothèses. Par exemple, Howard [1996] propose une approche simplifiée davantage dédiée à la compréhension de l'évolution des chenaux et de la plaine d'inondation sur le long terme, qu'à l'intégration des équations des processus actuels comme les méthodes décrites dans le paragraphe précédent (Figure 1.9) :

Cinq principaux types distincts de plaines d'inondation sont considérés selon l'énergie du système qui peut être haute, moyenne ou basse, selon la cohésion des sédiments et selon le style des chenaux (en tresses ou méandriformes). Cependant, des photos aériennes peuvent être utiles pour valider et calibrer l'évolution de la plaine d'inondation. De plus, de nombreux travaux ont été réalisés sur les rivières méandriformes et en tresses ce qui permet de faire la comparaison avec les objets simulés de la plaine d'inondation. Une autre méthode appropriée pour valider les résultats serait de comparer les changements temporels ou cinématiques avec les changements naturels observés. Cependant, une telle base de données n'est pas assez abondante pour pouvoir conclure. Ainsi, cette méthode de modélisation de dépôt de la plaine d'inondation n'est pas encore validée faute de données pertinentes. Seules les statistiques sur l'âge du lit majeur, l'élévation et la distance au lit mineur du chenal peuvent être considérées.

1.4.2.2 Approches de modélisations pseudo-processus

Les méthodes pseudo processus empruntent aux approches purement processus et aux approches stochastiques basées objets afin de concilier le fait que les modèles déterministes soient souvent complexes et difficiles à conditionner à des données ponctuelles et que les modèles stochastiques manquent de réalisme. [Viseur, 2001, Lopez, 2003, Pyrcz *et al.*, 2009]. Dans ces méthodes la part de composantes stochastiques et déterministes (liées au processus de dépôts) est très variable, par exemple dans le cas de l'approche de Lopez [2003] il y a une forte implication des lois hydrodynamiques et une perturbation stochastique peut être introduite sur les paramètres de ces lois. D'un autre côté Viseur [2001] représente le processus de dépôt des chenaux de manière qualitative en se basant sur des paramètres géométriques pour contrôler l'évolution

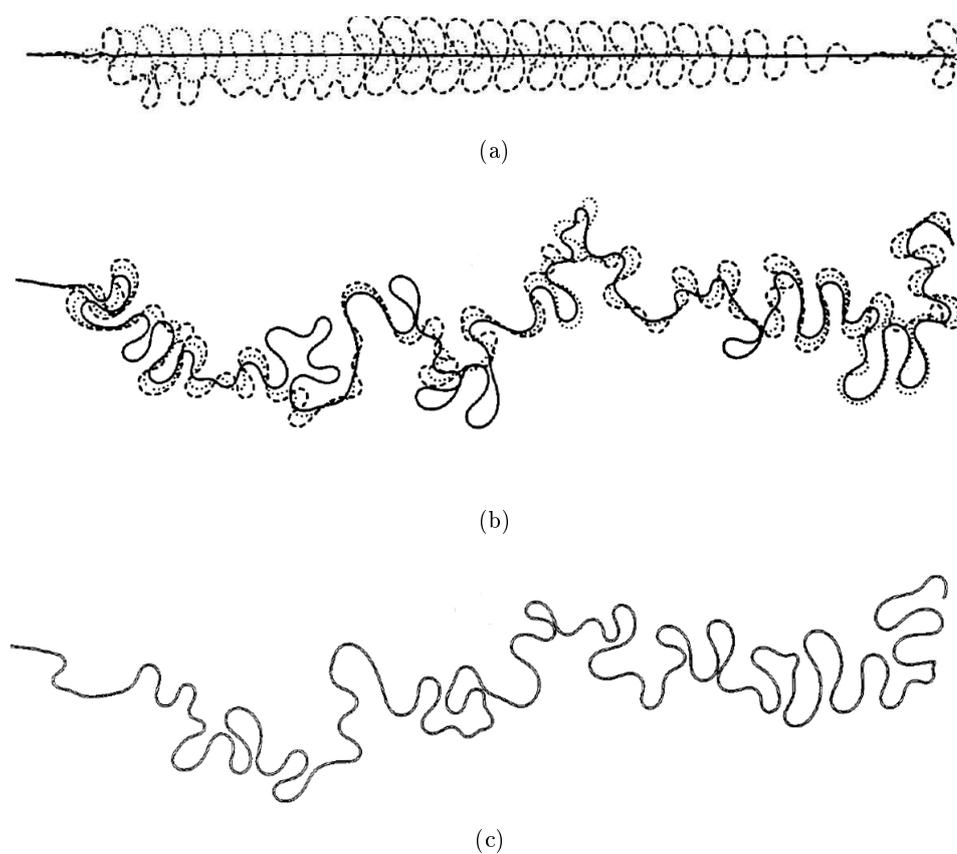


FIGURE 1.9 – ÉTAPE DE GÉNÉRATION DE L'AXE D'UN CHENAL [HOWARD, 1996]. (a) Début de la croissance de la ligne médiane d'un chenal. (b) État intermédiaire. (c) État final.

du chenal.

Modèles de lois hydrodynamiques appliquées aux simulations stochastiques

Lopez [2003] propose d'utiliser des méthodes déterministes afin d'intégrer des lois d'écoulements hydrodynamiques qualitatives permettant d'assurer le réalisme du modèle généré. Ensuite, une méthode stochastique est adoptée afin d'obtenir plusieurs simulations du même objet et de conditionner ces simulations aux données sismiques et de puits. Puis, après avoir fait évoluer l'axe du chenal dans le temps grâce à des paramètres physiques et géométriques, le modèle de proportions de faciès est intégré pour créer l'architecture des dépôts fluviaux. Cette approche permet d'avoir des simulations 3D réalistes de l'architecture fluviale de groupements de chenaux méandriformes dans un temps de calcul raisonnable.

Cette technique semble être satisfaisante pour modéliser un chenal méandriforme parce qu'elle donne des simulations rapides et réalistes honorant les données quantitative et qualitative pour un grand nombre de paramètres physiques et géométriques. Cependant, la quantité de données prises en compte reste limitée [Lopez, 2003]. De plus, dans l'objectif d'avoir des simulations fiables des paramètres pétrophysiques, une description plus complète des processus géologiques pourrait être envisagée. L'approche de conditionnement vise principalement à contraindre les chenaux or il serait intéressant de conditionner les structures non chenalisantes. Finalement les paramètres utilisés pour la simulation des chenaux tels que la paléo-pente ou le coefficient d'érodabilité lors de la formation du système ne sont pas toujours faciles à déduire directement de l'étude des sédiments actuels.

Méthode basée sur les événements (ou processus)

Pyrz *et al.* [2009] proposent une technique basée événements pour créer des modèles fluviaux stochastiques 3D de plusieurs types de chenaux conditionnés par des données de puits éparses associées à des tendances spatiales et verticales. L'initialisation de la ligne centrale se fait en utilisant un modèle périodique perturbé développé par Ferguson [1976]

$$\Phi(s) + \frac{2 * h}{k} * \frac{d\Phi(s)}{ds} + \frac{1}{k^2} * \frac{d^2\Phi(s)}{ds^2} = \varepsilon(s) \quad (1.1)$$

Avec $\Phi(s)$ les coordonnées cartésiennes de la ligne médiane par rapport à la coordonnée paramétrique s dans la courbe, k une variable reliée à la première longueur d'onde $k=2\pi/\lambda$, h est le facteur d'humidification ($0 < h < 1$) et $\varepsilon(s)$ la valeur de perturbation. À partir de cette initialisation un processus de migration latérale est appliqué.

La première étape de cette méthode consiste à positionner les éléments de plus grande échelle comme les chenaux ou les lobes de crevasse. Une fois les lignes centrales des chenaux générées, les autres éléments architecturaux sont créés. Ces éléments peuvent être des dépôts de particules fines d'inondation, des remplissages de chenaux, des accrétions latérales, des levées, des lobes de crevasse ou des remplissages de chenaux abandonnés. Chaque objet est généré sur la base d'une géométrie spécifique et de paramètres qui lui sont associés. Par exemple, un élément chenal est paramétré géométriquement par sa ligne centrale, la position relative de son talweg, sa profondeur stochastique et par le ratio de sa largeur sur sa profondeur (Figure 1.10).

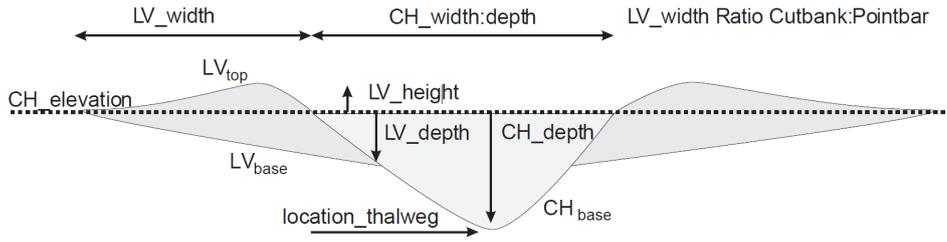


FIGURE 1.10 – ÉLÉMENTS DE CHENAUX ET LEVÉE EN COUPE AINSI QUE LEURS PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES RELATIFS [PYRCZ *et al.*, 2009].

Le nombre de lobes de crevasse générés par un chenal est calculé en se basant sur une distribution gaussienne. Pour chaque lobe, une ligne médiane est calculée en utilisant un processus de marche aléatoire. Les géométries des lobes de crevasse utilisées dans ce cas, sont définies par Deutsch et Tran [2002] en se basant sur des paramètres géométriques tels que la distance moyenne entre l'extrémité de la crevasse sableuse et les rives du chenal ainsi que la largeur et l'épaisseur de la crevasse sableuse.

Ces objets géométriques sont conditionnés à des données ponctuelles qui se comportent comme des points de contrôle pour la génération des trajectoires des différentes structures. Ces données sont intégrées dans le processus par l'utilisation d'un algorithme de rejet qui permet d'éliminer les réalisations qui ne respectent pas les données. Une méthode de correction, par modification des paramètres ou déformation ou translation, est également utilisée pour améliorer la correspondance aux données. Ainsi, cette approche intègre des morphologies de chenaux, et des processus tels que l'avulsion ou la migration des méandres, en honorant des données de puits et des tendances de répartition de faciès. Cependant, cette technique ne convient qu'à un ensemble de données peu dense, les données abondantes engendrant des artefacts. De plus, si les puits ne sont pas verticaux, mais déviés, l'utilisation de cette approche nécessite des améliorations pour la mise à l'échelle des données de puits à celle des cellules du maillage de la grille réservoir.

Simulation stochastique basée objets

Une autre approche de modélisation de réservoir a été proposée par Viseur [2004], les chenaux méandriformes sont simulés en utilisant une structure paramétrique définie par une ligne médiane qui reproduit la sinuosité de l'objet. La ligne médiane d'un chenal est habillée par une surface triangulée qui représente la frontière du chenal [Wietzerbin, 1994]. La simulation de la ligne médiane se fait en deux étapes. Premièrement, une courbe avec une sinuosité donnée est construite dans un domaine 2D en utilisant une simulation géostatistique. Ensuite, une courbe méandriforme est créée en se basant sur la courbure de la première courbe générée. Au point P_i sur la courbe C , le vecteur D_i correspond à

$$D_i = \alpha.T_i - \beta.N_i + \sigma.\mu.F \quad (1.2)$$

Avec T_i le vecteur normalisé de la tangente au point P_i , N_i le vecteur orthogonal normalisé de la courbe au point P_i , F le vecteur normalisé de la paléo-pente, σ le signe du produit scalaire entre N_i et F , tandis que α , β , et μ sont des valeurs arbitraires dont la somme est égale à 1. De plus, la simulation de chenaux est basée sur des

paramètres morphologiques tels que la tortuosité et la géométrie qui sont directement disponibles lors de l'étude du réservoir.

Pour finir, la dernière étape de l'algorithme permet d'honorer les données. Les modèles de chenaux étant définis hors des grilles par leurs surfaces limitantes le conditionnement aux données peut se faire sans changement d'échelle de celle-ci. Néanmoins, quand certaines données sont très proches, la simulation est biaisée et une direction préférentielle des structures peut être observée. À part ce problème, toutes les autres configurations de données peuvent être acceptées.

Les manipulations directes (par pointés de l'utilisateur) des objets sédimentaires représentés par des surfaces triangulées peuvent néanmoins être complexes et mener à la formation de points anguleux. Ainsi, afin de préserver la cohérence géométrique des modèles, il peut être nécessaire d'utiliser des processus de déformations globaux tels que DSI (*Discrete Smooth Interpolation*) [Mallet, 1992] ou les déformations adaptatives de l'espace [Botsch *et al.*, 2007].

Modélisation à petite échelle

Les approches basées processus peuvent être utilisées à plusieurs échelles. Par exemple une méthode a été proposée par Nordahl *et al.* [2005] pour modéliser des structures sédimentaires à l'échelle des carottes de puits. Cette modélisation est basée sur l'hypothèse que la plupart des réservoirs clastiques sont constitués de trois composants principaux que sont le sable, le silt et l'argile intercalés à l'échelle centimétrique. Ces approches se basent sur la paramétrisation des formes sédimentaires représentées par des surfaces limitantes entre les différents faciès. Les migrations des dépôts sont simulées par des déplacements successifs de ces surfaces. Les modèles de structures à petite échelle proposés par Nordahl *et al.* [2005] permettent de reproduire statistiquement les types et les mécanismes de dépôt tout en respectant les proportions des faciès, mais ne permettent pas de reproduire les données telles que celles fournies par l'imagerie de puits.

1.5 Conclusion et approche proposée

Au vu de la grande diversité des formes des structures sédimentaires et de leurs impacts sur les écoulements fluides, il est nécessaire de pouvoir modéliser de façon réaliste les géométries des objets sédimentaires afin de représenter les hétérogénéités du sous-sol. Plusieurs méthodes ont été développées pour modéliser les différentes structures sédimentaires. Elles reposent sur une paramétrisation des objets sédimentaires ainsi que sur une méthode de placement de ceux-ci qui peut être soit stochastique ou soit basée sur les processus de dépôt. Des approches alliant ces deux aspects ont également été considérées par exemple par Viseur [2001], Lopez [2003], Pyrcz *et al.* [2009] afin de générer stochastiquement des objets sédimentaires réalistes.

Dans de nombreuses approches de génération, les modèles de dépôts sédimentaires sont modélisés dans des grilles à l'échelle du réservoir. Toutefois Shtuka *et al.* [1996], Viseur [2001] introduisent une méthode de représentation des structures sédimentaires par des surfaces limitantes sous la forme de surfaces triangulées hors des grilles. En se basant sur cette idée de représenter les objets sédimentaires par leurs surfaces limitantes de façon explicite nous proposons d'utiliser des surfaces paramétriques afin de pouvoir créer des modèles flexibles des structures sédimentaires

avec un nombre restreint de paramètres. La formulation des surfaces appliquée ici sont les NURBS (*Non-Uniform Rational Basis Splines*) qui sont des représentations communes dans le domaine de la conception assistée par ordinateur. En effet, cette formulation mathématique introduit une plus grande flexibilité pour les déformations interactives directes des modèles que les surfaces triangulées grâce en particulier à une propriété de support locale qui permet de modifier une portion d'une NURBS de façon cohérente. Elles fournissent également des espaces paramétriques intrinsèques aux structures qui sont utilisés comme support pour la modélisation de propriétés pétrophysiques.

Les modèles d'objets sédimentaires par représentation surfacique basée sur des NURBS, sont construits afin de pouvoir gérer les processus de dépôts (p.ex. avulsions, abandons des méandres) et les relations entre les différentes structures. Contrairement au cas de la simulation dans des grilles, ce type de problématique doit être gérée explicitement au niveau des surfaces pour les représentations surfaciques. En effet, dans le cas de la modélisation dans des grilles, les valeurs des cellules déjà peintes sont effacées par les valeurs des nouveaux objets générés, cela permet en particulier de gérer facilement les changements de topologies telles que les érosions. Au contraire, dans le cas de la modélisation surfacique la géométrie des intersections entre les différentes structures doivent être calculée pour pouvoir retirer les parties érodées tout en maintenant la conformité des différents objets (p.ex. éviter les trous entre les structures). Ainsi, l'approche de simulation des chenaux présentée dans cette thèse est utilisée conjointement avec des processus permettant de gérer des problèmes géométriques et de changements de topologies tels que les avulsions, la formation de méandres abandonnés et la modélisation des barres d'accrétion latérale sous la forme de cliniformes indépendants.

De plus, pour pouvoir construire des modèles réservoirs prédictifs, ceux-ci doivent pouvoir être conditionnés aux données disponibles. Or si la méthode de simulation considérée se base sur une grille pour représenter les géométries des objets sédimentaires [Deutsch et Tran, 2002, Pycrz *et al.*, 2009], cela suggère de changer l'échelle des données (en particulier les données géométriques et de faciès) pour les mettre à celle de la grille. Les changements d'échelles peuvent conduire à moyennner localement l'information et donc à une perte d'information. Ainsi en modélisant les structures sédimentaires par des surfaces limitantes indépendamment de la grille permet d'éviter la nécessité de procéder à un changement d'échelle [Pycrz *et al.*, 2012, Hassanpour *et al.*, 2013]. Outre les données de puits, des données d'acquisitions géophysiques permettent aussi d'obtenir des images du sous-sol montrant des structures sédimentaires [Reijenstein *et al.*, 2011]. Ces données sont particulièrement denses, or les modèles basés objets actuels sont limitées dans l'utilisation de ce type de données. L'approche proposée dans ces travaux pour intégrer les données issues de la sismique est d'utiliser la grande flexibilité des NURBS afin de déformer les modèles d'objets sédimentaires pour respecter les données d'une image grâce à un processus d'interprétation semi-automatique.

Chapitre 2

Construction de modèles d'objets géologiques

Sommaire

2.1	Introduction	27
2.2	Éléments mathématiques des NURBS	28
2.2.1	Généralités sur les surfaces paramétriques	28
2.2.2	Éléments constitutifs des NURBS	29
2.2.3	Équations générales des courbes et surfaces	31
2.2.4	Dérivation	34
2.2.5	Raffinement de la NURBS	34
2.2.6	Manipulation directe d'une NURBS	34
2.2.7	Intérêts et limites pour la modélisation d'objets sédimentaires	36
2.3	Représentation par frontières basées sur les NURBS de structures sédimentaires	37
2.3.1	Formes chenalisantes	37
2.3.2	Levés	43
2.3.3	Figures d'accrétion latérale	46
2.3.4	Lobes	47
2.4	Construction de grilles et modélisation de faciès	48
2.4.1	Construction des grilles	48
2.4.2	Géométrie de remplissage des chenaux	49
2.4.3	Application à la modélisation de faciès dans les chenaux turbidiques	51
2.5	Utilisation en milieux déformés	53
2.5.1	Milieus plissés	53
2.5.2	Gestion des discontinuités	53
2.6	Conclusion	57

2.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous cherchons à fournir des modèles capables de représenter les structures sédimentaires à différentes échelles. Les objets géologiques sont représentés en se basant sur leurs paramètres géométriques (p.ex. longueur, largeur, épaisseur,

sinuosité) qui permettent de définir une forme théorique pour chaque structure. Les structures sédimentaires sont décrites dans la littérature en termes de paramètres et d'organisation géométrique ainsi que de relations génétiques entre les différentes structures sédimentaires [Miall, 1996, Rabelo *et al.*, 2007, Howell *et al.*, 2008] (Section 1.2). Les objets sédimentaires sont ensuite modélisés en utilisant des représentations par frontières dans lesquelles chaque surface correspond à une surface paramétrique qui peut être déformée afin de permettre la représentation de géométrie "réaliste" des différents objets. Les surfaces paramétriques utilisées sont les Splines non-uniformes rationnelles, dites NURBS (Non-Uniform Rational Basis Splines), qui sont communément utilisées dans le domaine de la conception assistée par ordinateur (CAO). Les NURBS sont intéressantes pour la génération d'un nombre important de modèles d'objets sédimentaires étant donné qu'elles peuvent être construites et modifiées avec un nombre restreint de paramètres. Les NURBS ont également un faible coût en mémoire et des temps de calculs rapides, ce qui permet de réaliser des manipulations interactives comme la déformation et le raffinement, ce qui est par exemple particulièrement intéressant pour conditionner la NURBS à des points de données. Le but de cette représentation est de construire une représentation tridimensionnelle de structures sédimentaires (chenal, lobe, levée, barre d'accrétion latérale) et de l'utiliser comme cadre pour la modélisation de faciès et de propriétés pétrophysiques. Ce chapitre propose un rappel sur les bases mathématiques de la construction des NURBS et des différents processus impliqués dans le cadre de l'édition des modèles basés sur les surfaces NURBS (Section 2.2). La Section 2.3 présente l'approche adoptée pour modéliser différents objets sédimentaires en utilisant une représentation par frontières basée sur les NURBS. Ces modèles sont utilisés pour construire des grilles hexaédriques conformes à leurs surfaces limitantes et la simulation de faciès dans ces grilles est illustrée en modélisant les schémas de remplissage des chenaux turbiditiques (Section 2.4). Pour finir, la Section 2.5 présente quelques considérations sur l'utilisation de ces modèles d'objets sédimentaires en milieux déformés. Ce chapitre s'appuie sur un article publiés dans le journal *Mathematical Geosciences* [Ruij *et al.*, 2015a].

2.2 Éléments mathématiques des NURBS

2.2.1 Généralités sur les surfaces paramétriques

Les NURBS sont des modèles mathématiques largement utilisés en CAO pour représenter des courbes, des surfaces et des solides. Elles permettent une grande précision (respect de points de contraintes) et une grande flexibilité (déformations interactives) dans la modélisation de formes. Les NURBS sont définies pour la première fois par Versprille [1975]. Les principes et les formulations mathématiques des NURBS décrites dans ce chapitre se basent sur Piegl et Tiller [1995].

Les premiers développements de ce type de courbes et de surfaces paramétriques appliquées à la CAO ont été réalisés par Pierre Bézier [Bézier, 1983] et ont été utilisés pour la modélisation d'automobiles. Leur principe consiste en une interpolation lisse d'un ensemble de points de contrôle. La fonction d'interpolation est une fonction polynomiale ou rationnelle continue dont le degré est directement lié au nombre de points interpolés. Par exemple une courbe de Bézier de degré trois interpole quatre points.

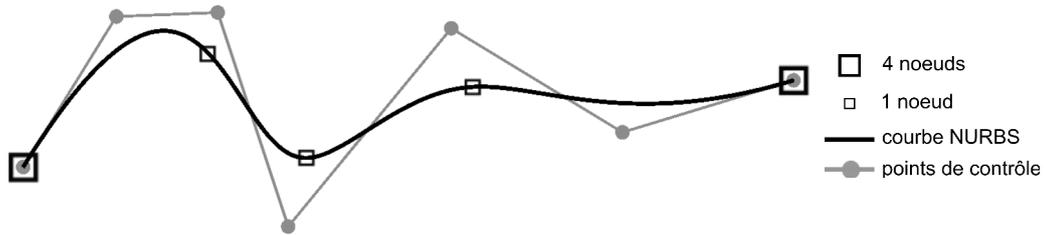


FIGURE 2.1 – COURBE NURBS DE TROISIÈME DEGRÉ. (Section 2.2.2 dans la partie sur les degrés). Avec les points de contrôle (Section 2.2.2) et un vecteur de nœuds $U = (0, 0, 0, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1, 1, 1)$ (cette formulation est décrite dans la Section 2.2.2 dans la partie sur les vecteurs de nœuds)

Afin d'éviter le recours à des polynômes de degré élevé pour des ensembles importants de points de contrôle, il est possible d'associer plusieurs parties de courbe ou de surface pour obtenir une structure continue par morceaux. La continuité du modèle est assurée en imposant des contraintes sur les dérivées au niveau des bords de chaque partie. Cependant ces contraintes réduisent la flexibilité des modèles. Une autre solution est d'utiliser une forme généralisée de la formulation de Bézier telle que les NURBS qui ont l'avantage d'être intrinsèquement continues dans l'espace cartésien.

2.2.2 Éléments constitutifs des NURBS

Trois paramètres de base sont suffisants pour définir une NURBS complète dans l'espace euclidien.

Points de contrôle

Les points de contrôle déterminent la forme de la NURBS, en agissant comme des aimants sur la courbe ou la surface. Le résultat de cette interpolation est toujours contenue dans l'enveloppe convexe formée par les points de contrôle. La formulation des NURBS évite la redondance des points contrairement au modèle de Bézier par parties pour lequel les points sont dupliqués au niveau des jonctions. Le fait d'ajouter des points de contrôle augmente la flexibilité pour la manipulation de la NURBS.

Degrés

Le degré d'une NURBS est lié à la distance entre les points de contrôle et leur interpolation, plus le degré est élevé plus l'interpolation est lisse (Figure 2.2). Une valeur de degré doit être spécifiée pour chaque dimension de l'espace paramétrique (p.ex. une surface, $2D$ dans l'espace paramétrique, nécessite deux valeurs de degrés). Le nombre de points de contrôle dans chaque direction de l'espace doit être strictement supérieur à la valeur du degré dans cette direction.

Dans le cadre de la modélisation géométrique, les NURBS cubiques sont les plus courantes car elles sont C^2 (fonctions 2 fois dérivable et à dérivée seconde continue) sur l'ensemble de leur domaine. Ceci permet de déterminer et de définir en tout point de l'espace paramétrique des valeurs de tangente (dérivée première) et de courbure (dérivée seconde). Les quatrième et cinquième ordres

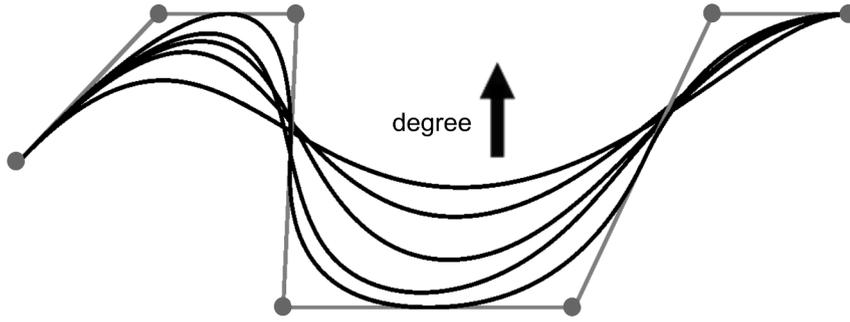


FIGURE 2.2 – IMPACT DU DEGRÉ DE LA FONCTION D'INTERPOLATION SUR LA FORME DE LA COURBE NURBS. Les points de contrôle et l'enveloppe convexe de ces points sont en gris.

peuvent être utilisés pour obtenir une continuité à plus haut ordre, mais restent rares car l'augmentation du degré accroît les temps de calcul et peut entraîner des instabilités numériques.

Vecteur de nœuds

Les NURBS sont intrinsèquement continues dans l'espace cartésien mais sont définies par parties dans leur espace paramétrique. Un ensemble de coordonnées paramétriques appelé vecteur de nœuds définit les séparations entre les différentes fonctions d'interpolation des points de contrôle servant à construire la géométrie de la NURBS dans l'espace cartésien. Le nombre de vecteurs de nœuds dépend de la dimension de l'espace paramétrique, par exemple, un pour une courbe et deux pour une surface.

Un nœud peut être répété plusieurs fois dans le vecteur. Le nombre de fois où le nœud est répété, est appelé multiplicité et a un impact direct sur la continuité et la dérivabilité de la NURBS. En effet, en un nœud la NURBS est C^{p-k} , avec p le degré et k la multiplicité du nœud (Figure 2.3). Usuellement, le premier et le dernier nœud ont une multiplicité égale au degré plus un, afin de forcer la NURBS à passer par les points de contrôle extrêmes (Section 2.2.3.2).

La formulation générale d'un vecteur de nœuds, pour un espace paramétrique normalisé entre 0 et 1 est [Piegl et Tiller, 1995]

$$U = \underbrace{\left(\overbrace{0, \dots, 0}^{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{(n_u-1)-p-1}, \overbrace{1, \dots, 1}^{p+1} \right)}_{n_u = n + p + 1}, \quad (2.1)$$

Avec n_u le nombre d'éléments du vecteur de nœuds, n le nombre de points de contrôle dans la direction paramétrique correspondant au vecteur (p.ex. u or v) et p le degré de la NURBS dans cette direction.

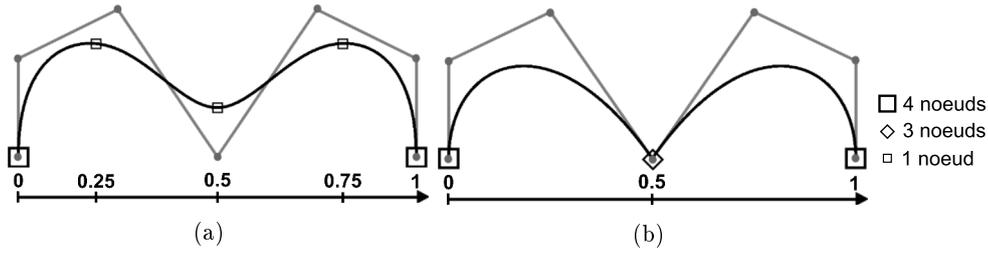


FIGURE 2.3 – INFLUENCE DE LA MULTIPLICITÉ D’UN NŒUD SUR LA CONTINUITÉ D’UNE COURBE NURBS. (a) Courbe NURBS cubique avec le vecteur de nœuds $U = (0, 0, 0, 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1, 1, 1, 1)$ (b) Courbe NURBS cubique avec le vecteur de nœuds $U = (0, 0, 0, 0, 0.5, 0.5, 0.5, 1, 1, 1, 1)$

2.2.3 Équations générales des courbes et surfaces

2.2.3.1 Évaluation d’un point sur une NURBS

Une courbe NURBS est construite à partir d’une fonction d’interpolation dans un espace paramétrique et est définie par

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)w_i}, \quad (2.2)$$

Avec p le degré de la NURBS, P_i un point de contrôle, $n + 1$ le nombre de point de contrôle, w_i le poids de chaque point de contrôle sur l’interpolation et $N_{i,p}(u)$ la fonction de base de $p^{\text{ème}}$ degré (Section 2.2.3.2).

Les courbes rationnelles sont calculées en utilisant un système de coordonnées homogènes, afin de transformer la formulation rationnelle en une formulation polynomiale,

$$C^w(u) = \sum_{i=0}^n N_{i,p}(u)P_i^w, \quad (2.3)$$

Cette forme est obtenue en transformant les points de contrôle $P = (x, y, z)$ en points 4D $P^w = (wx, wy, wz, w)$ avec w le poids des points dans l’interpolation.

Une surface NURBS est quant à elle construite comme le produit tensoriel de deux courbes avec des paramètres (u, v) indépendants, tel que

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u)N_{j,q}(v)w_{i,j}}, \quad (2.4)$$

Avec p, q les degrés de la NURBS dans chacune des directions de l’espace paramétrique, $P_{i,j}$ un point de contrôle et $[n + 1] \times [m + 1]$ le nombre de points de contrôle, $w_{i,j}$ le poids associé à un point de contrôle (Figure 2.4) et $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$ les fonctions de base de $p^{\text{ème}}$ et $q^{\text{ème}}$ degré (Section 2.2.3.2).

Les surfaces sont également calculées en utilisant des coordonnées homogènes dans

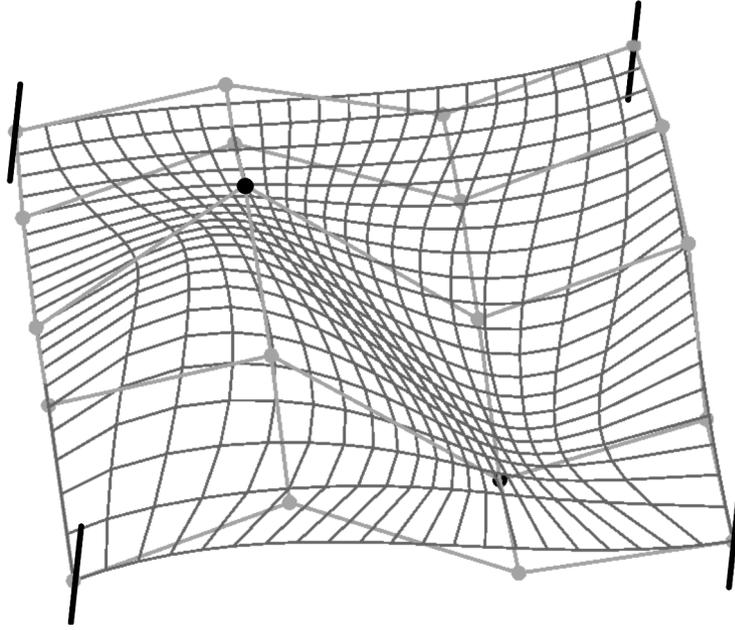


FIGURE 2.4 – SURFACE NURBS BI-CUBIQUE AVEC UN POIDS $w = 10$ AUX POINTS NOIRS ET $w = 1$ AUX POINTS GRIS. Les lignes grises représentent des évaluations iso-paramétriques de la surface et sont en particulier attirées par les points noirs.

un souci d'efficacité de calcul, par

$$S^w(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{i,j}^w. \quad (2.5)$$

en transformant les points de contrôle $P = (x, y, x)$ en $P = (wx, wy, wx, w)$.

2.2.3.2 Fonctions de base

Piegl et Tiller [1995] décrivent une formulation des fonctions de base des NURBS, $N_{i,p}$, avec une structure récursive facilement utilisable dans le cadre d'une implémentation informatique. La fonction de base de $p^{\text{ème}}$ degré est définie par

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{si } u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2.6)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u-u_i}{u_{i+p}-u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1}-u}{u_{i+p+1}-u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

avec $U = (u_0, \dots, u_{nu-1})$ le vecteur de nœuds, i l'index du nœud dans le vecteur de nœud, et p le degré de la fonction de base (Figure 2.5).

Les fonctions de base portent des propriétés importantes qui ont un impact sur les caractéristiques géométriques des courbes et surfaces NURBS. Ces propriétés sont :

- $N_{i,p}(u) = 0$ si u n'appartient pas à l'espace de nœuds $[u_i, u_{i+1})$.
- Les dérivées des fonctions de base $N_{i,p}(u)$ existent pour tous les u appartenant à un espace de nœuds $[u_i, u_{i+1})$. En particulier, en un nœud, $N_{i,p}(u)$ est C^{p-k} avec k la multiplicité d'un nœud. En augmentant la multiplicité du nœud, une courbe ou une surface peut être divisée en plusieurs éléments puisque la

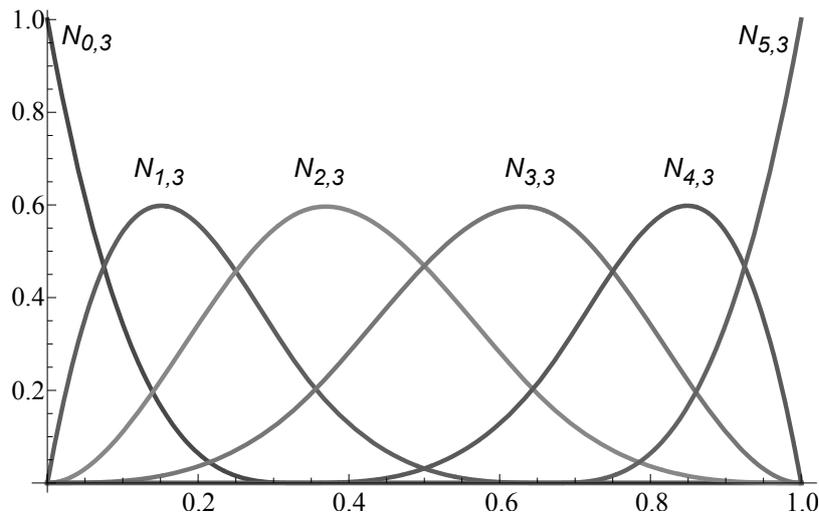


FIGURE 2.5 – FONCTIONS DE BASE DE DEGRÉ TROIS. Le vecteur de nœuds vaut $U = (0, 0, 0, 0, 1/3, 2/3, 1, 1, 1, 1)$.

multiplicité détermine la continuité de la NURBS.

- Si p est différent de 0, alors $N_{i,p}(u)$ a un unique maximum (Figure 2.5). Cette propriété est à l'origine du comportement "d'aimant" des points de contrôle vis à vis la courbe ou de la surface. Elle est donc primordiale dans le contexte de la modélisation interactive étant donné que les modifications des courbes ou des surfaces sont directement associées aux déplacements des points de contrôle.

2.2.3.3 Propriétés fondamentales

Les NURBS présentent un certain nombre d'avantages pour la conception interactive de surfaces :

- Les coins de la surface sont colocalisés avec les points au niveau des coins du maillage de contrôle. Ceci est dû à la formulation des vecteurs de nœuds pour laquelle les nœuds extrêmes ont une multiplicité égale au degré de la NURBS plus un, ce qui rend la NURBS C^0 à ses extrémités (Equation 2.1). Cette propriété permet de contrôler l'extension latérale de la surface NURBS.
- La surface est contenue dans l'enveloppe convexe formée par les points de contrôle.
- La surface présente un support local, en effet une partie de la surface peut être modifiée sans que l'ensemble de celle-ci ne le soit. Si un point $P_{i,j}$ est déplacé, alors la surface est affectée dans le sous domaine $[u_i, u_{i+p+1}] \times [v_j, v_{j+q+1}]$ des vecteurs de nœuds.
- En tout point de l'espace paramétrique, une surface NURBS est $p - m_u$ et $q - m_v$ dérivable par rapport respectivement aux directions U et V avec p le degré dans la direction U , q le degré dans la direction V et m_u la multiplicité dans le vecteur de nœud U et m_v la multiplicité dans le vecteur de nœud V .

2.2.4 Dérivation

Une surface NURBS est $p - m_u$ fois dérivable dans la direction U et $q - m_v$ fois dérivable dans la direction V sur l'ensemble de l'espace paramétrique, avec p et q les degrés selon U et V , m_u la multiplicité dans le vecteur de nœud U et m_v la multiplicité dans le vecteur de nœud V . La dérivée en espace de coordonnées homogènes est définie par :

$$\frac{\partial^{k+l}}{\partial^k u \partial^l v} S^w(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}^{(k)}(u) N_{j,q}^{(l)}(v) P_{i,j}^w. \quad (2.7)$$

Avec k l'ordre de dérivation selon u , l l'ordre de dérivation selon v , et $N_{i,p}^{(k)}(u)$ et $N_{j,q}^{(l)}$ les $k^{\text{ème}}$ et $l^{\text{ème}}$ dérivée des fonctions de base. La dérivée des fonctions de base est définie par

$$N_{i,p}^{(k)} = p \left(\frac{N_{i,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p} - u_i} - \frac{N_{i+1,p-1}^{(k-1)}}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} \right) \quad (2.8)$$

Avec u_i le $i^{\text{ème}}$ nœud dans le vecteur de nœuds.

2.2.5 Raffinement de la NURBS

Le raffinement des NURBS est opéré en insérant des nœuds dans les vecteurs de nœuds tout en préservant la courbe ou la surface, de façon paramétrique et géométrique. Cette opération consiste à déterminer un nouveau maillage de contrôle Q_i^W dont la taille est augmentée d'autant d'éléments que l'augmentation du nombre de nœuds. Pour déterminer ce nouveau maillage de contrôle de telle façon que la géométrie de la courbe soit préservée, il faut résoudre l'équation itérativement

$$\sum_{i=0}^n N_{i,p}(u) P_i^W = \sum_{i=0}^{n+1} N'_{i,p}(u) Q_i^W, \quad (2.9)$$

avec $N'_{i,p}(u)$ les fonctions de base de $p^{\text{ème}}$ degré correspondant au nouveau vecteur de nœuds. L'équation 2.9 peut être généralisée aux surfaces en appliquant l'opération d'insertion pour chaque ligne ou colonne de points de contrôle, dépendant de la direction de raffinement choisie.

Le raffinement des NURBS peut être appliqué pour :

- Découper des courbes et des surfaces
- Ajouter des points de contrôle et ainsi augmenter la flexibilité de l'objet
- Créer des arêtes aigües en diminuant la continuité de la NURBS

2.2.6 Manipulation directe d'une NURBS

La manipulation des NURBS par le déplacement de points de contrôle ou la modification du vecteur de nœuds peut s'avérer peu intuitive pour un utilisateur. Une méthode permet la manipulation directe des NURBS en se basant sur la prise en compte d'un ensemble de contraintes imposées à l'espace paramétrique et permet de déterminer la position des points de contrôle qui honore au mieux ces contraintes.

2.2.6.1 Projection de l'espace cartésien dans l'espace paramétrique

Les contraintes imposées à la NURBS, dans le cadre d'une déformation manuelle, sont définies dans l'espace cartésien par l'utilisateur. Un processus permettant de projeter un point de l'espace cartésien dans l'espace de la NURBS a été implémenté. Le processus se base sur une méthode par itération de Newton qui minimise la distance entre un point P de l'espace cartésien et son image $S(u, v)$ sur la NURBS. De façon générale la méthode par itération de Newton cherche à approximer une valeur de x pour laquelle $f(x)$ vaut 0 en se reposant sur le développement limité de Taylor au premier ordre

$$f(x) \simeq f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0). \quad (2.10)$$

Dans le cas d'une méthode de Newton $f(x) = 0$, on obtient donc l'équation

$$f'(x_0)(x - x_0) = -f(x_0). \quad (2.11)$$

Pour une surface NURBS $S(u, v)$, on cherche à déterminer conjointement les deux coordonnées u, v qui minimisent la distance entre P et $S(u, v)$ en utilisant les deux équations scalaires [Piegl et Tiller, 1995]

$$\begin{aligned} f(u, v) &= (S(u, v) - P) \cdot \frac{\partial}{\partial u} S(u, v) = 0 \\ g(u, v) &= (S(u, v) - P) \cdot \frac{\partial}{\partial v} S(u, v) = 0 \end{aligned} \quad (2.12)$$

et en résolvant le système d'équations

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial u} f(u_i, v_i) & \frac{\partial}{\partial v} f(u_i, v_i) \\ \frac{\partial}{\partial u} g(u_i, v_i) & \frac{\partial}{\partial v} g(u_i, v_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{i+1} - u_i \\ v_{i+1} - v_i \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(u_i, v_i) \\ g(u_i, v_i) \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$\text{avec } \begin{cases} f(u_i, v_i) = \frac{\partial}{\partial u} S(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P) \\ g(u_i, v_i) = \frac{\partial}{\partial v} S(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P) \end{cases} ,$$

avec u_i et v_i les coordonnées paramétriques à la $i^{\text{ème}}$ itération de la projection de P sur la surface NURBS $S(u, v)$. Le processus itératif est arrêté si une des trois conditions de convergence suivantes est remplie :

- Les points P et $S(u_i, v_i)$ sont colocalisés.
- La droite formée par P et $S(u_i, v_i)$ est orthogonale à la surface.
- Les points $S(u_i, v_i)$ et $S(u_{i-1}, v_{i-1})$ sont colocalisés.

2.2.6.2 Modification de la NURBS

La manipulation directe des NURBS peut être appliquée à la fois sur les courbes (Figure 2.6) et les surfaces (Figure 2.7) de façon interactive. Un ensemble de contraintes, $\Delta D_r^{(k,l)}$, est imposé aux coordonnées paramétriques $S(u, v)_r$ et à la $k^{\text{ème}}$ et $l^{\text{ème}}$ dérivées partielles. Il est important de noter que ces contraintes représentent les déplacements imposés à la NURBS et non pas la position finale des points $S(u, v)_r$. Pour une surface un système d'équations est établi à partir des contraintes imposées par l'utilisateur,

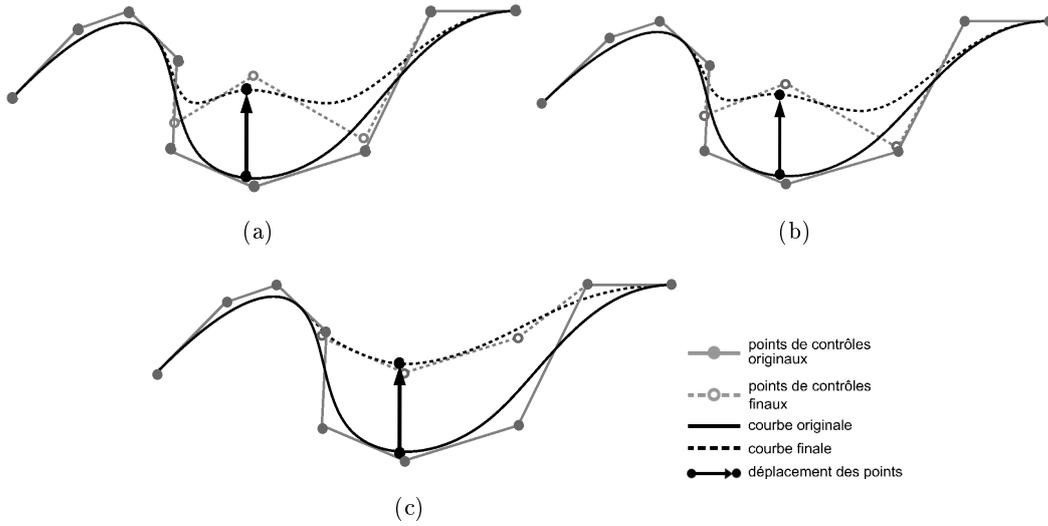


FIGURE 2.6 – MANIPULATION DIRECTE D'UNE COURBE NURBS. Un point (en noir) est sélectionné sur la courbe et est déplacé avec la possibilité de fixer la tangente et la courbure à ce point. L'état original de la courbe est illustré par des lignes et des points pleins. L'état final est représenté par des pointillés et des points vides. (a) Contraintes uniquement sur la position du point. (b) Contraintes sur la position du point avec conservation de la tangente. (c) Contraintes sur la position du point avec conservation de la tangente et de la courbure.

$$\sum_{i=0}^{(n+1)(m+1)-1} R_s^{(k,l)}((u,v)_r) \Delta P_s = \Delta D_r^{(k,l)} \quad (2.14)$$

avec

$$\sum_{i=0}^{(n+1)(m+1)-1} R_s^{(k,l)}((u,v)_r) P_s \Leftrightarrow \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) P_{i,j}$$

avec p, q les degrés de la surface NURBS dans chaque direction de l'espace paramétrique, $P_{i,j}$ les points de contrôle et $[n+1] \times [m+1]$ est le nombre de points de contrôle. $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$ sont les fonctions de base de $p^{\text{ème}}$ -degré et $q^{\text{ème}}$ -degré.

2.2.7 Intérêts et limites pour la modélisation d'objets sédimentaires

Les surfaces de NURBS permettent de créer une représentation par frontières des objets géologiques avec une grande flexibilité et un nombre de paramètres réduit. Ce type de représentation est adapté pour modéliser les structures sédimentaires étant donné que des utilisateurs ou des algorithmes peuvent interactivement contraindre les surfaces par des données. Des connaissances a priori sur les formes volumétriques des objets peuvent également être maintenues au cours des déformations des modèles grâce aux contraintes pouvant être imposées sur les tangentes et courbures des surfaces. Afin de conserver la cohérence de l'objet au cours de ses déformations, les points communs à différentes surfaces sont contraints à rester colocalisés.

Une limite significative des NURBS est de calculer l'intersection de surfaces et de découper l'une des surfaces par l'autre. La discontinuité d'une NURBS peut être assurée en augmentant la multiplicité d'un nœud. Dans le cadre d'une surface, celle-

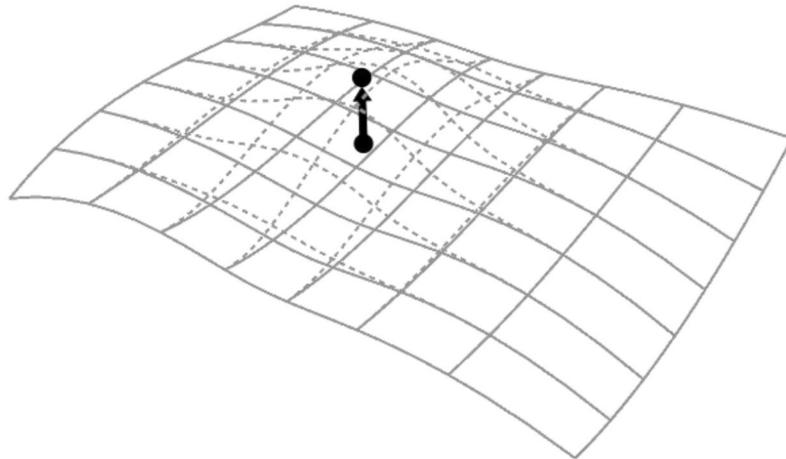


FIGURE 2.7 – MANIPULATION DIRECTE D'UNE SURFACE NURBS. Un point est sélectionné sur la surface et un déplacement est imposé à la position du point.

ci est découpée sur l'ensemble de son domaine suivant la coordonnée paramétrique du nœud ajouté, en impliquant l'insertion de plusieurs points de contrôles le long de la surface. La découpe d'une surface suivant une géométrie complexe nécessite l'ajout d'un nombre important de nœuds ce qui alourdit considérablement l'impact en mémoire de cette surface [Piegl et Richard, 1995].

2.3 Représentation par frontières basées sur les NURBS de structures sédimentaires

Nous proposons de construire des modèles par frontières de structures sédimentaires en utilisant pour chaque surface une NURBS cubique définie par un ensemble de points de contrôle qui représente une approximation de la géométrie de l'objet. Les points communs entre les différentes surfaces restent colocalisés par construction afin de maintenir la cohérence de l'objet au cours de ces déformations.

2.3.1 Formes chenalisantes

2.3.1.1 Caractéristiques sédimentaires

Les dépôts grossiers en contexte alluvial sont déposés par les écoulements fluides dans les chenaux. Au sein des sédiments alluviaux les chenaux sont rarement observables mais peuvent être déduits de mesures de paléocourants sur des structures d'ordre inférieur [Miall, 1985]. Dans les chenaux actifs, le remplissage sédimentaire est souvent de nature sableuse avec des éléments grossiers à la base de la structure [Reineck et Singh, 1980]. Les faciès observés dans les chenaux abandonnés sont plus argileux à cause de la diminution de la charge sédimentaire suite à l'abandon du méandre [Miall, 1996]. En pratique, le terme chenal est utilisé uniquement lorsque les dépôts ne peuvent pas être décrits par des structures d'ordre inférieur. La modélisation des chenaux est toutefois essentielle étant donné qu'ils conditionnent la répartition spatiale de toutes les autres structures sédimentaires. La géométrie d'un

chenal est habituellement définie par des paramètres de largeur, d'épaisseur, de longueur et de sinuosité. La surface limite supérieure peut être érosive ou aggradante et la surface limite inférieure est concave et érosive. La pente d'un chenal est liée à sa largeur, en effet plus la largeur d'un chenal est grande plus la pente est faible. Les surfaces limitantes des chenaux sont généralement de 5^{ème} ordre comme résumé dans la [Table 1.1](#).

2.3.1.2 Construction

Les chenaux sont représentés par trois surfaces NURBS connectées. La forme d'un chenal est définie par les paramètres suivants

- (i) L'axe du chenal qui représente la ligne de profondeur maximum projetée sur la surface supérieure. Il peut être pointé manuellement ou généré stochastiquement comme proposés par exemple par [Deutsch et Tran \[2002\]](#), [Viseur \[2004\]](#), [Pyrzcz *et al.* \[2009\]](#) ;
- (ii) la largeur du chenal ;
- (iii) l'épaisseur du chenal ;
- (iv) le ratio d'asymétrie maximale (formulé comme un ratio de la largeur, p. ex. le chenal est symétrique pour une valeur de 0.5).

Le maillage de contrôle de la surface supérieure est construit autour de l'axe du chenal en construisant une section verticale du chenal par nœud de l'axe ([Figure 2.8\(a\)](#)). Les paramètres de forme (largeur et épaisseur) peuvent être définis indépendamment pour chaque section. Pour les surfaces latérales, les points des sections sont placés suivant une forme quadratique ([Figure 2.8\(b\)](#)). La distance d'un point de contrôle appartenant à une surface latérale à l'axe du chenal est calculé par

$$\begin{cases} dist1(h) = \frac{L}{2} - \frac{L}{2} * (h/H)^2 \\ dist2(h) = -\frac{L}{2} + \frac{L}{2} * (h/H)^2 \end{cases} , \quad (2.15)$$

Avec $dist1(h)$ la distance horizontale d'un point de contrôle de la première surface latérale à l'axe du chenal en fonction de la position verticale du point, et $dist2(h)$ la distance équivalente pour la seconde surface latérale. L est la largeur du chenal et H la hauteur de celui-ci. Le point à la base du chenal est aligné avec le point précédent pour chaque surface latérale afin d'assurer la continuité de la forme chenalissante ([Figure 2.8\(b\)](#)).

