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

Reverse-time modeling of channelized meandering systems from geological observations

Modélisation rétro-chronologique de systèmes chenalisés méandriformes à partir d'observations géologiques

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 5 avril 2018
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Marion PARQUER

Composition du jury:

Rapporteurs:	Prof. Sylvie BOURQUIN	Université de Rennes
	Prof. Clayton DEUTSCH	University of Alberta
Examinateurs:	Dr. Isabelle COJAN	MINES ParisTech
	Prof. François MÉTIVIER	IPGP - Université Paris Diderot
	Dr. Zoltán SYLVESTER	BEG - University of Texas
Directeur de thèse:	Prof. Guillaume CAUMON	Université de Lorraine
Co-directrice de thèse:	Dr. Pauline COLLON	Université de Lorraine
Invité:	Jean-Loup RUBINO	TOTAL

GeoRessources – UMR 7359
Université de Lorraine – ENSG / CNRS / CREGU
2 rue du Doyen Marcel Roubault - BP 10162
54505 Vandœuvre-lès-Nancy, France

Summary

Meandering systems constitute the majority of aerial and subaquatic channels which shape the landscapes by their temporal and spatial evolution. The witnesses of this evolution can be observed on the plains crossed by these channels. Among them, lateral point bars result from the channel migration, abandoned meanders are created by the natural stream rectifying and abandoned channels originate from the main direction change by avulsion.

Once buried, the channelized systems are good candidates for natural resources storage thanks to the diversity and the volume of the resulting deposits. The understanding of the internal architecture of facies is thus crucial for resource exploitation.

Satellite and LIDAR (Light Detection and Ranging) images permit current system studies. Subsurface architecture can be imaged by seismic or GPR (Ground Penetrating Radar) images. These techniques give a good evaluation of the whole system of the last channel path. However, anterior stages, when spared by the erosion can only be observed locally. Indeed, the reworking of the channel belt by lateral and downstream migration makes it difficult to observe the geometrical or chronological features of anterior deposits.

This thesis proposes a 3D reconstruction simulation method of channelized systems conditioning to sparse and diverse available information. Among them, the subsurface imaging often permits to identify the last system stage and the abandoned meanders, thanks to their muddy filling after the abandonment time, contrasting with the channel belt. Lateral point bars can also be observed, witnessing of meander paleo-migration direction. Sometimes, well data inform on the facies (e.g., muddy, sandy). The method presented here starts from the last channel path observed on the seismic image and goes back in time by reverse migration to reconstruct anterior channel paths. This stochastic migration model is inspired by the analysis of historic Mississippi maps. According to a chronology simulation based on spatial and statistical criteria (e.g., distance and orientation to the current channel, abandonment probability distribution), abandoned meanders are integrated at the relevant time step inside the main channel path. Erosion and difficulty of imaging of abandoned meanders is addressed by abandoned meander simulation inside the meander belt.

This stochastic simulation conditions to geometrical criteria observed on the abandoned meanders spared by the erosion but also to statistical criteria observed on sedimentary analogs such as the Mississippi river (e.g., erosion probability distribution).

One of the main perspectives is to condition to well data through the simulation of abandoned meanders.

This technique has been applied on two satellite and seismic 2D case studies.

Keywords channelized system migration abandoned meander stochastic simulation sedimentary record reservoir

Résumé

Les systèmes méandriformes constituent la plupart des rivières terrestres ou subaquatiques qui modèlent les paysages par leur évolution temporelle et spatiale. Les témoins de leur évolution peuplent les plaines traversées par ces systèmes. Parmi ces témoins, des barres d'accrétion latérale traduisant la migration des boucles du chenal peuvent être identifiées, tout comme des méandres abandonnés par simplification naturelle de la trajectoire du chenal ou encore des chenaux entiers abandonnés lors d'un changement de direction principale du chenal par avulsion.

La diversité et le volume des dépôts résultant font des systèmes chenalisés, une fois enfouis, de bons candidats pour le stockage de ressources naturelles. L'étude de la disposition des différents faciès est donc cruciale pour leur exploitation.

Les techniques d'imagerie satellitaire ou LIDAR (Light Detection and Ranging) permettent l'étude des systèmes actuels. L'architecture en subsurface peut être imagée par image sismique ou GPR (Ground Penetrating Radar), ou localement par des puits d'investigation. Ces techniques permettent d'avoir une bonne évaluation du dernier état du système chenalisé. Les états précédents, quant à eux, peuvent être observés par morceaux lorsqu'ils ont été épargnés par l'érosion. En effet, le remaniement de la ceinture de méandres par migration latérale des chenaux rend souvent difficile l'analyse des états antérieurs tant en matière de géométrie que de chronologie des dépôts.

Cette thèse propose une méthode de simulation de reconstruction des systèmes chenalisés en trois dimensions qui respecte au mieux les informations disponibles de nature et d'échelle diverses. Parmi ces données, souvent, l'imagerie permet d'identifier le dernier état du système et des boucles de méandres abandonnés en contrastant avec la ceinture de méandres par des dépôts souvent plus argileux et datant de la période succédant l'abandon. Des barres d'accrétion latérale peuvent aussi être observées, témoignant des directions de migration des méandres. Parfois, des données de puits sont accessibles et informent sur la nature des faciès rencontrés (p. ex., sableux, argileux). La méthode présentée dans ce manuscrit part du dernier état du système observé. Une simulation rétro-chronologique de la migration du chenal, inspirée par l'analyse des cartes chronologiques du Mississippi, est appliquée et permet,

pas de temps par pas de temps, de retrouver de potentiels états antérieurs. Selon une simulation de la chronologie estimée par des critères spatiaux et statistiques (p. ex., distance et orientation au chenal courant, probabilité d'abandon), les méandres abandonnés sont intégrés à l'étape de temps appropriée dans le chenal principal. Les boucles de méandres disparues par érosion ou invisibles à l'imagerie sont compensées par la simulation d'autres méandres dans la ceinture de méandres. Cette simulation respecte les critères géométriques observés sur les méandres épargnés par l'érosion mais également d'autres critères statistiques tels que la probabilité d'érosion observée sur des analogues sédimentaires (p.ex. le fleuve Mississippi).

Cette approche ouvre la possibilité d'honorer les faciès observés sur les puits par la simulation de méandres abandonnés en ces points.

Elle a été appliquée sur deux jeux de données bidimensionnels satellite ou sismique.

Mots-clefs système chenalisé migration méandre abandonné simulation stochastique enregistrement sédimentaire réservoir

Remerciements

A certains égards, il est sûrement plus facile de passer sa soutenance de thèse que d'écrire ses remerciements mais c'est une tradition à laquelle je ne voudrais pas me dérober.

En premier lieu j'aimerais remercier les membres de mon jury de thèse, à savoir Sylvie Bourquin, Isabelle Cojan, Clayton Deutsch, François Métivier, Jean-Loup Rubino et Zoltàn Sylvester pour avoir accepté d'évaluer ce travail et de l'avoir valorisé par des questions diverses et pertinentes lors de l'échange pendant ou avant la soutenance. Je voudrais également remercier ceux qui ont suivi à différents moments ce travail de plus ou moins loin au travers de comités de suivi ou de simples discussions, à savoir Nathalie Babonneau, Simon Lopez, Philippe Renard et Sophie Viseur.

Je ne pourrai pas ne pas évoquer les initiateurs de ce projet Pauline Collon et Guillaume Caumon mes directeurs de thèse. Merci à vous deux de m'avoir confié ce sujet. Merci pour vos discussions, vos encouragements et vos critiques. Je vous suis très reconnaissante de la liberté que j'ai eue pendant ma thèse, de travailler à mon rythme, sur les thématiques qui m'intéressaient, d'encadrer des étudiants, d'effectuer des heures d'enseignement aux travers de TDs et d'écoles de terrain même en s'éloignant un peu de mon sujet. Ces trois ans (et quelques) m'ont permis d'apprendre beaucoup de choses dans des domaines très différents, scientifiques ou non mais aussi de développer des qualités que je ne pensais pas avoir. Pour ce dernier point merci de m'avoir donné l'opportunité d'aller présenter mon travail dans des conférences très diverses, parfois seule et dans des pays où je n'avais jamais été qui ont fait grandir ma confiance en moi et mes qualités d'oratrice. Ce fut des expériences très différentes des meetings annuels du consortium qui sont en comparaison plutôt confortables ! Pour conclure, l'aboutissement de ces travaux doit beaucoup à votre complémentarité de personnalité, de qualités et défauts ainsi qu'aux miens. Merci !

Cependant, la réussite de cette thèse n'aurait tout simplement pas été envisageable sans un contexte de travail unique au sein de la RING Team. Parmi ces personnes, je voudrais remercier tout particulièrement Jérémy pour m'avoir le premier confié un (vrai) projet de recherche et m'avoir encouragé dans cette voie. Merci de m'avoir fait découvrir le merveilleux monde des NURBS, dont j'ai (heureusement !) rapidement bifurqué pour revenir à des thématiques un peu plus géologiques... Merci pour ton travail de thèse tout simplement qui a ouvert la porte à mon propre sujet. Pour continuer dans les "mentors" je nommerais Guillaume R, mon deuxième exemple à suivre en matière de chenaux. Merci pour ton humour et ton sérieux tout ensemble. Enfin, le tout premier de l'équipe à m'avoir encadrée en projet, merci à François pour ton enthousiasme suite à mes 5 lignes de code sur les fractures et ton entrain communicatif. Pour finir, plus dans l'équipe mais toujours un pied dedans qu'on le veuille ou non, merci Florent pour ton encadrement, en autonomie supervisée j'ai envie de dire !, pendant ce stage qui m'a aussi permis de découvrir le travail de

recherche en entreprise et encore mieux l'Ecosse ! Merci aussi pour tes conseils et discussions au fil de tes visites à Nancy.

Cependant, au jour le jour, ce sont tout de même mes co-bureaux qui m'ont été indispensables. Merci à Arnaud pour tes critiques sur mon code, mes images, mes présentations, et je crois que c'est tout... suivies parfois de quelques compliments ! Tes critiques toujours positives m'ont permis de valoriser mon travail tout comme les conseils que tu prenais toujours le temps de prodiguer. Merci à Benjamin, je crois que c'est toi qui m'a supporté le plus longtemps dans le bureau. Merci pour ta capacité d'écoute, tes conseils, ta disponibilité et ton humour. Je citerais ensuite Nicolas, j'ai presque envie de dire, merci pour ta jeunesse juste pour t'embêter ! Merci pour ta bonne humeur toujours égale pour éclairer les mornes journées d'hiver et ton relativisme à toute épreuve ! Enfin dernier arrivé, après moultes tentatives pour t'attirer avec nous, et non pas des moindres, Pierre. Merci pour ton caractère tout simplement, merci pour ta curiosité multidisciplinaire (aah l'histoire des sciences quelle matière intéressante surtout avec ton idole !) et pour ta capacité d'écoute et d'échange. Avec Nicolas vous avez formé une fine équipe pour me supporter en fin de thèse, période que je ne pensais pas si difficile. Quand j'écris "supporter" je pense bien sûr aux encouragements que vous m'avez prodigués mais aussi à votre capacité à accepter mon caractère plus ou moins facile et stable dans les derniers mois... Co-bureau à temps partiel, je ne t'oublie pas Julien, merci pour la chaleur que tu ramenais du sud de la France à chacun de tes passages et pour tes conseils directs mais toujours avisés.

Pour les autres qui n'ont pas eu la chance (à voir.. !) de partager mon bureau, je voudrais tout d'abord remercier mes "frères de promo" Antoine et Gabriel. On s'est embarqués dans cette aventure en même temps et on en sort presque en même temps. Je dirais que tout a commencé en Turquie avec notre voyage de fin d'études de la promo GéolNum. Sa réussite a permis d'entrevoir le plaisir à continuer à se côtoyer dans la même équipe pendant les trois ans suivants (au passage merci Alexandre de nous avoir supportés et merci de m'avoir encore une fois prouvé que j'adore le terrain. Merci aussi à Julien C pour nous avoir accompagnés, emmener une bande de GéolNum sur le terrain n'est pas de tout repos...). Merci Gabriel pour tes blagues pas drôles, tes gâteaux, ta gentillesse et ta promptitude à donner un coup de main. Merci Antoine pour ton aversion de la géologie, ton sens de la fête et au final ton caractère tout aussi attachant. Dans la même veine mais quand même bien plus vieux... je citerais Jonathan, merci pour ton originalité (ouhh le non géolien !), ta bonne humeur et ton amour de la bière.

Enfin, merci Margaux pour ta camaraderie, ben oui entre filles il faut bien se soutenir un peu mais aussi ta curiosité scientifique et culturelle. Merci Modeste pour ton sérieux que j'admire beaucoup. Merci pour le soutien discret dont tu sais faire preuve quand on a besoin (genre se lever à 7h du mat pour essayer de remplir une salle conférence presque vide et me faire croire que oui je ne présentais pas mon travail sans public !). Enfin les nouveaux, Melchior, Yves et Corentin, vous prenez la

relève, je n'ai pas eu le temps de vous côtoyer beaucoup, merci pour les répétitions de soutenance et vos questions parfois très pertinentes pour le peu de connaissances que vous aviez sur mon sujet. Merci de continuer à faire vivre cette équipe pour laquelle je ne pensais pas autant m'attacher sentimentalement pendant ma thèse.

Parmi les non-thésards, merci Paul pour ta franchise scientifique, je n'oublierai jamais le "j'ai pas de questions toute façon j'ai rien compris" à mon jury de soutenance de mi-master. C'est devenu presque un but à part entière, te faire comprendre à toi et tes semblables géo-physiciens, mon travail de master puis de thèse. Merci pour ta culture et ton côté bon-vivant. Merci Gautier pour ta bienveillance et tes remarques souvent embêtantes et aussi souvent pertinentes à mes séminaires. Enfin pas vraiment dans l'équipe mais tout comme, merci Christine pour ton côté un peu "maman de l'équipe" ta bonne humeur et ta pédagogie qui m'a beaucoup inspirée pour mes propres TDs. Enfin arrivé récemment Mustapha, merci d'être là tout simplement et de prendre la relève de Pierre J. Pierre J que je remercierais particulièrement pour son support technique, même après son départ pour tenter de sauver mon Fitou qui malheureusement restera vert jusqu'à la fin de ses jours, qui sont comptés hélas je crois bien... Merci aussi à Christophe pour son aide pour le portage, les trainings ou le code tout simplement.

Enfin et non pas des moindres je tiens à remercier Fatima et Sophie pour un secrétariat exceptionnel de bonne humeur et d'efficacité (je m'arrête là sinon Sophie va encore pleurer et inonder tous les manuscrits...). Et merci à l'équipe de l'ASGA pour leur efficacité et leur disponibilité sans qui la RING team aurait du mal à exister je pense. Pour finir merci aux étudiants que j'ai eu le plaisir d'encadrer sur des projets même si cela n'est pas toujours facile, c'est toujours très instructif, je pense notamment à Margot mais surtout à Quentin et Paul j'espère vous avoir insufflé un peu de mon intérêt pour la recherche.

Je pense également à ceux qui ont été seulement de passage dans l'équipe, merci Andrea pour ton grand rire communicatif, ton accent suisse et ta curiosité scientifique. De la même manière merci Marianne d'apporter un peu de diversité dans cette équipe avec la mécanique si chère à Antoine ! Et les "vieux thésards" Charline et Pablo, qui ont été des exemples à suivre pour moi ! Enfin un merci pour général aux personnes que j'ai eue l'occasion de côtoyer pendant ma thèse, pour du terrain Mary, Isabella et David, pour des soirées non géoliennes Maxence, Benoît, Mathilde, Faustine et j'en oublie.

Je finirais par remercier ma famille pour m'avoir encouragée dans mes études à poursuivre un idéal parfois changeant ou flou et avec quelques méandres dans mon orientation. Eh oui on est loin de l'institutrice ou de la vétérinaire équine, mais qui sait peut être pas tant que ça, et ce n'est pas fini ! Enfin merci Malo d'avoir accepté ma résidence nancéienne et mon amour grandissant (allant presque jusqu'à l'obsession ?) pour les chenaux. Merci pour vos relectures françaises ou anglaises de non-spécialistes avec des questions parfois saugrenues mais toujours intéressantes.

Table des matières

Introduction **1**
1 Motivations . . . 1
1.1 Les systèmes méandriformes . . . 1
1.2 Informations accessibles . . . 9
1.3 Modélisation des architectures de subsurface . . . 12
2 Objectifs . . . 21
3 Plan détaillé . . . 22
4 Contexte de travail . . . 23

1 Modélisation des systèmes chenalisés par migration inverse **27**
Article publié dans Mathematical Geosciences: Reconstruction of Channelized Systems through a Conditioned Reverse Migration Method . . . 30
1.1 Introduction . . . 30
1.2 Natural Migration of a Channel . . . 34
1.2.1 Migration Case Study: Mississippi River . . . 34
1.2.2 A Curvature-Dependent Migration . . . 36
1.3 Reverse Migration Modeling . . . 40
1.3.1 Stochastic Reverse Migration . . . 41
1.3.2 Conditioning to Paleo-path Indicators . . . 46
1.4 Application to a Satellite Image . . . 50
1.5 Conclusion . . . 54

Appendices **57**
A Forward Migration Analysis of the Mississippi River . . . 59
B Algorithm of the Reverse Migration Method . . . 59
C Flexibility in Interactive Channel Modeling brought by Non-Uniform Rational B-Splines . . . 59

2 Simulation stochastique de la chronologie d'abandon de méandres **67**

Article écrit pour soumission au journal Geomorphology : Stochastic reconstitution of channelized paleo-evidences abandonment chronology. 70
2.1 Chronology observations 73
2.1.1 Deduction of local relative chronologies 73
2.2 Simulation of the chronology of abandoned loops at a given stage of the channelized system 74
2.2.1 Cutoff rate 75
2.2.2 Draw of the contemporary abandoned meanders 78
2.3 Application in reconstruction issues 80
2.3.1 Integration in the reverse migration simulation 82
2.3.2 McMurray Formation application 85
2.4 Discussion 85

Appendices **91**
A Algorithm of the Chronology Simulation Method 93

3 Simulation stochastique de méandres abandonnés **95**
Article écrit pour soumission au journal Computers and Geosciences : Abandoned meander simulation and borehole data conditioning in reverse migration modeling of channelized systems. . . 98
3.1 Channel belt development 99
3.2 Conditioning of channelized system reconstruction 103
3.2.1 Reverse migration algorithm 103
3.2.2 Simulation of eroded abandoned meanders 104
3.3 Synthetic application 107
3.4 Perspectives: conditioning to borehole data 111

Appendices **115**
A Algorithm of the Abandoned Meander Simulation Method 117

Conclusions **119**
1 Contributions de la thèse 119
1.1 Modélisation de systèmes chenalisés adaptée aux données disponibles en subsurface 119
1.2 Modélisation géométrique inspirée d'analogues sédimentaires 121
1.3 Gestion des lacunes d'enregistrement sédimentaires 121
2 Perspectives 122
2.1 Vers plus de vraisemblance géologique 122
2.2 Vers plus de conditionnement des données 124
2.3 Vers une adaptation à la simulation d'écoulement 128

A Modélisation de l'asymétrie du chenal **133**

B Simulation des hétérogénéités surfaciques des chenaux **135**

Bibliographie **141**

Introduction

1 Motivations

1.1 Les systèmes méandriformes

Contexte géologique

Le transport de l'eau modèle les paysages traversés par l'intermédiaire de structures chenalisées qui creusent et remplissent les vallées. Ce sont des facteurs importants de la géomorphologie de nos paysages, mais aussi de ceux d'autres planètes telles que Mars où ont été trouvées des traces de paléo-systèmes chenalisés [p. ex., Sharp and Malin, 1975, Irwin et al., 2008, Howard, 2009], preuve qu'il y aurait eu de l'eau sur cette planète, tout comme sur Titan [p. ex., Lorenz et al., 2008].

En contexte continental, les rivières régissent le partage des ressources en eau et pendant longtemps aussi la division des territoires. Les cours d'eau ont été façonnés selon les besoins des hommes, ils ont été canalisés, barrés, par des ouvrages géotechniques, au détriment de leur besoin naturel d'espace de migration et de débordement, avec des conséquences parfois dramatiques. Les bras morts favorisent le développement d'écosystèmes [p. ex., Ward, 1998, Stella et al., 2011]. Ils opposent également une résistance à l'érosion de par leur nature argileuse. La compréhension de ces systèmes est donc au coeur des thèmes de l'aménagement urbain ou agricole depuis plusieurs siècles. Ils contribuent ainsi peu à peu à la formation du substratum ou plus précisément de l'empilement sédimentaire sur lequel ils évoluent. En effet, l'étude des systèmes méandriformes passe par l'enregistrement sédimentaire qui demande un changement d'échelle de temps et d'espace ainsi que des analyses géologiques et sédimentaires pour que sa compréhension soit complète.

Le profil de ces chenaux varie selon l'interaction de divers facteurs (p. ex., distalité à la source, hydrodynamisme, érodibilité de la ceinture de méandres) [p. ex., Leopold and Wolman, 1957, Galloway, 1998, Schumm, 2007, Métivier and Barrier, 2012, Church, 2015]. Une illustration simplifiée de la succession des différents profils de systèmes chenalisés au long du transport de l'eau et des sédiments est proposée en Figure 1. Le transport de l'eau commence en altitude avec la zone de drainage cor-

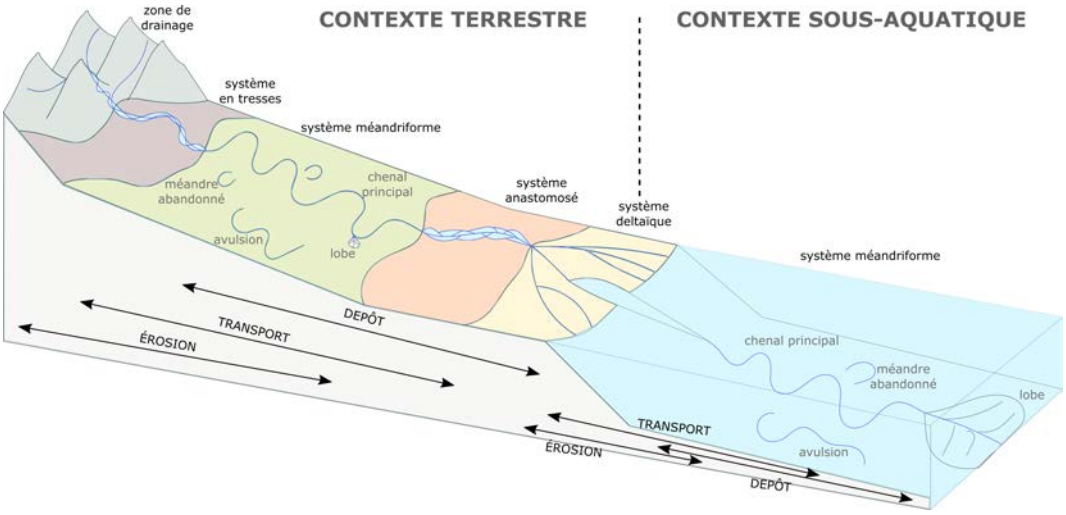


FIGURE 1 Schéma général des contextes de dépôts alluviaux depuis la zone de drainage jusque dans les plaines sous-marines. De nombreux systèmes chenalisés s'y succèdent. Parmi eux les systèmes méandriformes se rencontrent en contexte fluviatile et sous-marin. Les mêmes structures s'y retrouvent (p. ex. chenal principal, méandres abandonnés, avulsion, lobe, levée, barre d'accrétion latérale)

respondant au bassin versant. Les chenaux y sont plutôt droits, le processus principal y est l'érosion, on y trouve donc principalement des lits de rivières rocheux. Un peu plus en aval avec une pente qui s'atténue, les systèmes en tresses sont caractérisés par une charge sédimentaire plus forte que leur capacité à déposer les particules en suspension dans le courant. Les chenaux sont donc instables et entrecoupés par de multiples barres internes mobiles.

Ensuite, le système se recentre sur un seul chenal plus sinueux. Il dessine des méandres dans la plaine d'inondation. En plus du chenal principal, peuvent aussi être observées dans celle-ci d'autres structures telles que d'anciens méandres isolés du chenal principal, appelés méandres abandonnés, ou d'anciennes trajectoires coupées du système actuel par une avulsion. Les méandres évoluent dans l'espace et le temps, du fait du dépôt sur le bord interne des sédiments en suspension et de l'érosion sur le bord externe (Figure 2) [p. ex., Leopold and Wolman, 1960, Leopold et al., 1964, Leopold and Langbein, 1966, Janocko et al., 2013b].

À proximité de son embouchure, le système peut se diviser de nouveau en plusieurs chenaux relativement droits qui forment un delta. Ce stade est caractérisé par un fort taux de dépôt au niveau de l'embouchure dans la mer.

En zone sous-marine, des chenaux peuvent aussi se former sous la force de courants sous-marins plus ou moins continus et chargés en sédiments [p. ex., Abreu et al., 2003, Babonneau et al., 2002, Pirmez and Imran, 2003]. Ceux-ci présentent une forte ressemblance géomorphologique avec les systèmes méandriformes continentaux (Fi-

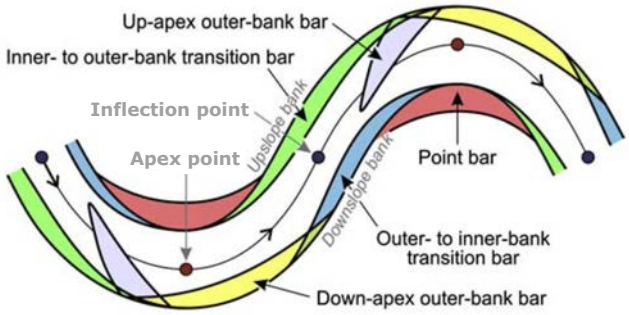


FIGURE 2 Érosion et dépôt au travers de la migration du chenal. D'après Janocko et al. [2013a]

gure 3). Ils développent la même structure en méandres avec une extension latérale et aval de la trajectoire, et une composante verticale par aggradation du système. Des méandres abandonnés peuvent également y être observés, tout comme des avulsions, des lobes et des barres sableuses latérales [p. ex., Lonsdale and Hollister, 1979, Posamentier and Kolla, 2003, Alpak et al., 2011]. Ainsi, de nombreuses études se sont penchées sur les similitudes et différences de ces deux types de systèmes méandriformes [p. ex., Peakall et al., 2000, Kolla et al., 2007, Labourdette, 2007, Wynn et al., 2007, Cross et al., 2009, Jobe et al., 2016].

Les chenaux sous-marins sont connus pour suivre des trajectoires modérément sinueuses [Menard, 1955]. Ce sont Mutti and Normark [1991] qui, les premiers, utilisent le terme de chenal turbiditique pour évoquer le conduit pérenne qui transporte les sédiments au bas de la pente. Pour d'autres, les courants turbiditiques sont des courants denses gravitaires à comportement non cohésif et sans direction préférentielle ni organisation spatiale [Lowe, 1982]. Dans cette thèse, les chenaux turbiditiques évoqués sont ceux correspondant à la première définition.

Les principales différences entre chenaux méandriformes turbiditiques et fluviatiles concernent le processus physique et hydrodynamique à l'origine du phénomène [p. ex., Imran et al., 1999, Jobe et al., 2016]. L'apport sédimentaire est également plus discontinu en sous-marin qu'en domaine continental. Plusieurs études ont conclu que, en comparaison avec le chenal méandriforme fluviatile, le chenal méandriforme turbiditique migre plus verticalement que latéralement [p. ex., Allen, 1965, Sun et al., 1996, Mohrig et al., 2000, Peakall et al., 2000, Abreu et al., 2003, Sylvester et al., 2011, Macauley and Hubbard, 2013, Jobe et al., 2016]. Les méandres abandonnés y sont plus rares, ainsi que les lobes de crevasses. L'empilement vertical est prépondérant sur la continuité latérale des corps géologiques [p. ex., Clark et al., 1992, Normark et al., 1993, Babonneau et al., 2002, Posamentier and Kolla, 2003, Deptuck et al., 2007, Alpak et al., 2011, Huang et al., 2012, Romans and Graham, 2013]. Néanmoins, malgré les différences de taille et de probabilité d'occurrence d'évènements, les deux types de systèmes sont très proches géométriquement. Ils présentent les mêmes structures malgré des processus qui diffèrent physiquement.

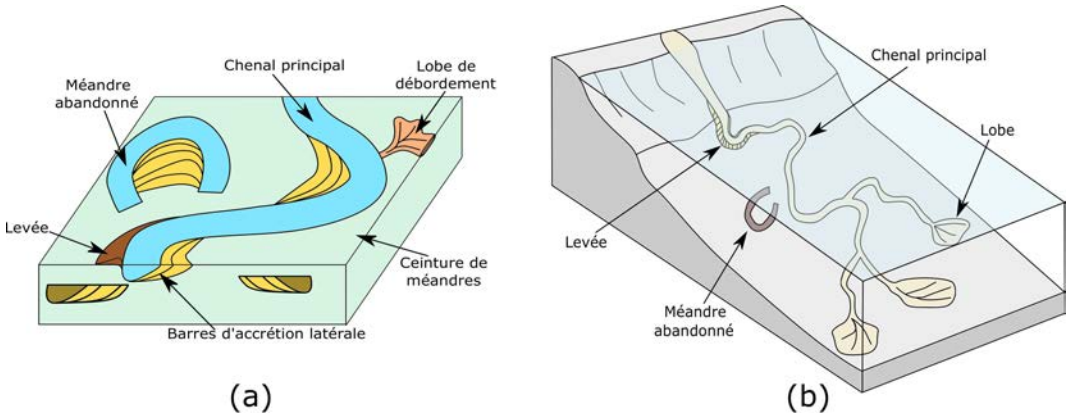


FIGURE 3 Diversité des structures sédimentaires retrouvées de façon similaire en **a** contexte fluviatile **b** ou turbiditique. Modifié d'après Shanmugam [2000].

Géométrie

La suite de ce travail s'intéresse donc aux chenaux méandriformes que ce soit en contexte continental ou sous-marin. Ceux-ci se développent le plus souvent en plaine avec une certaine sinuosité (>1.5) qui permet d'identifier des boucles de méandres [Leopold et al., 1964]. Les boucles de méandres sont définies grâce aux points d'inflexion du chenal [Leopold and Wolman, 1960, Williams, 1986, Flood and Damuth, 1987]. Ils correspondent aux changements de courbure de la trajectoire. La sinuosité correspond au ratio de la longueur curvilinéaire du chenal sur la longueur cartographique entre deux points d'étude [Schumm, 1963]. La longueur d'onde correspond à la distance cartographique entre deux points correspondant à la même position (p. ex., deux apex ou deux points d'inflexion) sur deux boucles de méandres successives (Figure 4). L'amplitude correspond à la largeur du système entre les deux lignes liant les apex des méandres du chenal. La largeur du chenal varie selon la charge de celui-ci (normale ou en crue) alors que la ceinture de méandres est stable et correspond à la zone préférentielle de migration du chenal. Plusieurs travaux se sont penchés sur la relation entre ces différents paramètres [p. ex., Williams, 1986, Flood and Damuth, 1987, Gibling, 2006, Howell et al., 2008, Xiaoming et al., 2017]. Ce type d'étude a permis de mieux comprendre les phénomènes responsables de leur mise en place mais aussi de déduire certains paramètres inconnus à partir de certains autres (p. ex. la largeur du chenal en fonction de son épaisseur ou la longueur d'onde en fonction de la largeur du chenal).

Les caractéristiques géométriques des chenaux, qui sont les seules accessibles avec fiabilité par imagerie, sont les principales caractéristiques considérées dans cette thèse. La description géométrique d'un chenal dans sa ceinture de méandres est assez facile à établir voire à quantifier. En revanche, la comparaison des systèmes chenalisés méandriformes les uns par rapport aux autres et donc l'établissement d'un

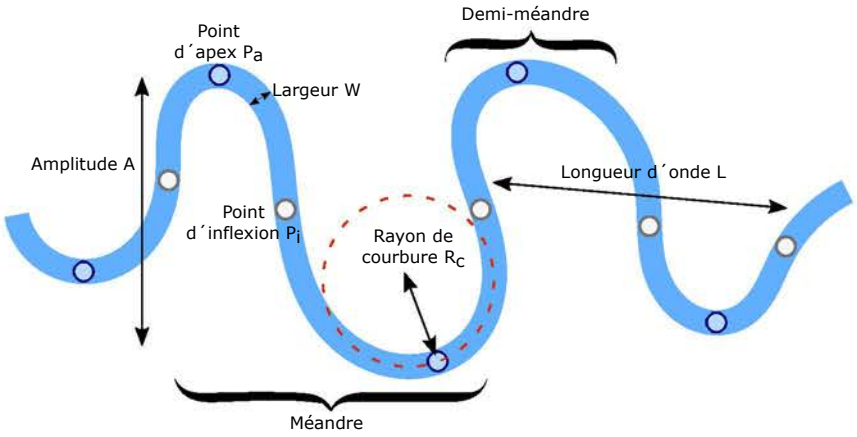


FIGURE 4 Définition des paramètres géométriques de méandre

modèle global, est plus compliquée [p. ex., Leopold and Wolman, 1960, Leopold et al., 1964, Leopold and Langbein, 1966, Schumm and Khan, 1972, Brice, 1974, Snow, 1989, Stølum, 1998, Church, 2006, Seminara, 2006, Güneralp and Rhoads, 2009, Howard, 2009, Słowik, 2011, Holbrook, 2013, Słowik, 2016, Rusnák et al., 2016, Holbrook, 2017].

Evolution spatio-temporelle

La migration est elle aussi présente dans les deux contextes sédimentaires et y dessine des motifs de migration comparables [p. ex., Gee et al., 2007, Tipper, 2016, Schook et al., 2017, Sylvester et al., 2017]. Elle s'y fait de manière continue et discrète (Figure 5), avec des vitesses de migration très variables allant de l'ordre du centimètre à celui du mètre par an [p. ex., Peakall et al., 2000, Posamentier and Kolla, 2003, Wynn et al., 2007]. La migration continue se décompose en migration latérale, aval, verticale ou encore avec rotation des méandres au sein de la ceinture de méandres. La migration discrète se traduit par des abandons de méandres et donc un recoupement abrupt du tracé du chenal principal ou une avulsion c'est-à-dire un changement local du lit du chenal principal avec souvent changement de la direction principale du système. La diversité des facteurs d'évolution et leurs multiples combinaisons ne permettent pas de classifier les systèmes. L'évolution spatiale est assez imprévisible et spécifique à chaque cas d'étude.

Les phénomènes physiques principaux qui la composent dans les deux types de contexte sédimentaire sont l'érosion, le transport et le dépôt des sédiments en des endroits différents du système. D'autres paramètres globaux tels que la charge sédimentaire, la tectonique et l'érodibilité du substratum jouent également sur la direction de migration dominante [p. ex. Schumm, 1986, Leeder, 1993, Holbrook and Schumm, 1999, Blum and Törnqvist, 2000, Bourquin et al., 2006]. Leur degré de

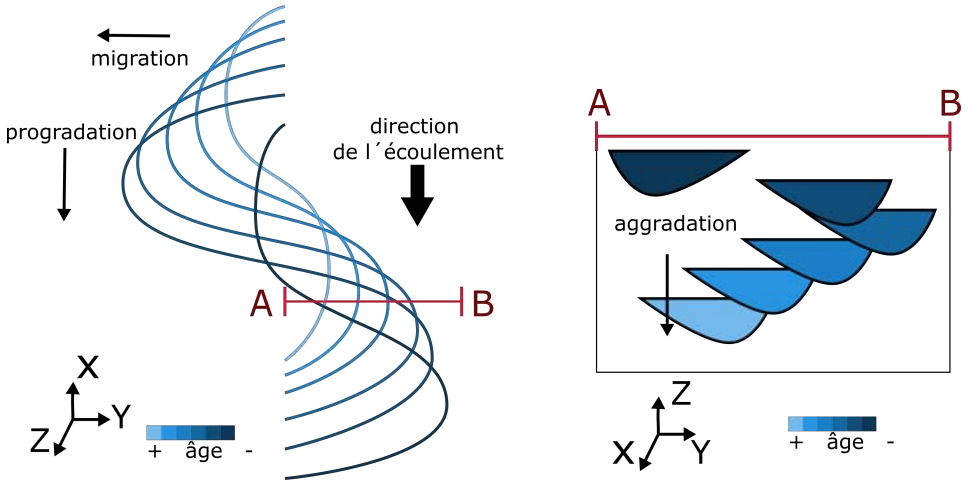


FIGURE 5 Migration latérale du chenal (appelée migration si perpendiculaire à la direction principale d'écoulement, progradation si dans le sens de l'écoulement) et migration verticale (appelée aggradation) : **a** vue en carte, **b** vue en coupe

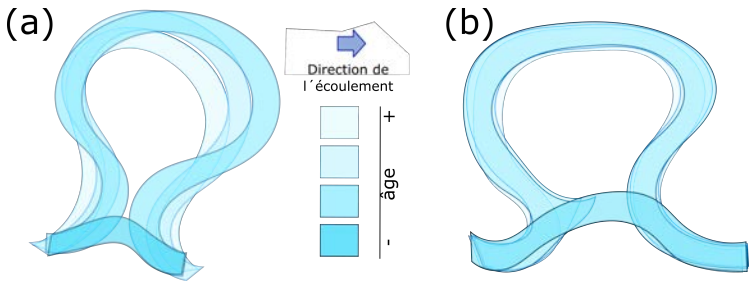


FIGURE 6 Type d'abandon de méandre (*bend cutoff*) **a** par tangence (*neck cutoff*) déclenché par la proximité des bras **b** par déversement (*chute cutoff*) déclenché par la connection des bras par un ou plusieurs raccourcis de trajectoire.

combinaison révèle la dissipation de l'énergie dans les diverses directions et donc la complexité de sa compréhension. Les systèmes méandriformes laissent au cours de leur évolution des structures particulières. Ces dépôts correspondent à des structures diverses tant pour ce qui est de leur forme que de la nature de leurs sédiments. Ce sont par exemple des barres sableuses d'accrétion latérale déposées lors de l'expansion latérale des boucles de méandres ou des boucles abandonnées par recoupement naturel d'un chenal à forte sinuosité. En effet, les systèmes méandriformes évoluent dans l'espace et le temps, du fait du dépôt sur le bord interne des sédiments en suspension et de l'érosion sur le bord externe (Figure 2) [p. ex., Leopold and Wolman, 1960, Leopold et al., 1964, Leopold and Langbein, 1966].

L'extension des méandres n'est pas infinie, une fois que la boucle atteint un degré de courbure maximal, le système l'abandonne par recoupement du chenal principal

(*bend cutoff*) et une trajectoire plus directe que la précédente se met en place [p. ex., Lonsdale and Hollister, 1979, Erskine et al., 1992] (Figure 6). On appelle ces derniers des méandres abandonnés. Les processus d'abandon sont divers et régis par une combinaison de facteurs physiques et mécaniques qui rend leur formation complexe (p. ex., *neck cutoff* ou *abandon par tangence*, *chute cutoff* ou *abandon par déversement*) [p. ex., Bravard and Gilvear, 1996, Constantine and Dunne, 2008, Constantine et al., 2010, Toonen et al., 2012, Constantine et al., 2015, Riquier, 2015, Schwenk et al., 2015, Schwenk and Foufoula-Georgiou, 2016] (Figure 6). Ces structures sont, en contexte continental, le plus souvent remplies de dépôts argileux issus du dépôt des sédiments en suspension au moment de l'abandon. Des phases successives d'inondation du système dans le cas des systèmes fluviatiles peuvent aussi déposer des drapages d'argile successifs [p. ex., Toonen et al., 2012].

L'abandon peut concerner un chenal entier avec divergence de son lit principal en amont de la partie abandonnée. Ce phénomène est appelé l'avulsion (Figure 7). Celle-ci peut être entière ou partielle, et avoir des causes variées, comme par exemple, un déséquilibre entre le débit et les levées, ou la tectonique, le degré de la pente, ou encore un soudain apport sédimentaire [Stouthamer and Berendsen, 2001, Slingerland and Smith, 2004, Hajek and Wolinsky, 2012, Gupta et al., 2014]. Dans tous les cas, une fois abandonné, le chenal se remplit, comme les méandres abandonnés, de sédiments argileux.

Le système peut développer des lobes de débordement sur les bords du chenal par percement de ses levées ou en terminaison du système. Cela arrive lors d'une inondation en contexte fluviatile ou lors d'un changement brutal de l'hydrodynamisme en contexte aérien ou sous-marin. Le lobe de terminaison, quant à lui, n'apparaît qu'en contexte turbiditique à la distalité extrême du système lorsque le transport est quasi nul et que le dépôt devient le processus physique principal.