Chaque section est alignée sur la bissectrice de l'angle formé par les deux segments autour du nœud de l'axe sur lequel est attachée la section ([Figure 2.8\(a\)](#)). Pour calculer la bissectrice de vecteur \vec{AB} et \vec{AC} , on utilise l'opération vectorielle

$$\vec{Bissect} = \frac{\vec{AB}}{\|\vec{AB}\|} + \frac{\frac{\vec{AC}}{\|\vec{AC}\|} - \frac{\vec{AB}}{\|\vec{AB}\|}}{2} . \quad (2.16)$$

L'alignement est réalisé en calculant l'angle θ entre la section à aligner et la bissectrice calculée en utilisant l'équation 2.16. Basée sur cet angle une rotation de la section est effectuée en utilisant la matrice de rotation

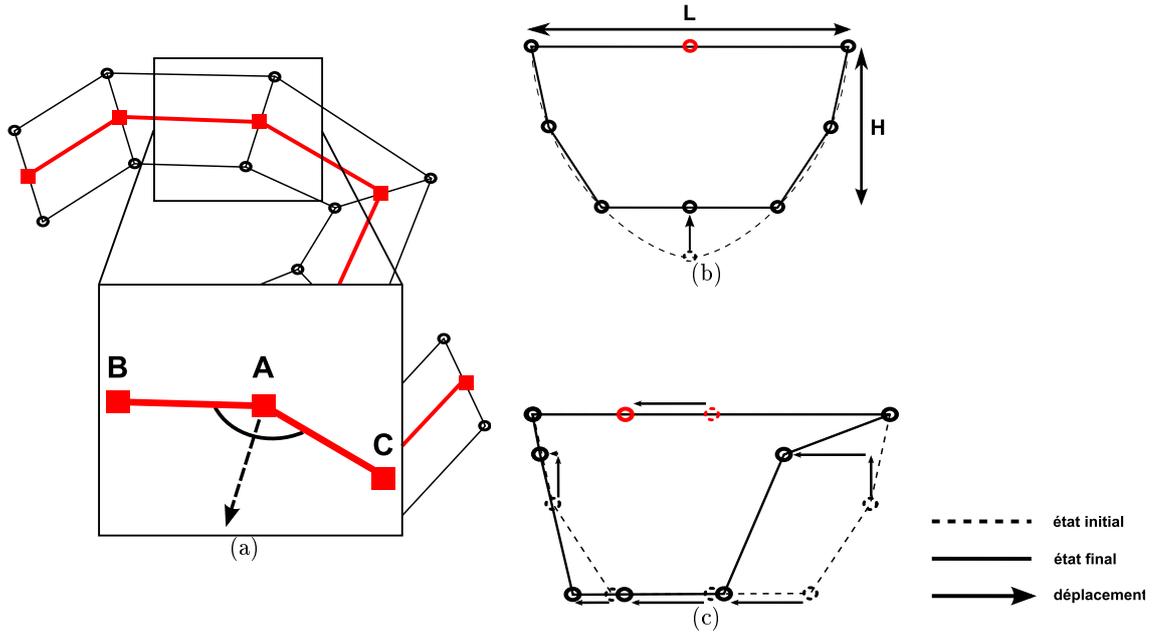


FIGURE 2.8 – ÉTAPES DE CONSTRUCTION DES SECTIONS DE CHENAUX. (a) Les sections sont construites pour chaque nœud de l'axe (en rouge) et sont alignées sur la bissectrice formée par les deux segments consécutifs qui portent ce nœud. (b) Les points des sections sont placés suivant une fonction quadratique. (c) Les points des sections sont modifiés pour obtenir l'asymétrie choisie par l'utilisateur.

$$R = \begin{pmatrix} \cos \theta + u_x^2(1 - \cos \theta) & u_x u_y(1 - \cos \theta) - u_z \sin \theta & u_x u_z(1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta \\ u_y u_x(1 - \cos \theta) - u_z \sin \theta & \cos \theta + u_y^2(1 - \cos \theta) & u_y u_z(1 - \cos \theta) - u_x \sin \theta \\ u_x z_x(1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta & u_z u_y(1 - \cos \theta) - u_x \sin \theta & \cos \theta + u_z^2(1 - \cos \theta) \end{pmatrix} \quad (2.17)$$

Avec le vecteur $\vec{u} = (u_x, u_y, u_z)$ l'axe de rotation est tel que $\vec{u} = \frac{\vec{AB} \times \vec{AC}}{\|\vec{AB} \times \vec{AC}\|}$. Dans le cas particulier où les deux segments sont alignés la section est directement placée orthogonalement aux deux segments.

Le calcul de la position d'asymétrie des chenaux repose également sur le calcul de la bissectrice des angles formés par deux segments consécutifs de l'axe du chenal. Le sens de la bissectrice donne la position de l'intérieur du méandre. Pour deux segments consécutifs \vec{AB} et \vec{AC} , un pondérateur du ratio d'asymétrie est calculé par

$$W = \sqrt[n]{(1 - \cos^{-1}(\vec{AB} \cdot \vec{AC})/Pi)}, \quad (2.18)$$

La racine permet de contrôler la variation d'asymétrie en fonction des variations d'angles, par expérience n est mis à la valeur 3. Les pondérateurs pour chaque section sont normalisés par le pondérateur maximal. Les points sont déplacés suivant la direction de la bissectrice et vers l'extérieur de la courbure du méandre.

La surface NURBS résultant de l'interpolation des points de contrôle est présentée sur la Figure 2.9 et montre en particulier l'impact de la courbure sur la position et l'intensité de l'asymétrie des chenaux (Figure 2.9(b) et (c)).

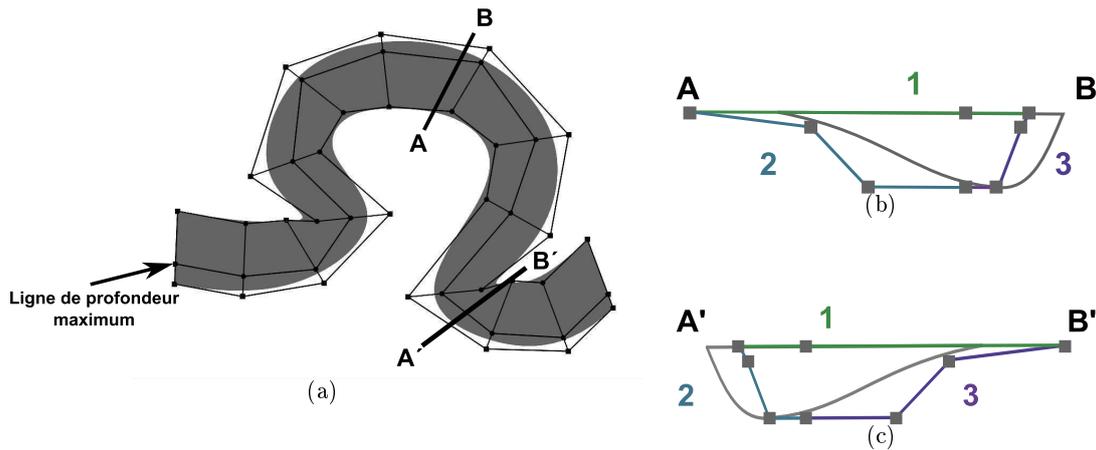


FIGURE 2.9 – MODÈLE D'UN CHENAL ASYMÉTRIQUE CONSTRUIT PAR DES SURFACES NURBS. (a) Vue du dessus du chenal, le maillage des points de contrôle est représenté par des lignes noires. (b) Vue en coupe du chenal avec une asymétrie correspondant à une courbure positive (une couleur différente est utilisée pour les points de contrôle de chaque surface). (c) Vue en coupe du chenal avec une asymétrie correspondant à une courbure négative.

2.3.1.3 Branchement de chenaux

Dans la plupart des environnements fluviaux (en tresses, méandrique, et anastomosé), plusieurs chenaux peuvent être connectés. Les connexions entre chenaux peuvent être formées par des phénomènes d'avulsion qui correspondent à l'abandon partiel ou total du lit d'une rivière. Ce phénomène est provoqué par la rupture des berges d'une rivière ayant lieu le plus souvent durant une période d'inondation.

La connexion entre ces différents chenaux doit être prise en compte pour éviter les incohérences telles que les croisements ou les espaces entre chenaux. Dans cette section nous traitons la cohérence géométrique entre les différents chenaux, des considérations sur l'intégration des processus liés aux avulsions sont présentées dans la [Section 3.2.6](#). La connexion entre deux chenaux peut être assurée en projetant les points de l'extrémité à connecter sur le chenal majeur. La première étape consiste à placer l'extrémité du chenal à brancher au niveau d'une section du chenal principal ([Figure 2.10\(a\)](#)). La seconde étape est de connecter le chenal en projetant les points de contrôle de l'extrémité à brancher sur le chenal principal. Pour ce faire, un point de contrôle est projeté dans l'espace paramétrique du chenal majeur en utilisant la méthode décrite par [Piegl et Tiller \[1995\]](#) et résumée dans la [section 2.2.6.1](#). Le résultat de l'opération de branchement de chenaux est présenté sur la [Figure 2.10\(c\)](#) avec le maillage de contrôle et sur la [Figure 2.10\(d\)](#) sans le maillage.

Le processus de branchement peut être utilisé pour connecter aussi bien une ou deux extrémités d'un chenal simultanément. Cette approche est utilisée dans le cadre de l'interprétation manuelle tridimensionnelle de chenaux deltaïques (en prenant une valeur d'épaisseur des chenaux arbitraire), à partir d'une image satellite du delta de l'Atchafalaya en Louisiane ([Figure 2.11](#)).

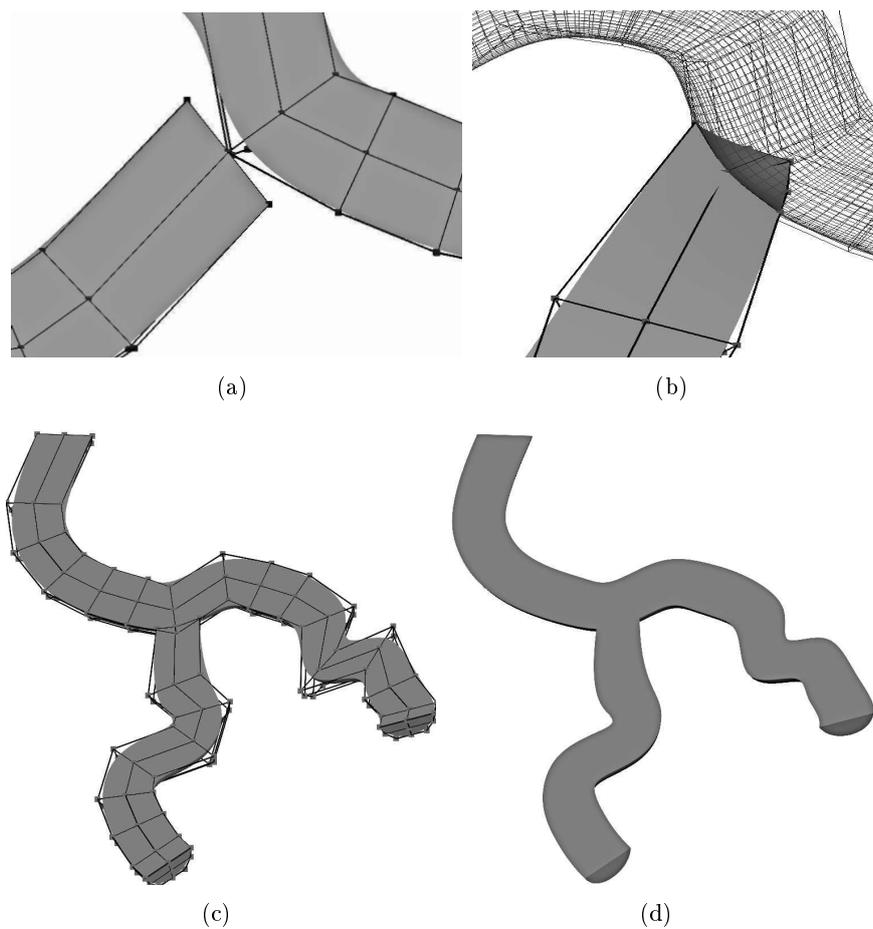


FIGURE 2.10 – PROCESSUS DE BRANCHEMENT DE DEUX CHENAUX. (a) L'extrémité du canal à brancher est alignée par rapport au canal majeur. (b) L'extrémité est branchée sur le canal majeur. (c) Résultat avec les points de contrôle. (d) Résultat avec les chenaux uniquement.

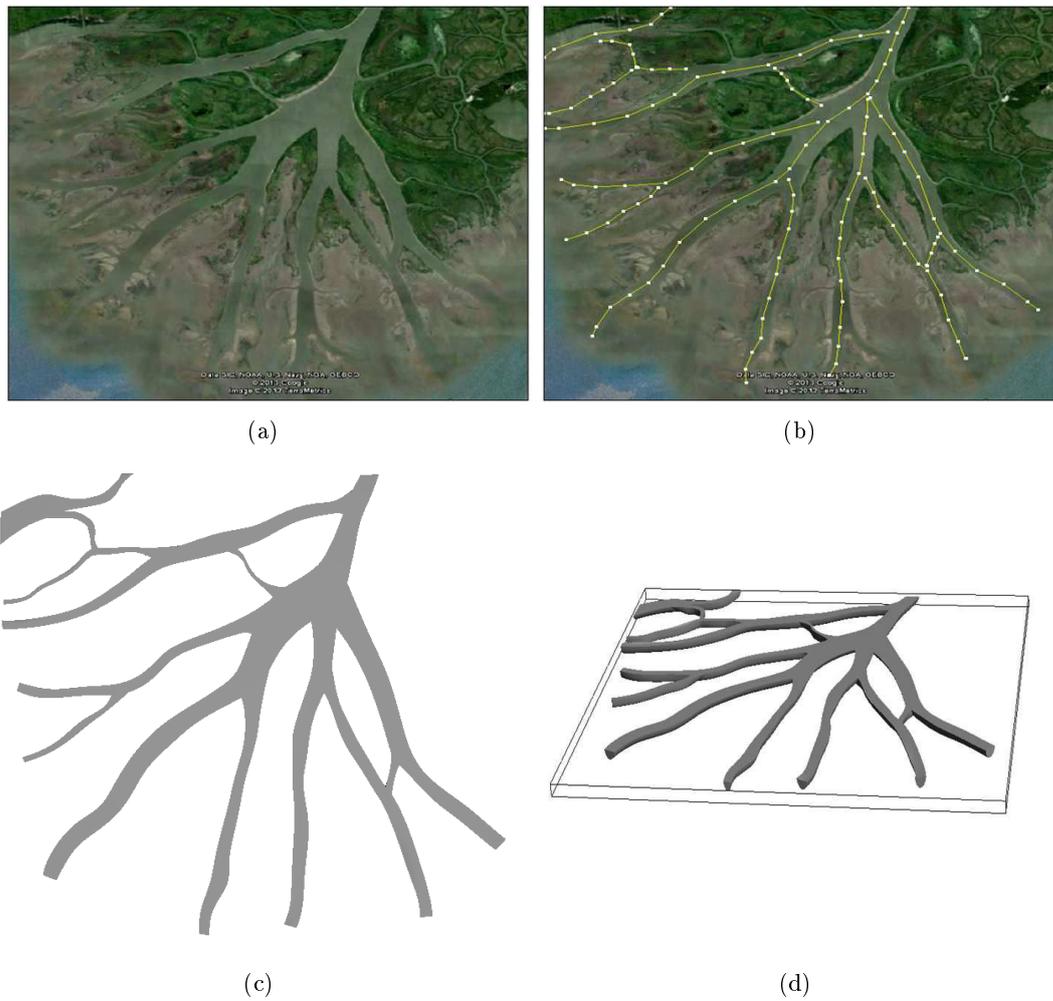


FIGURE 2.11 – APPLICATION DU PROCESSUS DE BRANCHEMENT DE CHENAUX ET DE MANIPULATION INTERACTIVE DES OBJETS : INTERPRÉTATION TRIDIMENSIONNELLE D'IMAGE SATELLITE (AVEC UNE VALEUR D'ÉPAISSEUR DES CHENAUX ARBITRAIRE) [GOOGLE EARTH, OCTOBER, 29 2012]. (a) Image originale. (b) Points de l'axe des chenaux (1 ligne par chenal). (c) Résultat en vue du dessus. (d) Résultat en vue latérale.

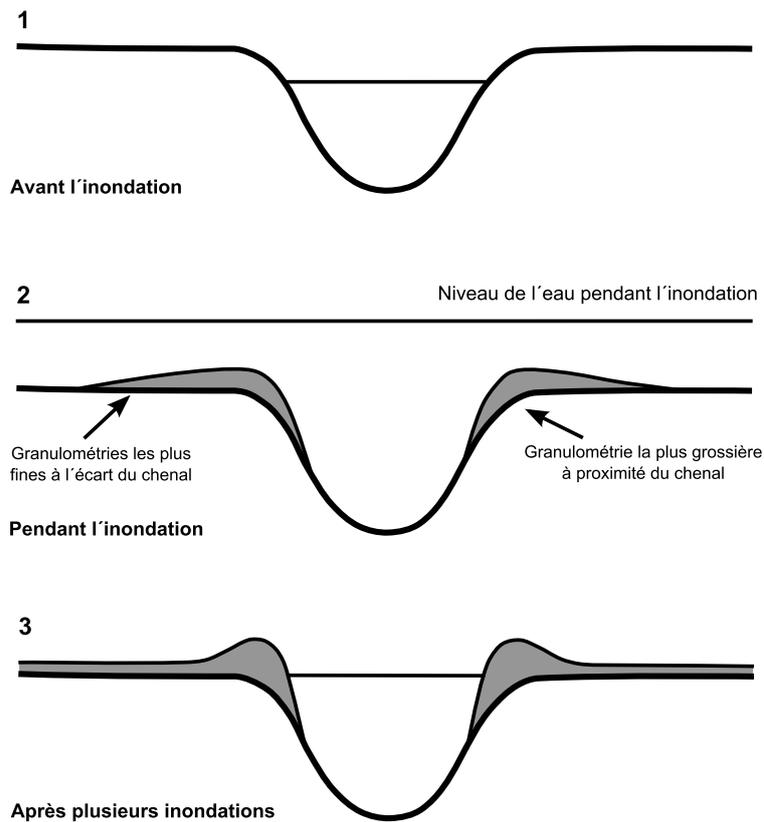


FIGURE 2.12 – FORMATION DES LEVÉES PAR DES INONDATIONS SUCCESSIVES D'APRÈS MOUNT [1995].

2.3.2 Levées

2.3.2.1 Caractéristiques sédimentaires

Les levées sont formées lors d'inondations des rivières lorsque le niveau de l'eau est au-dessus des berges du chenal [Mount, 1995]. Elles résultent du dépôt de fortes proportions de sables fins, de silts et d'argiles, organisés en succession de lentilles parallèles aux bords du chenal. Les sédiments les plus grossiers sont déposés à proximité du chenal et la granulométrie décroît en s'éloignant des bords du chenal. À proximité du chenal, la géométrie des levées consiste en un étroit talus qui peut atteindre une dizaine de mètres de hauteur [Miall, 1996, Reineck et Singh, 1980]. En s'éloignant du chenal les dépôts s'amincissent [Miall, 1996]. Les levées se développent de préférence dans la partie convexe des chenaux (extérieur de la courbure du méandre). Les surfaces limitantes sont du 4^{ème} ordre dans la classification de Miall [1996] comme résumé dans la Table 1.1 [Miall, 1996].

2.3.2.2 Construction

Les levées sont construites en utilisant quatre surfaces NURBS connectées. Deux surfaces latérales sont utilisées pour construire les pentes du talus de la levée (Figure 2.13(a)). Les points de contrôle sont placés suivant une fonction quadratique de la même façon que pour les chenaux (Section 2.3.1.2). Un paramètre d'asymétrie est utilisé pour reproduire l'asymétrie des levées avec une forte pente du talus à proximité

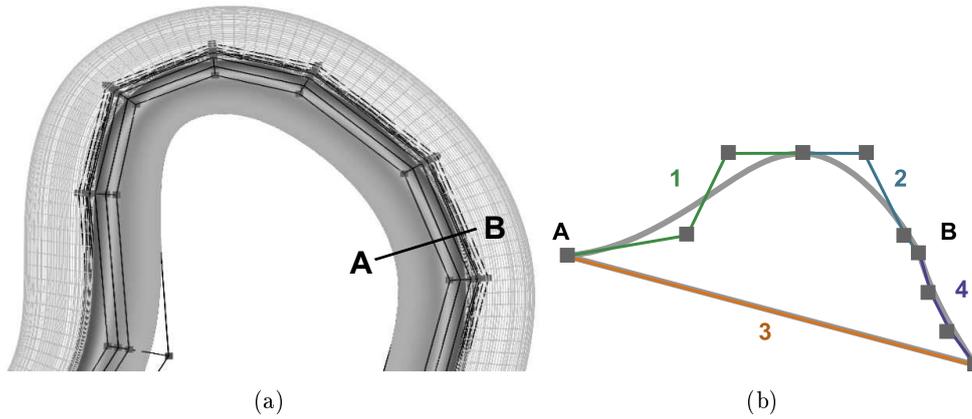


FIGURE 2.13 – MODÈLE D'UNE LEVÉE CONSTRUITE EN UTILISANT QUATRE SURFACES NURBS. (a) Vue du dessus d'une levée avec son chenal associé (affiché en fil de fer). (b) Vue en section de la levée.

du chenal et qui diminue en s'éloignant du chenal (cf les surfaces 1 et 2 sur [Figure 2.13\(b\)](#)). La troisième surface représente la base de la levée, cette surface est construite plane. Étant donné qu'une levée est construite à partir d'un chenal, la dernière surface est utilisée pour assurer la cohérence en profondeur entre la levée et le chenal (surface 3 sur [Figure 2.13\(b\)](#)).

À partir d'une surface latérale d'un chenal donné, les paramètres suivants permettent de définir la forme d'une levée :

- (i) La largeur
- (ii) L'épaisseur
- (iii) Le ratio d'asymétrie (formulé comme un ratio de la largeur, p. ex. si la valeur est 0.5 la levée est symétrique)

Une amélioration intéressante à apporter à la construction des levées serait de prendre en compte la courbure du chenal pour déterminer la position des levées. En effet, dans l'approche actuelle la levée est construite tout le long du chenal correspondant mais, comme mentionné dans la [Section 2.3.2.1](#), les levées ont tendance à se déposer dans la partie externe du chenal.

2.3.2.3 Cohérence chenal-levée

La cohérence en profondeur entre le chenal et sa levée est assurée en extrayant une portion de la surface du chenal qui représente la surface de contact entre le chenal et la levée ([Figure 2.14](#)). Cette portion de chenal est isolée en utilisant la propriété des nœuds de la NURBS qui veut que l'augmentation de la multiplicité d'un nœud entraîne la diminution de la continuité de la NURBS. Un nœud est donc inséré $q + 1$ fois, avec q le degré de la NURBS dans la direction v , sur une copie de la surface latérale appropriée du chenal en utilisant le processus de raffinement de la NURBS décrit dans la [Section 2.2.5](#) [[Piegl et Tiller, 1995](#)] ([Figure 2.14\(a\)](#)). L'opération d'ajout de nœud permet de créer une discontinuité dans une copie de la surface latérale du chenal en maintenant sa géométrie et donc d'extraire une portion de la surface ([Figure 2.14\(b\)](#)). Le résultat de l'association entre un chenal et ses levées est présenté sur la [Figure 2.15](#).

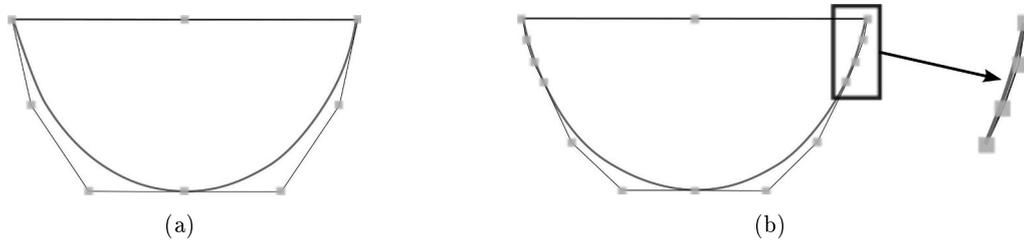


FIGURE 2.14 – EXTRACTION D’UNE PORTION DE SURFACE PARAMÉTRIQUE. (a) État initial (b) Un nœud est ajouté aux coordonnées paramétriques déterminées en maintenant la forme de la surface. Ajouter des nœuds est équivalent à ajouter des points de contrôle. Les nœuds sont ajoutés pour découper la surface.

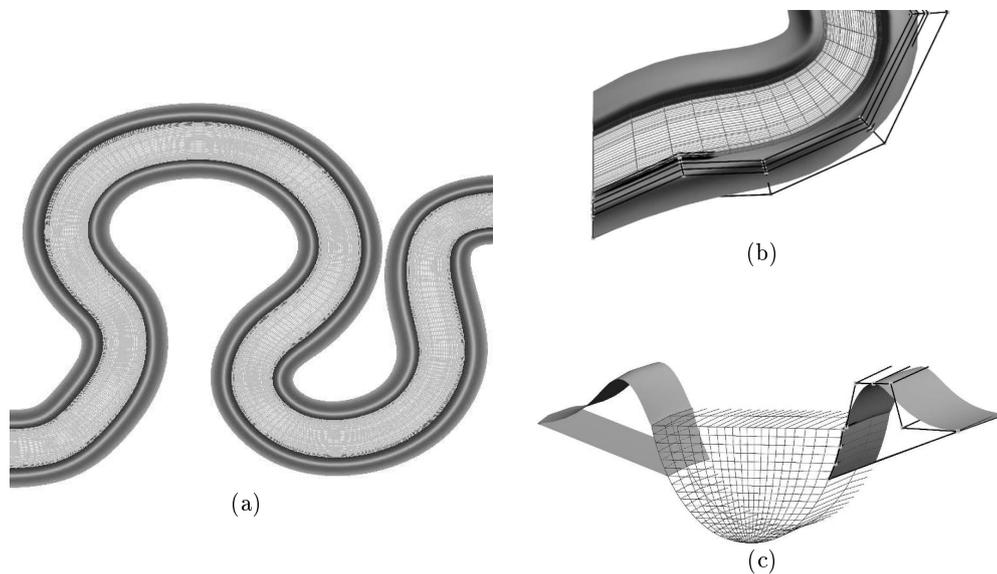


FIGURE 2.15 – LEVÉES CONSTRUITES EN ASSOCIATION AVEC UN CHENAL. (a) Vue du dessus des levées associées avec un chenal. (b) Zoom sur la vue du dessus (le chenal est affiché en fil de fer). (c) Section latérale du chenal avec ses levées montrant la cohérence des objets en profondeur.

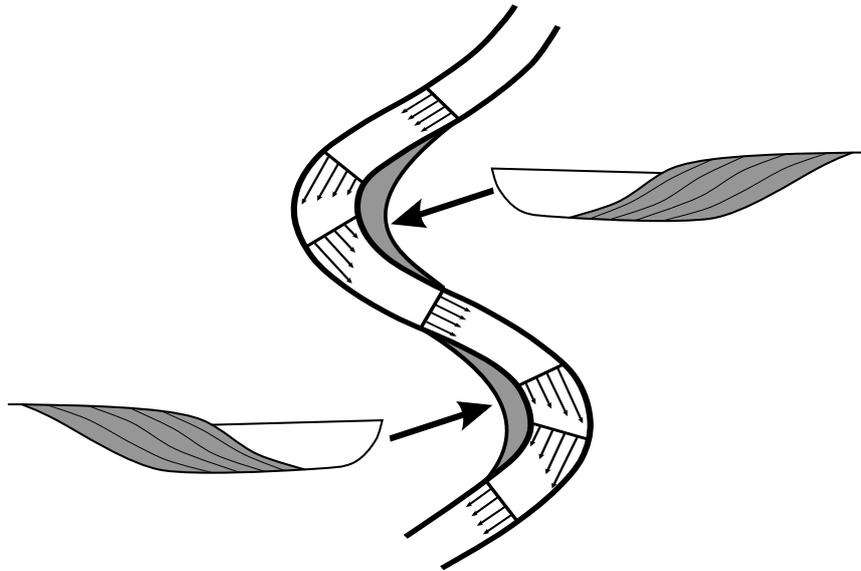


FIGURE 2.16 – SCHÉMA DES MOTIFS DE VITESSE D'ÉCOULEMENT DANS UN CHENAL MÉANDRIFORME. Les écoulements fluides sont liés à la migration latérale des chenaux due à l'érosion de la partie externe des méandres (forte vitesse d'écoulement) et le dépôt de sédiments sur la partie interne (faible vitesse d'écoulement)

2.3.3 Figures d'accrétion latérale

2.3.3.1 Caractéristiques sédimentaires

Les dépôts d'accrétion latérale (barre d'accrétion latérale) sont abondants dans les rivières méandriques. Ils sont formés lors de la migration latérale causée par les courants d'eau. L'érosion de la partie externe des méandres par ces courants fait migrer le chenal et les sédiments se déposent dans la partie interne des méandres où le régime hydraulique est plus faible [Reineck et Singh, 1980] (Figure 2.16). Ce type de dépôts est constitué par une succession de cliniformes qui sont des macroformes délimitées par des surfaces sigmoïdales de troisième ordre dans la classification de Miall [1996] appelés *epsilon cross-bedding* [Allen, 1963]. Ils représentent des unités sédimentaires déposées de façon incrémentale lors de la croissance latérale du chenal en particulier durant les périodes de crues. Ces structures présentent habituellement une épaisseur équivalente à la profondeur des chenaux dans lesquels elles se déposent.

2.3.3.2 Construction

Les dépôts d'accrétion latérale dans les chenaux sont modélisés par une succession de cliniformes individuels construits en utilisant six surfaces NURBS. Deux surfaces sont utilisées pour les bordures inclinées (*foreset beds*) supérieure et inférieure, leurs points de contrôle sont placés de la même façon que les points des surfaces latérales des chenaux en suivant une fonction quadratique (Section 2.3.1.2). Les quatre autres surfaces sont utilisées pour assurer la connexion des deux surfaces inclinées avec en particulier une surface pour le dessus (*topset beds*) une pour la base (*bottomset beds*), et les deux dernières surfaces sont utilisées pour la fermeture latérale du modèle et ainsi obtenir une représentation par frontières fermées (Figure 2.17).

En utilisant cette représentation, les paramètres suivants sont utilisés pour définir

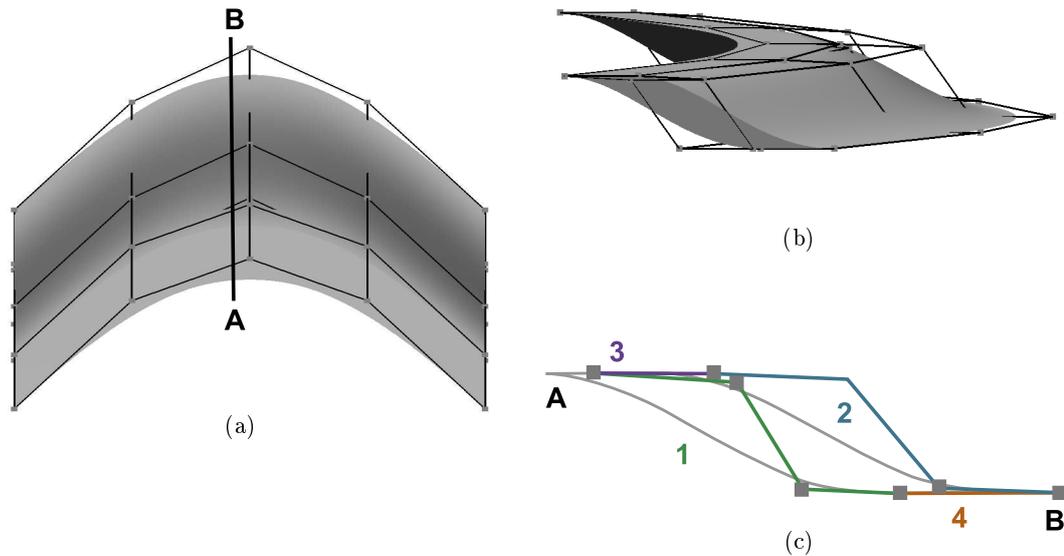


FIGURE 2.17 – MODÈLE DE CLINIFORME CONSTRUIT EN UTILISANT 6 SURFACES NURBS. (a) Vue du dessus d'un cliniforme. (b) Vue latérale d'un cliniforme. (c) Vue en section d'un cliniforme.

la forme du cliniforme :

- (i) la longueur ;
- (ii) la largeur ;
- (iii) la hauteur ;
- (iv) l'épaisseur correspondant à la distance entre les deux surfaces inclinées ;
- (v) l'amplitude du chenal qui a formé le cliniforme.

2.3.4 Lobes

2.3.4.1 Caractéristiques sédimentaires

Les objets lobes peuvent être présents dans les environnements sédimentaires à plusieurs échelles, pouvant aller de quelques mètres dans le cas des lobes de débordement en contexte fluviatile à plusieurs kilomètres pour les lobes deltaïques et turbiditiques [Miall, 1996, Bhattacharya, 2010, Arnott, 2010]. Leur géométrie caractéristique est une large forme lenticulaire qui s'amincit en s'éloignant du chenal distributaire. Dans la classification de Miall les surfaces limitantes des lobes de débordement sont du troisième ordre et celles des lobes deltaïques sont du cinquième ordre (Table 1.1).

2.3.4.2 Construction

La géométrie des lobes est construite en utilisant trois surfaces NURBS connectées (Figure 2.18). La première surface est utilisée pour représenter le toit du lobe. Les points de contrôle de cette surface sont disposés selon une fonction quadratique semblable à celle utilisée pour construire les chenaux (Section 2.3.1.2). La seconde surface représente la base du lobe et est construite par défaut plane. La troisième

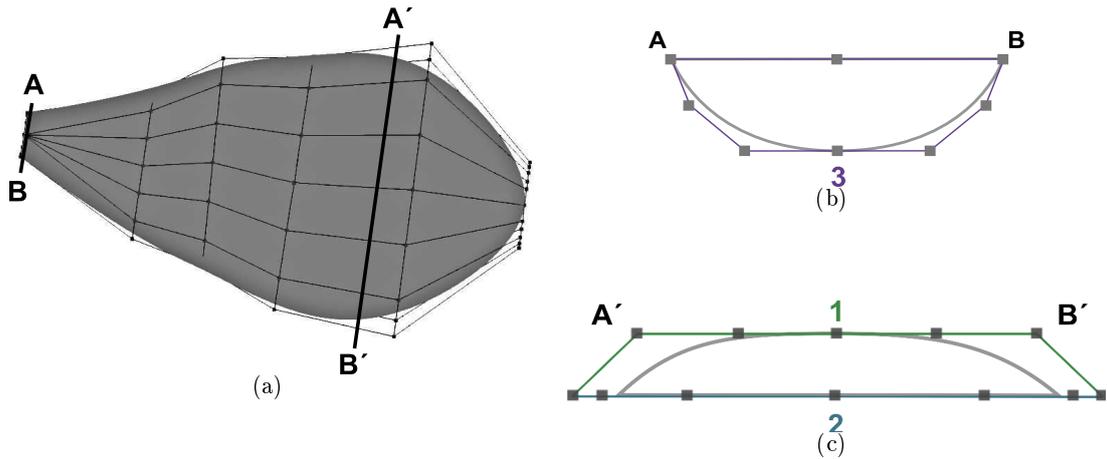


FIGURE 2.18 – MODÈLE DE LOBE CONSTRUIT EN UTILISANT 3 SURFACES DE NURBS. (a) Vue du dessus du lobe. (b) Section en forme de chenal permettant d'assurer la cohérence du lobe avec le chenal associé (c) Section à forme lenticulaire.

surface permet de connecter un lobe à un chenal et est donc construite avec la même forme qu'une section de chenal.

En utilisant cette représentation, les paramètres suivants sont utilisés pour définir la forme du lobe :

- (i) L'axe médian du lobe
- (ii) La largeur
- (iii) L'épaisseur.

Les lobes peuvent être connectés aux chenaux de deux manières, dans le cas des lobes de débordement la connexion se fait de la même manière que le branchement entre deux chenaux. Pour les lobes branchés à l'extrémité des chenaux les points de contrôle de la face extrême du chenal et du lobe sont colocalisés (Figure 2.19).

2.4 Construction de grilles et modélisation de faciès

Les modèles de structures sédimentaires, décrits dans la Section 2.3, sont utilisés pour construire des grilles conformes aux géométries des différents objets. Ces grilles sont utilisées comme support pour la modélisation de propriétés pétrophysiques.

2.4.1 Construction des grilles

De la même façon que les surfaces de NURBS sont construites en opérant le produit tensoriel de deux courbes NURBS, la formulation mathématique d'un volume NURBS est établi en utilisant le produit tensoriel de trois courbes NURBS de degrés p , q et r , qui sont définies pour les coordonnées paramétriques (u, v, w) :

$$S(u, v, w) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) W_{i,j,k} P_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) W_{i,j,k}} \quad (2.19)$$

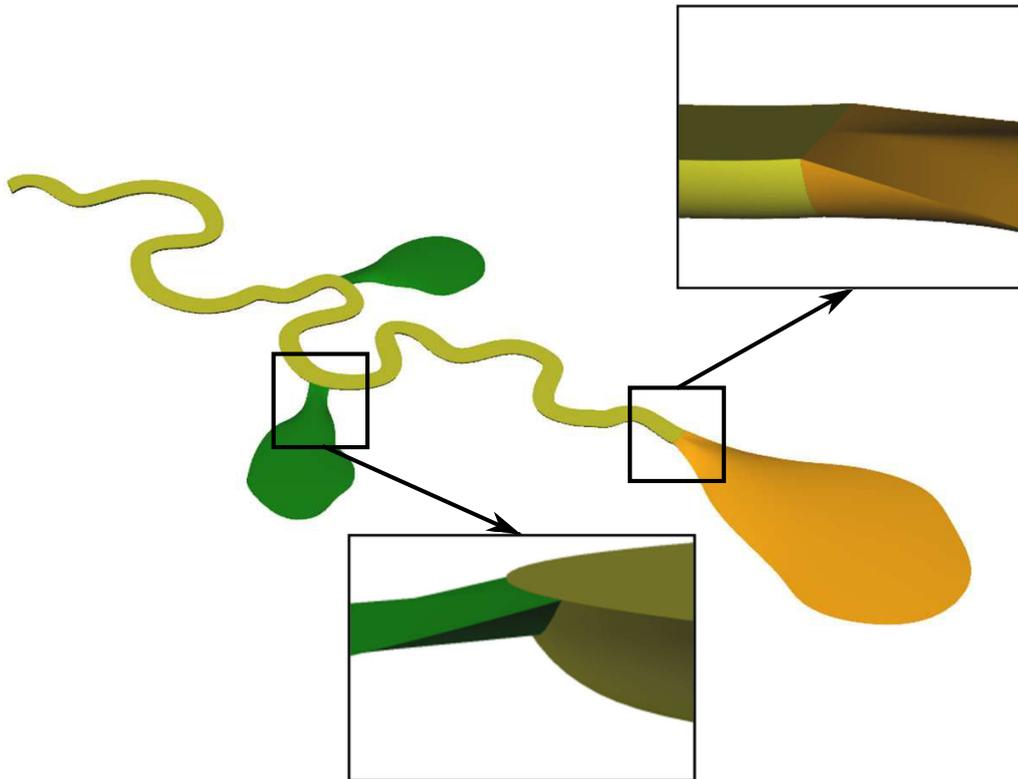


FIGURE 2.19 – CONNEXIONS ENTRE DES LOBES ET UN CHENAL. Les lobes sont ici de deux types, deltaïques et de débordement

Avec $P_{i,j,k}$ les points de contrôle et $[n] \times [m] \times [l]$ le nombre de ces points de contrôle. $W_{i,j,k}$ est le poids de chaque point de contrôle sur l'interpolation de la surface NURBS. $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$, $N_{k,r}(w)$ sont les fonctions de base de $p^{\text{ème}}$ -degré, $q^{\text{ème}}$ -degré et $r^{\text{ème}}$ -degré.

La formulation tridimensionnelle des NURBS est appliquée aux quatre types d'objets précédemment décrits (chenal, levée, lobe et clinoforme) (Section 2.3). Les fonctions paramétriques de chaque objet sont évaluées régulièrement dans l'espace paramétrique pour déterminer les coordonnées des coins des cellules d'une grille hexaédrique. Dans le cas où les grilles sont construites à partir d'un espace paramétrique complet, elles sont intrinsèquement conformes aux surfaces limitantes des représentations par frontières des objets sédimentaires (Figure 2.20). Au contraire si elles ne sont construites qu'à partir d'une partition de l'espace paramétrique une opération de modification de la grille est nécessaire pour assurer la conformité aux limites des structures sédimentaires (Figure 2.22(c)).

2.4.2 Géométrie de remplissage des chenaux

Reineck et Singh [1973] d'après McKee [1957] définissent trois types de remplissages sédimentaires pour les chenaux :

- (i) Des couches assymétriques inclinées (progradantes). Ces dépôts sont communs dans les dépôts influencés par la marée (Figure 2.21(a)).
- (ii) Des couches concaves conformes à la forme du chenal (divergentes). Ce type

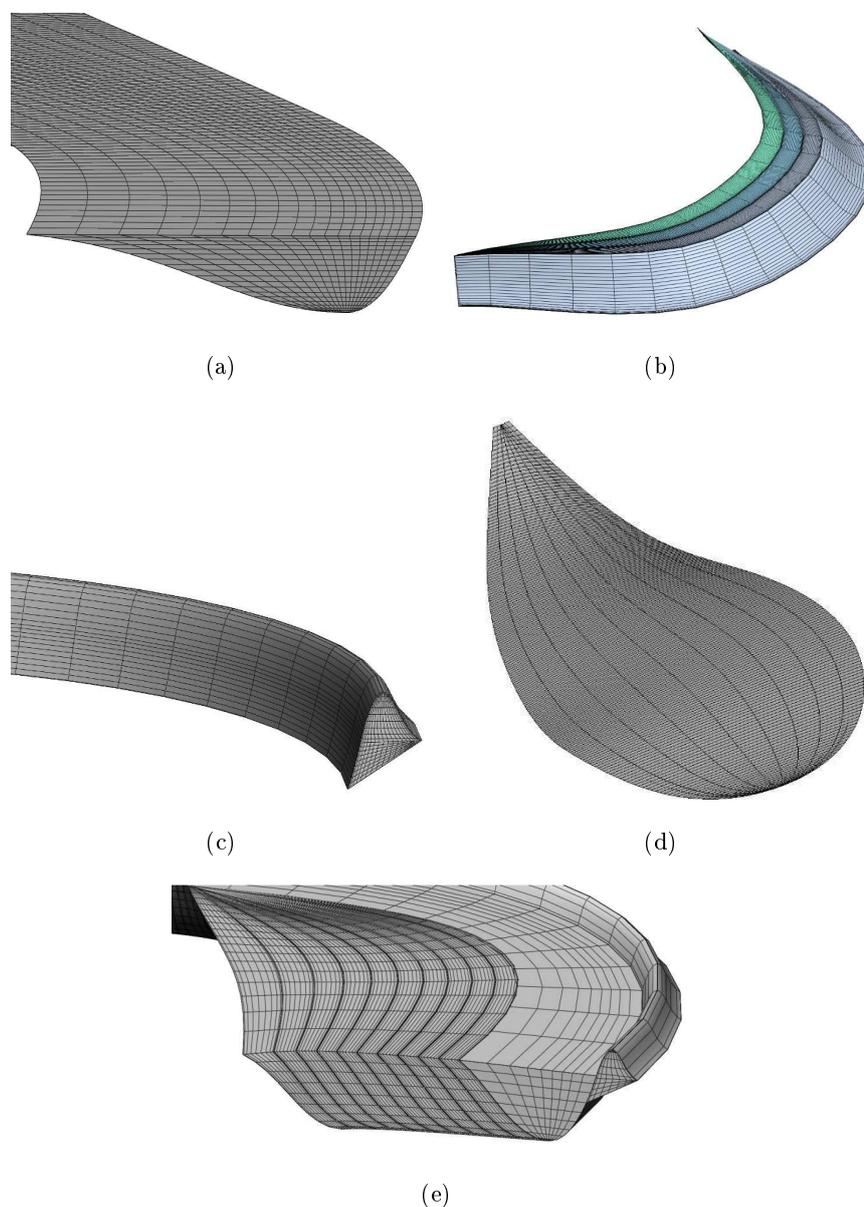


FIGURE 2.20 – GRILLES HEXAÉDRIQUES CONSTRUITES À PARTIR DE REPRÉSENTATIONS PAR FRONTIÈRES DES DIFFÉRENTS OBJETS SÉDIMENTAIRES. (a) Grille construite à partir d'un chenal. (b) Grille construite à partir de cliniformes. (c) Grille construite à partir d'une levée. (d) Grille construite à partir d'un lobe. (e) Exemple de relations entre ces différentes grilles.

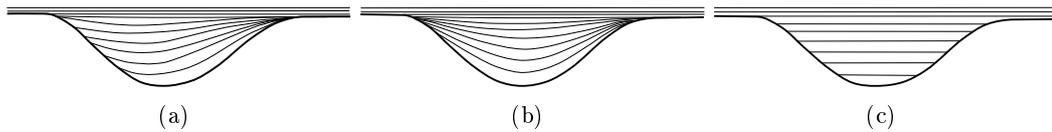


FIGURE 2.21 – TROIS TYPES DE REMPLISSAGE DE CHENAUX (D’APRÈS REINECK ET SINGH [1973] BASÉ SUR MCKEE [1957]). (a) Chenal progradant, les couches sont inclinées. (b) Chenal divergent les couches sont conformes à la forme du chenal. (c) Chenal aggradant, les couches sont horizontales.

de remplissage est habituellement rencontré dans le cas de chenaux submergés tel que les chenaux turbiditiques (Figure 2.21(b)).

- (iii) Des couches horizontales (aggradantes), ce remplissage est commun dans les sédiments préservés des chenaux fluviaux (Figure 2.21(c)).

Lors de la construction des grilles, différentes géométries internes peuvent être obtenues soit en modifiant la façon dont les points de contrôle des surfaces limitantes des objets sédimentaires sont considérés pour construire le maillage de contrôle tridimensionnel soit en modifiant la méthode d’évaluation de la NURBS avec un maillage de contrôle donné. Par exemple, la construction des grilles progradantes dans la Figure 2.22(a) est basée sur les maillages de contrôle des deux surfaces latérales du chenal (Figure 2.9). Les grilles divergentes présentées dans la (Figure 2.22(b)) sont construites en utilisant la surface du toit du chenal et les deux surfaces latérales réunies en une seule surface globale représentant la base du chenal. Les grilles aggradantes Figure 2.22(c) sont extrudées proportionnellement à la surface du toit du chenal. Dans ce dernier cas, seulement une partition de l’espace paramétrique est utilisée étant donné que le nombre de cellules est différent pour chaque couche de la grille. Les cellules totalement à l’extérieur du chenal sont considérées comme mortes. Dans le cas des cellules intersectées par les surfaces limitantes, les faces des cellules à l’extérieur du chenal sont projetées horizontalement sur la surface dont on cherche à reproduire la forme.

La grille progradante proposée est sensiblement différente du modèle théorique de Reineck et Singh [1973]. Un autre type de NURBS volumique est proposé pour approcher d’avantage la forme théorique. Le maillage de contrôle utilisé pour une section du volume est construit à partir de celui de la surface supérieure du chenal et de la surface latérale qui se trouve dans la partie interne de la courbure du méandre. Une interpolation est réalisée entre ces deux surfaces de telle façon que les points à l’extrémité de ces lignes sont issus de la surface latérale du chenal à l’extérieur du méandre (Figure 2.23(a)). Le résultat de la construction de la grille progradante est présenté dans (Figure 2.23(b)). Dans l’état actuel de la construction de la grille le changement de l’asymétrie de la grille en fonction de la courbure n’est pas fonctionnel et nécessite davantage de développement.

2.4.3 Application à la modélisation de faciès dans les chenaux turbidiques

Les chenaux turbiditiques sont usuellement remplis par des sédiments sableux intercalés par des drapages d’argiles. Ces drapages d’argiles dans les chenaux turbidi-

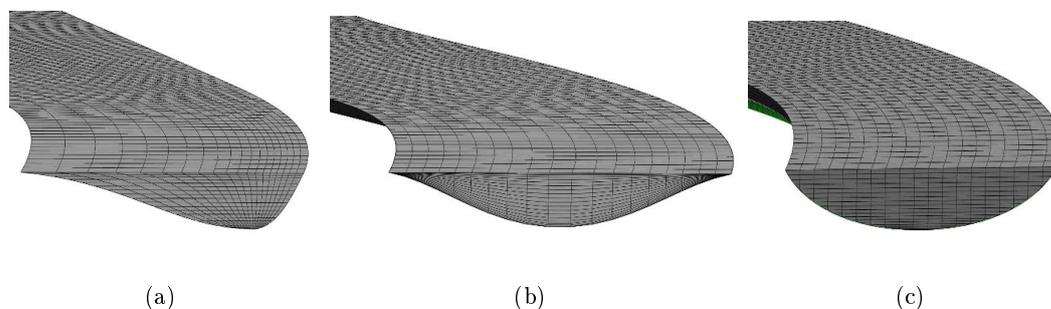


FIGURE 2.22 – GRILLES HEXAÉDRIQUES CONSTRUITES À PARTIR DES REPRÉSENTATIONS PAR FRONTIÈRES DES CHENAUX AVEC DIFFÉRENTS TYPES DE REMPLISSAGES REINECK ET SINGH [1973]. (a) Chenal progradant. (b) Chenal divergent. (c) Chenal aggradant.

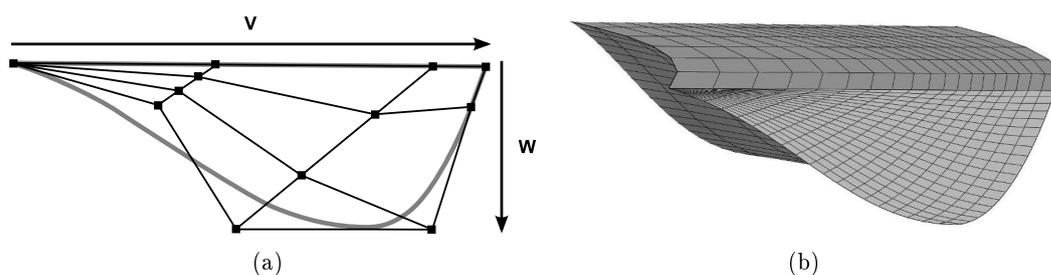


FIGURE 2.23 – MODIFICATION DE LA GRILLE PROGRADANTE AFIN DE MIEUX REPRODUIRE LE MODÈLE THÉORIQUE DE REINECK ET SINGH [1973]. (a) Maillage de contrôle d'une section de la NURBS 3D correspondant au chenal progradant. (b) Grille progradante issue de la NURBS 3D.

tiques peuvent être divisés en trois types distincts [Alpak *et al.*, 2010, Barton *et al.*, 2010] (Figure 2.24(a)) :

- Les drapages d’abandon sont déposés lorsque le chenal est abandonné après l’incision initiale puis par la suite réoccupé. Ils consistent en des dépôts argileux hémipélagiques déposés par la précipitation de sédiments en suspension (Figure 2.24(a)).
- Les drapages de marge sont développés lorsque le chenal se remplit progressivement. Les sédiments grossiers se déposent dans la partie médiane du chenal où la densité de l’écoulement est élevée. Les drapages d’argiles se développent quant à eux sur les marges du chenal où le flux est faible (Figure 2.24(b)).
- Les drapages de by-pass sont déposés avant la phase principale de remplissage lorsque des sédiments argileux passent le long du chenal. Ils sont généralement intercalés avec des conglomérats sableux et argileux qui sont remaniés lors du dépôt des drapages (Figure 2.24(c)).

Les dépôts dans les chenaux turbiditiques sont en général une combinaison de ces trois schémas de dépôt [Barton *et al.*, 2010].

Les trois types de remplissage sont aisément modélisés en se basant sur les couches des grilles et la définition de tendances par rapport aux coordonnées dans la grille (Figure 2.24(b)). Pour les drapages d’abandon les couches de cellules inférieures de la grille sont remplies par le faciès argile et les couches supérieures par le faciès de sable. Les drapages de marge sont modélisé par une simulation avec tendance qui correspond à la probabilité du faciès argile ; en particulier cette probabilité est de cent pour cent pour les cellules de la grilles au niveau des marges du chenal qui décroît linéairement vers zéro au milieu du chenal. Finalement les drapages de by-pass sont simulées uniquement dans la partie centrale du chenal.

2.5 Utilisation en milieux déformés

Les modèles d’objets sédimentaires présentés dans ce chapitre sont modélisés en adéquation avec la description des structures dans leur espace de dépôt. Dans le cas général les corps sédimentaires sont déformés ou tronqués par les déformations structurales telles que les plissements, les failles et l’érosion.

2.5.1 Milieux plissés

Les déformations continues comme les plissements sont prises en compte dans la modélisation des objets sédimentaires en construisant une grille stratigraphique qui est une grille hexaédrique déformée de façon à être conforme aux horizons. Cette grille permet de définir un espace UVW normalisé et à plat [Mallet, 2004, Moyen *et al.*, 2004]. Les objets sédimentaires sont donc simulés dans cet espace normalisé (Figure 2.25). La transformation des coordonnées des points de contrôle des objets sédimentaires de l’espace UVW vers l’espace cartésien XYZ permet ensuite d’obtenir la géométrie finale des chenaux résultant de la déformation.