L'architecture interne résultante présente donc dans les deux contextes sédimentaires de nombreux faciès différents, avec des formes et des extensions variables de ces unités lithologiques [p. ex. Mayall et al., 2006]. Ainsi, on peut assister à la juxtaposition de sédiments qui, une fois enfouis et soumis à de fortes conditions de pression-température, sont susceptibles de développer des gisements pétrolifères ou gazifères [p. ex. Martin, 1993, McCabe et al., 1993, Pranter and Sommer, 2011]. En effet, les diverses structures chenalisantes présentent des faciès et des propriétés de perméabilité et de porosité favorables à la création de roches mères et de roches réservoir. Le développement d'aquifères ou de réservoirs géothermiques y est également probable [p. ex. Fitterman et al., 1991, Jussel et al., 1994, García-Gil et al., 2015].

L'exploitation de ces types de ressources implique une bonne connaissance de la disposition relative et de la connectivité des corps sableux qui constituent la majorité du réseau poreux accueillant ces ressources. Il est donc aussi important d'avoir une idée de l'agencement des faciès fins car ils peuvent créer des barrières à l'écoulement aux interfaces entre les objets plus poreux et perméables [p. ex.

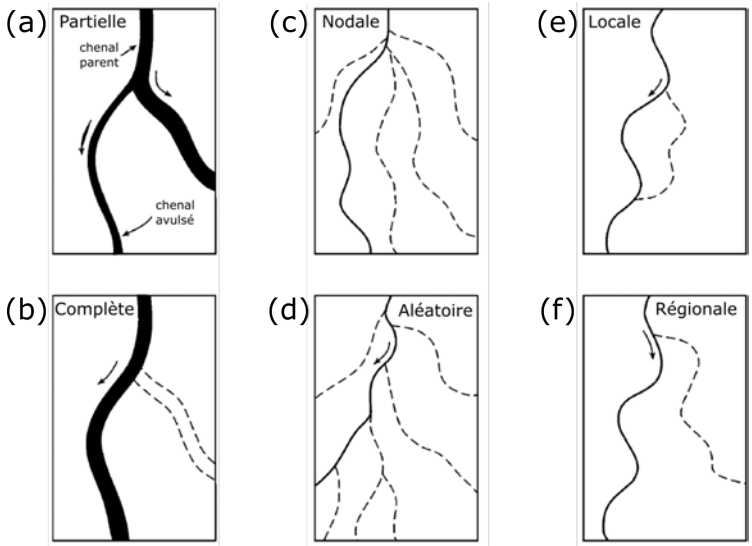


FIGURE 7 Le processus d'avulsion peut se traduire de diverses manières dans le paysage. Il peut être partiel **a** ou complet **b** selon que le chenal parent reste actif après l'avulsion ou non. Il peut donner naissance à plus d'un nouveau chenal, de manière nodale **c** ou aléatoire **d** selon que tous les nouveaux chenaux partent d'un même point ou non. Enfin il peut être local **e** ou régional **f** selon que le nouveau chenal se reconnecte plus loin avec le chenal parent ou non. Modifié d'après Slingerland and Smith [2004]

Jackson and Muggeridge, 2000, Jackson et al., 2009, Issautier et al., 2013]. Enfin, un intérêt économique minier peut également y être trouvé par le développement de placers minéraux dans les dépôts chenalisés [p. ex. Buck, 1983, Youngson and Craw, 1999]. Ces placers, qui correspondent à de fortes concentrations en minéraux lourds, peuvent se créer par gravité et ruissellement depuis des filons originaux lors de l'évolution du système chenalisé.

Ainsi la compréhension de tels processus d'évolution des systèmes chenalisés est la clé dans de nombreux domaines. Ceux-ci comprennent l'urbanisation des territoires, la gestion des ressources énergétiques et la compréhension théorique de la géomorphologie des terrains ainsi que la sédimentologie et les cycles de la matière.

Pour toutes ces raisons, beaucoup d'études ont porté sur la physique hydrodynamique des chenaux apparaissant en contexte fluviatile (aérien) ou turbiditique (sous-marin) [Posamentier and Kolla, 2003, Miall, 2010, Ford and Pyles, 2014]. Certains se sont penchés sur les processus géologiques et physiques responsables du méandrage du chenal [p. ex. Ikeda et al., 1981, Parker et al., 1983], tandis que d'autres ont étudié les structures résultant de ces processus et observables dans les paysages [p. ex. Normark et al., 1993, Ford and Pyles, 2014, Miall, 2016]. Ces deux types d'approches sont nécessaires et complémentaires. Cependant, encore aujourd'hui, il reste des zones d'ombre dans la compréhension totale de ces processus et des

systèmes qu'ils engendrent. Chaque système est en effet unique et leur modélisation réaliste devrait prendre en compte une multitude de facteurs très divers et souvent difficilement accessibles.

1.2 Informations accessibles

Les systèmes qui nous intéressent dans l'étude de l'organisation du sous-sol sont, par définition, des paléo-systèmes qui ne sont plus actifs. Le but de la modélisation dans ce cas est de reconstituer, avec la précision voulue pour le type d'étude finale, l'agencement et l'architecture des corps géologiques successivement abandonnés, érodés et enfouis. Les observations sont donc des données sûres à respecter, les vides laissés par l'érosion ou l'enfouissement constituent des hiatus à combler avec une simulation temporelle pour retrouver toute la diversité des corps ciblés.

Ainsi, une fois abandonnés au profit d'une autre ceinture de méandres et enfouis sous des sédiments plus jeunes, les anciens systèmes chenalisés sont difficilement observables.

A ce stade, l'évaluation de leur structure souterraine peut se faire par plusieurs moyens :

- *le forage.* Les puits d'exploration ou de développement informent localement sur la nature du corps sédimentaire foré (p. ex. sableux ou argileux, à litages obliques ou homogène). Ils sont en général peu nombreux sur le même site car coûteux [p. ex. Babonneau et al., 2010] (Figure 8 e).

- *les données LIDAR (Light detection and ranging).* Cette technique fonctionne avec des lasers pour mesurer la distance entre l'émission du faisceau et l'objet qui le reçoit. Elle donne des images précises de la topographie terrestre et sub-aquatique [p. ex. McKean et al., 2009] (Figure 8 d).

- *l'imagerie sismique.* Elle donne, grâce à l'analyse du retour des ondes sismiques renvoyées par les principales structures en profondeur une bonne précision à des profondeurs jusqu'à la dizaine de kilomètres. Néanmoins, elle ne permet pas toujours de cartographier précisément la géométrie et la disposition relative des corps géologiques surtout lorsqu'ils sont profonds [p. ex. Posamentier and Kolla, 2003, Janocko et al., 2013b] (Figure 8 a).

- *le radar (Ground Penetrating Radar).* Cette technique fonctionne avec des ondes acoustiques qui permettent de souligner les structures principales du sous-sol. Elle est relativement souvent utilisée pour les études géologiques de subsurface. Elle est aussi de moindre résolution que l'acquisition sismique [p. ex. Corbeanu et al., 2001, Young et al., 2003] (Figure 8 f).

- *l'analogue.* La comparaison avec un analogue plus documenté ou accessible permet de mieux appréhender le système étudié [p. ex. Fisk, 1944]. Parmi les

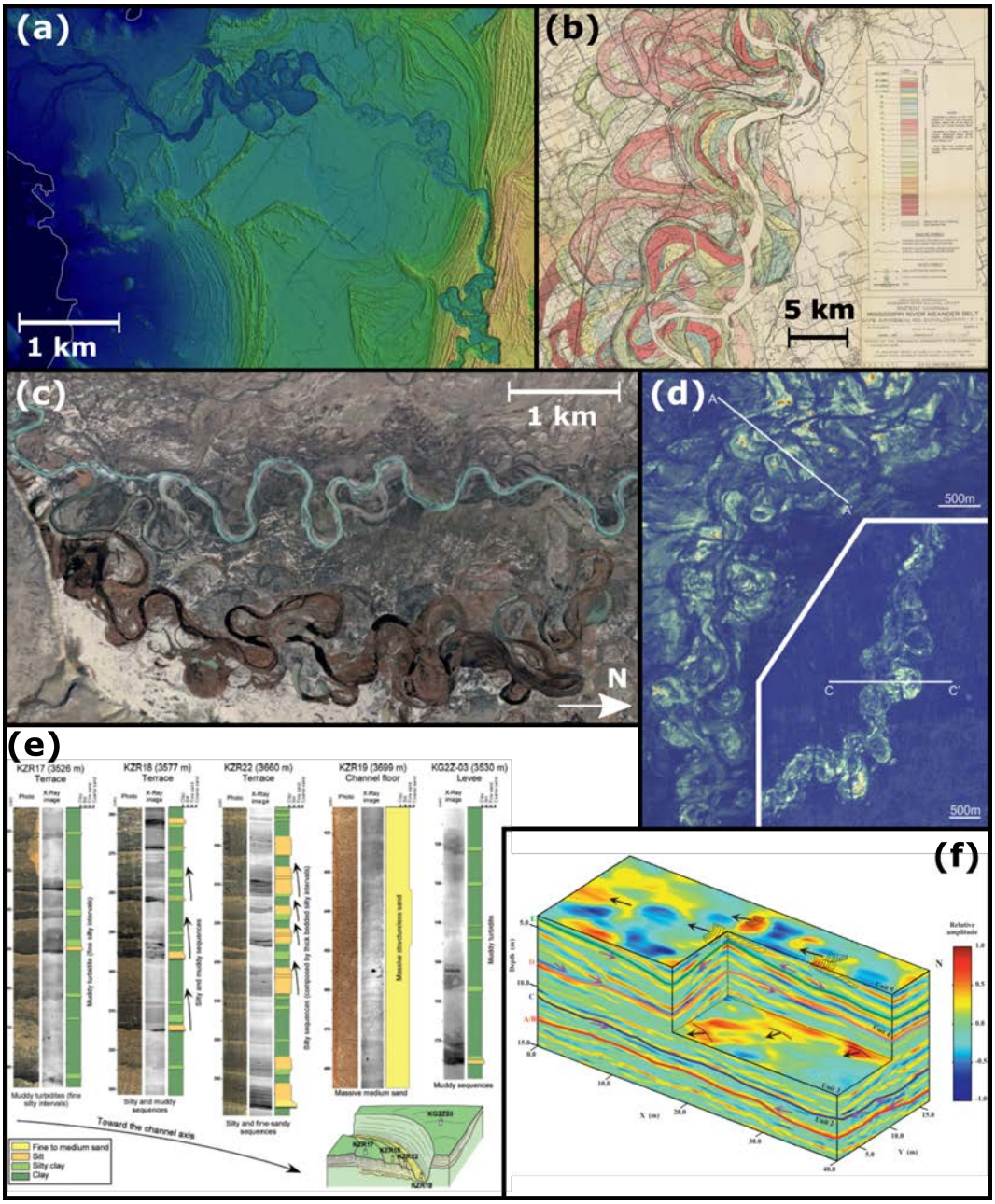


FIGURE 8 **a** Image LIDAR de la rivière Siiponjoki (Finlande) [Geological Survey of Finland] **b** Cartes issues de travail de terrain sur le système du Mississippi (États-Unis), d'après Fisk [1944] **c** Image satellite du Río Chico (Argentine) [Google Earth $48°29'33.40"S\ 70°27'22.73"O$] **d** Image sismique d'après Janocko et al. [2013b] **e** Données de puits sur le système turbiditique du Congo (Congo) d'après Babonneau et al. [2010] **f** Données GPR de la formation Cretaceous Ferron Sandstone dans l'Utah (États-Unis) d'après Corbeanu et al. [2001]

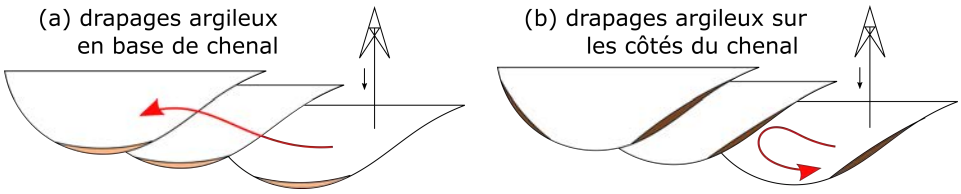


FIGURE 9 Conséquences de l'architecture interne et de ses hétérogénéités de forme et d'épaisseur variables sur l'écoulement de fluides. **a** Écoulement possible par la connectivité des corps sableux à drapages argileux basaux. **b** Écoulement impossible car les corps sableux sont disconnectés par la présence d'une barrière à l'écoulement créée par des drapages argileux latéraux

analogues, les systèmes actuels permettent d'étudier la dynamique temporelle des systèmes, mais chaque système est unique car issu de la combinaison de nombreux facteurs environnementaux. Seule leur étude combinée à celle des paléo-systèmes permet d'appréhender l'évolution d'un système et les dépôts qui en résultent. L'étude des paléo- et des néo-systèmes peut donc aider à prédire l'évolution des systèmes actuels et à mieux les comprendre. Elle permet également de mieux appréhender l'agencement en subsurface des dépôts chenalisés. (Figures 8 b et 8 c).

- *le contexte géologique.* La connaissance du contexte géologique au moment du dépôt du système est précieux dans la contrainte de divers paramètres géométriques par des informations sur les facteurs de contrôle externes (p. ex. taux de sédimentation global, climat, paléopente, subsidence, temps d'exposition). Toutes ces informations sont utiles pour choisir le type de modélisation et contraindre l'approche choisie pour la modélisation d'un système enfoui. Ces informations sont données par la connaissance de l'histoire géologique régionale.

Les données et les observations géologiques disponibles sont généralement éparses (puits), ambigües, de diverses échelles et voire de faible précision (imagerie à distance). L'utilisation de connaissances extraites du contexte géologique ou d'analogues sédimentaires permet de proposer des interprétations, mais celles-ci ne sont pas exemptes d'incertitudes. Une erreur d'appréciation peut compromettre la compréhension de l'écoulement dans les corps géologiques de par la connectivité ou l'absence de connectivité entre corps géologiques [p. ex. Jackson and Muggeridge, 2000, Stright et al., 2006, Jackson et al., 2009, Issautier et al., 2013, Massart et al., 2016]. En effet, des drapages argileux peuvent, de par leur positionnement par rapport à l'empilement des corps sableux, permettre ou empêcher l'écoulement de fluides entre eux (Figure 9).

1.3 Modélisation des architectures de subsurface

Afin de reproduire l'architecture interne d'un paléo-système chenalisé, plusieurs types de méthodes sont possibles. Les méthodes dites *statiques* cherchent à reconstruire le plus fidèlement possible la géométrie des structures déposées par le système sans tenir compte de la temporalité du phénomène. Les méthodes dites *dynamiques* s'attachent à reproduire les processus responsables des dépôts.

Les méthodes statiques

La juxtaposition des corps géologiques est une information très utile dans de nombreuses applications. Parmi elles, la reconstitution géométrique en 3D des systèmes déposés est utile pour leur compréhension tout comme pour l'exploitation des ressources énergétiques par le biais de leur visualisation et le support pour des calculs et des simulations. De façon à évaluer celle-ci, de nombreuses méthodes de reproduction de la juxtaposition des facies ont été développées.

Les méthodes basées-cellule

Parmi ces approches, les méthodes basées-cellules reposent sur le principe de voisinage des faciès porté par un modèle *a priori* pour le reproduire dans les zones exemptes d'information. Les objets géologiques y sont définis en tant que remplissage de la discrétisation régulière de l'espace géologique et non en tant qu'objets géologiques issus d'un processus de dépôt.

Dans ces approches, en premier lieu est définie une grille sur laquelle des propriétés peuvent être affectées à chaque cellule. Ces propriétés peuvent par exemple correspondre à des faciès sédimentaires.

Ces méthodes se basent sur le principe que les corps géologiques sont des variables spatialisées. Il est donc possible en partant des observations renseignées sur la grille de simulation ou sur un modèle *a priori*, de simuler les valeurs dans les zones inconnues. C'est ainsi que de nombreuses méthodes se sont développées pour simuler des faciès ou des propriétés pétrophysiques [p. ex. Krige, 1951, Xu et al., 1992, Journel and Xu, 1994]. Plusieurs outils permettent de décrire leur répartition statistique (p. ex. histogramme) et spatiale (p. ex. variogramme).

Diverses méthodes ont été développées pour la représentation stochastique d'environnements chenalisés à partir de ces outils. Ainsi, une méthode basée SIS (Simulation séquentielle d'indicatrices) a été développée pour tenir compte de la corrélation spatiale des faciès de façon itérative [p. ex. Deutsch and Journel, 1992]. Alabert et al. [1990] en propose une application pour représenter l'hétérogénéité de remplissage des réservoirs turbiditiques. L'introduction de relations de voisinage franches entre les différents faciès est gérée par l'utilisation de simulation plurigaussienne (PGS) dans laquelle des cartes de transition sont définies [p. ex. Galli et al., 1994].

Ces techniques permettent aussi de conditionner relativement facilement les données de puits locales ou les tendances générales telles que des proportions de faciès.

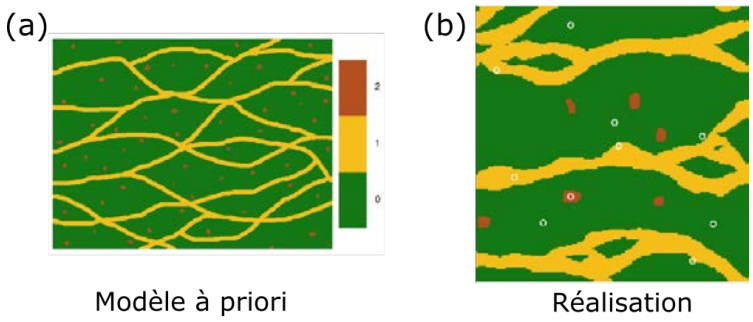


FIGURE 10 Les méthodes MPS permettent de conditionner des données dures et douces. Ici des données de puits et de voisinage de faciès. **a** Image d'entraînement et règles de voisinage **b** Visualisation d'une réalisation conditionnant des données locales. Modifié d'après Straubhaar and Malinverni [2014]

Ce conditionnement peut se faire à travers, par exemple, des techniques de recuit simulé (*simulated annealing*) [Deutsch and Cockerham, 1994] ou des simulations par chaînes de Markov [Li, 2007]. Néanmoins, localement, pour plus de deux faciès différents, la reproduction de la juxtaposition des faciès est complexe et ne permet pas de retrouver toute la connectivité et la continuité originelle [p. ex. Journel and Zhang, 2006]. Par ailleurs, le passage à la troisième dimension nécessite souvent une puissance et de temps de calcul conséquents [p. ex. Koltermann and Gorelick, 1996].

Dans le but de mieux prendre en compte le voisinage d'une cellule pour y simuler la valeur associée, se sont développées les méthodes de Statistiques Multi-Points (MPS)[p. ex. Srivastava, 1992, Tran, 1994, Caers, 2001, Strebelle, 2002, Tahmasebi et al., 2012, Mariethoz et al., 2014, Straubhaar and Malinverni, 2014, Tahmasebi et al., 2014]. Ces techniques reposent sur l'apprentissage des relations entre les différentes valeurs par l'intermédiaire d'une image d'entraînement. Cette image est jugée analogue du milieu géologique à simuler. Elle est plus petite que celui-ci mais est composée de tous les motifs de faciès ou de propriétés pétrophysiques naturels à simuler. A chaque cellule non remplie d'une valeur, ses voisins les plus proches sont recherchés et leur configuration est comparée à celles trouvées dans l'image d'entraînement. Une des configurations trouvées dans l'image d'entraînement est sélectionnée et la valeur correspondante est assignée à la cellule de la grille.

Les MPS permettent de gérer plus de deux faciès ainsi qu'un passage à la troisième dimension. Néanmoins ce dernier implique un coût de calcul non négligeable. Le conditionnement à des données locales ou globales est possible grâce, par exemple, à la création de divers niveaux de grilles ou à la superposition de tendances à l'image d'entraînement. Néanmoins, ce type de méthodes présente des difficultés à reproduire les corps allongés tels que les chenaux et la connectivité entre les corps géologiques [p. ex. Rongier et al., 2016].

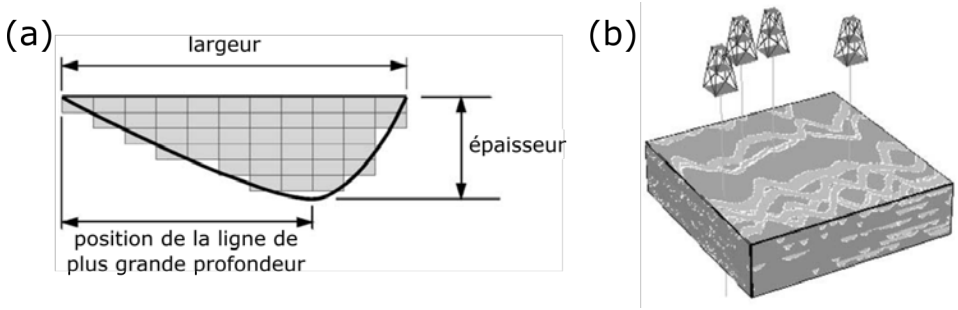


FIGURE 11 Méthode basée-objet FLUVSIM : **a** Paramétrisation de la section de l'objet chenal. **b** Réalisation conditionnée par 4 puits. Modifié d'après [Deutsch and Tran, 2002]

Les méthodes basées-objets

Les approches basées-objets proposent une modélisation reposant sur la paramétrisation des différents objets composant le système sédimentaire [p. ex. Deutsch and Tran, 2002, Yan et al., 2017]. La modélisation des corps géologiques est conditionnée par des paramètres géométriques clés tels que la longueur, la largeur, la hauteur et la sinuosité des chenaux et qui permettent de contraindre le volume de ces objets sédimentaires.

Cette méthodologie convient bien à la création de patrons de structures sédimentaires typiques. La zone d'intérêt doit être définie par une grille sur laquelle les différents objets paramétrisés sont positionnés. Ce genre de méthode propose des résultats intéressants sur le plan du remplissage de la grille. En revanche, le conditionnement aux données observées reste difficile en général du fait de la faible flexibilité des modèles d'objets. Il est la plupart du temps géré par un algorithme d'échantillonage par rejet [p. ex. Deutsch and Wang, 1996]. Deutsch and Tran [2002] proposent ainsi une modélisation du chenal paramétrisé en section et longitudinalement. Le modèle proposé respecte les données de puits après plusieurs itérations et tant que les puits ne sont pas trop nombreux. De même, Hassanpour et al. [2013] proposent de considérer la paramétrisation du chenal principal mais également des barres d'accrétion latérales, des méandres abandonnés et des levées.

Une autre méthode de modélisation objet a été proposée par Viseur [2004]. Dans cette approche, des chenaux méandriformes sont modélisés en utilisant une structure paramétrique flexible définie par une ligne médiane correspondant à la sinuosité de l'objet. La technique de simulation adoptée permet de reproduire les points de rebroussement caractéristiques des chenaux sinueux. La structure proposée sert de squelette à la méthode proposée par Ruiu et al. [2016] qui proposent d'utiliser les NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) [Piegl and Tiller, 1997]. Les chenaux sont générés stochastiquement en simulant les lignes de profondeur maximale comme Viseur [2004] le fait.

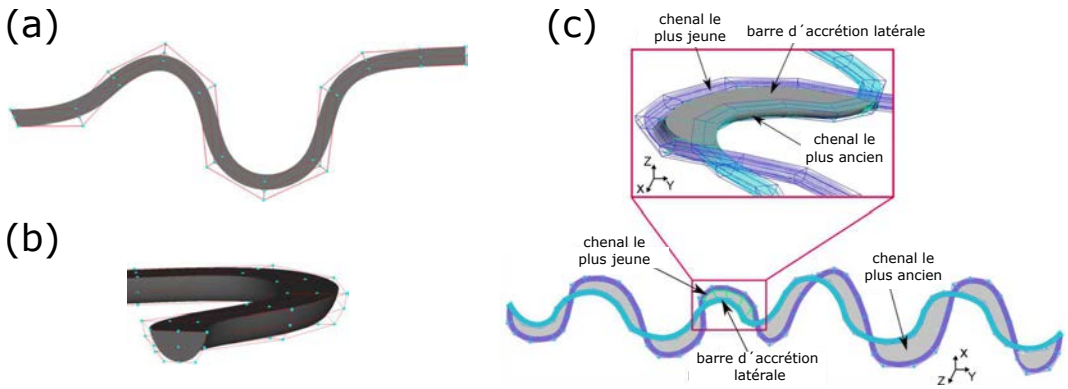


FIGURE 12 Objets sédimentaires créés par une paramétrisation NURBS, la surface NURBS est en gris, les points de contrôle en bleu et les maillages de contrôle en rouge **a** Vue en carte d'un chenal **b** Vue de profil d'un chenal **c** Entre deux positions successives d'un chenal (en bleu pour le plus ancien, en violet pour le plus récent), modélisation d'une barre d'accrétion latérale (en gris)

Ruiu et al. [2016] proposent également la modélisation d'environnements clastiques entiers avec les rivières méandriformes, les barres d'accrétion latérales, les lobes de débordement et les méandres abandonnés. L'utilisation des NURBS permet de générer des modèles compacts et flexibles de toute stucture sédimentaire indépendamment de toute grille spatiale. Les corps géologiques sont délimités par des surfaces frontières créées sous forme de surfaces paramétriques et déformables (Figure 12).

La modélisation des principales structures d'un environnement clastique permet une première approche. Néanmoins, sans la prise en compte des diversités de faciès internes tels que les drapages d'argile déposés sur les surfaces érosives des chenaux [p. ex. Alpak et al., 2013, Barton et al., 2010], la compréhension du réservoir est incomplète. Pour cela, certains se sont intéressés plus particulièrement aux hétérogénéités surfaciques et à leur représentation en surface de ces objets en vue de simulations d'écoulements [Labourdette et al., 2006, Stright et al., 2006, Sech et al., 2009].

En conclusion, les approches *statiques* dites aussi descriptives qui s'intéressent plus au résultat de la migration qu'aux processus géologiques responsables de la migration sont principalement basées sur la géométrie du chenal (p. ex. courbure, largeur, profondeur). Cette paramétrisation simplifiée permet d'élargir la diversité d'applications à des systèmes peu connus en matière de contextes de dépôts. Cependants, bien qu'ils donnent de bons modèles de géométries de chenaux, ils ne peuvent facilement honorer les données sismiques et d'observations de puits que pour chaque objet chenal indépendamment les uns des autres.

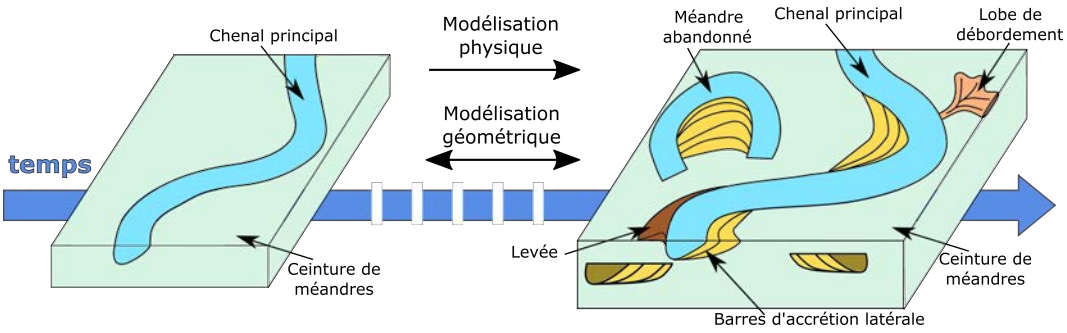


FIGURE 13 Évolution d'un système chenalisé dans le sens naturel de l'écoulement du temps (flèche bleue), avec migration des méandres, dépôts de barres latérales, création de levées et percement de celles-ci par des lobes de débordement.

Les méthodes dynamiques

Les méthodes *dynamiques* tentent de reproduire les processus de dépôt. Pour cela, deux grands types d'approches sont possibles. Les premières, qualifiées ici de basées-processus, simulent directement les processus géologiques responsables de la formation des dépôts. Les secondes, qualifiées ici de basées-géométrie, tentent de reproduire le résultat de ces processus en termes de relation géométriques entre les corps déposés. La première approche s'effectue forcément chronologiquement tandis que la seconde peut également s'effectuer de manière rétro-chronologique (Figure 13). Les deux types d'approches permettent de retrouver la géométrie des corps sédimentaires à travers une approche inspirée des processus naturels. Le dernier état du chenal visible étant le stade le plus récent avant avulsion, la reconstruction du système chenalisé à partir de celui-ci implique de choisir une approche rétro-chronologique. Par ailleurs, les méandres abandonnés, souvent observées sur les horizons sismiques au même titre que le dernier chenal du système sont facilement intégrables dans une approche rétro-chronologique. Enfin, dans une approche directe (i.e. chronologique), le modèle en sortie est fortement dépendant de l'hypothèse faite sur la première trajectoire du chenal. Ainsi, il peut être difficile de respecter la forme du chenal mature observée. Une approche rétro-chronologique permet de laisser plus de liberté à la simulation.

Les méthodes basées-processus

Ces méthodes s'attachent à reproduire les processus géologiques à l'origine des dépôts sédimentaires, de façon à représenter ces derniers avec la meilleure précision possible en matière de géométrie et de nature du remplissage [p. ex. Mackey and Bridge, 1995, Karssenberg et al., 2001, Nordahl et al., 2005, Abrahamsen et al., 2007, Michael et al., 2010, Hajek and Wolinsky, 2012, Motta et al., 2012, Grappe, 2014, Hoffimann et al., 2017].

Les travaux de Howard [1992], Sun et al. [1996] et Edwards and Smith [2002] sont centrés sur la reproduction physique des processus de dépôt. Ils sont en partie basés sur les travaux originaux de Langbein and Leopold [1966] et Ikeda et al. [1981] qui proposent des modèles hydrodynamiques de l'écoulement intra-chenal. Ces modèles sont calibrés avec des paramètres géométriques et environnementaux tels que la courbure, la largeur du chenal et sa charge sédimentaire. Cependant, en dépit de leur similarité visuelle de prédictions, les simulations long-terme seraient statistiquement distinguables des chenaux naturels [Howard and Hemberger, 1991].

De façon à stabiliser le comportement long-terme de ces modèles, Frascati and Lanzoni [2009] ont travaillé sur un champ d'écoulement prenant en compte d'autres critères morphologiques, comme d'autres régimes d'écoulement morpho-dynamiques. Cela a permis de reproduire un panel complet de régimes morpho-dynamiques qui peuvent se rencontrer dans un chenal avec des géométries de méandres variables. En dépit de prédictions intéressantes d'évolution de chenaux données par ces méthodes, leur application peut être complexe et contrainte. Par ailleurs, comme ces méthodes focalisent sur la reproduction des processus géologiques, le conditionnement des données reste difficile [Charvin et al., 2009] et notamment la repoduction du chenal mature. Le conditionnement à des données de puits peut parfois être géré grâce à des champs d'attraction et répulsion.

Teles et al. [1998] proposent une méthode multi-agents, c'est-à-dire faisant intervenir simultanément plusieurs processus responsables des dépôts alluviaux. Le modèle permet la migration latérale, longitudinale et le recoupement. Une application sur la rivière West Fork White dans l'Indiana montre son applicabilité dans une approche directe pour une modélisation réaliste des dépôts sédimentaires.

Lopez [2003] et Cojan et al. [2005] proposent un modèle fluviatile basé sur les équations hydrodynamiques de Parker and Johannesson [1989] inspirés de Ikeda et al. [1981] et sur la migration liée à la paléotopographie inspirée de Sun et al. [2001]. Ce modèle hybride, FLUMY, permet de contrebalancer un modèle purement déterministe précis mais souvent trop complexe à gérer et à conditionner, avec un modèle purement stochastique accusé de souvent manquer de réalisme. Ainsi, l'approche envisagée consiste premièrement à utiliser les lois hydrodynamiques d'écoulement pour se rapprocher de la réalité des processus modélisés. Dans un second temps, les réalisations sont conditionnées en faisant varier stochastiquement des paramètres tels que la composante latérale de migration du chenal (Figure 14). Le conditionnement aux données de puits et d'imagerie sismique ont été considérés. Les chenaux turbiditiques et fluviatiles présentant des dépôts similaires mais dans des environnement variés, la méthode FLUMY fait l'objet depuis peu d'une adaptation au cas turbiditique [Lemay et al., 2016].

Pyrcz et al. [2009] proposent aussi une technique de modélisation introduisant un aspect stochastique (Figure 15). Tout d'abord, des objets paramétrisés au préalable selon des critères géologiques peuplent la grille de simulation. Ils y sont placés de façon à respecter le plus possible les données par un algorithme d'échantillonage par

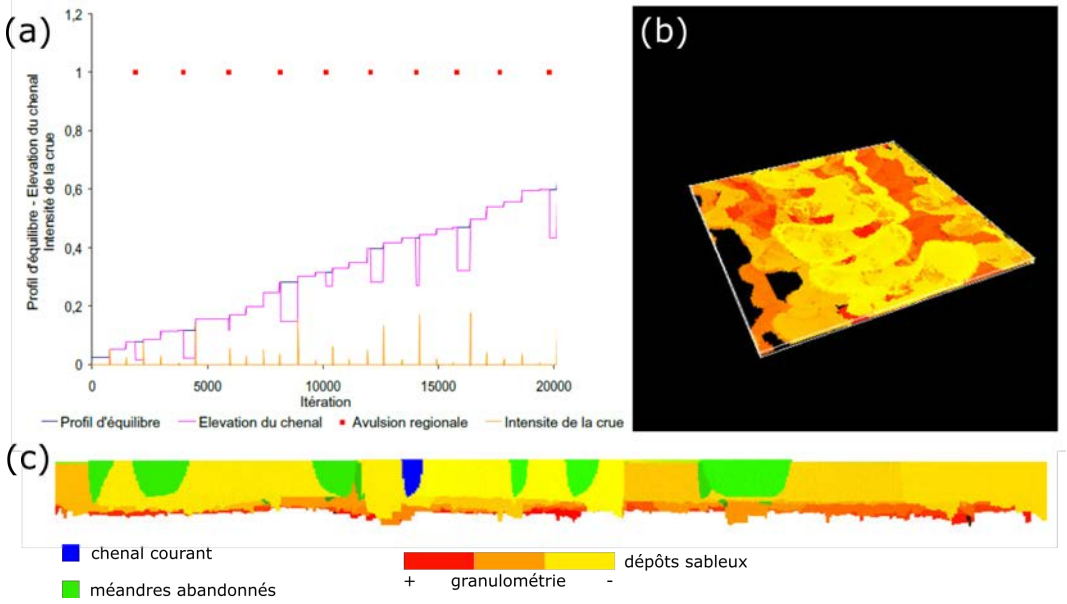


FIGURE 14 Modélisation dynamique basée-processus FLUMY. Évolution d'un système stable contraint par son profil d'équilibre **a** Paramètres de contrôle **b** Architecture des dépôts sableux **c** Coupe transversale à l'axe de la vallée. Modifié d'après Lopez [2003])

rejet et mise à jour des réalisations infructueuses. Une modification chronologique est ensuite appliquée à la ligne centrale du chenal pour représenter l'évolution temporelle du système par des équations de migration, aggradation ou abandon de boucles. Par la suite, une technique d'optimisation post-modélisation permet de parfaire le conditionnement des données de puits éparses combinées à des tendances verticales et horizontales.

Les méthodes basées-géométrie

Ces méthodes cherchent à reproduire l'évolution des systèmes chenalisés en se basant principalement sur les caractéristiques géométriques de ceux-ci. Parmi ces méthodes, Labourdette [2007] propose une modélisation par pointé sismique (Figure 16). Les chenaux sont interprétés manuellement puis modélisés en 3D. Le type de migration, le nombre de chenaux en jeu, le taux de recouvrement des surfaces érosives par des hétérogénéités sont des paramètres stochastiques variables qui permettent de s'affranchir des incertitudes.

Ruiu [2015] propose une modélisation dynamique de la croissance du système chenalisé par une migration latérale dans le sens rétro-chronologique. Elle permet, à partir d'un chenal mature et de paramètres tels que le nombre d'étapes et l'amplitude de migration de retrouver la géométrie des barres d'accrétion latérale de chaque

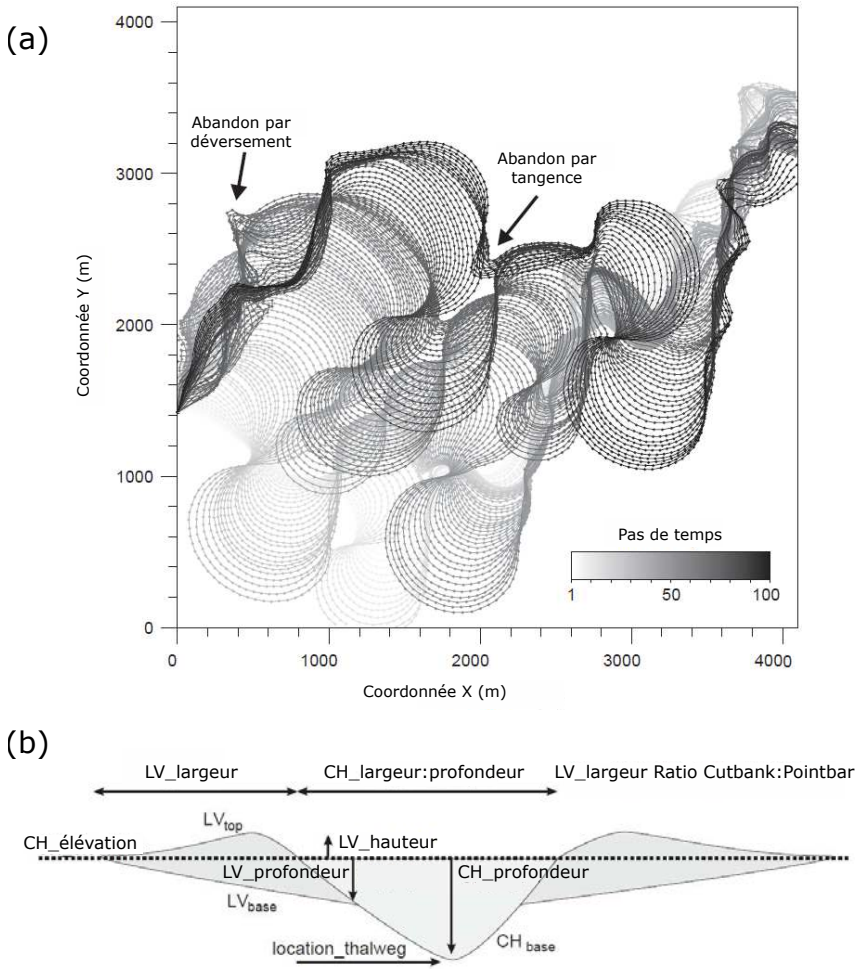


FIGURE 15 Modélisation dynamique basée-processus ALLUVSIM. **a** Modélisation de la migration du chenal principal **b** Paramétrisation des architectures sédimentaires. Modifié d'après Pyrcz et al. [2009]

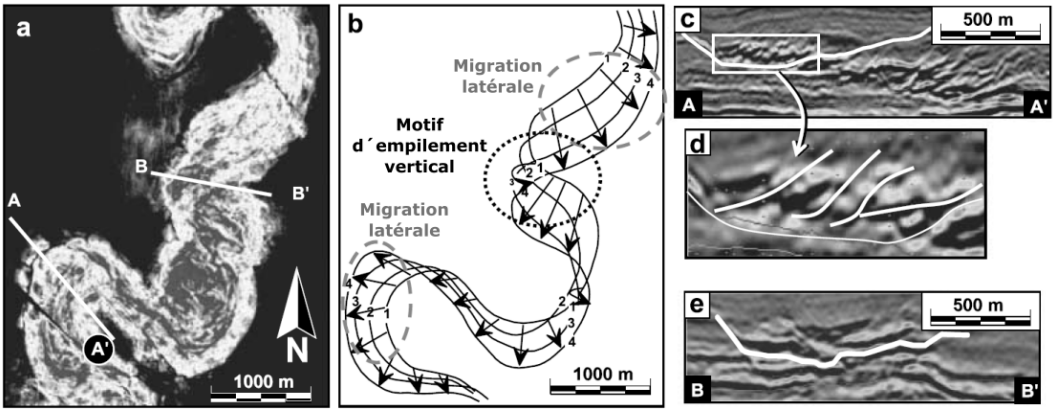


FIGURE 16 **a** Section horizontale en temps d'un cube d'amplitude sismique **b** Interprétation de la migration latérale et aval du système **c** Section de migration latérale **d** Zoom sur la migration latérale **e** Section de migration latérale. Modifié d'après [Labourdette, 2007]

demi-méandre. La migration en sens rétro-chronologique se fait itérativement jusqu'à revenir à un état rectiligne entre les points d'inflexion du chenal initial.

Rongier et al. [2017b] proposent une modélisation de la ligne centrale des chenaux par un système de Lindenmayer ou L-système [Lindenmayer, 1968]. Cette méthode permet de rendre stochastique la ligne centrale du chenal tout en permettant le conditionnement à des données de puits ou de probabilité de faciès. Le L-système est un système grammatical basé sur la réécriture d'une séquence selon des règles définies et associées à des probabilités. L'association de ces règles grammaticales à un comportement géométrique (p. ex. angle de n degrés vers la droite ou la gauche, n' distance parcourue) permettent la génération aléatoire de systèmes complexes comme un système chenalisé tout en permettant l'intégration de paramètres à respecter tels que le conditionnement ou des caractéristiques géométriques (p. ex. sinuosité, longueur d'onde, amplitude).

Les lignes médianes des chenaux sont ensuite habillées par des NURBS avec la méthode de Ruiu et al. [2016] (Figure 12). La combinaison de ces deux méthodes permet d'avoir une simulation basée-objet avec un processus de croissance stochastique et honorant les données (Figure 17). Une fois le premier chenal simulé, Rongier et al. [2017a] proposent une simulation de la migration de celui-ci dans le sens direct ou inverse par des méthodes géostatistiques de type SGS ou MPS. Celle-ci s'effectue par une simulation de l'amplitude de la migration du chenal selon la normale à sa trajectoire. Dans le sens chronologique, cette migration comprend les phénomènes d'avulsion et de méandres abandonnés. En revanche dans le sens rétro-chronologique, seule l'avulsion peut être simulée. En ce qui concerne le conditionnement aux données de puits, seul le premier chenal de la migration est conditionnable.

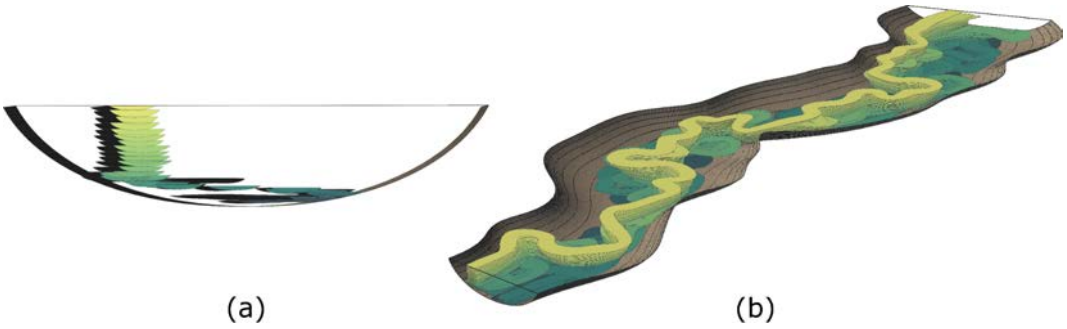


FIGURE 17 Modélisation de la migration chronologique d'un chenal non conditionnable ni à des données de puits ni à des observations de méandres abandonnés **a** Vue en coupe **b** Vue d'ensemble [Rongier et al., 2017a]

La méthode proposée par Sylvester et al. [2017] se base sur la relation entre la migration et le ratio du rayon de courbure du chenal sur sa largeur [p. ex. Hickin and Nanson, 1975].

Cependant, les données de méandres abandonnés ne sont pas honorées avec de telles approches. Elles représentent pourtant des sources d'informations non négligeables à propos des paléo-trajectoires du système.

2 Objectifs

Le but de ce travail est de proposer une nouvelle méthode de modélisation des systèmes chenalisés basée sur la connaissance du processus de migration et sur la seule géométrie des objets observables (p. ex. dernier état du chenal principal, méandres abandonnés) en imagerie sismique, satellite ou de télédétection.

Pour cela on propose une approche ciblée sur plusieurs objectifs scientifiques.

Notre premier objectif est de reconstruire le plus fidèlement possible et en trois dimensions des environnements chenalisés en intégrant la connaissance géologique. Cela passe donc par l'étude de la migration de systèmes naturels et la traduction en équations de cette migration en matière de géométrie.

Notre second objectif est de diversifier le conditionnement des données. Dans notre modèle, celles-ci sont constituées du dernier chenal abandonné mais aussi des boucles de méandres abandonnés au cours de l'évolution du système. En effet, ces deux types d'objets contrastent de par leur remplissage sédimentaire, sur les images sismiques. Ils sont également souvent visibles sur les images de télédétection et satellites de par leur topographie ou leur végétalisation différente. Pour conditionner le dernier chenal abandonné nous proposons de travailler en rétro-chronologie : il s'agit de commencer la simulation par le dernier chenal observé. Le temps est alors remonté en faisant migrer ce chenal en sens inverse, de façon à retrouver étape par étape les états antérieurs du système. Pour conditionner aux méandres

abandonnés, nous proposons une intégration de ceux-ci les uns après les autres dans le processus de migration rétro-chronologique. Cependant cette intégration ne peut être assurée que par une bonne estimation de l'époque d'abandon du méandre de façon à l'introduire au bon moment lors de la modélisation de la migration inverse. Pour cela nous proposons une simulation de la chronologie d'abandon des différentes structures observées selon les indices laissés.

Seules les structures observables en imagerie sismique et donc épargnées par l'érosion au cours du temps peuvent être conditionnées. La reconstruction du système est donc limitée et peu vraisemblable. De façon à étendre la simulation à toute la ceinture de méandres et à se rapprocher de la réalité des motifs de dépôt, nous proposons enfin de simuler les structures érodées et de les intégrer dans le système de la même façon que celles observées.

3 Plan détaillé

Cette thèse est divisée en trois chapitres développant et appliquant les méthodes proposées pour les deux thèmes de recherche évoqués dans le paragraphe précédent.

Le chapitre 1 est composé d'un article publié dans la revue *Mathematical Geosciences* en novembre 2017 [Parquer et al., 2017]. Il propose une méthode de migration rétro-chronologique basée sur les données accessibles sur l'imagerie sismique, à savoir le dernier chenal observé ainsi que les méandres abandonnés. Une étude de la migration sur le Mississippi y est également présentée et a permis de proposer un modèle de migration rétro-chronologique. Ainsi, partant du dernier chenal observé, celui-ci est migré dans le sens inverse du temps. A chaque étape de temps les méandres abandonnés peuvent être intégrés et ainsi permettre au système modélisé de s'étendre dans toute la ceinture de méandres.

Le chapitre 2 est composé d'un article en cours de soumission au journal *Geomorphology*. Il développe une méthode de simulation de la chronologie des méandres abandonnés dans la ceinture de méandres. En effet, une fois une boucle abandonnée, le système continue à évoluer dans la ceinture de méandres. Il perd ainsi toute connexion avec les boucles précédemment abandonnées, il peut s'en éloigner ou s'en rapprocher, allant même parfois jusqu'à les éroder entièrement ou en partie. Le moment de leur abandon est donc difficile à estimer, affectant la précision de la reconstruction du système. L'âge absolu étant ainsi très difficile à estimer, nous proposons donc de nous intéresser plutôt à l'âge relatif, la chronologie des évènements d'abandon. Nous présentons une méthode pour simuler la chronologie d'abandon des différentes boucles de méandres. Elle se base sur les relations géométriques entre le chenal principal et chaque méandre abandonné. Elle intègre également un aspect stochastique pour rendre compte des incertitudes associées.

Le chapitre 3 se présente sous la forme d'un article en préparation pour le journal *Computers and Geosciences*. Au cours de son histoire, le système chenalisé évolue

dans les trois dimensions de l'espace, verticalement, ce qui permet l'enregistrement sédimentaire. Cependant, l'évolution se fait aussi horizontalement (i.e. latéralement ou dans le sens du courant), ce qui peut entraîner un recouvrement voire une érosion des dépôts précédents. Des méandres précédemment abandonnés peuvent donc disparaître rendant plus difficile encore la reconstruction du système entier. Dans ce chapitre nous proposons une simulation de boucles de méandres dans la ceinture de méandres. Leur forme est inspirée de celles observées dans le système (chenal principal et méandres abandonnés épragnés par l'érosion) ou dans des analogues sédimentaires.

4 Contexte de travail

Ce travail a été financé par le consortium RING-Gocad géré par l'ASGA. Il s'inscrit dans le projet RING développé au sein du laboratoire GeoRessources à l'Université de Lorraine.

Ce travail s'est essentiellement concrétisé par le développement de code dans le plug-in *GoNURBS* pour le logiciel SKUA-GOCAD. Ce dernier est un logiciel de géomodélisation développé par Paradigm dont le projet a été initié en 1989. Il permet un environnement de développement complet et adapté à la recherche en géologie numérique sous la forme de plug-in écrits en C++. Le plug-in GoNURBS a été créé par Jérémy Ruiu pendant sa thèse soutenue en 2015. Il proposait alors notamment une librairie d'objets clastiques modélisés par des NURBS, offrant une grande liberté de diversification et de modification interactive des modèles paramétriques proposés. Le travail présenté ici utilise les modèles créés lors de ce travail de thèse avec quelques modifications apportées pour alléger leur utilisation lors d'algorithmes de modification itératives. Les méthodes de migration rétro-chronologiques ont été développées autour de cette librairie.

Ce travail a donné lieu à des tutoriaux proposés avec utilisation directe des techniques développées dans GoNURBS lors des RING meetings de 2015, 2016 et 2017 ainsi qu'aux contributions suivantes :

$^{(r)}$ *article à comité de lecture,* $^{(o)}$ *présentation orale,* $^{(p)}$ *poster,* $^{(a)}$ *article de conférence, * présentateur*

Articles à comité de lecture

$^{(r)}$ **M. Parquer**, P. Collon, G. Caumon. (2017) *Reconstruction of Channelized Systems Through a Conditioned Reverse Migration Method* , Mathematical Geosciences , 49(8), 965-994

$^{(r)}$ **M. Parquer**, G. Caumon, P. Collon. *A stochastic reconstitution method for determining the abandonment chronology of channelized paleo-evidences.*, Geomorphology, *in prep.*

$^{(r)}$ **M. Parquer**, P. Collon, G. Caumon. *Eroded oxbow lake simulation and borehole data conditioning in reverse migration modeling of channelized systems.*, Computers and Geosciences, *in prep.*

Résumés étendus pour conférences internationales

$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon (2017) *Rock record reconstruction of channelized systems through reverse migration simulation conditioned to seismic stratal slices*, 11th International Conference on Fluvial Sedimentology, Calgary, Canada
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon (2017) *On the chronological ordering of oxbow lakes for reverse migration of channels conditioned to subsurface data*, 79th EAGE Conference & Exhibition 2017 Proceedings, Paris, France
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon (2016) *Stochastic simulation of channel migration conditioned to subsurface data*, 10th International Geostatistical Congress, Valencia, Spain
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon (2016) *Conditioning channel backward migration modeling to seismic data*, 78th EAGE Conference & Exhibition 2016 Proceedings, Vienna, Austria

Articles pour RING Meeting

$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, G. Caumon, P. Collon (2017) *Simulation of stochastic chronological ordering of channelized paleo-evidences.*, 2017 RING Meeting, Nancy, France
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon, C. Vouaux (2017) *Simulation of eroded oxbow lakes and conditioning to well data in reverse migration simulation of channelized systems.*, 2017 RING Meeting, Nancy, France
$^{(p)}$ **M. Parquer**, Q. Corlay*, P. Marchive* (2017) *Improvements in reconstruction of channelized system stacking patterns.*, 2017 RING Meeting, Nancy, France
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, P. Collon, G. Caumon (2016) *Reconstruction of channelized systems through a conditioned backward-migration method*, 2016 RING Meeting, Nancy, France
$^{(o,a)}$ **M. Parquer***, J. Ruiu, P. Collon, G. Caumon, G. Rongier (2015) *Towards more genetics concepts and data integration in channel simulation*, 35th Gocad Meeting, Nancy, France

D'autres contributions résultent de travaux parallèles :

$^{(p,a)}$ M. De Baecque*, **M. Parquer**, P. Collon, G. Caumon (2016) *Morphological study of channelized systems Geometrical approach.*, 2016 RING Meeting, Nancy, France

$^{(p,a)}$ T. Le Blevec*, **M. Parquer**, J. Ruiu, G. Caumon (2015) *Modeling NURBS channels in faulted reservoirs.*, 35th Gocad Meeting, Nancy, France

Cette thèse a été l'occasion de l'encadrement de quatre étudiants en master (3ème année d'ingénieur) à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) à Nancy : T. Le Blevec (2014-2015), M. De Baecque (2015-2016), C. Vouaux (2016-2017) ; et

de deux étudiants en 2ème d'année d'ingénieur à l'Ecole Nationale Supérieure de Géologie (ENSG) à Nancy : Q. Corlay (2016-2017) et P. Marchive (2016-2017).

Chapitre 1

Modélisation des systèmes chenalisés par migration inverse

Le dernier état du chenal et les méandres abandonnés sont les vestiges les plus visibles du système chenalisé et de son évolution dans la ceinture de méandres. En effet, la migration continue du chenal principal érode et dépose des sédiments de manière synchrone. Ainsi, de nombreux témoins de l'évolution passée peuvent disparaître du fait de l'érosion.

Le but étant de reconstituer une possible architecture interne du système, ce chapitre présente une méthode générique de simulation rétro-chronologique de la migration du chenal. Dans cette approche, le vecteur de migration est scindé selon trois directions principales (e.g. verticale, latérale et aval). Il est inspiré de l'analyse d'un analogue sédimentaire : le Mississippi. En effet, des cartes à accès public détaillent 4 étapes de temps cartographiées sur près de 200 ans et 1200 kilomètres. Des tendances de corrélation entre la courbure du chenal et sa migration horizontale (latérale et aval) pour chaque demi-méandre ont été identifiées et retranscrites dans le modèle sous forme probabiliste.

Une fois le dernier état du chenal digitalisé, il est migré rétro-chronologiquement, pas de temps par pas de temps. La transformation des courbes digitalisées en objets paramétriques NURBS [Ruiu, 2015] permet de connecter plusieurs objets. Ainsi, chaque méandre abandonné peut être intégré dans le chenal principal au pas de temps approprié. La modélisation par migration rétro-chronologique permet donc de reconstituer le système entier selon un nombre d'étapes de temps voulu, en s'inspirant d'analogues pour le modèle de migration et en respectant les observations disponibles que constituent les méandres abandonnés.

Une application de la méthode est proposée sur une image satellite de la rivière Tangnara (Russie). Cette image est similaire à une image sismique où le dernier état

enregistré du chenal contraste sur la sismique grâce à son remplissage argileux. Cent réalisations stochastiques sont proposées. Elles permettent d'échantilloner les incertitudes sur la géométrie du système global tout en respectant à chaque réalisation les observations faites sur l'image satellite.

Ce chapitre se présente sous la forme d'un article publié à *Mathematical Geosciences* en novembre 2017. Il est complété par un travail annexe effectué dans le cadre d'un projet de recherche en laboratoire d'un étudiant en 2ème année d'école d'ingénieur à l'ENSG sur la modélisation de la composante aggradante dans le modèle de migration inverse. En effet, celle-ci n'était pas prise en compte dans le modèle initial qui était basé sur l'analyse des cartes du Mississippi. Sur ces données, l'étude de la troisième dimension n'était possible que très ponctuellement grâce à quelques sections. Néanmoins, la littérature permet de sélectionner quelques facteurs globaux tels que la distalité (distance à la source) ou le degré de confinement qui influenceraient l'aggradation du chenal dans le système.

La conception géométrique du modèle de migration inverse rend possible son application à des systèmes fluviatiles ou turbiditiques moyennant une précision de l'importance relative des divers types de migration.

Reconstruction of Channelized Systems through a Conditioned Reverse Migration Method

Marion PARQUER, Pauline COLLON, Guillaume CAUMON

Mathematical Geosciences, 49.8 : 965–994, 2017

DOI : *10.1007/s11004-017-9700-3*

Abstract Geological heterogeneities directly control underground flow. In channelized sedimentary environments, their determination is often underconstrained: it may be possible to observe the most recent channel path and the abandoned meanders on seismic or satellite images, but smaller-scale structures are generally below image resolution. In this paper, reconstruction of channelized systems is proposed with a stochastic inverse simulation reproducing the reverse migration of the system. Maps of the recent trajectories of the Mississippi river were studied to define appropriate relationships between simulation parameters. Measurements of curvature and migration vectors showed (i) no significant correlation between curvature and migration offset and (ii) correlation trends of downstream and lateral migration offsets versus the curvature at half-meander scale. The proposed reverse migration method uses these trends to build possible paleo-trajectories of the river starting from the last stage of the sequence observed on present-day (satellite or seismic) data. As abandoned meanders provide clues about the paleo-locations of the river, they are integrated step by step during the reverse simulation process. We applied the method on satellite images of a fluvial system. Each of the different resulting geometries of the system honors most of the available observations and presents meandering patterns that are similar to the observed ones.

1.1 Introduction

Deciphering the fundamental parameters that control the morphology and evolution of meandering systems has been the focus of many researchers for decades [Covault et al., 2016, Jobe et al., 2016, Leopold and Langbein, 1966, Seminara, 2010]. These systems can be found in aerial or submarine environments [Leopold and Langbein, 1966, Wynn et al., 2007]. In the sedimentary record, channelized systems can also represent interesting reservoirs for natural resources such as water and hydrocarbon [Fitterman et al., 1991, García-Gil et al., 2015, Mayall et al., 2006] or for storage of gas (e.g., carbon sequestration, Issautier et al. 2014).

Turbidite and fluvial systems both migrate in the available space (canyon or floodplain) [Jobe et al., 2016, Wynn et al., 2007]. This migration goes along with a perpetual reworking of sediments due to erosion, transport and deposition. Labourdette and Bez [2010] and Peakall et al. [2000] describe a vertical migration (aggradation, Fig. 1.1a) and two horizontal migrations, one directed downstream, in the direction of flow, and one directed perpendicularly to the flow direction (Fig.1.1b). The latter is called the lateral migration and contributes to the extension of channel meander loops at small scale and, at a larger scale, to the meander belt. The relative expression of these directions of migration depends on various external and internal factors (e.g., amount of sediment, confinement degree, nature of sediment, paleo-slope, maturity of the system, structural controls) and makes each system unique [McHargue et al., 2011, Wynn et al., 2007].

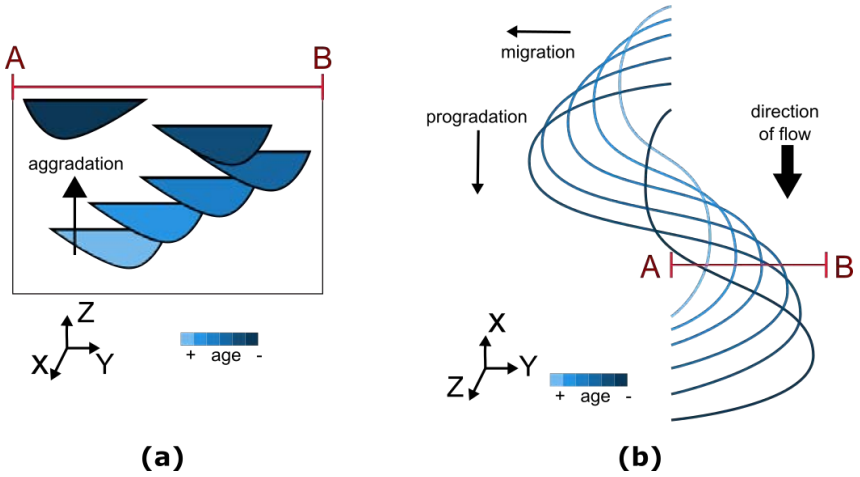


Figure 1.1 Channel lateral migration (called migration if perpendicular to flow direction, progradation if in the direction of the flow) and vertical migration (called aggradation): **a** section view, **b** map view

In addition to gradual migration, the main path of the channel can change abruptly because of avulsions or cut-offs [Hajek and Wolinsky, 2012, Slingerland and Smith, 2004, Stouthamer and Berendsen, 2001]. A cut-off occurs when the sinuosity of the channel becomes so high that the channel pinches itself. The trajectory is naturally simplified by the cutting of meander loops. After these disruptive events, paleo-channels and oxbow lakes will be filled with fine-grained material [Issautier et al., 2014, Veeken, 2006]. Therefore, paleo-channels can be observed on stratal slices [Miall, 2014, Posamentier and Kolla, 2003]. The remnants of oxbow lakes after erosion will provide important clues about paleo-trajectories of the channel. In subsurface studies, well data can also inform about channel facies positions. Thus, the typical subsurface data that are available to constrain the modeling of channelized systems are composed by borehole data, the last channel path and the observable oxbow lakes.

The long-term evolution of the main channel leads to a complex internal architecture of shale and sand deposits. This complexity, mainly due to the perpetual reworking of the sediments, causes heterogeneities at different scales in the final deposit [Jackson and Muggeridge, 2000, Willis and Tang, 2010]. For example, various types of point bars are deposited along both sides of the channel and distributed around the meander shape (e.g., counter-point-bars, downstream-migrating fluvial point bars, eddy-accretion deposits) [Ghinassi et al., 2016]. Such volumes constitute the main reservoir rocks for fluids hosted in channelized sediments. However, these volumes can be compartmentalized due to the presence of shale drapes deposited on the scour surfaces. Understanding reservoir behavior can be achieved by flow

simulation. This implies a good reconstruction of the accretion point bars and of the surrounding objects such as shale drapes.

Many studies have been conducted on the spatial evolution of channels [Peakall et al., 2000, Posamentier and Kolla, 2003, Wynn et al., 2007]. Most of them focused on fluvial systems because they are easily observable and because their day-to-day evolution directly impacts human activities. Thus, forecasting the future evolution of a channel given a geological and hydrodynamic context has been a wide research topic for decades.

Most of the proposed modeling approaches [Edwards and Smith, 2002, Sun et al., 1996] are physical-based methods trying to reproduce the physical processes that generate channelized systems. Many of them are rooted in the seminal works of Ikeda et al. [1981] or Langbein and Leopold [1966] that rely on a hydrodynamic model of the flow inside the channel. This kind of model is calibrated with various parameters such as curvature, channel width values and sedimentary discharge. However, despite the similarity of these forecasts with natural patterns, long-term simulation produces systems that are statistically distinguishable from the natural channels [Howard and Hemberger, 1991]. In order to stabilize the long-term behavior of these models, Frascati and Lanzoni [2009] worked on a flow field taking into account other morphological features, such as various morpho-dynamic flow regimes. It has permitted to reproduce the full range of morpho-dynamic regimes which can be found inside a channel of variable meander geometries. Whereas interesting forecasts of channel evolution are given by these methods, their application can be complex and restricted. For example, their parameterization calls for specific types of data such as paleo-hydrodynamic flow and paleo-flow bank erodibility, which are difficult to assess after deposition [Camporeale et al., 2007]. Another limit is that these methods give a deterministic solution which does not cover the reservoir architecture uncertainties. To overcome this limit, Lopez [2003] and Pyrcz et al. [2009] introduced stochasticity in their models. Finally, due to the focus on the reproduction of geological processes, data conditioning is difficult, except for well data which can be managed thanks to attraction or repulsion fields.

Descriptive approaches [Deutsch and Tran, 2002, Labourdette et al., 2006, Teles et al., 1998, Viseur, 2004], which focus more on the result of the migration than on the geological processes responsible of the migration, are mainly based on the channel geometry (e.g., curvature, width, depth). This simplified parametric construction permits to widen the range of applications to poorly known systems in terms of depositional contexts. Although they give good models of channel geometries, they hardly honor seismic and borehole observations in a simple way. In a direct approach, the output model is, indeed, strongly dependent on the hypothesis made on the first channel path. Thus, it can be quite difficult to fit to a precisely observed mature channel shape with a direct evolution model of the channel path.

However, our aim is to reproduce the sedimentary record deposited by the channelized system. Thus, honoring data such as the last channel path is of high importance.

Our approach is based on the idea that a good approximation of geological processes should help fitting to all conditioning data by getting closer to the reality. This paper proposes a modeling tool mainly based on the geometric parameters accessible through seismic images such as channel curvature. Starting from the last observed channel path, our algorithm goes back in time reproducing the natural migration of a channel and integrating step by step the oxbow lakes which recorded paleo-trajectories. Although most of the developed approaches only support two dimensions [Howard and Hemberger, 1991, Ikeda et al., 1981, Langbein and Leopold, 1966], the one presented here reproduces the three migration directions of channels, i.e. downstream, lateral and vertical. Our migration model is based on the study of Mississippi maps detailing several trajectories. Thus, the main channel migration steps are reconstructed, opening the way for the reproduction of accretion point bars. In addition to the continuous migration process, the algorithm also aims at reproducing the discrete evolution steps due to brutal events such as meander abandonment. Absolute values of abandonment ages can be given by a few methods such as radiocarbon analysis [Holbrook et al., 2006] or satellite image analysis (e.g., optically stimulated luminescence [Rowland et al., 2005]). Most of the time, on seismic images, only relative abandonment ages can be constrained by the analysis of cross-cuttings and intra point bar erosion surfaces [Durkin et al., 2015].

In order to honor the last channel path observed as conditioning data, some works have been conducted on reverse migration modeling of channelized systems starting from the conditioning data and going back in time. Labourdette [2008] proposed a geometric modeling approach based on the seismic observations of a turbidite system (e.g., final stage, channel belt borders) and on the probable migration of characteristic points of the channel trajectory. The idea of Ruiu et al. [2015] is to reduce the sinuosity of the channel by doing a reverse lateral migration of the channel. The result is a channel that tends to produce a straight line between the initial inflection points. This approach gives interesting stacked geometries for channels which have migrated mainly laterally, but does not reproduce deposits due to potential downstream migration. In the absence of unambiguous subsurface images, Rongier et al. [2017b] simulate the last channel path with a formal grammar method using probability distributions of various geometrical parameters (e.g., meander amplitude, meander wavelength, channel width, channel main orientation). Then, a reverse migration step is generated either with a Sequential Gaussian Simulation (SGS) of migration offset constrained by the curvature of the channel or with a Multiple Point Simulation process. This method reproduces the meandering specificities observed in natural deposits such as lateral and down-system migrations [Posamentier and Kolla, 2003], aggradation [Peakall et al., 2000], diminution of the sinuosity by natural retro-migration of the channel [Nakajima et al., 2009], abrupt migration [Abreu et al., 2003, Maier et al., 2012], and avulsion [Armitage et al., 2012]. However, none of these methods decomposes the migration into the two main directions, lateral and

downstream, as advocated for instance by Jobe et al. [2016]. Moreover, they do not honor oxbow lakes, which are essential remnants of the evolution of the system.

In this paper, a statistical study of the lateral and downstream migrations of the Mississippi river located in the United States over centuries is proposed (Sect. 1.2). The aim is to determine how the channel migration could be correlated with morphological parameters. Indeed, the natural migration is the result of the combination of so many internal and external factors that this natural irreversible process is necessarily simplified in the numerical modeling. Then, an inverse modeling method conditioning to oxbow lakes and reproducing the migration patterns as observed in the studied database is presented (Sect. 3.7) and applied on a satellite image of the Tangnara river located in Russia (Sect. 1.4). As the available data never sample the channelized system in its whole, the method proposes stochastic realizations. Moreover, the stochasticity helps to assess architectural uncertainties (e.g., location of barriers to flow).

1.2 Natural Migration of a Channel

1.2.1 Migration Case Study: Mississippi River

At human time scale, the Mississippi river is a good example of an evolutive meandering channelized system. The US Army Corps of Engineers has dated and mapped the last evolution steps of the river (Fig. 1.2). This work has been achieved thanks to historic archives for the four youngest paths since 1765 and with aerial photographs for the remnants of older trajectories [Fisk, 1944]. Almost twenty stages of migration are observed. This database gives the opportunity to study the link between river geometry and river migration. Most of the previous studies demonstrated a maximum of lateral offset when the ratio of curvature radius to channel width equals three [Furbish, 1988, Hickin and Nanson, 1975, Hooke, 1984]. However, channel width can vary locally and is not directly observable on Mississippi maps except for the last channel path of 1944. For the other complete paths, the width should be locally estimated. Otherwise, our aim is to provide a modeling tool also usable on seismic images. On such images, the noise and the limited resolution of these data can make the assessment of river width quite difficult. Thus, we choose not to consider the channel width.

Therefore, we studied the influence of the river curvature on the lateral and downstream migrations by analyzing the four last observed trajectories of the river. Between one thousand and two thousand points were picked along the 1200 km of each trajectory of the channel belt and offsets of migration were computed between pairs of successive channels in terms of evolution through time in the reverse way.

For the study, the channel trajectory is divided into meanders and meanders are divided into half-meanders (Fig. 1.3). A meander is composed by a pair of opposite loops [Leopold et al., 1964]. A half-meander is delimited by inflection points.

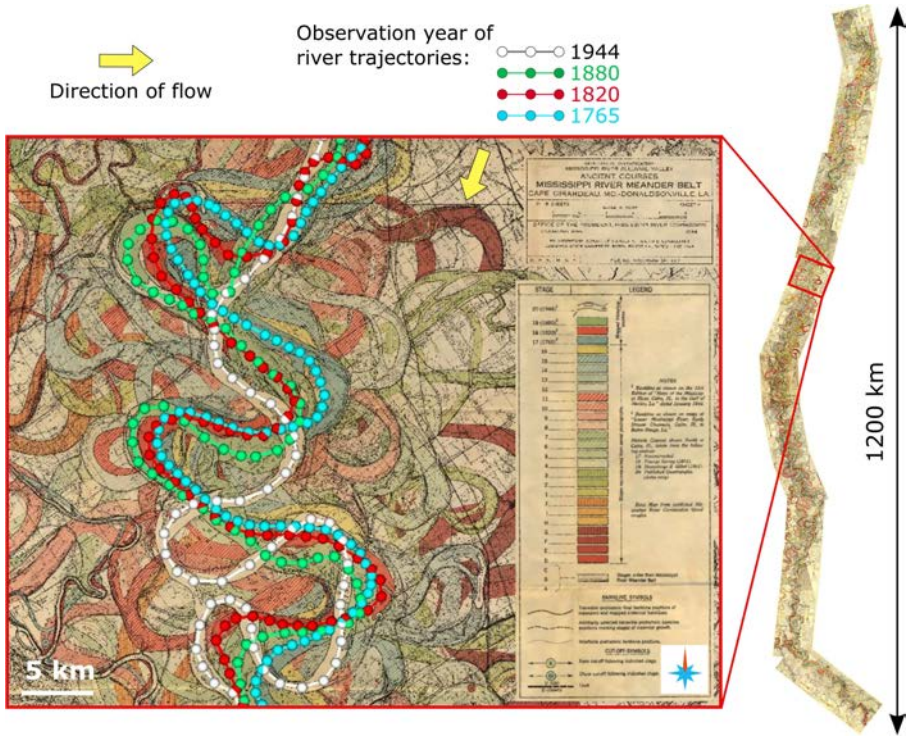


Figure 1.2 Picking of the four last trajectories of the Mississippi in 1944 (in white), 1880 (in green), 1820 (in red) and 1765 (in blue) on an extract of map [http://lmvmapping.erdc.usace.army.mil/]

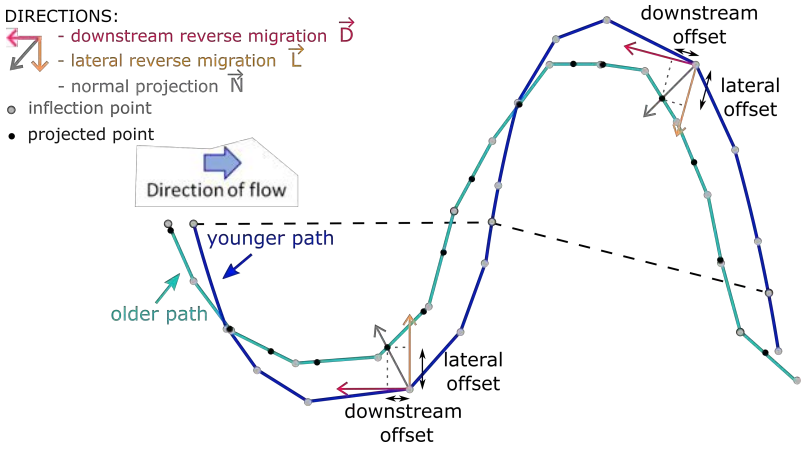


Figure 1.3 Points of the youngest channel are projected on the older channel along the normal direction of each point. Lateral and downstream reverse migration offsets are deduced by projection of the normal vector on the lateral or downstream one

In order to avoid very small half-meanders, two points at minimum are required between two successive inflection points to define a half-meander. Obviously, the number of points between two inflection points depends of the centerline interpretation. Inside each half-meander, the direction of reverse downstream migration and the direction of reverse lateral migration are defined relatively to the segments connecting the inflection points (dashed grey in Fig. 1.3). Between two successive channels, the downstream and lateral offsets are given by projecting the points of the younger channel on the older channel along the normal direction to the younger channel path. Then, downstream and lateral offsets are deduced by projection of this vector respectively on the downstream vector and on the lateral vector. The curvature computed on each point p_i of the youngest channel is defined between two consecutive segments as the inverse of the radius of the common circle of the three points defining these two segments.

The global analysis of the results does not demonstrate a clear correlation between the channel curvature and its natural migration offset (Figs. 1.4a, 1.4b and 1.4c). The lateral and the downstream migrations show a majority of migration patterns with downstream and lateral positive offsets (Fig. 1.4d). The occurrences of patterns with a negative lateral or downstream migration are lower. The same kind of results have been observed on forward migration rates (A).

1.2.2 A Curvature-Dependent Migration

The analysis of migration offsets for each half-meander yields more interesting results. Locally, the considered curvature values are the curvature values divided by the maximal observed curvature of each half-meander, hereafter called normalized

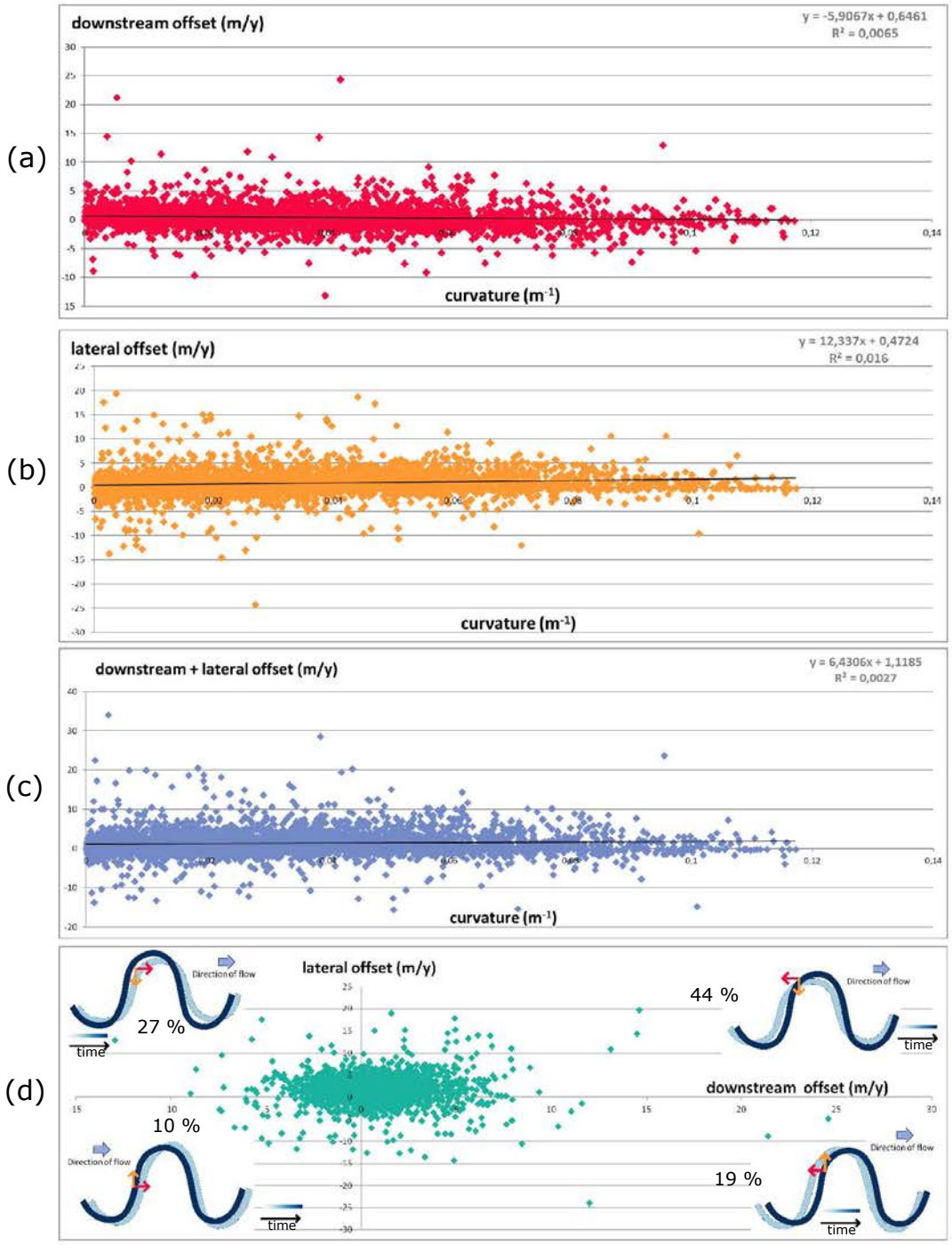


Figure 1.4 Horizontal offset versus curvature on four successive paths considered in the reverse direction. **a** curvature versus downstream migration offsets, **b** curvature versus lateral migration offsets, **c** curvature versus sum of the downstream and lateral migration offsets, **d** downstream migration offsets versus lateral migration offsets

curvature. Some of the results are presented in Fig. 1.5. Inside a half-meander, a light trend can generally be observed between the normalized curvature and the downstream migration offset and between the normalized curvature and the lateral migration offset. Nonetheless, the trends observed are not constant and can be contradictory for two half-meanders of the same river age. In Figs. 1.5a, 1.5b and 1.5f, the downstream migration clearly decreases when normalized curvature increases while the lateral migration follows an opposite trend. The observed correlation is completely inverse in Fig. 1.5d. It is interesting to point out that the half-meanders of Fig. 1.5 present various migration patterns (e.g., lateral migration in Figs. 1.5a and 1.5f, downstream migration in Fig. 1.5b and a natural retro-lateral migration in Fig. 1.5d). The maximal values of lateral and downstream migrations vary with the considered half-meander.

Some half-meanders (Fig. 1.5c and Fig. 1.5e) do not present any correlation between the normalized curvature and any of the two horizontal migrations. This is not surprising, considering that the related meanders do not show any visual evidence of correlation. Indeed, the meander of Fig. 1.5c does not present any significant migration between the two mapped steps. On the contrary, the meander of Fig. 1.5e has quickly migrated between the two mapped steps and shows the development in the reverse direction of multiple loops in 1820 whereas only one was observed in 1880. Some intermediate steps are missing to understand the link between the normalized curvature and the migration offsets between the two mapped stages. This variety of meander migration speeds has been described in many rivers studies [Brice, 1974].

These results have to be tempered due to the uncertainty on the river mapping in ancient times, the potential influences of the human activities on the river trajectory and of our manual interpretation of the maps. Moreover, the mapped stages are not representative of the gradual migration of the river. It is, however, still interesting to point out that the same results have been observed on forward migration rates (A).

These plots permit to deduce a model of the half-meander curvature-dependent migration. In the following development, all values obtained by sampling are indicated in lowercase and all values deduced from the equations or channelized system analysis are indicated in uppercase. Vectors are indicated in bold.

Because the maximal offset of lateral or downstream migration varies according to the considered half-meander, a sampling of these maximal values o_D and o_L from probability distributions is proposed. A positive or negative weighting by the local curvature is then applied to reproduce the diversity of half-meander behaviors: the curvature weight w is uniformly sampled from the set of discrete values $\{-1; 1\}$. The horizontal offsets of migration are then smoothed according to the local curvature $c(p_i)$ at the point p_i normalized by c_M the local maximal curvature. The smoothing parameters s_D and s_L are sampled from a uniform distribution defined between 0 and two times the maximal offset o_D or o_L.