2.5.2 Gestion des discontinuités

Comme il est mentionné dans la Section 2.2.7, même s’il est facile de découper des surfaces NURBS le long des coordonnées paramétriques en ajoutant des nœuds,

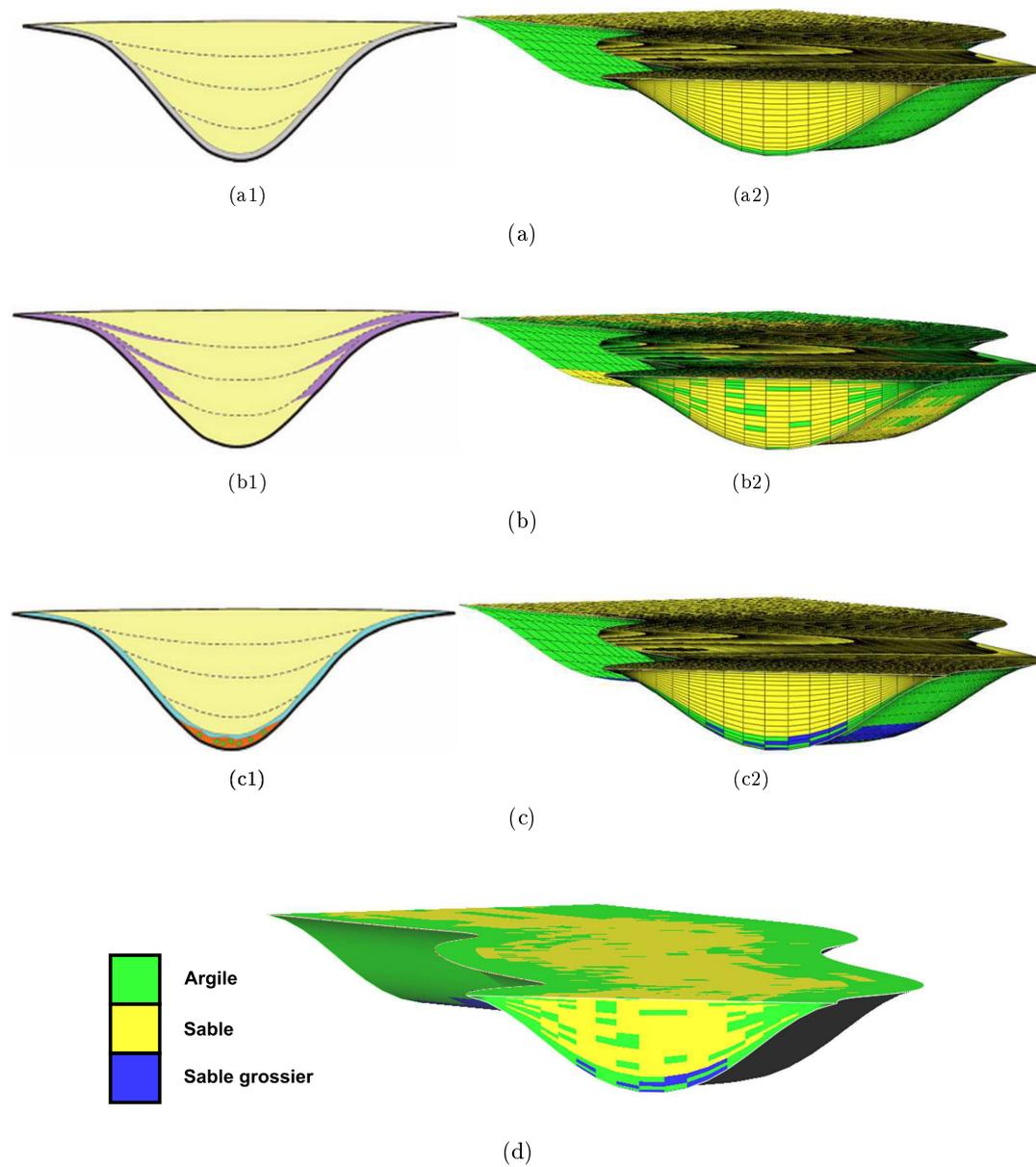


FIGURE 2.24 – MODÉLISATION DE FACIÈS TURBIDITIQUES À PARTIR DE MODÈLES THÉORIQUES DE REMPLISSAGES TURBIDITIQUES [BARTON *et al.*, 2010]. (a) Drapages d'abandonnement. (b) Drapages de marges. (c) Drapages de by-pass.

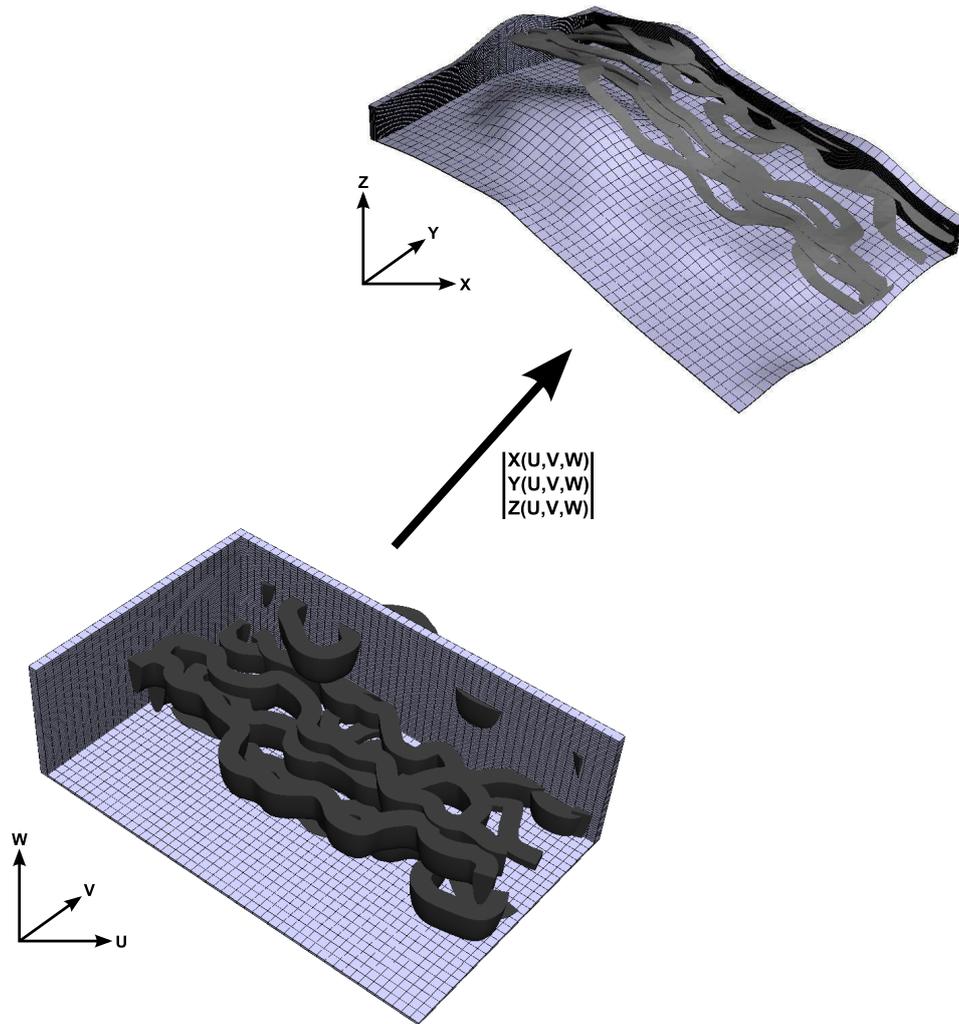


FIGURE 2.25 – MODÈLES DE CHENAUX PLISSÉS. Les chenaux sont modélisés à plat dans l'espace paramétrique d'une grille stratigraphique et la transformation des coordonnées UVW vers XYZ permet de restituer la géométrie déformée des chenaux.

il est complexe de reproduire des géométries de découpes complexes. Or ce genre de géométrie complexe peut être générée au niveau des failles où dans des zones érodées.

Érosion L'érosion est un processus de dégradation des sédiments par des phénomènes mécaniques ou chimiques mais qui n'induit pas de déplacement au niveau des structures sédimentaires. Dans l'état actuel des modèles d'objets sédimentaires les relations d'érosion entre les différentes structures sont gérées en convertissant dans un premier temps les surfaces NURBS en surfaces triangulées qui sont aisément découposables. Ce processus est appliqué sur un ensemble de chenaux plissés (Figure 2.26). Les surfaces limitantes des différents objets sont ensuite mutuellement coupées et la partie érodée est retirée et remplacée par la partie correspondante de la surface érosive (Figure 2.26(c)).

Cette approche permet de construire la géométrie des structures sédimentaires érodées mais la conversion des objets en surfaces triangulées limite la flexibilité des modèles. Une autre approche qui permettrait de modéliser l'érosion serait d'utiliser des NURBS tronquées (trimmed NURBS) [Piegl et Richard, 1995]. Cette formulation mathématique est utilisée en particulier pour la création de rendu des surfaces avec des trous et ne nécessite pas de raffinement de la NURBS. Les surfaces NURBS tronquées sont construites en définissant une courbe fermée dans l'espace paramétrique qui va délimiter les zones intérieures et extérieures sur la surface. Selon le choix de l'utilisateur seul l'une des deux est affichée en utilisant une tessellation particulière de la NURBS décrite par Piegl et Richard [1995]. La courbe de découpe étant décrite en termes de coordonnées paramétriques de la surface NURBS, la surface est déformée elle suit ces déformations.

Failles Les failles, tout comme l'érosion, induisent des discontinuités dans les modèles de structures sédimentaires mais elles entraînent également des déplacements. Les failles sont généralement définies par des surfaces dans l'espace cartésien. Les chenaux ne peuvent pas être découpés directement dans cet espace car le passage de l'espace à plat, par exemple l'espace UVW d'une grille, dans lequel les structures sédimentaires sont simulées, à l'espace cartésien entraîne des distorsions de la géométrie des modèles d'objets dues aux déplacements induits par les failles. Il est donc nécessaire de couper les structures sédimentaires par les failles dans le même espace sans déplacement. Une approche possible serait de se reposer sur la formulation Geochron qui permet de définir un pseudo espace de dépôt dans lequel le rejet des failles est annulé [Mallet, 2004, Moyen, 2005]. L'espace de dépôt est défini par un système de coordonnées chrono-stratigraphiques :

- U et V qui définissent les coordonnées paléo-géographiques représentant la position géographique au moment du dépôt.
- T qui définit la position d'un point dans la colonne stratigraphique.

Ce système de coordonnées peut être défini dans une grille tétraédrique conforme aux failles [Moyen *et al.*, 2004]. Ainsi, chaque sommet de tétraèdre est associé à une coordonnée chrono-stratigraphique ce qui permet de reconstruire aisément la géométrie de la faille dans l'espace UVT . Les modèles d'objets sédimentaires doivent ensuite être effectivement découpés par les failles pour assurer la conformité des objets sédimentaires avec les surfaces de failles lors du passage dans l'espace cartésien. Pour ce faire, il est possible d'ajouter des nœuds entre les intersections des surfaces NURBS

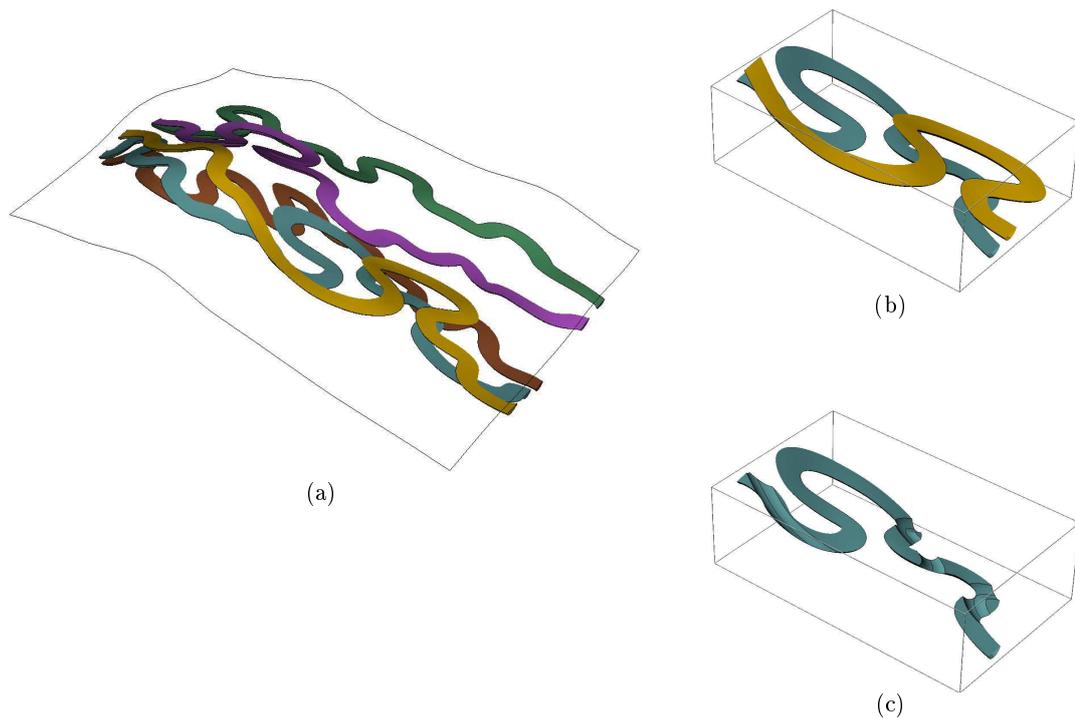


FIGURE 2.26 – MODÈLE PLISSÉ DE CHENAUX ÉROSIFS. (a) Chenaux déformés et érosifs. (b) Zoom sur deux chenaux, le jaune étant érosif sur le vert. (c) Chenal érodé dont la représentation par frontière est close par la surface de base du chenal érodant.

et les arêtes des faces des tétraèdres correspondantes à la faille. Dans le cas de géométries d'intersection complexes un grand nombre de nœuds doivent être ajoutés ce qui suggère une forte complexification de la NURBS. Une approche plus efficace serait l'utilisation des T-Splines, qui sont une extension des NURBS [Sederberg *et al.*, 2003, 2004], pour lesquelles une ligne de points de contrôle peut être terminée sans traverser l'intégralité de la surface et peut donc permettre de modéliser des discontinuités.

2.6 Conclusion

Ce chapitre introduit une méthode pour construire des modèles tridimensionnels par frontières d'objets sédimentaires et de les utiliser comme cadre pour réaliser des simulations de faciès. Les surfaces de NURBS permettent de réaliser des modèles par frontières avec une grande flexibilité et un nombre relativement limité de points de contrôle, pour lesquels les informations géométriques telles que la tangente et la courbure peuvent être déterminées en tout point de l'espace (en comparaison par exemple aux surfaces polygonales [Viseur, 2004] où la résolution de la surface doit être suffisamment élevée pour approximer la courbure de la surface). Les NURBS sont, de plus, bien adaptées pour modéliser des structures sédimentaires étant donné que le maillage de points de contrôle peut permettre de restituer des concepts de géométries d'objets géologiques avec un nombre limité de points en se basant sur une approximation et intuitive de la forme souhaitée. Les NURBS sont également très flexibles en terme de déformations. En particulier dans le cas d'une manipulation directe d'une

surface les déformations englobent plusieurs points de contrôle (propriété de support local ([Section 2.2.3.3](#))). Cela permet par exemple de maintenir la cohérence entre des sections d'un chenal au cours des déformations. Cette flexibilité de ces objets vis à vis des déformations peut être appliquée afin d'interpréter manuellement des structures sédimentaires à partir d'images géologiques avec un nombre relativement restreint de manipulations (p.ex. image satellite, imagerie de puits, image sismique). Finalement les NURBS en deux dimensions peuvent être étendue en trois dimensions. Elles permettent donc de construire des grilles intrinsèquement conformes aux surfaces limitantes et ainsi de modéliser les hétérogénéités internes des structures sédimentaires.

Ces objets sont compatibles avec des processus de déformation à plus grande échelle tels que les plissements. Dans l'état actuel du développement de la bibliothèque d'objets sédimentaires, la prise en compte des déformations discontinues est toutefois limitée. Une solution dans le cadre de l'érosion est de passer par la conversion des NURBS en surfaces triangulées qui sont plus facilement découpables. Une autre approche serait d'utiliser des NURBS tronquées (Trimmed NURBS) [[Piegl et Richard, 1995](#)]. En revanche dans le cadre des failles, il est nécessaire de pouvoir définir la géométrie de la discontinuité mais également le déplacement imposé aux objets et les NURBS tronquées sont dans ce cas peu adaptées. Une approche possible serait de définir les objets sédimentaires et les failles dans un pseudo espace de dépôt [[Moyen, 2005](#)] et de couper les objets convertis en surfaces triangulées ou T-Splines [[Sederberg *et al.*, 2004](#)] par les failles.

Chapitre 3

Simulation de systèmes chenalisants

Sommaire

3.1	Introduction	59
3.2	Génération stochastique de chenaux	60
3.2.1	Initialisation de l'axe	61
3.2.2	Croissance de la forme initiale	62
3.2.3	Méandres abandonnés	65
3.2.4	Raffinement de l'axe du chenal	67
3.2.5	Simulation de paramètres de forme	71
3.2.6	Considération sur différents types de chenaux fluviaux	71
3.2.7	Simulation de chenaux en tresses ou anastomosés	73
3.2.8	Prise en compte de l'avulsion	73
3.3	Génération de cliniformes à partir de la croissance des chenaux	74
3.4	Considérations sur le conditionnement	74
3.4.1	Approches proposées et limites	77
3.4.2	Pistes d'améliorations du conditionnement	77
3.5	Exemples de modélisation de propriétés	79
3.5.1	Simulation de propriétés dans les grilles des objets sédimentaires	79
3.5.2	Simulation de propriétés surfaciques	81
3.6	Erosion entre objets sédimentaires et mise à l'échelle de la grille réservoir	81
3.6.1	Impact de l'érosion	81
3.6.2	Exemples d'application des méthodes de mise à l'échelle	83
3.6.3	Rastérisation des structures sédimentaires	83
3.7	Conclusion	90

3.1 Introduction

La modélisation de dépôts sédimentaires souterrains repose sur des données peu abondantes et réparties de façon irrégulière, qui correspondent le plus souvent à des

puits. De plus les hétérogénéités sédimentaires ont souvent une taille trop faible pour être imagées par des méthodes sismiques. Cela implique une grande incertitude liée aux géométries, répartitions et diversités des propriétés pétrophysiques des structures sédimentaires. En l'absence de données, la simulation stochastique permet de construire plusieurs modèles équiprobables en se basant sur des connaissances sur les mécanismes de dépôts et les géométries caractéristiques des structures sédimentaires afin de déterminer les répartitions possibles des hétérogénéités et d'appréhender les incertitudes de cette répartition.

Ce chapitre traite de la méthodologie proposée, qui repose sur une approche hybride entre méthodes basées objets et processus (Section 1.4). Ce type d'approche permet d'associer les modèles de structures sédimentaires décrits dans le chapitre précédent avec des processus de génération stochastique. Une technique de simulation de trajectoires de chenaux méandriformes est présentée. Le principe de cette méthode repose sur l'initialisation d'une courbure sur laquelle est appliquée une équation de croissance de façon à obtenir un aspect méandriforme. La simulation de trajectoires de chenaux prend en compte des processus tels que la formation de méandres abandonnés et la création de barres d'accrétion latérale. En plus de l'axe des chenaux, les paramètres de forme (épaisseur, largeur) peuvent également être simulés. Des considérations sur le conditionnement des chenaux sont ensuite présentées (Section 3.4). Les modèles d'objets sédimentaires sont utilisés comme cadre pour simuler les hétérogénéités internes des structures sédimentaires (Section 3.5). Finalement, les propriétés simulées sont transférées dans une grille à l'échelle du réservoir en respectant les relations d'érosion entre les objets et en utilisant des processus de changement d'échelle et de rastérisation (Section 3.6).

3.2 Génération stochastique de chenaux

La génération stochastique des chenaux repose sur la simulation de l'axe des chenaux qui correspond à la ligne de profondeur maximale projetée sur le toit du chenal. La simulation se base sur les paramètres suivants :

1. la longueur du chenal ;
2. l'amplitude de sinuosité définie orthogonalement à la direction de l'écoulement global, \vec{F} (vecteur normalisé) ;
3. la longueur d'onde de la sinuosité définie dans la direction de l'écoulement global ;
4. la longueur moyenne d'une barre d'accrétion latérale ;
5. le nombre d'itérations de croissance ;
6. un rapport de croissance (α) entre la croissance dans la direction de l'écoulement global et celle orthogonalement à cette direction ;
7. Une graine stochastique tirée aléatoirement, permettant d'assurer la reproductibilité des résultats.

La construction de la forme chenalissante se divise en deux étapes. Dans un premier temps une courbe est initialisée en utilisant un processus stochastique, ici une simulation séquentielle gaussienne (Section 3.2.1.1) ou des systèmes de Lindenmayer

(L-Systèmes) (Section 3.2.1.2). La seconde étape consiste en un processus de croissance basé sur des paramètres géométriques inspirés par [Viseur \[2004\]](#) afin de restituer un aspect méandrique aux axes des chenaux (Section 3.2.2).

3.2.1 Initialisation de l'axe

L'initialisation de l'axe permet de déterminer les paramètres géométriques de courbure et de tangente utilisés dans le processus de croissance qui construit la forme finale d'un chenal. Cette initialisation apporte également un aspect stochastique dans la construction des trajectoires des chenaux.

3.2.1.1 Simulation séquentielle gaussienne 1D

La méthode de simulation séquentielle gaussienne (SGS) est une méthode géostatistique largement utilisée dans la simulation de propriétés pétrophysiques dans des domaines bi ou tridimensionnels [[Deutsch et Journel, 1992](#), [Goovaerts, 1997](#)]. La simulation de l'axe du chenal repose sur une application 1D de cette méthode.

Une SGS se base sur la définition d'un chemin aléatoire dans le domaine de simulation. Pour chaque point dont la valeur de la propriété, nommée Z qui représente dans ce cas l'amplitude des chenaux, n'est pas connue, une recherche des points avoisinants à valeurs connues (données ou précédemment simulées) est effectuée. La simulation utilise comme paramètres d'entrée un variogramme qui contient l'information de la corrélation spatiale des données, et la loi de distribution que l'on cherche à reproduire. La SGS suppose que les variables à simuler suivent une loi de probabilité gaussienne et une anamorphose gaussienne est donc opérée afin de pouvoir généraliser la méthode à d'autres lois de distribution. Dans le cas de la simulation de l'axe d'un chenal le variogramme utilisé est gaussien avec une portée a égale à la moitié de la longueur d'onde du chenal et une variance C égale à l'amplitude du chenal. Il est choisi gaussien car il fournit une trajectoire sinueuse et lisse. Le variogramme gaussien est donné par

$$\gamma(h) = C(1 - e^{-(\frac{h}{a})^2}), \quad (3.1)$$

Avec h la distance entre deux points. En se basant sur ce variogramme un krigeage est opéré afin d'estimer une valeur et de déterminer une variance d'estimation. Le krigeage est un estimateur linéaire sans biais qui minimise la variance d'estimation [[Journel, 1989](#), [Wackernagel, 2003](#)]. Les poids λ_i des points de données Z_i sont déterminés par un système d'équations linéaires dans lequel ces poids sont les inconnues. Le krigeage utilisé pour la simulation de chenaux est un krigeage simple défini par

$$\text{avec } \begin{cases} Z_{KS}^*(u_j) &= \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(u_i) + (1 - \sum_{i=1}^n \lambda_i) m \\ \sigma_{KS}^2 &= \text{Var}[Z] - \sum_{i=1}^n \lambda_i \text{Cov}[Z(u_j), Z(u_i)] \end{cases}, \quad (3.2)$$

Avec Z_{KS}^* la valeur estimée au point u_j , $Z(u_j)$ sont les valeurs connues de la propriété Z dans le voisinage de u_j avec n le nombre de ces points et m la moyenne de Z . La valeur estimée et la variance d'estimation du krigeage sont utilisés pour construire une fonction de répartition gaussienne $G(Z_{KS}^*, \sigma_{KS}^2)$ dont la moyenne et

la variance sont respectivement cette valeur estimée et cette variance d'estimation. Un tirage aléatoire, p_i dans $[0, 1]$ est réalisé dans cette fonction afin de déterminer la valeur de $v_i = G^{-1}(p_i)$, l'amplitude du chenal au point i . Finalement une anamorphose gaussienne inverse est appliquée pour restituer la distribution de probabilités des données.

3.2.1.2 L-systèmes

Les systèmes de Lindenmayer sont des outils de grammaire formelle proposés par Lindenmayer [1968] pour représenter le développement d'organismes filamenteux et sont basés sur la réécriture de chaînes de caractères. Les systèmes de Lindenmayer sont expliqués en détail par Prusinkiewicz [1986], Prusinkiewicz *et al.* [1996]. Les L-systèmes se basent sur un ensemble de règles de production qui sont appliquées sur une chaîne initiale dans laquelle chaque élément, appelé prédécesseur, est remplacé selon ces règles de production par d'autres caractères appelés successeurs.

Une chaîne de caractère générée par des L-systèmes peut être associée à une interprétation graphique pour la génération de modèles géométriques [Prusinkiewicz, 1986]. Les types d'interprétations classiques sont :

- Construction d'un segment de longueur prédéfinie
- Rotation d'un angle prédéfini
- Initiation de la construction d'une branche
- Fin de la construction d'une branche

Les L-systèmes de base produisent des formes très régulières. Les L-systèmes peuvent être rendus stochastiques de deux manières :

- En appliquant un tirage aléatoire des paramètres de l'interprétation graphique de la chaîne de caractères comme par exemple les angles de rotation et les longueurs des segments. Cette approche modifie uniquement la géométrie du modèle.
- En associant plusieurs successeurs à un même prédécesseur avec une probabilité d'apparition pour chacun. En réalisant un tirage aléatoire dans les successeurs possibles, la géométrie et la topologie du modèle peuvent être affectées par le processus aléatoire.

Rongier *et al.* [2014] décrivent une méthode pour simuler des axes de chenaux en utilisant des L-systèmes. Un exemple de simulation est présenté dans la Figure 3.1(a). Cet axe de chenal peut ensuite être habillé avec un modèle par frontières de chenal (Section 2.3.1.2) (Figure 3.1(b)).

3.2.2 Croissance de la forme initiale

À partir d'un axe initial (Figure 3.2(a)), une opération de croissance basée sur des critères géométriques peut être appliquée de manière à donner un aspect méandrique (Figure 3.2(b)) [Viseur, 2004]. Le but de ce processus est de reproduire l'évolution des chenaux de peu sinueux à méandriques [Miall, 1996, Knighton *et al.*, 1998]. Cette évolution est due à l'existence d'un fort courant érodant la partie externe des méandres. L'orientation des méandres peut être donnée par la bissectrice au niveau de deux segments consécutifs formés par les points de contrôle (Équation 2.16).

D'après Knighton *et al.* [1998] la migration du chenal peut être décomposée en une combinaison de trois déplacements, une extension, une translation et une rotation.

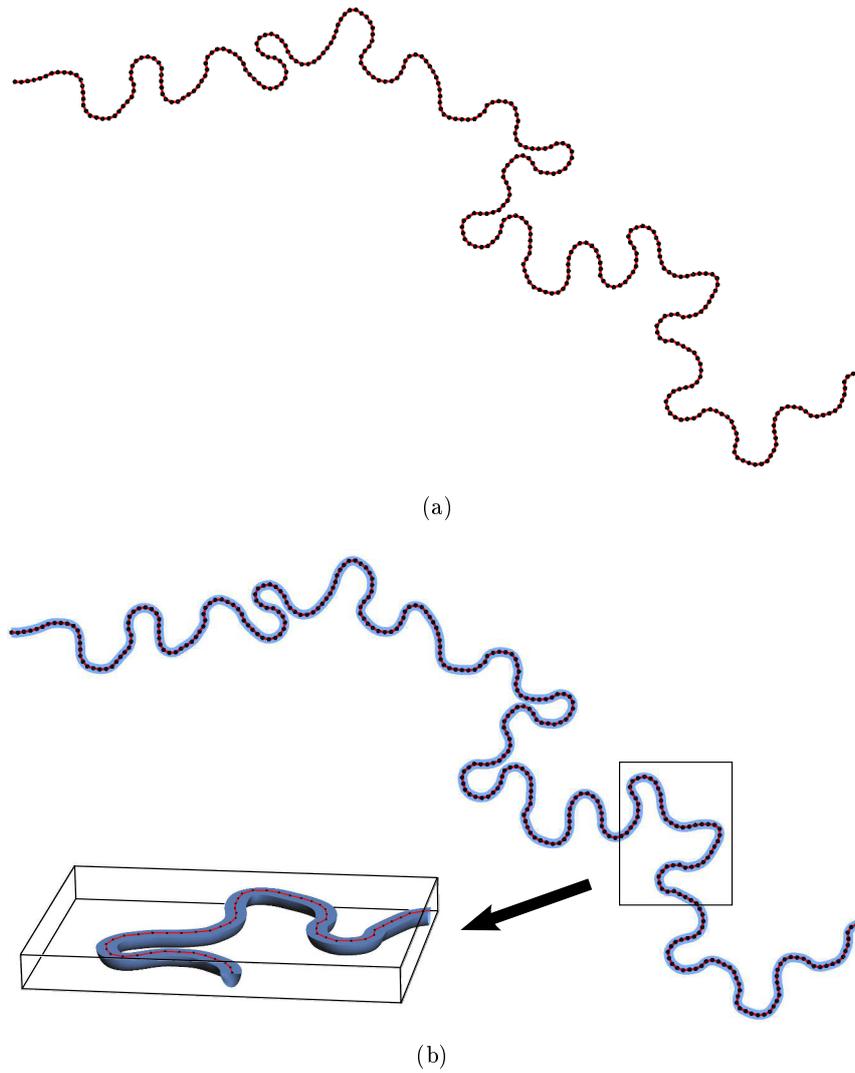


FIGURE 3.1 – CONSTRUCTION DE L'AXE D'UN CHENAL EN UTILISANT DES L-SYSTÈMES ET HABILLAGE AVEC UN MODÈLE DE CHENAL BASÉ SUR DES NURBS. (a) Axe du chenal généré par des L-systèmes. (b) Habillage du chenal.

Le vecteur de croissance \vec{G}_i appliqué à l'axe du chenal est donc défini comme une combinaison linéaire d'un vecteur de courbure \vec{C} (extension), d'un vecteur tangent local \vec{T} (rotation) et du vecteur de courant global \vec{F} (translation et extension).

Les calculs de la tangente et de la courbure se basent respectivement sur les dérivées première et seconde. Celles-ci sont finalement évaluables grâce à l'utilisation de l'axe du chenal pour la construction d'une courbe NURBS.

Le vecteur de courbure est défini par le rayon de courbure qui est porté par un vecteur orthogonal à la tangente à la courbe et orienté vers la concavité. La norme du vecteur est donnée par

$$R(u) = \frac{1}{\frac{\partial^2}{\partial u^2} C(u)} \quad (3.3)$$

Avec $C(u)$ la courbe NURBS et u la coordonnée paramétrique dans la NURBS. Dans ce cas plus la courbe est plane plus la valeur de R est élevée, dans le cas d'une ligne droite le rayon R est infini. Pour appliquer ce vecteur à la croissance des chenaux, la norme de la composante de courbure utilisée est

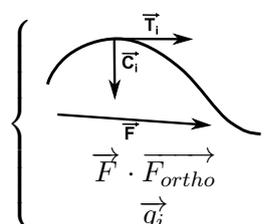
$$\|C\| = -\frac{1}{R}. \quad (3.4)$$

Cette formulation permet à l'extension de se faire vers l'extérieur de la courbe et d'être maximale dans les parties les plus incurvées et minimale dans les portions rectilignes.

L'équation de croissance est dérivée de celle décrite par [Viseur \[2004\]](#) :

$$\vec{G}_i = \alpha \times (\|\vec{g}_i\| \times \|\vec{F}\|) \times \vec{F} + (\|\vec{g}_i\| \times \|\vec{F}_{ortho}\|) \times \vec{F}_{ortho}$$

avec



$$\begin{cases} \vec{F} \cdot \vec{F}_{ortho} = 0 \\ \vec{g}_i = \alpha \times \vec{T}_i - \beta \times \vec{C}_i + \gamma \times (\vec{T}_i \cdot \vec{F}) \times \vec{F} \end{cases} \quad (3.5)$$

Avec \vec{T}_i la tangente et \vec{C}_i la courbure au niveau de la projection du point de contrôle i sur la courbe NURBS, \vec{F} le vecteur représentant la direction globale d'écoulement et \vec{F}_{ortho} l'orthogonale à cette direction globale. Cette formulation permet de contrôler le rapport entre la croissance latérale et longitudinale par rapport à la direction de l'écoulement. α, β, γ sont des réels compris entre 0 et 1. Ils sont utilisés pour moduler l'impact des composantes d'extension, de rotation et de migration sur la forme finale du chenal.

Les différentes composantes vectorielles de l'équation de croissance sont normalisées entre 0 et 1. En particulier les vecteurs liés à la courbure et à la tangente sont normalisés en calculant les normes maximales pour ces deux éléments sur l'ensemble des points de la courbe évalués.

La fonction de croissance est elle aussi normalisée par la croissance moyenne de chaque itération. Le but de cette opération est de respecter le paramètre de la longueur moyenne des barres d'accrétion latérale. Pour cela la longueur moyenne totale des barres d'accrétion est divisée par le nombre d'itérations pour déterminer la longueur

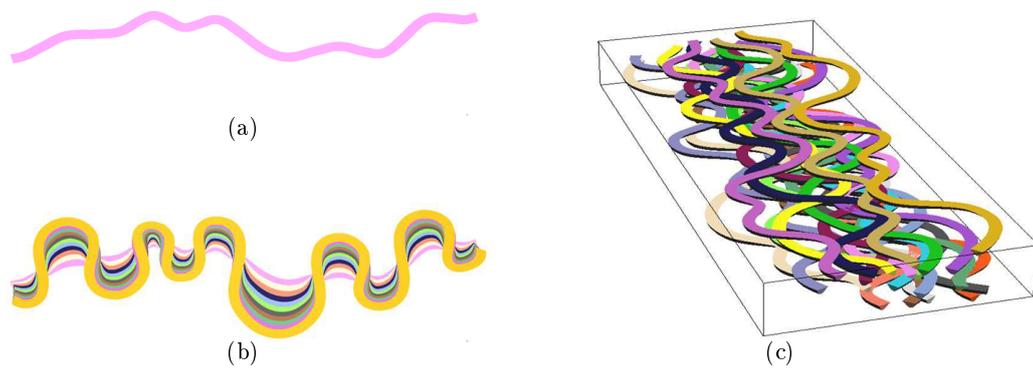


FIGURE 3.2 – CONSTRUCTION DE DIX CHENAUX EN UTILISANT UN PROCESSUS DE GÉNÉRATION STOCHASTIQUE. (a) L'axe du chenal est généré en utilisant une simulation gaussienne non conditionnelle. (b) Étape de migration latérale du chenal. (c) Simulation de dix chenaux.

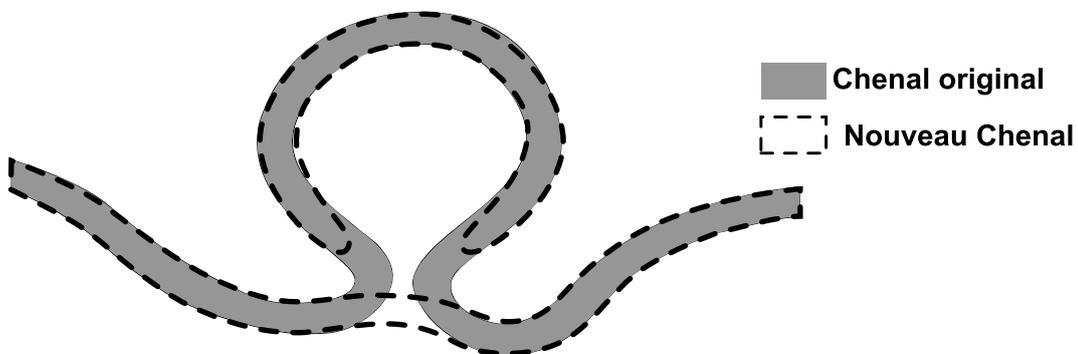


FIGURE 3.3 – FORMATION D'UN BRAS MORT AU COURS DE LA CROISSANCE D'UN MÉANDRE.

des incréments de croissance.

L'équation de croissance est purement déterministe, toutefois des variations stochastiques de certains paramètres comme la croissance moyenne à chaque itération peuvent être introduites pour simuler la diversité des géométries des clinofformes des barres d'accrétion latérale associées au chenal. Les paramètres α, β, γ peuvent également être simulés à chaque itération.

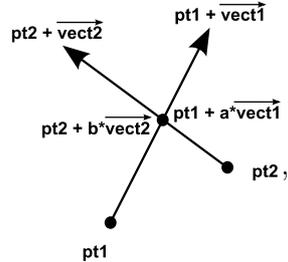
3.2.3 Méandres abandonnés

Les méandres abandonnés sont formés par la migration latérale du chenal, lorsqu'un méandre devient très courbé et que les deux berges concaves à l'extrémité du méandre deviennent très proches. L'abandon a lieu lorsque la fine bande de terre entre les deux coudes du méandre est érodée suite à la migration du chenal ou suite à un fort courant lors d'une inondation. Le chenal est alors raccourci au niveau de ces coudes qui se rejoignent (Figure 3.3).

Ce processus est pris en compte lors de l'opération de croissance en détectant les auto-intersections du maillage de contrôle de la face supérieure du chenal.

3.2.3.1 Intersection de segments dans le plan

Le calcul de l'intersection de deux segments appartenant par exemple au maillage de contrôle de la face supérieure du chenal, non parallèles et appartenant à un même plan, repose sur la recherche de deux réels a et b tels que

$$pt1 + a * \overrightarrow{vect1} = pt2 + b * \overrightarrow{vect2} \quad (3.6)$$


Avec $pt1$ un point du premier segment, $pt2$ un point du second segment, $\overrightarrow{vect1} = pt1_{bis} - pt1$ avec $pt1_{bis}$ le second point du premier segment et $\overrightarrow{vect2} = pt2_{bis} - pt2$ avec $pt2_{bis}$ le second point du second segment. Dans cette équation a et b peuvent être séparés en réalisant l'opération

$$\begin{cases} (pt1 + a * \overrightarrow{vect1}) \times \overrightarrow{vect2} = (pt2 + b * \overrightarrow{vect2}) \times \overrightarrow{vect2} \\ (pt1 + a * \overrightarrow{vect1}) \times \overrightarrow{vect1} = (pt2 + b * \overrightarrow{vect2}) \times \overrightarrow{vect1} \end{cases}, \quad (3.7)$$

étant donné que $\overrightarrow{vect1} \times \overrightarrow{vect1} = 0$ et $\overrightarrow{vect2} \times \overrightarrow{vect2} = 0$. En résolvant ces deux équations, une formulation de a et b est donnée par

$$\begin{cases} a = \frac{(pt2 - pt1) \times \overrightarrow{vect2}}{\overrightarrow{vect1} \times \overrightarrow{vect2}} \\ b = \frac{(pt1 - pt2) \times \overrightarrow{vect1}}{\overrightarrow{vect2} \times \overrightarrow{vect1}} \end{cases}. \quad (3.8)$$

Si $0 \leq a \leq 1$ et $0 \leq b \leq 1$ les deux segments s'intersectent et les coordonnées du point d'intersection sont données par $pt_{inter} = pt1 + a * \overrightarrow{vect1}$.

3.2.3.2 Construction des méandres abandonnés

La construction d'un bras mort par remaniement du chenal est divisée en cinq étapes :

1. La détection des intersections pour chaque côté de la surface supérieure du chenal (Figure 3.4(a)). Les indices des deux sections correspondant au segment qui s'intersectent sont stockés.
2. Un tri et une réduction du nombre d'intersections en se basant sur les indices des sections sont opérés afin qu'il ne reste qu'une intersection par méandre.
3. L'augmentation de la multiplicité d'un nœud à la coordonnée paramétrique correspondant à la projection du point d'intersection sur la NURBS. Cette opération sert à réduire la continuité de la NURBS tout en maintenant sa forme.
4. La sélection des sections avant et après le point d'intersection au niveau de cette discontinuité (Figure 3.4(b)).
5. La détermination de la nouvelle forme du chenal et du bras mort à partir de ces sections (Figure 3.4(c)).

En particulier, des détails sont apportés sur la méthode de tri des intersections. À chaque intersection, un couple de sections du chenal est déterminé. Ceux-ci doivent être triés et leur nombre réduit de façon à ce que plusieurs de ces intersections ne puissent pas exister au niveau d'un méandre. Quatre configurations possibles sont recensées :

- une intersection unique, elle est directement stockée dans la liste d'intersections finales (Figure 3.5(a)) ;
- un couple de sections inclus dans l'espace d'un autre couple, alors le couple le plus grand est conservé dans la liste d'intersections finales (Figure 3.5(b)) ;
- le premier élément d'un couple de sections liées à une intersection est compris dans l'espace entre deux sections correspondantes à une autre intersection, la seconde intersection est conservée dans la liste d'intersections finales (Figure 3.5(c)) ;
- le second élément d'un couple de sections liées à une intersection est compris dans l'espace entre deux sections correspondantes à une autre intersection, la première intersection est conservée dans la liste d'intersections finales (Figure 3.5(d)) ;

L'algorithme de tri appliqué, en se basant sur les cas précédemment décrits, parcourt l'ensemble des intersections, chacune est comparée avec les suivantes et si un des cas précédemment décrits est rencontré, il est résolu, et le résultat est marqué comme une association de plusieurs intersections. Le parcours passe à l'intersection suivante, recommence l'étape de comparaison et ainsi de suite jusqu'à la fin de la liste des intersections. Le processus est poursuivi jusqu'à ce que plus aucune intersection ne soit trouvée. Cette méthode est résumée dans l'algorithme 3.1.

Une fois la liste des intersections finales déterminée les points de contrôles entre deux sections liées à une intersection sont supprimés du chenal (Figure 3.4(c)). Le résultat de la croissance conjointement avec le processus de formation des méandres abandonnés est présenté sur la Figure 3.6.

3.2.4 Raffinement de l'axe du chenal

Au cours de l'opération de croissance un raffinement de l'axe du chenal est opéré afin de conserver la résolution du maillage de contrôle du chenal. Le critère de raffinement est défini comme un ratio de la longueur maximale des segments de la courbe initiale avant croissance. Le raffinement est opéré lorsque la longueur d'un segment dépasse la longueur maximale autorisée. Dans ce cas le milieu du segment est calculé et projeté sur une courbe NURBS construite à partir de l'axe du chenal. Un nœud est ajouté à la courbe à la coordonnée paramétrique du projeté en maintenant la forme de la courbe.

L'ajout de point à l'axe n'est pas fait directement en rajoutant le point au milieu d'un segment. En effet, la technique utilisée permet de conserver la forme du chenal en le raffinant. L'autre avantage de cette approche est que des segments alignés ne sont pas créés artificiellement par l'ajout d'un point ce qui aurait pour effet de créer des zones où la composante d'extension de la fonction de croissance serait nulle.

Le raffinement est particulièrement utile pour la formation des méandres abandonnés lors de la croissance étant donné que le nombre de points du chenal diminue à chaque formation d'un bras mort. De plus, conserver la résolution du chenal permet

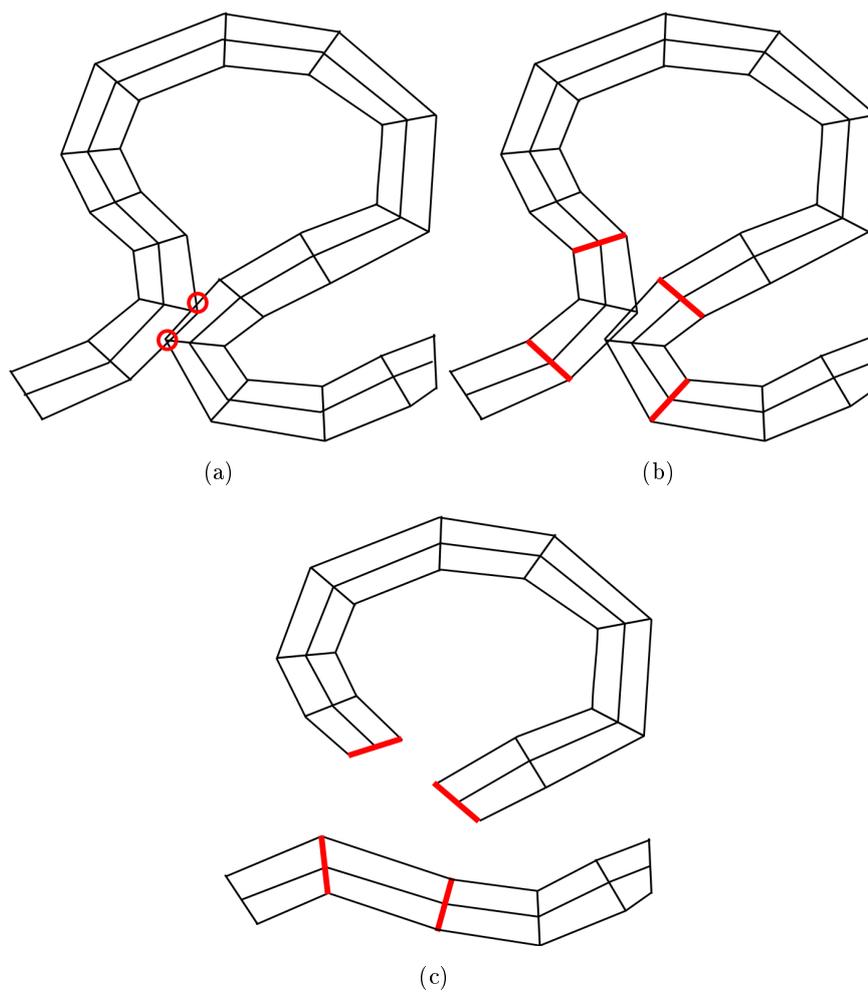


FIGURE 3.4 – CONSTRUCTION DES BRAS-MORT. Durant le processus de croissance des auto-intersections des chenaux peuvent avoir lieu, et sont associées à la formation de bras mort. (a) Les auto-intersections sont détectées (points rouges). (b) Les sections avant et après une intersection sont détectées (lignes rouges). (c) Les points de contrôle entre ces sections sont supprimés pour former le chenal et son bras mort.

ALGORITHME 3.1 - ALGORITHME DE TRI DES AUTO-INTERSECTIONS D'UN CHENAL.

Données : Ensemble des auto-intersections d'un chenal
Résultat : Intersections triées et réduites à une par méandre
Initialisation de la liste des associations d'intersections L_a avec toutes les intersections;
Chaque composant de L_a a deux éléments El_1 et El_2 ;
tant que *tant que* L_a *n'est pas vide* **faire**
 Initiation d'une nouvelle liste d'association vide L'_a ;
 pour $i=0$ **à** *nombre d'éléments dans* L_a **faire**
 pour $j=i+1$ **à** *nombre d'éléments dans* L_a **faire**
 si $L_a[i].El_1 \geq L_a[j].El_1$ *et* $L_a[j].El_2 \leq L_a[i].El_2$ **alors**
 ajout d'un élément à L'_a ;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_1 = L_a[i].El_1$;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_2 = L_a[i].El_2$;
 l'intersection $L_a[i]$ est marquée comme associée;
 sortie de la boucle;
 sinon
 si $L_a[j].El_1 \geq L_a[i].El_1$ *et* $L_a[i].El_2 \leq L_a[j].El_2$ **alors**
 ajout d'un élément à L'_a ;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_1 = L_a[j].El_1$;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_2 = L_a[j].El_2$;
 l'intersection $L_a[i]$ est marquée comme associée;
 sortie de la boucle;
 sinon
 si $L_a[i].El_1 \geq L_a[j].El_1$ *et* $L_a[i].El_2 \leq L_a[j].El_2$ **alors**
 ajout d'un élément à L'_a ;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_1 = L_a[j].El_1$;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_2 = L_a[j].El_2$;
 l'intersection $L_a[i]$ est marquée comme associée;
 sortie de la boucle;
 sinon
 si $L_a[i].El_2 \geq L_a[j].El_1$ *et* $L_a[i].El_2 \leq L_a[j].El_2$ **alors**
 ajout d'un élément à L'_a ;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_1 = L_a[i].El_1$;
 $L'_a[\text{taille de } L'_a].El_2 = L_a[i].El_2$;
 l'intersection $L_a[i]$ est marquée comme associée;
 sortie de la boucle;
 fin
 fin
 fin
 fin
 fin
 si l'intersection $L_a[i]$ *n'est pas marquée comme associée* **alors**
 ajout de l'intersection à la liste finale;
 fin
fin
 $L_a = L'_a$;
fin

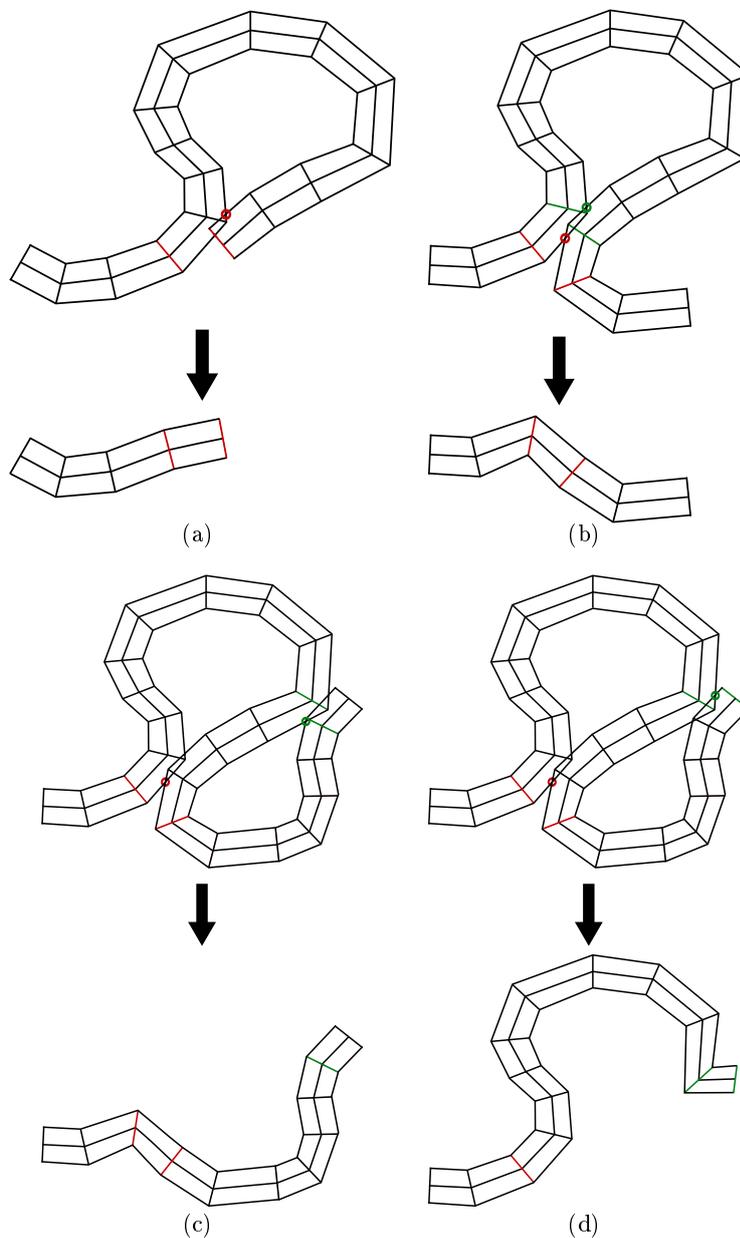


FIGURE 3.5 – TRI DES AUTO-INTERSECTIONS D’UN CHENAL. (a) Une intersection unique (b) Les sections du chenal correspondantes à une intersection sont incluses entre les sections d’une autre intersection. (c) La première section correspondante à une intersection est incluse entre les sections d’une autre intersection. (d) La seconde section correspondante à une intersection est incluse entre les sections d’une autre intersection



FIGURE 3.6 – RÉSULTAT DE LA CROISSANCE D’UN CHENAL INCLUANT LA FORMATION DE BRAS-MORT.

d’éviter des modifications dans la largeur du chenal due à des changements brutaux dans la courbure.

Une comparaison de la résolution des courbes raffinée et non raffinée par rapport à la courbe initiale est présentée sur la Figure 3.7.

La décimation des chenaux est théoriquement possible en se basant sur un processus de réduction du nombre de points de contrôle en maintenant la géométrie de la surface proposé par Piegl et Tiller [1995]. Cette méthode permet de déterminer le support minimal de la NURBS, c’est à dire le plus petit nombre de points de contrôle nécessaires pour représenter une géométrie.