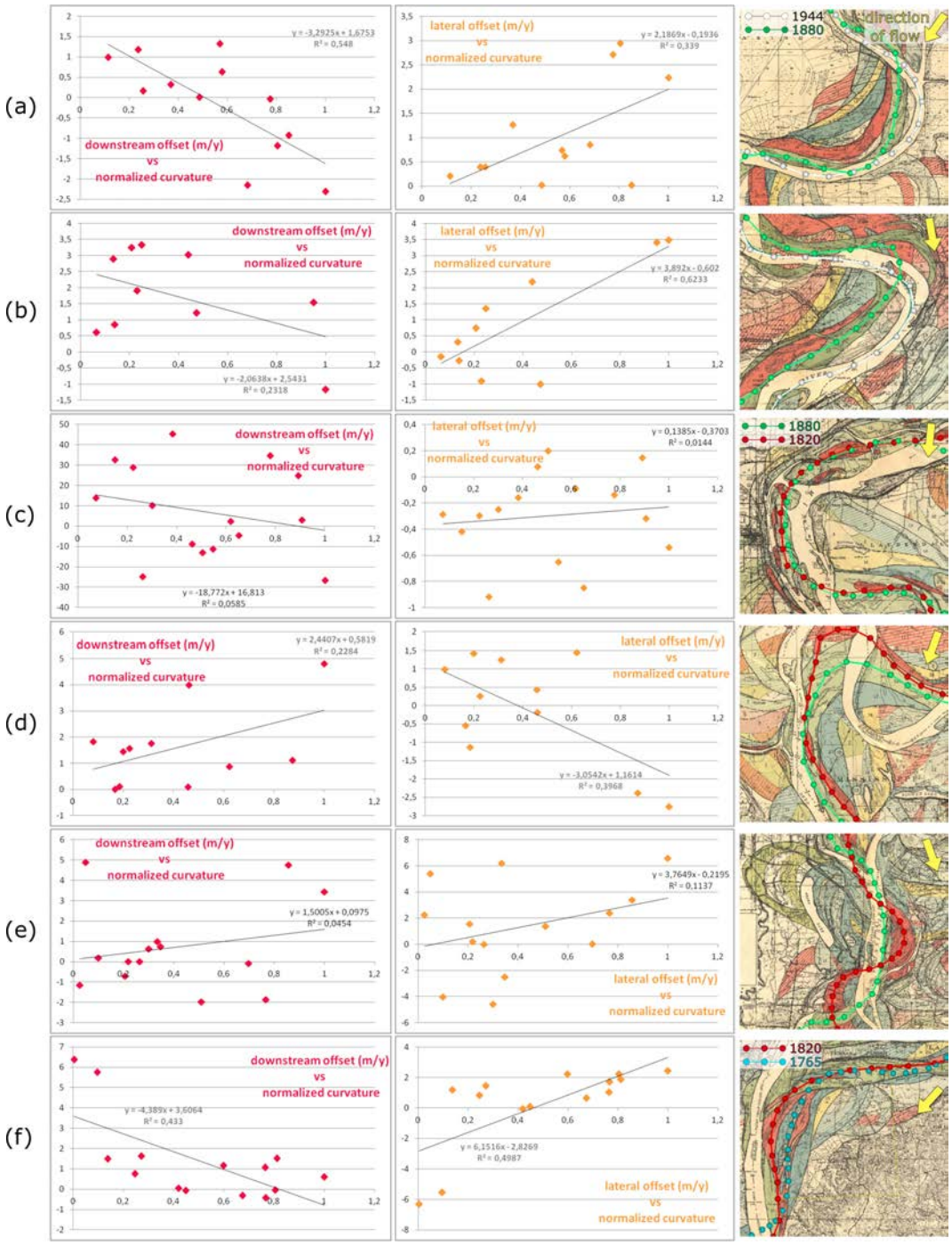


Figure 1.5 Plots of offset values (downstream in red, lateral in orange) versus normalized curvature for five meanders of the four last Mississippi trajectories considered in the reverse direction. If some trends can be locally observed, the very low values of some linear correlation coefficients demonstrate the absence of general rules and the high variability of migration patterns

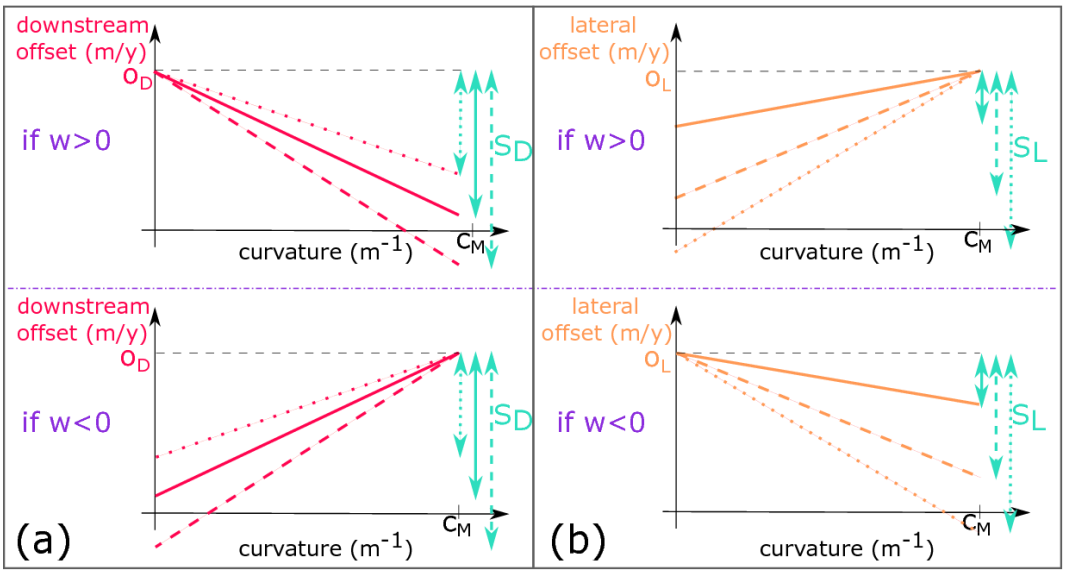


Figure 1.6 Schemes of the correlations at the point p_i for three example values of S_L and S_D: **a** between curvature and downstream offset $O_D(p_i)$ for Eq.(1.1); **b** between curvature and lateral offset $O_L(p_i)$ for Eq.(1.2)

If w is positive, the reverse downstream migration offset O_D decreases when curvature increases (Fig. 1.6) as

$$O_D(p_i) = \begin{cases} o_D - s_D \times \frac{c(p_i)}{c_M} \text{ if } w > 0 \\ o_D - s_D \times \left(1 - \frac{c(p_i)}{c_M}\right) \text{ if } w < 0 \end{cases} . \tag{1.1}$$

Similarly, the reverse lateral migration offset O_L increases when curvature increases (Fig. 1.6) as

$$O_L(p_i) = \begin{cases} o_L - s_L \times \left(1 - \frac{c(p_i)}{c_M}\right) \text{ if } w > 0 \\ o_L - s_L \times \frac{c(p_i)}{c_M} \text{ if } w < 0 \end{cases} . \tag{1.2}$$

A negative w value reverses the influence of the curvature (Fig. 1.6).

1.3 Reverse Migration Modeling

The study made on the Mississippi system shows the positive or negative influence of the channel curvature on its migration at half-meander scale. This observation can be used as a constraint for migration modeling. A complete reconstruction of channel belts is proposed with a method that only necessitates information that is deducible from seismic horizon slices or satellite images (Fig. 1.7, B). These observations include the geometry of the last channel path and, when available, the meander

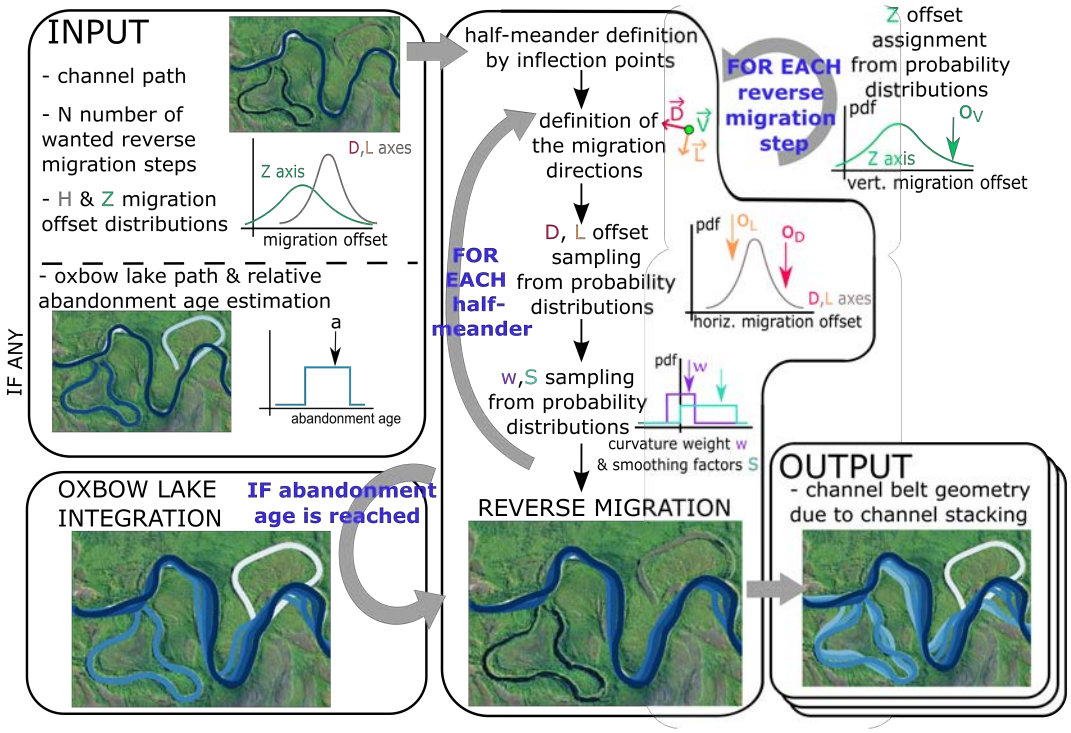


Figure 1.7 The reverse migration method accepts data that are available from seismic images such as picking of the main channel path and of its oxbow lakes, estimated minimum and maximum abandonment ages of these abandoned meanders, probabilistic distribution of migration offsets and a number N of migration steps. The outputs correspond to different stochastic three-dimensional architectures of the reservoir. The algorithm is detailed in B [Google Earth $63°34'39.69"N\ 123°35'02.08"E$]

loops abandoned during channel evolution and the age of their abandonment. For practicality, age is considered as discrete time steps and a maximal number of reverse migration steps is used as an ending condition for the algorithm.

1.3.1 Stochastic Reverse Migration

Curvature-Dependence Modeling. The reverse migration starts from an initial channel path. This trajectory corresponds to the most recent channel position and to the first step of the reverse migration. Inflection points of the channel path permit to identify meanders and half-meanders (Fig. 1.8). Probability distributions of horizontal and vertical migration offsets are needed to reproduce the variability of migration patterns. In the following examples, Gaussian distributions have been chosen.

Along the channel path, for each half-meander, the downstream and lateral horizontal reverse migration directions (**D** and **L**, respectively) are defined for the current step (Fig. 1.8). **D** is parallel to the line connecting consecutive inflection points and

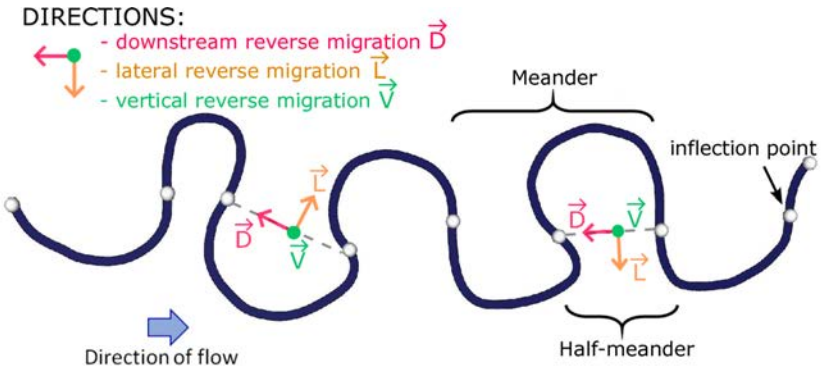


Figure 1.8 Definition of the three migration directions at each step thanks to the inflection points of the channel on synthetic data

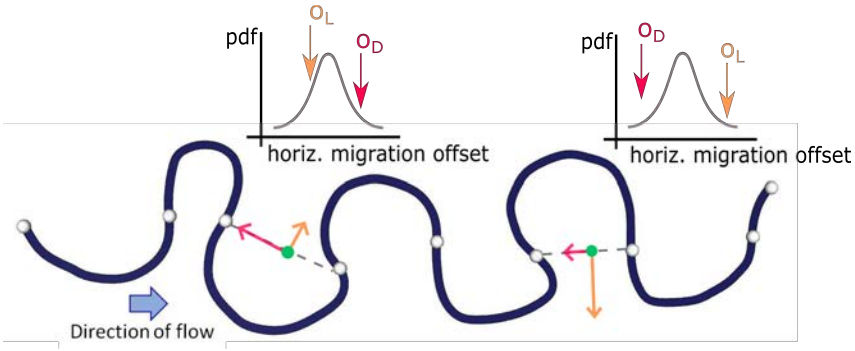


Figure 1.9 Sampling of the horizontal and vertical offset migration values in the corresponding probability distributions for each half-meander on synthetic data

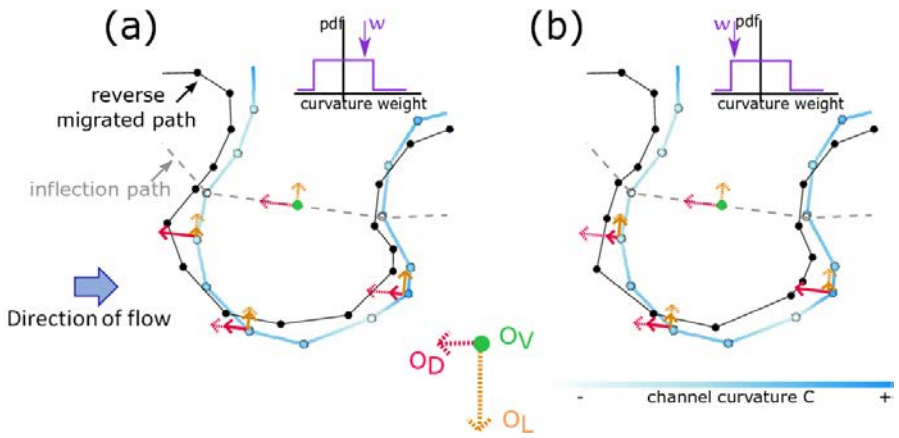


Figure 1.10 Influence of the channel curvature on the offset of migration with a sampled value of smoothing equal to o_D in the downstream direction and o_L in the lateral direction on synthetic data. **a** Positive curvature weighting of the horizontal migration, the downstream offset is maximal for lowest curvatures. **b** Negative curvature weighting of the horizontal migration, the lateral offset is maximal for lowest curvatures

L is perpendicular and oriented toward the center of the meander loop. For each half-meander, a value of maximal horizontal reverse migration offset o_D is sampled from the probability distribution of horizontal offsets (Fig. 1.9). This value is assigned to the downstream reverse migration **D** and corresponds to the maximal downstream offset of migration in this half-meander for this step. Similarly, another sampling from the horizontal offsets of migration allows to assign the maximal value o_L to the lateral reverse migration L and represents the maximal offset of lateral migration. Values of lateral s_L and downstream s_D curvature smoothing parameters are also sampled from their corresponding distributions and define the minimal offset values. Then, a value of curvature weight w is drawn from the corresponding distribution and applied to the half-meander (Fig. 1.10). Curvature is computed on each point of the half-meander and local maxima are deduced for each half-meander.

Then, the offset values are computed for each point of the half-meander following the equations deduced from the Mississippi study (Eqs (1.1) and (1.2)). The translated points of the half-meander correspond to all points between both inflection points and to the inflection point located the most upstream of the channel path. This ensures the continuity of the reverse migrated channel path at inflection points. At an inflection point p_i, the local curvature $c(p_i)$ is null: depending on the sampled value w, O_L and O_D can be equal to their maximal or minimal value. However, the strict decomposition of the channel path into half-meanders imposes only one translation to each inflection point.

The translated points correspond to the discretization of the channel path centerline. This centerline is wrapped by Non-Uniform Rational B-Splines (Ruiu et al.

[2016] and C) to generate an interpolated volume reproducing the channel shape. Once wrapped, the top surface of the channel is defined by a control mesh made by two external and one central control lines. Furthermore, the offset translation is applied on the control nodes of the NURBS and not on the interpolated shape. This, combined by the strict discretization of the channel path into half-meanders ensures the continuity of the reverse-migrated paths.

As the Mississippi database presents essentially maps, except some cross sections which are too sparse to permit an exhaustive study, the reverse vertical migration has not been studied. Several authors relate the vertical aggradation O_V to be mainly influenced by external factors such as the confinement degree, the sedimentary charge, the accommodation space and, to a lesser point, by morphological parameters such as the sinuosity of the channel [Labourdette and Bez, 2010, Peakall et al., 2000, Wynn et al., 2007]. Thus, O_V could be constrained by layer thickness trend or distality if available. When such information is not available, for each step of the sequential reverse migration, the vertical offset value o_V can be sampled at each time step globally for all half-meanders along the channel path from some input probability distribution (Fig. 1.7) as

$$O_V(\mathbf{p_i}) = o_V \tag{1.3}$$

and is assigned to all points of the channel path.

Model Discussion. This approach allows to reproduce a wide range of meander migration patterns (Fig. 1.11). Indeed, the decoupling of the channel horizontal migration in downstream and lateral directions permits to reproduce pure lateral migration (Fig. 1.11a), pure downstream migration (Fig. 1.11b) or an intermediate between both (Fig. 1.11c). A natural backward migration of meanders can also be simulated when the offset probability distribution includes negative values (Fig. 1.11d).

The sampling of the horizontal offsets is done at each time step and for each half-meander, in order to reproduce the observed variability of migration offset between two half-meanders for the same age (Fig. 1.11a). It would be possible to correlate spatially the offsets of migration of the same period if a specific migration rate is known. It would also be possible to correlate the offsets for a specific half-meander if an erosional rate is observed in this specific area.

All these configurations have been observed on the Mississippi maps. In these examples, the reverse migrated channel is located upstream compared to the initial channel when the offset of downstream migration is positive. As the channel reversely migrates, the channel becomes straighter and less sinuous. Indeed, the reverse migration tends to smooth the channel trajectory toward the straight line defined by the inflection points. This diminution of sinuosity is consistent with older channels which are less mature [Brice, 1974].

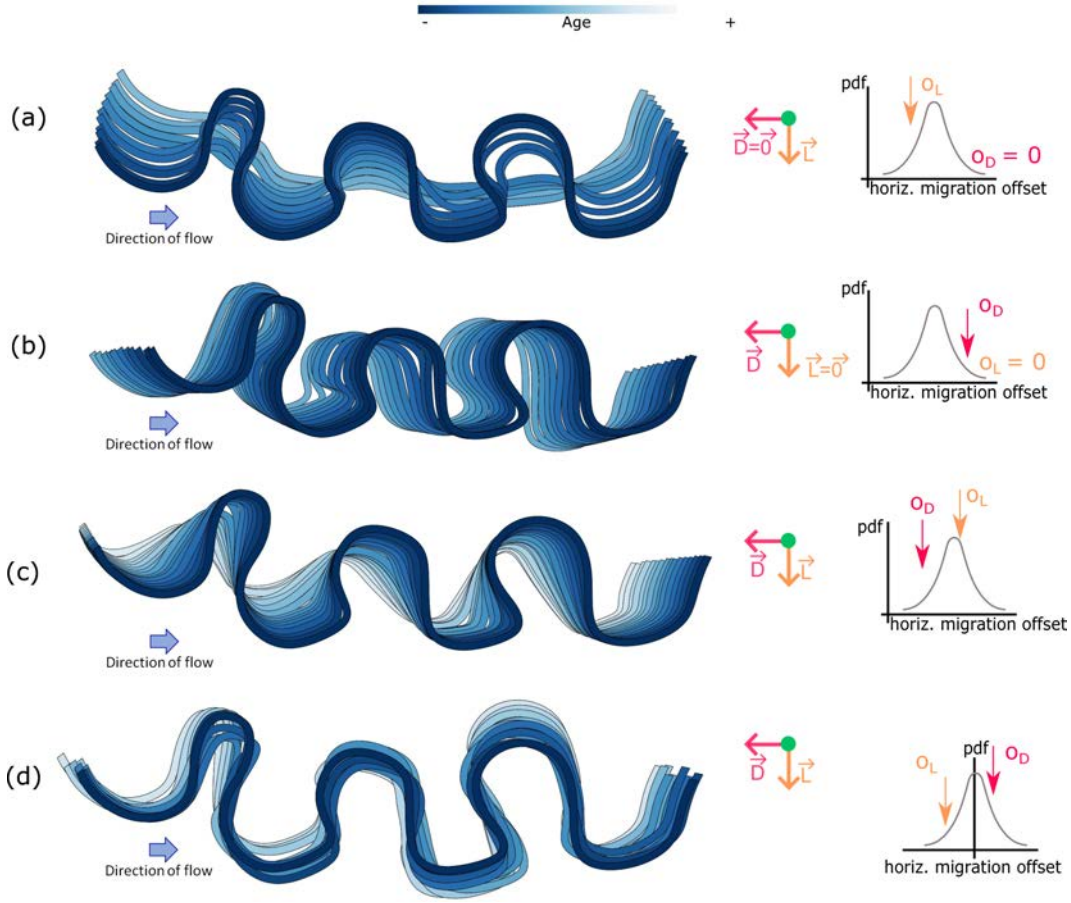


Figure 1.11 Variability of the migration patterns applied to synthetic data **a** Pure lateral reverse migration in 10 time steps. **b** Pure reverse downstream migration in 10 time steps. **c** Reverse migration of a channel in 15 time steps. The reconstructed path migrates upstream and becomes less sinuous with the increasing number of steps. **d** Natural reverse migration in 10 time steps with probability distribution accepting negative offsets of lateral and downstream migrations

Between each reverse migration step, the list of inflection points, and so the list of half-meanders, is updated. This permits a complete migration of the system, including inflection points, and a consideration of meander births or extinctions. Working at half-meander scale allows, whatever the sinuosity of the channel, to avoid most of the potential self-intersections all along the reverse process. Indeed, reverse migrating each half-meander independently permits to evolve toward the line connecting two successive inflection points. In this direction, the probability of crossing another meander loop is almost null.

Most of the migration modeling methods [Rongier et al., 2017a, Ruiu et al., 2015, Viseur, 2004] determine the direction of migration along the normal vectors of each point and its offset in a global way. However, the Mississippi river, as many natural channelized systems, presents meanders of various geometries [Brice, 1974]. Working between each pair of inflection points allows to reproduce this diversity in terms of channel geometry.

1.3.2 Conditioning to Paleo-path Indicators

Oxbow Lakes Abandonment Age and Geometry Interpretations. In addition to the last channel path, other channel belt structures can be observed on satellite or seismic images. These objects can be used to constrain the modeling. This corresponds, for example, to oxbow lakes filled by fine particles following their abandonment. For each oxbow lake observed in a meander belt, the absolute abandonment age is difficult to evaluate. Therefore, we use a probability distribution function for relative abandonment ages.

The distance to the middle of the meander belt and the potential erosion by younger oxbow lakes permit to estimate minimal and maximal values of relative abandonment ages. The assigned abandonment age a is sampled from a probability distribution defined between these two extreme values (Fig. 1.12).

As the natural migration of the channel can erode oxbow lake deposits, the complete geometry of the oxbow lake at the moment of its abandonment may not be preserved in the sedimentary record. An interpretation has then to be performed to extrapolate a probable shape before its integration in the reverse migration algorithm (Fig. 1.13).

Integration into the Main Channel Path. Each oxbow lake is defined by its centerline (Fig. 1.14) and wrapped by NURBS (C) in the same way as the main channel path. When the iterative time step of the algorithm reaches the value of the assigned abandonment age $a - 1$ of an oxbow lake, this oxbow lake is candidate for integration into the main channel path for the next step (Fig. 1.7). In order to prepare the integration, the algorithm detects the channel closest sections to the oxbow lake extremities (Fig. 1.14b). Then, the distances between each of the detected channel sections and the oxbow lake extremities are computed in order to check if they

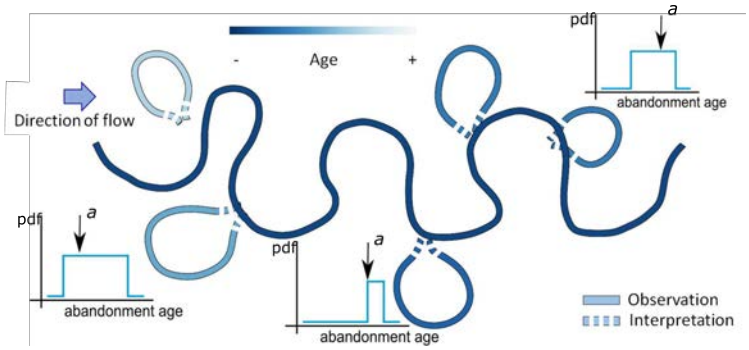


Figure 1.12 Abandonment ages a are sampled for each oxbow lake composing the synthetic data inside a discrete probability distribution $U(A_{min}, A_{max})$ with minimal A_{min} and maximal A_{max} deduced from geometric rules. Dashed parts of the oxbow lake traces correspond to interpreted extremities which have been eroded by system migration after abandonment of this oxbow lake

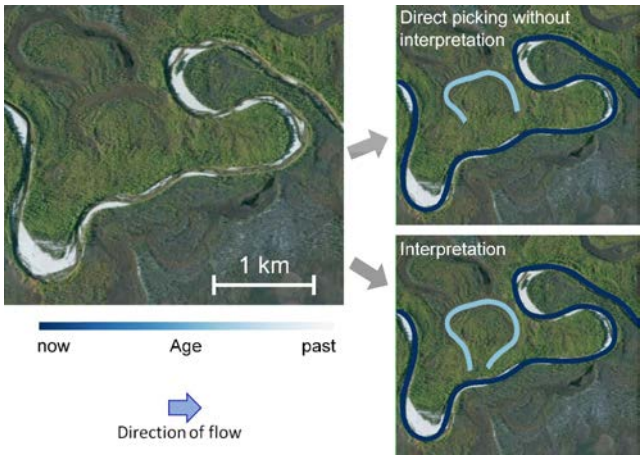


Figure 1.13 Interpretation of eroded parts in the trace given in input in order to help a good reconstitution of the paleo-paths [Google Earth $63°12'25.33"N\ 122°59'53.73"E$]

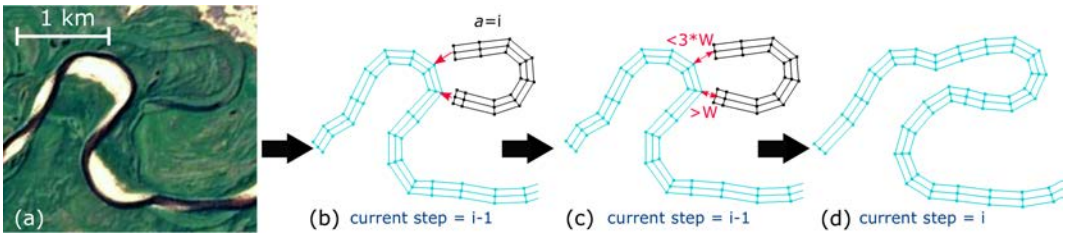


Figure 1.14 Reverse modeling of meander cut-off through visualization of the structure of the channel (illustration with the Linde river (Russia)): **a** Satellite image of a river and its oxbow lake. **b** Digitization of the oxbow lake (in black) and of the main channel (in blue) paths. **c** Detection of the channel closest sections and check of the distances. **d** At abandonment age a,the extremities of the considered oxbow lake are projected on the main channel path which is cut between the two projections. The original main channel path is then reconstituted by integration of the oxbow lake path [Google Earth $65°16'46.27"N\ 122°26'34.65"E$]

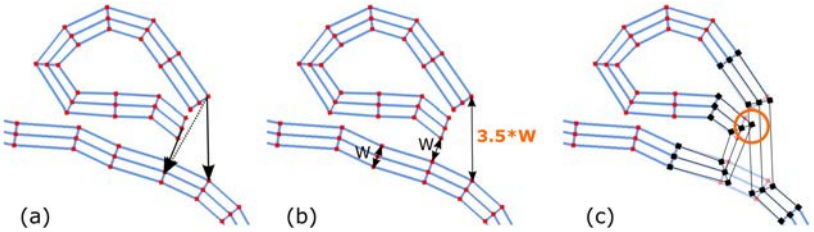


Figure 1.15 Example on synthetic data of oxbow lake with perpendicular orientation with the main channel path. Visualization of the control polygons (in blue) of the channel and oxbow lake paths, and of the control points (in red). **a** The research of the closest sections of oxbow lake extremities found the same one, a correction needs to be performed. **b** The distance check fails: maximal accepted distance is equal to three channel widths. **c** Example of integration: if it were authorized, the channel would pinch itself

are in the authorized range of distances. Such verification is needed to allow the integration of the complete observed oxbow lake geometry. As a rule of thumb, the distance must range between one and three channel widths (Fig. 1.14c). If the distance control is successful, the two oxbow lake extremities are connected to the detected sections of the main channel path during the next step corresponding to the age a of the oxbow lake abandonment (Fig. 1.14d). This oxbow lake integration is achieved by connecting the control polygons of both objects. If the distance condition is not respected, the oxbow lake is not integrated. Indeed, for an easy and smooth integration of the oxbow lake, its orientation should fit the channel closest sections orientation. The segment that links its two extremities should be approximately parallel to the main channel path (Fig. 1.14) whereas the integration will not be possible if these segments are perpendicular (Fig. 1.15). This direct connection between the extremities of the oxbow lake and the channel justifies the importance of the interpretation of the abandoned meander loop. Naturally, a channel always

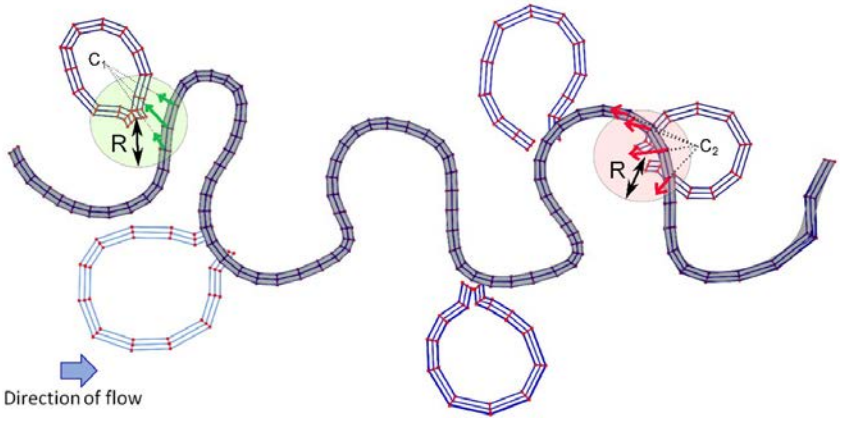


Figure 1.16 Attraction and repulsion of oxbow lakes during reverse migration process on synthetic data. Visualization of the control polygons (in blue) of the channel and oxbow lake paths, and of the control points (in red). At abandonment time step, if the oxbow lake is too far from the main channel path (left) the main channel path is attracted towards the center C_1 of the oxbow lake. If the oxbow lake is too close (right) the main channel path is repulsed from the center C_2 of the oxbow lake

chooses, indeed, the path of lower energy [Langbein and Leopold, 1966]. In the case of a neck cut-off, it corresponds to the cutting of the meander loop when its bends are very close. Thus the interpreted oxbow lake should present a neck made by two extremities that are quite close to each other and are also close to the main channel path at the abandonment age. The following migration of the system may erode the neck due to its proximity to the new channel path. Unsuccessful distance checking for both extremities happens when oxbow lakes are located very far from the main channel or, conversely, in the middle of the channel belt. In the first case, the reverse migration process needs to be attracted by these conditioning data (Fig. 1.16) which can be located at one border of the channel belt. In the second case, the reverse migration process needs to be repulsed from the area of the considered oxbow lake: until the integration of this abandoned meander, this area must be indeed avoided by the migration process. Otherwise, reverse migration steps could erode an observed abandoned meander before its integration. Such a realization would suppose that the oxbow lake has been successively abandoned and eroded. In this case, this abandoned meander would not be observable on the image, which is not the case. Thus, attraction or repulsion vectors are defined equal to the current horizontal migration offset and oriented toward the targeted oxbow lake or in the opposite direction of the oxbow lake to avoid (Fig. 1.16). These repulsion or attraction vectors are applied on restricted areas of the channel path. These zones are defined by a circle centered around the neck of the considered oxbow lake and with a radius R equal to half the mean wavelength of the channel path. The mean wavelength of the channel is defined by the mean distance between two successive inflection points. The offset

of attraction or repulsion is weighted by the inverse distance to the center of the oxbow lake (Fig. 1.16). This prevents brutal distortion of the channel path between sections inside and outside the restriction area.

Finally, if a complex configuration has prevented the integration of an oxbow lake at the wanted step (Fig. 1.15), the integration is delayed to the next step while conserving the relative age order between oxbow lakes. This postponement to posterior steps calls for adapting the ending condition of the algorithm. In our implementation, the number of reverse migration steps can be increased up to three times the target number of steps in order to improve conditioning rate. This value has been arbitrarily defined after testing various percentages. The best would be to let the algorithm run until all oxbow lakes would be integrated (i.e., without constraint on the maximal number of time steps). However, it is impossible up to now, because all configurations are not handled, and because oxbow lake relative ages may also need to be reconsidered during reverse migration (e.g. Fig. 1.15). Without such improvements, there is a risk for the algorithm to fall into an infinite loop.

The integrated abandoned meander loops extend the channel reverse migration to the complete meander belt and permit to reproduce the natural reworking of the channel belt (Fig. 1.17). Conditioning to fairway data is not considered here but could be easily handled. Indeed, fairway datum can be considered in the algorithm as indicator of past meander location in the same way as an oxbow lake. Information about the paleo-orientation of the migration can be observed on fairway data through the stacking patterns of point bars and used to orient the meander loop.

1.4 Application to a Satellite Image

We tested the reverse migration method on a 15 * 4 km satellite image of the Tangnara river located in Russia (Fig. 1.18a) [Google Earth $36°12'34.31"N\ 123°00'01.02"E$]. This river presents 24 oxbow lakes that we digitized and classified by relative abandonment ages (Fig. 1.20). The probability distributions of abandonment ages were attributed by considering the distance to the channel and relative locations of the other oxbow lakes. A target of 10 reverse migration steps was defined and Gaussian distributions were attributed to horizontal and vertical migration offsets, respectively N(500,100) and N(100,10) in meters. We generated one hundred realizations, of which two are presented in Fig. 1.18b and Fig. 1.18c. All realizations have the same parameters. Their differences come from the sampling of migration offsets, curvature weights and abandonment ages. A map of the average occurrences informing about the oxbow lake occurrences of integration and of reverse migration step locations over the hundred realizations is shown in Fig. 1.18d. It can be noticed that, even with the increased number of reverse migration steps of 300 percents (i.e. maximal 30 reverse migration steps), due to the delayed integration of oxbow

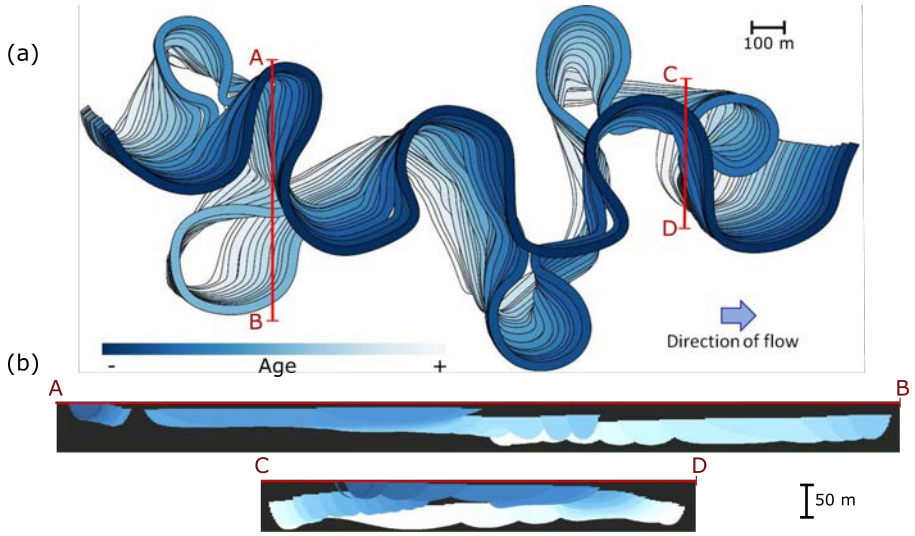


Figure 1.17 Reverse migration on synthetic data containing five oxbow lakes. The initial number of reverse migration time steps is set equal to 10. Horizontal offsets follow a normal distribution N(20, 5). **a** Map view. **b** Section views

lakes after ten steps, some oxbow lakes were not integrated. From one realization to another, the number of successful integrations of oxbow lakes varies between 3 and 15 (Fig. 1.19a). The same oxbow lakes, for example the 1, 4, 8, 12, 13, 16, 17 and 23 are often let aside. As these are the most ancient oxbow lakes, their successful integration depend on the integration of the youngest abandoned meanders (Figure 1.20).

The method needs some further developments to accept a wider diversity of oxbow lakes. The improvements concern precise geometrical configurations that are arduous: e.g., when the segment of the oxbow extremities is perpendicular to the main channel path. Another explanation for the non-integration of some oxbow lakes is a mistaken abandonment age estimation. As a perspective, working with scenarios of abandonment ages relying on observed obvious relative abandonment ages could help identifying relative oxbow lakes chronologies that permit reconstruction of more probable paleo-systems. This calls for a better management of relative ages. Relativity between abandonment ages is easy to guess for two juxtaposed oxbow lakes but quite arduous for oxbow lakes far away one from another. Study of the natural clustering of oxbow lakes could help defining relative abandonment ages.

Finally, some oxbow lakes could have been completely eroded by the migration of the system. Indeed, the oxbow lakes that are observable at a given moment do not necessarily retrace the exhaustive history of the channel belt. The simulation of eroded oxbow lakes could help to fit the observed ones and to reproduce the complete channel belt evolution.