3.2.5 Simulation de paramètres de forme

La construction des chenaux présentés jusqu’ici se faisait à largeur et épaisseur constante. Or pour chaque section des chenaux (de même pour les lobes et les levées) une valeur des paramètres de largeur et d’épaisseur peut être spécifiée. Une simulation des paramètres d’épaisseur et de largeur est réalisée en utilisant une simulation séquentielle gaussienne avec une loi de distribution choisie par l’utilisateur. Un exemple de deux réalisations de largeurs différentes avec le même chenal est présenté sur la Figure 3.8.

Pour l’instant les simulations d’épaisseur et de largeur se font indépendamment, mais Gibling [2006] a défini des relations entre ces deux valeurs en fonction du type de chenal. L’approche proposée serait donc de simuler une des deux variables et de s’en servir pour simuler la seconde en utilisant une SGS basée sur un krigeage colocalisé qui utilise un coefficient de corrélation entre la variable à simuler et la variable déjà simulée.

3.2.6 Considération sur différents types de chenaux fluviaux

La simulation de chenaux est jusque-là concentrée sur la construction de chenaux méandriques caractérisés par un chenal indépendant. Or dans le but de modéliser d’autres schémas de forme de chenaux il est intéressant de prendre en compte les connexions entre les différents chenaux. Cela peut en particulier s’appliquer dans le cadre des dépôts de rivières en tresses ou anastomosées.

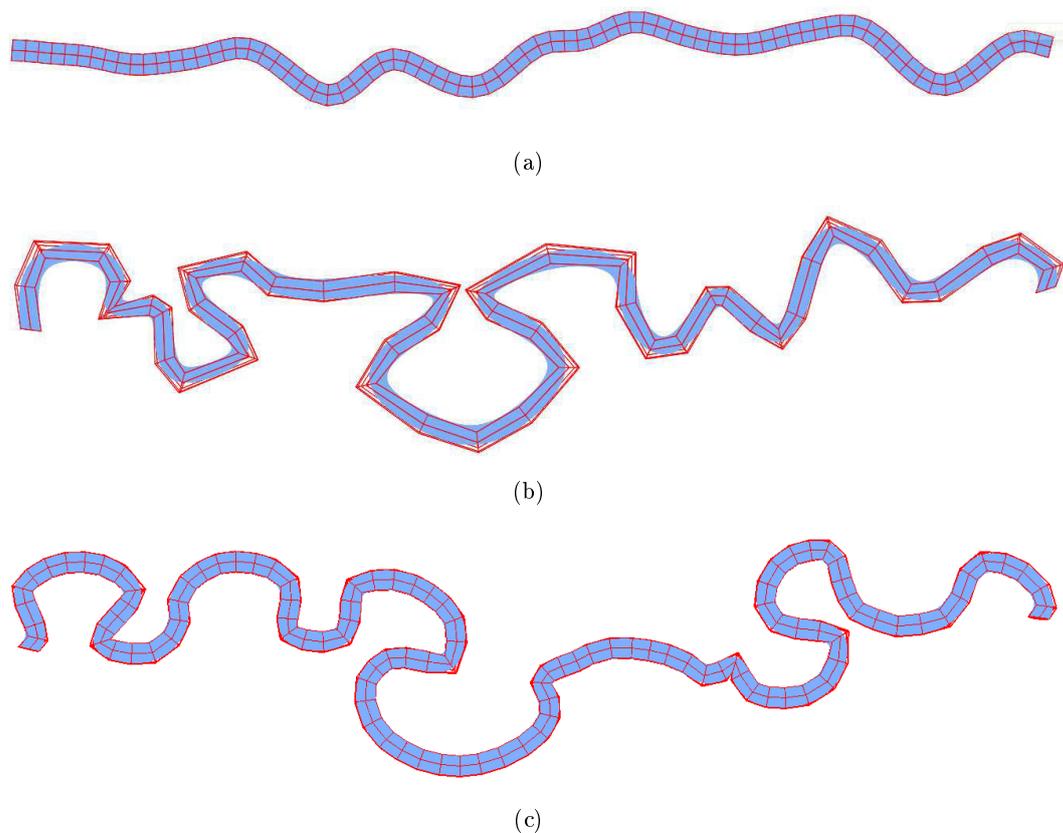


FIGURE 3.7 – IMPACT DU RAFFINEMENT DE L'AXE DU CHENAL SUR SA FORME FINALE. (a) État initial avant croissance. (b) État final après croissance sans raffinement de l'axe. (c) État final après croissance avec raffinement de l'axe.

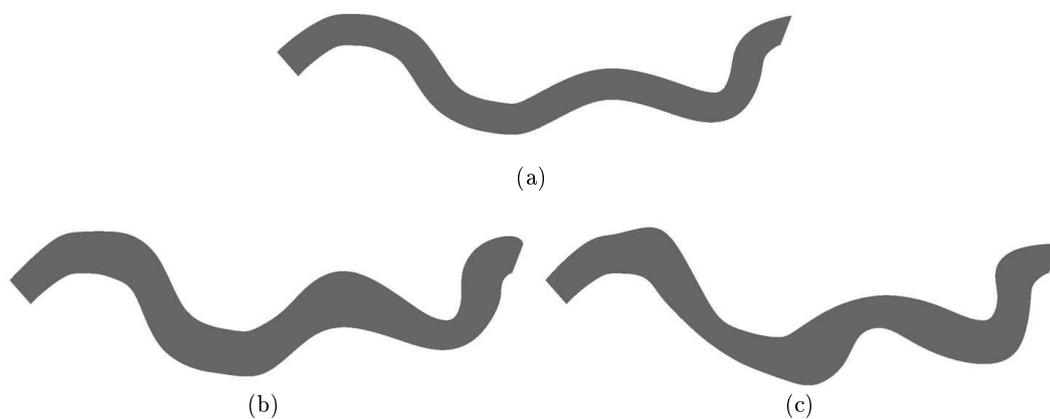


FIGURE 3.8 – SIMULATION DES PARAMÈTRES DE FORME. (a) Chenal à paramètres de formes constants. (b) Première réalisation. (c) Seconde réalisation.

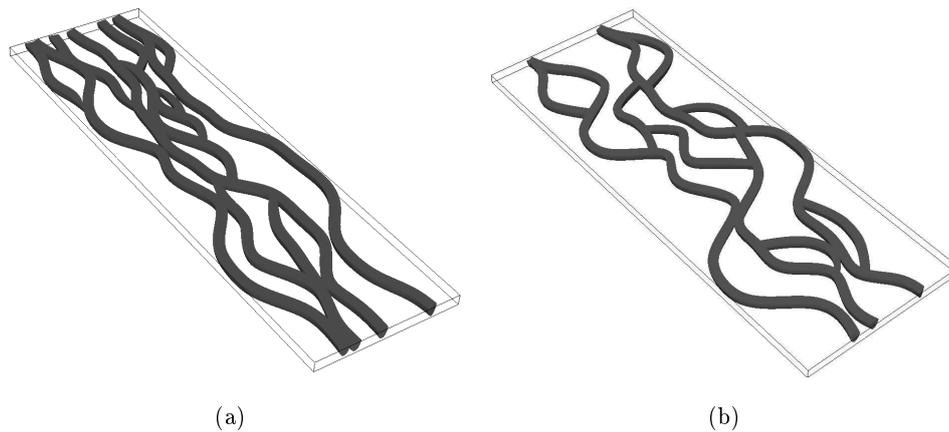


FIGURE 3.9 – EXEMPLES DE SIMULATIONS DE CHENAUX CONNECTÉS AVEC DIFFÉRENTS PARAMÈTRES DE FORME. (a) Premier exemple (b) Second exemple

3.2.7 Simulation de chenaux en tresses ou anastomosés

Les chenaux en tresses sont caractérisés par des chenaux larges et peu profonds qui changent rapidement de trajectoire à cause de nombreuses avulsions locales. Pour les environnements fluviaux anastomosés, les chenaux sont caractérisés par des portions droites ou peu sinueuses avec peu de migration latérale qui sont séparés par des barres stables qui séparent les écoulements des chenaux. [Miall, 1996, Reineck et Singh, 1973]. Dans les deux cas ces dépôts présentent un ensemble de chenaux interconnectés (Section 1.2.1.2).

L'approche actuelle consiste à simuler un nombre de chenaux défini par l'utilisateur avec une distribution latérale donnée et de calculer séquentiellement les intersections entre les différents chenaux. Pour un chenal toutes les intersections avec les chenaux déjà traités sont calculées. La portion de ce chenal entre deux intersections consécutives ou entre une intersection et une des extrémités du chenal est isolée en découpant le chenal par insertion de nœuds (Section 2.2.5). Les extrémités de cette portion de chenal sont connectées avec les chenaux intersectés de façon à assurer la cohérence de l'ensemble du dépôt (Section 2.2.6.1).

Cette approche donne des résultats de chenaux connectés (Figure 3.9). Toutefois elle semble peu efficace étant donné que de grandes parties des chenaux simulés sont finalement supprimées. De plus le nombre de connections et de boucles formées n'est pas contrôlable.

Néanmoins l'approche de découpage en elle-même est intéressante pour assurer la cohérence de l'ensemble des chenaux dans un processus de simulation qui inclut la génération d'avulsions. En effet si deux chenaux sont proches du fait de leur croissance ils peuvent s'intersecter, il est donc nécessaire de prendre en compte cette situation qui est gérée en connectant les extrémités d'une portion du chenal aux chenaux intersectés.

3.2.8 Prise en compte de l'avulsion

Outre la formation de méandres abandonnés qui sont des avulsions mineures, des avulsions à plus grande échelle doivent être prises en compte. Les avulsions majeures correspondent à une modification de la trajectoire du chenal par rupture de berge

pendant une inondation ou suite à un effondrement. Le débit du chenal peut être totalement détourné dans le cas d'une avulsion totale ou le flux peut être séparé en deux parties dans le cas d'une avulsion partielle [Slingerland et Smith, 2004].

Dans l'état d'avancement actuel des modèles de structures sédimentaires, seul le cas des avulsions totales a été considéré conjointement avec le processus de croissance. Pour ce faire, un chenal initial est généré en utilisant une initialisation SGS et le processus de croissance (Figure 3.10(a)). À un certain point une avulsion est générée. Étant donné qu'il s'agit d'une avulsion totale, le chenal initial est coupé au niveau du point d'avulsion et la partie en amont est fusionnée avec la partie aval du chenal résultant de l'avulsion (Figure 3.10(b)). Le processus de croissance est finalement repris sur la nouvelle trajectoire du chenal (Figure 3.10(c)).

Dans le cas des avulsions partielles, pour l'instant, seule la forme finale des chenaux peut être modélisée en générant une trajectoire à partir du chenal majeur et en appliquant une opération de branchement (Section 2.3.1.3). Il est également nécessaire de réduire la largeur et l'épaisseur du chenal majeur après le branchement pour retranscrire le partitionnement du flux dû aux avulsions.

3.3 Génération de clinofformes à partir de la croissance des chenaux

Les différentes étapes de l'équation de croissance (Équation 3.5) sont utilisées pour générer les barres d'accrétion latérale et leurs clinofformes successifs (Figure 3.11(a)). Les chenaux à chaque étape du processus de croissance s'intersectent à l'extrémité des clinofformes. Les portions de surfaces latérales de deux chenaux entre deux intersections successives sont utilisées pour construire les bordures obliques d'un clinofforme. Afin de déterminer le domaine d'un clinofforme au sein d'un chenal, les intersections entre les maillages de contrôle des chenaux successifs sont calculés. Ces points d'intersection sont ensuite projetés sur le chenal correspondant afin de déterminer la position des extrémités des clinofformes dans l'espace paramétrique du chenal (Figure 3.11(b)). Une portion du chenal est isolée de la même façon que pour la construction des levées (Section 2.3.2.3) en ajoutant des nœuds aux coordonnées paramétriques avec une multiplicité égale au degré plus un afin de couper des parties des chenaux (Figure 3.11(c)). Le résultat de l'extraction des clinofformes et leur lien avec le chenal sont présentés sur la Figure 3.12.

3.4 Considérations sur le conditionnement

Le conditionnement aux données consiste à forcer les réalisations d'une simulation stochastique à respecter certaines valeurs. Le type de données utilisées dans ce cas sont issues des forages :

- Données de carottage, qui sont des échantillons de roche (des carottes) retirés au cours des forages. L'analyse des carottes permet d'obtenir des descriptions des faciès et en particulier des surfaces limitantes de ces différents faciès.
- Données de diagraphie qui sont des méthodes de mesures géophysiques donnant des informations sur la nature des roches, la lithologie et l'orientation des structures.

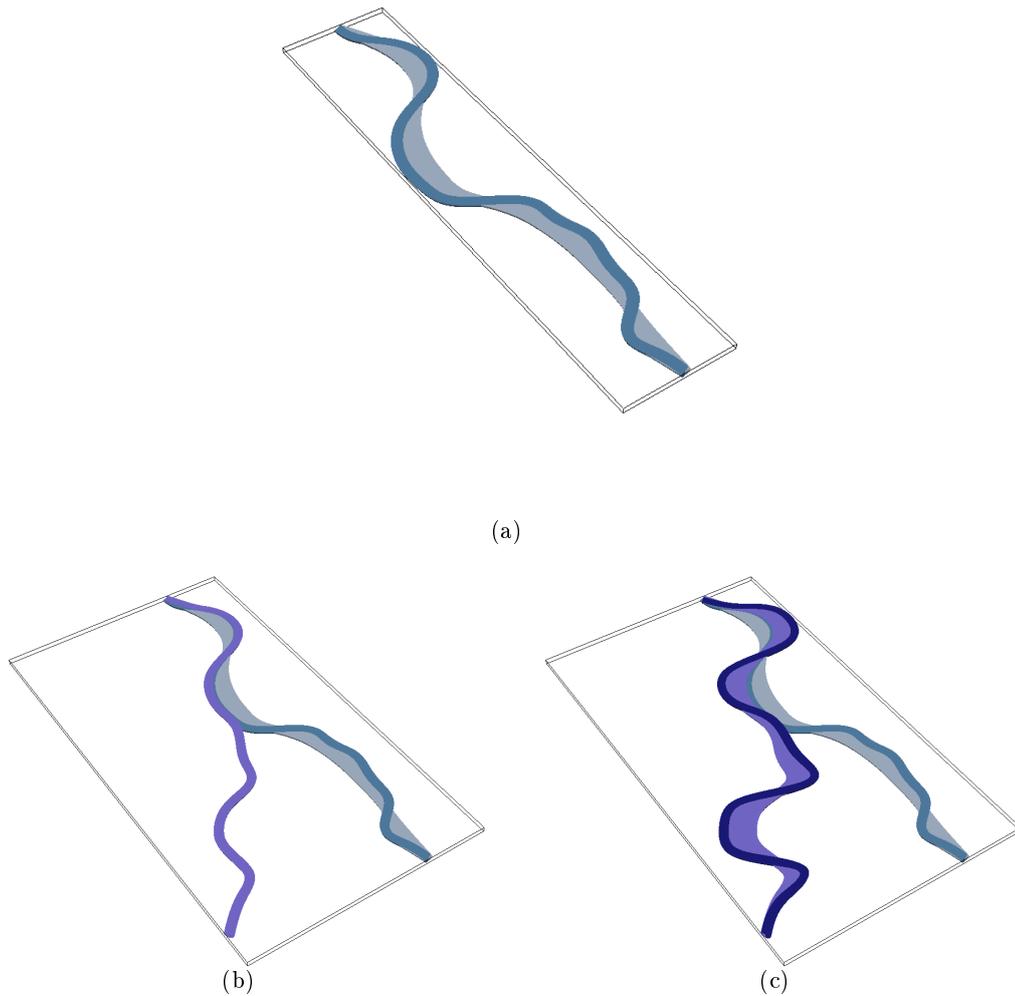


FIGURE 3.10 – EXEMPLE DE MODÉLISATION D’AVULSION TOTALE [SLINGERLAND ET SMITH, 2004], COMBINÉE AVEC UNE CROISSANCE DU CHENAL. (a) Un chenal (en bleu foncé) avec ses barres d’accrétion latérale (bleu clair). (b) Nouvelle trajectoire du chenal (en violet) après une avulsion totale. (c) Deuxième étape de croissance (en violet) à partir de la nouvelle trajectoire du chenal.

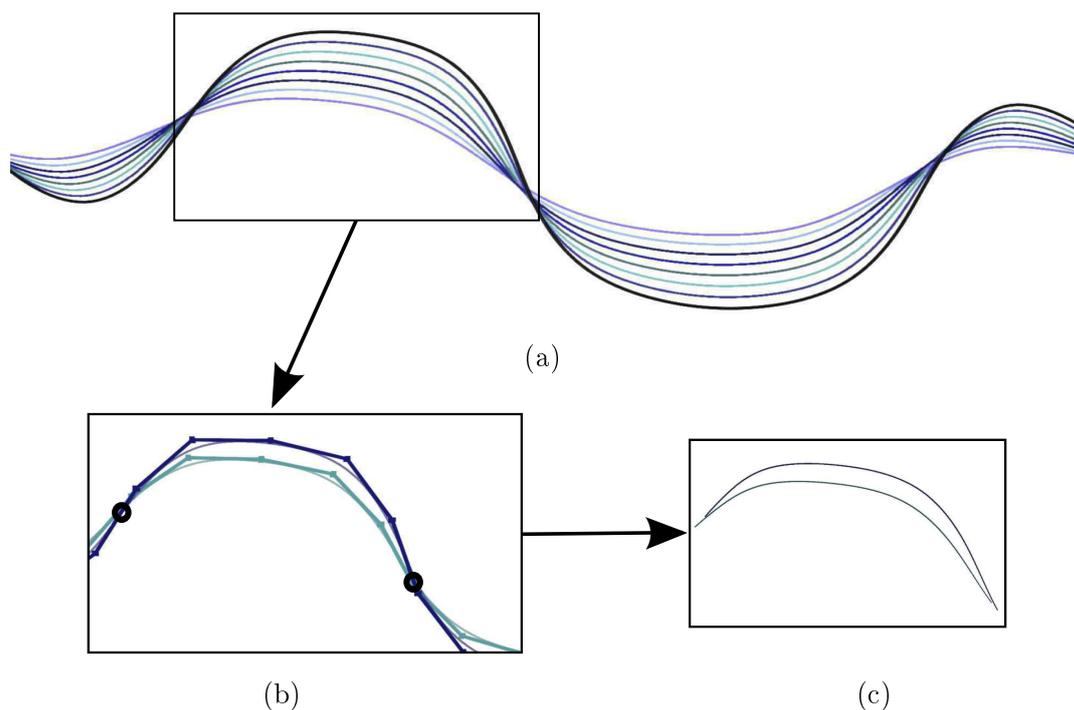


FIGURE 3.11 – EXTRACTION DES CLINOFORMES DES BARRES D'ACCÉTION LATÉRALE À PARTIR DE LA CROISSANCE D'UN CHENAL. Les chenaux sont ici représentés par leurs axes. (a) Un chenal avec ses étapes de croissances. (b) Les intersections entre les maillages de contrôle sont calculés. (c) Portions de chenaux entre les points d'intersections.

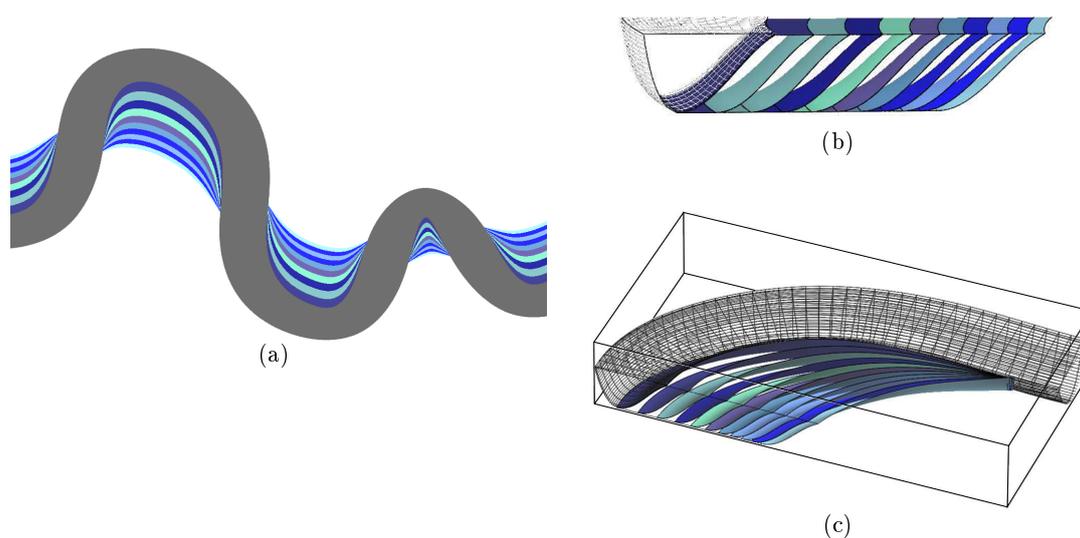


FIGURE 3.12 – CLINOFORMES EXTRAITS DE LA SIMULATION DES CHENAUX. (a) Clinoforme en vue du dessus associée à leur chenal. (b) Vue en coupe d'une succession de clinoformes. (c) Vue latérale du chenal et de ses clinoformes présentant la cohérence entre les différentes structures en trois dimensions.

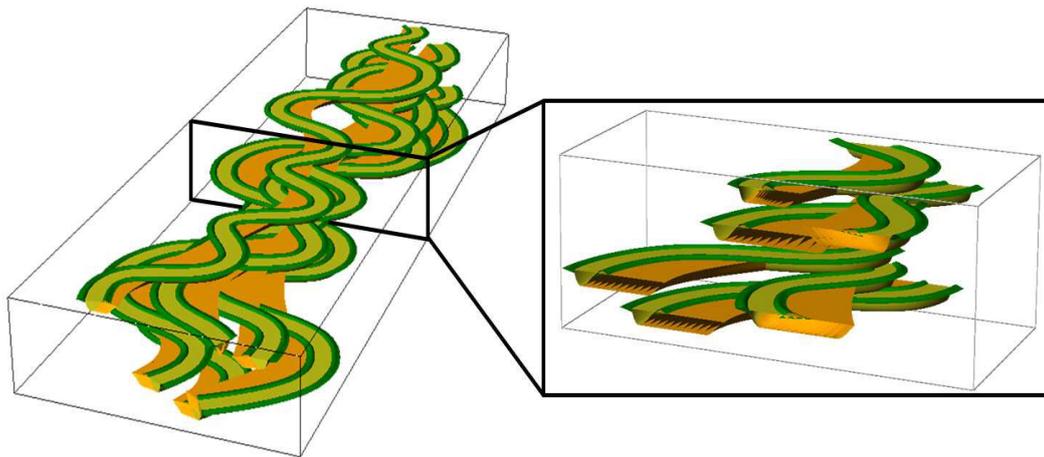


FIGURE 3.13 – RÉALISATION D’UN ENVIRONNEMENT DE DÉPÔT FLUVIAL PRÉSENTANT QUATRE CHENAUX (EN JAUNE) AVEC LEURS BARRES D’ACCRÉTION LATÉRALE (EN ORANGE) ET LEURS LEVÉES (EN VERT).

3.4.1 Approches proposées et limites

L’approche de conditionnement appliquée sur les simulations proposées dans ce chapitre se base sur le conditionnement de l’initiateur de courbure dans un premier temps (SGS ou L-Systèmes). Dans le cas d’une initialisation en utilisant une SGS, étant donné que le krigeage est un interpolateur linéaire sans biais les données sont respectées par construction. Le processus de croissance est ensuite fixé au niveau des points de contrôle de la structure sédimentaire, correspondant aux données de puits. Cela permet d’imposer le passage des chenaux par les données mais introduit un biais dans la formation des structures liées aux chenaux (Figure 3.14).

En plus de contraindre la position d’un chenal par rapport aux données il serait intéressant de pouvoir conditionner l’orientation d’un chenal. Cela est particulièrement applicable si l’on cherche à conditionner des barres d’accrétion latérale. Dans ce cas, le chenal doit passer à une distance du puits inférieure à la longueur supposée des barres d’accrétion de telle façon que les données se trouvent dans la partie interne du méandre.

Le processus de conditionnement n’inclut pour l’instant pas de processus de sélection des données pour déterminer si quelques marqueurs sur plusieurs correspondent à une seule structure ou à plusieurs de même type. Ainsi une méthode de corrélation des données devrait être considérée de façon à déterminer le nombre de puits perforant une structure [Viseur, 2001, Colombera *et al.*, 2014].

De la même façon, un marqueur peut correspondre à plusieurs éléments dont on n’identifie pas les limites sur les données de puits. Il reste donc à prendre en compte ces deux aspects dans la simulation de réalisation conditionnée afin de rendre compte de l’incertitude des données de puits vis à vis des structures sédimentaires.

3.4.2 Pistes d’améliorations du conditionnement

Si le processus de conditionnement permet d’imposer le passage d’un chenal par un ensemble de puits, il introduit un biais lorsqu’il s’agit de construire les structures associées au chenal telles que les barres d’accrétion latérale (Figure 3.14). Une mé-

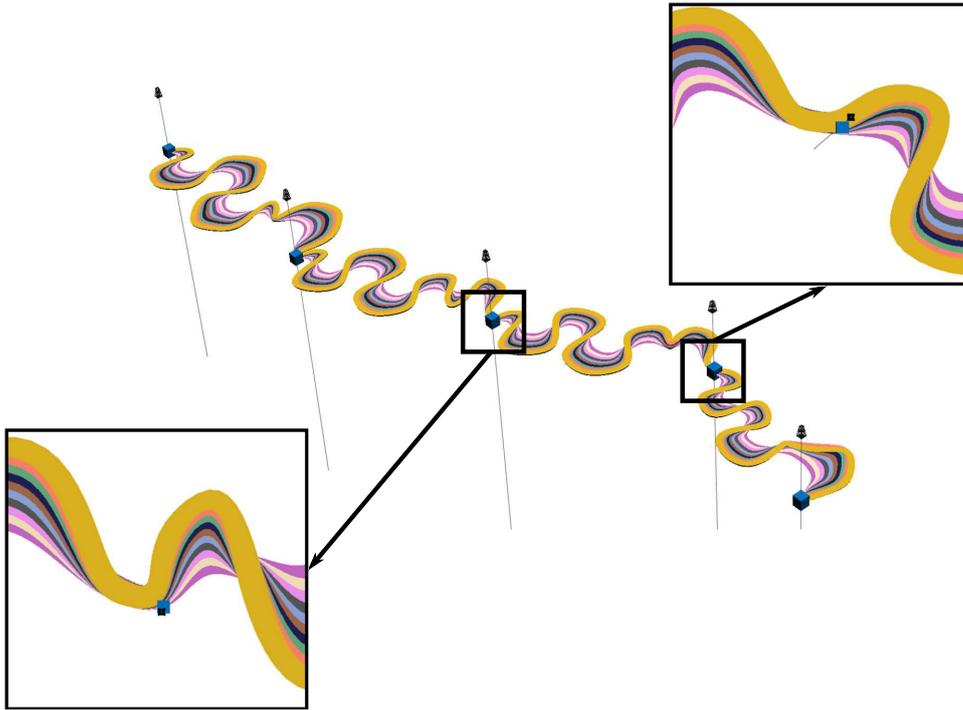


FIGURE 3.14 – TENTATIVE DE CONDITIONNEMENT DES CHENAUX.

thode de reconstruction de ces structures à partir de l'état final du chenal conditionné est alors envisageable.

3.4.2.1 Rétro-migration des chenaux

En utilisant un chenal conditionné, un processus de reconstruction des barres d'accrétion latérale est proposé en s'inspirant des processus utilisés dans les équations de simulation directe définie par Viseur [2001] et Ruiu *et al.* [2014a] (Section 3.2.2). Ce processus utilise en paramètres la longueur maximale totale des barres d'accrétion latérale et le nombre d'itérations de la rétro-migration.

Pour chaque étape du processus de rétro-migration, les points d'inflexion de l'axe du chenal sont identifiés afin de déterminer les extrémités des méandres. Ils sont calculés en se basant sur les orientations des bissectrices des angles formés par trois points consécutifs de l'axe. Si deux bissectrices consécutives ont un produit scalaire négatif, cela marque la présence d'un point d'inflexion dans le segment qu'elles entourent. En l'occurrence ce point est choisi comme étant le milieu du segment (Figure 3.15(a)). Deux points d'intersection consécutifs sont utilisés pour construire un segment qui contient les cibles de la rétro-migration pour chaque point de contrôle. Pour ce faire le segment est utilisé afin de répartir de façon équidistante un point cible par point de contrôle (Figure 3.15(b)). Les points de contrôle sont déplacés en se basant sur la longueur maximale de déplacement. Pour une itération celle-ci est calculée par le ratio entre la longueur de la barre d'accrétion latérale et le nombre d'itérations. En particulier le déplacement est tel que la longueur de celui-ci est maximale sur les points les plus éloignés des points d'inflexion, c'est-à-dire pour lesquels la distance entre un point contrôle et son point cible est la plus grande. Les distances de déplacement pour

les autres points sont calculées en faisant le ratio entre l'écart du point de contrôle avec son point cible et l'écart maximal pour le méandre courant (Figure 3.15(c)).

L'application de la rétro-migration au chenal conditionné montre que les barres d'accrétion absentes dans la simulation directe sont reconstruites (Figure 3.16)

Le processus actuel de rétro-migration des chenaux est totalement déterministe. Une amélioration de cette approche serait d'inclure un aspect stochastique dans ce processus afin d'obtenir plusieurs réalisations des barres d'accrétion latérale pour un même chenal.

L'aspect stochastique peut être ajouté au niveau de plusieurs étapes du processus de migration :

- la position des points d'inflexion : au lieu d'être choisis au milieu d'un segment de la ligne médiane du chenal, ils pourraient être déplacés aléatoirement le long de ce segment ;
- une variation sur la position du point de déplacement maximal pourrait également être introduite.
- la longueur de la migration à chaque étape pourrait également être choisie aléatoirement.

Les formations des méandres abandonnés ont également un fort impact sur la forme des barres d'accrétion latérale étant donné que la trajectoire des chenaux est modifiée. Les barres d'accrétion ont une forme comparable entre la migration directe et la rétro-migration dans les zones où il n'y a pas eu d'abandon de méandre. Toutefois dans les zones d'abandon, les barres d'accrétion ont une géométrie totalement différente. Une amélioration de la méthode serait donc de simuler les méandres abandonnés avec leurs barres d'accrétion et de les réintroduire aléatoirement dans la géométrie des chenaux au cours du processus de rétro-migration. Afin de reproduire l'ensemble des événements qui ont conduit à la formation du chenal final, il est nécessaire d'inclure d'autres processus tels que l'avulsion et l'aggradation.

3.4.2.2 Déformation des chenaux

Le conditionnement en imposant la position de l'axe du chenal du maillage de contrôle du chenal à passer par les données fait que le chenal ne passe pas forcément par les puits (Figure 3.17(a)). Une modification des modèles peut être opérée en se basant sur la flexibilité des surfaces NURBS et en particulier sur la propriété de support local (Section 2.2.3.3). La déformation directe des surfaces NURBS est appliquée pour corriger le modèle (Section 2.2.6.2) (Figure 3.17(a)). En plus d'un décalage par rapport aux données il est nécessaire de conditionner l'épaisseur des chenaux afin de faire passer les surfaces limitantes du chenal par les marqueurs des faces supérieure et inférieure (Figure 3.17(b)).

3.5 Exemples de modélisation de propriétés

3.5.1 Simulation de propriétés dans les grilles des objets sédimentaires

Les grilles conformes à des objets sédimentaires, permettent de définir facilement les directions d'anisotropies locales, en utilisant des méthodes géostatistiques dans

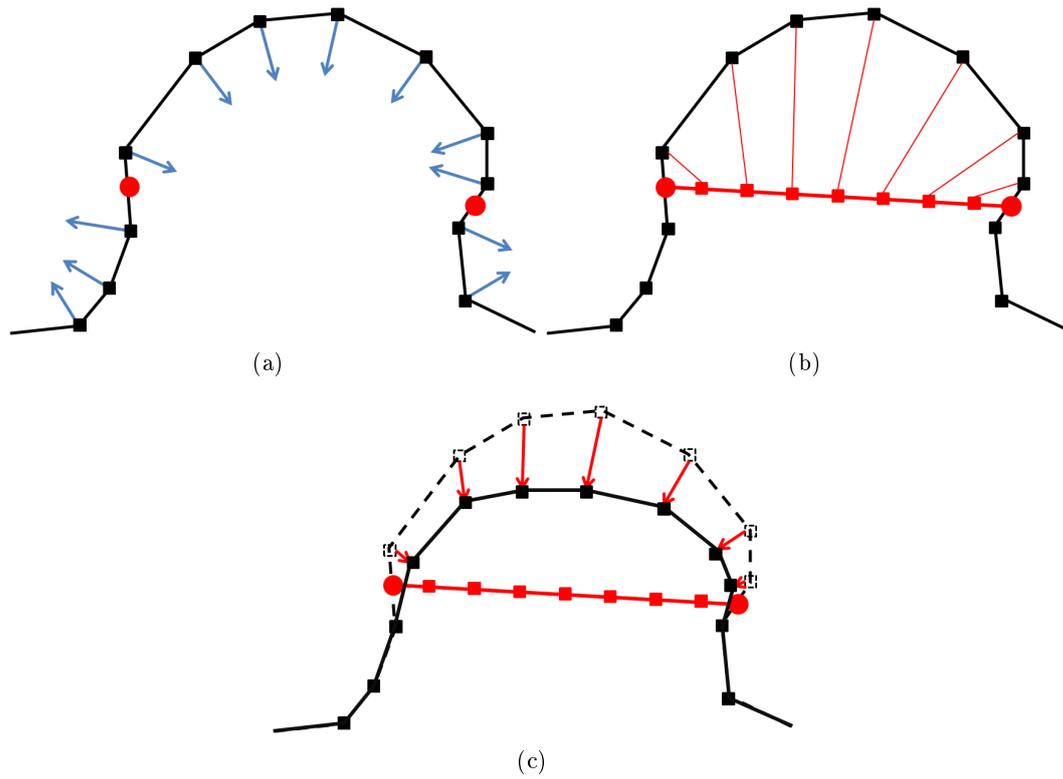


FIGURE 3.15 – ESTIMATION DES BARRES D'ACCRÉTION LATÉRALE D'UN CHENAL. (a) Calcul de points d'inflexion du chenal (b) Construction de la cible de rétro-migration. (c) Déplacement des points de contrôle.

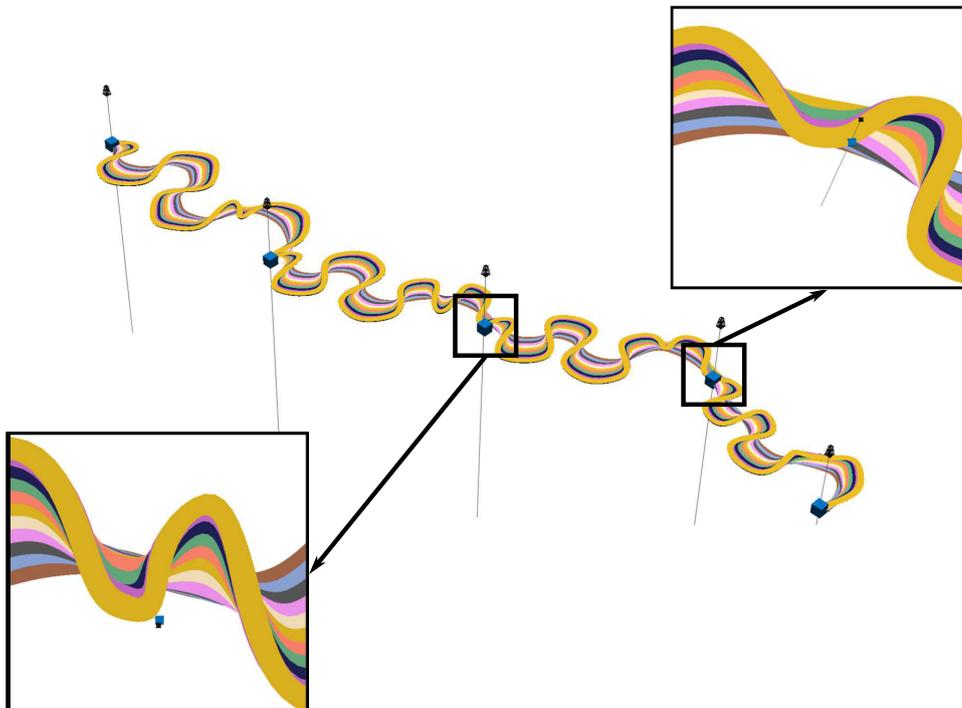


FIGURE 3.16 – APPLICATION DE LA RÉTRO-MIGRATION À UN CHENAL .

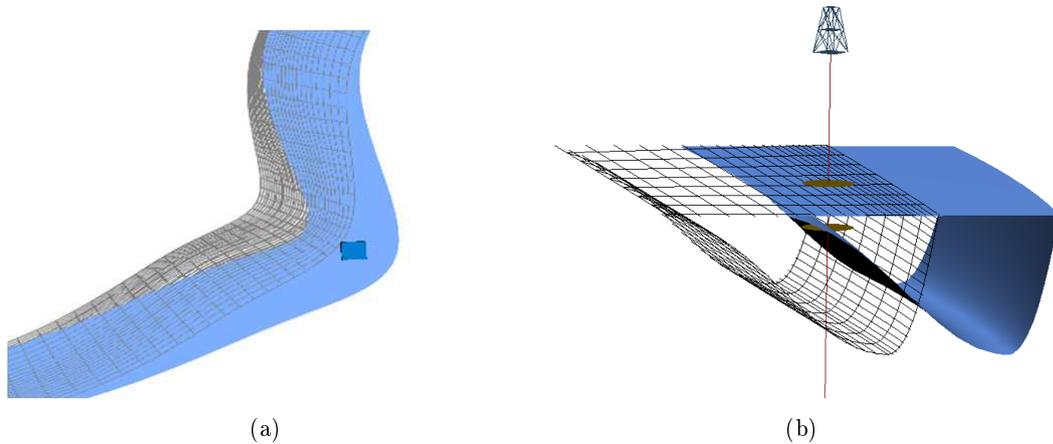


FIGURE 3.17 – ÉDITION D'UN CHENAL POUR HONORER LES DONNÉES. L'état initial est affiché en fil de fer et l'état final en surface pleine et en bleu. (a) Déformation pour placer la donnée au milieu du chenal. (b) Déformation pour placer le chenal dans un intervalle de données.

l'espace paramétrique des grilles. Pour illustrer cela, une simulation séquentielle gaussienne non conditionnée a été réalisée sur différentes grilles (Figure 2.22). Les simulations sont calculées en utilisant les mêmes variogrammes et la même distribution gaussienne d'entrée. Les résultats de ces simulations pour chaque grille sont présentés sur la Figure 3.18. Ces résultats mettent en évidence l'impact des différentes géométries sur le calcul des hétérogénéités internes du chenal et des autres objets sédimentaires (Figure 3.19).

3.5.2 Simulation de propriétés surfaciques

La transmissibilité des interfaces peut également être simulée en utilisant une SGS en deux dimensions sur les surfaces limitantes des structures sédimentaires comme présenté sur la Figure 3.20.

3.6 Erosion entre objets sédimentaires et mise à l'échelle de la grille réservoir

À l'exception des structures anastomosées, les objets NURBS présentés jusqu'à maintenant sont tous construits comme étant le produit de l'évolution continue d'un seul chenal. Cependant, dans la réalité, les chenaux alluviaux et les dépôts leur étant associés migrent latéralement et verticalement. Ils peuvent aussi couper et éroder des systèmes plus anciens. Un processus de rasterisation est donc introduit afin de prendre en compte le processus d'érosion à l'intérieur des ceintures de chenaux et de mettre les hétérogénéités internes à l'échelle de la grille réservoir.

3.6.1 Impact de l'érosion

Afin de transférer les propriétés simulées sur une grille fine à une grille plus grossière représentant l'ensemble du réservoir, il est nécessaire de prendre en compte l'im-

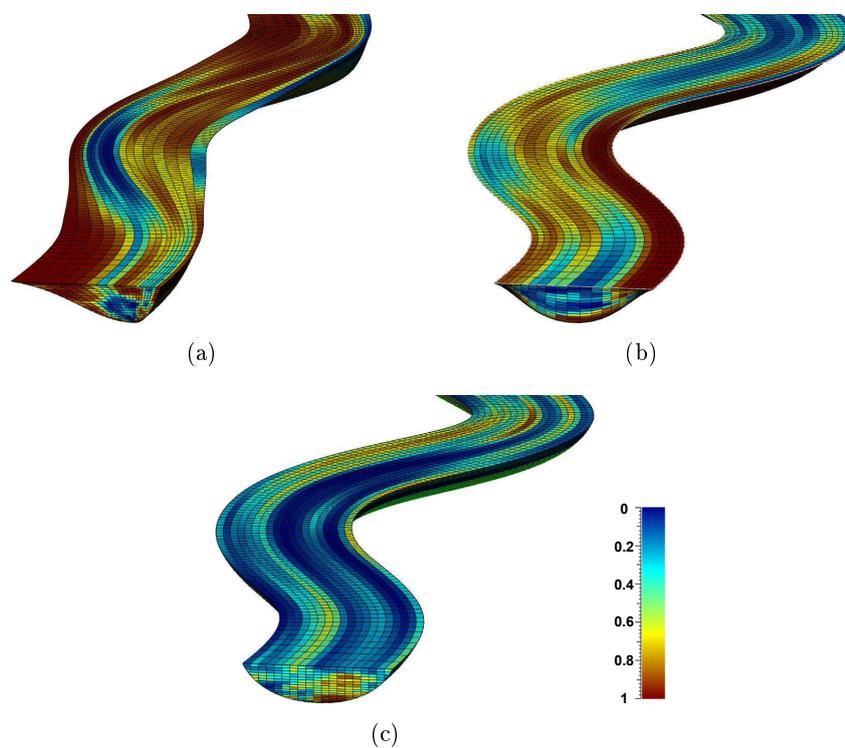


FIGURE 3.18 – POROSITÉ SIMULÉE SUR UNE GRILLE DE CHENAL. (a) Chenal progradant. (b) Chenal divergent. (c) Chenal aggradant.

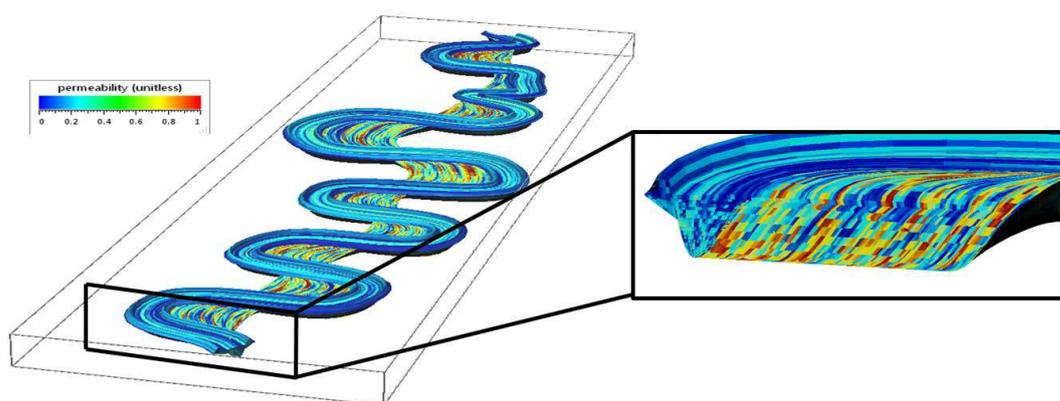


FIGURE 3.19 – EXEMPLE DE MODÉLISATION DE PROPRIÉTÉS SUR PLUSIEURS TYPES DES STRUCTURES SÉDIMENTAIRES (LE CHENAL, LES LEVÉES ET LES CLINOFORMES).

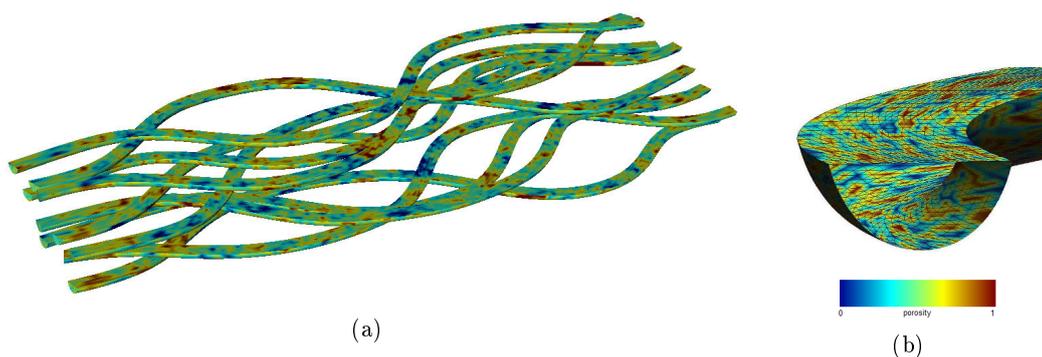


FIGURE 3.20 – SIMULATION DES HÉTÉROGÉNÉITÉS DE SURFACES. (a) Vue du dessus (b) Vue en coupe

l'impact de l'érosion sur la forme finale des objets sédimentaires. Pour cela, les structures sédimentaires sont organisées selon leur ordre de dépôt et leur ordre stratigraphique au sein de chaque phase de dépôt (un chenal avec ses levées et ses barres d'accrétion latérale) (Table 1.1) [Miall, 1996]. L'ordre stratigraphique est reproduit en affectant une valeur à chaque objet selon les relations d'érosion entre les surfaces limitantes définies par Miall [1996]. En ce qui concerne l'ordre de dépôt, l'hypothèse utilisée ici est que les objets les plus profonds sont les plus vieux. Ainsi chaque ensemble sédimentaire (un chenal avec ses levées et ses barres d'accrétion latérale) est classé du plus profond au moins profond.

3.6.2 Exemples d'application des méthodes de mise à l'échelle

Afin d'illustrer la mise à l'échelle du réservoir des propriétés pétrophysiques des grilles construites à partir de structures géologiques, vingt chenaux ont été modélisés de manière stochastique. Dans les grilles correspondantes à chaque objet, une valeur de porosité a été simulée par une simulation séquentielle gaussienne (Figure 3.21(a)). Le processus de mise à l'échelle est réalisé objet par objet en suivant l'ordre d'érosion défini précédemment afin de reproduire l'effet de l'érosion. Pour la porosité, la mise à l'échelle de la grille réservoir a été réalisée par une moyenne arithmétique pondérée par le volume [Durlinsky, 2005], définie par

$$\phi^* = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \phi dV. \quad (3.9)$$

Avec ϕ les porosités à l'échelle de la grille fine contenues dans le volume V_b de la cellule à l'échelle plus grossière, et ϕ^* la porosité équivalente à cette même échelle. Le résultat du processus de mise à l'échelle est montré sur la Figure 3.21(b).

3.6.3 Rastérisation des structures sédimentaires

Une méthode a également été développée pour transférer les surfaces limitantes des chenaux dans une grille et peindre l'intérieur de ces structures de façon à définir différentes régions correspondant aux diverses structures sédimentaires.

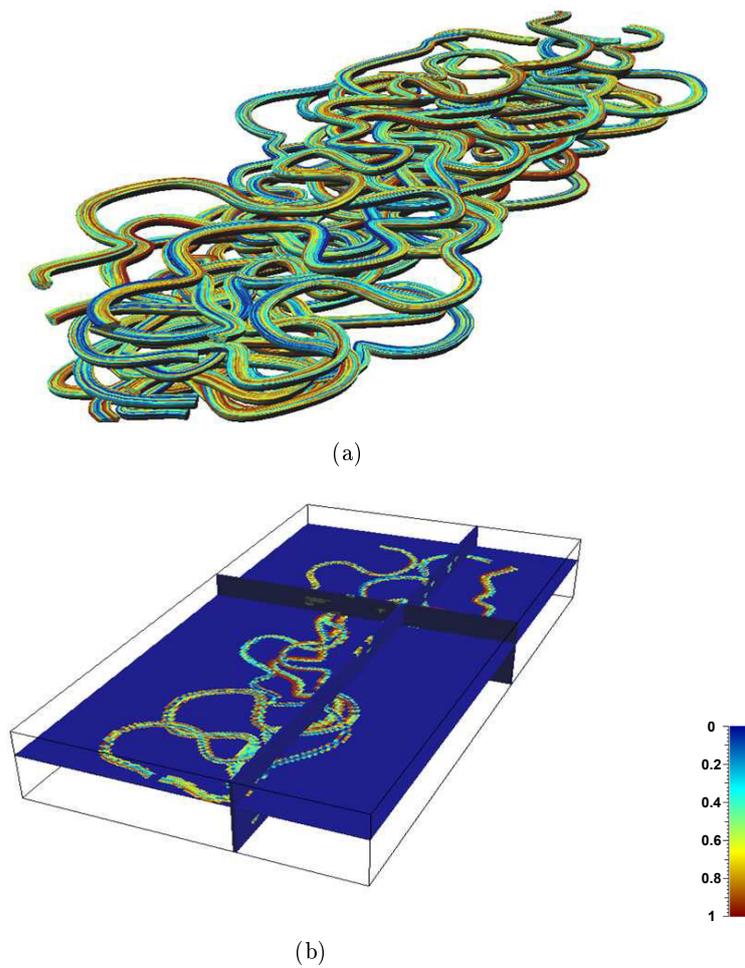


FIGURE 3.21 – MISE À L'ÉCHELLE DE LA POROSITÉ DU RÉSERVOIR, SIMULÉE PAR UNE SGS NON CONDITIONNÉE SUR DES CHENAUUX (DANS CE CAS, LA MÊME GRAINE STOCHASTIQUE A ÉTÉ UTILISÉE POUR LA SIMULATION DE LA POROSITÉ DE CHAQUE CHENAL). (a) Chenaux divergents à mettre à l'échelle réservoir. (b) Résultat de la mise à l'échelle.

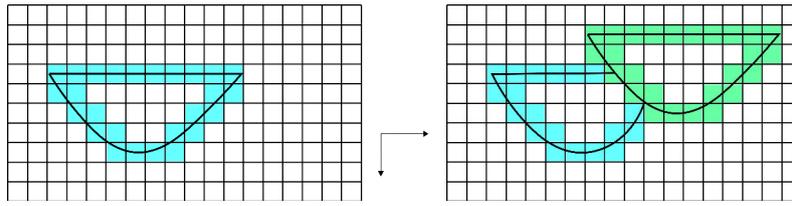


FIGURE 3.22 – ILLUSTRATION DE LA RASTERISATION DE PLUSIEURS CHENAUX EN PRENANT COMPTE DE L'ORDRE DE DÉPÔT ET DU PROCESSUS D'ÉROSION.

3.6.3.1 Rasterisation des surfaces

Le processus de rasterisation est réalisé objet par objet en suivant l'ordre défini précédemment (Figure 3.22). Les surfaces limitantes de chaque objet sont transposées dans la grille en utilisant la méthode de rasterisation de Bresenham, appliquée aux triangles dans l'objectif de limiter les temps de calcul des intersections dans l'espace réel [Bresenham, 1965]. Ce processus fournit un ensemble de cellules représentant une approximation des surfaces limites des différents objets sédimentaires (Figure 3.23(a)).

3.6.3.2 Rasterisation des volumes

L'ensemble des cellules rasterisées délimite le volume de chaque objet sédimentaire. Nous proposons d'utiliser une méthode de parcours pour remplir ces volumes. Chaque cellule appartenant à un objet se voit attribuer une valeur correspondant à sa position dans la liste ordonnée des objets. Le processus de remplissage scanne la grille verticalement, et dès qu'une cellule non vide est détectée, les cellules au-dessus sont remplies avec la valeur de l'objet correspondant (Figure 3.23(b)). Le remplissage s'arrête lorsqu'une cellule de valeur égale ou supérieure à celle de l'objet considéré alors est trouvée. Ce processus est répété pour tous les objets d'ordre plus élevés (Figure 3.23(c)). Quand des cellules d'un objet sont présentes dans un objet de plus grand ordre, elles n'impactent pas le remplissage et sont écrasées afin de reproduire le processus d'érosion qui a construit cette structure supplémentaire (Figure 3.23(d)). Le résultat de la rasterisation d'une superposition complexe des chenaux est montré dans la Figure 3.24.

L'objet rasterisé peut être utilisé pour la définition des limites des changements d'échelle des propriétés pétrophysiques simulées sur les structures sédimentaires. Cette utilisation est particulièrement intéressante pour les propriétés de surface qui sont transférées en tant que multiplicateurs de transmissibilité.

3.6.3.3 Principe des multiplicateurs de transmissibilité

Là où des corps argileux sont simulés, il est nécessaire de mettre cette information à l'échelle de la grille [Stright *et al.*, 2006, Li et Caers, 2011]. En parallèle de la rasterisation des surfaces NURBS en faces de cellules, des multiplicateurs de transmissibilité sont appliqués sur les faces proches des surfaces porteuses d'hétérogénéités. Les multiplicateurs de transmissibilité sont utilisés pour transférer les informations d'hétérogénéités à petite échelle dans la grille réservoir, en discrétisant les barrières imperméables aux fluides pour le simulateur d'écoulement.