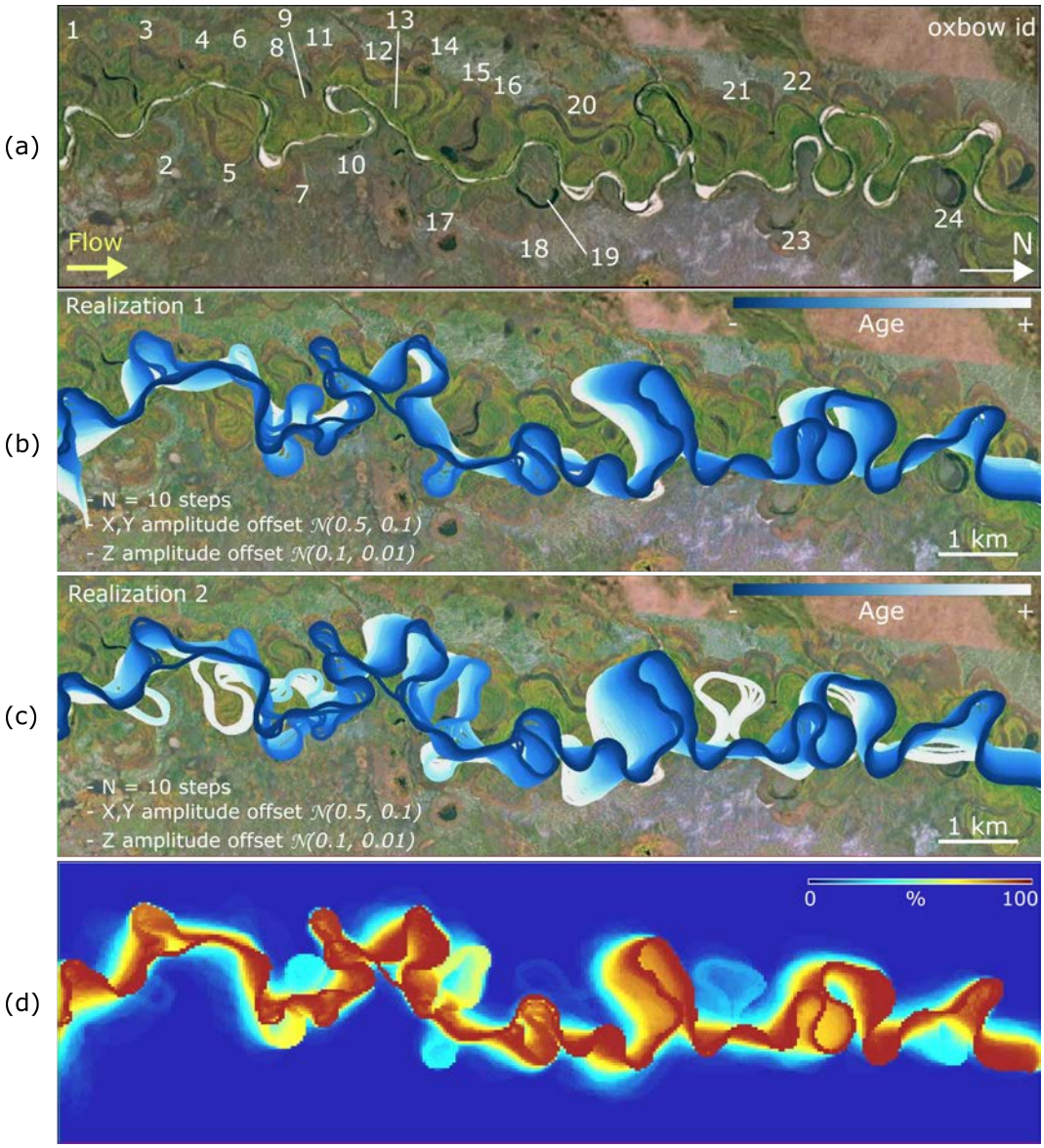


Figure 1.18 **a** Satellite image of the Tangnara river (Russia). 24 oxbow lakes can be observed and have been identified by a specific id number. **b**,**c** Realizations of the stochastic reverse migration with conditioning to respectively 9 and 13 oxbow lakes in 30 time steps (the maximal threshold of steps for this application). **d** Map of the average occurrences of 100 realizations [Google Earth $63°09'04.57"N\ 122°59'29.12"E$]

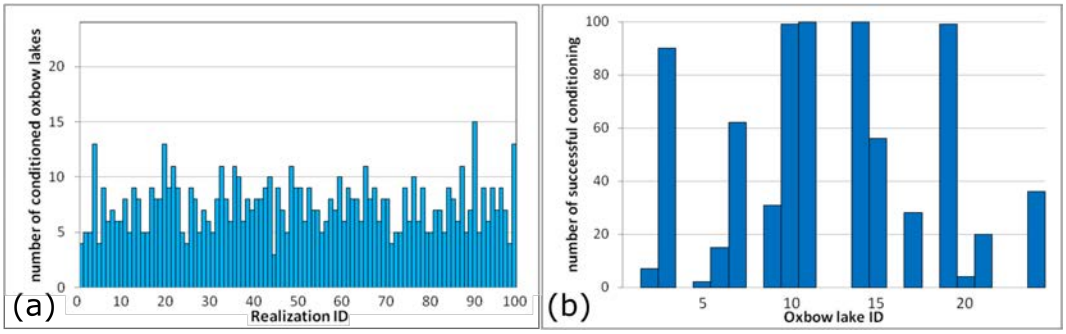


Figure 1.19 **a** Number of conditioned oxbow lakes for each realization among the 24 observed paleo-geometries. **b** Number of successful integration for each oxbow lake and for 100 realizations.

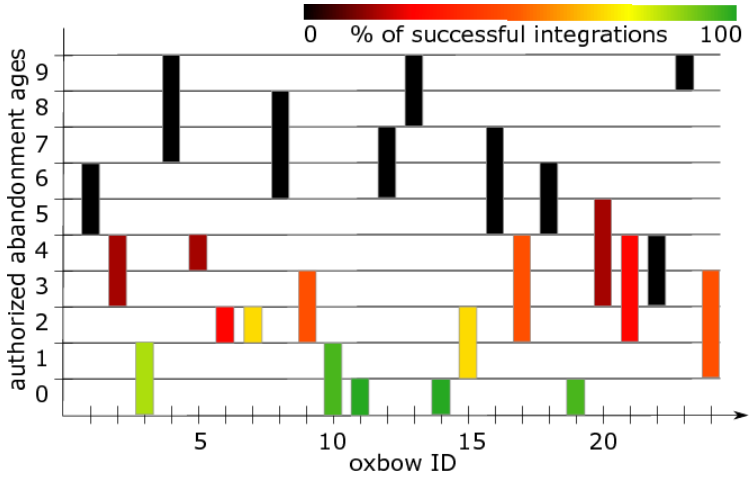


Figure 1.20 Probable ages of oxbow lakes versus rate of successful integrations over 100 realizations

1.5 Conclusion

Most present-day observations of channel belt systems are suitable to retro-simulate channel evolution and reconstruct possible sedimentary structures and heterogeneities. The types of available datum for channel belt modeling motivate to go back in time to reconstitute the whole system from the last channel position. The lack of information about the paleo-hydrodynamics of the river and of the bank erodibility led us to develop a geometrical-based method of stochastic reverse migration which aims at reproducing the natural geological processes. Moreover, the complexity and the irreversibility of the natural processes calls for a simplification and a randomization of the model. A statistical study on the Mississippi river suggests an anti-correlation trend of reverse downstream and lateral migration offsets at the half-meander scale. This anti-correlation could maybe be attributed to the energetic compensation between both migration directions of the channel at the half-meander scale. Comparison with correlations observed in other studies about the ratio of curvature radius and channel width could be realized on the last mapped channel path. At this stage, the channel width can be precisely observed. Perfect conditioning to the mapped width could be done using the shape fitting of NURBS objects proposed by Ruiu et al. [2015].

The simulation of the migration in the three directions of the space permits to reproduce many observed patterns of the internal sedimentary architecture in the subsurface. It includes a conditioning to the observable remnants of the system such as oxbow lakes. The stochasticity of the method could help assessing the impact of the heterogeneities and the associated uncertainties on the subsurface flow but calls for appropriate spatial discretization [Botella, 2016, Labourdette et al., 2006, Massart et al., 2016]. As discussed by Pyrcz et al. [2015], the reverse migration may change statistics on the simulated geometric features of the channel (e.g. wavelength). As channels can naturally show complex variations in time and space, this can be seen as a strength, even though it raises questions about how to validate the simulation results.

Oxbow lakes with specific orientations are still difficult to integrate and lead to postponing the integration of the older ones. Analysis of their natural clustering could help to assign more accurate abandonment ages and simulation of the eroded ones could facilitate the integration of each oxbow. The development of such a semi-automated tool is one of the short-term perspectives of this work. Another constraint of rotation of the main channel path could be added to overcome this limit and avoid orientation misfit. Finally, the difficulty of the integration of some oxbow lakes can also be due to unexpected behaviors of the natural river which are hard to anticipate in our geometric approach. Oxbow lakes postponed too many times could also result from a wrong age estimation. Their exclusion could be considered. It could also be further used for invalidating some realizations. An a posteriori study of the migration offsets could be done for that purpose.

One of the main perspectives of this work is to test the method on subsurface data of fluvial or turbidite environments. Conditioning to other data than oxbow lakes could also be considered, such as point bars or borehole data. Point bars data can be assimilated to paleo-channel geometries in the same way as oxbow lakes. Well data would indicate sand or shale facies which could be conditioned through the simulation of oxbow lakes geometries inside the channel belt.

Acknowledgments

This work was performed in the frame of the RING project at Université de Lorraine (http://ring.georessources.univ-lorraine.fr/). We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA. The software corresponding to this paper is available in the GoNURBS plugin of SKUA-Gocad. We also acknowledge Paradigm for the SKUA-Gocad Software and API. The authors thank Michael Pyrcz and an anonymous reviewer for their constructive remarks that helped us to improve this paper.

Appendices

A Forward Migration Analysis of the Mississippi River

Migration rates have also been studied on the Mississippi river between pairs of paleo-trajectories in the forward direction of the paleo-flow. The lateral and downstream offsets have been computed in the same way as in the reverse direction but with inversed vectors. The results are close to the ones deduced from the reverse direction: no clear global correlation can be observed between curvature and forward migration. Correlation trends can be observed at the half-meander scale. These smooth correlations vary depending on the considered half-meander.

B Algorithm of the Reverse Migration Method

The proposed algorithm for channelized system reconstruction requires as input data the number of wanted realizations, the number of targeted reverse steps, the horizontal and vertical distributions of migration offsets, the final channel path centerline, the list of identified oxbow lake centerlines with their corresponding estimated minimal and maximal values of abandonment period. It iterates on the wanted number of stochastic realizations, on the wanted number of the reverse migration time steps and on the number of half-meanders found, to reverse migrate the main channel path while conditioning to paleo-geometries observed. The algorithm 3 is illustrated in Fig. 1.7.

C Flexibility in Interactive Channel Modeling brought by Non-Uniform Rational B-Splines

NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) are parametric surfaces defined by a network of control points and an interpolation function [Piegl and Tiller, 1997]. The interpolation function is a continuous polynomial function whose degree is directly related to the number of interpolated points [Bézier, 1983]. NURBS objects present a curvilinear framework which permits to choose the grid resolution without shape deformation. These surfaces have been combined to define volumetric objects independent from the support by Ruiu et al. [2016]. Thus, channel, levees, point bars and lobes can be modeled with NURBS (Fig. .23) allowing to reproduce channelized systems in both fluvial or turbidite contexts.

In many steps of the workflow, the number of control points varies in an inhomogeneous way. It is the case at each connection of two objects (e.g., the integration of an oxbow lake) or at each local deformation of the NURBS object (e.g., the reverse migration process). This decreases the handling of the NURBS object and the computational efficiency (Fig. .24a). Therefore, the algorithm of Tiller [1992] has been implemented to determine the smallest control polygon while minimizing the deformation imposed to the NURBS (Fig. .24b).

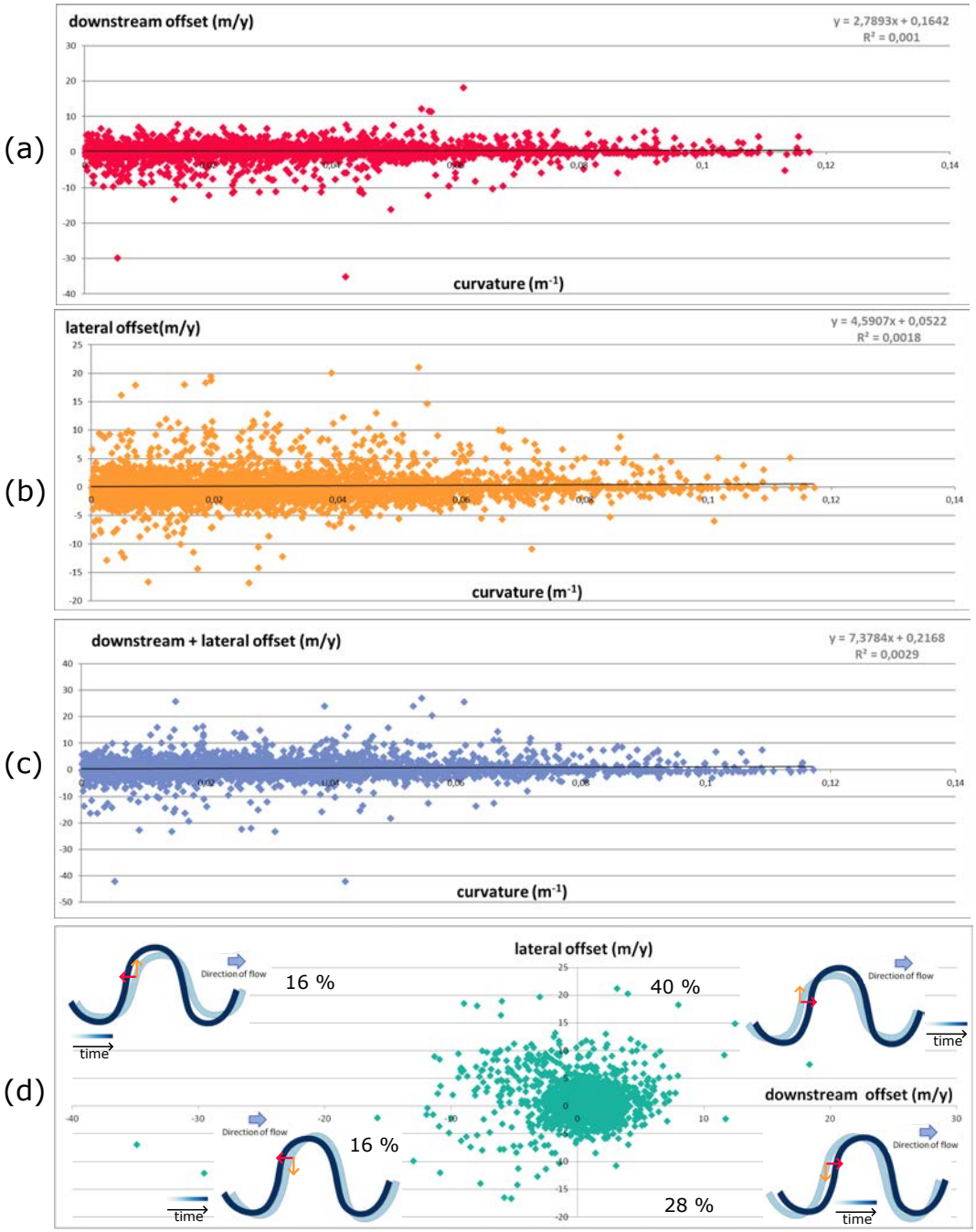


Figure .21 Horizontal offset values versus curvature on four successive paths considered in the forward direction.**a** curvature versus downstream migration offsets, **b** curvature versus lateral migration offsets, **c** curvature versus sum of the downstream and lateral migration offsets, **d** downstream versus lateral migration offsets

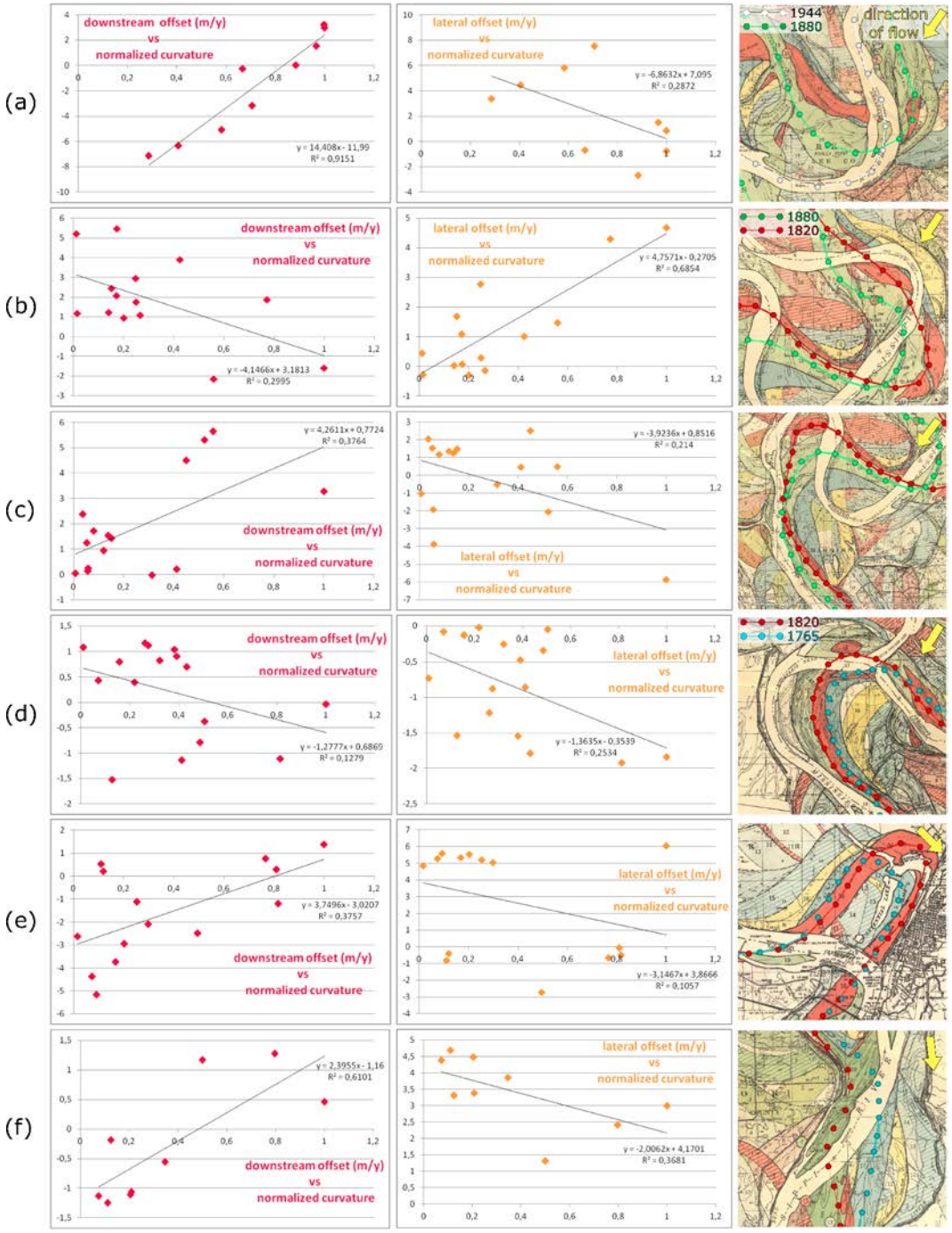


Figure .22 Plots of values of offset versus normalized curvature for five meanders of the four last Mississippi trajectories considered in the forward direction. They summarize the main trends observed for normalized curvature and downstream migration in red, and normalized curvature and lateral migration in orange. If some trends can be locally observed, the very low values of some correlation coefficients demonstrate the absence of general rules and the high variability of migration patterns

Algorithm 1 Reverse migration simulation workflow

Input: N_r number of realizations wanted, N_s target number of reverse steps, H the horizontal distribution of migration offset, Z the vertical distribution of aggradation offset, the channel path digitization, the list of identified oxbow lake digitizations O_i with corresponding minimal A_{min} and maximal A_{max} values of abandonment period.

Output: N_r different possible geometries of the subsurface

```
for each O_i identified oxbow lake do
    draw the abandonment period a_i between its minimal A_{i_min} and maximal A_{i_max} value
end for
for r_j the current realization id < N_r do
    for s_k the current reverse migration time step < N_s do
        sample the offset of vertical migration inside the probability distribution Z
        detect the inflection points of the current channel path
        define the number N_hm of half-meanders of the current channel path
        for each hm_l of the N_hm half-meanders do
            define the migration directions inside hm_k
            sample the offsets of migration inside the probability distributions H (for the lateral and the downstream offsets)
            sample the smoothing values s_L and s_D
            sample the weighting w
            for each point p_m do
                compute the curvature on the current channel path
                smooth the offset depending on smoothing of the half-meander and of the curvature at the point p_m and of the sampled value w
                translate the point p_m accordingly
            end for
        end for
        if s_k the current reverse migration step == a_i the abandonment period of an oxbow lake then
            integrate the corresponding oxbow lake into the current channel path
            if integration of the oxbow lake O_i unsuccessful then
                integration of the oxbow lake O_i postponed to the following time step
                for each O_i that remain to be integrated do
                    a_i = a_i + 1
                end for
            end if
        end if
    end for
end for
return N_r potential geometries of channelized systems
```

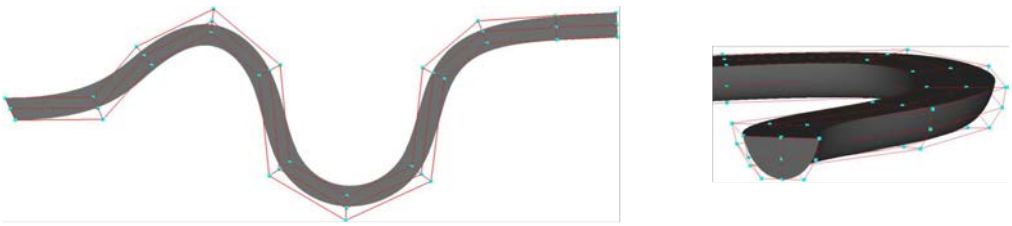


Figure .23 Modeling of a channel using 5 NURBS surfaces. Red lines compose the control polygon and the blue points are the control points. **a** Map view **b** Cross view

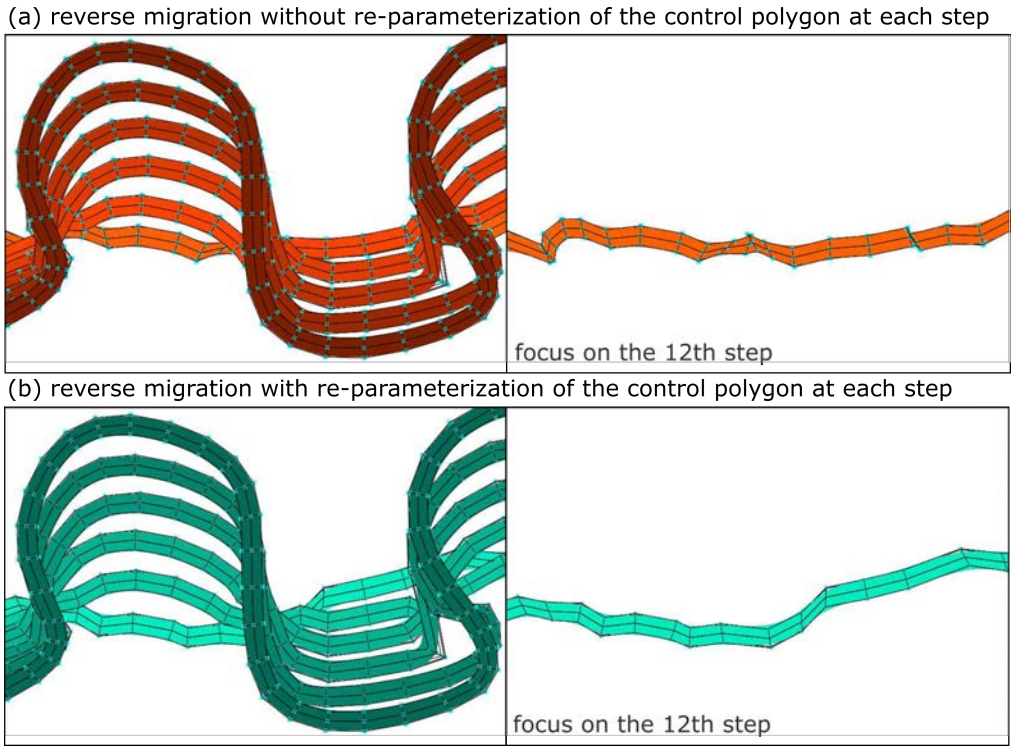


Figure .24 Re-parameterization during reverse migration process permits to avoid the collapse of sections affecting the channel geometry

Modélisation de l'aggradation

Dans l'article précédent, la migration a été décrite et modélisée en deux dimensions. Cependant, la troisième dimension est difficilement analysable sur les données disponibles telles que les cartes historiques du Mississippi qui présentent peu de sections car difficiles d'accès sur le terrain.

Néanmoins quelques études ont porté sur la théorie de l'aggradation dans les systèmes chenalisés [e.g., Labourdette, 2007, Jobe et al., 2016]. Elle est naturellement plus prononcée dans les systèmes turbiditiques. Elle est reliée à de nombreux facteurs environnementaux (p. ex. la charge sédimentaire, le niveau eustatique, la distalité à la source, le degré de confinement ou la paléo-pente).

Comme pour la modélisation rétro-chronologique, le but est de limiter les données aux seules accessibles en imagerie sismique. Ce sont donc les paramètres géométriques tels que la distalité à la source et le degré de confinement qui ont été retenus (Figure 1.25).

Ainsi, la valeur d'aggradation O_V est calculée localement en fonction des deux valeurs de confinement minimale C_{min} et maximale C_{max}, respectivement associées aux points le plus en amont p_0 et le plus en aval p_n. Cette valeur est moyennée avec la valeur tirée aléatoirement o_V correspondant à la valeur d'aggradation associée au point central du chenal.

$$O_V(\mathbf{p_i}) = o_V \times (C_i) \times (\left(\frac{C_{max}}{C_{min}}\right) \tag{1.4}$$

La modélisation est conditionnable à des valeurs précises de paléo-taux de migration verticale s'ils sont connus pour un laps de temps donné.

[p] **M. Parquer**, Q. Corlay*, P. Marchive* (2017) *Improvements in reconstruction of channelized system stacking patterns.*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

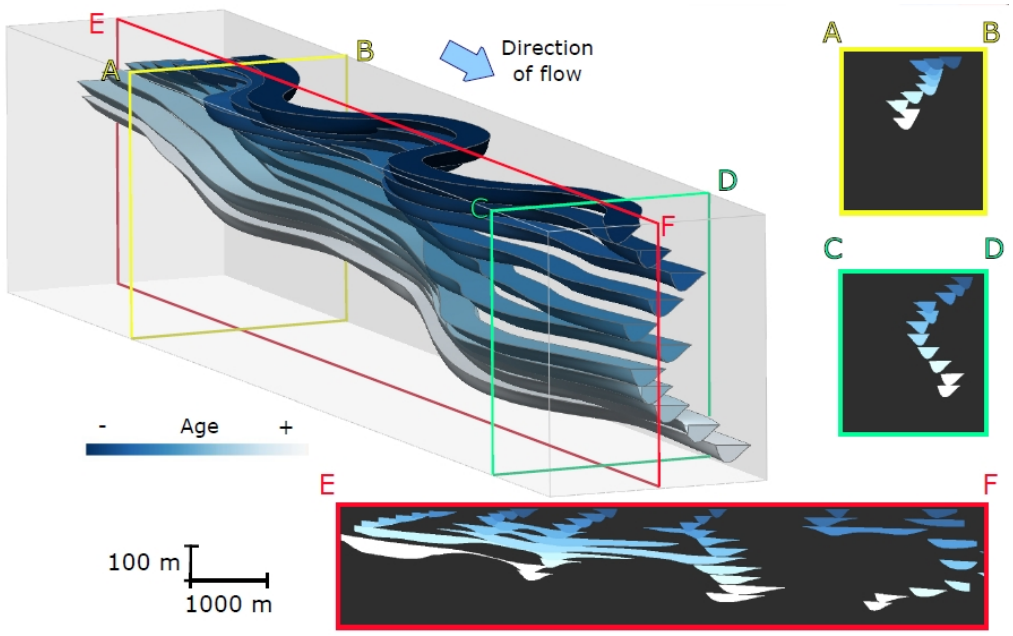


FIGURE 1.25 Modélisation de l'aggradation des systèmes en fonction de la distalité et du degré de confinement.

Chapitre 2

Simulation stochastique de la chronologie d'abandon de méandres

Le remaniement de la ceinture de méandres rend souvent difficile l'interprétation des âges d'abandon des bras morts. La compréhension de l'architecture interne d'un système chenalisé, d'autant plus par reconstruction en migration rétro-chronologique, dépend fortement de la connaissance de ces âges, qui seule contraint l'intégration des méandres abandonnés au moment approprié.

Afin de permettre une utilisation générique de la reconstruction sans recourir à des méthodes de précision (p. ex. analyse de l'orientation des barres d'accrétion latérale, datation isotopique des bras morts) qui ne sont pas toujours envisageables, ce chapitre propose une méthode de simulation stochastique de la chronologie de méandres abandonnés. Pour cela, une simple analyse géométrique de la ceinture de méandres et des relations des méandres abandonnés les uns par rapport aux autres est précieuse. En effet, les relations d'érosion des structures les unes par rapport aux autres rendent localement évidentes les chronologies relatives. En revanche, deux structures sans relation de type érosif entre elles ne peuvent être ordonnées chronologiquement.

La méthode présentée dans ce Chapitre 2 est donc une méthode stochastique, semi-automatisée et basée sur des données issues de l'état courant du système chenalisé à modéliser mais également d'analogues sédimentaires. Elle procède à une étape de temps donnée et peut donc être intégrée à une méthode dynamique telle que celle présentée dans le Chapitre 1.

À l'étape de temps courante, l'analyse géométrique des méandres abandonnés les uns par rapport aux autres et par rapport au chenal principal, donne une ou plusieurs

chronologies relatives certaines, selon que les méandres abandonnés forment un ou plusieurs groupes de structures inter-érodées. Ainsi, un ou plusieurs méandres abandonnés sont candidats pour un abandon contemporain à l'état courant du chenal (et donc à l'intégration en migration rétro-chronologique). Ils correspondent aux méandres abandonnés qui ne sont pas érodés. Le tirage est pondéré par des considérations géométriques telles que la distance et l'orientation vis-à-vis du méandre le plus proche du chenal principal. Le nombre de méandres abandonnés est déterminé par une probabilité d'abandon, à une étape de temps donnée et pour une taille de système donnée, inspirée d'un analogue sédimentaire.

La méthode présentée est ensuite appliquée sur une image sismique de la formation de McMurray en Alberta (Canada).

Ce chapitre se présente sous la forme d'un article préparé pour soumission au journal *Geomorphology*.

A stochastic reconstitution method for determining the abandonment chronology of channelized paleo-evidences.

Marion PARQUER, Guillaume CAUMON, Pauline COLLON

Article écrit pour soumission au journal *Geomorphology*

Abstract In subsurface and geomorphological studies, the density and precision of the information given by imaging and prospection is variable. This is due to technical limits but also to natural phenomena such as erosion which erase anterior deposits. The understanding of the depositional history is thus hardly accessible. The last channel stage and the abandoned meander loops, when preserved, are generally brought out on seismic images. These evidences provide valuable clues for recovering the past evolution of a channelized system. However, their abandonment time is less accessible, except in relative terms through truncation patterns due to erosion processes. The chronology of abandonment of the observed structures is crucial for reproducing geobody connectivity.
We propose a new method to simulate abandoned meander chronologies given a stage of the channelized system informing about the last channel path and the abandoned loops in the meander belt. This semi-automatic tool takes into account local obvious relative chronologies, and generates a possible global chronology of channel meander abandonments through going back in time to update the system configuration. Local chronologies are semi-automatically defined through truncation identification between digitized paths of abandoned meanders inside a group. Then, a stochastic procedure orders the isolated abandoned meanders one from the other. The method is combined with the reverse migration method so that the global stochastic ordering is made at each time step of the migration method consistently with the updated channel belt. The sampling is guided by the distance and the orientation of the abandoned meanders toward the current channel path. The proposed method is able to use the distribution of the cutoff number per unit time and per unit length that can be observed in an analog database. The application of our tool on a seismic stratal slice of the McMurray Formation in Canada provides various possible global chronologies and shows the importance of the chronology on the subsurface reconstruction connectivity.

Introduction

In turbidite or fluvial contexts, understanding the channelized system evolution inside a channel belt is important for ancient system architecture evaluation, but also for modern system evolution prediction. Through their evolution, channelized processes leave visual remnants of their successive stages, among which point bars [e.g., Ghinassi et al., 2016, Holbrook, 2017] or abandoned meanders [e.g., Lonsdale and Hollister, 1979, Erskine et al., 1992].

When abandoned, the paleo-channel path (abandoned loop or avulsed channel) is most of the time filled by deposits of the remaining suspended sediment at the time of the abandonment and by the following successive floods occuring in the meander belt [Toonen et al., 2012]. The filling is mainly composed of muddy material, both in alluvial settings [Veeken, 2006] and turbidite settings [Issautier et al., 2014] hence

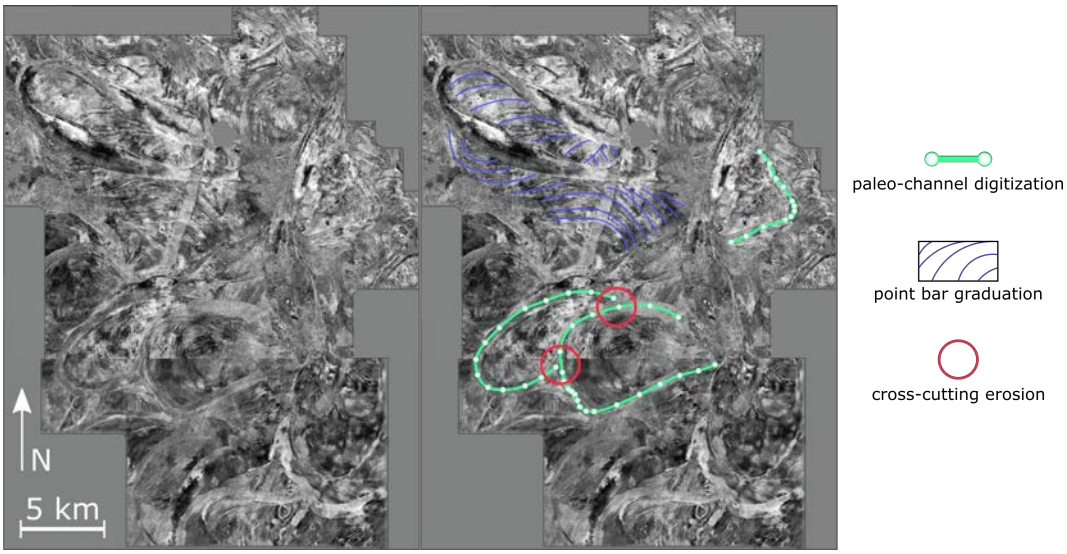


Figure 2.1 Age constraint detected from seismic image analysis. The analysis of gradual traces of point bars permits to analyse the gradual evolution of the channel. The abandoned meander digitizations themselves do not permit to define the abandonment chronology, except when they are truncated by another paleo-path. In this case, relative chronology is deducible. Seismic image after Durkin [2016], from ConocoPhillips Canada.

can be imaged by reflection seismic data [e.g., Miall, 2014, Posamentier and Kolla, 2003]. These phenomena leave valuable information about the previous trajectories of the main channel. However, whereas the location and the geometry of these landforms can be clear, the time of meander abandonment or avulsion triggering is often difficult to estimate from the sedimentary record. Indeed, the geometry of the abandoned loop and the distance and orientation to the current channel path do not inform about the absolute time of the abandonment. Chronologic uncertainty lies in the irreversible aspect of abandonment combined with the incompleteness of the sedimentary record due to erosion processes.

Many observations can be made on satellite, seismic, LIDAR, or GPR images (Figure 2.1). Paleo-channel trajectories can be observed, as well as erosive patterns between them. Such observations do not inform about the absolute abandonment age. They give the chronology of abandonment between overlapping structures. The point bar traces inform about the local migration rate and orientation. The isolated abandoned loop, i.e. without overlapping relation with other structures, only inform about the local geometry of the paleo-trajectory. Well data inform locally on the presence or absence of a paleo-channel facies, and occasionally about the presence of point bars and orientation of the paleo-migration.

However, at the meander belt scale, relative ages are not sufficient to construct a reliable chronology. An exhaustive and precise study of the point bar evolution

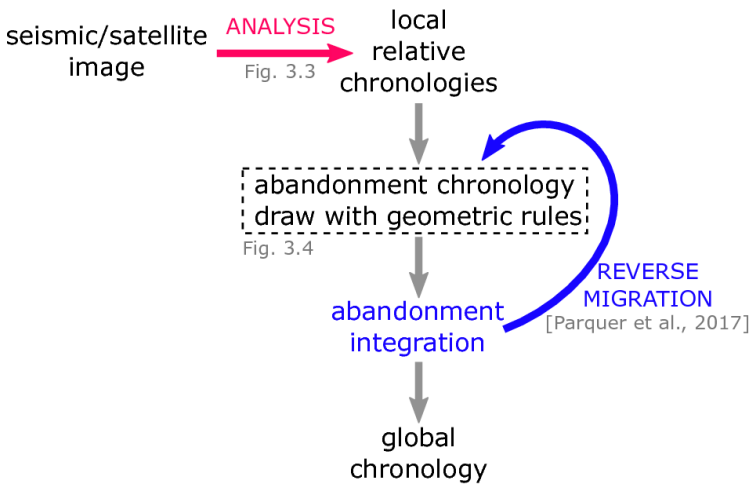


Figure 2.2 Global workflow of deduction of global chronology of abandoned meanders from geometric channel belt analysis

can be valuable such as the one by Durkin et al. [2017], created on cross-cutting, orientation and paleo-current analyses. In order to determine relative or absolute ages, these geometric considerations can be completed, for example, by field work [Fisk, 1944], borehole data analysis [Hubbard et al., 2011], radiocarbon analysis [Holbrook et al., 2006] or optically stimulated luminescence [Rowland et al., 2005] in order to estimate absolute or relative abandonment ages. However, such detailed characterizations have a significant cost in terms of data acquisition and analysis. Their application to a particular system is, therefore, not always feasible, especially in subsurface settings, where direct sampling is seldom an option. These limits call for a stochastic simulation tool to deduce global chronologies from the only observation of the seismic images.

Thus, in this paper, we propose a stochastic method to simulate the most probable global chronology of the observed channel evidences. These observations are similar to the ones observable on a given seismic slice for example. This method, illustrated in Figure 2.2, exploits the relative ages that can be observed thanks to cross-cutting relationships between paleo-meanders. For paleo-meanders without relation of erosion between them, we propose to order them by a random sampling weighted by the spatial relation organization toward the current channel path and cutoff statistics based on analog studies. A combination of this technique with the reverse migration method proposed by Parquer et al. [2017] permits to deduce the global chronology of the abandoned loops through the stochastic estimation of abandonment at each reverse migration time step and thus possible internal architectures of the connected compartments. We apply our technique to the McMurray Formation through a reverse migration of the channelized system and all the observed abandoned loops (Section 3).

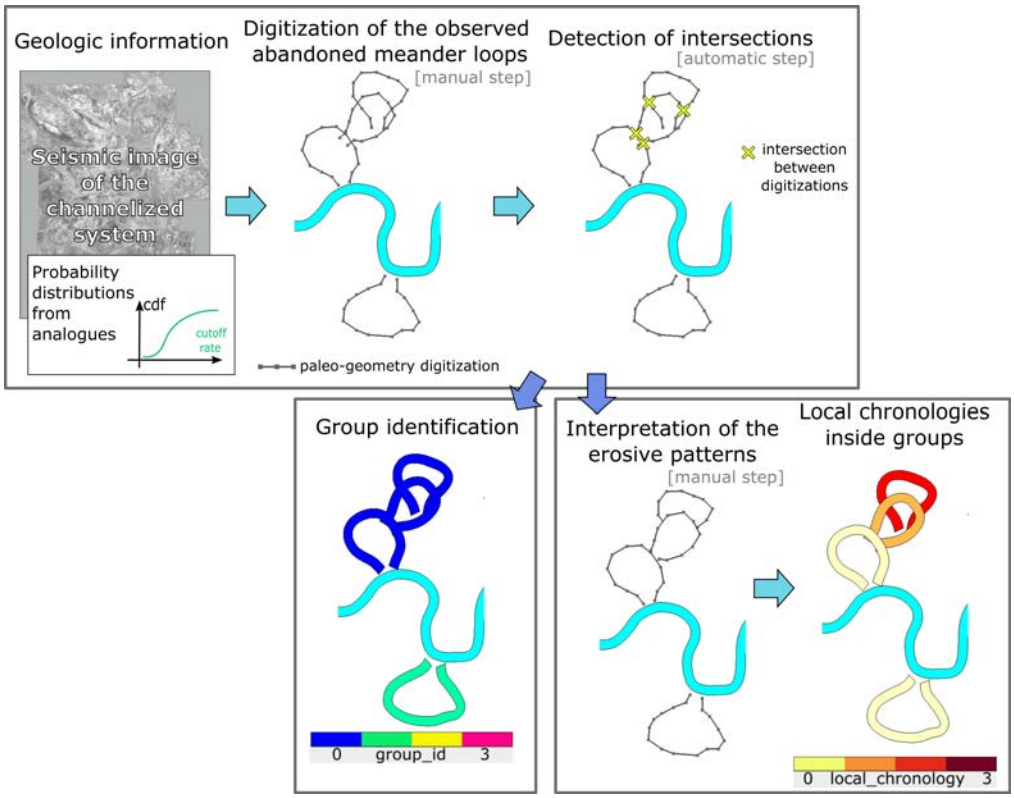


Figure 2.3 Exploitation of the witnesses of the chronology observable on the seismic image in order to determine local chronologies from inter-eroded structures

2.1 Chronology observations

The semi-automatic channel belt analysis aims to detect obvious local chronologies between observed paleo-geometries through curve intersections as described in the workflow in Figure 2.3 and in the Appendix A and in the Algorithm 3.

2.1.1 Deduction of local relative chronologies

Through evolution in the meander belt, a meander bend can erode another bend that was previously abandoned. The relation of erosion gives a relative chronology. The eroded bend is older than the eroding one.

Pairwise automatic intersection checks are performed between observed paleo-channel paths (Figure 2.4A). The eroding/eroded abandoned meanders compose groups of abandoned loops in which local chronologies are deduced through human eye analysis of the seismic/satellite image (Figure 2.4B).

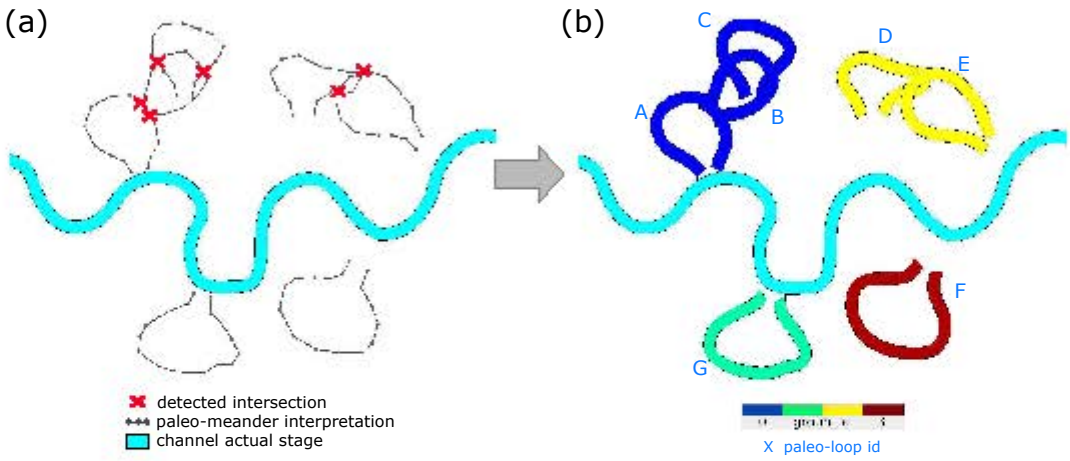


Figure 2.4 **a** Automatic detection of intersections between interpreted paleo-meanders. **b** Detection of groups of abandoned loops through automatic detection of intersections

The groups of paleo-geometries indicate abandoned meanders that can be chronologically ordered through the compilation of the two-by-two relative chronologies observed by human eye. Relative ages are assigned to the chronologically ordered abandoned meanders. The abandoned meanders that have been abandoned most recently have the smallest relative age. A relative age equal to zero is assigned to the youngest abandoned meander of a group. The relative age of anterior abandoned meanders is incremented within each group (Figure 2.5).

An abandoned meander presenting no intersection with another observed abandoned meander is an isolated one. It constitutes a group in its own in which the local chronology value is equal to zero for its only member.

Local chronologies are directly deduced by interpretation of the curve intersections inside groups. However, between groups, no clear relationship appears from the channel belt and uncertainty remains on the global chronology.

2.2 Simulation of the chronology of abandoned loops at a given stage of the channelized system

We propose a simulation tool which permits at a given stage of the system to reconstruct a possible chronology of abandonment through the reconstruction of the system migration. In order to deduce the most probable global chronology, the best is to estimate at each past stage which ones are the most probable structures for abandonment among the contemporary candidates in accordance with the current main channel geometry. Thus, the chronology simulation tool is combined with the reverse migration method [Parquer et al., 2017]. The analysis of the local chronologies is done before the first step of reverse migration of the main channel. The draw of the

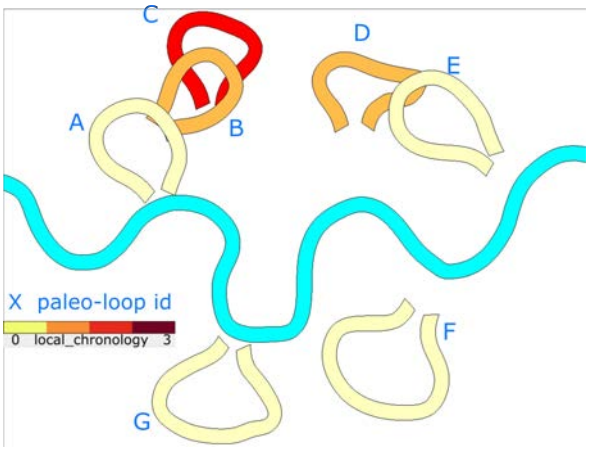


Figure 2.5 Deduction of local chronologies of meanders labeled A to G inside groups through relative ages observation. The abandoned meanders not eroded by another abandoned meander are automatically candidates for abandonment at this step. The eroded ones have an added value of local chronology and necessarily correspond to an anterior path of the main channel.

abandoned structures is done at each time step of the reverse algorithm, respecting the local chronologies deduced beforehand.

Once local chronologies are validated on each abandoned meander group, the number of abandoned meanders and the best candidates have to be designated as described in Figure 2.6. We propose to draw the number of contemporary abandonments from a probability distribution inspired by sedimentary analogs such as the Mississippi river. The process of abandonment by stream connection between two bends of a meander loop [e.g., Lonsdale and Hollister, 1979, Erskine et al., 1992] implies the proximity and the perpendicularity of the loop at the time of abandonment. Indeed, cutoff can be due to the proximity of the two bends (neck cutoff) or to the development of a shortcut after the modification of the hydrodynamic flow (chute cutoff). The latter is more common in fluvial settings than in turbidite ones. In both cases, the meander loop is by-passed by the modification of the channel flow through the neck or chute cutoff of the meander loop.

2.2.1 Cutoff rate

The last four paths of the Mississippi river mapped with precision by Fisk [1944] have been digitized along 1200 kilometers (Figure 2.7). The Mississippi is a fluvial system with tidal influences at its mouth. As developed in introduction, the Mississippi can be considered as analog of the McMurray formation because of the catchment of both their sediments in continental contexts. However, the Mississippi cannot be considered as a reliable analog for any kind of channelized system, such as for

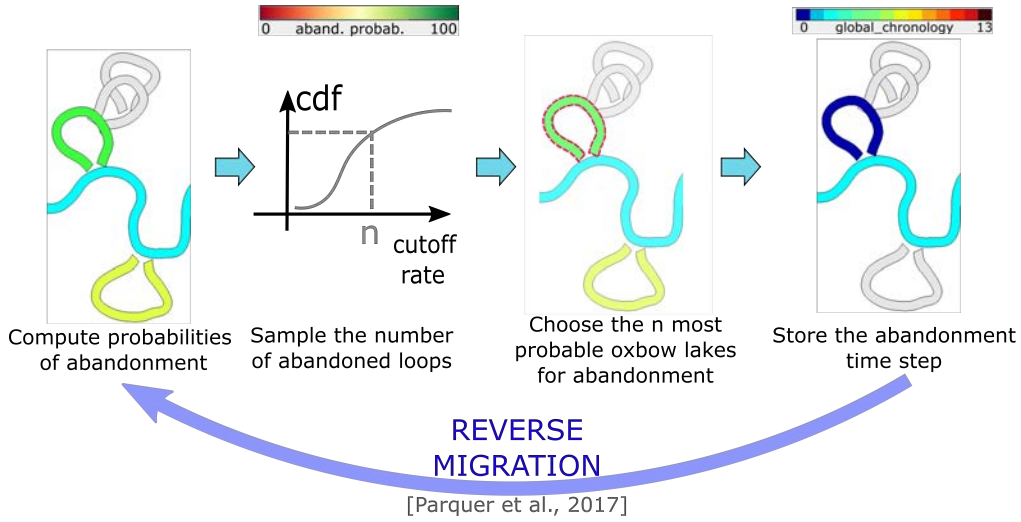


Figure 2.6 Workflow of abandoned meander draw through probability distribution at a given reverse migration time step

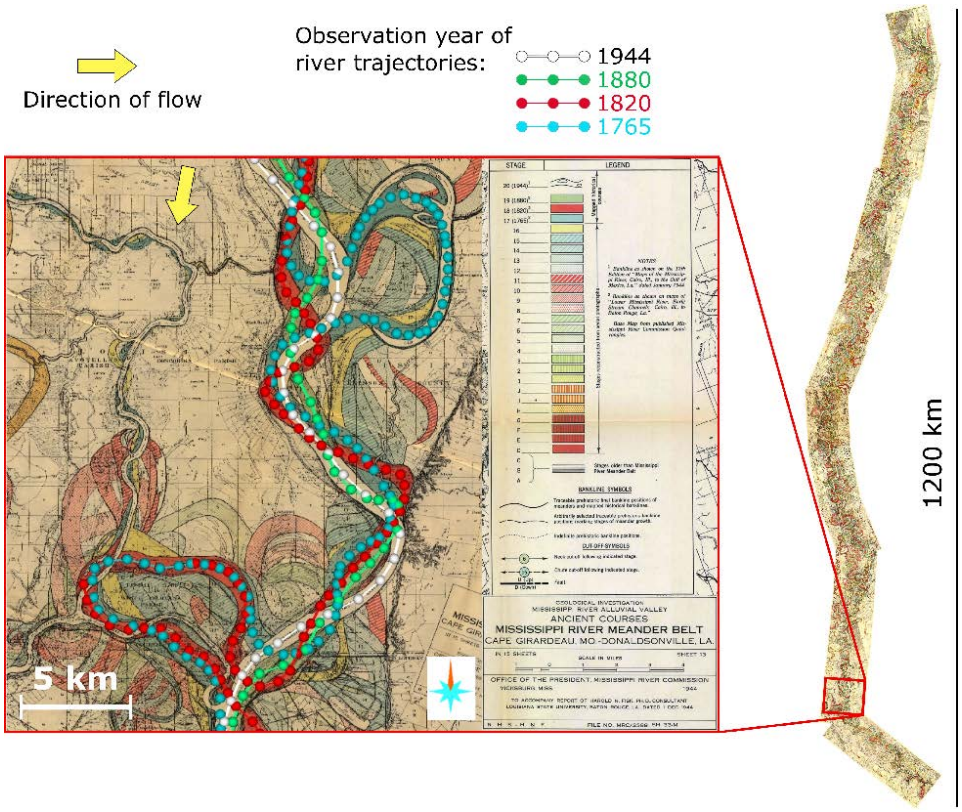


Figure 2.7 Picking of the four last trajectories of the Mississippi in 1944 (in white), 1880 (in green), 1820 (in red) and 1765 (in blue) on a map [http://lmvmapping.erdc.usace.army.mil/]

	nb km	nb years	nb oxbow lakes	std. dev.
1765-1820 trajectories	1200	55	4	0
1820-1880 trajectories	1200	60	10	1
1880-1944 trajectories	1200	64	30	4

Figure 2.8 On 1200 km of historic Mississippi maps, between 1880 and 1944, 30 meander cutoffs have been observed with a precision of more or less 4. Between 1820 and 1880, 10 meander cutoffs have been observed with a precision of more or less 1. Between 1765 and 1820, 4 meander cutoffs have been observed with a precision of more or less 0.

example a highly tidally influenced system or a strict marine system. Moreover, the precision of the database is useful to propose a geologically inspired approach.

On these channel digitizations, we counted the cutoffs between each pair of successive paths. Because we base our work on interpreted data and because we have only 4 complete paths known for a period of almost 200 years, the precision of the information has to be balanced with standard deviations. The results are presented in Figure 2.8.

Such difference in the number of observed abandoned meanders created between pairs of digitized paths can be explained by the preservation rate of the structures which decrease significantly with time [e.g. Sadler, 1981]. This study gives us some minimal rates assuming that the driving parameters remained the same. In order to estimate the true number of abandoned meanders that are created per year, we should take the most recent survey so 0.5 abandoned meander per year over 1200 km or even less to overcome the preservation rate decrease.

For a better precision, the reference probability distribution could be refined by the analysis of other channelized systems in order to construct a database. It should also contain information about the influence of external factors such as water and sediment discharge [Constantine et al., 2010], topography, tectonic settings, or climate. Such variability and diversity of factors influence the use of probability distributions to reproduce the uncertainty brought by the influencing factors.

Such a probability distribution can be used in input to determine the number of abandoned meanders that should have been formed at a given time step. The probability distribution of the number of abandoned meanders created during a given time interval is crucial for the reconstitution of the complete system deposits. Indeed, this probability impacts the number of reverse time steps between two abandoned meanders integration and thus the architecture and the connectivity of the simulated paths. Such information is almost impossible to extract from the seismic images. A solution is to use analogs to compute it.

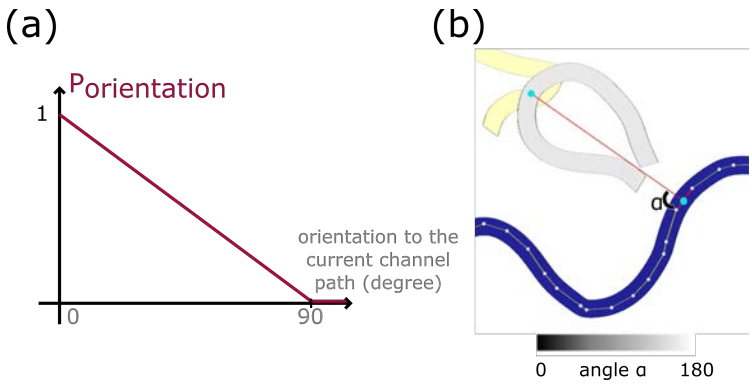


Figure 2.9 Influence of the abandoned meander orientation inside its meander belt on its integration probability P_{orient} **a** computation of the orientation of the abandoned meander and the main channel path **b** probability of integration according to the meander orientation

2.2.2 Draw of the contemporary abandoned meanders

A value of number of contemporary abandoned meanders is sampled from the (positive) gaussian probability distribution inspired by an analog or given by the user. If the sampled number is non-null, all abandoned meanders with a relative age equal to 0 are candidates for abandonment at this time step. They are as numerous as the number of observed groups of abandoned meanders. A probability of abandonment is computed for each considered abandoned loop. The probability value is influenced by the proximity and the orientation of the paleo-meander relative to the main channel path.

On one hand, an abandoned meander that is perpendicular to the main channel has the highest chance to be integrated. On the other hand, the abandonment of an abandoned meander parallel to the main channel path is highly improbable.

- The shortest distance and the orientation angle between each potential contemporary abandoned meander and the main channel path are computed (Figure 2.9 and 2.10). The orientation corresponds to the angle between the line apex-cutoff-channel and the local segment between two sections (Figure 2.9). The shortest distance is defined as the shortest path between the line apex-cutoff and the main channel path (Figure 2.10).

- An abandoned meander located too close to or too far from the main channel path has no chance to be considered as abandoned by the current channel. Indeed, as the definition of the chronology is done by estimation of the integration time step at each time step, if an abandoned meander cannot be integrated at the next time step, its probability of integration at this time step must be null. An abandoned meander too close is an abandoned meander with a shortest distance smaller than one width W of the channel path. For the same reason, an

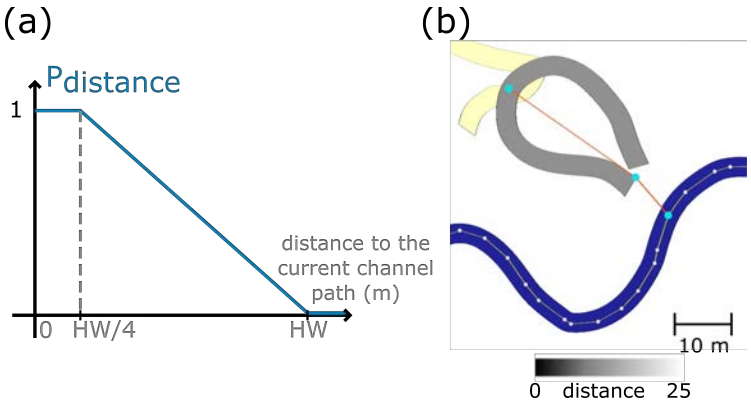


Figure 2.10 Influence of the abandoned meander distance inside its meander belt on its integration probability $P_{distance}$, with HW the half-wavelength of the channel path **a** computation of the shortest distance of the abandoned meander and the main channel path **b** probability of integration according to the meander distance

abandoned meander too far is an abandoned meander with a shortest distance higher than three channel widths W .

To account for the amplitude A of the channel belt which cannot exceed the length of a meander loop, the maximal distance is taken equal to the half-amplitude. The probability according to the distance (Figure 2.10) corresponds to :

$$P_{distance}(i) = \begin{cases} 0 \text{ if } d_i < 2W \text{ or } d_i > A/2 \\ 1 - \frac{4}{3HW} d_i \text{ if } 2W < d_i < A/2 \end{cases} . \tag{2.1}$$

in which d_i is the shortest distance in meters between the abandoned meander i and the main channel path.

The amplitude A can be deduced from an analog [Inglis, 1949, Leopold and Wolman, 1960, Malavoi and Bravard, 2010] or estimated from the channel path.

The orientation of the abandoned meander toward the main channel path also constrains the probability of abandonment (Figure 2.9b). We consider the angle between the local section of the main channel path and the height direction of the abandoned meander. The probability according to the distance (Figure 2.9) corresponds to :

$$P_{orientation}(i) = 1 - \frac{\alpha_i}{90}. \tag{2.2}$$

in which α_i is the orientation in degrees (with $0 < \alpha_i < 90$) between the abandoned meander i and the main channel path.

Finally, both probabilities are combined to rank the abandoned meanders according to their probability of abandonment:

$$P_{abandonment}(i) = \frac{P_{distance}(i) + P_{orientation}(i)}{2}. \tag{2.3}$$

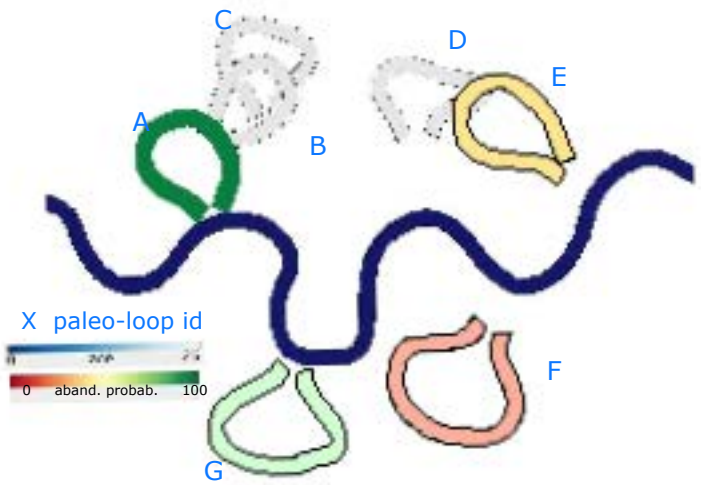


Figure 2.11 Probabilities of abandonment of each abandoned meander candidate for contemporary abandonment

An example of computed probability for abandonment of the meander loop candidates for abandonment is given in Figure 2.11.

Then, the n paleo-meanders with the higher probabilities of abandonment are chosen for abandonment by the meander belt (Figure 2.12). The number n of paleo-meanders chosen is defined by the value drawn from the probability distribution of cutoff rate (Section 1.1).

2.3 Application in reconstruction issues

The technique described here permits to find at a given time step the best candidates for abandonment among the observed abandoned meanders. In order to repeat this simulation until all abandoned meanders are chronologically ordered, the main channel path has to be updated. For that, we combined this technique with a reverse migration method [Parquer et al., 2017] through the simulation of abandoned meander abandonment time at successive paleo-reconstructed channel stages. The reverse-migration technique permits to simulate the paleo-trajectories of a given channelized system on the basis of its last channel path, probability distributions of migration amplitudes and abandoned meander digitizations (Figure 2.13). The combination of this simulation tool inside the reverse migration modeling aims to optimize the estimation of the integration time step of the observed abandoned meanders. An abandoned meander drawn at a given time step is indeed a candidate for integration at the next time step.

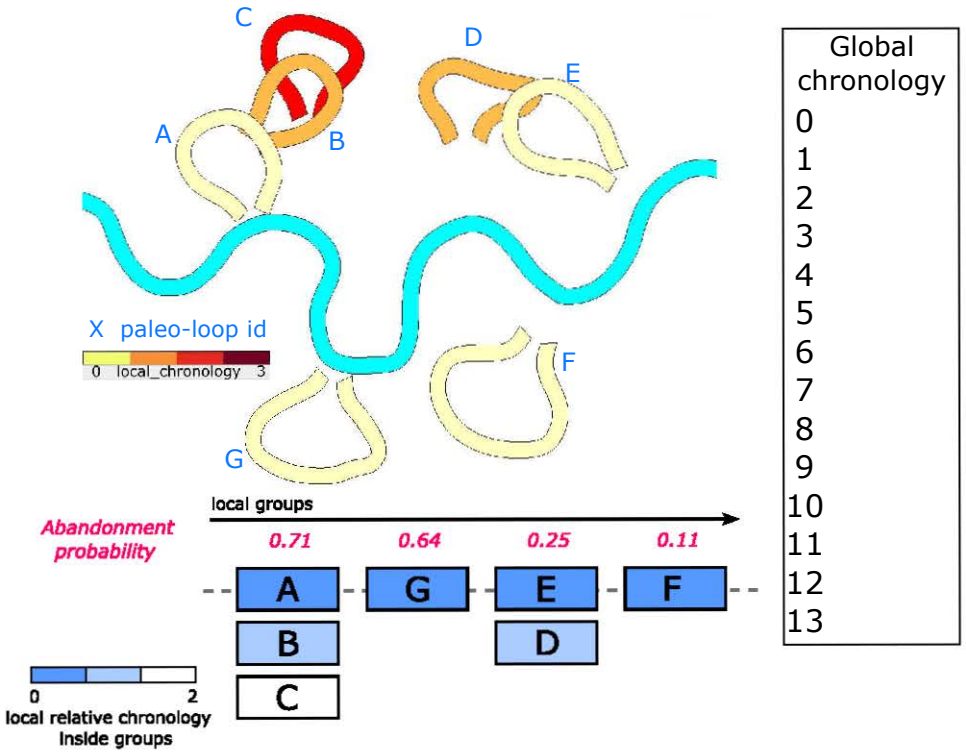


Figure 2.12 The abandoned meanders are drawn among the youngest ones (in dark blue the ones with the relative chronology value equal to zero) according to their probability of abandonment (in red)

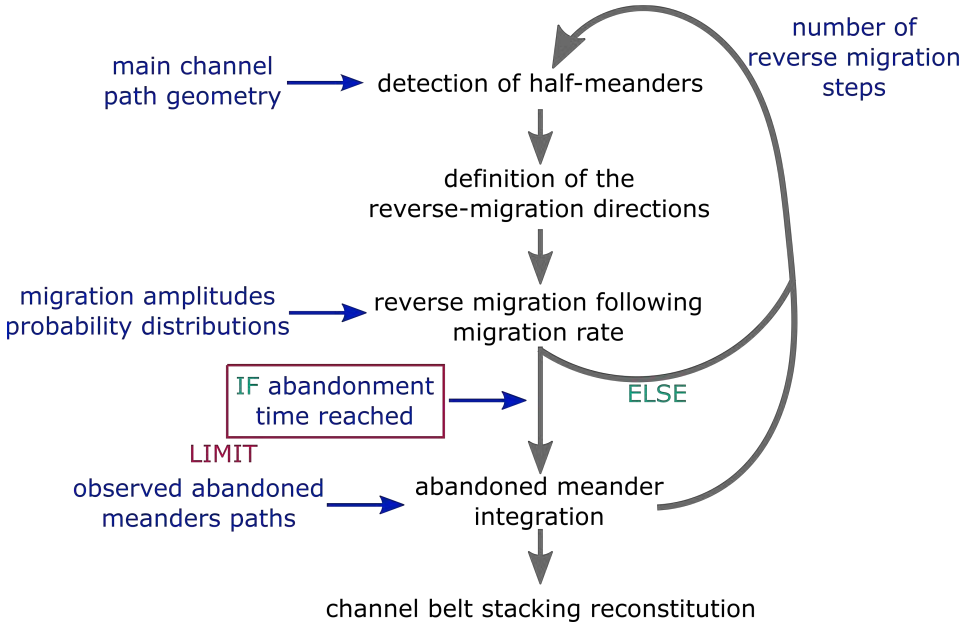


Figure 2.13 Simplified workflow of reverse migration. INPUT DATA in blue, LIMIT in red

2.3.1 Integration in the reverse migration simulation

When a paleo-meander has been drawn for the one stage simulation chronology, its integration is performed at the next step and its integration time step is registered in the global chronology (Figure 2.14). They are put in the waiting list for the reverse migration chronology. Once the paleo-meander is integrated into the main channel path, it is also removed from the integration waiting list of abandoned loops and the local chronologies are updated in its group. Practically, each value of relative age is decremented by 1. For instance, in the channel belt observed in Figure 2.12, when the entity C is drawn for abandonment, the resulting chronology is updated for the next step draw (Figure 2.14). The time of abandonment simulated in the chronology simulation corresponds to the integration step in the reverse migration algorithm [Parquer et al., 2017].

As discussed in Parquer et al. [2017] in the simple reverse migration algorithm, after the meander loop sampling, integration into the main channel path can fail. This may occur when the abandoned meander tips make a large angle with the current channel, or when overlapping with the main channel path can be observed (see also discussion in [Parquer et al., 2017]). Such context can happen even when integration probabilities are computed with geometric considerations such as in Section 2. In this case, the integration of the abandoned loop is postponed to the next step. The integration time step registered into the final global chronology corresponds to the successful integration time step.

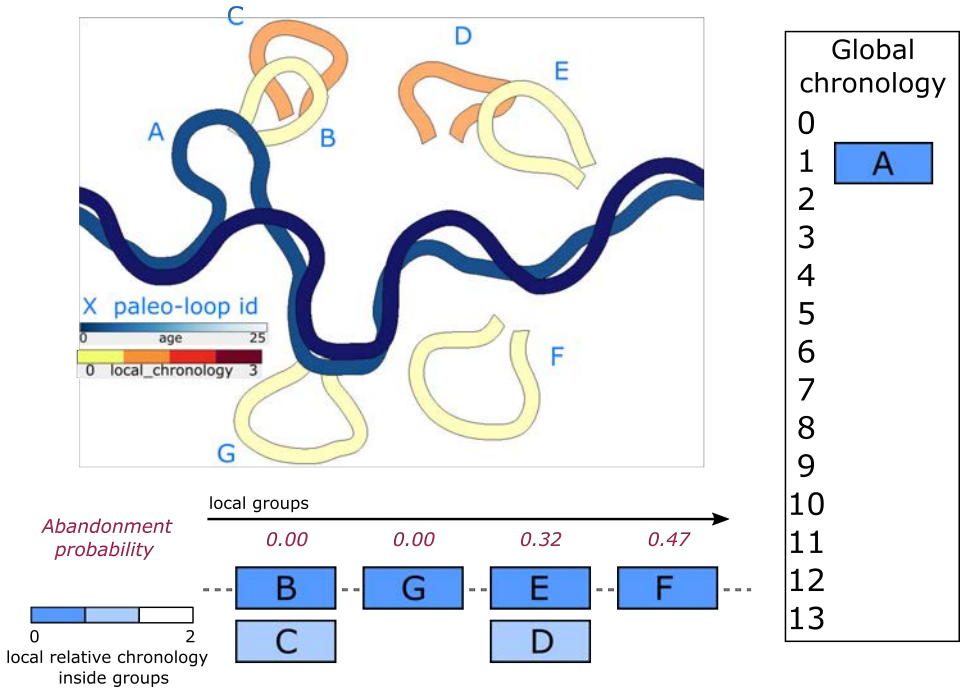


Figure 2.14 Update of the table of the abandoned meanders candidate for abandonment after the draw of one of them at the previous time step.

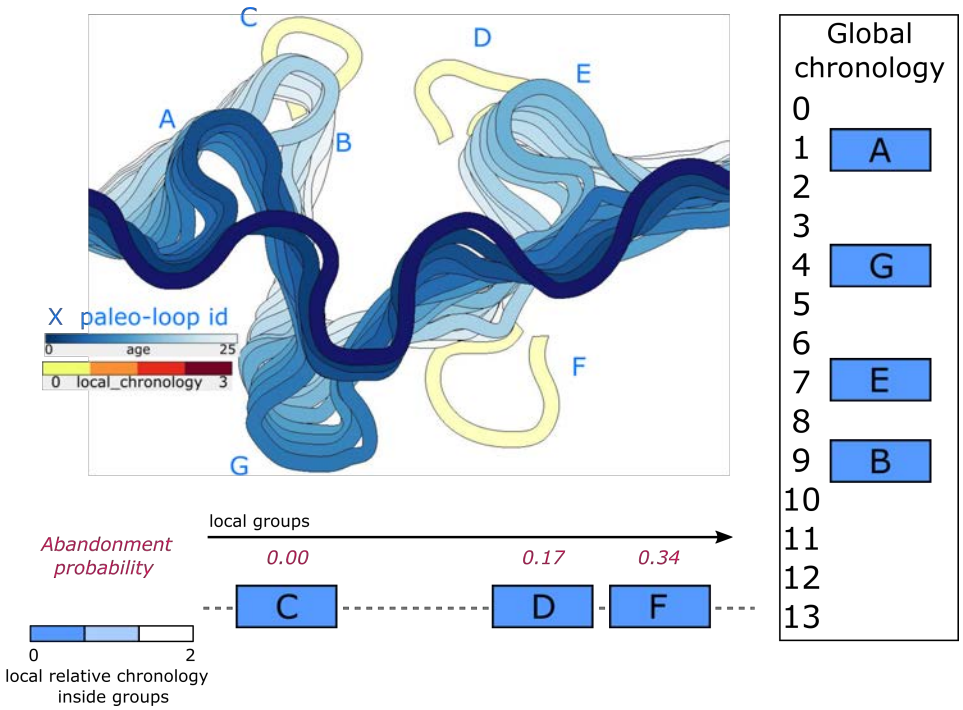


Figure 2.15 The reverse migration conditioned to paleo-meanders proceeds until the number of time steps is reached. At the end of the process, as much as possible paleo-meanders have been integrated according to their probabilities of integration and a global chronology is deduced.

The best would be to let the algorithm run until all paleo-loops are chronologically ordered and integrated into the main channel path, but integration failure and postponement can prevent such success and lead to impractical simulation time. Therefore, this workflow is repeated until the maximal number of time steps chosen for the realization is reached (Figure 2.15).

The simulation of the global chronology of paleo-meanders is closely related to the reverse migration of the complete system. Indeed, both simulations are done simultaneously with an updating of all distance and orientation computations and probabilities of integration to be consistent with the current channel path. This facilitates the successful paleo-meander integration while respecting the local chronologies but obviously has an impact on the algorithm efficiency. In fact, the process always integrates the paleo-geometries of the group in the observed chronological order thanks to erosion relationships. If the younger abandoned meander of a group fails to be integrated, the other abandoned meanders of the same group will never be candidates for integration.

2.3.2 McMurray Formation application

We applied this technique, combined with the reverse migration modeling, to a seismic image of the McMurray Formation in Alberta (Canada) (Figure 2.16A). The Lower Cretaceous McMurray Formation in northeastern Alberta, Canada is a record of a complex non-marine to marginal-marine depositional history [Mossop and Flach, 1983, Ranger and Pemberton, 1997, Hein and Cotterill, 2006]. On the basis of studies on 3D seismic data, scaling relationships, and detrital-zircon geochronology, Musial et al. [2012], Benyon et al. [2014], Blum and Pecha [2014] made the hypothesis that the catchment for these fluvial sediments was of continental scale, comparable to that of the modern Mississippi River. Evidence of tidal influence has been deduced in the fluvial pointbar-dominated deposits within the study area [e.g., Hubbard et al., 2011, Labrecque et al., 2011, Musial et al., 2012]. Locally, the McMurray Formation occurs at a depth of 350 to 500 m below the surface, and is covered by 600 km2 of 3D seismic reflection data (Figure 2.16A).

We used only abandoned meander paths (not all the migration traces visible in point bar). Ten clear abandoned loops were observed and digitized (Figure 2.16B). Nine intersections were brought out by the semi-automatic analysis of the channel belt (Figure 2.16B). These intersections divided the abandoned meanders into four distinct groups (Figure 2.16C). Then, inside each of the four groups, using the cross-cutting relationships between paleo-meanders and the human interpretation of relative ages, local chronologies were deduced (Figure 2.16D). In this example, the probability distribution of the number of abandoned meanders to draw at each time step is given by the statistics found in the Mississippi analog (Figure 2.8). Indeed, both systems are interpreted to be quite similar in terms of environmental context and system dimensions [Durkin et al., 2015].

Thanks to the stochastic reverse migration process (Figure 2.17B1 and 2.17B2 and 2.17B3), we found various global chronologies (Figure 2.17C1 and 2.17C2 and 2.17C3) which all respect the observed truncation erosive patterns and the interpreted relative chronologies. The variability brought by the stochasticity of the reverse migration favors differently the integration of the various abandoned meanders through their abandonment probability, which is linked to the channel stage.

2.4 Discussion

In this paper, we focus on a scenario where abandoned meanders are interpreted on satellite or seismic images. This is the main reason why human digitizations through curves are important because they convey much of the interpretations made from available data. These interpretations have to be made and extrapolated by hand in this paper (Figure 2.2 and Appendix 3). Namely, the method needs the complete reconstruction of the abandoned meander from one extremity to the other even when

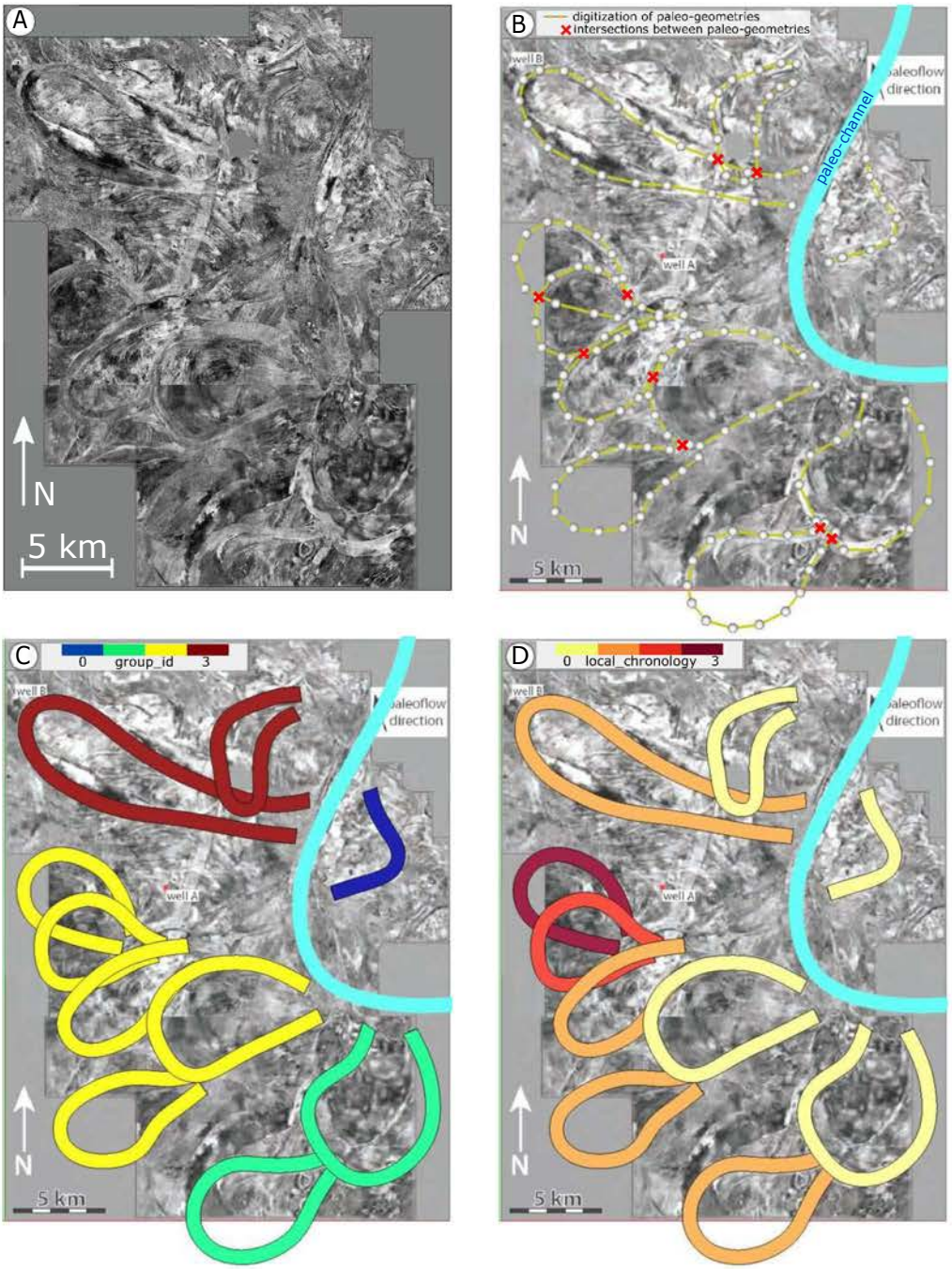


Figure 2.16 Application to the McMurray Formation. **A** Seismic image after Durkin [2016], from ConocoPhillips Canada. **B** Digitization of the ten observed abandoned loops and automatic detection of intersections between digitized paths. **C** Automatic detection of groups through intersections between digitizations. **D** Local chronologically ordering inside groups

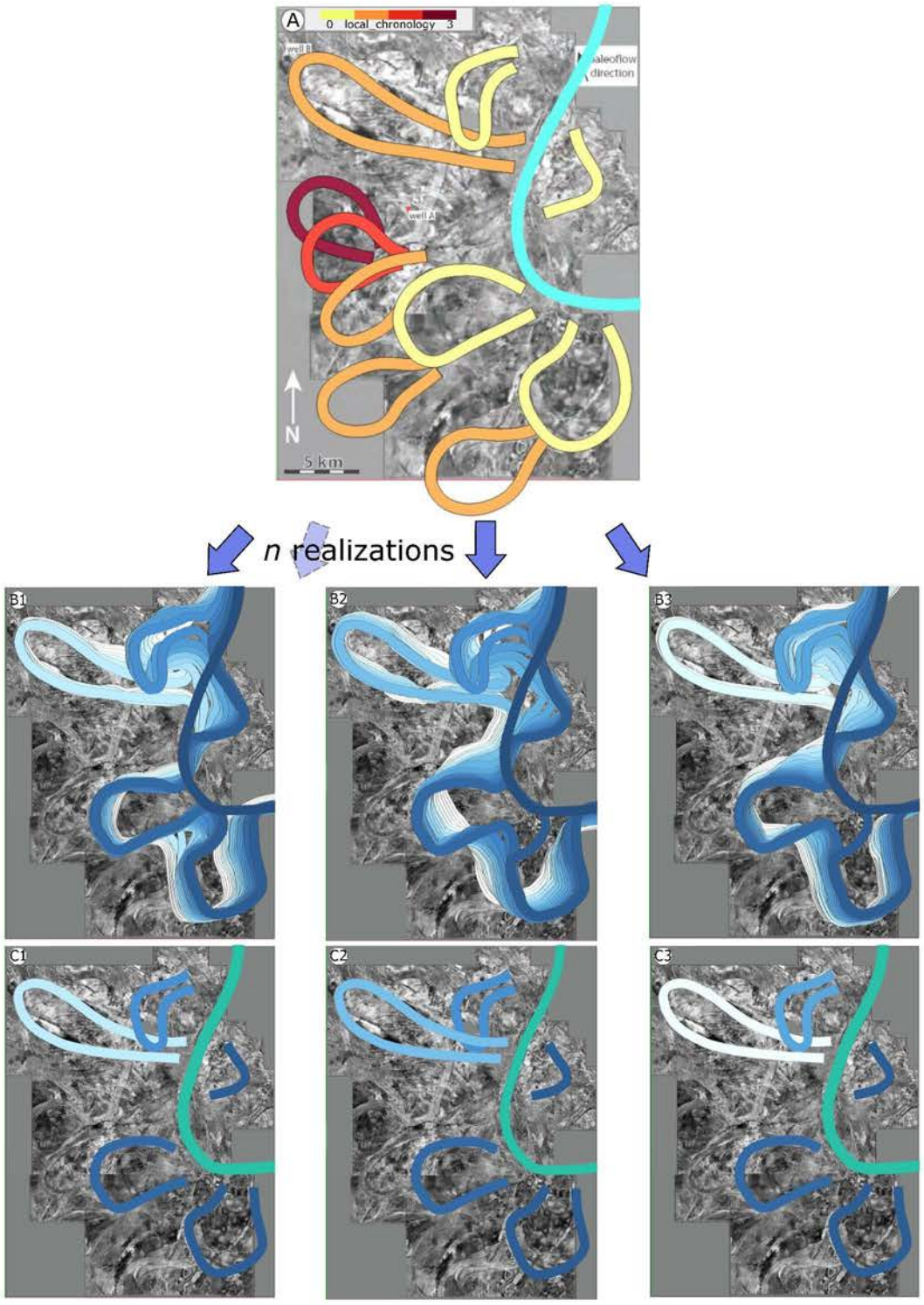


Figure 2.17 Application to the McMurray Formation. **A** Semi-automatic chronological ordering inside groups. **B1**, **B2** and **B3** Three realizations of reverse migration (20 migration time steps, probability distribution of amplitude horizontal offset $N(1000, 300)$ in meters). **C1**, **C2** and **C3** Three resulting realizations of global chronology simulation processed during the reverse migration

it is no longer observable. Our workflow could also use interpretations generated or simulated by computational methods (e.g. image analysis [e.g., Ruiu, 2015]).