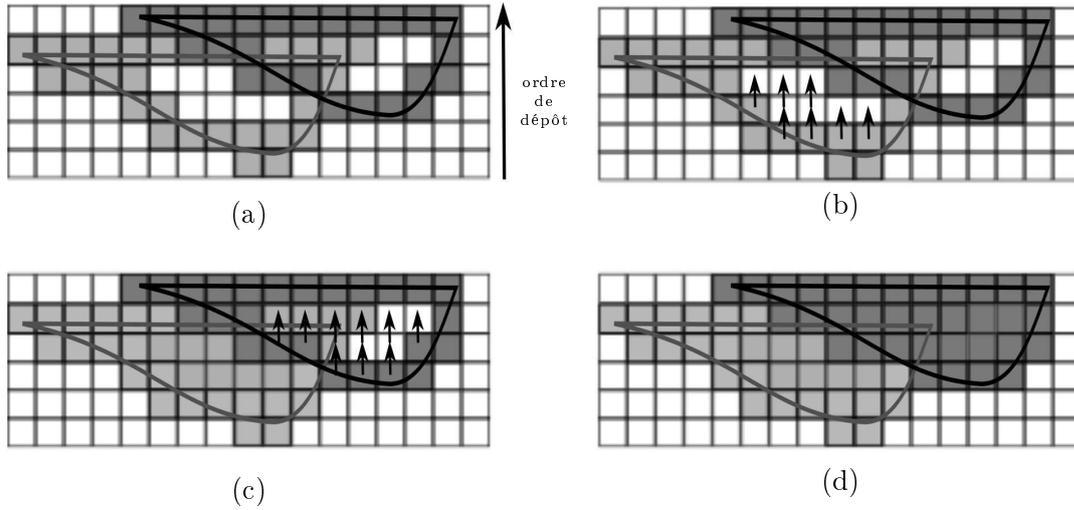


FIGURE 3.23 – REMPLISSAGE DE LA RASTÉRISATION DES STRUCTURES SÉDIMENTAIRES. (a) Les surfaces des limites du chenal sont rasterisées en utilisant la méthode de Bresenham. (b) Les chenaux rasterisés sont remplis verticalement un par un selon l'ordre de dépôt. Le processus commence par remplir verticalement à partir d'une cellule rasterisée jusqu'à la prochaine cellule avec un ordre de dépôt égal ou supérieur. (c) Une fois le premier chenal rempli, le processus est répété pour le chenal suivant (d) Résultat final.

Dans les logiciels de simulation d'écoulement, pour des grilles dont les propriétés sont définies au niveau des nœuds des cellules (corner-point), trois multiplicateurs de transmissibilité sont définis pour les trois directions de l'espace comme illustré dans la Figure 3.25. Ils contrôlent les flux entre deux nœuds comme expliqué dans les équations 3.10 et 3.11 tel que

$$q_f = v_{i-1/2}(p_i - p_{i-1}), \quad (3.10)$$

Avec q_f le flux entre deux cellules i et $i - 1$ données par p_i , la pression dans la cellule i et $v_{i-1/2}$ la transmissibilité de la face entre les cellules i et $i - 1$,

$$v_{i-1/2} = \frac{A\lambda}{B\Delta x} k_{x_{i-1/2}} v_m, \quad (3.11)$$

Avec v_m le multiplicateur de transmissibilité, A l'aire de section au travers de laquelle passe le flux, λ la mobilité du fluide, B le facteur de volume du fluide, Δx la distance entre le nœud i et le nœud $i - 1$, et $k_{x_{i-1/2}}$ une moyenne harmonique des perméabilités effectives des cellules correspondant aux nœuds i et $i + 1$ définie par

$$k_{x_{i-1/2}} = \frac{\Delta x_i + \Delta x_{i-1}}{\Delta x_i/k_i + \Delta x_{i-1}/k_{i-1}}. \quad (3.12)$$

3.6.3.4 Transfert des propriétés de surface à la grille

Une surface NURBS peut traverser les faces des cellules d'un grille cartésienne de différentes façons, qui sont présentées dans la Figure 3.26. Nous devons déterminer une méthode systématique qui pourrait être appliquée dans tous les cas de figures. Une méthode de rasterisation d'une surface NURBS est proposée. Seules les faces

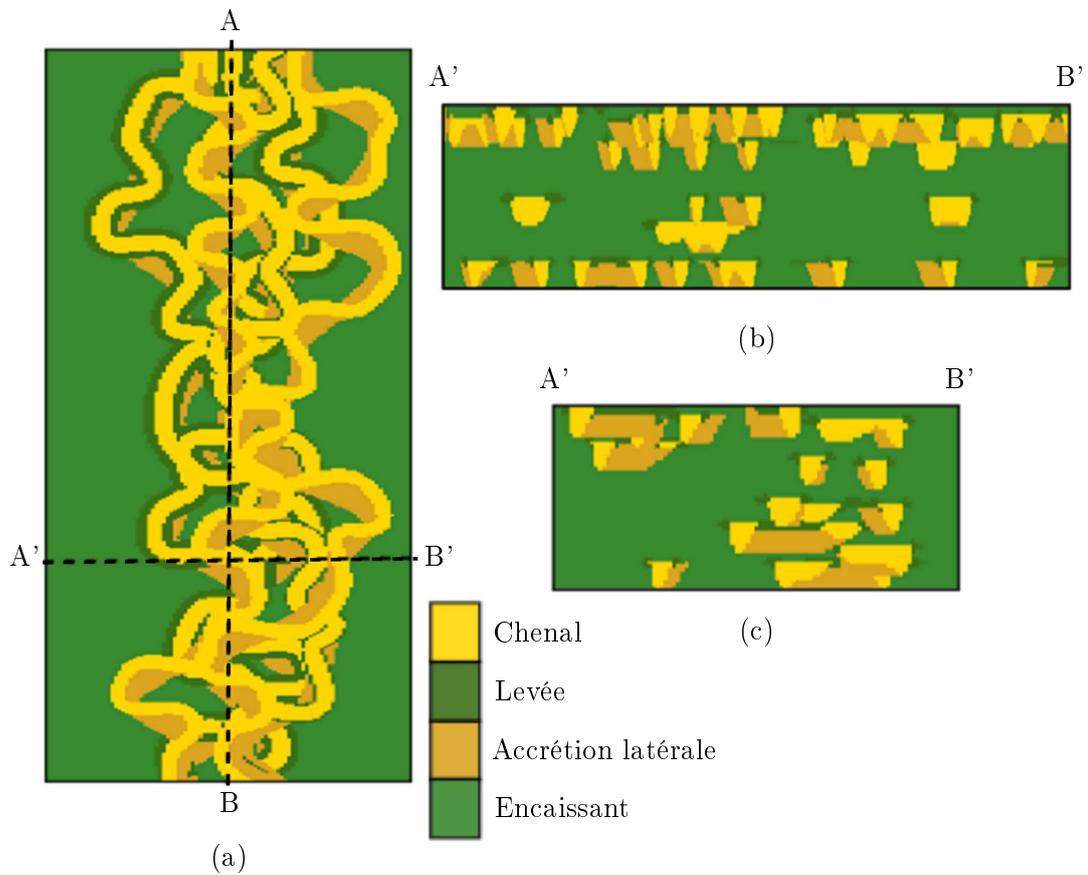


FIGURE 3.24 – RÉALISATION D'UN ENVIRONNEMENT DE DÉPÔTS FLUVIATILES REPRÉSENTANT DES CHENAUx AVEC LEURS BARRES D'ACCÉRIION LATÉRALE ET LEURS LEVÉES DANS UNE GRILLE RASTÉRISÉE. (a) Vue de dessus. (b) Vue en coupe dans la longueur avec une exagération verticale de $\times 3$. (c) Vue en coupe dans la largeur avec une exagération verticale de $\times 3$.

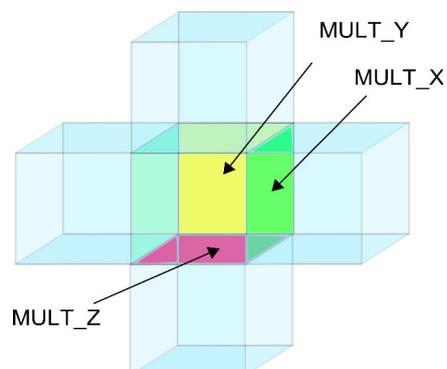


FIGURE 3.25 – LOCALISATION DES MULTIPLICATEURS DE TRANSMISSIBILITÉ COMME DÉFINIS DANS LE SIMULATEUR D'ÉCOULEMENT ECLIPSE, POUR UNE CELLULE IJK.

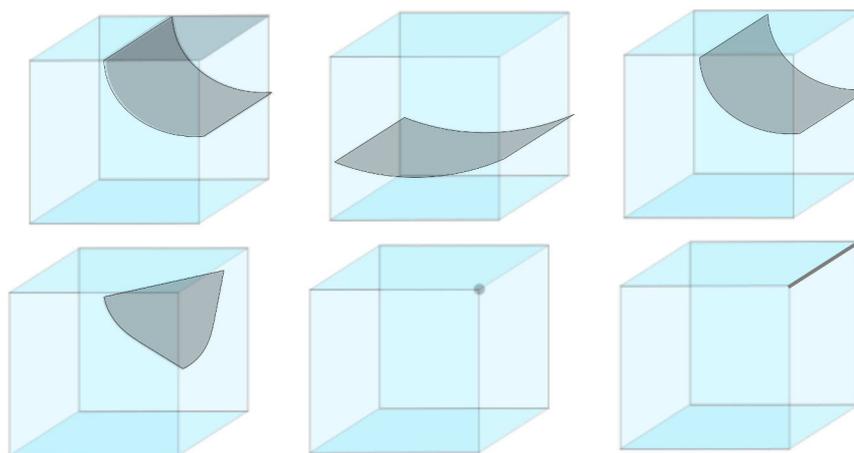


FIGURE 3.26 – DIFFÉRENTS CAS D'INTERSECTION ENTRE UNE SURFACE NURBS ET DES CELLULES DE LA GRILLE.

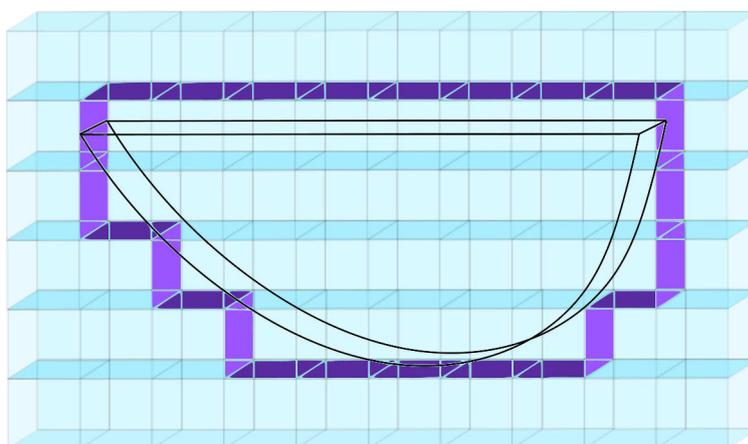


FIGURE 3.27 – ILLUSTRATION DE LA RASTÉRISATION D'UN CHENAL EN PRENANT POUR EXEMPLE UNE SECTION DE CE CHENAL. Le chenal est représenté en trait plein. Les faces sélectionnées sont toujours à l'extérieur de l'objet et sont de couleur violette.

externes des cellules traversées par la surface NURBS sont conservées. Pour chaque cellule intersectée, chaque nœud de la cellule est testé pour déterminer si il est inclus dans l'objet géologique. Si tous les coins d'une face sont à l'extérieur de l'objet, grâce à la construction de l'enveloppe convexe des objets NURBS, cette face est externe et fait partie de la rasterisation de l'objet. Un exemple est fourni dans la [Figure 3.29](#).

Une fois que les cellules intersectées ont été identifiées, la valeur de la perméabilité de la cellule est calculée comme expliqué dans la [Figure 3.28](#). Si la perméabilité est faible, un multiplicateur de transmissibilité est créé au niveau de la face voulue et la valeur calculée est assignée à la propriété $MULT_X$, $MULT_Y$ ou $MULT_Z$.

L'approche actuelle tend à surestimer l'aire des hétérogénéités surfaciques. Pour résoudre ce problème, nous envisageons d'estimer, pour chaque cellule concernée, le rapport de volume entre l'objet et la cellule et ensuite de choisir la face interne ou externe. Un inconvénient de cette méthode, est que des connexions entre les chenaux pourraient être modifiées.

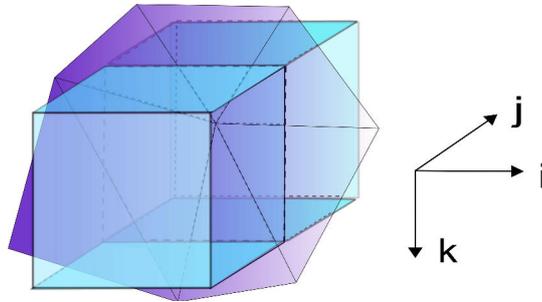


FIGURE 3.28 – CALCUL DE LA VALEUR ASSIGNÉE À LA FACE RASTÉRISÉE. La liste des triangles formant la surface NURBS est scannée afin de sélectionner uniquement les triangles intersectant la cellule considérée. Une moyenne de toutes les valeurs des nœuds des triangles intersectés, est réalisée et affectée au centre de la cellule. Selon l'orientation de la face extérieure à l'objet considérée, la valeur est assignée à la propriété $MULT_X$, $MULT_Y$ ou $MULT_Z$.

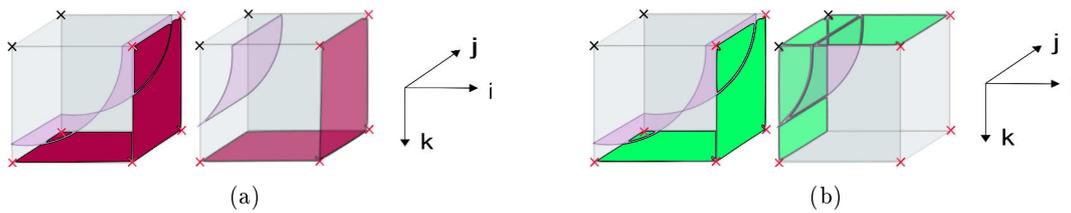


FIGURE 3.29 – TECHNIQUE DE RASTÉRISATION DE SURFACE DANS LA GRILLE. Les points rouges sont à l'extérieur de l'objet tandis que les points noirs sont à l'intérieur. Quatre points rouges forment une face de rasterisation. (a) Technique actuelle. (b) Perspectives et améliorations de la technique actuelle de rasterisation en calculant les faces les plus proches.

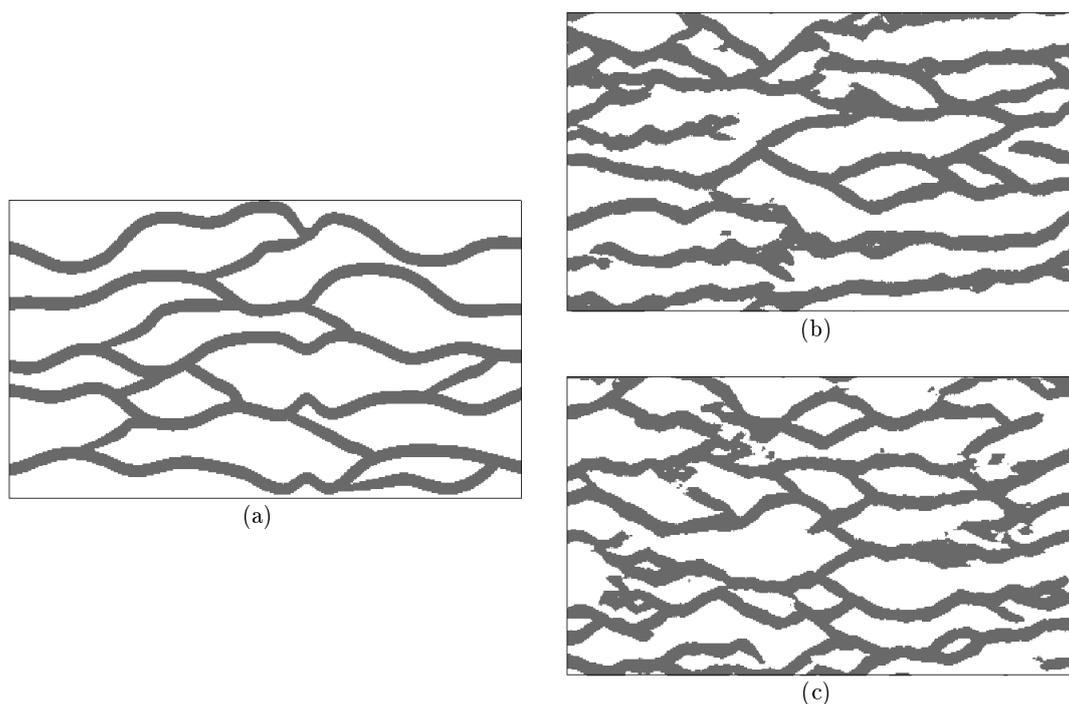


FIGURE 3.30 – SIMULATION DE FACIÈS D’UN CHENAL (EN GRIS) EN UTILISANT UNE MÉTHODE STATISTIQUE MULTI-POINTS. (a) Image d’entraînement d’une rivière anastomosée avec un faciès (chenal) construite en utilisant la rasterisation modèles de chenaux connectés. (b) Une réalisation de la simulation. (c) Autre exemple de réalisation.

3.6.3.5 Test sur une image d’entraînement

Pour illustrer une des applications de la rasterisation des structures sédimentaires, nous proposons de construire une image d’entraînement pour une simulation multi-points (MPS). Un ensemble de chenaux connectés est construit, formant un environnement théorique de dépôt alluvial anastomosé (Figure 3.30(a)). Une MPS est lancée pour obtenir plusieurs réalisations (Figure 3.30(b) et (c)). Les résultats sont cohérents avec ceux présentés dans la littérature [Strebelle, 2002], ce qui montre que l’utilisation des simulations basées sur des objets peut être une manière efficace et rapide de construire des images d’entraînement adaptées.

3.7 Conclusion

Ce chapitre introduit une méthode pour générer des modèles stochastiques de chenaux en s’inspirant des processus liés aux dépôts tels que la migration latérale de faciès et l’abandon des méandres. La simulation génère pour chaque chenal une trajectoire et un ensemble de paramètres de forme. Associés à la croissance des chenaux les barres d’accrétion latérale peuvent être reconstruites à partir des différentes étapes de la migration.

Certains des processus de dépôt majeurs qui interviennent dans la mise en place des chenaux tels que l’aggradation et l’avulsion ne sont pas bien pris en compte. En ce qui concerne l’aggradation, il serait possible de reprendre l’équation de migration en y

ajoutant une composante de migration verticale. Certains travaux ont tout de même été entrepris dans le cadre de la gestion des avulsions en particulier sur la cohérence des chenaux au niveau de leurs connexions et de la gestion des intersections afin de traiter par exemple le cas où un chenal issu d'une avulsion est reconnecté plus en aval avec le chenal principal.

Il est nécessaire d'ajouter à ce processus de génération de structures sédimentaires des méthodes de conditionnement aux données de puits qui donnent des informations sur la position et l'orientation des chenaux et aux données secondaires telles que des probabilités de faciès. L'approche par rétro-migration des chenaux semble être prometteuse pour le conditionnement des chenaux tout en reproduisant les barres d'accrétion latérale. Une méthode de conditionnement de la forme des chenaux à des données denses issues d'images géologiques est décrite dans le chapitre suivant.

Concernant la modélisation de propriétés, le maillage conforme des objets permet de modéliser les hétérogénéités internes des structures sédimentaires et de les transférer à une grille globale. Les hétérogénéités à l'interface entre les structures sédimentaires (p.ex. lentilles d'argile entre les cliniformes des barres d'accrétion latérale) sont également considérées. L'amélioration et la finalisation du changement d'échelle des hétérogénéités pour les transférer à une grille réservoir est une des perspectives majeures de ces travaux.

Chapitre 4

Application des modèles sédimentaires à l'analyse d'image

Sommaire

4.1	Abstract	96
4.2	Introduction	96
4.3	Object-based edge detection	97
4.3.1	Model of sedimentary objects	97
4.3.2	Edge filtering based on the distance to interpreted objects	99
4.4	Channel optimization using active contours	101
4.4.1	Active contour model principle	101
4.4.2	Adaptation for channel interpretation from geological images	102
4.4.3	Results and discussion	103
4.5	Point bar estimation	108
4.5.1	Retro-migration process	108
4.5.2	Results and discussion	108
4.6	Conclusions	108
4.7	Acknowledgements	110
Appendix A		110
A.1	Image pre-processing	110
A.2	Canny Edge	111

S'il existe une vaste littérature sur l'analyse automatisée d'images numériques, l'interprétation géologique de photographies satellites, de sections sismiques ou encore d'imageries de puits reste largement l'objet d'interprétations manuelles souvent répétitives. En effet, l'identification d'objets géologiques s'appuie essentiellement sur des pointés de lignes, lesquelles sont ensuite utilisées pour construire les principales interfaces entre objets. Si cette approche se justifie souvent pour des objets structuraux, elle atteint ses limites pour des objets sédimentaires, pour lesquels il existe par ailleurs de nombreux modèles conceptuels d'organisation spatiale à différentes échelles, à la fois en termes de structures internes et de relations avec les objets environnants [Miall, 1996, Ford et Pyles, 2014]. Les approches classiques d'analyse d'image (seuillage, lissage, morphologie mathématique, transformée de Hough, etc), pour utiles qu'elles soient, négligent complètement ces modèles conceptuels de corps sédimentaires.

D'autre part une approche de modélisation des structures sédimentaires basée sur des surfaces déformables facilement éditables est proposée dans le Chapitre 2. Les modèles sont construits pour reproduire les concepts liés à leurs formes géométriques.

L'objectif de ce chapitre est donc de tenter de réconcilier modélisation par objets $3D$ et l'analyse d'images sur des surfaces de coupe arbitraires (topographie, ligne sismique, paroi de forage). Un des enjeux de ce travail est en particulier de faciliter la caractérisation quantitative du sous-sol en limitant la tâche de l'interpréteur au choix de scénarios sédimentaires et à la sélection d'objets, et à l'analyse de résultats, de manière à accélérer le travail d'interprétation et à le rendre plus facilement reproductible et systématique. Ce type de problème a été en grande partie étudié en médecine informatique pour l'analyse d'images de tomographie médicale. Les approches de types contours actifs ou volumes actifs [Kass *et al.*, 1988, Shen *et al.*, 2009] nous paraissent ainsi prometteuses, mais elles nécessitent un travail de fond pour s'adapter d'une part à la variabilité, au bruit et à la nature multivariable des mesures, et d'autre part aux types d'objets à identifier, qui sont généralement moins bien contraints que dans des applications médicales.

Semi-automatic interpretation of 3D-Sedimentological
Structures on Geological Images : an object based
approach

Jeremy RUIU, Guillaume CAUMON, Sophie VISEUR and Christophe ANTOINE

Interpretation, 2015, vol.3, no. 3, p. SX63-SX74

4.1 Abstract

The characterization of sedimentary structures is an important step to construct quantitative models of sedimentary deposits from digital images such as 3D seismic data, satellite images or digital outcrops. However, the interpretation of these structures generally consists in tedious line pickings followed by surface modeling to define geobodies. Automatic geobody extraction is an alternative but it is sensitive to image noise and does not account for prior sedimentary knowledge. We propose to combine minimal picking by an interpreter with object-guided image processing and optimization to achieve fast and semi-automatic geobody interpretation. Our approach uses a realistic volumetric geobody representation based on Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS) which can easily be deformed by the interpreter and numerical optimization. A custom edge detection guided by some initial rough interpretations is performed to strengthen the most relevant edges in the picture. An automatic optimization is then computed to fit the initial geobody to these highlighted edges. This approach is applied on satellite pictures showing alluvial channels and some preliminary results on 3D seismic time slices are also presented. The interpreted channels are then used in a retro-deformation process to automatically reconstruct the point bars. This semi-automatic method opens new perspectives to help interpreters rapidly come up with 3D models of sedimentary structures from subsurface and analog surface data sets.

4.2 Introduction

The impact of small scale structures on subsurface heterogeneities and dynamic reservoir behavior is discussed in several studies [Haldorsen et Lake, 1984, Desbarats, 1987, Jackson et Muggeridge, 2000, Novakovic *et al.*, 2002, Jackson *et al.*, 2009]. Therefore, it is necessary to calibrate reservoir and analog models at different scales with a large range of observation data (Lidar analogs, high resolution seismic, borehole imaging, etc.). Statistical information on these sedimentary structures can be deduced from outcrop analogs [Adams *et al.*, 2009, van Lanen *et al.*, 2009, Pranter *et al.*, 2007, Stright *et al.*, 2014]. Recent advances in imaging technologies let us monitor small scale structures, down to 25 cm for 2D shallow seismic acquisition [Reijenstein *et al.*, 2011]. The subsurface seismic images allow identifying relatively large scale heterogeneities, in order to guide subseismic heterogeneity characterization [Hubbard *et al.*, 2011, Rabelo *et al.*, 2007].

The automatic extraction of such complex geometries out of image data has been widely considered especially in Medical Imaging [McInerney et Dehmeshki, 2003, Shen *et al.*, 2009, Tauber *et al.*, 2009, Tsai *et al.*, 2003]. These methods generally rely on the extraction of preliminary information about object zones or boundaries. Two techniques are distinguished : the edge detector and the image segmentation. Edge detector (e.g. Canny Edge Detector [Canny, 1986]) aims at extracting points or lines where the image intensity is discontinuous. Image segmentation gathers zones where image intensity shares the same characteristics. The result of an image segmentation can be either the contour of a region [Kass *et al.*, 1988] or the region itself [MacQueen *et al.*, 1967]. However, these types of approaches are well adapted for high quality images with a small level of noise. In the case of lower signal to noise ratio as in most seismic data sets, user-defined *a priori* knowledge provides essential information to

interpret the structures of interest.

In this article, we propose to perform an object-based modeling of sedimentary structures quantitatively honoring image data. The main proposed strategy is : first, to use a preliminary rough 3D model of the structure to extract and; second, to optimize the shape and position of the 3D model to match the information carried by the image. We aim at providing an object model capable of representing most natural sedimentary structures at different scales using a relatively limited set of parameters. Geobodies are defined by a boundary representation ; each bounding surface is constructed as a parametric deformable surface. The parametric surfaces proposed here are the Non-Uniform Rational Basis Splines (NURBS) which are commonly used in computer aided design (CAD) [Piegl et Tiller, 1995]. They are constructed using a set of control points that define the shape of the model in Euclidian space (this space may be the present-day-space or the depositional space for relatively planar structures of the depositional space for domains affected by faults and folds, see [Mallet, 2014, Wu et Hale, 2015]). These control points are interpolated by rational piecewise continuous functions to obtain a smooth surface that represents the actual boundary of the objects to model. NURBS are interesting for modeling abundant sedimentary structures since they can be edited and deformed with a small number of points and have a small data storage and interactive computation times [Ruiiu *et al.*, 2014a,b]. Several sedimentary structures can be produced thanks to the proposed template forms but this article focuses on generating channels and point bars.

This template form serves as support to help the user to define a preliminary rough interpretation of channel shapes in order to semi-automatically retrieve their actual 3D geometries based on image features. The interpretation workflow proceeds as follows (Figure 4.1) ; the interpreter picks an approximate object geometry, which guides edge detection on the image. These edges are then used to deform the initial shape to match the image features. Finally, based on the interpreted channels a modeling process of their related point bars is proposed.

4.3 Object-based edge detection

The interpretation of geological objects from geophysical or remote sensing images relies on the detection of salient features. For instance, the edges are used by Halpert [2012] for the interpretation of salt bodies. They represent the limits of the structures present in the image. The proposed edge detection process is derived from the Canny Edge Detector [Canny, 1986] and takes into account an initial approximate interpretation of the sedimentary structure defined by an interpreter.

4.3.1 Model of sedimentary objects

Models of sedimentary structures are constructed using parametric surfaces assembled to delineate closed volumes [Ruiiu *et al.*, 2014a,b]. These surfaces are mathematically represented as NURBS, which were first introduced by Versprille [1975] and are thoroughly described by [Piegl et Tiller, 1995]. A NURBS surface is defined as a

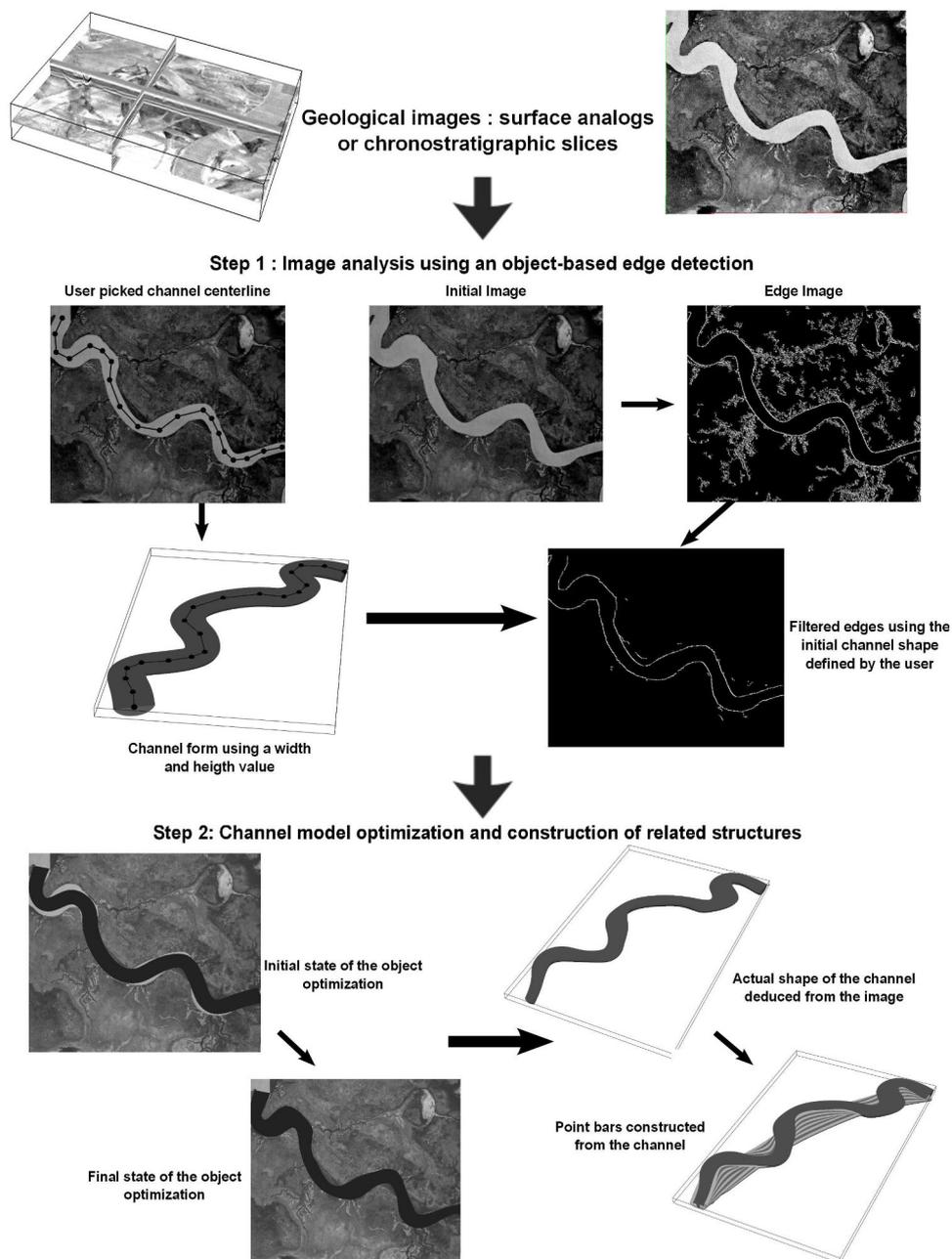


FIGURE 4.1 – APPROACH PROPOSED TO AUTOMATICALLY RETRIEVE SEDIMENTARY STRUCTURES FROM IMAGES. . Approach proposed to automatically retrieve sedimentary structures from images.

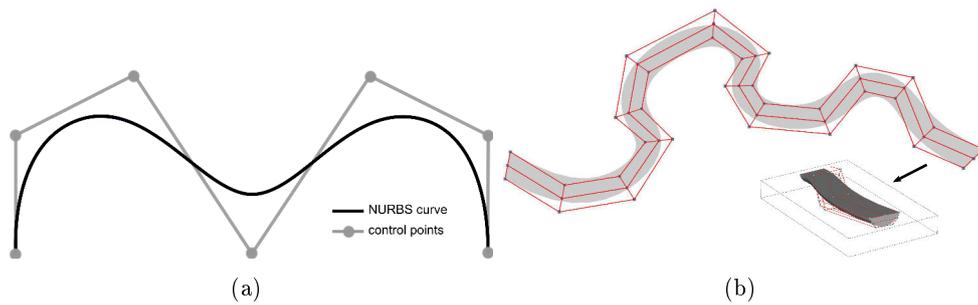


FIGURE 4.2 – PRINCIPLE OF A NURBS AND MODEL OF A CHANNEL CONSTRUCTED USING NURBS SURFACES (A) THIRD DEGREE PART DEGREE NURBS CURVE WITH CONTROL POINTS. (B) CHANNEL MODEL CONSTRUCTED USING NURBS SURFACES. . Principle of a NURBS and model of a channel constructed using NURBS surfaces (a) Third degree part degree NURBS curve with control points. (b) Channel model constructed using NURBS surfaces.

tensor product of curves with two independent parameters (u, v) by :

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j}}, \quad (4.1)$$

where p, q are the degrees of the NURBS in each direction of the parametric space, $P_{i,j}$ is one control point and $[n + 1] \times [m + 1]$ is the number of control points, $W_{i,j}$ is the weight of the control point and $N_{i,p}(u), N_{j,q}(v)$ are the p^{th} -degree and q^{th} -degree basis functions [Piegl et Tiller, 1995] Figure 4.2(a).

In particular, a channel form is constructed using three NURBS surfaces by defining channel sections from a polyline picked by the user and three values specifying : the channel section width and the height as well as the asymmetry of the channel Figure 4.2(b). The centerline of the channel may be adaptively refined to reflect changes in channel curvature, width or height.

4.3.2 Edge filtering based on the distance to interpreted objects

Edge detection processes are used to reduce the amount of data in an image and particularly to identify contours that could delimit regions of interest. Meaningful edge detection is difficult to achieve because high frequency signals such as noise or textures can be mistaken for edges. The images considered in this paper are in grayscale and the operations are applied on the intensity (e.g. black intensity is 0 and white is 1). The edges are detected using Canny's approach [Canny, 1986]. The Canny Edge Detector is divided in five steps. At first, a preprocessing is applied to reduce the level of noise. For this, we use the Kuwahara filter [Kuwahara et al., 1976], which is an edge preserving smoothing process. This smoothing approach has shown its value when applied to seismic images [AlBinHassan et al., 2006, Halpert, 2012]. The gradient in the image is then computed and the local maxima of the gradient are marked as edges. A double thresholding is applied to suppress the edges with a low magnitude and to determine sure and potential edges. Finally the potential edges are

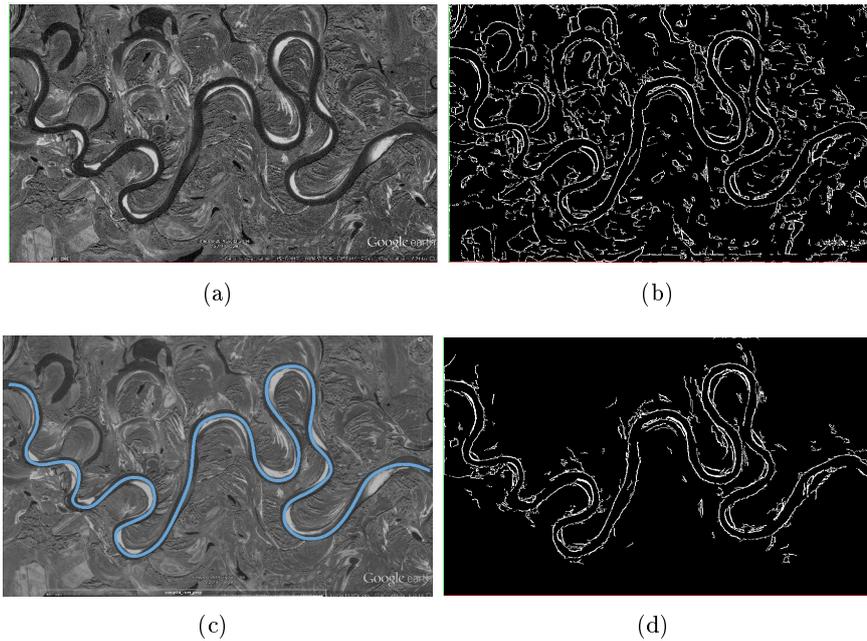


FIGURE 4.3 – IMPACT OF THE GUIDING OBJECT ON THE EDGE DETECTION RESULT. (A) ORIGINAL IMAGE [GOOGLE EARTH, OCTOBER,10 2010]. (B) EDGE OBTAINED WITH THE CANNY EDGE. (C) ORIGINAL IMAGE WITH A USER-DEFINED GUIDING CHANNEL (IN BLUE). (D) RESULT OF A CANNY EDGE THAT TAKES INTO ACCOUNT THE GUIDING CHANNEL.. Impact of the guiding object on the Edge detection result. (a) Original image [Google Earth, October,10 2010]. (b) Edge obtained with the Canny Edge. (c) Original image with a user-defined guiding channel (in blue). (d) Result of a Canny Edge that takes into account the guiding channel.

marked as part of the final edges with the sure edges, if they are connected to these sure edges.

For an image with many apparent structures, many edges are generally detected by this process (Figure 4.3(b)), but not all of them are relevant to extract the contour of an object of interest (e.g. the channel on (Figure 4.3(a))). Therefore, we propose to guide the image analysis by an initial approximate geometry of the targeted geological object (Figure 4.3(c)). For instance, in the case of a channel, the geometry of the guiding object can be obtained from the manual picking of the channel axis and can be used to modify the strength of the edges. The results of the Canny Edge with a guiding structure are shown on Figure 4.3(d) : the majority of the edges that are not related to the channel of interest are eliminated. For this, we compute a distance field to the boundary of the guiding object in the pixel map of the image using a Euclidean Distance Transform [Saito et Toriwaki, 1994]. This distance field is combined with the edges according to :

$$\|\overrightarrow{E_{guided}}\| = \|\overrightarrow{E}\| \times proxy^n \times \left\| \frac{\overrightarrow{E} \cdot \overrightarrow{\nabla} proxy}{\|\overrightarrow{E}\| \times \|\overrightarrow{\nabla} proxy\|} \right\|, \quad (4.2)$$

where $\|\overrightarrow{E_{guided}}\|$ is the norm of the edges modified according to the shape and distance to the initial interpretation ; $\|\overrightarrow{E}\|$ is the strength of the edges obtained by the Canny Edge Detector on the image. The *proxy* is the proximity to the guiding object deduced

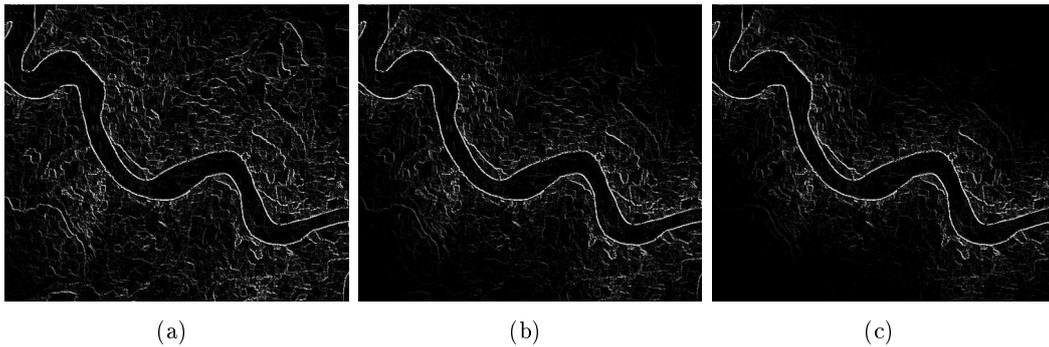


FIGURE 4.4 – IMPACT OF THE POWER OF THE *proxy* VALUE IN EQUATION 4.2 ON THE EDGE DETECTION RESULT. (A) POWER VALUE OF 1. (B) POWER VALUE OF 3. (C) POWER VALUE OF 5. Impact of the power of the *proxy* value in Equation 4.2 on the edge detection result. (a) Power value of 1. (b) Power value of 3. (c) Power value of 5.

from the distance field and normalized between 0 and 1. The power n given to *proxy* allows controlling the impact of the increasing distance to the object on the decrease of the edge strength (Figure 4.4). In the further applications of this edge detection process, the chosen power value is 3. Indeed, our experiments suggest that this value provides a good filtering of the far edges while preserving the ones related to the actual structure.

4.4 Channel optimization using active contours

The edge detection process is efficient for the detection of salient features in images. However, the extracted edges are limited for extracting continuous regions or shapes with particular forms. This type of task requires a process which implies, in particular, assumptions on the geometry to retrieve. The active contour techniques allow such constraints to be accounted for.

4.4.1 Active contour model principle

Active contour models, also termed as Snakes, refer to approaches that aim at optimizing contour positions and shapes [Papari et Petkov, 2011]. [Kass et al., 1988, Terzopoulos et al., 1988] introduce a methodology to extract large features from an image. This approach is widely used in image processing and is suitable to retrieve lines, region contours and even subjective contours (not actually present in the image but detected by the human vision). This technique must be initialized with an approximation of the desired shapes and a location close to the appropriate contour. Then, the Snake process is applied to optimize the shape and position of the contour (Figure 4.5). It is performed using an energy minimization process that takes into account three types of energy :

- An internal force, E_{int} , which represents the tension and stiffness of the curve. On one hand, the tension makes the Snake act like a membrane that bends toward the image edges. On the other hand, the stiffness tends to limit the deformation, for instance to prevent the formation of corners and artificial loops.

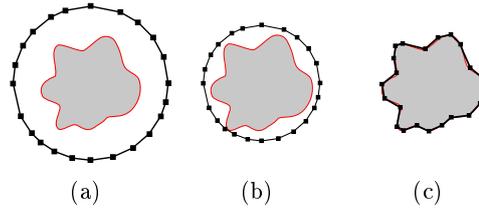


FIGURE 4.5 – EXAMPLE OF A SNAKE WITH AN INTERNAL ENERGY THAT SHRINKS MODEL AND THE EDGE OF AN OBJECT AS EXTERNAL ENERGY (IN RED) USED TO STOP THE PROCESS. (A) SNAKE INITIALIZATION. (B) OPTIMIZATION IN PROGRESS. (C) FINAL STATE OF THE SNAKE.. Example of a Snake with an internal energy that shrinks model and the edge of an object as external energy (in red) used to stop the process. (a) Snake initialization. (b) Optimization in progress. (c) Final state of the Snake.

- An external force, E_{ext} , which corresponds to the image energy that imposes the Snake to converge toward salient features such as particular intensity values or edges.
- User input constraints, formulated as an energy E_{con} , that come from external sources such as fixed point or preferential direction of optimization imposed by users.

Therefore, the Snake energy E_{snake} is defined by [Kass *et al.*, 1988]

$$E_{snake}(s) = \int_0^1 [E_{int}(v(s)) + E_{ext}(v(s)) + E_{con}(v(s))] ds, \quad (4.3)$$

where $v(s) = (x(s), y(s))$ are the x, y coordinates in the image of the point in the parametric coordinate s . This equation can be minimized using a gradient descent algorithm [Ivins *et al.*, 1995].

4.4.2 Adaptation for channel interpretation from geological images

The proposed approach to extract 3D geological shapes (e.g. channels) from 2D images relies on a simplified Snake process with a local optimization of the energy instead of a global one with a gradient descent. At first the user picks the center-line of the channel to interpret (Figure 4.6(a)). Then an initial NURBS channel is constructed using a width, height, and asymmetry ratio [Ruiu *et al.*, 2014b] (Figure 4.6(b)). This object is defined by a network of control points which defines the channel section geometry along the main channel axis. The energy minimization is performed using a 3×3 pixels mask around each point of the object to optimize. These points can be the control points, which is faster but less precise, or may be directly evaluated on the NURBS surfaces (Figure 4.6(c) and 2(d)). The components of this Snake energy are :

- The distance to the sure edges determined using a Euclidean Distance Transform on the object-based edges obtained through the edge filtering approach (Eq. 4.2), with the initial NURBS channel shape as a guiding object.
- A static energy which gives a higher impact to the central point of the mask, allowing fixing a point when there are several positions with the same energy value. This in particular prevents a point to move indefinitely along an edge.
- A uniformity energy that makes the displacement less expensive following a

channel section direction. The value is defined by $E_u = 1 - |\vec{d} \cdot \vec{s}|$ where \vec{d} represents a potential normalized displacement applied on a point of the object and \vec{s} normalized vector along the channel section corresponding to the point to move. This allows minimizing the distortion on sections.

These different energies are weighted and summed to determine the global energy driving the deformation of the initial channel interpretation to match the image edges. The distance to the sure edges is the component that sets the snake in motion, whereas the other ones are used to limit its displacement. For simplicity in our experiments, we chose to weight equally the limiting energies and to give a larger weight to the distance to the edges. Indeed, we found that the latter weight must be at least equal to the sum of those of the other energies in order to allow the channel model to move. Different weight values for the edge distance have been tested they do not seem to have a significant impact of the snake optimization as long as they are above this threshold.

In the proposed method, the 3D consistency is ensured throughout the deformation by maintaining the shapes of channel sections using the uniformity energy (Figure 4.7). However the process is still limited as the optimization is not global so the subjective edges can be missed, making the object shape highly sensitive to non-continuity in the edges. There is also approximation of the 3D object shapes as the optimization is done on the control point and it should be done directly on the NURBS surface. Finally it could be interesting to add hard constraints which would allow the interpreter to fix points or give trends to guide the optimization process.

The optimization can be performed directly on the NURBS surfaces forming the channel. It is done by defining a set of constraints. Knowing the parametric coordinates of constraints, the principle of this tool is to determine the control points to move and their better positions to satisfy all the different constraints [Piegl et Tiller, 1995]. For a surface, a system of equations is established by imposing a set of constraints $D_r^{k,l}$ at the parametric coordinates $(u, v)_r$ for the k^{th} and l^{th} partial derivatives of the NURBS interpolation function R_s of degree s :

$$\sum_{i=0}^{(n+1)(m+1)-1} R_s^{(k,l)}((u, v)_r) \Delta P_i = \Delta D_r^{(k,l)} \quad (4.4)$$

where p, q are the degrees of the NURBS in each direction of the parametric space, P_i are the control points and $[n+1] \times [m+1]$ is the number of control points. Performing the optimization directly on the NURBS brings each local constraint to have an impact at a larger range than with only a control point optimization. In particular, it also allows dealing with the highly non-continuous edges (subjective edges) due to the image noise or the object discontinuities due to object superimposition.

4.4.3 Results and discussion

First results on different satellite images are shown on Figure 4.7. In the proposed method, the 3D consistency is ensured throughout the deformation by maintaining the shapes of channel sections (Figure 4.7). However, the process is still limited as the optimization is not global so the subjective edges can be missed, making the object shapes highly sensitive to edge discontinuity. Moreover the optimization of the process

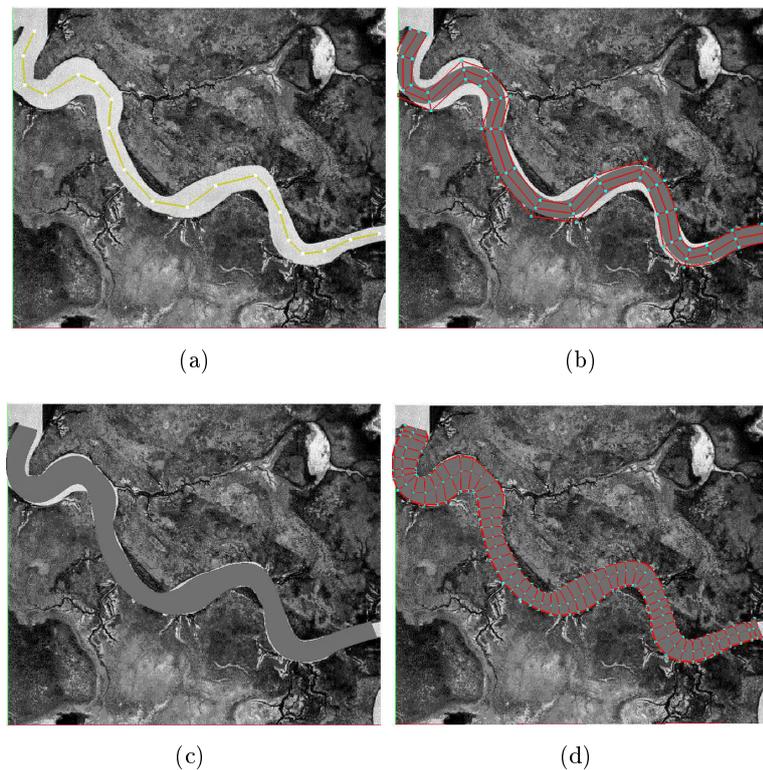


FIGURE 4.6 – RESULTS OF THE CURRENT SEMI-AUTOMATIC OPTIMIZATION OF A CHANNEL BASED ON IMAGE ENERGY. (A) INITIAL PICKED CENTER-LINE OF THE CHANNEL. (B) INITIALIZATION OF THE 3D CHANNEL FORM BY CHOOSING A WIDTH AND DEPTH VALUE. (C) CHANNEL GEOMETRY AFTER 20 ITERATIONS. (D) RESULT OF THE OPTIMIZATION PROCESS (40 ITERATIONS).. Results of the current semi-automatic optimization of a channel based on image energy. (a) Initial picked center-line of the channel. (b) Initialization of the 3D channel form by choosing a width and depth value. (c) Channel geometry after 20 iterations. (d) Result of the optimization process (40 iterations).

can be sensitive to the user initialization, in particular for channel with high width variations. If the initial picking is done close to the center of the channel, the process is not sensitive to the initial width value. However if the picking is less precise, the interpreter needs to be more accurate on the width initialization to avoid a collapse of the channel due to the edge distance force (a channel side can be closer to an edge on the wrong side of the actual channel). This problem can be addressed using editing tools on the NURBS channel to manually deform the object during the optimization process to guide the final shape of the object. As an improvement of this process, other forces could be added, for instance Cohen [1991] uses a "balloon" force that favors the dilation of the model over its contraction.

The proposed Snake approach can be used to extract channel shapes from 2D geological images but also from horizon slices on 3D seismic data. This method is applied on shallow time slices of a data set from offshore Indonesia presented in Klein *et al.* [2008], where channels are clearly visible. The edges are computed according to a channel initialized by the user (Figure 4.8(a) and 3(b)). The optimization is then performed directly on the NURBS surfaces representing the channel as explained in the previous section.

As mentioned above, performing the optimization directly on the NURBS brings each local constraint to have an impact at a larger range than with only control point optimization. In the seismic case study, this strategy allows interpretation robustness despite existing highly discontinuous edges (subjective edges) due to the seismic image noise or the channel erosions (Figure 4.8(b))

In this example, the optimization process remains in 2D but the edge detection has been tested on the 3D seismic data (Figure 4.9) by sequentially applying the 2D edge detection for each time slice. The object-based aspect of edges detection is performed using a channel initialization on a selected time slice (Figure 4.9(a)). The edge results are presented on (Figure 4.9(b)) showing the 3D traces of the channel. A 2D optimization of the channel is then performed using the edges from the selected time slice, (Figure 4.9(c)) shows that with an appropriate height value for the channel sections, the final result is quite close to the 3D traces even with only a 2D optimization.

It would be interesting to perform the optimization on the entire 3D data set, either sequentially or at once in 3D. This is easy in principle because the NURBS channel models are 3D objects on which three dimensional constraints can be applied. However, several challenges must be addressed to set these constraints from a 3D seismic image. A first idea could be to apply the optimization process in 2.5D by fitting several time slices at the same time. In this case, it would be necessary to determine the appropriate vertical channel resolution and to maintain the consistency of the displacement along the different slices. More importantly, a 2.5D approach with a deformation following time slices would not be sufficient to capture shapes with variable channel heights. An energy term that allows reconstructing 3D surfaces such as the balloon energy [Cohen, 1991] should therefore be added to allow for changes in channel height. Finally, in order to add information from the seismic cross section in a 3D optimization process, the edge detection technique should be modified to identify the trace of channels on cross sections. A 3D distance field to these edges could be used in an energy term in the Snakes method.