Ideally, it would be good to avoid extrapolation and use intersection or proximity query for detecting directly the age relativity from the paleo-path digitizations. Indeed, manual interpretations can introduce mistakes which impact on the probabilities of integration: the interpretation of the cutoff geometry directly influences the detected distance and orientation. The extremities have more importance than the shape of the loop even if they are not observed. For that reason, the probability of integration set to zero if the distance is too short can be responsible for non integration or a delayed integration which do not respect the true observations of the non-eroded abandoned meander.

Coherency is driven by the geometric evolution in reverse migration steps. The gradual evolution is key [e.g., Sylvester et al., 2011, Parquer et al., 2017] to gain global coherency. Thus, integration of this chronology technique inside the reverse migration algorithm is interesting. Multiple possible global chronologies can be obtained by the proposed method. All of them respect local chronologies and permit to reproduce a range of possible reservoir geometries through the stochastic sampling at diverse scales of the workflow. The different sets of possible chronologies translate the inherent uncertainties due to the incompleteness of the sedimentary record, which is often exacerbated by incomplete or fuzzy observations. As the method ultimately reconstructs possible temporal evolutions of the channel from available evidence, it is also useful to constrain the geometric layout of depositional heterogeneities.

It would be interesting to study the non-integrated abandoned meanders in order to see the occurrences of non-integration and the corresponding spatial layout. Disappeared structure can isolate abandoned meanders from the rest of the meander belt. Up to now, fully eroded abandoned meanders are not taken into account during the process. The cutoff rate frequencies inferred from the Mississippi data suggests that missing abandoned meanders could be simulated to reproduce more realistic past channel evolution. Such analog study highlights the need of abandoned meander simulation in order to go back in the history evolution of the main channel system. This could also help the ability of the reverse migration to integrate all evidences. In the case of recurrent non-integrated loops, it could be interesting to simulate by hand missing abandoned loops to test the impact of meander simulation on the integration rate.

Despite the encouraging results and perspectives of this method, one of the main issue in the method presented here is the speed and memory-consuming aspect. Indeed, such realization such as the one presented in Figure 2.16 takes about ten minutes.

Conclusion

We proposed a stochastic semi-automated tool to simulate the chronology at a channel stage through the reverse migrating time steps when precise study of the channel belt (e.g. paleo current, point bars) or absolute dating method is not possible. The tool we developed permits to overcome these difficulties by considering only cross-cutting relationships and by simulating stochastically the global chronology by a reverse migration process and geometric rules. It could also be used as an assistance for manual work such as Durkin et al. [2017] or Hubbard et al. [2011]. The sampling of a paleo-meander is weighted by its distance and orientation to the reverse migrated river at a given stage. For subsurface modeling applications, it permits to facilitate the reverse migration of a channel by the ease of use of the method and to ensure the geological consistency of the 3D reconstructed internal architecture. There is no more need to estimate minimal and maximal abandonment ages for each abandoned meander as proposed in Parquer et al. [2017]. It also improves the performance of the reverse migration through the designation for integration of the best predisposed abandoned meanders.

One limit of this technique is that the result is only conditioned by the observed paleo-channels. However, many of the abandoned meander loops of the system did not survive later evolution of the system. Simulating eroded abandoned loops is an ongoing work which we hope will help to better expand the reverse migrated system to the complete meander belt and so to assess the potential geometries of the reservoir and the associated heterogeneities.

We would like to apply our method to other seismic data from turbidite or fluvial contexts. Using 3D seismic data would be interesting to test the conditioning to paleo-meanders at various depths. It would also be interesting to observe the differences in fuzziness depending on the depth of the geobody.

Long-term perspectives concern the validation of the proposed model geometries through the simulation of the heterogeneities inside the channelized system and the calibration to hydrogeological or reservoir production data.

Acknowledgments

This work was performed in the frame of the RING project (http://ring.georessources.univ-lorraine.fr/) at Université de Lorraine. We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA. The authors would also like to thank Paul Durkin for sharing the McMurray Formation seismic image (ConocoPhilips Canada courtesy). The software corresponding to this paper is available in the GoNURBS plugin of SKUA-Gocad. We also acknowledge Paradigm for providing the SKUA-Gocad Software and API.

Appendices

A Algorithm of the Chronology Simulation Method

The proposed algorithm for channelized system global chronology deduction requires as input data the main channel path centerline, the observed abandoned meander interpreted centerlines. The interpretation concerns the eroded parts and the local chronology interpretation. It can be integrated inside the reverse migration algorithm detailed in Appendix B of the Chapter 1 in the time step loop. The algorithm 2 is illustrated in Figs. 2.2, 2.3 and 2.6.

Algorithm 2 Simulation workflow of chrono-ordering of observed abandoned meander

Input: N_r number of realizations wanted, the channel path digitization, the list of identified abandoned meander digitizations O_i, a distribution probability of contemporaneous abandonment C

Output: the most probable abandonment chronology at a given time stage

for each intersections between the O_i identified abandoned meander **do**
  interact with user to determine which one is older and which one is younger
  assign local relative chronology value L_i
end for
for each O_c abandoned meander with local chronology L_i equal to 0 **do**
  compute probabilities of integration (distance and orientation)
end for
sample the number N_{am} of abandoned meander to draw inside C
sample the N_{am} among the candidates O_c
for each O_i remaining after draw **do**
  update the local chronologies L_i
end for
return the most probable abandonment chronology at a given time stage

Chapitre 3

Simulation stochastique de méandres abandonnés

La méthode de reconstruction de systèmes chenalisés présentée en Chapitre 1 est dépendante, par son principe de migration rétro-chronologique, des intégrations régulières des méandres abandonnés pour reproduire une géométrie globale cohérente avec les analogues sédimentaires. En effet, sans intégration de méandre abandonné, le chenal devient de plus en plus droit et ne couvre pas la totalité de la ceinture de méandres, ni ne reproduit la diversité des faciès observés.

Malgré une érodibilité moindre, due à un remplissage plus argileux que le reste de la ceinture de méandres, les bras morts disparaissent parfois lors de la migration du chenal après leur abandon. Le taux de non préservation des dépôts est en partie lié à la durée enregistrée dans les sédiments. De plus, la profondeur d'enfouissement est inversement proportionnelle à la visibilité des structures en imagerie sismique. Ainsi, les chances de reconstituer correctement les différentes trajectoires à partir de simples observations sont de plus en plus faibles à mesure que le temps passe.

Pour pallier cette difficulté, ce chapitre propose une méthode de simulation stochastique de méandres abandonnés. Elle se base sur les observations faites dans le système épargné par l'érosion (p.ex., dimensions des bras morts observés, amplitude et longueur d'onde du chenal) et simule aléatoirement des bras morts dans la ceinture de méandres. Cette simulation respecte le positionnement des formes observées et donc non érodées. De plus, dans le contexte de la méthode de migration rétro-chronologique, les structures simulées ont vocation à être candidates à l'intégration à l'étape courante. Pour cela, elles doivent être proches du chenal courant et exemptes de toute intersection avec d'autres structures. L'incertitude sur leur position et leur forme est prise en compte par un tirage stochastique du centre, des dimensions et de l'angulosité du méandre abandonné dans diverses distributions de probabilités. Le

nombre de méandres abandonnés simulés par étape de temps est, quant à lui, tiré d'une distribution de probabilité inspirée d'analogues sédimentaires.

La reproduction de formes plus complexes ainsi que l'utilisation de cette simulation pour conditionner à des données de puits sont discutées. Ce chapitre se présente sous la forme d'un article préparé pour soumission au journal *Computers and Geosciences*.

Abandoned meander simulation and borehole data conditioning in reverse migration modeling of channelized systems.

Marion PARQUER, Pauline COLLON, Guillaume CAUMON

Article écrit pour soumission au journal *Computers and Geosciences*

Abstract Sedimentary channelized systems result from a combination of continuous and discrete channel evolutive events whose understanding raises challenges when considering borehole data and seismic images. The abruptness of discrete events, such as abandoned meanders, strongly influences the lateral shift of the system. Such processes can be reproduced in a forward simulation approach. In a reverse migration simulation, integrating the abandoned meanders observed on subsurface images makes possible to reproduce the extension of the channelized system to the whole channel belt. The reverse approach, which starts from the last observed channel path and migrates it back in time while integrating step by step the paleo-geometries, relies on the preservation percentage of these structures. Only a few of them are spared by the reworking of the meander belt after their formation. In this paper, we propose to simulate eroded abandoned meanders inside the meander belt. Considering the geometrical and spatial characteristics of the observed abandoned meanders, paleo-channels are simulated for each time step of the reverse migration simulation.

Introduction

Channelized systems are evolutive systems in the three directions of the space (e.g., Peakall et al. [2000], Jobe et al. [2016]). They constitute interesting targets for subsurface energy resource. Their evolution history explains their complex architecture which compartmentalizes or connects reservoir facies bodies, impacting resource recovery. Thus, their understanding and the conditioning of numerical models to the remnants of their evolution is crucial for subsurface architecture estimation.

Information on the past evolution consists in abandoned paths (e.g., abandoned loops due to cutoffs, avulsed paths) or deposits due to the gradual migration of the channel (e.g., point bars). However, only a fraction of time is registered in the sedimentary record (e.g., Barrell [1917], Miall [2016], Tipper [2016]) and the degree of preservation follows an inverse logarithmic decay toward the considered period [Sadler, 1981].

Thus, to reconstruct the channelized system and its extension over the channel belt, the consideration of not observed features is crucial. For example, in a reverse migration modeling approach such as the one developed in Parquer et al. [2017] which conditions to abandoned meanders, the erosion or the difficulty of observation of these structures is a real limitation through the lost of any evidence of the existence of the eroded meander (Figure 3.1). To override this constraint, we propose a method to stochastically simulate meander loops through the reverse migration process of the system. At each time step of the reverse migration algorithm, the number of abandoned meanders to simulate is drawn from a prior probability distribution law as well as their dimensions, orientation and location. The simulated abandoned



Figure 3.1 Three time steps of the river Ucayali (Peru) captured by satellite images. In less than 10 years, any evidence of the previous existence of the abandoned meander (red circle) disappears from the channel belt. Through its erosion, information about paleo-trajectories of the channel is also lost. [Google Earth $9°52'30.39"S\ 74°03'15.72"O$]

meanders are then integrated into the main channel path at this reverse migration time step.

3.1 Channel belt development

The natural behavior of channelized systems includes recurrent discrete events such as meander loop abandonment or avulsion of the main channel path. Both correspond to a change of the natural path of the channel stream due to connection of two bends of a meander loop or to the development of another pathway for the flow. Both phenomena let abandoned paleo-paths filled by fine-grained material [e.g., Toonen et al., 2012, Jobe et al., 2016].

Channelized systems evolve in the three directions of the space by aggradation, lateral migration and downstream migration. The relative importance of one direction of migration over the others is responsible for the variety of meander loop geometries [e.g., Brice, 1974, Hooke, 1984]. Sediments recording these processes are typically point bars and other depositional structures (e.g., counter-point-bars, downstream-migrating fluvial point bars, eddy-accretion deposits) [e.g., Ghinassi et al., 2016, Holbrook, 2017]. The variety of shapes and developments of meander loops is mainly the result of the combination of both meander lateral and downstream migrations (e.g., Ghinassi et al. [2016], Holbrook [2017], Schwenk et al. [2015], Schwenk and Foufoula-Georgiou [2016]) (Figure 3.2).

The horizontal migration implies the development of accretion point bars in the inner bank or in the outer bank depending on the dominant migration direction

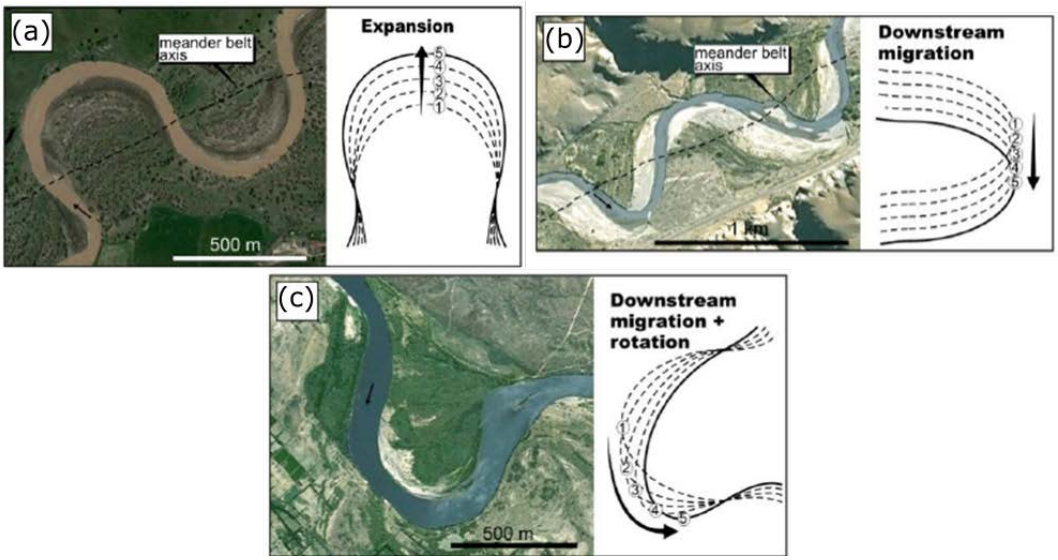


Figure 3.2 Variety of migration type in fluvial and turbidite contexts. **a** Pure lateral migration **b** Pure downstream migration **c** Mixed rotation and downstream migration. Modified from [Ghinassi et al., 2016]

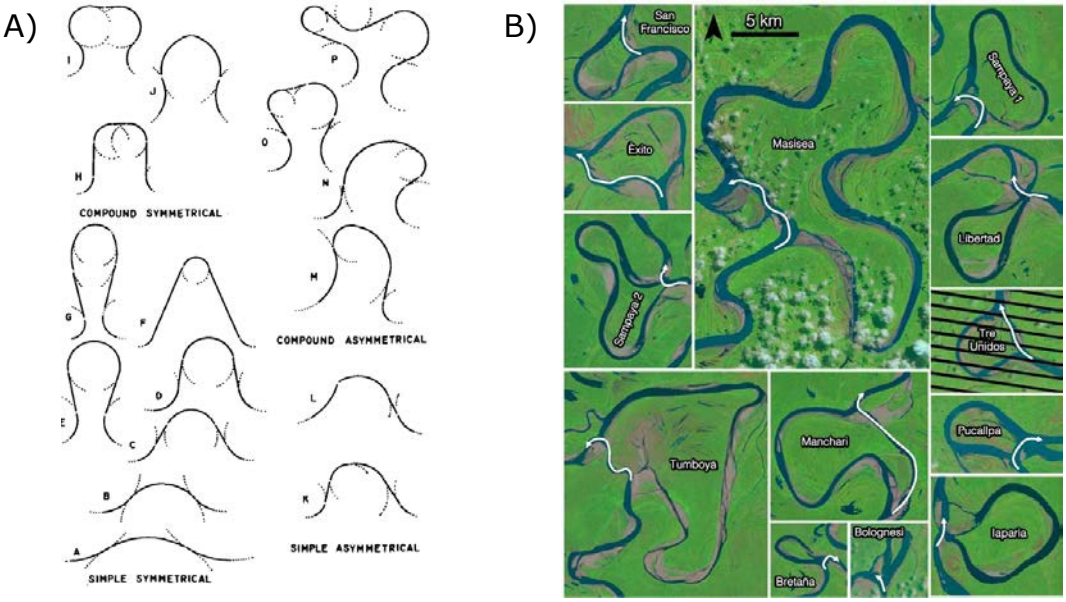


Figure 3.3 Variety of meander loops shapes is linked with its evolution. Modified from [Brice, 1974] and is still observed after its abandonment



Figure 3.4 Variety of meander loop shapes is linked with the system evolution. [Google Earth 2018]

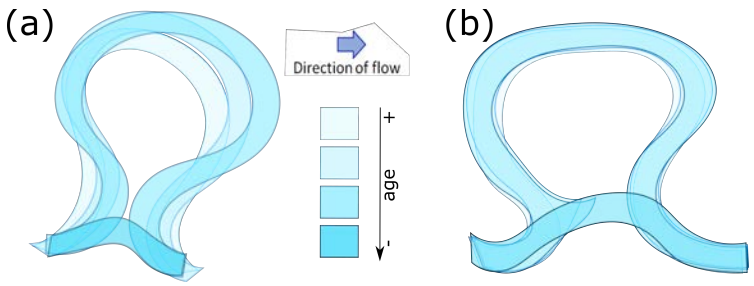


Figure 3.5 Meander type of bend cutoff: **a** neck cutoff triggered by bend proximity **b** chute cutoff triggered by embayment initiation between bends

[e.g., Leeder and Bridges, 1975, Ghinassi et al., 2016, Holbrook, 2017]. It leads to symmetrical or asymmetrical meander loops, with potentially complex shapes (Figure 3.3).

At abandonment time, the abandoned meander is a mature meander loop cut at two locations (Figure 3.4) by a neck or a chute cutoff (Figure 3.5). A neck cutoff occurs after a narrowing of the meander neck so that the two bends are getting close enough together to permit the final breach. A chute cutoff proceeds by a shortcut inside the meander belt and joins two channel bends not necessarily close [e.g., Gay et al., 1998, Constantine et al., 2010]. The resulting shape of the abandoned meander is thus different according to the cutoff process. The general shapes are a drop for a neck cutoff and a horsehoe for a chute cutoff. Their formation is ruled by various factors (e.g., change in upstream or downstream flow, change in sediment charge, successive floods) [e.g., Constantine et al., 2010, 2015]. Chute cutoff generally occurs in fluvial context whereas neck cutoff occurs in both contexts.

A cyclicity behaviour of the ratio of the local curvature over the width has been proposed as a controlling factor of the meander development into abandoned loops [e.g., Hooke, 1984, Sylvester et al., 2017]. This would also influence the way the abandoned loops are populating the meander belt on the basis of a relationship with the sinuosity [Constantine and Dunne, 2008]. Stølum [1996] analyzed the evolution of river due to cutoff events. A cutoff seems to trigger other cutoff events in the following or preceding meander loop. Moreover, cluster of cut-offs would regulate the balance between the equilibrium state and the chaotic regime. An increase of the bend extension rate could trigger a chute cutoff [Grenfell et al., 2014], such as a stream restoration [Eekhout and Hoitink, 2015]. Multiple cutoffs can occur in the same location because of the enhancing of the enumerated parameters by an opposite migration of the meander loops upstream and downstream of the cutoff location [Słowik, 2016]. Thus, despite the numerous studies of the creation of abandoned meanders, their physical trigger is still not well known. That is the reason why we propose to consider this event in geometric terms.

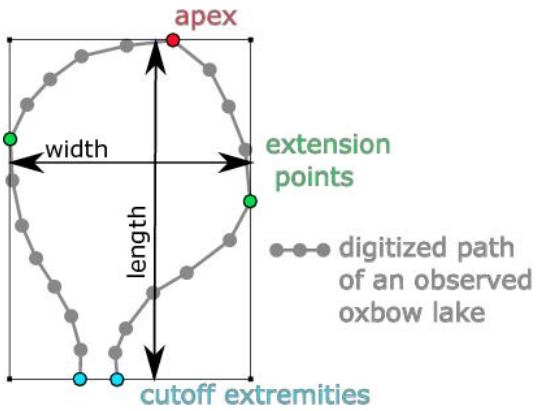


Figure 3.6 Dimension parameters definition on a scheme of a neck cutoff abandoned meander. The inscription of the shape into a rectangle permits to deduce the two main parameters: (i) the length between the cutoff and the apex and (ii) the width between the two laterally farthest points

3.2 Conditioning of channelized system reconstruction

3.2.1 Reverse migration algorithm

Reverse migration simulation methods are motivated by the ease of observation of the last stage of the system [e.g., Labourdette, 2008, Ruiu, 2015, Rongier et al., 2017a]. A reconstruction of the complete system in the inverse way permits to consider conditioning data such as the last stage of the channel path and abandoned meanders. The last channel stage and the observed abandoned meanders are digitized and the latter can be described by dimension characteristics such as described in Figure 3.6. A neck cutoff abandoned meander can be inscribed into a rectangle of which the length is defined by the distance between the cutoff and the apex and the width is defined by the distance between the two laterally farthest points.

The reverse migration simulation we proposed in Parquer et al. [2017] starts from the last observed channel belt and reverse migrates it as many time steps as chosen. This reconstruction is done time step by time step at the half-meander scale. Offsets of lateral, downstream and vertical migration are drawn for each half-meander from probability distributions. These sampled offsets are then weighted by the local curvature inside the half-meander. When abandonment period of a channel evidence is reached by the reverse migration algorithm, the abandoned geometry is integrated into the main channel path.

The integration of the abandoned meanders permits to extend the 3D system reconstitution to the complete meander belt. This is crucial in a reverse migration approach which, time step by time step, straightens the main stream. The obtained geometries fit the observed conditioning data and span the overall meander belt [Parquer et al., 2017]. One of the main limits is the erosion of abandoned loops

which decreases the amount of information on the paleo-system and so the capacity to embrace the entire meander belt. Simulation of such objects consistently with the existing information on the paleo-system should improve the ability of the reverse migration to capture existing heterogeneities and to honor all observations in the channel belt. The stochasticity of the process allows us to assess the uncertainties brought by the acquisition method limitations, or by the natural unexpected behaviors of channelized systems.

3.2.2 Simulation of eroded abandoned meanders

The simulation of abandoned meanders has been proposed by a few researchers in object-based methods [e.g., Deutsch and Tran, 2002, Hassanpour et al., 2013] or by channel forward migration simulation and natural cutoffs [e.g., Lopez, 2003, Rongier et al., 2017a, Ruiu, 2015].

Here we propose to simulate eroded abandoned meanders at each time step of the reverse migration process (Figure 3.7). The chosen approach is a geometric one. It permits to propose generic applications for simulation of chute or neck cutoffs in reverse modeling even if the mechanisms of occurrence are not completely understood, and even if these mechanisms are irreversible ones.

Geometry stochastic simulation

Abandoned meanders show various 2D geometries. Each of them can be contained into a rectangle and, for most of them, be defined by a five-points piecewise Hermite spline. Indeed, an abandoned loop can be described by its apex, its neck or chute cutoff, a maximal width of the meander loop, and a length between the apex and the cutoff (Figure 3.6). Then, the variety of abandoned meander shapes is reproduced by the sampling of these five points along the simulation rectangle. They correspond to the two extremities cutoff points, the two extension points and the apex point such as presented in Figure 3.6. Each point position cannot be too close to the rectangle corner in order to avoid too sharp-edged geometries. It is constrained by probability distribution of position along the edges of the simulation rectangle (Figure 3.8). Eight norms for the tangents on the five points are also drawn. The directions of the eight tangents are fixed. There are perpendicular to the smaller edge for the cutoff extremities points and parallel to the longer edges of the simulation rectangle for the three other points.

These points and the associated tangents are linked by a piecewise Hermite spline. It gives a smooth curve respecting the tangents and honoring the sampled points [Schoenberg, 1973].

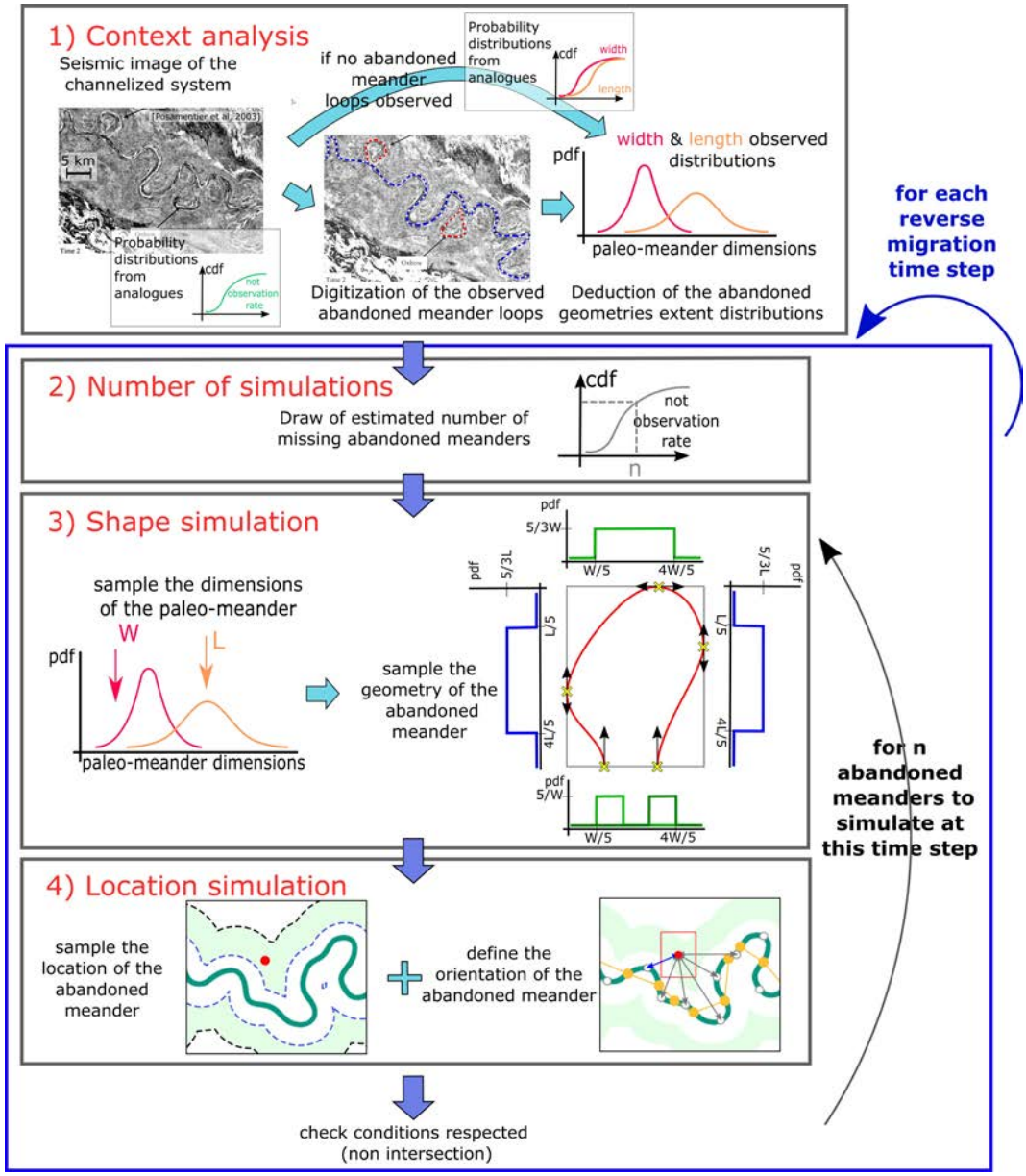


Figure 3.7 Workflow for stochastic simulation of abandoned meanders honoring the meander belt analysis and performed at each time step of the reverse migration process

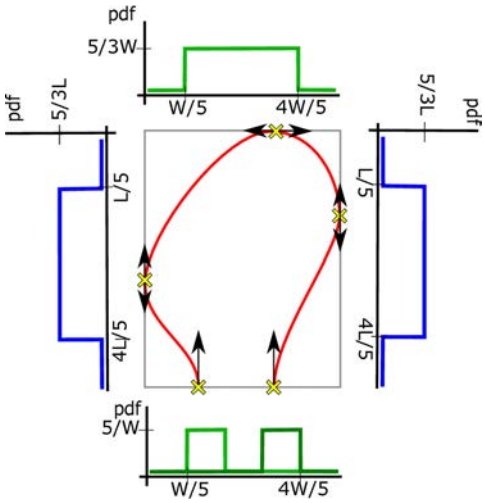


Figure 3.8 Construction of the abandoned meander geometry thanks to a piecewise Hermite spline inside a rectangle fitting the width (W) and length (L) observed in the channel belt.

Conditioning to channel belt analysis

If we assume that the eroded or not imaged paleo-geometries present the same geometric characteristics as the preserved ones, an automatic analysis of the channel belt permits to deduce probability distributions of the abandoned meander dimensions such as defined in Figure 3.6. The box that encapsulates all the points of each digitized abandoned meander is automatically deduced for the corresponding path. The largest dimension is taken as the length of the abandoned meander and the smallest as the width (Figure 3.9).

We take the mean values and the differences to the extremes to deduce a distribution from which the values of length and width for each abandoned meander simulation will be sampled during the simulation. These values define the dimension of the rectangle in which the abandoned loop is simulated. In cases in which no abandoned meanders could be observed to construct probability distributions of meander loop dimensions, the probability distributions can also be deduced from the channel path analysis (i.e., wavelength, amplitude) or from an analog study of another similar channelized system.

Location and orientation stochastic simulation

During reverse migration, an abandoned meander is simulated in order to be integrated at the next time step. To be consistent with the current configuration of the channel, the abandoned meander has to be simulated in the vicinity of the current channel path. A proportion of eroded and not observable abandoned meanders could be initially given to the algorithm in order to fit the geological context.

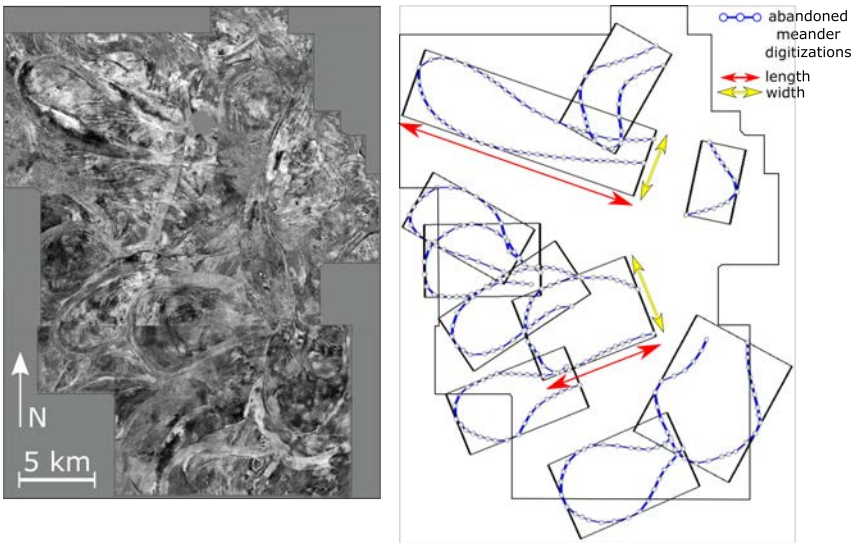


Figure 3.9 The automatic channel belt analysis is performed though the whole meander belt and collects the variability of width and length of the observed abandoned meanders.

Moreover, their orientation and their distance to the current channel path should be consistent with the closest half-meander to facilitate their integration in the channel belt.

Our meander simulation is first driven by the sampling of the location of the simulation. Because our aim is to simulate an abandoned meander at a given time step, the simulated structures have to be close to the current stream. However, in a first approximation, the drawn point is the center of the future abandoned meander. In this case, the point should be simulated sufficiently far away from the main channel path in order to permit the simulation of the complete shape around it.

The minimal distance for simulating the center of the abandoned meander is set to the quarter of the amplitude of the meandering channel and the maximal distance is set equal to half the amplitude (Figure 3.10). Once the point has been drawn inside the authorized area, the englobing rectangle is simulated thanks to the draw of the length and the width values. The rectangle is then oriented toward the closest half-meander thanks to the detection of the closest apex.

3.3 Synthetic application

500 realizations of abandoned meander simulations have been carried out on a synthetic database. The Figure 3.11 shows 4 realizations. We choosed to consider the following parameters as input of the simulation. The erosion probability distribution has been defined as $N(4, 1.05)$ entities. No abandoned meanders are considered

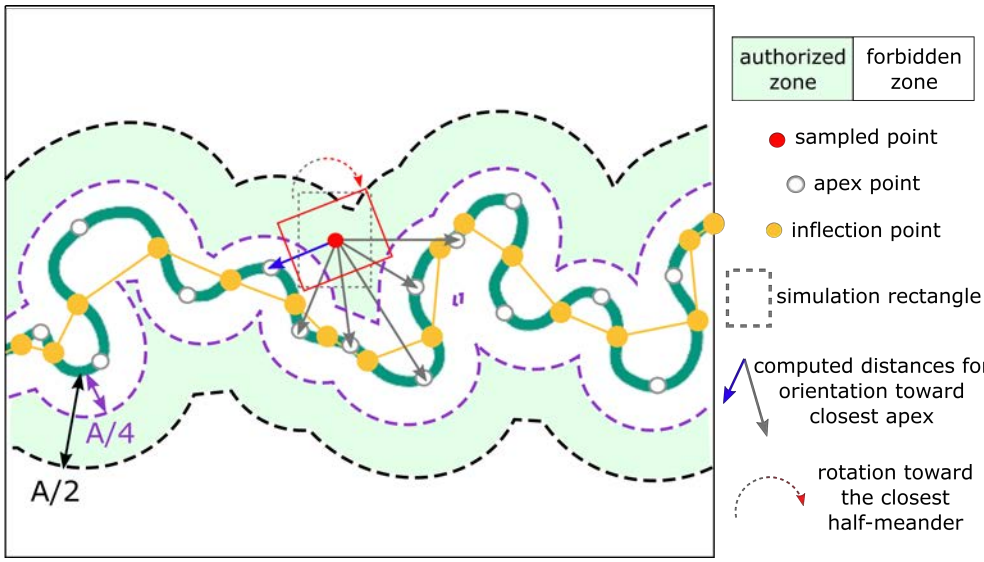


Figure 3.10 Distance constraints for location and orientation of the simulated abandoned meander. The center point is drawn inside the authorized area defined by a distance to the main channel between the quarter and the half of the amplitude A. Then the rectangle englobing the simulated abandoned meander is rotated toward the closest half-meander. The closest half-meander is defined by the smallest distance, here illustrated by the blue arrow.

as observed so we defined the length probability distribution of eroded abandoned meanders as equal to $N(95, 15)$ and the width probability distribution to $N(65, 15)$, both in meters.

All probability distributions are respected, as well as the authorized area of simulation. The shapes of the simulated abandoned meanders resemble the meanders of the input channel. A numerical quantification of the respect of the dimensions and location of simulated abandoned meanders could be run to go toward a validation of the technique.

Figure 3.12 presents the average maps of 500 realizations of non-conditioned simulation of abandoned meanders and of 500 realizations of conditioned simulation of abandoned meanders.

It shows the comparison between two sets of 500 realizations with parameters such as presented in Figure 3.11 with or without conditioning to 10 observed abandoned meanders. The average maps presented in Figures 3.12c and 3.12f show the respect of the authorized areas constrained or not by abandoned meander observations. Inside these areas, the simulated abandoned meanders cover the totality of the authorized space.

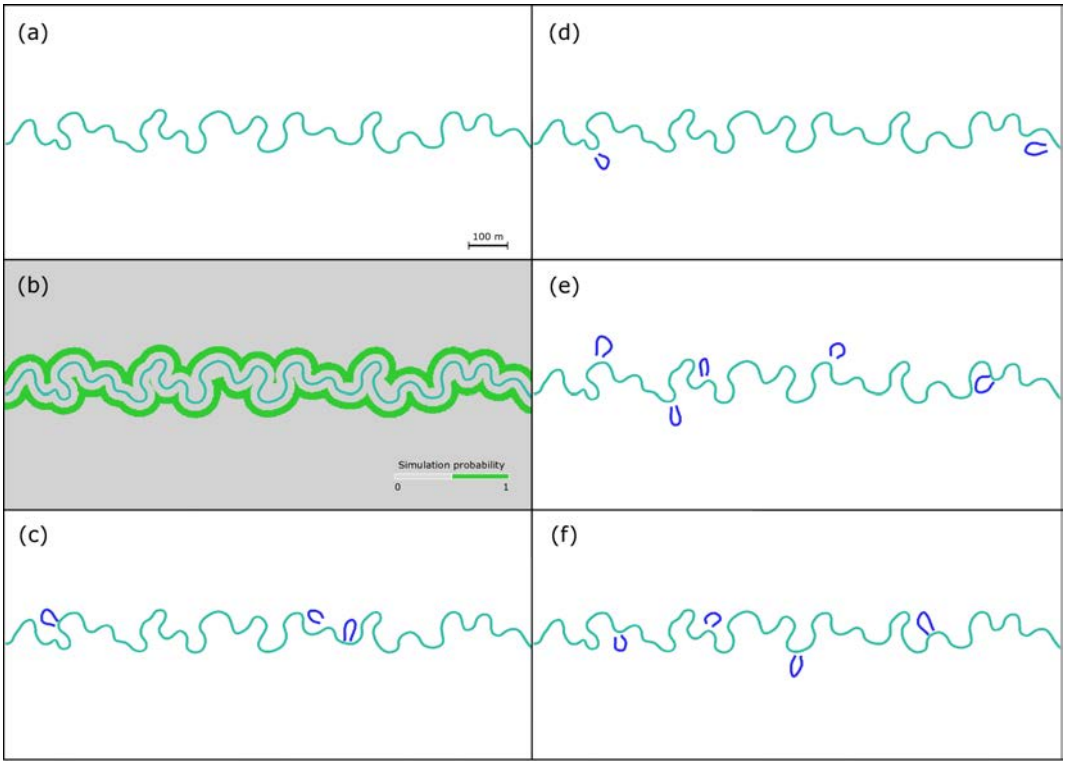


Figure 3.11 Not conditioned simulation of eroded abandoned meanders at a given time step. Erosion probability distribution: $N(4, 1.05)$; Length probability distribution: $N(95, 15)$ in meters; Width probability distribution: $N(65, 15)$ in meters; Seed: 627; **a** The input observation is a synthetic channel path **b** The authorized area for abandoned meander simulation is defined around the main channel path where distance to the channel is comprised between the quarter and the half of the channel amplitude A **c**, **d**, **e**, **f** Four distinct realizations.