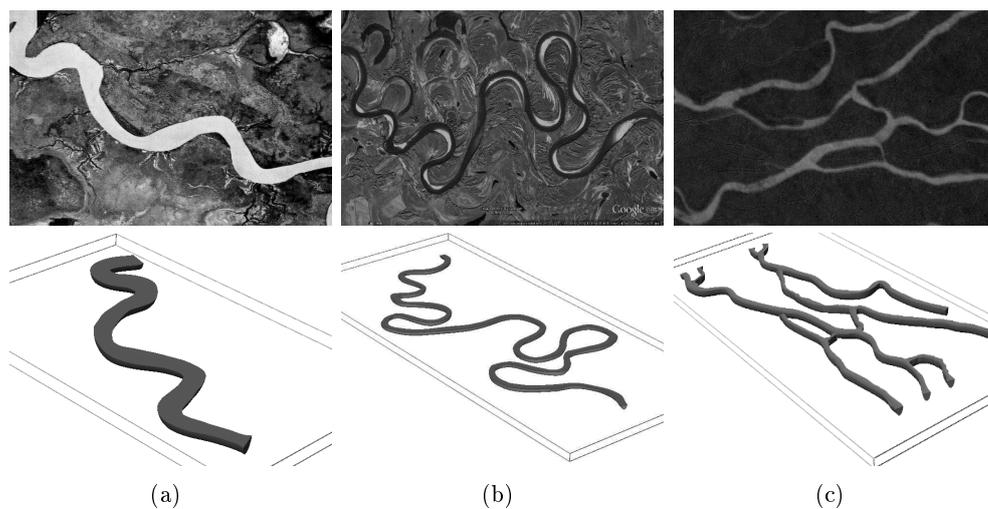


FIGURE 4.7 – 3D CHANNELS EXTRACTED FROM IMAGES. (A) SOUTH-ALIGATOR RIVER [GOOGLE EARTH, JULY,7 2012]. (B) SONSHUA RIVER [GOOGLE EARTH, OCTOBER,10 2010]. (C) ORINOCO DELTA [GOOGLE EARTH, APRIL,10 2013].. 3D channels extracted from images. (a) South-Aligator river [Google Earth, July,7 2012]. (b) Sonshua river [Google Earth, October,10 2010]. (c) Orinoco delta [Google Earth, April,10 2013].

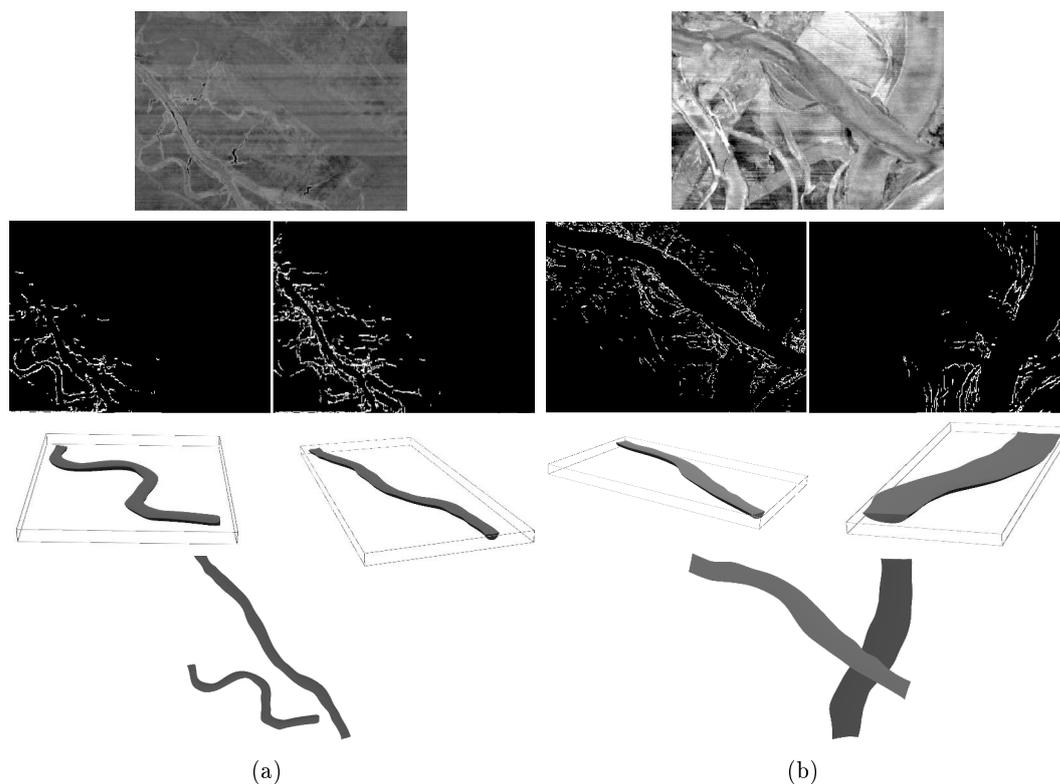


FIGURE 4.8 – APPLICATION OF ACTIVE CONTOURS TO EXTRACT OBJECTS FROM TWO DIFFERENT SEISMIC TIME SLICES. (A) EXTRACTION OF NON-INTERSECTING CHANNELS. (B) EXTRACTION OF INTERSECTING CHANNELS.. Application of active contours to extract objects from two different seismic time slices. (a) Extraction of non-intersecting channels. (b) Extraction of intersecting channels.

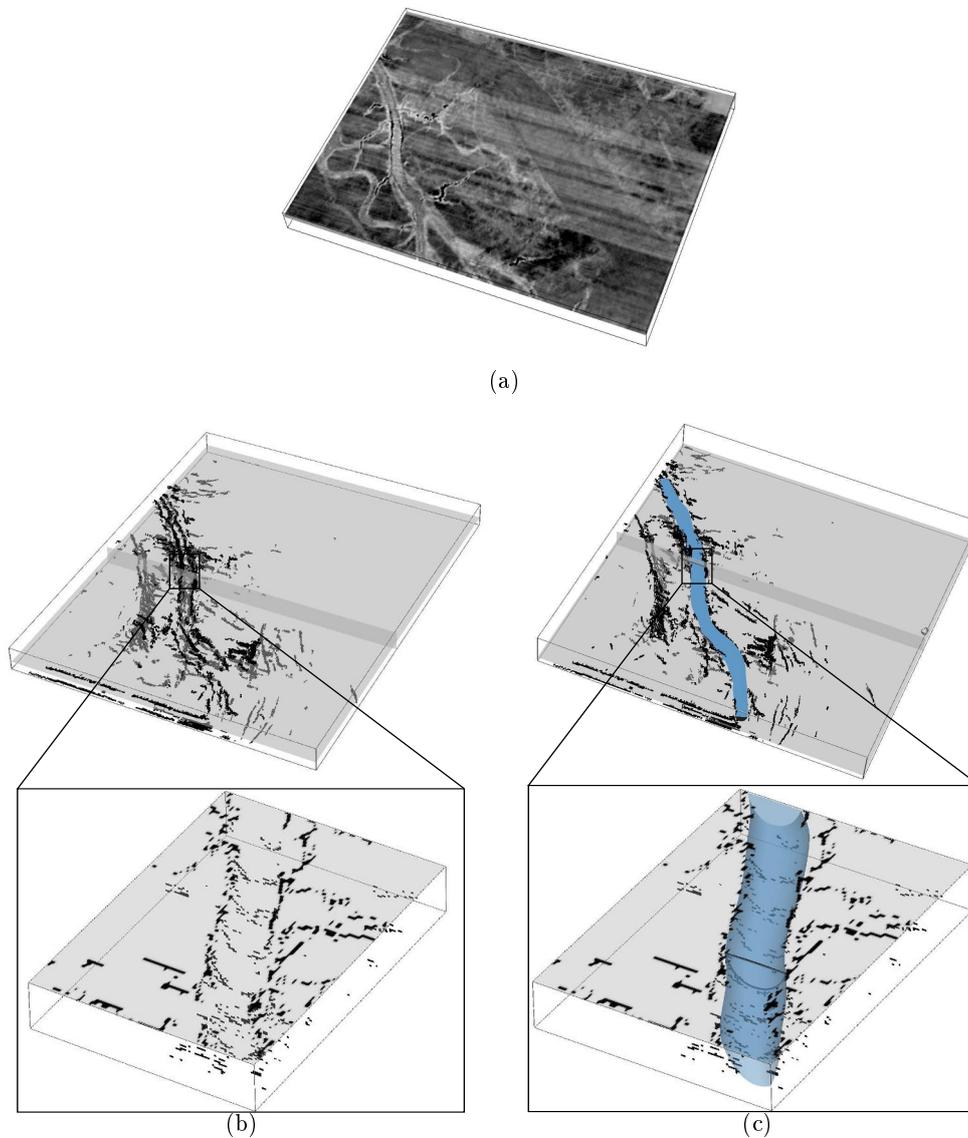


FIGURE 4.9 – $2D$ SNAKE OPTIMIZATION USING EDGES EXTRACTED FROM A $3D$ SEISMIC DATA SET. (A) THE TIME SLICE USED FOR THE CHANNEL INITIALIZATION AND OPTIMIZATION. (B) $3D$ EDGES EXTRACTED FROM THE SEISMIC DATA. THE DETAIL SHOWS THE SHAPE OF THE CHANNEL UNDERLINED BY THE EDGES. (C) RESULTING CHANNEL. THE DETAIL SHOWS THAT THE $2D$ OPTIMIZATION AND A GOOD INITIALIZATION PRODUCE A RESULT CLOSE TO THE ACTUAL SHAPE.. $2D$ Snake optimization using edges extracted from a $3D$ seismic data set. (a) The time slice used for the channel initialization and optimization. (b) $3D$ edges extracted from the seismic data. The detail shows the shape of the channel underlined by the edges. (c) Resulting channel. The detail shows that the $2D$ optimization and a good initialization produce a result close to the actual shape.

4.5 Point bar estimation

Some sedimentary structures, such as point bars formed in rivers by lateral accretion, may lead to the interpretation of a lot of small objects. In such a context, the proposed semi-automatic interpretation approach still would demand a lot of user interactions (e.g. center-line picking). The alternative presented in this paper is to use a pseudo-genetic approach by taking into account the impact of the lateral channel migration on the point bars deposits.

4.5.1 Retro-migration process

A retro-migration process, inspired by the forward migration process presented by [Viseur \[2004\]](#) and [Ruiu *et al.* \[2014a\]](#), is proposed to retrieve the growing iterations from an interpreted channel ([Figure 4.10\(a\)](#)). For each step of the migration process, the inflection points of the center-line, which represent the limit between two meanders, are calculated. They are computed using the bisector of the angle formed by three consecutive points of the center-line. If the scalar product of two consecutive bisectors, at two consecutive center-line points, is negative then the middle of the segment between the two points is considered as the inflection point. Then between two consecutive inflection points a segment is created and divided with the number of points present between the two inflections in the center-line. The vector between a center-line point and its equivalent on the segment gives the direction of retro-migration. The maximum of displacement occurs on the farthest point of the two inflection points and the length of displacement is given by the user.

4.5.2 Results and discussion

The proposed retro-migration process was applied on images of meandering channel presenting point bars. The final result of the retro-migration is shown on the [Figure 4.10\(b\)](#). Proposed point bar geometry is globally consistent with observations.

The current process is totally deterministic, which does not allow for precise matching of point bar geometry. Therefore, a possible improvement would be to make some retro-migration parameters variable in space and possibly to include a stochastic aspect in order to obtain several point bar realizations for the same channel.

Another perspective is to better manage large changes in channel trajectory, corresponding to oxbow lake formation. Indeed, our tests simulating the forward lateral migration of a channel show that point bars shapes are significantly different when oxbow lakes are generated ([Figure 4.11](#)). The current approach is then suitable for generating single-story meandering channel deposits [[Jordan *et Pryor*, 1992](#), [Miall, 2002](#), [Issautier *et al.*, 2014](#)] with no oxbow lake. To be able to reproduce multi-story meandering channel deposits [[Jordan *et Pryor*, 1992](#), [Miall, 2002](#), [Issautier *et al.*, 2014](#)], it would be interesting to account for the for positions of oxbow lakes and to integrate these integration in the retro-migration process.

4.6 Conclusions

We use a parametric volumetric model of sedimentary structures to perform 3D interpretations of alluvial geobodies from 2D images. The use of NURBS represen-



FIGURE 4.10 – MODELING OF AN OPTIMIZED CHANNEL’S POINT BARS USING A RETRO-MIGRATION PROCESS INSPIRED BY THE MIGRATION PROCESS PRESENTED BY RUIU *et al.* [2014A]. (A) OPTIMIZED CHANNEL ON THE SONSHUA RIVER [GOOGLE EARTH, OCTOBER,10 2010]. (B) POINT BARS WITH THE RETRO MIGRATION PROCESS (10 STEPS).. Modeling of an optimized channel’s point bars using a retro-migration process inspired by the migration process presented by Ruiiu *et al.* [2014a]. (a) Optimized channel on the Sonshua river [Google Earth, October,10 2010]. (b) Point bars with the retro migration process (10 steps).

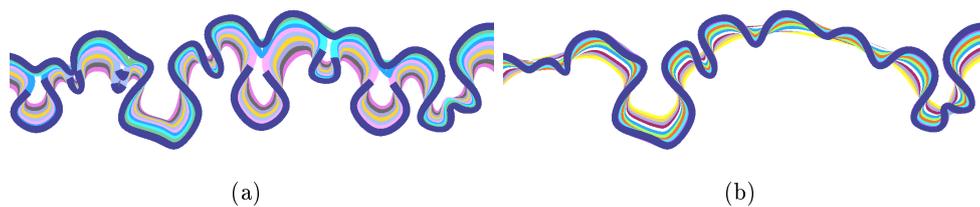


FIGURE 4.11 – COMPARISON BETWEEN THE RETRO-MODELING AND THE FORWARD SIMULATION OF A CHANNEL POINT BAR. (A) SIMULATION OF A CHANNEL WITH ITS OXBOW LAKES (IN DARK BLUE) AND ITS POINT BARS [RUIU *et al.*, 2014A]. (C) RETRO-MIGRATION OF THE SIMULATED CHANNEL.. Comparison between the retro-modeling and the forward simulation of a channel point bar. (a) Simulation of a channel with its oxbow lakes (in dark blue) and its point bars [Ruiiu *et al.*, 2014a]. (c) Retro-migration of the simulated channel.

tation for the boundary surfaces has interesting characteristics for modeling object boundary surfaces since NURBS are editable by moving a small number of points. Modeling sedimentary structures with deformable templates also offers possibilities for multiscale geometry. It has potential to interpret digital dense outcrop or analog models, borehole images, and seismic reflection data. In conjunction with most of analog reservoir studies (e.g. [Pranter *et al.* \[2007\]](#), [Adams *et al.* \[2009\]](#)) it also has a potential to help creating 3D models which could serve as training images for multiple-point geostatistics methods [[Renard *et Mariethoz*, 2014](#), [Mariethoz *et Renard*, 2014](#)].

Moreover, a process is proposed to automatically optimize the first user rough interpretation of channel shape and position according to image information. This process involves edge detection, image segmentation and Snake algorithms. In the short term, the image interpretation process will be extended to use the Snake method with a global optimization by minimizing the objective function using a gradient descent algorithm.

For interpreting complex meandering channel deposits, we finally propose a modeling of point bars based on the lateral migration of a channel. This avoids the need of many editing operations to retrieve an approximation of the actual point bars. This approach is for now purely deterministic and uses fixed parameters in space. An enhancement would be to add a stochastic component in order to simulate a larger range of shapes to have a better approximation of the actual shapes present in image data.

4.7 Acknowledgements

We would like to thank Adam Halpert and two anonymous reviewers whose comments contributed to improve this paper. This work was supported by the Gocad Research Consortium managed by ASGA (www.gocad.org). We thank all the academic and industrial sponsors of this Consortium, and Paradigm Geophysical for providing the SKUA-GOCAD software and SDK.

Appendix A

A.1 Image pre-processing

Different types of image pre-processing can be used to reduce high frequency noise in an image. This section focuses on two approaches, the Gaussian filter [[Hodson *et al.*, 1981](#)] and the Kuwahara filter [[Kuwahara *et al.*, 1976](#)]. The Gaussian filter is a linear low-pass filter widely applied before edge detection to reduce image noise because it is proven to be quasi-optimal for noise suppression [[Canny, 1986](#)]. A Gaussian function is used for calculating the transformation to apply for each pixel ([Figure A.1\(b\)](#)). In two dimensions the pixel intensity value is given by

$$I_G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}}, \quad (5)$$



FIGURE A.1 – IMAGE PRE-PROCESSING. (a) Original image. (b) Gaussian Filter. (c) Kuwahara filter.

where x is the horizontal distance and y is the vertical distance from the pixel to transform and σ is the standard deviation of the Gaussian distribution.

The Kuwahara filter [Bakker *et al.*, 1999] is a non linear edge preserving operator. The Kuwahara Kernel consists in a square window of $2a + 1$ side size, centered around a point (x, y) in the image. The kernel is divided in four smaller regions, R_i , defined by

$$R_i(x, y) = \begin{cases} [x, x + a] \times [y, y + a] & \text{if } i=1 \\ [x - a, x] \times [y, y + a] & \text{if } i=2 \\ [x - a, x] \times [y - a, y] & \text{if } i=3 \\ [x, x + a] \times [y - a, y] & \text{if } i=4 \end{cases} . \quad (6)$$

For each region the mean and the standard deviation are calculated and are used to determine the intensity value of the (x, y) point,

$$I_K(x, y) = \begin{cases} m_1(x, y) & \text{if } \sigma_1(x, y) = \min(\sigma_i(x, y)) \\ m_2(x, y) & \text{if } \sigma_2(x, y) = \min(\sigma_i(x, y)) \\ m_3(x, y) & \text{if } \sigma_3(x, y) = \min(\sigma_i(x, y)) \\ m_4(x, y) & \text{if } \sigma_4(x, y) = \min(\sigma_i(x, y)) \end{cases} . \quad (7)$$

The result on the Kuwahara filter is shown on Figure A.1(c). The major drawback of the Kuwahara filter is that it can create block artifacts in highly textured areas, due to the square shape of the kernel and of the regions [Papari *et al.*, 2007].

A.2 Canny Edge

The Canny Edge detector is a multi-step algorithm for edge detection defined by Canny [1986]. The first step is the use of a smoothing algorithm to reduce the image noise, usually a Gaussian filter. Then an edge is detected when the gradient of the grayscale intensity changes rapidly, which corresponds to a first-order discontinuity. The gradient is computed using a Sobel operator which is a discrete differentiation operator, computing an approximation of the image gradient. The Sobel operator is based on a 3×3 kernel defined by :

$$K_x = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad K_y = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Using the Sobel kernels, the norm of the gradient $\overrightarrow{G(x,y)}$ and the orientation $\Theta(x,y)$ of the gradient at the coordinate (x,y) can be calculated by :

$$\|\overrightarrow{G(x,y)}\| = \sqrt{(K_x * I(x,y))^2 + (K_y * I(x,y))^2}, \quad (9)$$

$$\Theta(x,y) = \text{atan}\left(\frac{K_y * I(x,y)}{K_x * I(x,y)}\right),$$

where $\|\overrightarrow{G(x,y)}\|$ is the norm of the approximation of the gradient given by the Sobel operator and Θ is the orientation of the gradient. The result of the Sobel Edge filter is shown on [Figure A.2\(b\)](#). Due to the pre-processing (e.g. Gaussian filter) the edges can be blurred out, so the next step of the Canny edge is to obtain sharp edges. The edge thinning relies on the orientation of the gradient which is rounded to the closest 45° multiple, corresponding to the 8 octant around the current cell. The edge strength in the current pixel is compared with the value of the cell in the positive and negative gradient direction. If the current cell has the highest gradient norm value it is preserved else it is removed. This operation is repeated for each cell, yielding the sharpened edges ([Figure A.2\(c\)](#)).

After the edge thinning process, some edges can correspond to remaining noise or may be due to highly textured regions in the image. A double thresholding with hysteresis approach is used to isolate the actual edge [[Canny, 1986](#)]. This process is based on the assumption that the strongest edges are considered to be the most likely. The user chooses two threshold values : if the edge value is above the first, it is considered as sure, if it is between the first and the second threshold value, the edge is considered as probable, else it is considered as non relevant and is removed ([Figure A.2\(d\)](#)). Finally, the probable edges are considered as sure only if they are connected with a sure edge ([Figure A.2\(e\)](#)). The pre-processing has a strong impact on the detected edges, for instance the strongest edges have a better contrast with the weaker ones using the Kuwahara filter than with the Gaussian filter. So the thresholding with hysteresis phase of the Canny edge performs a better selection of the edges of interest ([Figure A.3](#)). In the further edge detection shown in this paper the images are pre-processed with a Kuwahara filter.

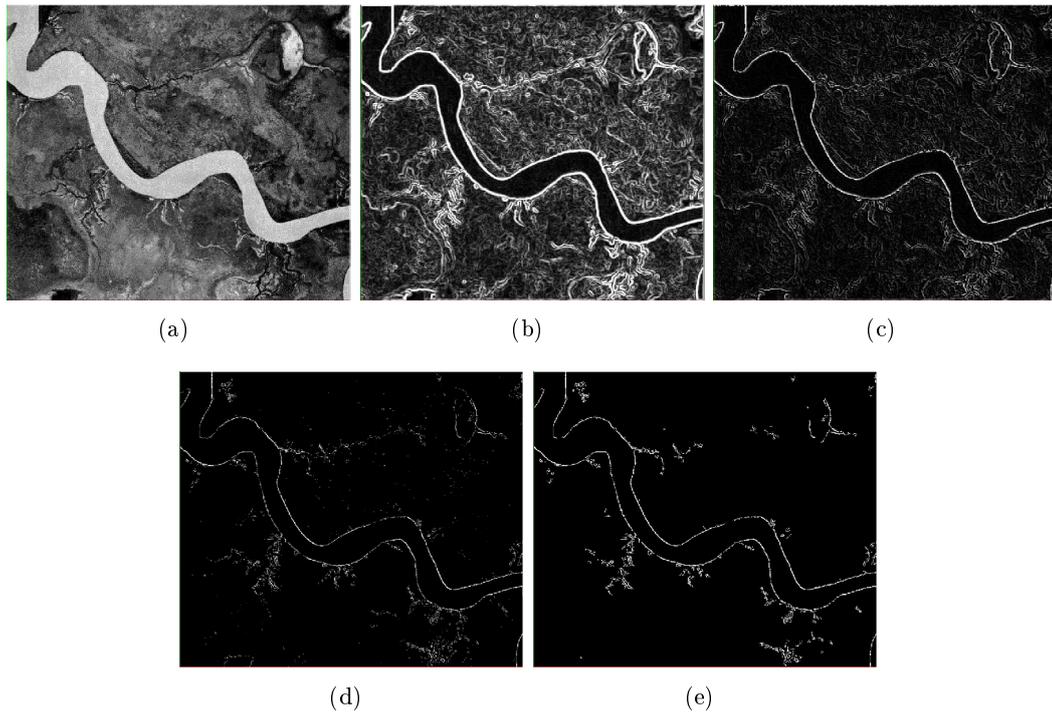


FIGURE A.2 – STEPS OF THE CANNY EDGE DETECTOR[[GOOGLE EARTH, JULY,7 2012](#)]. (a) Original image (b) Edge detection using a Sobel edge filter (c) Edge thinning (d) Edge thresholding (e) Edge hysteresis.

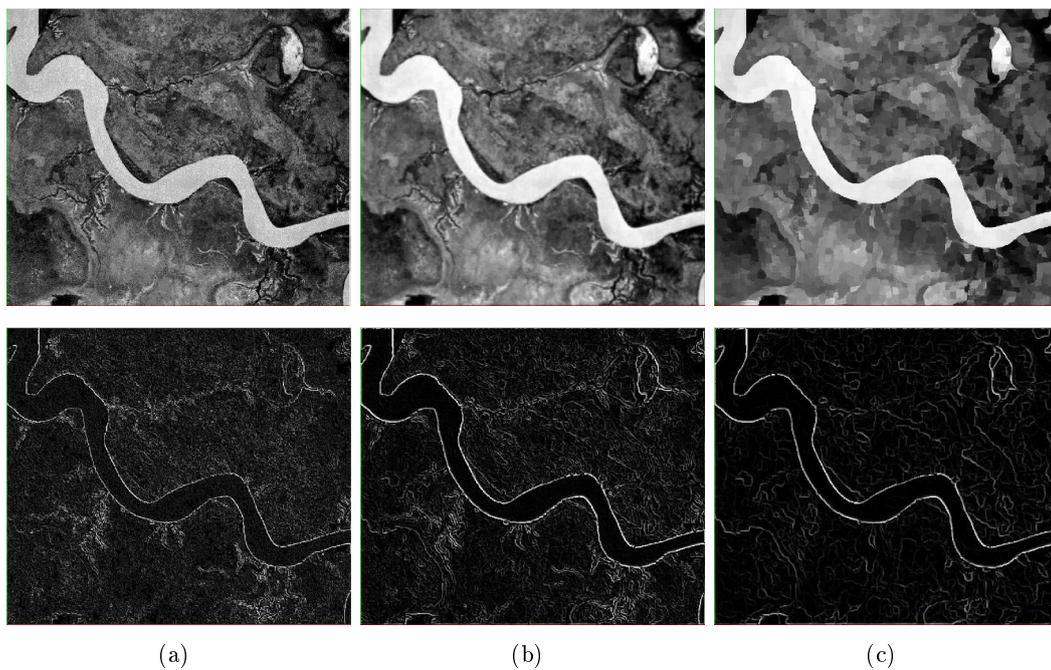


FIGURE A.3 – IMPACT OF PRE-PROCESSING ON SOBEL EDGE FILTER RESULTS. (a) Results using the original image. (b) Results using a Gaussian filter. (c) Results using a Kuwahara filter.

Conclusion Générale

L'objectif de cette thèse était de proposer une approche de construction de modèles de dépôts sédimentaires qui permettent de reproduire la complexité géométrique des structures composant les dépôts et de leur organisation à plusieurs échelles. Cette approche repose sur un ensemble de modèles tridimensionnels d'objets sédimentaires élémentaires construits comme des objets déformables. Ces objets ont été intégrés dans une méthode de modélisation qui cherche à reproduire qualitativement certains processus de dépôt. Dans ce contexte une part importante du travail était d'étendre les modèles de ces objets pour pouvoir gérer les changements topologiques et géométriques souvent complexes associés à ces processus. Un des autres grands axes de ces travaux était l'intégration de données qui permettent conditionner les modèles. En particulier une stratégie est proposée pour concilier la représentation des structures avec des méthodes d'analyse d'image afin de pouvoir intégrer rapidement et facilement des données issues d'images géologiques dans les modèles d'objets.

Ainsi, dans les trois chapitres centraux présentés dans ce mémoire de thèse nous avons abordé trois problèmes liés à la modélisation des structures sédimentaires :

- la définition et la construction de modèles de structures élémentaires adaptables à l'interprétation et à la simulation des modèles de dépôt (interprétation et simulation) en fonction des données disponibles ;
- l'utilisation de ces modèles de structures sédimentaires pour des simulations et leur application en lien avec les différents processus de dépôts ;
- l'utilisation des modèles de structures sédimentaires afin de proposer une méthode d'interprétation semi-automatique de données denses en se basant sur des connaissances *a priori* sur les géométries des structures.

Une méthode a été mise au point afin de modéliser différents modèles de structures sédimentaires en se basant sur des surfaces NURBS. Les NURBS peuvent être décrites par un nombre restreint de points de contrôle représentant une approximation de la forme des objets. Il est ainsi aisé de concevoir la géométrie finale des objets en se basant sur une approximation de la forme. Ces objets sont toutefois limités pour la représentation des structures sédimentaires en milieux faillés étant donné que la détection d'intersection et la découpe sur des surfaces paramétriques sont des problèmes complexes. En effet la construction d'une discontinuité avec une géométrie complexe nécessite l'ajout d'un grand nombre de points de contrôle ce qui alourdit considérablement les surfaces. En perspective il serait intéressant de considérer l'utilisation d'autres formulations des surfaces paramétriques. Par exemple, une extension des NURBS appelée les T-Splines, conçue pour gérer les discontinuités pourrait être considérée [Sederberg *et al.*, 2003].

Les modèles d'objets sédimentaires sont appliqués dans le cadre de la simulation

stochastique multi-échelles d'environnements sédimentaires en se basant sur une initialisation par SGS ou des L-systèmes. Une opération de croissance est appliquée afin de reproduire un aspect méandriforme. Cette approche permet de simuler des chenaux mais également de construire les barres d'accrétion latérale associées à chaque chenal sous la forme de clinofformes successifs. En particulier l'approche qui permet de construire les figures d'accrétion à partir d'un chenal connu semble prometteuse pour la gestion du conditionnement de ces structures.

Des processus de dépôt majeurs, tels que l'aggradation [Labourdette et Bez, 2010] et l'avulsion [Hajek et Wolinsky, 2012], restent toutefois à intégrer dans le processus de simulation des dépôts sédimentaires. Le défi majeur dans l'intégration de ces processus de formation des structures chenalisantes est de les lier avec la croissance des chenaux et la formation des objets sédimentaires déposés en relation avec ceux-ci. Dans le cas de l'avulsion totale il est nécessaire de pouvoir changer la trajectoire liée à l'écoulement puis de gérer la croissance latérale au cours des itérations suivantes. Une méthodologie de construction de ce changement géométrique et topologique a déjà été considérée, toutefois il est nécessaire d'automatiser cette approche en définissant des critères de déclenchement d'avulsion. Pour les avulsions partielles les déplacements au niveau des points de jonction entre les différents chenaux formés par l'avulsion doivent être paramétrisés et gérés d'une façon qui reste à définir. De plus l'approche de simulation est principalement focalisée sur la modélisation des environnements fluviaux, il serait intéressant d'étendre cette méthode à d'autres types de dépôts comme les environnements turbiditiques et deltaïques.

La formulation des objets sédimentaires indépendamment d'une grille permet de construire un espace paramétrique pour chaque objet sédimentaire en se basant sur la formulation des NURBS. Cet espace peut être utilisé comme support pour la simulation de propriétés pétrophysiques aussi bien surfaciques (sur les limites des structures) que volumiques. Les géométries des structures sédimentaires étant définies par des fonctions continues la résolution de discrétisation pour chaque objet peut être choisie en se basant sur la résolution des hétérogénéités.

Le conditionnement, bien qu'abordé dans ces travaux, reste un axe à développer dans le processus de simulation stochastique des objets sédimentaires. Dans l'état actuel du développement il est possible de conditionner l'initialisation de l'axe de chenal que ce soit avec les L-Systèmes ou les SGS et de rendre nulle la croissance en ces points afin de maintenir le chenal aux points de conditionnement. Cette approche introduit des biais dans la création des structures liées aux chenaux telles que les barres d'accrétion latérale. Pour gérer cela un processus de reconstruction de la migration d'un chenal à partir de son état final est proposé. Aux points de données, des corrections des objets sédimentaires peuvent être considérées pour ajuster la position des structures par rapport aux données de puits. Les NURBS étant des surfaces déformables présentant un support local il est possible d'utiliser la flexibilité de ces surfaces pour effectuer les déformations locales des objets. Un processus de correction à plus grande échelle peut également être ajouté au conditionnement afin d'améliorer l'ajustement aux données. Pour ce faire, en plus d'utiliser les propriétés de surfaces déformables des NURBS, les travaux de Botsch *et al.* [2007], Sumner *et al.* [2007] introduisent des méthodes pour déformer l'espace de façon interactive.

Les modèles de structures sédimentaires sont également applicables dans le cadre de l'interprétation de données denses, comme celles issues d'images satellites ou de

sections sismiques, du fait de la grande flexibilité des NURBS. L'association des NURBS à une approche dérivée des modèles de contours actifs [Kass *et al.*, 1988] est utilisée. Cette méthode procède par la détection de bords, visibles dans l'image, guidée par une approximation grossière de l'objet à interpréter. Une optimisation de la forme est réalisée en se basant sur la distance aux bords de l'objet précédemment identifié. Elle peut être faite sur les points de contrôle du modèle ou directement sur les surfaces NURBS.

Dans l'état actuel de ces travaux sur l'interprétation d'images le processus d'optimisation est réalisé en deux dimensions. Toutefois les détections des bords ont été testées sur des données sismiques tridimensionnelles en répétant l'identification des bords sur les sections en temps de la sismique ce qui permet d'appréhender la forme du chenal en trois dimensions même si cette approche reste en deux dimensions et demi. Ainsi une perspective de ce travail serait d'investiguer les bords en trois dimensions en s'appuyant sur l'adaptation des méthodes de détection de bords pour des valeurs d'amplitude sur des sections sismiques en coupe [Halpert *et al.*, 2014]. L'optimisation de la forme du chenal pourrait elle aussi être étendue en trois dimensions. De plus un processus de perturbation stochastique des objets finaux pourrait être introduit pour tenir compte de l'incertitude liée aux données sismiques.

D'un point de vue pratique les objets et les méthodes décrites dans les chapitres 2, 3 et 4 ont fait l'objet d'une implémentation en langage C++ dans un plugin du logiciel Gocad. En particulier, les NURBS, bien que basées sur les algorithmes décrits par Piegl et Tiller [1995], des courbes, surfaces et volumes NURBS ont été intégralement réimplémentés dans une librairie pour laquelle les structures de données et les méthodes sont indépendantes de Gocad. Cette librairie indépendante contient également l'implémentation des géométries des différentes structures sédimentaires ainsi que des algorithmes géométriques élémentaires tels que les rotations, les translations et le calcul d'intersection. Ces différentes implémentations ont représenté une part importante du travail contenu dans cette thèse. Elles sont librement disponibles pour les membres du consortium de recherche Gocad, par le site internet www.gocad.org.

En conclusion les travaux de cette thèse ont permis de poser les bases méthodologiques de la construction de dépôts sédimentaires en se basant sur des objets construits par des surfaces déformables. Ces objets sont à la fois applicables dans le cadre des simulations stochastiques et de l'interprétation de données denses. Il nous paraît maintenant important de valider ces modèles sur des cas d'études réels en particulier dans le cas de simulations réservoir. Cela nécessite de pouvoir améliorer le conditionnement des objets aux données de puits.

Bibliographie

- E. ADAMS, J. BELLIAN et R. REYES : Digital outcrop models reduce uncertainty and improve reservoir characterization. *World Oil, September Issue*, p. 46–49, 2009. (Cited pages [96](#) and [110](#).)
- N. M. ALBINHASSAN, Y. LUO et M. N. AL-FARAJ : 3D edge-preserving smoothing and applications. *Geophysics*, 71(4):P5–P11, 2006. (Cited page [99](#).)
- J. R. ALLEN : The classification of cross-stratified units. with notes on their origin. *Sedimentology*, 2(2):93–114, 1963. (Cited page [46](#).)
- J. ALLEN : Studies in fluvial sedimentation : bars, bar-complexes and sandstone sheets (low-sinuosity braided streams) in the brownstones (l. devonian), welsh borders. *Sedimentary Geology*, 33(4):237–293, 1983. (Cited page [11](#).)
- F. O. ALPAK, M. D. BARTON et S. J. NARUK : The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance. *AAPG Bulletin*, 97(2): 251–284, 2013. (Cited pages [ix](#), [13](#), [15](#), [16](#), and [18](#).)
- F. O. ALPAK, M. D. BARTON, F. F. van der VLUGT, C. PIRMEZ, B. E. PRATHER, S. H. TENNANT *et al.* : Simplified modeling of turbidite channel reservoirs. *SPE Journal*, 15(2):480–494, 2010. (Cited page [53](#).)
- R. ARNOTT : *Facies Model 4*, chap. Deep-Marine sediments and sedimentary systems, p. 295–322. St. John’s :Geological Association of Canad, 2010. (Cited page [47](#).)
- P. BAKKER, L. J. van VLIET et P. W. VERBEEK : Edge preserving orientation adaptive filtering. In *Computer Vision and Pattern Recognition, 1999. IEEE Computer Society Conference on.*, vol. 1. IEEE, 1999. (Cited page [111](#).)
- M. BARTON, C. O’BYRNE, C. PIRMEZ, B. PRATHER, F. van der VLUGT, F. O. ALPAK et Z. SYLVESTER : Turbidite channel architecture : Recognizing and quantifying the distribution of channel-base drapes using core and dipmeter data. *Dipmeter and Borehole Image Log Technology : AAPG Memoir 92*, 92, 2010. (Cited pages [x](#), [53](#), and [54](#).)
- A. BERTONCELLO, T. SUN, H. LI, G. MARIETHOZ et J. CAERS : Conditioning surface-based geological models to well and thickness data. *Mathematical Geosciences*, 45 (7):873–893, 2013. (Cited page [20](#).)
- P. E. BÉZIER : Unisurf, from styling to tool-shop. *Computers in Industry*, 4(2):115 – 126, 1983. (Cited page [28](#).)

- J. BHATTACHARYA : *Facies Model 4*, chap. Deltas, p. 233–264. St. John's : Geological Association of Canada, 2010. (Cited page 47.)
- M. BOTSCH, M. PAULY, M. WICKE et M. GROSS : Adaptive space deformations based on rigid cells. *In Computer Graphics Forum*, vol. 26, p. 339–347. Wiley Online Library, 2007. (Cited pages 25 and 116.)
- J. E. BRESENHAM : Algorithm for computer control of a digital plotter. *IBM Syst. J.*, 4(1):25–30, mars 1965. ISSN 0018-8670. (Cited page 85.)
- J. S. BRIDGE : Paleochannel patterns inferred from alluvial deposits : A critical evaluation perspective : Perspective. *Journal of Sedimentary Research*, 55(4), 1985. (Cited page 9.)
- J. S. BRIDGE et J. A. DIEMER : Quantitative interpretation of an evolving ancient river system. *Sedimentology*, 30(5):599–623, 1983. (Cited page 11.)
- J. S. BRIDGE et R. S. TYE : Interpreting the dimensions of ancient fluvial channel bars, channels, and channel belts from wireline-logs and cores. *AAPG bulletin*, 84(8):1205–1228, 2000. (Cited pages 1 and 8.)
- J. CANNY : A computational approach to edge detection. *Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on*, (6):679–698, 1986. (Cited pages 96, 97, 99, 110, 111, and 112.)
- M. CHURCH : Bed material transport and the morphology of alluvial river channels. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 34:325–354, 2006. (Cited pages ix, 9, 10, and 12.)
- L. D. COHEN : On active contour models and balloons. *CVGIP : Image understanding*, 53(2):211–218, 1991. (Cited page 105.)
- L. COLOMBERA, N. P. MOUNTNEY, F. FELLETTI et W. D. MCCAFFREY : Models for guiding and ranking well-to-well correlations of channel bodies in fluvial reservoirs. *AAPG Bulletin*, 98(10):1943–1965, 2014. (Cited page 77.)
- A. DESBARATS : Numerical estimation of effective permeability in sand-shale formations. *Water Resour Res*, 23(2):273–286, 1987. (Cited pages 1 and 96.)
- C. V. DEUTSCH et A. G. JOURNAL : Geostatistical software library and user's guide. *New York*, 1992. (Cited page 61.)
- C. V. DEUTSCH et L. WANG : Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. *Math Geol*, 28(7):857–880, 1996a. (Cited pages 2 and 8.)
- C. V. DEUTSCH et L. WANG : Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. *Mathematical Geology*, 28(7):857–880, 1996b. (Cited page 19.)
- C. DEUTSCH et T. TRAN : Fluvsim : a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Computers & Geosciences*, 28(4):525–535, 2002. (Cited pages 2, 8, 19, 24, 26, and 38.)
- L. J. DURLOFSKY : Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation. *In 8th International Forum on Reservoir Simulation, Borromees Island, Stresa, Italy*, p. 20–24, 2005. (Cited page 83.)

- R. I. FERGUSON : Disturbed periodic model for river meanders. *Earth Surface Processes*, 1(4):337–347, 1976. ISSN 1931-8065. URL <http://dx.doi.org/10.1002/esp.3290010403>. (Cited pages 21 and 23.)
- T. FISHER et R. WALES : Rational splines and multidimensional geologic modeling. In R. PFLUG et J. HARBAUGH, édés : *Computer Graphics in Geology*, vol. 41 de *Lecture Notes in Earth Sciences*, p. 17–28. Springer Berlin / Heidelberg, 1992. ISBN 978-3-540-55190-4. (Cited page 2.)
- G. L. FORD et D. R. PYLES : A hierarchical approach for evaluating fluvial systems : Architectural analysis and sequential evolution of the high net-sand content, middle wasatch formation, uinta basin, utah. *AAPG Bulletin*, 98(7):1273–1304, 2014. (Cited pages 11 and 93.)
- X. GAI, X.-h. WU, L. BRANETS, K. SEMENTELLI et G. ROBERTSON : Concept-based geologic modeling using function form representation. In *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition*, 2012. (Cited pages 19 and 20.)
- M. R. GIBLING : Width and thickness of fluvial channel bodies and valley fills in the geological record : a literature compilation and classification. *Journal of Sedimentary Research*, 76(5):731–770, 2006. (Cited page 71.)
- GOOGLE EARTH : Orinoco delta 8°43'56.30"N 60°57'12.25"O, April,10 2013. (Cited pages xii and 106.)
- GOOGLE EARTH : South aligator river 12°38'27.95"S 132°28'43.71"E, July,7 2012. (Cited pages xii, 106, and 113.)
- GOOGLE EARTH : Songshua river 48°38'53.26"N 133°56'44.94"E, October,10 2010. (Cited pages xi, xii, 100, 106, and 109.)
- GOOGLE EARTH : Atchafalaya delta 29°30'02.17"N 91°25'50.54"O, October,29 2012. (Cited pages x and 42.)
- P. GOOVAERTS : *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford university press, 1997. (Cited page 61.)
- O. GROVE, L. KHAIRAN RAJAB, A. PIEGL et S. LAI-YUEN : From ct to nurbs : Contour fitting with b-spline curves. *Computer-Aided Design and Applications*, 8(1):3–21, 2011. (Cited page 3.)
- F. B. GUARDIANO et R. M. SRIVASTAVA : Multivariate geostatistics : beyond bivariate moments. In *Geostatistics Troia'92*, p. 133–144. Springer, 1993a. (Cited page 2.)
- F. B. GUARDIANO et R. M. SRIVASTAVA : Multivariate geostatistics : beyond bivariate moments. In *Geostatistics Troia'92*, p. 133–144. Springer, 1993b. (Cited page 8.)
- E. A. HAJEK et M. A. WOLINSKY : Simplified process modeling of river avulsion and alluvial architecture : Connecting models and field data. *Sedimentary Geology*, 257:1–30, 2012. (Cited page 116.)
- H. HALDORSEN et L. LAKE : A new approach to shale management in field-scale models. *Old SPE J*, 24(4):447–457, 1984. (Cited pages 1, 2, and 96.)

- A. D. HALPERT : Edge-preserving smoothing for segmentation of seismic images. *In SEG Technical Program Expanded Abstracts 2012*, p. 1–5. Society of Exploration Geophysicists, 2012. (Cited pages [97](#) and [99](#).)
- A. D. HALPERT, R. G. CLAPP et B. BIONDI : Salt delineation via interpreter-guided 3d seismic image segmentation. *Interpretation*, 2(2):T79–T88, 2014. (Cited page [117](#).)
- M. M. HASSANPOUR, M. J. PYRCZ et C. V. DEUTSCH : Improved geostatistical models of inclined heterolithic strata for McMurray formation, Alberta, Canada. *AAPG Bull*, 97(7):1209–1224, 2013. (Cited pages [2](#), [19](#), [20](#), and [26](#).)
- R. HAUGE, L. HOLDEN et A. R. SYVERSVEEN : Well conditioning in object models. *Mathematical Geology*, 39(4):383–398, 2007. (Cited page [2](#).)
- E. HODSON, D. THAYER et C. FRANKLIN : Adaptive gaussian filtering and local frequency estimates using local curvature analysis. *Acoustics, Speech and Signal Processing, IEEE Transactions on*, 29(4):854–859, 1981. (Cited page [110](#).)
- A. HOWARD : Modelling channel evolution and floodplain morphology. *Floodplain processes*, p. 15–62, 1996. (Cited pages [ix](#), [21](#), and [22](#).)
- A. HOWARD et T. KNUTSON : Sufficient conditions for river meandering : A simulation approach. *Water Resources Research*, 20(11):1659–1667, 1984. (Cited page [21](#).)
- J. A. HOWELL, A. SKORSTAD, A. MACDONALD, A. FORDHAM, S. FLINT, B. FJELLVOLL et T. MANZOCCHI : Sedimentological parameterization of shallow-marine reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 14(1):17–34, 2008. (Cited pages [1](#) and [28](#).)
- S. M. HUBBARD, D. G. SMITH, H. NIELSEN, D. A. LECKIE, M. FUSTIC, R. J. SPENCER et L. BLOOM : Seismic geomorphology and sedimentology of a tidally influenced river deposit, lower cretaceous athabasca oil sands, alberta, canada. *AAPG Bulletin*, 95(7):1123–1145, 2011. (Cited page [96](#).)
- S. IKEDA, G. PARKER et K. SAWAI : Bend theory of river meanders. part 1. linear development. *Journal of Fluid Mechanics*, 112:363–377, 1981. (Cited page [21](#).)
- B. ISSAUTIER, S. VISEUR, P. AUDIGANE et Y.-M. le NINDRE : Impacts of fluvial reservoir heterogeneity on connectivity : Implications in estimating geological storage capacity for CO₂. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 20:333–349, 2014. (Cited pages [18](#) and [108](#).)
- J. IVINS et J. PORRILL : Everything you always wanted to know about snakes (but were afraid to ask). *Artificial Intelligence*, 2000, 1995. (Cited page [102](#).)
- M. D. JACKSON, G. J. HAMPSON et R. P. SECH : Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog : Part 2. geologic controls on fluid flow and hydrocarbon recovery. *AAPG Bull*, 93(9):1183–1208, 2009. (Cited pages [1](#), [7](#), [15](#), [17](#), [18](#), and [96](#).)
- M. D. JACKSON, S. YOSHIDA, A. H. MUGGERIDGE et H. D. JOHNSON : Three-dimensional reservoir characterization and flow simulation of heterolithic tidal sandstones. *AAPG bulletin*, 89(4):507–528, 2005. (Cited pages [7](#) and [17](#).)

- M. JACKSON et A. MUGGERIDGE : Effect of discontinuous shales on reservoir performance during horizontal waterflooding. *SPE J*, 5(4):446–455, 2000. (Cited pages [1](#), [15](#), [17](#), and [96](#).)
- M. JANOCKO, W. NEMEC, S. HENRIKSEN et M. WARCHOL : The diversity of deep-water sinuous channel belts and slope valley-fill complexes. *Marine and Petroleum Geology*, 2012. (Cited page [13](#).)
- D. W. JORDAN et W. A. PRYOR : Hierarchical levels of heterogeneity in a Mississippi river meander belt and application to reservoir systems : Geologic note (1). *AAPG Bulletin*, 76(10):1601–1624, 1992. (Cited page [108](#).)
- A. JOURNAL : Fundamentals of geostatistics in five lessons, 1989. (Cited page [61](#).)
- A. JOURNAL : Conditional simulation of geologically averaged block permeabilities. *J hyd*, 183(1):23–35, 1996. (Cited pages [7](#) and [19](#).)
- A. JOURNAL, R. GUNDESIO, E. GRINGARTEN et T. YAO : Stochastic modelling of a fluvial reservoir : a comparative review of algorithms. *J Pet Sci and Eng*, 21(1):95–121, 1998. (Cited pages [7](#) and [19](#).)
- D. KARSENBERG, T. E. TORNVIST et J. S. BRIDGE : Conditioning a process-based model of sedimentary architecture to well data. *Journal of Sedimentary Research*, 71(6):868–879, 2001. (Cited page [2](#).)
- M. KASS, A. WITKIN et D. TERZOPOULOS : Snakes : Active contour models. *International journal of computer vision*, 1(4):321–331, 1988. (Cited pages [3](#), [94](#), [96](#), [101](#), [102](#), and [117](#).)
- P. KLEIN, L. RICHARD et H. JAMES : 3d curvature attributes : a new approach for seismic interpretation. *First Break*, 26(4), 2008. (Cited page [105](#).)
- D. KNIGHTON *et al.* : Fluvial forms and processes : a new perspective. *Fluvial forms and processes : a new perspective.*, (Ed. 2), 1998. (Cited pages [8](#) and [62](#).)
- C. E. KOLTERMANN et S. M. GORELICK : Heterogeneity in sedimentary deposits : A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. *Water Resources Research*, 32(9):2617–2658, 1996. (Cited page [1](#).)
- M. KUWAHARA, K. HACHIMURA, S. EIHO et M. KINOSHITA : Processing of ri-angiocardigraphic images. *In Digital Processing of Biomedical Images*, p. 187–202. Springer, 1976. (Cited pages [99](#) and [110](#).)
- R. LABOURDETTE et M. BEZ : Element migration in turbidite systems : Random or systematic depositional processes. *AAPG bulletin*, 94(3):345–368, 2010. (Cited page [116](#).)
- L. B. LEOPOLD, M. G. WOLMAN, M. G. WOLMAN et M. G. WOLMAN : River channel patterns : braided, meandering, and straight. 1957. (Cited page [10](#).)
- H. LI et J. CAERS : Geological modelling and history matching of multi-scale flow barriers in channelized reservoirs : methodology and application. *Petroleum Geoscience*, 17(1):17–34, 2011. (Cited page [85](#).)

- A. LINDENMAYER : Mathematical models for cellular interactions in development i. filaments with one-sided inputs. *Journal of theoretical biology*, 18(3):280–299, 1968. (Cited page 62.)
- Y. LIU, A. HARDING, W. ABRIEL et S. STREBELLE : Multiple-point simulation integrating wells, three-dimensional seismic data, and geology. *AAPG Bull*, 88 (7):905–921, 2004. (Cited page 2.)
- S. LOPEZ : Modélisation de réservoirs chenalisés méandriformes : une approche génétique et stochastique, PhD thesis, Mines Paris Tech. 2003. (Cited pages 2, 21, 23, and 25.)
- J. MACQUEEN *et al.* : Some methods for classification and analysis of multivariate observations. In *Proceedings of the fifth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*, vol. 1, p. 281–297. California, USA, 1967. (Cited page 96.)
- J.-L. MALLET : Discrete smooth interpolation in geometric modelling. *Computer-aided design*, 24(4):178–191, 1992. (Cited page 25.)
- J.-L. MALLET : Space–time mathematical framework for sedimentary geology. *Mathematical geology*, 36(1):1–32, 2004. (Cited pages 53 and 56.)
- J.-L. MALLET : *Elements of Mathematical Sedimentary Geology : the GeoChron Model*. EAGE Publishing, bv., 2014. (Cited page 97.)
- G. MARIETHOZ et P. RENARD : Special issue on 20 years of multiple-point statistics : Part 2. *Mathematical Geosciences*, 46(5):517–518, 2014. (Cited page 110.)
- M. MAYALL, E. JONES et M. CASEY : Turbidite channel reservoirs—key elements in facies prediction and effective development. *Marine and Petroleum Geology*, 23 (8):821–841, 2006. (Cited pages ix, 13, and 14.)
- T. MCHARGUE, M. J. PYRCZ, M. D. SULLIVAN, J. CLARK, A. FILDANI, B. ROMANS, J. COVAULT, M. LEVY, H. POSAMENTIER et N. DRINKWATER : Architecture of turbidite channel systems on the continental slope : patterns and predictions. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3):728–743, 2011. (Cited page 2.)
- T. MCINERNEY et H. DEHMESHKI : User-defined b-spline template-snakes. In R. ELLIS et T. PETERS, eds : *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention - MICCAI 2003*, vol. 2879 de *Lecture Notes in Computer Science*, p. 746–753. Springer Berlin / Heidelberg, 2003. ISBN 978-3-540-20464-0. (Cited pages 3 and 96.)
- T. MCINERNEY, G. HAMARNEH, M. SHENTON et D. TERZOPOULOS : Deformable organisms for automatic medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 6(3):251–266, 2002. ISSN 1361-8415. (Cited page 3.)
- E. D. MCKEE : Flume experiments on the production of stratification and cross-stratification. 27(2):129–134, 1957. (Cited pages x, 49, and 51.)
- A. MIALL : Architectural-element analysis : a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Sci Rev*, 22(4):261–308, 1985. (Cited pages 8, 9, 10, and 37.)

- A. MIALL : *Geology of Fluvial Deposits : Sedimentary Facies*. Springer Verlag, 1996. (Cited pages [ix](#), [xii](#), [1](#), [8](#), [9](#), [10](#), [11](#), [15](#), [28](#), [37](#), [43](#), [46](#), [47](#), [62](#), [73](#), [83](#), and [93](#).)
- A. MIALL : *Facies Model 4*, chap. Alluvial deposits, p. 105–138. St.John’s :Geological Association of Canad, 2010. (Cited pages [ix](#), [8](#), [10](#), and [14](#).)
- A. D. MIALL : A review of the braided-river depositional environment. *Earth-Science Reviews*, 13(1):1–62, 1977. (Cited pages [ix](#), [9](#), and [11](#).)
- A. D. MIALL : Architecture and sequence stratigraphy of pleistocene fluvial systems in the Malay Basin, based on seismic time-slice analysis. *AAPG bulletin*, 86(7), 2002. (Cited page [108](#).)
- J. MONTAGNAT, H. DELINGETTE et N. AYACHE : A review of deformable surfaces : topology, geometry and deformation. *Image and Vision Computing*, 19(14):1023 – 1040, 2001. ISSN 0262-8856. (Cited page [3](#).)
- J. F. MOUNT : *California rivers and streams : the conflict between fluvial process and land use*. Univ of California Press, 1995. (Cited pages [x](#) and [43](#).)
- R. MOYEN, J.-L. MALLET, T. FRANK, B. LEFLON et J.-J. ROYER : 3d-parameterization of the 3d geological space—the geochron model. In *9th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 2004. (Cited pages [53](#) and [56](#).)
- R. MOYEN : *Paramétrisation 3D de l’espace en Géologie sédimentaire : Le modèle Geochron*. Thèse de doctorat, Atelier national de reproduction des thèses, 2005. (Cited pages [56](#) and [58](#).)
- K. NORDAHL, P. S. RINGROSE et R. WEN : Petrophysical characterization of a heterolithic tidal reservoir interval using a process-based modelling tool. *Petrol Geosci*, 11(1):17–28, 2005. (Cited page [25](#).)
- D. NOVAKOVIC, C. WHITE, R. CORBEANU, W. HAMMON III, J. BHATTACHARYA et G. MCMECHAN : Hydraulic effects of shales in fluvial-deltaic deposits : Ground-penetrating radar, outcrop observations, geostatistics, and three-dimensional flow modeling for the Ferron sandstone, Utah. *Math Geol*, 34(7):857–893, 2002. (Cited pages [1](#) and [96](#).)
- G. PAPARI et N. PETKOV : Edge and line oriented contour detection : State of the art. *Image and Vision Computing*, 29(2):79–103, 2011. (Cited page [101](#).)
- G. PAPARI, N. PETKOV et P. CAMPISI : Artistic edge and corner enhancing smoothing. *Image Processing, IEEE Transactions on*, 16(10):2449–2462, 2007. (Cited page [111](#).)
- M. PARQUER, J. RUIU et G. CAUMON : Simulation of surface petrophysical heterogeneities on sedimentary objects. In *Petroleum Geostatistics 2015*, 2015. (Cited page [5](#).)
- L. PIEGL et W. TILLER : *The NURBS book*. Springer-Verlag, London, UK, 1995. (Cited pages [28](#), [30](#), [32](#), [35](#), [40](#), [44](#), [71](#), [97](#), [99](#), [103](#), and [117](#).)

- L. A. PIEGL et A. M. RICHARD : Tessellating trimmed nurbs surfaces. *Computer-Aided Design*, 27(1):16–26, 1995. (Cited pages 37, 56, and 58.)
- H. W. POSAMENTIER et V. KOLLA : Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3):367–388, 2003. (Cited pages 2 and 13.)
- M. J. PRANTER, A. I. ELLISON, R. D. COLE et P. E. PATTERSON : Analysis and modeling of intermediate-scale reservoir heterogeneity based on a fluvial point-bar outcrop analog, williams fork formation, piceance basin, colorado. *AAPG Bulletin*, 91(7):1025–1051, 2007. (Cited pages 96 and 110.)
- P. PRUSINKIEWICZ : Graphical applications of l-systems. In *Proceedings of graphics interface*, vol. 86, p. 247–253, 1986. (Cited page 62.)
- P. PRUSINKIEWICZ, M. HAMMEL, J. HANAN et R. MECH : L-systems : from the theory to visual models of plants. In *Proceedings of the 2nd CSIRO Symposium on Computational Challenges in Life Sciences*, vol. 3, p. 1–32. Citeseer, 1996. (Cited page 62.)
- M. J. PYRCZ, T. MCHARGUE, J. CLARK, M. SULLIVAN et S. STREBELLE : Event-based geostatistical modeling : description and applications. In *Geostatistics Oslo 2012*, p. 27–38. Springer, 2012. (Cited pages 2 and 26.)
- M. PYRCZ, J. BOISVERT et C. DEUTSCH : Alluvsim : A program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Comp & Geosci*, 35(8):1671 – 1685, 2009. ISSN 0098-3004. (Cited pages ix, 2, 8, 19, 21, 23, 24, 25, 26, and 38.)
- I. R. RABELO, S. M. LUTHI et L. J. VAN VLIET : Parameterization of meander-belt elements in high-resolution three-dimensional seismic data using the geotime cube and modern analogues. *Geological Society, London, Special Publications*, 277(1):121–137, 2007. (Cited pages 1, 28, and 96.)
- H. M. REIJENSTEIN, H. W. POSAMENTIER et J. P. BHATTACHARYA : Seismic geomorphology and high-resolution seismic stratigraphy of inner-shelf fluvial, estuarine, deltaic, and marine sequences, gulf of Thailand. *AAPG Bulletin*, 95(11):1959–1990, 2011. (Cited pages 2, 26, and 96.)
- H.-E. REINECK et I. B. SINGH : Depositional sedimentary environments. 1973. (Cited pages ix, x, 8, 10, 13, 49, 51, 52, and 73.)
- H.-E. REINECK et I. B. SINGH : Depositional environments. In *Depositional Sedimentary Environments*, p. 5–7. Springer, 1980. (Cited pages 10, 37, 43, and 46.)
- P. RENARD et G. MARIETHOZ : Special issue on 20 years of multiple-point statistics : Part 1. *Mathematical Geosciences*, 46(2):129–131, 2014. (Cited page 110.)
- G. RONGIER, P. COLLON, P. RENARD et J. RUIU : Channel simulation using l-system, potential fields and nurbs. In *Petroleum Geostatistics 2015*, 2015. (Cited page 5.)
- G. RONGIER, P. COLLON-DROUILLET et P. RENARD : Channel axis simulation based on lindenmayer systems. In *Proc. 34th Gocad Meeting, Nancy*, 2014. (Cited page 62.)

- J. RUIU, G. CAUMON et S. VISEUR : Modeling sedimentary structures using non uniform rational b-splines. *In Proc. 34th Gocad Meeting, Nancy*, 2014a. (Cited pages [xii](#), [5](#), [78](#), [97](#), [108](#), and [109](#).)
- J. RUIU, G. CAUMON et S. VISEUR : Modeling channel forms and related sedimentary objects using a boundary representation based on non-uniform rational b-splines. *Mathematical Geosciences*, 48(3):259–284, 2015a. ISSN 1874-8953. (Cited pages [5](#) and [28](#).)
- J. RUIU, G. CAUMON et S. VISEUR : Semiautomatic interpretation of 3d sedimentological structures on geologic images : An object-based approach. *Interpretation*, 3(3):SX63–SX74, 2015b. (Cited page [5](#).)
- J. RUIU, G. CAUMON, S. VISEUR et C. ANTOINE : Modeling channel forms using a boundary representation based on non-uniform rational b-splines. *In Mathematics of Planet Earth*, p. 581–584. Springer, 2014b. (Cited pages [97](#) and [102](#).)
- T. SAITO et J.-I. TORIWAKI : New algorithms for euclidean distance transformation of an n-dimensional digitized picture with applications. *Pattern Recognition*, 27(11):1551 – 1565, 1994. ISSN 0031-3203. (Cited page [100](#).)
- T. SALLES, S. LOPEZ, R. ESCHARD, O. LERAT, T. MULDER et M. CACAS : Turbidity current modelling on geological time scales. *Marine Geology*, 248(3):127–150, 2008. (Cited page [2](#).)
- S. A. SCHUMM : Evolution and response of the fluvial system, sedimentologic implications. 1981. (Cited page [9](#).)
- R. P. SECH, M. D. JACKSON et G. J. HAMPSON : Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog : Part 1. surface-based modeling to capture high-resolution facies architecture. *AAPG Bulletin*, 93(9):1155–1181, 2009. (Cited pages [17](#), [19](#), and [20](#).)
- T. W. SEDERBERG, D. L. CARDON, G. T. FINNIGAN, N. S. NORTH, J. ZHENG et T. LYCHE : T-spline simplification and local refinement. *In ACM Transactions on Graphics (TOG)*, vol. 23, p. 276–283. ACM, 2004. (Cited pages [57](#) and [58](#).)
- T. W. SEDERBERG, J. ZHENG, A. BAKENOV et A. NASRI : T-splines and t-nurccs. *In ACM transactions on graphics (TOG)*, vol. 22, p. 477–484. ACM, 2003. (Cited pages [57](#) and [115](#).)
- T. SHEN, H. LI, Z. QIAN et X. HUANG : Active volume models for 3d medical image segmentation. *In Computer Vision and Pattern Recognition, 2009. CVPR 2009. IEEE Conference on*, p. 707–714. IEEE, 2009. (Cited pages [3](#), [94](#), and [96](#).)
- A. SHTUKA, P. SAMSON et J. MALLET : Petrophysical simulation within an object-based reservoir model. *In European 3-D reservoir modelling conference*, p. 47–56, 1996. (Cited page [25](#).)
- R. SLINGERLAND et N. D. SMITH : River avulsions and their deposits. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32:257–285, 2004. (Cited pages [x](#), [74](#), and [75](#).)

- D. G. SMITH et N. D. SMITH : Sedimentation in anastomosed river systems : examples from alluvial valley near bannf, alberta. *Journal of Sedimentary Research*, 50(1), 1980. (Cited page 10.)
- K. B. SPRAGUE et E. A. de KEMP : Interpretive tools for 3-d structural geological modelling part ii : Surface design from sparse spatial data. *GeoInformatica*, 9:5–32, 2005. ISSN 1384-6175. (Cited page 3.)
- S. STREBELLE : Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Math Geol*, 34:1–21, 2002. ISSN 0882-8121. (Cited pages 2, 8, 19, and 90.)
- L. STRIGHT, J. CAERS, H. LI, F. VAN DER VLUGT, C. PIRMEZ et M. BARTON : Modeling, upscaling, and history matching thin, irregularly-shaped flow barriers : a comprehensive approach for predicting reservoir connectivity. SEPM, 2006. (Cited page 85.)
- L. STRIGHT, J. STEWART, K. CAMPION et S. GRAHAM : Geologic and seismic modeling of a coarse-grained deep-water channel reservoir analog (Blacks Beach, La Jolla, California). *AAPG Bulletin*, 98(4):695–728, 2014. (Cited page 96.)
- R. W. SUMNER, J. SCHMID et M. PAULY : Embedded deformation for shape manipulation. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 26(3):80, 2007. (Cited page 116.)
- A. SYVERSVEEN, R. HAUGE, J. TOLLEFSRUD, U. LÆGREID et A. MACDONALD : A stochastic object model conditioned to high-quality seismic data. *Mathematical Geosciences*, 43:763–781, 2011. ISSN 1874-8961. (Cited page 2.)
- C. TAUBER, H. BATATIA et A. AYACHE : Robust b-spline snakes for ultrasound image segmentation. *Journal of Signal Processing Systems*, 54(1-3):159–169, 2009. (Cited page 96.)
- D. TERZOPOULOS, A. WITKIN et M. KASS : Constraints on deformable models : recovering 3d shape and nonrigid motion. *Artificial Intelligence*, 36(1):91 – 123, 1988. ISSN 0004-3702. (Cited page 101.)
- A. TSAI, A. YEZZI JR, W. WELLS, C. TEMPANY, D. TUCKER, A. FAN, W. E. GRIMSON et A. WILLSKY : A shape-based approach to the segmentation of medical imagery using level sets. *Medical Imaging, IEEE Transactions on*, 22(2):137–154, 2003. (Cited page 96.)
- X. M. T. van LANEN, D. HODGETTS, J. REDFERN et I. FABUEL-PEREZ : Applications of digital outcrop models : two fluvial case studies from the triassic wolfville fm., canada and oukaïmeden sandstone fm., morocco. *Geological Journal*, 44(6):742–760, 2009. ISSN 1099-1034. (Cited page 96.)
- K. J. VERSPRILLE : Computer-aided design applications of the rational b-spline approximation form. 1975. (Cited pages 28 and 97.)
- S. VISEUR : *Simulation stochastique basée-objet de dépôts fluviaux*. Thèse de doctorat, INPL, Nancy, France, 2001. 233 p. (Cited pages 2, 21, 25, 77, and 78.)

- S. VISEUR : Turbidite reservoir characterization : object-based stochastic simulation meandering channels. *B Soc Geol Fr*, 175(1):11–20, 2004. (Cited pages [2](#), [4](#), [19](#), [21](#), [24](#), [38](#), [57](#), [61](#), [62](#), [64](#), and [108](#).)
- H. WACKERNAGEL : *Multivariate geostatistics*. Springer Science & Business Media, 2003. (Cited page [61](#).)
- R. WEN, A. MARTINIUS, A. NÆSS et P. RINGROSE : Three-dimensional simulation of small-scale heterogeneity in tidal deposits—a process-based stochastic simulation method. In) *Proceedings of the 4th Annual Conference of the International Association of Mathematical Geology (IAMG)*. De Frede editore, Ischia, p. 129–134, 1998. (Cited page [2](#).)
- L. WIETZERBIN : *Modélisation et paramétrisation d’objets naturels de formes complexes en trois dimensions. Application à la simulation stochastique de la distribution d’hétérogénéités au sein des réservoirs pétroliers*. Thèse de doctorat, 1994. (Cited pages [2](#) and [24](#).)
- X. WU et D. HALE : Horizon volumes with interpreted constraints. *Geophysics*, 80 (2):IM21–IM33, 2015. (Cited page [97](#).)

Annexe A. : Article publié dans Mathematical Geosciences

Modeling Channel Forms and Related Sedimentary Objects Using
a Boundary Representation Based on Non-uniform Rational
B-Splines

Jérémy RUIU, Guillaume CAUMON and Sophie VISEUR

Mathematical Geosciences, 2014, 1-26, DOI [10.1007/s11004-015-9629-3](https://doi.org/10.1007/s11004-015-9629-3)

Modeling Channel Forms and Related Sedimentary Objects Using a Boundary Representation Based on Non-uniform Rational B-Splines

Jeremy Ruiu¹ · Guillaume Caumon¹ ·
Sophie Viseur²

Received: 23 July 2014 / Accepted: 16 November 2015
© International Association for Mathematical Geosciences 2015

Abstract This paper aims at providing a flexible and compact volumetric object model capable of representing many sedimentary structures at different scales. Geobodies are defined by a boundary representation; each bounding surface is constructed as a parametric deformable surface. A three-dimensional sedimentary object with a compact parametrization which allows for representing various geometries and provides a curvilinear framework for modeling internal heterogeneities is proposed. This representation is based on non-uniform rational basis splines which smoothly interpolate between a set of points. The three-dimensional models of geobodies are generated using a small number of parameters, and hence can be easily modified. This can be done by a point and click user interaction for manual editing or by a Monte-Carlo sampling for stochastic simulation. Each elementary shape is controlled by deformation rules and has connection constraints with associated objects to maintain geometric consistency through editing. The boundary representations of the different sedimentary structures are used to construct hexahedral conformal grids to perform petrophysical property simulations following the particular three-dimensional parametric space of each object. Finally these properties can be upscaled,

✉ Jeremy Ruiu
ruiu@gocad.org

Guillaume Caumon
Guillaume.Caumon@univ-lorraine.fr

Sophie Viseur
viseur@cerege.fr

¹ Georessources, Université de Lorraine-ENSG, CNRS, GREGU,
2 rue du Doyen Marcel Roubault, 54518 Vandoeuvre-Lès-Nancy, France

² CEREGE (UMR 7330), Aix Marseille University, 3 Place Victor Hugo,
13331 Marseille Cedex 03, France

according to erosion rules, to a global grid that represents the global depositional environment.

Keywords Architectural elements · Geobody · Surface-based modeling · Event-based modeling · Channel · Clinofolds · Meanders · Lobes

1 Introduction

Most clastic deposits consist in geometric arrangements of sedimentary facies which control petrophysical heterogeneities. Capturing the spatial layout of sedimentary facies is therefore critical for subsurface modeling tasks. For instance, several authors have studied the influence of small-scale sedimentary heterogeneities on subsurface flow (Alpak et al. 2013; Desbarats 1987; Haldorsen and Lake 1984; Jackson and Muggeridge 2000; Novakovic et al. 2002). For instance, Jackson et al. (2009) show that the thicknesses of sealing facies between clinofolds impact the prediction of hydrocarbon recovery volumes in shallow marine reservoirs. Jackson and Muggeridge (2000) also depict different flow behaviors depending on the scale of shale heterogeneities and the number of fluid phases. In the case of CO₂ storage capacity in reservoirs, Issautier et al. (2013) show the strong influence of heterogeneities on uncertainties related to both transport and storage capacity.

Classical approaches for facies modeling in sedimentary contexts upscale small-scale core data and use geostatistical methods at the modeling grid scale to deduce spatial distribution of given properties (e.g., rock types, porosity, permeability, etc.) based on their spatial probabilistic distribution. In the case of pixel-based approaches, the geometric and multi-scale aspects of sedimentary heterogeneities are most commonly handled using the cookie cutter strategy (Journel 1996; Journel et al. 1998), whereby properties are simulated within simulated facies deemed stationary. Over the past decade, multiple-point geostatistics (MPS) has emerged as an interesting practical way to describe complex channel geometries (for instance, Mariethoz and Caers 2014 and Renard and Mariethoz 2014 for reviews of recent progresses). This type of methods is based on analog training images to obtain conditional probabilities in stochastic spatial simulation processes. These approaches can be easily conditioned to dense well data. However, generating three-dimensional training images deemed representative of the geological environment remains a practical challenge in the application of MPS (Boisvert et al. 2007; Mirowski et al. 2009). In practice, object-based simulation is often used to generate training images.

Classically, object-based methods (Deutsch and Wang 1996; Deutsch and Tran 2002; Haldorsen and Lake 1984; Hassanpour et al. 2013; Holden et al. 1998; Shtuka et al. 1996; Viseur 2004) simulate sedimentary bodies by sampling from probability distributions of geometric object parameters. Internal heterogeneities are then represented in a background grid (Deutsch and Wang 1996; Holden et al. 1998) or in a curvilinear grid defined for each channel (Shtuka et al. 1996). Object-based methods can also be applied at a smaller scale to represent centimetric to decimetric sedimentological bedforms, then upscaled to decametric scale (Wen et al. 1998; Nordahl et al. 2005).

The choice of the geometric object parametrization is non-unique and can influence the ability of the method to produce realistic sedimentary shapes. Therefore, process-oriented and pseudo-genetic methods try to model or approximate the results of depositional processes to define channel shapes (Abrahamsen et al. 2007; Howard and Knutson 1984; Howard 1996; Lopez 2003; Pyrcz et al. 2009).

Most of these methods rely on grids to construct or to represent the object geometries. The limited resolution of grids can be a source of aliasing at the interfaces between objects. To mitigate such approximations in object representation, several authors have proposed a surface-based description of object boundaries. A possible strategy consists in using the top and bottom bounding (surfaces Bertoncello et al. 2013; Fisher and Wales 1992; Graham et al. 2015; Pyrcz et al. 2005; Sech et al. 2009). For instance, Fisher and Wales (1992) suggest using parametric surfaces to capture the patterns of fluvial bodies between well data. They represent the top and bottom of the channel by two parametric surfaces yielding a boundary representation. The bounding surfaces of architectural elements can also be implicitly represented around channel axes, which makes it possible to maintain consistency of shapes during simulation and editing (Deutsch and Wang 1996; Hassanpour et al. 2013; Gai et al. 2012; Pyrcz et al. 2009).

This paper proposes a similar strategy using a boundary representation based on non-uniform rational basis splines (NURBS) surfaces (Piegl and Tiller 1995). The NURBS models can represent sedimentary bodies in many types of depositional environments, but this paper focuses on alluvial deposits (Sect. 2). As other surface-based representations, the proposed approach can accurately represent small-scale sedimentary structures without prior limitations imposed by the volumetric grid resolution. Additionally, our method directly and explicitly represents volumes, in the same spirit as done by Viseur (2004) with polyhedral objects. As compared to previous methods, the proposed representation makes it possible to maintain the geometric consistency of the structures during pseudo-genetic evolution. Additionally, NURBS can represent a number of tridimensional alluvial features such as channel asymmetry depending on meander curvature, channel bifurcation and confluence, levees, point bars and lobes (Sect. 3). Also, NURBS are compact in the sense that they can describe relatively complex geometric shapes with a limited set of parameters. In addition to CPU and RAM efficiency, this allows interpreters to create and deform objects with a small number of graphical interactions. This compact parameterization also makes it possible to use optimization methods to automatically reshape objects to match features in seismic or aerial images (Ruiu et al. 2015). Finally, modeling the petrophysical properties in sedimentary structures can be tedious as their distribution highly depends on the geometry of the object and the support grid is not usually aligned on the heterogeneity. Managing this particular distribution implies either the definition of locally varying anisotropy (Deutsch and Wang 1996) or complex meshing approach (Shtuka et al. 1996). The volumetric representation presented in this paper allows constructing direct conformable grids for several types of architectural elements and with different types of internal architectures, giving a curvilinear coordinate system for modeling internal heterogeneities (Sect. 4).

2 Conceptual Descriptions of Sedimentary Structures

2.1 Alluvial Deposit Context

In continental environments, rivers are the main agent of the transport of sedimentary loads toward coastal areas. Alluvial formations are shaped by channels which erode, transport and deposit sediments (Miall 2010).

Miall (1985, 1996) decomposes river deposits in a construction of eight architectural elements (channels, gravely bars and bedforms, sandy bedforms, foreset macroforms, lateral accretion deposits, sediment gravity flow deposits, laminated sand sheets and overbank fines). These elements are equivalent in size to the channel fill and can be differentiated by their external shapes, internal geometries and facies combinations. These types of deposits are usually characterized by their good porosity and permeability, which explains their interest in hydrocarbon exploration and production. However, owing to their internal heterogeneities, alluvial reservoirs can be highly compartmentalized (Miall 2010).

2.2 Hierarchical Organization of Alluvial Sedimentary Structures

Miall (1996) describes a hierarchical classification of alluvial sedimentary structures, based on the typology of their bounding surfaces. These different structures are constructed by multiscale nested organizations of microforms (e.g., ripple marks), mesoforms (e.g., dunes) and macroforms (e.g., point bar, levee, crevasse splay, etc.) (Table 1).

The first-order and second-order bounding surfaces are microforms and mesoforms made of cross-bed surfaces with little or no internal erosion. The third-order surfaces are cross-bedding erosion surfaces dipping at an angle up to 15°. They are usually

Table 1 Hierarchy of fluvial architectural elements, after Miall (1996)

Sedimentary order	Fluvial architectural elements	Specifics characteristics
1st order	Microforms (ripples)	Centimeter scale undulations with little or no apparent erosion
2nd order	Mesoforms (dunes)	Large meter scale ripple with little or no apparent erosion
3rd order	Macroforms of growth increment (clinoform formed by the lateral accretion increment in channel)	Dipping depends of width depth ratio of the channel, usually up to 15° in the direction of accretion
4th order	Macroforms (point bars, levee, crevasse splay)	Variable geometries depending of the nature of the architectural element. Extension can be between few meters to few kilometers
5th order	Channel	Defined by width, length, depth, width/depth ratio with a concave-up basal surface

The sedimentary orders addressed in this paper are in bold

draped with mudstones. The fourth-order surfaces are the upper bounding surface of macroforms. The fifth-order surfaces limit major sand deposits such as channel fill features and channel phases. The architectural elements constituting the river deposits are of the third to fifth order (Miall 1996).

Rules are defined on these bounding surfaces (Miall 1996). A surface can truncate any surface of equal or lower order, but none of higher order. In this way, a surface always limits a set of nested bounding surfaces. Surfaces of low order can change order laterally. Bounding surfaces can disappear because of erosion. These rules can be used for the modeling of sedimentary structures using deformable templates.

3 NURBS-Based Boundary Representations of Sedimentary Objects

Boundary models of sedimentary structures are constructed by combining several cubic NURBS surfaces, each defined by a set of control points. These surfaces represent an approximation of the actual body geometry. Common points between surfaces must remain collocated to maintain the coherence of the shape throughout editing.

3.1 Mathematical Elements of NURBS

NURBS are a mathematical model commonly used in computer-aided design for representing curves, surfaces and solids. They consist in a smooth interpolation between an ordered set of points called the control points of the NURBS. The interpolation function is a piecewise continuous polynomial or rational function in which degree is directly related to the number of interpolated points (Piegl and Tiller 1995). The NURBS formulation also relies on knot vectors that specify the parametric coordinates of the points separating the different interpolation functions in each direction of the parametric space. The number of elements in a knot vector is equal to the sum of the number of control points and the degree. At a knot, the NURBS continuity is C^{p-k} where p is the degree and k is the multiplicity of the knot. Thus increasing the multiplicity of a knot creates creases in the NURBS. This feature can be used to allow for watertight connection between several smooth NURBS surfaces, for example to connect channel and levees surfaces (Sect. 3.3).

A NURBS curve is a function of a parametric coordinate u , controlled by n control points P_i (Piegl and Tiller 1995)

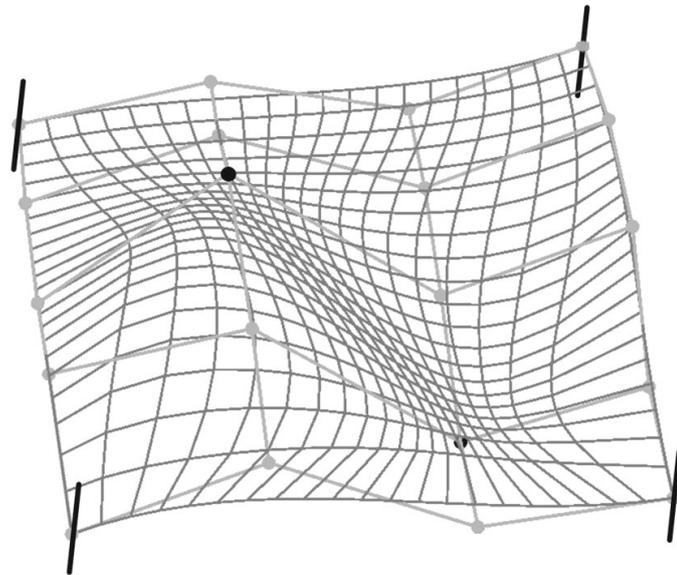
$$C(u) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) W_i P_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) W_i}, \quad (1)$$

where p is the degree of the NURBS, W_i are the weights of control points and $N_{i,p}(u)$ are the p th-degree basis functions.

A NURBS surface is defined as a tensor product of curves with two independent parameters (u, v) (Piegl and Tiller 1995) by

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j} P_{i,j}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) W_{i,j}}, \quad (2)$$

Fig. 1 Bi-cubic NURBS surface with weight $w = 10$ at the *black points* and $w = 1$ at the *grey points*. The *dark grey lines* representing that iso-parametric evaluations of the surface are particularly attracted around these two points



where p and q are the degrees of the NURBS in each direction of the parametric space, $P_{i,j}$ is one control point and $[n + 1] \times [m + 1]$ is the number of control points, $W_{i,j}$ is the weight of the control point (Fig. 1) and $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$ are the p th-degree and q th-degree basis functions.

3.2 Channels Shapes

3.2.1 Description

Coarse deposit facies in alluvial environments are formed in channels. In alluvial sediments, channels are seldom observable but are deduced from paleocurrent measurements from low-order structures (Miall 1985). In an active channel, the sediment fill is usually sandy with coarser elements at the base of the structure (Reineck and Singh 1980). An abandoned channel facies is muddier due to the diminution of the sediment load (Miall 1996). Commonly, the channel term is only used when the deposits cannot be described as low-order sedimentary structures generated by accretion processes. However, modeling channels is essential because channels condition the spatial layout of all other sedimentary structures in fluvial environment. Channel geometry is usually defined by its depth, width, length and sinuosity. The top bounding surfaces can be erosional or aggradational and the bottoms are concave-up erosional surfaces. Their slopes decrease when the channel width increases (Miall 1996). Channel-bounding surfaces are generally from the fifth order as summarized in Table 1.

3.2.2 Construction

A channel form is represented using three connected NURBS surfaces. The channel shape is constructed around the backbone of the channel, which represents the line of maximum depth projected onto the top surface. The backbone is a piecewise linear curve that can be manually picked on a horizon slice or stochastically gener-

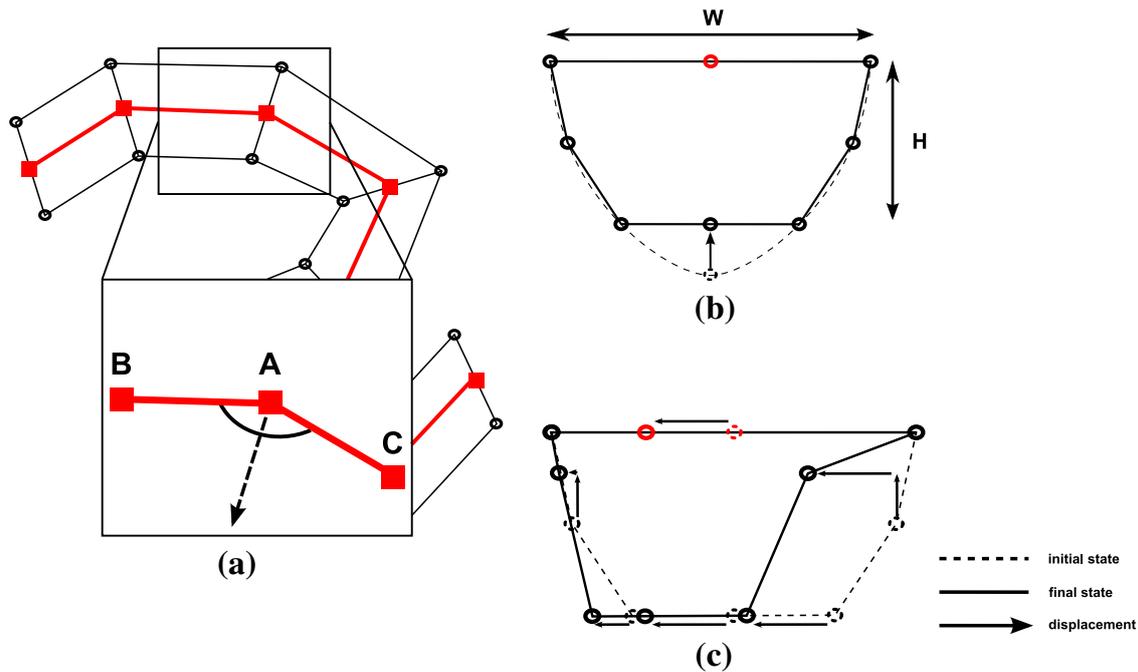


Fig. 2 Construction steps for a channel section. **a** Sections are constructed for each point of the backbone (in red) and are aligned on the bisector between two consecutive segments. **b** The points of the section are placed along a quadratic function defined from the width W and height H of the channel. **c** Points are translated to obtain the desired asymmetry

ated (Deutsch and Tran 2002; Viseur 2004; Pyrcz et al. 2009). The tridimensional shape of the channel is constructed by sections which are placed at the end points of each segment of the backbone (Fig. 2). They represent the control points of the channel-bounding surfaces. The shape of each channel section is defined by a width, a height and an asymmetry aspect ratio. The latter corresponds to the relative location of the backbone between the edges of the channel; for instance, the channel section is symmetric if the asymmetry value is 0.5.

The top surface control net is constructed from the backbone and the width (Fig. 2a). To maintain the width of the channel each section is aligned according to the bisector of the angle formed by two consecutive segments of the backbone (Fig. 2a). The lateral surfaces are constructed starting from the top surface and their points are placed along a quadratic shape (Fig. 2b). In particular, the point at the base of the quadratic function is aligned with the two above points to obtain the continuity at the channel base. A section modification process is applied to obtain an asymmetric shape of a channel according to its map view curvature (Fig. 2c). The resulting NURBS interpolation is shown in Fig. 3, which illustrates in particular the impact of channel curvature on the asymmetry (Fig. 3b, c).

3.2.3 Branching Channels

In many fluvial formations (braided, meandering, or anastomosed rivers), several channels can be connected. Avoiding geometric inconsistencies, such as holes between branching channels, calls for special processing. The connection between two channels can be created at a section in the control mesh of the main one. The first step is

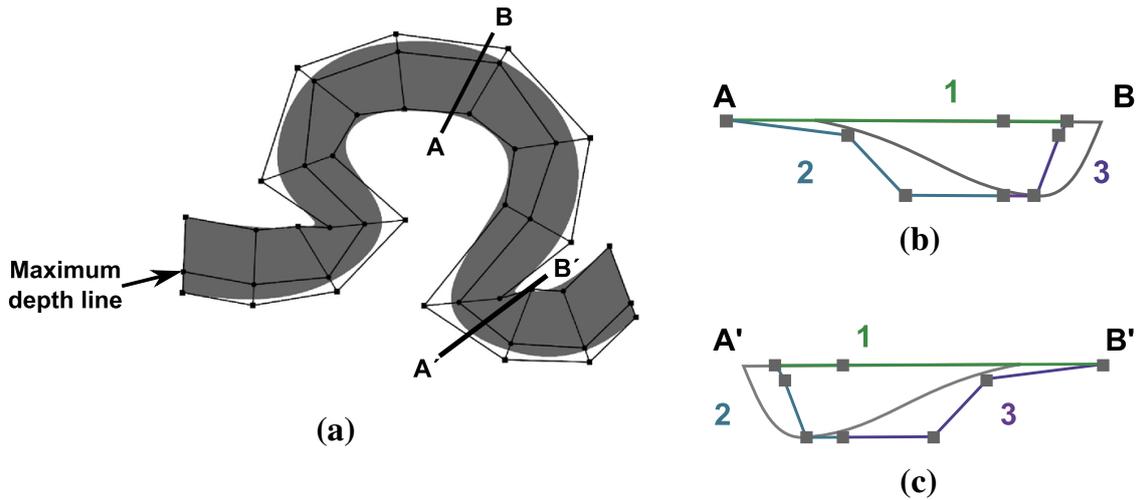


Fig. 3 Model of an asymmetric channel based on NURBS surfaces [modified from Ruiu et al. (2014)]. **a** Top view of the channel (the control point net is represented by *black lines*). **b** Section view of the asymmetric channel in a positive channel curvature (*a different color* is used for each surface control point net). **c** Section view of the channel with an inverse asymmetry corresponding to a negative channel curvature

to fix the backbone extremity of the branching channel, to its corresponding point on the designated section of the main channel (Fig. 4a).

The second step to connect the channel is to project the other control points of the extremity to branch onto the main channel. For an initial control point P of the branching channel, the parametric coordinates of the closest point on the main channel surface are found using the Newton method (Piegl and Tiller 1995)

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial u} f(u_i, v_i) & \frac{\partial}{\partial v} f(u_i, v_i) \\ \frac{\partial}{\partial u} g(u_i, v_i) & \frac{\partial}{\partial v} g(u_i, v_i) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{i+1} - u_i \\ v_{i+1} - v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f(u_i, v_i) \\ g(u_i, v_i) \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$\text{with } \begin{cases} f(u_i, v_i) = \frac{\partial}{\partial u} S(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P) \\ g(u_i, v_i) = \frac{\partial}{\partial v} S(u_i, v_i) \cdot (S(u_i, v_i) - P), \end{cases}$$

where u_i and v_i are the parametric coordinates at the i th iteration of the projection of P on the NURBS surface $S(u, v)$ (side surface of the main channel on which the branching channel is connected). The final result of the branching operation is shown with the control net in Fig. 4c and without in Fig. 4d. This process can be used to connect either one or the two extremities of a channel. This method is used for the manual three-dimensional interpretation (with an arbitrary depth value) of 13 distributary deltaic channels on a satellite image of Atchafalaya Delta near Bayou Sale, Louisiana (Fig. 5).

3.2.4 Stochastic Generation

To stochastically generate several channels, the lines of maximum depth are simulated (Fig. 6) in a way similar to Viseur (2004): from an initial random line, lateral evolution is simulated. The proposed input parameters of this generation are the channel

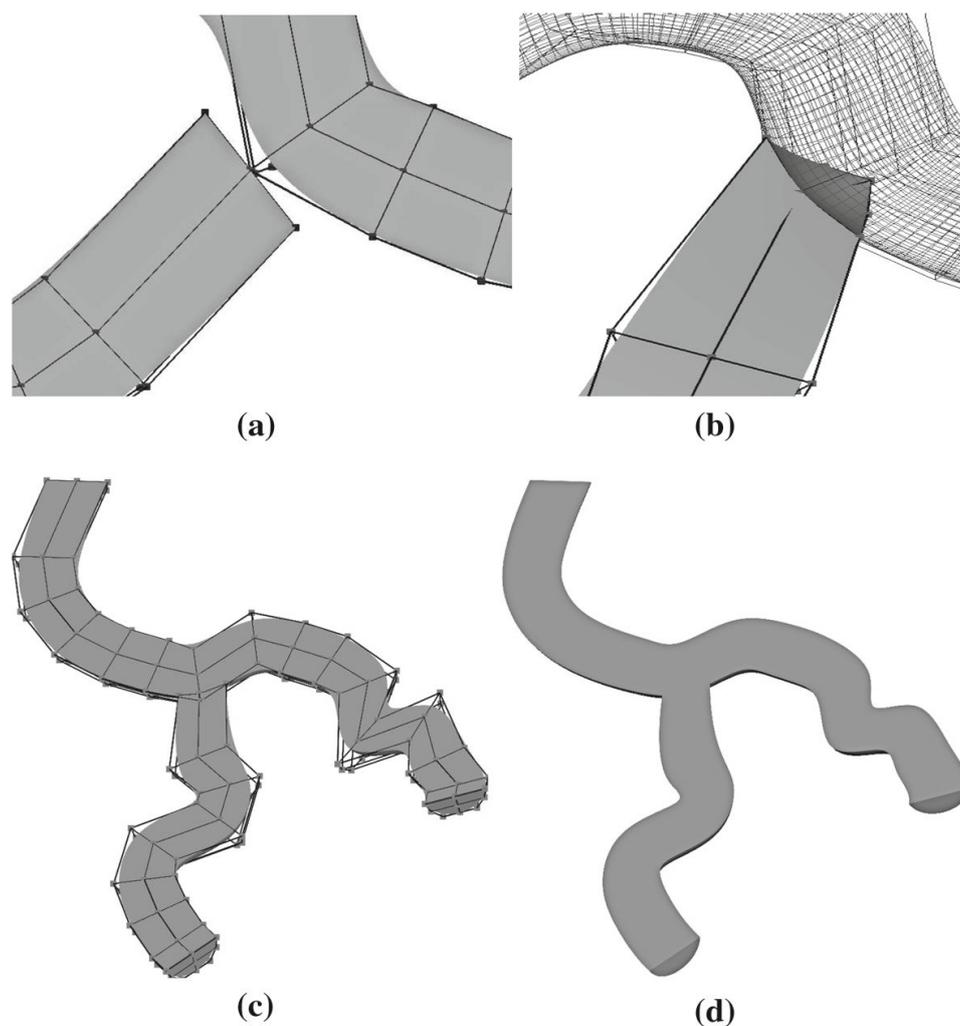


Fig. 4 Process to branch two channels. **a** Extremity of the channel to link is aligned on the main channel. **b** This extremity is projected on the main channel. **c** Result with the control points. **d** Result with the channels only

length, the mean amplitude of the sinuosity orthogonal to the global stream direction \vec{F} (normalized vector), and the wavelength of the sinuosity parallel to the global channel direction and the mean width of the point bars. As noted by [Abreu et al. \(2003\)](#), channels can migrate both down-dip along the main stream direction \vec{F} (sweep) and laterally (swing). Therefore, a growing ratio (γ) corresponding to the relative importance of both migrations is applied in the pseudo-genetic process.

Primarily, the growing process of the channel relies on the evaluation of tangents and the curvatures to determine the directions and amplitudes of migration. Initialization is simply performed by an unconditional one-dimensional sequential Gaussian simulation (Fig. 6a). To obtain a smooth channel trajectory, a Gaussian variogram is used with a range equal to half of the channel wavelength, as this type of approach is also used ([Deutsch and Tran 2002](#)). Using a one-dimensional sequential Gaussian simulation allows to obtain a relatively smooth initial channel that reproduces the mean amplitude and wavelength of the channel while introducing a stochastic variability on the initial shape. This initial variability has an impact on the final shape of the channel. More advanced methods based on physical analogy ([Pyrzcz et al. 2009](#)), multiple-point

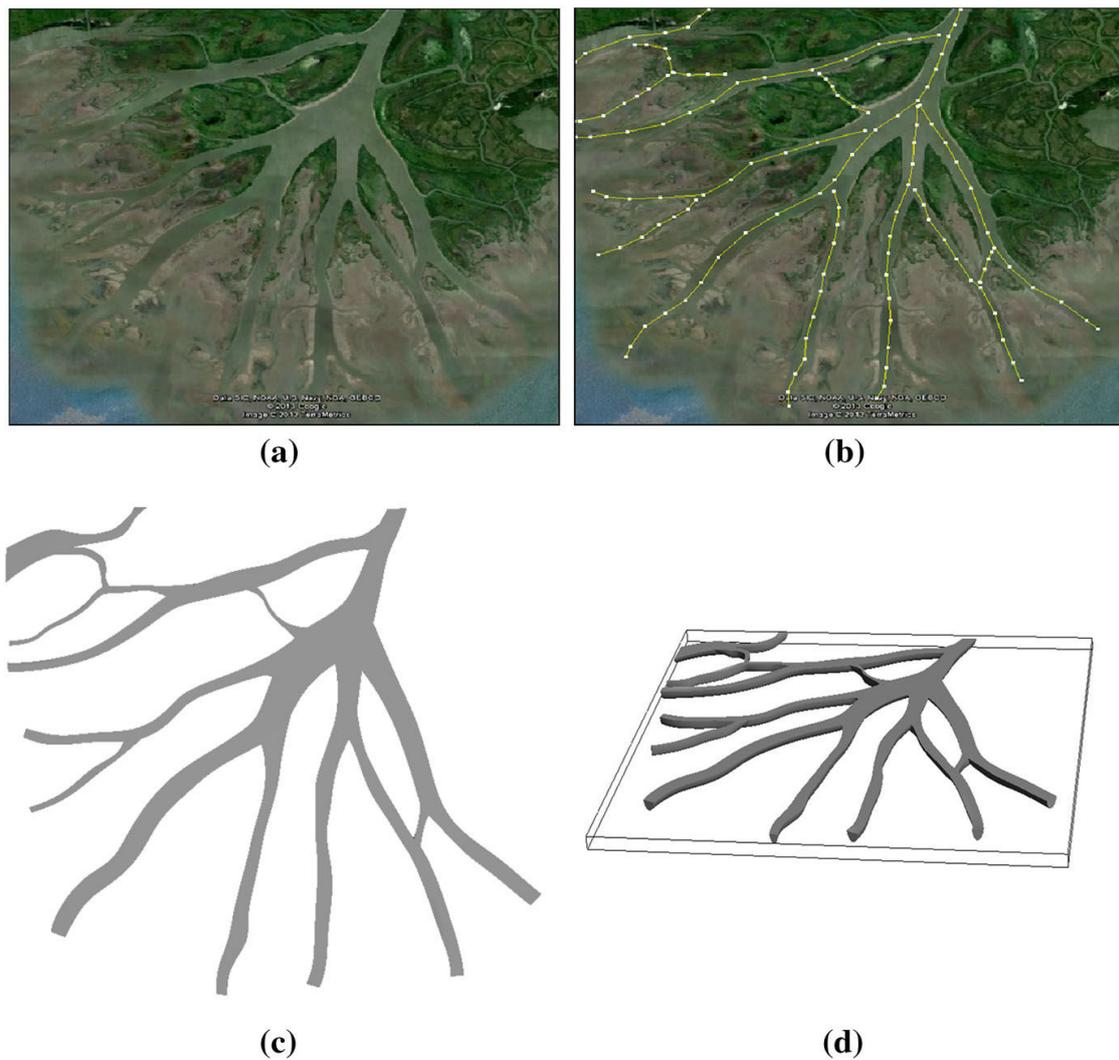


Fig. 5 Application of the channel branching. Process: manual three-dimensional interpretation (with an arbitrary thickness value) of 13 channels on a satellite image of Atchafalaya Delta (Google Earth 2012). **a** Original image. **b** Pickings of channels (one *line* by channel). **c** Result in top view. **d** Result in top lateral view

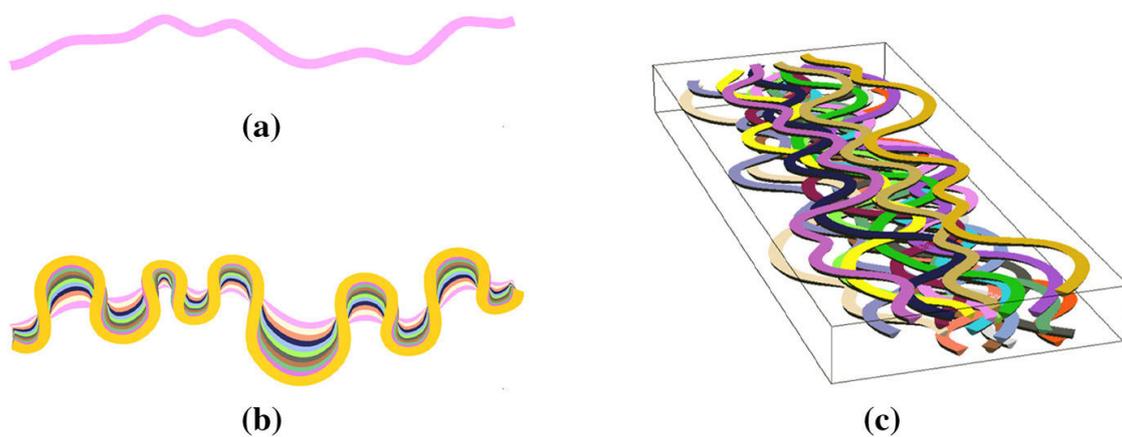


Fig. 6 Construction of ten channels using a stochastically generated backbone. **a** The channel path is generated using an unconditional sequential Gaussian simulation. **b** Lateral migration steps of a channel. **c** Simulation of ten channels

statistics (Mariethoz et al. 2014) or Lindenmayer systems (Rongier et al. 2015) could also be used.

For the initial channel geometry, meandering aspects are obtained using a growing process. According to Knighton (2014) the channel migration can be decomposed in three elementary displacements: an extension, a translation and a rotation. In this work, growing is obtained by displacing iteratively the control points by the following vector (Fig. 6b)

$$\vec{G}_i = \gamma \times (\|\vec{g}_i\| \times \|\vec{F}\|) \times \vec{F} + (\|\vec{g}_i\| \times \|\vec{F}_{ortho}\|) \times \vec{F}_{ortho}$$

with $\left\{ \begin{array}{l} \text{Diagram showing a channel curve with vectors } \vec{T}_i \text{ (tangent), } \vec{C}_i \text{ (curvature), } \vec{F} \text{ (global flow), and } \vec{F}_{ortho} \text{ (orthogonal flow).} \\ \vec{F} \cdot \vec{F}_{ortho} = 0 \\ \vec{g}_i = \alpha \times \vec{T}_i - \beta \times \vec{C}_i + \delta \times (\vec{T}_i \cdot \vec{F}) \times \vec{F} \end{array} \right. \quad (4)$

where \vec{T}_i is the tangent which represents the rotation component and \vec{C}_i the curvature which represents the extension due to the lateral migration (swing (Abreu et al. 2003)). \vec{F}_i is the vector representing the global flow direction and is associated with downdip migration of the channel [sweep (Abreu et al. 2003)]. These elementary vectors are evaluated at the projection of the control point i on the NURBS channel.

3.3 Levees

3.3.1 Description

The formation of levees is the consequence of the flooding of rivers. It results in the deposition of a high proportion of fine sands, silts and muds organized in overlapping lenses parallel to the channel borders. Levees consist in a sharp ridge which can reach 10 m in thickness (Miall 1996; Reineck and Singh 1980). The deposits get thinner and the facies finer as the distance from the guiding channel increases (Miall 1996). Levee-bounding surfaces are of the fourth order as summarized in Table 1.

3.3.2 Construction

Levee forms are represented using four connected NURBS surfaces. Two lateral surfaces are used to construct the lateral faces of the levee ridge (Fig. 7a). The control points are placed following a quadratic function as for channel construction. An asymmetry aspect ratio is used to modify these surfaces to reproduce the asymmetric aspect of levees (surfaces one and two in Fig. 7b). The third surface represents the bottom of a levee. As levees are constructed from a guiding channel, a fourth surface is added

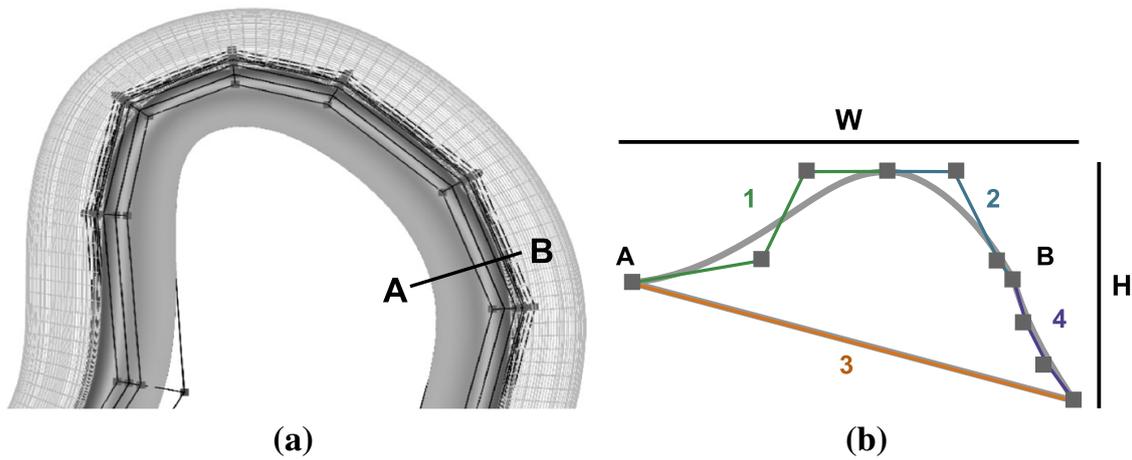


Fig. 7 Modeling of a levee using four NURBS surfaces placed according to the width **W** and height **H** of the levee. *Black lines* the control net; *grey points* the control points. **a** Top view of the levee with its related channel (in wireframe mode). **b** Section view of the levee

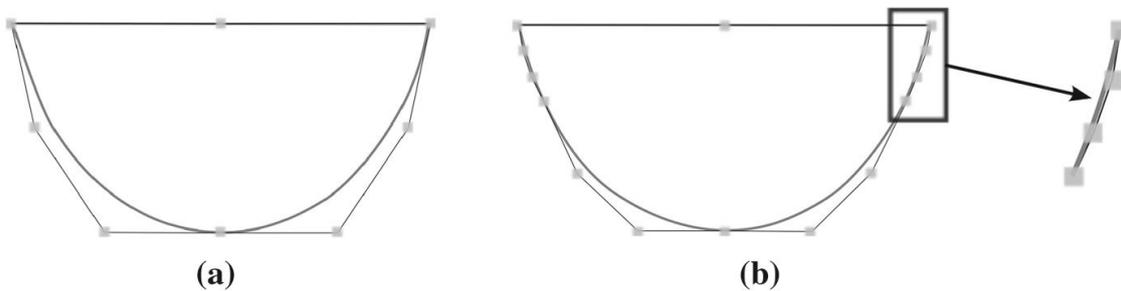


Fig. 8 Extraction of a portion of parametric surface. **a** Initial state. **b** Adding knots lead to add control points on the channel. Knots are added at the desired parametric coordinate to maintain the shape of the parametric surface. The knot is added to have a multiplicity equal the degree of the NURBS plus one to obtain C_0 surface at this point and to ensure the surface goes through the control points

(surface three in Fig. 7b) to ensure the consistency in depth between a channel and a levee. From a given channel lateral side, a levee shape is defined by the width of the levee, the height of the levee, and an asymmetry aspect ratio (formulated as a ratio of the width, for instance the levee is symmetric if the value is 0.5).

3.3.3 Levee-Channel Coherency

The coherency in depth between the channel and its levee is ensured by extracting the portion of the common surface form between the levee and the channel down to the appropriate depth (Figs. 8, 9). This part of the channel side is isolated using the property of NURBS knot vector described in Sect. 3.1. Indeed, the multiplicity of the knot at the desired parametric value can be increased while preserving the shape of the NURBS (Fig. 8b). Thus, a knot is inserted in the appropriate channel side surface by solving the following equation (in the case of a curve) (Piegl and Tiller 1995)

$$\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u) P_i^W = \sum_{i=1}^{n+1} N'_{i,p}(u) Q_i^W, \tag{5}$$

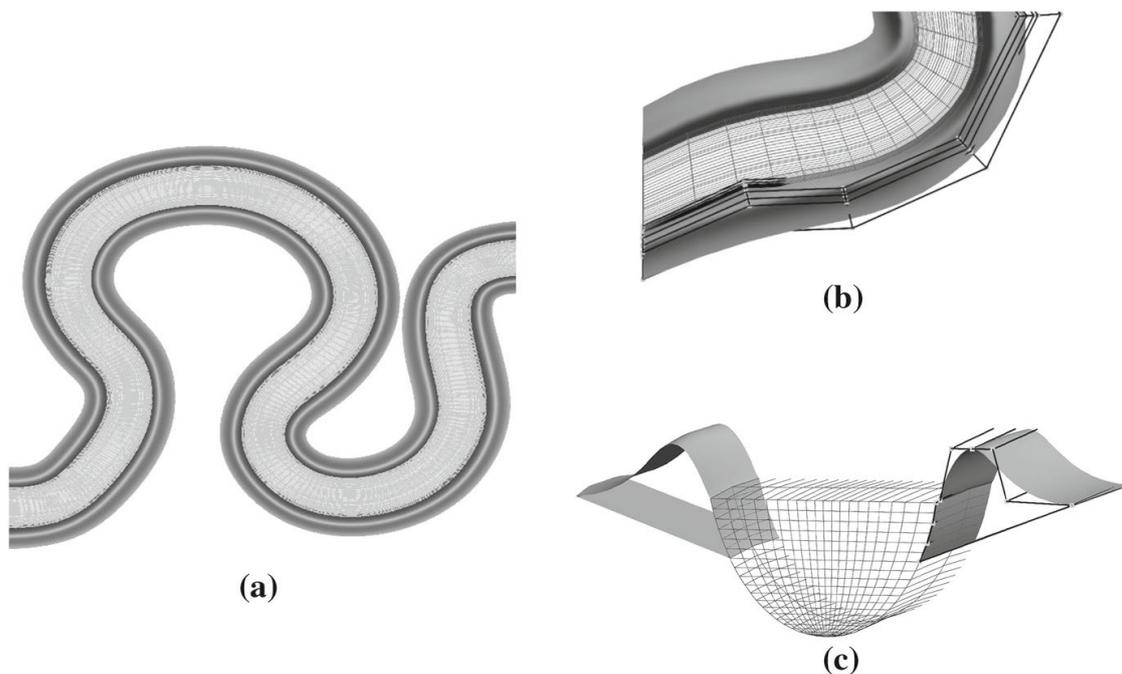


Fig. 9 Levees are constructed in association to a channel. **a** Top view of levees associated with a channel. **b** Zoom on the top view (channel in wireframe mode). **c** Lateral section of the channel and its levees showing the coherency in depth between the forms

where Q_i are the new control points and $N'_{i,p}(u)$ are the p th-degree basis functions corresponding to the new knot vector. Equation (5) is generalized to surfaces by applying it to each row or column of control points.

3.4 Lateral Accretion

3.4.1 Description

Lateral accretion deposits (point bars) are abundant in meandering rivers. They are formed by the migration of a channel due to the erosional water stream outside the bend of the channel. Point bars are formed by this continuous migration of the channel and are the result of the sediment deposition inside the bend of the channel (Reineck and Singh 1980). This type of deposit is constituted by successive clinofolds which are macroforms delimited by third-order bounding surfaces, called epsilon cross-bedding (Allen 1963) and constructed by the increment of lateral growth. Epsilon cross-bedding surfaces are dipping surfaces with a dip inversely proportional to their width/height ratio (Miall 1985). These structures usually present a height approximately equal to the depth of their related channel with an offlapped upper termination and a downlapped one on the channel floor (Miall 1996).

3.4.2 Construction

The clinofolds, representing the successive increments of the lateral accretion, are constructed using six connected NURBS surfaces. Two surfaces are used to represent

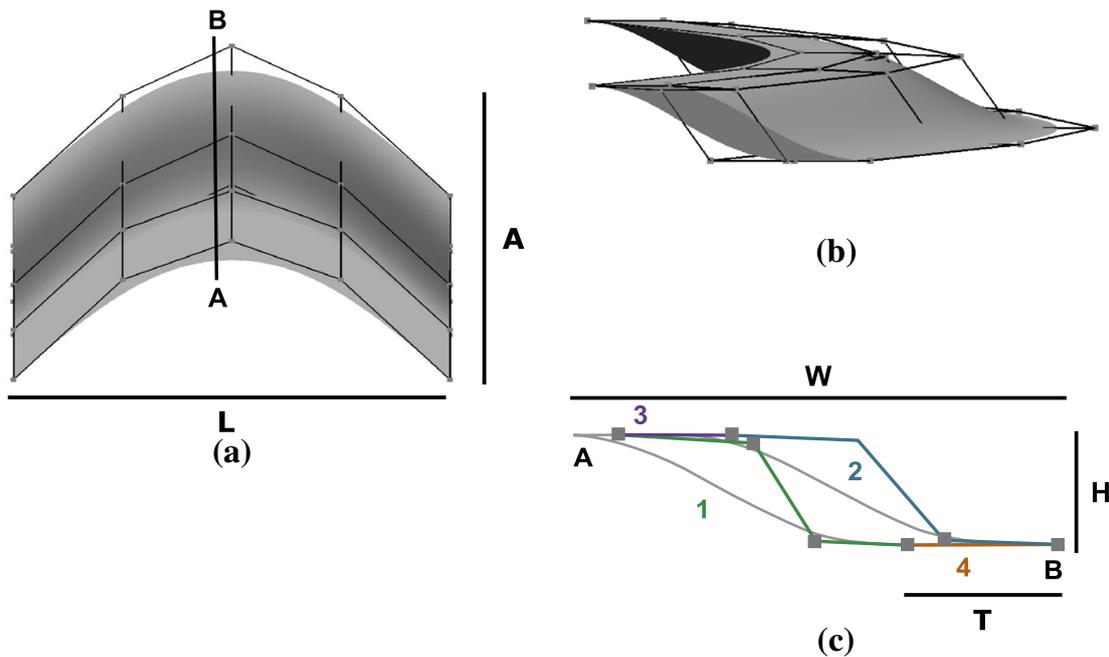


Fig. 10 Modeling of a clinoform using six NURBS surfaces from width W , height H , thickness T , length L of the clinoform and the amplitude A of the channel which has formed the clinoform. *Black lines* are the control point net and the *grey points* are control points. **a** Top view of the clinoform. **b** Side view of the clinoform. **c** Section view of the clinoform

the top and bottom foresets and two others for the topset and the bottomset (Fig. 10). For the foreset, the control points are placed according to the same quadratic function as for a channel (Fig. 10b, c). Two lateral surfaces are used to obtain a closed boundary representation (Fig. 10b). Using this representation, the clinoform shape is defined by the length, width and height of the clinoform, the thickness corresponding to the distance between the two foresets, the amplitude of the channel which has formed the clinoform and an asymmetry aspect ratio (formulated as a ratio of the width, for instance, if the value is 0.5 the clinoform is symmetric).

3.4.3 Clinoform Generation from Channel Growth

The channels growth [Eq. (4)] can be used to generate point bars and their constitutive clinoforms (Fig. 11a). The channels of each step of the growth process intersect at the extremity of clinoforms. To determine the domain of a clinoform, the intersection between the control nets of the successive channels is computed; projecting these intersection points on the corresponding surfaces approximates the clinoform extremity locus in the parametric space (Fig. 11b). The portion to isolate can be determined knowing the parametric coordinates of the extremities of the clinoforms on the original channel (Fig. 11c). The control points are determined using the same method as described in Fig. 8b to ensure the conformity between the different clinoforms. The results and the link between the channel and its clinoforms are shown in Figs. 12 and 13.

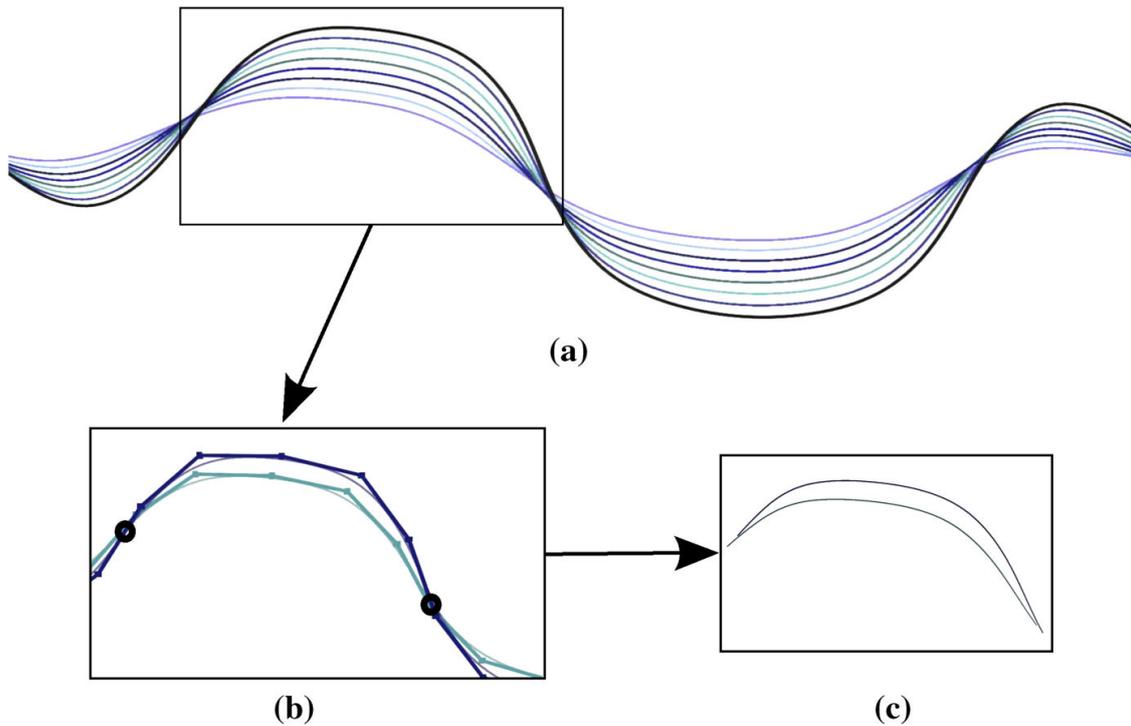


Fig. 11 Extraction of a clinoform from a channel growing process. The channels are presented using their maximum *depth lines*. **a** A channel with its growing steps (in *black* final state and in *color* the others). **b** The intersections between the control net of these surfaces are computed. **c** Surface parts between the intersection points are extracted

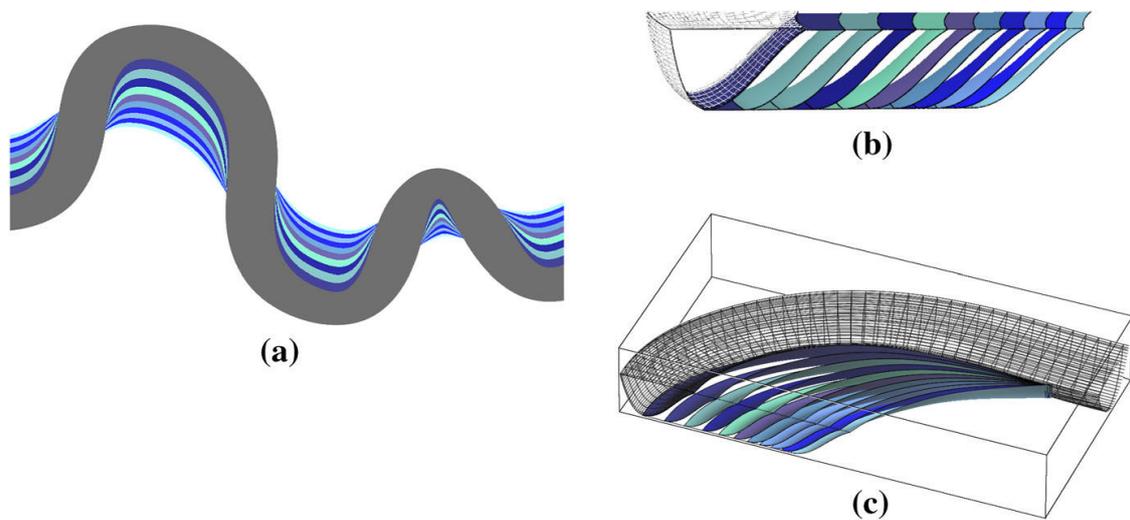


Fig. 12 Clinoforms are extracted from simulated channel growth. **a** Clinoforms in top view associated with a channel. **b** Slab view of the clinoform succession. **c** Cutoff view of the channel and its clinoforms showing the coherency between the different forms in three-dimensional

3.5 Crevasse Splay Lobes

3.5.1 Description

Lobe shape can be present in several sedimentary deposits at different scales, such as alluvial deposits (crevasse splay), delta (deltaic lobe) and turbidite basin floor. Their

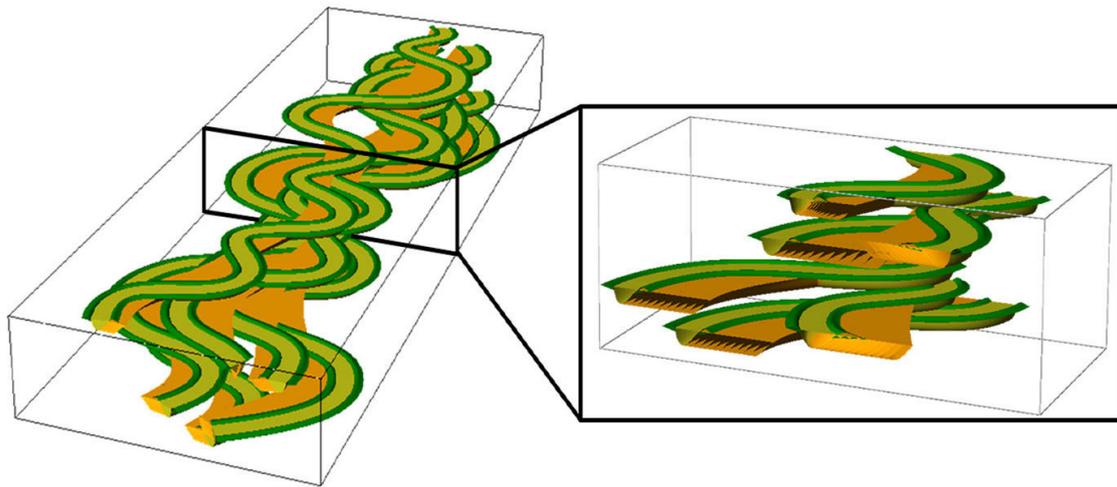


Fig. 13 Realization of a fluvial deposit environment presenting four channels (in yellow) with their associated point bars (in orange) and levees (in green)

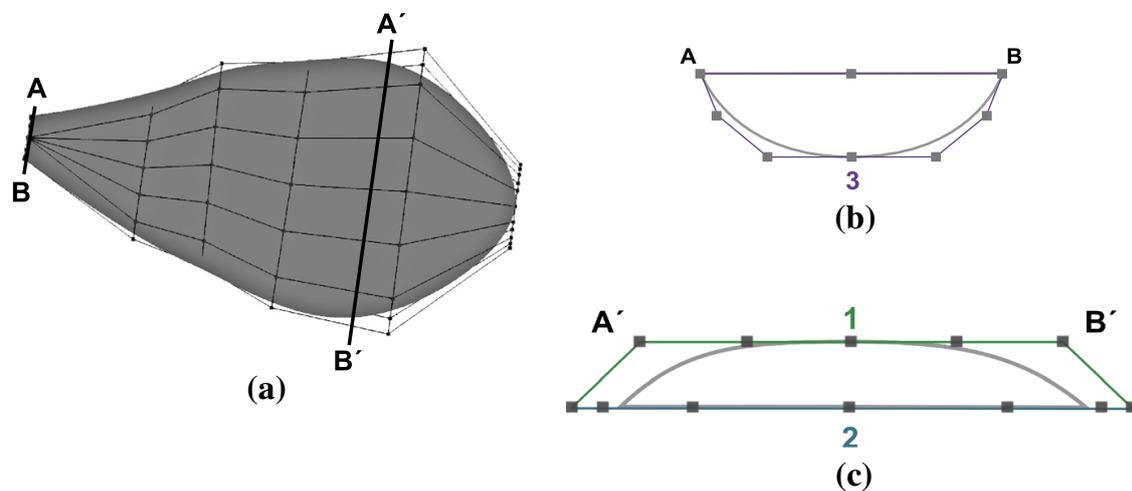


Fig. 14 Modeling of a lobe shape using three NURBS surfaces. *Black lines* are the control point net and the *grey points* are control points. **a** Top view of the lobe. **b** Channel-shaped section used to ensure the conformity with the lobe related channel. **c** Lens-shaped section

usual geometry is a very large shape body (Miall 1996; Bhattacharya 2010; Arnott 2010). In the case of alluvial deposits this type of structure can be up to 10 km long and 5 km large. The crevasse play sequence is usually up to 10 m high and gets thinner away from the associated channel. Crevasse splay bounding surfaces are generally of fourth order as summarized in Table 1.

3.5.2 Construction

Lobe shapes are constructed using three connected NURBS surfaces (Fig. 14). The first surface is used to construct the lobe's top. The control points of this surface are placed along a quadratic shape similarly to the channel. The second surface is used to construct the bottom and is flat. The third surface constructed has the same shape as a channel section and is used to connect the lobe and its related channel (Fig. 14c). From a given channel object and a crevasse branching location, the lobe shape is defined by the backbone, the width and the height of the lobe.

4 Property Modeling

The sedimentary structures described in this paper provide a frame to create conformable, regular curvilinear grids. These grids define a local frame suitable to model the petrophysical properties which are controlled by depositional processes.

4.1 Individual Object Petrophysical Properties

4.1.1 Grid Construction

The same way an NURBS surface is constructed by performing a tensor product between two NURBS curves, NURBS volume is established using a tensor product between three curves. Considering three curves of degrees p , q and r defined for the independent parameters (u, v, w) , NURBS volume V is defined as

$$V(u, v, w) = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) W_{i,j,k} P_{i,j,k}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^l N_{i,p}(u) N_{j,q}(v) N_{k,r}(w) W_{i,j,k}}, \quad (6)$$

where $P_{i,j,k}$ is one control point and $[n] \times [m] \times [l]$ is the number of control points, $W_{i,j,k}$ is the weight of the control point and $N_{i,p}(u)$, $N_{j,q}(v)$, $N_{k,r}(w)$ are the p th-degree, and q th- and r th-degree basis functions.

The three-dimensional NURBS formulation is applied to the four types of objects previously described (channels, levees, clinofolds and lobes). For each object, the function is regularly evaluated in the parametric space, providing the cell corners of a hexahedral grid. If the grids are constructed from the entire parametric space they are intrinsically conformable to the bounding NURBS surfaces up to the chosen spatial resolution (Fig. 15). The aggrading grid (Fig. 16c) is extruded proportionally to the top surface. In this case, the grid is only constructed following the top surface, a post-processing is then needed for the grid to follow the tridimensional geometry of the channel. Also, grid conformity across different objects is not necessarily guaranteed and would call for non-neighbor connections to be defined, as for instance between channel and levee (Fig. 16d).

4.1.2 Channel Internal Patterns

Reineck and Singh (1980), based on McKee (1957), defined three types of channel filling patterns:

- (i) By horizontal layers. This type is most common in preserved fluvial-type channels.
- (ii) By concave-up surfaces conforming to the channel shape. This type is usually present in submerged channels such as turbiditic ones.
- (iii) By asymmetrical inclined surfaces. This type is common in tidal-influenced deposits.

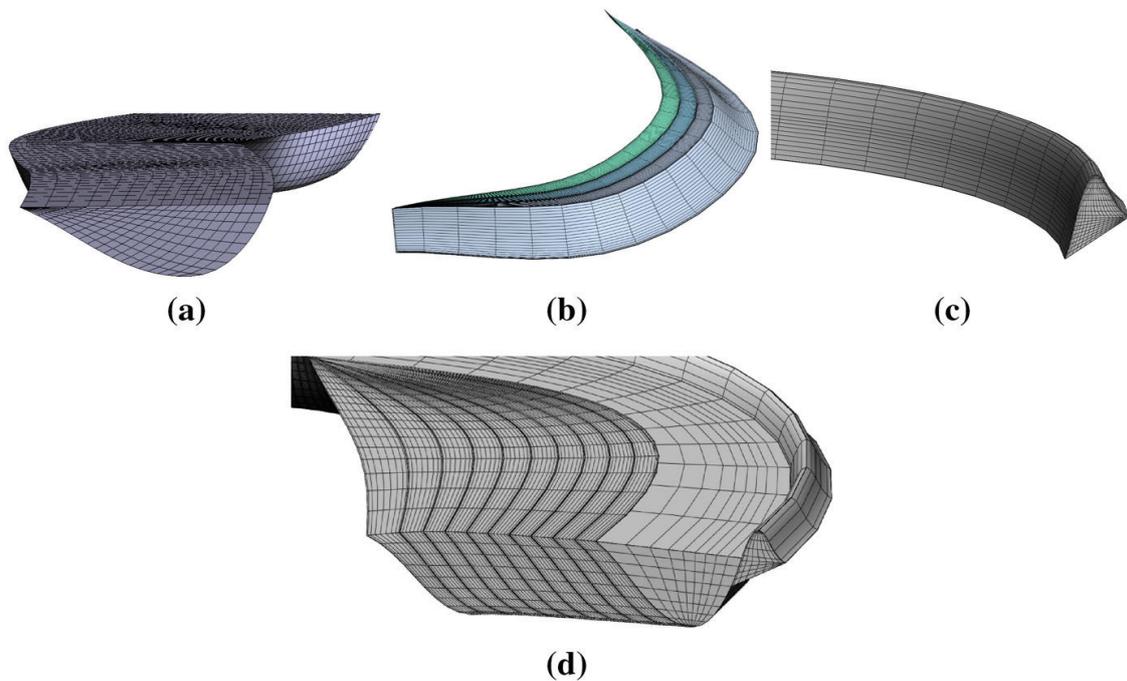


Fig. 15 Hexahedral grids constructed from NURBS-based boundary representations using different types of filling methods. **a** Grid constructed from a channel. **b** Grids constructed from clinoforms. **c** Grid constructed from a levee. **d** Relations between these different grids

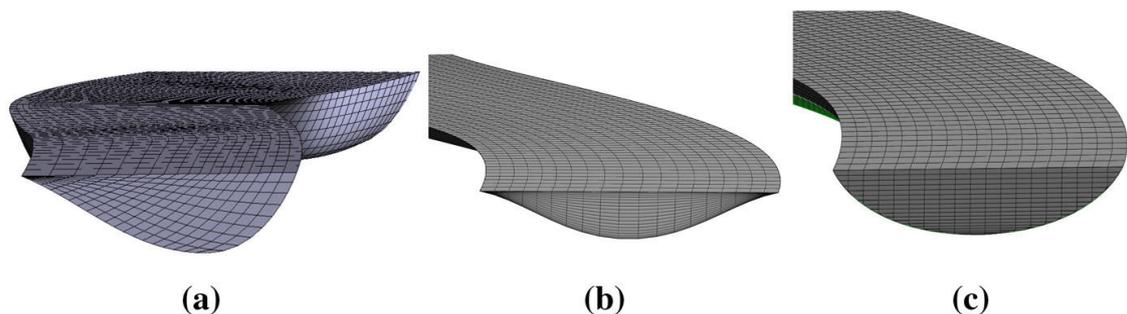


Fig. 16 Hexahedral grids constructed from NURBS boundary representations using different types of filling methods (Reineck and Singh 1980). **a** Prograding channel. **b** Divergent channel. **c** Aggrading channel

Such internal geometries can be obtained by modifying the way the control mesh of the channel-bounding surfaces is considered to construct the trivariate volumetric NURBS. For instance, the construction of the prograding grid in Fig. 16a is based on the mesh of the two lateral surfaces (Fig. 3). The divergent grid in Fig. 16b is constructed using the mesh of the top surface and by considering the two lateral surfaces as a global bottom one. The aggrading grid (Fig. 16c) is extruded proportionally to the top surface. Then, the lower corners of the cells directly below the base surface of the channel are then vertically projected on that surface and all the underlying cells are deactivated.

4.1.3 Example of Property Modeling

The conformable grids of the sedimentary objects enable the easy definition of the local direction of anisotropy by performing geostatistics in the grid parametric space. As an illustration, unconditional sequential Gaussian simulation is performed on grids

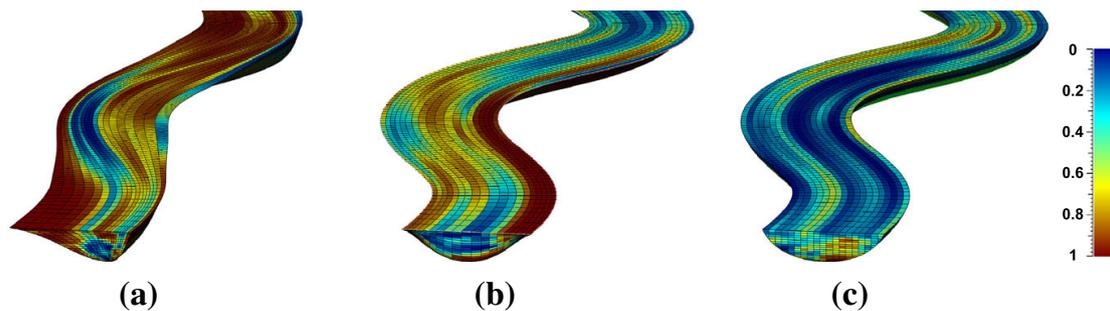


Fig. 17 Porosity values simulated using channel grids. **a** Prograding channel. **b** Divergent channel. **c** Aggrading channel

of Fig. 16. The simulations are computed using the same variogram and the same input distribution. In this example, the effect of grid block volume variation is neglected, so more advanced simulation methods could be used instead (Manchuk et al. 2005; Bertonecello et al. 2008; Manchuk and Deutsch 2012). A realization of these simulations on each grid is presented in Fig. 17. These results illustrate the impact of the different geometries on the computation of the internal channel heterogeneities.

4.2 Erosion Between Objects and Upscaling to Reservoir Grids

The NURBS objects presented up to now are all organized in response to the continuous evolution of a single channel. However, alluvial channels and their associated deposits migrate laterally and vertically and can cross-cut and erode older systems. In the current state of this work, the geometries of the eroded structures are not directly computed. For each object, an uncut grid is created and filled with petrophysical properties. Erosion relations between the objects are then taken into account when properties are transferred to the global reservoir grid.

Objects are ordered from their deposition order and their stratigraphic order within each deposition phase (a channel with its levees and point bars) (Table 1) (Miall 1996). The stratigraphic order is reproduced by assigning a value to each object according to the erosive relations of its bounding surface order defined by Miall (1996). In this case, the depth value is used to determine the deposit order of the object, assuming that the deepest objects are the oldest.

To illustrate the petrophysical property upscaling from the grids generated using individual geoobjects, 20 channels were stochastically generated. In the corresponding grids, porosity values were simulated using a sequential Gaussian simulation (Fig. 18a). The upscaling process was then performed object by object following the previously defined order to reproduce the impact of erosion. The upscaling of porosity was performed by simple volume-weighted averaging (Durlafsky 2005)

$$\phi^* = \frac{1}{V_b} \int_{V_b} \phi dV, \quad (7)$$

where ϕ is the fine scale porosity in the fine grid over the volume V_b of coarse cell, and ϕ^* is the equivalent porosity at coarse scale. The result of this simple upscaling process is shown in Fig. 18b.

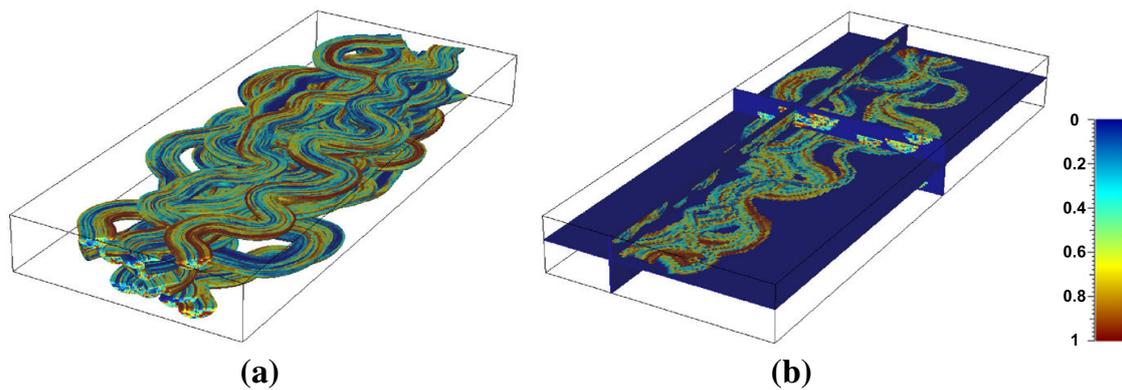


Fig. 18 Upscaling of divergent channel porosity values simulated using unconditional SGS. **a** Divergent channel grids to upscale. **b** Upscaling result

This cookie cutter strategy is not fully satisfactory because it approximates values in grid blocks crossed by the erosion surfaces. Also, thin shale drapes are not yet taken into account in this method. More advanced and rigorous upscaling and discretization methods should certainly be developed in the future to provide more accurate representations of heterogeneities.

5 Conclusions and Discussion

This paper introduces a method to construct three-dimensional boundary models of sedimentary objects and use them as a framework for petrophysical properties modeling. NURBS surfaces allow the creation of boundary representations of geological objects with great flexibility and a relatively small number of parameters [as compared, for instance, to linear polygonal surfaces (Viseur 2004)]. This type of representation is well adapted for modeling sedimentary structures, as interpreters can interactively fit these surfaces to data. A priori knowledge about the three-dimensional shape of the sedimentary structures can be maintained because derivative and curvature constraints can be defined. To create boundary representations of sedimentary structures, a control point hierarchy has to be created to keep the connection of common points between faces.

Pseudo-genetic lateral migration has been proposed to automatically generate point bar structures from channel migration. This process can be inverted to help point bar reconstruction from observed channels (Ruiu et al. 2015). As presented in “Appendix”, further refinement can be introduced in the forward channel migration process to generate oxbow lakes. These geobodies could easily be populated by abandonment shale facies. Currently, the proposed method only deals with lateral migration and does not include stacking patterns due to vertical aggradation and avulsion. The main limitation to deal with these processes lies in the extraction of point bars during the channel growth as it relies on the intersections between the channel’s top surface control nets, which is not applicable in case of channel vertical migration. More generally, a possible enhancement could be to compute intersections between all constituting surfaces of the successive channels.

Concerning the property modeling, the gridding of the objects allows the modeling of the internal heterogeneities in the sedimentary structures and to transfer them in a background grid. Heterogeneities at the interfaces between objects (e.g., shale lens deposits between clinofolds in point bars) are not yet considered. This could be simulated in the parametric spaces of the sedimentary structure boundary surfaces as done by [Li and Caers \(2011\)](#) and integrated in the reservoir grid as transmissibility multipliers.

In this work, only deterministic values are considered for the parameters used to construct the different objects. It would be interesting to simulate these parameters to generate more diverse shapes ([Deutsch and Tran 2004](#); [Pyrzcz et al. 2005](#)). Future work also includes the definition of architectural element templates adapted to other depositional environments (turbiditic, deltaic, etc.).

In subsurface applications involving the presence of conditioning data, two main avenues can be considered to use the proposed object models. The simplest strategy is to generate non-conditional realizations to be then used as training images for multiple-point geostatistical simulations ([Comunian et al. 2014](#)). Alternatively, significant research should still be done to allow data conditioning directly on the proposed object models ([Viseur 2004](#); [Pyrzcz et al. 2009](#); [Bertoncello et al. 2008](#); [Ruiu et al. 2015](#)).

Acknowledgments This research was performed in the frame of the Research for Integrative Numerical Geology (RING) project. We would like to thank our colleagues from RING for their help during the development of the project. The companies and universities members of the GOCAD consortium managed by ASGA (<http://www.ring-team.org/index.php/consortium/>) are acknowledged for their support. We thank Paradigm for providing the SKUA-GOCAD software and development kit.

Appendix: Construction of an Oxbow Lake

Oxbow lakes are formed during the lateral migration of a channel when a meander becomes much curved and the two concave banks at the extremity of the meander become very close. The meander cutoff occurs when the neck of land between the two concave banks is eroded due to the channel migration or due to strong current during a flooding event. The meander is then abandoned and a shortcut in the channel path is created where two concave banks are connected (Fig. 19).

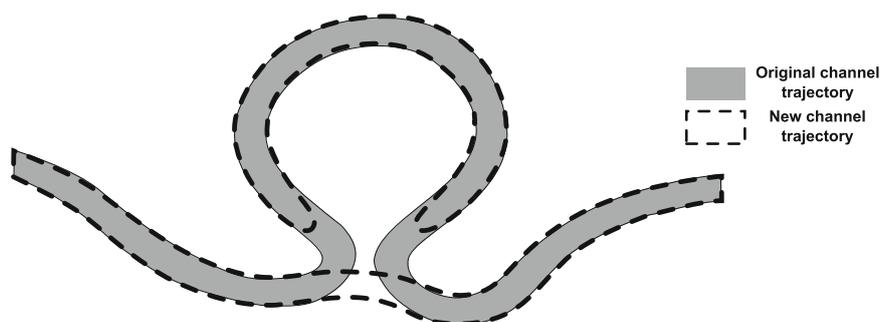
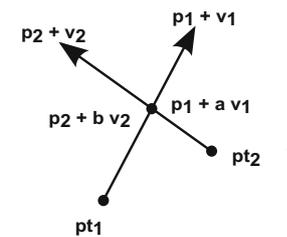


Fig. 19 Principle of the formation of an oxbow lake during the lateral migration of a meander

In the proposed approach, this process is taken into account during the lateral channel migration by detecting the self-intersections in the control point net of the top surface of the channel.

Segment Intersection

Considering two non-parallel segments belonging, for instance, to the control mesh of a channel top surface. Their intersections can be computed by determining two scalar values a and b such that

$$\mathbf{p}_1 + a \mathbf{v}_1 = \mathbf{p}_2 + b \mathbf{v}_2 \tag{8}$$


where \mathbf{p}_1 is the origin of the first segment, \mathbf{p}_2 the origin of the second segment, and \mathbf{v}_1 and \mathbf{v}_2 the vectors corresponding to the segments.

Taking the cross-product of Eq. (8) with \mathbf{v}_1 and \mathbf{v}_2 , respectively, the following expressions come for a and b

$$\begin{cases} a (\mathbf{v}_1 \times \mathbf{v}_2) = (\mathbf{p}_2 - \mathbf{p}_1) \times \mathbf{v}_2 \\ b (\mathbf{v}_2 \times \mathbf{v}_1) = (\mathbf{p}_1 - \mathbf{p}_2) \times \mathbf{v}_1. \end{cases} \tag{9}$$

If $0 \leq a \leq 1$ and $0 \leq b \leq 1$, the two segments intersect and the coordinates of the intersection points are given by $\mathbf{p}_{inter} = \mathbf{p}_1 + a\mathbf{v}_1$.

Construction of an Oxbow Lake

The construction of an oxbow lake from a NURBS channel is divided in five steps:

1. Detection of the self-intersection for each side of the channel top surface (Fig. 20a). The indexes of the channel sections behind and ahead of the intersecting segments are memorized.
2. Sorting and reduction of the number of intersections. This operation may be needed to keep only one intersection, see below.
3. Increasing knot multiplicity at the parametric coordinate corresponding to the projection of the intersection point on the NURBS. This operation is used to decrease the continuity of the NURBS while preserving its shape.
4. Selection of the sections before and after the intersection point (Fig. 20b).
5. Lateral closure of the oxbow lake sections and connection of the cutoff sections to maintain channel continuity (Fig. 20c)

The proposed intersection sorting is essential to obtain consistent final geometry. For each intersection, a couple of channel section indexes are determined. Their number

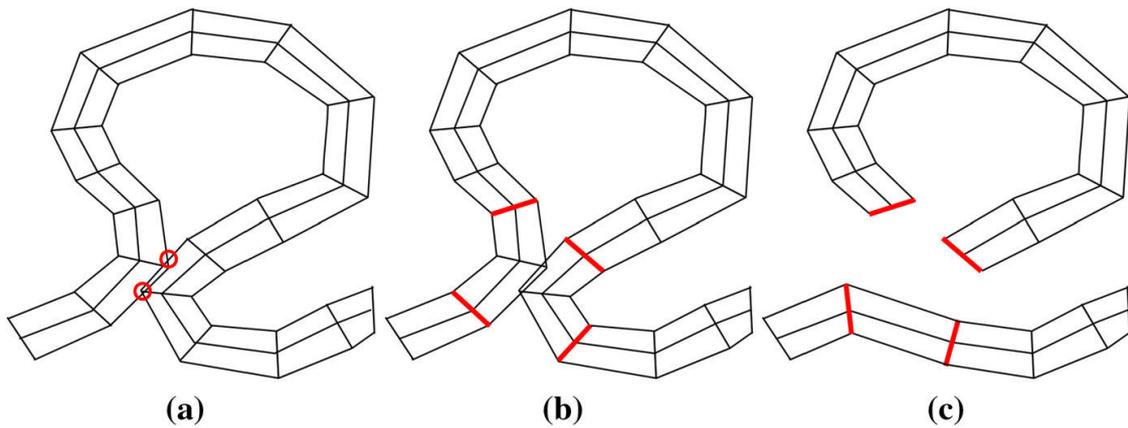


Fig. 20 Construction of an oxbow. During the process of a channel lateral migration, self-intersections can occur and are associated with the formation of an oxbow lake. **a** Self-intersections are detected (*red points*). **b** Sections before and after the self-intersection are detected (*red lines*). **c** Control point between sections are detected and suppressed to form the oxbow lake and the new channel path

Fig. 21 Sorting of the different cases of self-intersections during the NURBS channel migration. **a** Unique intersection. **b** Sections associated with an intersection (in *green*) are included between the sections corresponding to another intersection (in *red*). **c** The first section associated with an intersection (in *red*) is included between the sections corresponding to another intersections (in *green*). **d** The second section associated with an intersection (in *red*) is included between the sections corresponding to another intersections (in *green*)

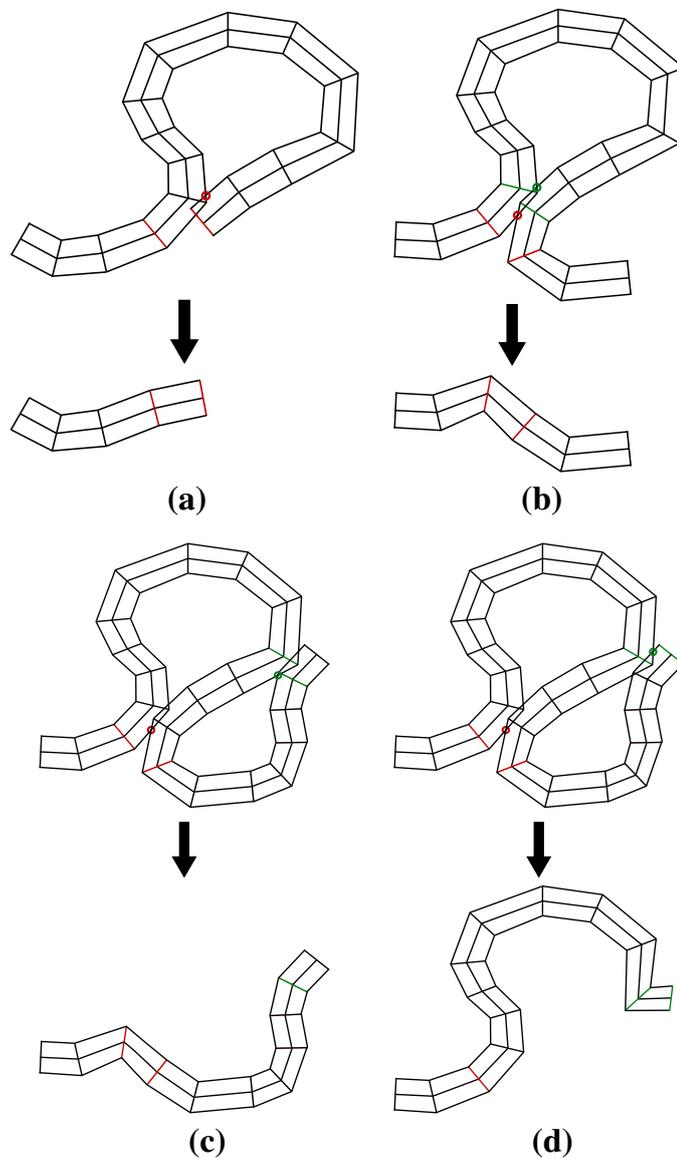




Fig. 22 Result of the oxbow lake formation during the channel lateral migration

has to be reduced so that only one intersection by meander remains. Four possible configurations have been determined. If there is only one intersection in the meander, then it is directly stored in the final intersection list (Fig. 21a). If two sections (in green in Fig. 21b) are included into another one (in red in Fig. 21b), only the largest one is kept in the final list. If the first element of a couple of sections linked with a self-intersection (in red in Fig. 21c) is included in the space defined by another couple (in green in Fig. 21c), the second couple of intersections is kept in the final list of intersections (Fig. 21c). If the second element of a couple of sections linked with a self-intersection (in red in Fig. 21d) is included in the space defined by another couple (in green in Fig. 21d), the first couple of intersections is kept in the final list of intersections (Fig. 21d).

Once the final intersection list has been determined, the control points between two sections corresponding to an intersection are removed from the channel (Fig. 20c). The result of the channel lateral migration process associated with the construction of oxbow lakes is shown in Fig. 22.

References

- Abrahamsen P, Fjellvoll B, Hauge R (2007) Process based stochastic modelling of deep marine reservoirs. In: EAGE petroleum geostatistics
- Abreu V, Sullivan M, Pirmez C, Mohrig D (2003) Lateral accretion packages (laps): an important reservoir element in deep water sinuous channels. *Mar Pet Geol* 20(6):631–648
- Allen JR (1963) The classification of cross-stratified units. With notes on their origin. *Sedimentology* 2(2):93–114
- Alpak FO, Barton MD, Naruk SJ (2013) The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance. *AAPG Bull* 97(2):251–284. doi:10.1306/04021211067
- Arnott R (2010) Deep-marine sediments and sedimentary systems. In: James N, Dalrymple R (eds) *Facies model 4*. St. John's: Geological Association of Canada, pp 295–322
- Bertoncello A, Caers JK, Biver P, Caumon G (2008) Geostatistics on stratigraphic grids. In: Ortiz J, Emery X (eds) *Proc. eighth geostatistical geostatistics congress, vol 2*. Gecamin Ltd, pp 677–686
- Bertoncello A, Sun T, Li H, Mariethoz G, Caers J (2013) Conditioning surface-based geological models to well and thickness data. *Math Geosci* 45(7):873–893
- Bhattacharya J (2010) Deltas. In: James N, Dalrymple R (eds) *Facies model 4*. St. John's: Geological Association of Canada, pp 233–264
- Boisvert JB, Pyrcz MJ, Deutsch CV (2007) Multiple-point statistics for training image selection. *Nat Resour Res* 16(4):313–321
- Comunian A, Jha SK, Giambastiani BM, Mariethoz G, Kelly BF (2014) Training images from process-imitating methods. *Math Geosci* 46(2):241–260

- Desbarats A (1987) Numerical estimation of effective permeability in sand–shale formations. *Water Resour Res* 23(2):273–286
- Deutsch CV, Wang L (1996) Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. *Math Geol* 28(7):857–880
- Deutsch C, Tran T (2002) Fluvsim: a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Comput Geosci* 28(4):525–535
- Deutsch C, Tran T (2004) Simulation of deepwater lobe geometries with object based modelling: Lobesim. Tech. rep., Tech. rep., University of Alberta. <http://www.uofaweb.ualberta.ca/ccg//pdfs/1999%2004-LobeModeling1.pdf>. Accessed 7 Dec 2015
- Durlofsky LJ (2005) Upscaling and gridding of fine scale geological models for flow simulation. In: 8th international forum on reservoir simulation, Borromees Island, pp 20–24
- Fisher T, Wales R (1992) Rational splines and multidimensional geologic modeling. In: Pflug R, Harbaugh J (eds) *Computer graphics in geology*, vol 41., Lecture notes in earth sciences Springer, Berlin, pp 17–28
- Gai X, Wu Xh, Branets L, Sementelli K, Robertson G (2012) Concept-based geologic modeling using function form representation. In: Abu Dhabi international petroleum conference and exhibition
- Google Earth (2012) Atchafalaya delta 29°O
- Graham GH, Jackson MD, Hampson GJ (2015) Three-dimensional modeling of clinofolds in shallow-marine reservoirs: part 1. Concepts and application. *AAPG Bull* 99(06):1013–1047. doi:[10.1306/01191513190](https://doi.org/10.1306/01191513190)
- Haldorsen H, Lake L (1984) A new approach to shale management in field-scale models. *Old SPE J* 24(4):447–457
- Hassanpour MM, Pyrcz MJ, Deutsch CV (2013) Improved geostatistical models of inclined heterolithic strata for McMurray formation, Alberta, Canada. *AAPG Bull* 97(7):1209–1224. doi:[10.1306/01021312054](https://doi.org/10.1306/01021312054)
- Holden L, Hauge R, Skare Ø, Skorstad A (1998) Modeling of fluvial reservoirs with object models. *Math Geol* 30(5):473–496
- Howard A (1996) Modelling channel evolution and floodplain morphology. In: *Floodplain processes*, pp 15–62
- Howard A, Knutson T (1984) Sufficient conditions for river meandering: a simulation approach. *Wat Resour Res* 20(11):1659–1667
- Issautier B, Fillacier S, Gallo YL, Audigane P, Chiaberge C, Viseur S (2013) Modelling of CO₂ storage capacity and performance. *Energy Procedia* 37:5181–5190
- Jackson M, Muggeridge A (2000) Effect of discontinuous shales on reservoir performance during horizontal waterflooding. *SPE J* 5(4):446–455
- Jackson MD, Hampson GJ, Sech RP (2009) Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog: part 2. Geologic controls on fluid flow and hydrocarbon recovery. *AAPG Bull* 93(9):1183–1208. doi:[10.1306/05110908145](https://doi.org/10.1306/05110908145)
- Journel A (1996) Conditional simulation of geologically averaged block permeabilities. *J Hydrol* 183(1):23–35
- Journel A, Gunderso R, Gringarten E, Yao T (1998) Stochastic modelling of a fluvial reservoir: a comparative review of algorithms. *J Pet Sci Eng* 21(1):95–121
- Knighton D (2014) *Fluvial forms and processes: a new perspective*, 2nd edn. Routledge, New York
- Li H, Caers J (2011) Geological modelling and history matching of multi-scale flow barriers in channelized reservoirs: methodology and application. *Pet Geosci* 17(1):17–34. doi:[10.1144/1354-079309-825](https://doi.org/10.1144/1354-079309-825)
- Lopez S (2003) Modélisation de réservoirs chenalisés méandriques: une approche génétique et stochastique. PhD thesis, Mines Paris Tech
- Manchuk JG, Deutsch CV (2012) Implementation aspects of sequential gaussian simulation on irregular points. *Comput Geosci* 16(3):625–637
- Manchuk J, Leuangthong O, Deutsch CV (2005) Direct geostatistical simulation on unstructured grids. In: *Geostatistics Banff 2004*. Springer, New York, pp 85–94
- Mariethoz G, Caers J (2014) *Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images*. Wiley-Blackwell, New York
- Mariethoz G, Comunian A, Irrazaval I, Renard P (2014) Analog-based meandering channel simulation. *Water Resour Res* 50(2):836–854. doi:[10.1002/2013WR013730](https://doi.org/10.1002/2013WR013730)
- McKee ED (1957) Flume experiments on the production of stratification and cross-stratification. *J Sediment Res* 27(2):129–134. doi:[10.1306/74D70678-2B21-11D7-8648000102C1865D](https://doi.org/10.1306/74D70678-2B21-11D7-8648000102C1865D)

- Miall A (1985) Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth-Sci Rev* 22(4):261–308
- Miall A (1996) *Geology of fluvial deposits: sedimentary facies*. Springer, New York
- Miall A (2010) Alluvial deposits. In: James N, Dalrymple R (eds) *Facies model 4*. St. John's: Geological Association of Canada, pp 105–138
- Mirowski PW, Tetzlaff DM, Davies RC, McCormick DS, Williams N, Signer C (2009) Stationarity scores on training images for multipoint geostatistics. *Math Geosci* 41(4):447–474
- Nordahl K, Ringrose PS, Wen R (2005) Petrophysical characterization of a heterolithic tidal reservoir interval using a process-based modelling tool. *Pet Geosci* 11(1):17–28
- Novakovic D, White C, Corbeanu R, Hammon Iii W, Bhattacharya J, McMechan G (2002) Hydraulic effects of shales in fluvial–deltaic deposits: Ground-penetrating radar, outcrop observations, geostatistics, and three-dimensional flow modeling for the Ferron sandstone, Utah. *Math Geol* 34(7):857–893
- Piegl L, Tiller W (1995) *The NURBS book*. Springer, London
- Pyrzcz MJ, Catuneanu O, Deutsch CV (2005) Stochastic surface-based modeling of turbidite lobes. *AAPG Bull* 89(2):177–191. doi:[10.1306/09220403112](https://doi.org/10.1306/09220403112)
- Pyrzcz M, Boisvert J, Deutsch C (2009) Alluvsim: a program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Comput Geosci* 35(8):1671–1685. doi:[10.1016/j.cageo.2008.09.012](https://doi.org/10.1016/j.cageo.2008.09.012)
- Reineck HE, Singh IB (1980) *Depositional sedimentary environments*. Springer, Berlin
- Renard P, Mariethoz G (2014) Special issue on 20 years of multiple-point statistics: part 1. *Math Geosci* 46(2):129–131
- Rongier G, Collon P, Renard P, Ruiu J (2015) Channel simulation using L-system, potential fields and NURBS. In: *Petroleum geostatistics 2015*, EAGE. doi:[10.3997/2214-4609.201413604](https://doi.org/10.3997/2214-4609.201413604)
- Ruiu J, Caumon G, Viseur S, Antoine C (2014) Modeling channel forms using a boundary representation based on non-uniform rational b-splines. In: *Mathematics of planet earth*. Springer, New York, pp 581–584
- Ruiu J, Caumon G, Viseur S (2015) Semiautomatic interpretation of 3D sedimentological structures on geologic images: an object-based approach. *Interpretation* 3(3):SX63–SX74
- Sech RP, Jackson MD, Hampson GJ (2009) Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog: part 1. Surface-based modeling to capture high-resolution facies architecture. *AAPG Bull* 93(9):1155–1181. doi:[10.1306/05110908144](https://doi.org/10.1306/05110908144)
- Shtuka A, Samson P, Mallet JL (1996) Petrophysical simulation within an object-based reservoir model. In: *Proc. European 3D reservoir modelling conference (SPE 35480)*
- Viseur S (2004) Turbidite reservoir characterization: object-based stochastic simulation meandering channels. *Bull Soc Geol Fr* 175(1):11–20. doi:[10.2113/175.1.11](https://doi.org/10.2113/175.1.11)
- Wen R, Martinius A, Næss A, Ringrose P (1998) Three-dimensional simulation of small-scale heterogeneity in tidal deposits—a process-based stochastic simulation method. In: *Proceedings of the 4th annual conference of the international association of mathematical geology (IAMG)*. De Frede editore, Ischia, pp 129–134

Modeling of sedimentary structures and application to image analysis

Abstract :

Most clastic deposits consist in geometric arrangements of several structures. The purpose of this work is to provide a volumetric representation of these objects in order to reproduce the high heterogeneity of the sedimentary deposits. These models are constructed to be flexible and compact in order to model the sedimentary formations at different scales. The sedimentary models are defined by a boundary representation; each boundary is defined by a deformable parametric surface. The proposed parametrization is the Non Uniform Rational B-Spline (NURBS). Each elementary shape is controlled by deformation rules and has connection constraints with associated objects, in order to maintain the geometry and the consistency through editing. Sedimentary structure models are applied to channel simulation and to the construction of the related structures such as point bars. These structures are then used as framework for petrophysical property simulations. The models are also applied to semi-automatically interpret geological images by adapting classical shape extraction methods. This approach is applied on satellite pictures showing alluvial channels and some preliminary results on 3D seismic time slices are also presented.

Keywords : Sedimentary structures, Interpretation, NURBS, Channel, Lobe, Cliniform, Levee

Modélisation d'objets sédimentaires par des surfaces paramétriques et application à l'analyse d'image

Résumé :

Les réservoirs clastiques sont constitués pour la plupart d'un agencement géométrique de plusieurs structures. Le but de ces travaux est de fournir une représentation volumétrique de ces différents objets afin de pouvoir reproduire la grande hétérogénéité des dépôts sédimentaires. Nous proposons une paramétrisation tridimensionnelle compacte des objets sédimentaires qui permet de représenter des géométries variées et qui fournit un espace curvilinéaire pour la modélisation des hétérogénéités internes des structures sédimentaires. Les modèles de corps géologiques sont définis par une représentation par frontières, chacune des frontières étant construite par une surface paramétrique déformable. La formulation mathématique utilisée pour construire les espaces paramétriques sont les B-splines rationnelles non uniformes dites NURBS (pour Non Uniform Rational B-Splines). Chaque forme élémentaire est contrôlée par des règles de déformations afin de maintenir la géométrie et la cohérence des objets durant l'édition. Les modèles de structures sédimentaires sont appliqués à la simulation de chenaux et des structures qui y sont liées telles que les barres d'accrétion latérale. Ils servent alors de support pour réaliser des simulations de propriétés pétrophysiques qui suivent l'espace paramétrique particulier de chaque objet. Les modèles d'objets sédimentaires sont également appliqués dans le cadre de l'interprétation semi-automatique d'images géologiques en adaptant des méthodes classiques d'extraction de formes. Cette approche est appliquée sur des images satellites de chenaux alluviaux. Des résultats préliminaires sur des données de sismiques 3D sont également présentés.

Mots-clés : Structure sédimentaire, Interprétation, NURBS, Chenal, Lobe, Cliniforme, Levée