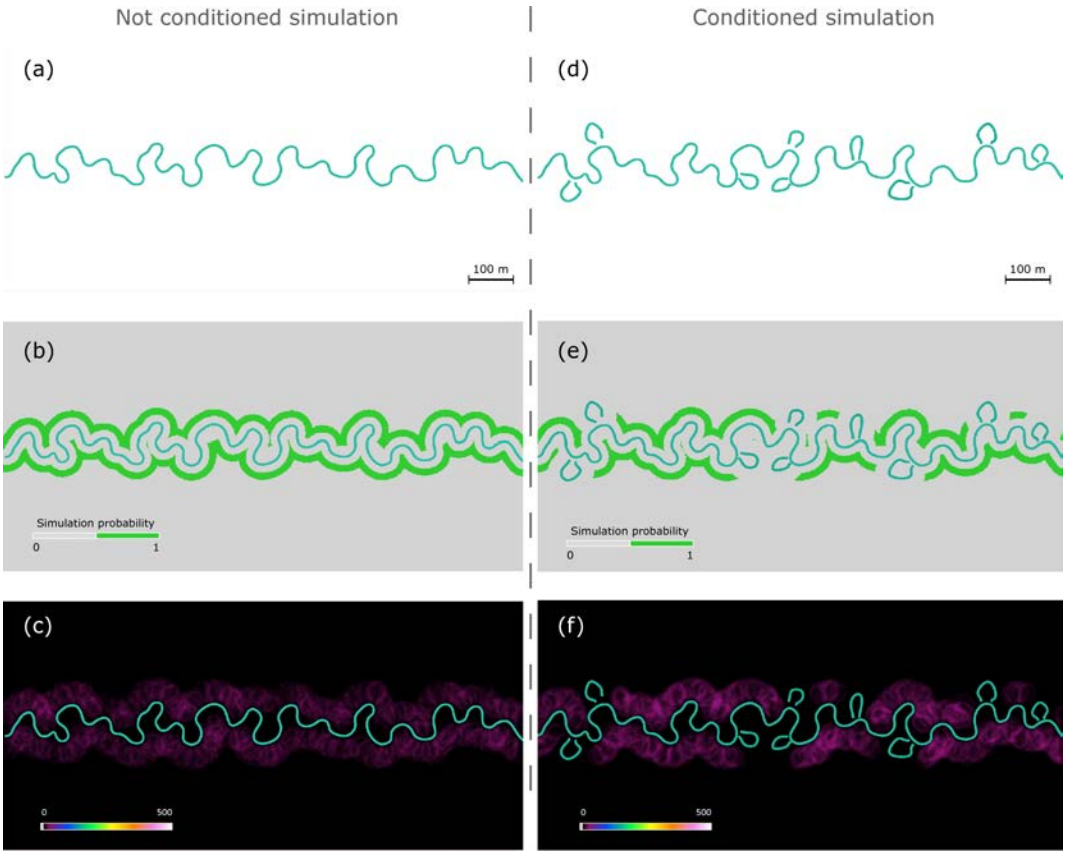


Figure 3.12 Comparison of 500 realizations of conditioned and not conditioned simulations of eroded abandoned meanders at a given time step. Erosion probability distribution: $N(4, 1.05)$; Conditioning to observations: No; Length probability distribution: $N(95, 15)$ in meters; Width probability distribution: $N(65, 15)$ in meters; Seed: 627; **a** Input data for not conditioned simulation **b** Authorized simulation areas for not conditioned simulation **c** Average map for not conditioned simulations ; **d** Input data for conditioned simulation **e** Authorized simulation areas for conditioned simulation **f** Average map for conditioned simulations

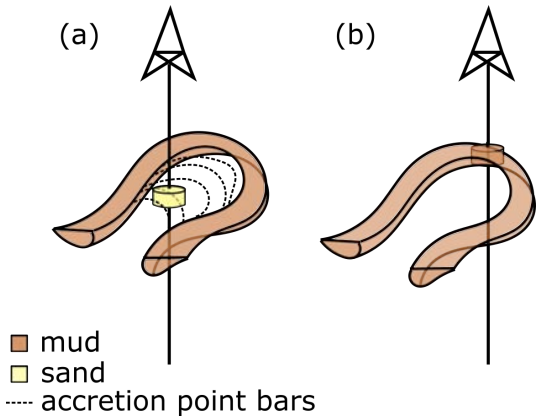


Figure 3.13 In both turbidite or fluvial contexts: **a** A sandy information with dipping structures indicates the location of lateral accretion point bars inside a meander loop. It can also indicate the main direction of migration, **b** A shaly facies indicates the last channel location before avulsion

3.4 Perspectives: conditioning to borehole data

A borehole data point indicates a positive or negative channel observation. In turbidite and fluvial contexts, a positive channel data point corresponds to a shaly facies and a sandy facies to point bar aggradation location [Toonen et al., 2012, Jobe et al., 2016] (Figure 3.13). As our approach is a geometric one we will only consider the borehole observation as channel presence or channel absence.

Then, to condition to a point bar borehole data such as described in Figure 3.13a, the abandoned meander should be placed so that the well falls in the green area of Figure 3.14. If the observed borehole data corresponds to the one described in Figure 3.13b, the sampling of the abandoned meander has to fit the blue area of the Figure 3.14. It depends on the information found (channel or non-channel data observation).

In order to facilitate the conditioning, we propose to sample the abandoned meander Hermite control points near the channel evidences (i.e., inside the dark blue half-disks for a channel observation) (Figure 3.14). Conditioning to non-channel data in fluvial context could be done through simulation of the rectangle so that the non-channel observation fits the center of the rectangle.

Conclusions

We have proposed a new tool to help the reconstruction of a channel belt evolution. The reverse migration workflow previously developed requires, indeed, to condition data far from the inflection point line to be able to reproduce the complete lateral extension of the meander belt. Most of the natural potential conditioning data such

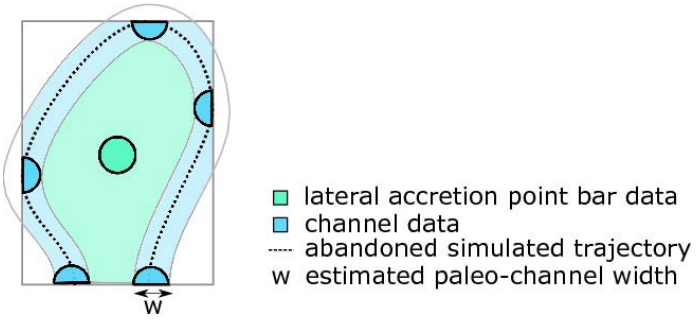


Figure 3.14 The simulation of an eroded abandoned meander can fit a borehole data. Indeed, a channel information corresponds to the blue area. In fluvial context, a lateral accretion point bar data corresponds to the green area. This kind of data can condition the orientation of the abandoned meander if paleo-migration direction is deducible from point bar orientation.

as the abandoned meanders are progressively eroded by the posterior evolution of the channelized system or progressively less accessible by imaging because of the increasing depth or recovering by reflecting structures. The presented automatic tool permits to overcome this difficulty by simulating the eroded ones on the basis of the geometry of the survival ones and main channel stream or analogs.

The shapes of the abandoned meanders that can be found in natural channelized contexts can be very complex. All these various shapes can not be encapsulated into a rectangle and controlled by the drawing of 5 points such as we propose in this work, especially for chute cutoff phenomenon. Detecting average dimensions and simulating simple abandoned meander shapes in a rectangle is thus a first step toward reproducing the natural structures. In order to fit to more complex shapes, considering a mere quadrangle could be more realistic. For the meander loops with more than one lobe, an octagon could be considered.

We can consider that simulated abandoned meanders gather eroded meanders and those which do not contrast on the seismic image. Thus, their location should be preferentially in the covered area from the previous, in a reverse approach, channel stages.

We have also proposed a way to fit to borehole data. The conditioning would, as a first approximation, be confined to areas near the sampled points. Finally, channel data could also indicate an avulsed channel. Conditioning to such precise data is an interesting perspective.

This geometric-based tool has been developed for a generic application to any kind of channelized systems. Application of this methodology to seismic or satellite images is an evident upcoming perspective.

Acknowledgments

This work was performed in the frame of the RING project (http://ring.georessources.univ-lorraine.fr/) at Université de Lorraine. We would like to thank for their support the industrial and academic sponsors of the RING-GOCAD Consortium managed by ASGA. The authors would also like to thank Paul Durkin for sharing the McMurray Formation seismic image (ConocoPhilips Canada courtesy). The software corresponding to this paper is available in the GoNURBS plugin of SKUA-Gocad. We also acknowledge Paradigm for the SKUA-Gocad Software and API.

Appendices

A Algorithm of the Abandoned Meander Simulation Method

The proposed algorithm for abandoned meander simulation requires as input data the main channel path centerline, the observed abandoned meander interpreted centerlines. The interpretation concerns the eroded parts. It can be integrated inside the reverse migration algorithm detailed in Appendix B of the Chapter 1 in the time step loop. The algorithm 3 is illustrated in Figs. 3.7.

Algorithm 3 Simulation workflow of eroded abandoned meander simulation for reverse migration integration

Input: N_r number of realizations wanted, E the probability distribution of erosion rate, the channel path digitization and probability distributions W and L of the desired dimensions of eroded abandoned meander or the list of identified abandoned meander digitizations O_i.
Output: N_r realizations of N_o number of eroded paleo-meanders inside N_s reverse migration steps
for s_k the current reverse migration time step $< N_s$ **do**
  if N_o non null **then**
    for each O_i identified abandoned meander **do**
      detect width and length as smallest and largest dimension
    end for
    update probability distributions W and L with observations
  end if
  determine the authorized simulation zone
  draw the number N_o of eroded structures to simulate inside E
  for each N_o eroded structures to simulate at this reverse migration time step s_k **do**
    sample its width and length inside W and L
    sample its location
    determine its orientation
  end for
  run the reverse migration algorithm
end for
return N_r potential geometries of channelized systems

Conclusions

1 Contributions de la thèse

1.1 Modélisation de systèmes chenalisés adaptée aux données disponibles en subsurface

Les méthodes de modélisation de systèmes chenalisés de subsurface sont aussi nombreuses que diverses. Chacune d'elles présente des avantages et des inconvénients différents qui guident leur utilisation préférentielle vers un certain type d'applications.

De façon à pouvoir travailler de façon générique sur la plus grande diversité possible de systèmes méandriformes, dans cette thèse, le choix a été fait de se concentrer sur le développement numérique en C++ d'une nouvelle méthode. Celle-ci est basée sur les paramètres les plus accessibles sur des systèmes étudiés uniquement au moyen d'imagerie à distance. Les paramètres physiques et hydrodynamiques n'étaient donc pas éligibles, au contraire des paramètres géométriques. En effet, ceux-ci sont étudiables dès que la résolution de l'acquisition permet de deviner la présence d'un axe fossile d'un chenal. L'axe central du chenal principal et des boucles abandonnées a donc été choisi comme paramètres principaux de modélisation (Figure 1).

L'aspect rétro-chronologique de la méthode de migration proposée (Chap. 1, [Parquer et al., 2017]) permet le conditionnement des vestiges du dernier état du système, souvent difficile avec d'autres approches (Figure 2). Pour cela, elle assimile ces observations comme point de départ de la simulation (Figure 2). Il faut donc que la ligne centrale du chenal puisse être digitalisée. C'est souvent le cas grâce à la différence de remplissage pétrophysique entre le chenal et la ceinture de méandres environnante. Cette différence se traduit par un contraste sur l'imagerie de surface ou de subsurface. En cas de contraste ou de résolution insuffisante, une méthode de simulation peut être utilisée pour reconstituer le premier chenal. Par exemple, la méthode basée L-systèmes de Rongier et al. [2017b] permet de simuler des chenaux en honorant des probabilités de faciès combinées ou non à des données de puits.

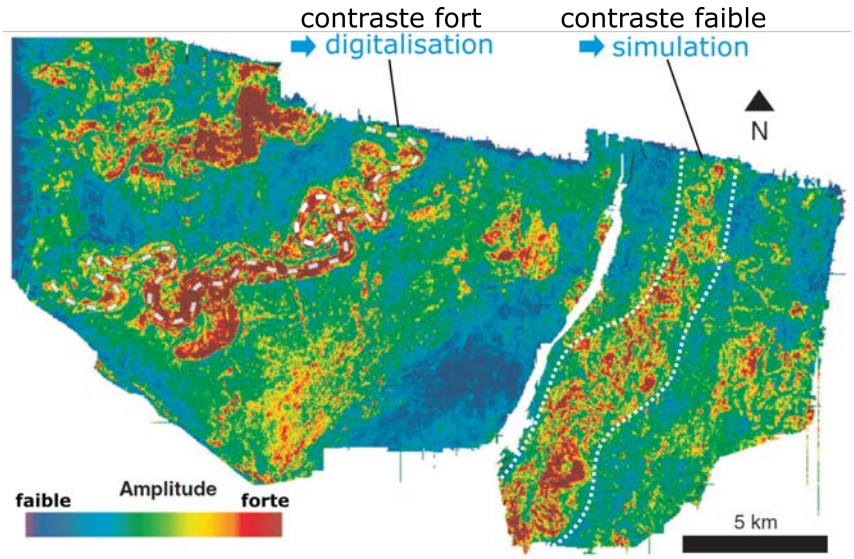


Figure 1 Variabilité de la résolution de l'image sismique et influence de celle-ci sur l'information disponible. Modifié d'après Sikkema and Wojcik [2000]

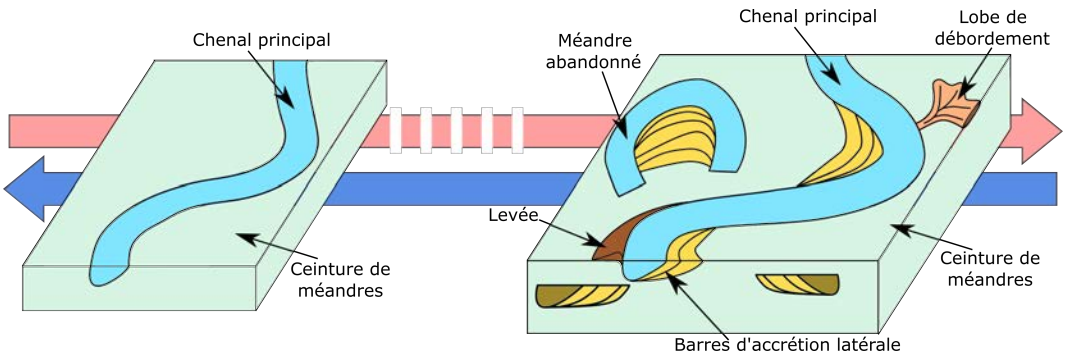


Figure 2 Une approche rétro-chronologique est adaptée à la modélisation des systèmes dont seul l'état final est connu. En effet, l'état initial inconnu peine à servir de départ d'une modélisation chronologique.

La méthode proposée ici permet de conditionner à des données sismiques ou satellites qui n'avaient pas été considérées jusqu'à présent : les méandres abandonnés. En effet la construction du chenal principal par des NURBS permet de considérer l'intégration d'autres morceaux de chenal, grâce à une re-définition [Ruiu, 2015] et une repamarétrisation (Annexe C) de son maillage de contrôle. De cette manière, le conditionnement de tous types de traces de paléo-trajectoires telles que des barres d'accrétion latérale est envisageable à condition qu'elles soient digitalisables. La modélisation géométrique rétro-chronologique permet de reconstruire tout type de motif d'empilement de structures sédimentaires.

1.2 Modélisation géométrique inspirée d'analogues sédimentaires

L'un des écueils à reproduire préférentiellement les paramètres géométriques pour la modélisation est de perdre en précision géologique qui est quant à elle apportée dans d'autres méthodes par la prise en compte des processus physiques responsables des dépôts. Pour cela, la méthode proposée repose également fortement sur des analogues. Par exemple, les cartes historiques du Mississippi représentant quatre paléo-trajectoires entières sur 1200 kilomètres et couvrant près de 200 ans [Fisk, 1944] forment un analogue intéressant à étudier. Le caractère public de ces données combiné à leur richesse est unique. En effet, des bases de données ont déjà été créées mais restent privées comme par exemple FAKTS (Fluvial Architecture Knowledge Transfer Store), SMAKS (Shallow-Marine Architecture Knowledge Store) et DMAKS (Deep-Marine Architecture Knowledge Store) [p. ex. Colombera et al., 2012, 2016, Cullis et al., 2017].

L'analyse du Mississippi nous a permis de calibrer notre modélisation de migration rétro-chronologique par la découverte d'une corrélation entre la courbure du chenal et sa migration horizontale à l'échelle d'un demi-méandre (Chap. 1). Les cartes historiques du Mississippi ont également été utilisées pour la définition de distributions de probabilité des divers types de migration (Chap. 1), d'abandon (Chap. 2), d'érosion et de dimension (Chap. 3) des méandres.

1.3 Gestion des lacunes d'enregistrement sédimentaires

Les imageries de surface ou de subsurface ne permettent pas toujours d'obtenir en détails l'histoire et la géométrie complète du système étudié. En effet, les limites de l'acquisition sismique ou l'érosion de traces anciennes par des dépôts plus récents occasionnent des hiatus plus ou moins longs dans l'enregistrement sédimentaire. L'érosion est partie intégrante du phénomène de migration qui érode du côté externe du chenal et dépose du côté interne. Elle intervient dans les contextes sédimentaires avec un assez fort hydrodynamisme comme les systèmes méandriformes [p.ex Morvan et al., 2002].

Pour obtenir une estimation de cette chronologie, une analyse manuelle plus poussée qu'une digitalisation 2D ou des techniques d'exploration plus intrusives que des imageries à distance sont nécessaires.

La cohérence du modèle, proposé en chapitre 1 tient dans la définition des moments d'intégration des différents objets dans le chenal principal et donc à l'estimation du moment d'abandon des structures qui est souvent difficile à évaluer à cause du remaniement perpétuel de la ceinture de méandres. La technique de simulation de la chronologie des méandres abandonnés présentée en Chap. 2 permet une modélisation semi-automatisée des chronologies relatives des différentes structures observées. Cela est possible grâce à l'utilisation des motifs d'érosion et de la probabilité d'intégration, elle-même guidée par la connaissance des analogues sédimentaires et la localisation relative entre le chenal courant et le méandre abandonné à replacer dans la chronologie.

L'approche proposée ici dépend beaucoup de la préservation et de la visibilité des structures pour l'extension du système à la ceinture de méandres. De façon à pallier cette disparition inévitable des indices des paléo-trajectoires, une simulation de celles-ci a été proposée à partir des données accessibles (Chap. 3). Elle se base, comme pour la modélisation globale de migration rétro-chronologique, sur l'analyse des paramètres géométriques et sur l'incorporation de données de systèmes analogues.

2 Perspectives

2.1 Vers plus de vraisemblance géologique

Extension de la base de données à d'autres paléosystèmes que le Mississippi

Les outils et méthodes numériques présentés dans cette thèse se basent sur l'analyse géométrique d'analogues sédimentaires. Les analyses de la corrélation entre la migration, la migration rétro-chronologique et la géométrie du chenal principal (Chap. 1) ont été réalisées sur les cartes du Mississippi de Fisk [1944]. Il en est de même pour l'étude sur le taux d'abandon (Chap. 2) et d'érosion (Chap. 3) de méandres par étape de temps.

L'étude de ce système permettait donc une première approche. Cependant il faudrait l'enrichir d'autres bases de données provenant d'autres lieux, dans d'autres contextes géologiques et sur d'autres périodes temporelles. Les principes géométriques et probabilistes de la méthode, en opposition à une méthode basée sur des principes physiques et déterministes, permettent d'envisager l'intégration de nouvelles données.

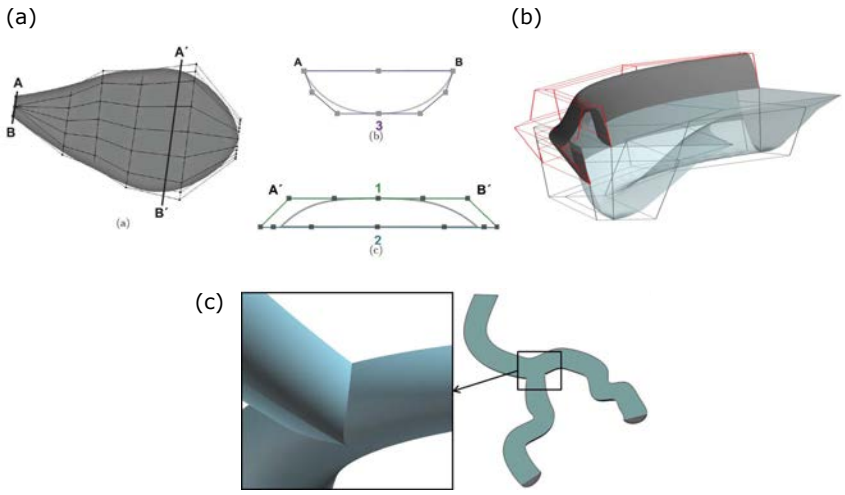


Figure 3 Modélisation des objets géologiques par des NURBS **a** Lobe de débordement [Ruiu, 2015] **b** et levées. **c** Les NURBS permettent la connection des objets entre eux. Ici, cette possibilité de connection est illustrée par une avulsion. [Ruiu et al., 2016]

Diversification des objets simulés

La méthode proposée dans cette thèse se focalise sur le chenal principal, ses méandres abandonnés et ses barres d'accrétion latérales. Bien qu'ils soient les figures majeures du système chenalisé en termes volumiques et que le chenal soit la structure motrice de tout le système, ils ne représentent pas la totalité des dépôts. D'autres objets ont été modélisés par des NURBS [Ruiu, 2015] de la même façon que les chenaux dans notre méthode. Parmi eux, des modèles de lobes de débordement ou des levées (Figure 3) pourraient être utilisés pour une modélisation plus exhaustive du système dans sa globalité.

Pour cela, des règles géométriques et des probabilités d'occurence devraient être issues des bases de données fluviatiles ou turbiditiques à disposition.

Avulsion

Il est possible de conditionner aux avulsions exactement de la même façon qu'aux méandres abandonnés. Néanmoins, leur effet sur la chronologie globale ne serait pas le même. Quelques ajustements techniques seraient donc nécessaires dans la méthode pour les prendre en compte de la même façon que les méandres abandonnés.

Par ailleurs, l'intégration difficile de certains méandres abandonnés peut être due à l'appartenance de ceux-ci à une autre ceinture de méandres (Figure 4). Le

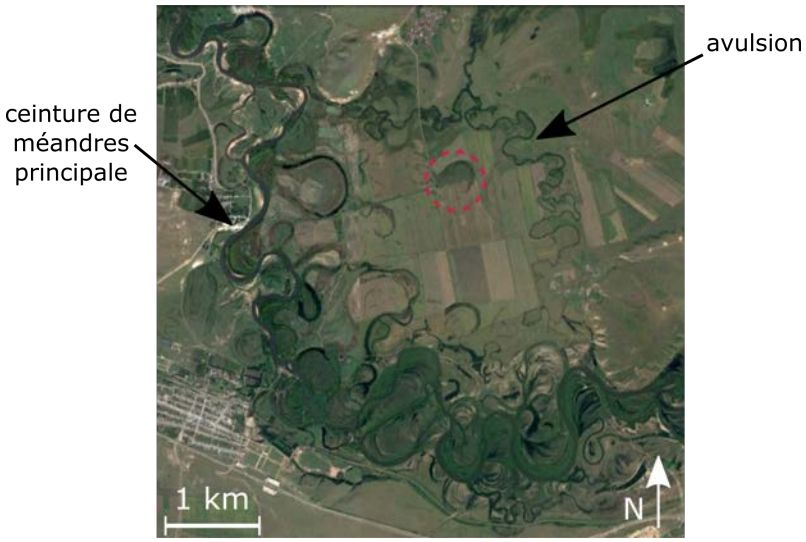


Figure 4 Image satellite d'une avulsion locale de la rivière Hailar (Chine). La ceinture de méandres située au nord-est n'est pas la principale. L'intégration du méandre central entouré en rouge n'est possible dans l'approche proposée de migration rétro-chronologique que si la date et la géométrie de l'avulsion sont connues. [Google Earth $49°12'48.56"N\ 120°07'35.21"E$]

phénomène de l'avulsion est brutal et peu prévisible même encore aujourd'hui avec des considérations physiques. La géométrie de ces évènements, ainsi que leur fréquence d'occurrence ont néanmoins été très étudiées [Stouthamer and Berendsen, 2001, Slingerland and Smith, 2004, Hajek and Wolinsky, 2012, Gupta et al., 2014]. La prise en compte de ces études permettrait une première approche de modélisation quand les paramètres physiques sont peu accessibles comme dans les observations de paléo-systèmes en profondeur.

Dans le cas d'une volonté d'intégration d'un méandre isolé, la simulation d'une avulsion orientée vers le méandre abandonné visé pourrait être utilisée. Par exemple, la méthode de L-systèmes de Rongier et al. [2017b] pourrait être envisagée par création d'une nouvelle trajectoire à conditionner avec la direction et/ou le point ciblé.

2.2 Vers plus de conditionnement des données

Conditionnement des données de puits

Le conditionnement des données de puits est possible dans les méthodes de modélisation dites statiques. Les données de puits indiquent localement la présence d'un

faciès (sableux ou argileux). Ce faciès peut être traduit par la présence de barres d'accrétion latérale ou d'une figure d'abandon. Le respect du modèle à ces informations est le plus souvent géré par des champs d'attraction ou de répulsion par rapport aux points de données. Ces techniques donnent de bons résultats avec les méthodes statiques. Les méthodes de modélisation dynamiques ne gèrent que difficilement les données de puits [p. ex. Labourdette et al., 2006, Pyrcz et al., 2015, Ruiu, 2015, Rongier et al., 2017a].

La simulation de méandres abandonnés permet d'envisager un conditionnement relativement facile des données de puits (Chap. 3).

La localisation de barres d'accrétion latérale indique forcément la présence d'une paléo-boucle de méandre autour de ce point. L'orientation des barres d'accrétion latérale peut préciser l'orientation et le dimensionnement du méandre. Ainsi la simulation d'une boucle de méandre autour ou sur le puits permet de conditionner au faciès observé.

Nous ne considèrerions pas ici les données de puits indiquant un faciès de lobe de débordement ou de levée car ces structures ne sont pas prises en compte dans notre méthode de modélisation par migration rétro-chronologique (Sect. 2.1). Leur prise en compte est donc une perspective à moyen terme de ce travail.

Extrapolation de parties de méandres abandonnés érodés

L'érosion peut effacer complètement ou en partie les méandres abandonnés. Une érosion complète peut être en partie compensée par une simulation de boucles de méandres dans la ceinture de méandres selon les probabilités de distributions observées dans les analogues sédimentaires (Chap. 3).

En cas d'érosion partielle, l'interprétation de la forme originelle de la structure au moment de son abandon est nécessaire pour reproduire au mieux la connexion entre le chenal et le méandre. Cette interprétation est sujette à l'appréciation de l'utilisateur (Figure 5). Une simulation stochastique des parties érodées, inspirée d'analogues sédimentaires, serait préférable pour envisager l'univers des possibles en matière de géométrie.

Accessibilité des données excentrées dans la ceinture de méandres

Malgré un conditionnement de la migration rétro-chronologique aux méandres abandonnés observés facilité par une simulation de la chronologie selon la position relative des différentes structures, et une attraction ou répulsion du système en cas de non compatibilité de configuration, certains méandres abandonnés ne sont pas intégrés.

La simulation d'une avulsion peut être envisagée comme évoqué plus haut. Néanmoins, si le méandre concerné appartient à la même ceinture de méandres que

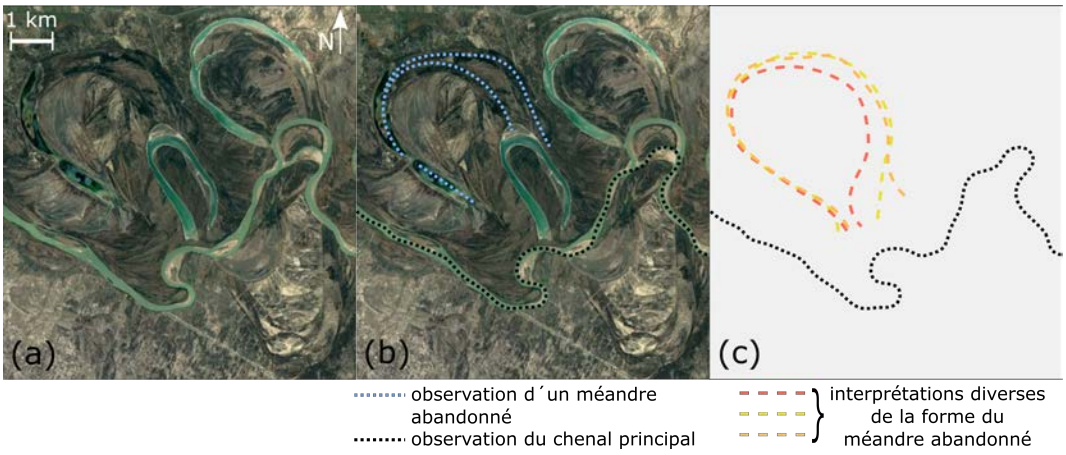


Figure 5 **a** Image satellite d'un méandre abandonné en partie érodé de la rivière Syr-Daria (Kazakhstan). **b** Observations de paléo-trajectoires possibles sans incertitude **c** Diversité des interprétations possibles de sa géométrie originelle et conséquences sur la reconstitution du système chenalisé [Google Earth $43°57'43.41"N\ 66°50'38.18"E$]

celle en cours de simulation rétro-chronologique, il serait possible de concentrer la simulation de méandre abandonné à la zone comprise entre le chenal principal et l'observation de méandre abandonné (Figure 4). Ainsi, le chenal serait progressivement rapproché, par l'intégration successive dans le chenal principal de boucles de méandres simulées, de la zone où a été observé le méandre abandonné et la probabilité d'intégration du méandre concerné augmenterait à chaque étape de temps (Sect. 2.1).

Intégration d'informations sur le contexte de dépôt global

La méthode de migration présentée permet de prendre en compte des paramètres géologiques locaux comme la géométrie du chenal principal. Néanmoins, d'autres paramètres plus globaux peuvent influencer la migration d'un système (p. ex. tectonique, climat, érodibilité de l'encaissant, charge sédimentaire) (Figure 6) [p. ex. Schumm, 1986, Leeder, 1993, Holbrook and Schumm, 1999, Blum and Törnqvist, 2000, Bourquin et al., 2006].

Il serait possible de prendre en compte ces paramètres globaux par l'intermédiaire de champs de vecteurs qui traduiraient leur influence effective sur la géométrie de migration du système. Ces vecteurs s'ajouteraient facilement aux vecteurs de migration et influenceraient directement la simulation de la migration du système.

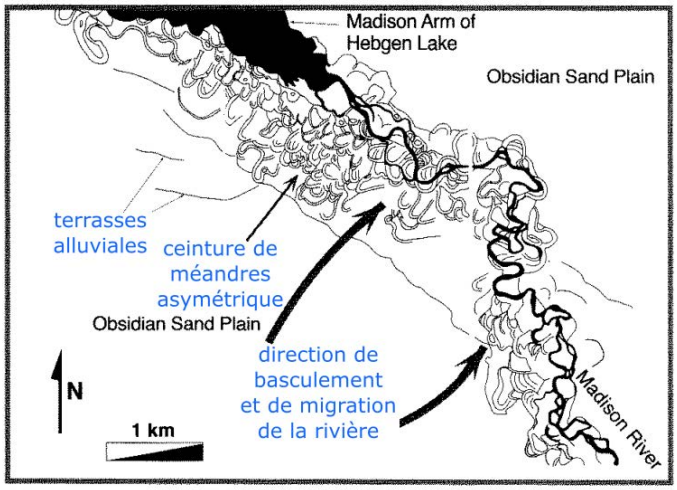


Figure 6 La migration d'un chenal est influencée par la tectonique régionale. Modifié d'après [Burbank and Anderson, 2000].

Conditionnement de la largeur du chenal observée sur l'image sismique

La largeur locale du chenal telle qu'elle est observée sur l'image sismique peut être intéressante à respecter exactement. En effet, sa connaissance pourrait aider à la modélisation de la migration du chenal. Plusieurs études ont proposé un lien entre rayon de courbure, largeur locale du chenal et taux de migration [p. ex. Howard, 1996, Sylvester et al., 2017]. Par ailleurs, la reproduction de la largeur permettrait de reproduire plus fidèlement le volume du dernier chenal. Cependant, la résolution des images sismiques ne permet pas toujours d'avoir accès à cette information. De plus, celle-ci évolue beaucoup le long d'un même demi-méandre. Il est donc difficile d'automatiser son évaluation à moins de faire appel à une méthode de type "analyse d'images". Par exemple, sur des objets NURBS, Ruiu [2015] a proposé une technique automatique de calage aux données sismiques en matière de largeur de l'objet.

Cet outil permet par l'analyse de l'image sismique via divers filtres de repérer les réflecteurs les plus importants et continus traduisant les bords du chenal. Ainsi, les surfaces NURBS de l'objet chenal modélisé sont attirées peu à peu par optimisation. Malgré de bons résultats en 2D, cette méthode nécessiterait encore quelques améliorations pour être appliquée en 3D. Par ailleurs, elle nécessite des données d'entrée d'images sismiques avec de bons contrastes sur les réflecteurs de façon à bien définir les bords du chenal à atteindre.

De plus, le conditionnement de la largeur observée ne peut être effectif que pour le chenal le mieux observé soit le dernier de l'enregistrement sédimentaire, ce qui réduit l'influence de l'utilisation d'une telle méthode.

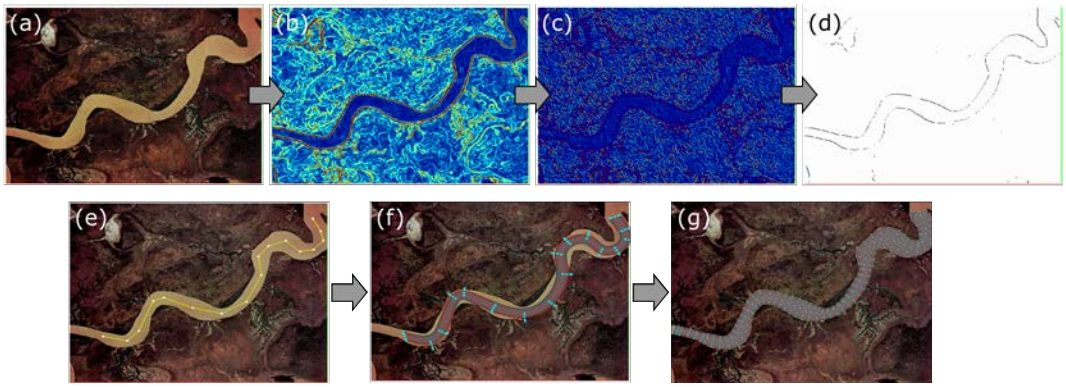


Figure 7 Détection automatique de formes géologiques par application de divers filtres d'analyse d'images et déformation d'objets NURBS. **a** Image satellite **b** Détection de bords **c** Affinement des bords **d** Seuillage des bords **e** Interprétation manuelle de la ligne centrale du chenal **f** Création d'un volume NURBS **g** Déformation du volume pour atteindre les bords détectés. Modifié d'après [Ruiu, 2015] South Alligator river, Australia [Google Earth, 2012]

2.3 Vers une adaptation à la simulation d'écoulement

Considération des surfaces d'érosion dans le modèle final

La méthode de migration proposée dans cette thèse reproduit l'empilement des structures chenalisées dans un ordre rétro-chronologique. Cependant, la gestion des érosions successives des structures reste une perspective d'amélioration de l'implémentation actuelle (Figure 8). En pratique, l'utilisation de NURBS, à la définition paramétrique et continue ne permet pas la modélisation de surfaces d'érosion ou de discontinuité. Les NURBS tronquées [Piegl and Tillert, 1998, Sederberg et al., 2008] ont le potentiel de représenter de telles surfaces tout en envisageant la prise en compte des érosions successives dans des approches chronologiques.

Prise en compte des hétérogénéités de surface

L'approche de modélisation présentée par migration rétro-chronologique s'attache à reproduire au mieux les empilements des chenaux successifs. Elle permet ainsi de représenter en 3D la juxtaposition des corps géologiques et donc de considérer les relations entre les objets.

Cette connectivité peut être modifiée par des hétérogénéités de surface qui peuvent exister sur les surfaces d'érosion des différents corps géologiques (Figure 9). Ainsi, des drapages d'argile déposés sur les surfaces érosives des chenaux peuvent constituer des barrières à l'écoulement des fluides. Une simulation de ces objets en

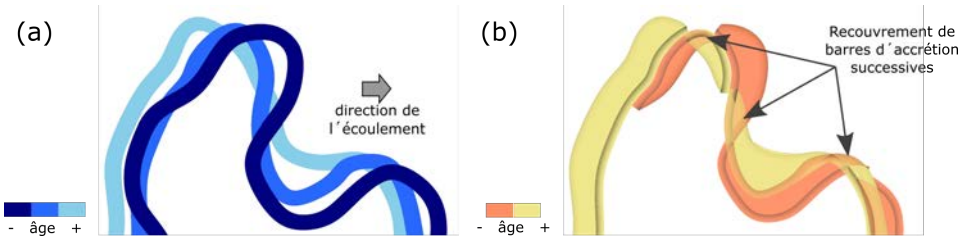


Figure 8 La simulation dynamique des systèmes chenalisés implique la nécessité de prendre en compte, pas de temps par pas de temps, l'érosion des structures entre elles. Ici, ceci est illustré avec des barres d'accrétion latérale issues d'un processus de migration rétro-chronologique. **a** Migration rétro-chronologique d'un chenal **b** Construction des barres d'accrétion latérale à chaque pas de temps. Des zones de recouvrement apparaissent, elles devraient se traduire par une érosion des dépôts anciens par les dépôts plus récents.

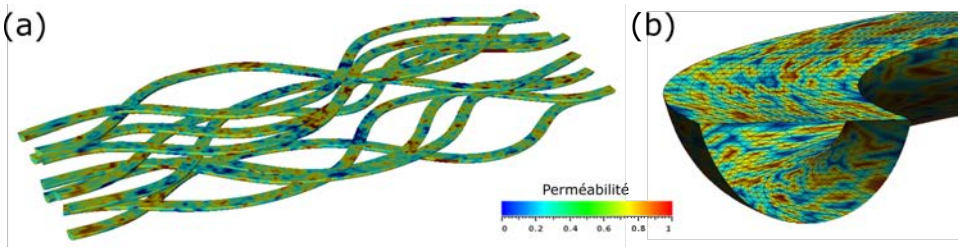


Figure 9 Simulation d'hétérogénéités surfaciques sur les surfaces paramétriques NURBS de chenaux avec une Simulation Séquentielle Gaussienne (SGS) non conditionnée à des données géologiques **a** Vue d'ensemble d'un système de chenaux **b** Vue en section d'un chenal. Modifié d'après [Parquer et al., 2014].

prenant en compte leur volume, extension et perméabilité est donc indispensable à une simulation d'écoulement.

Une première approche de solution a été développée dans mon travail de master [Parquer et al., 2014]. Les NURBS permettent, grâce à leur définition paramétrique intrinsèque, de définir des propriétés de surface. Il est donc possible de simuler directement sur la paramétrisation de l'objet les hétérogénéités de surface grâce à des méthodes géostatistiques classiques (p. ex. Simulation Séquentielle Gaussienne ou d'Indicatrices) (Figure 9).

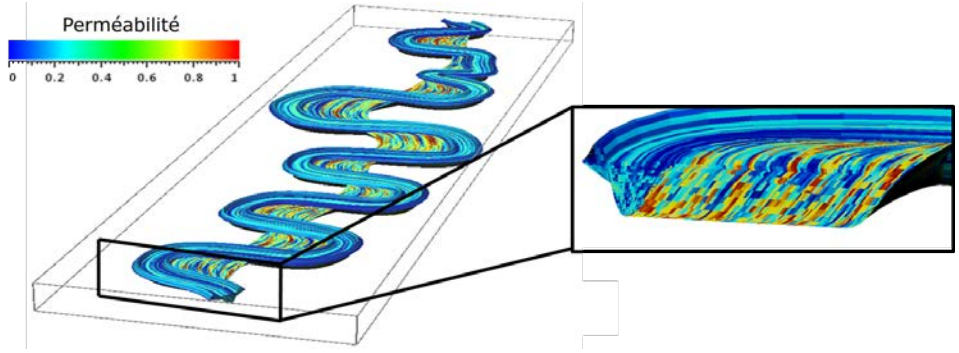


Figure 10 Simulation de perméabilité dans le chenal principal et les barres d'accrétion latérales issues de la migration du chenal principal. Modifié d'après [Ruiu, 2015].

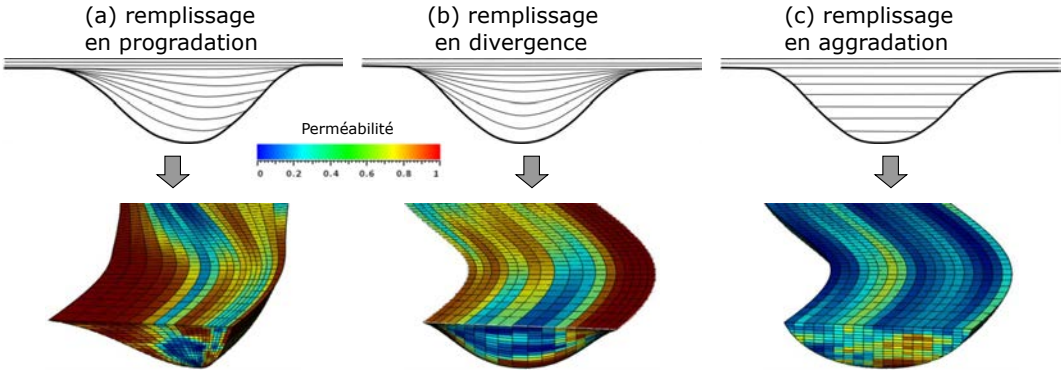


Figure 11 Diversité des grilles possibles pour le chenal principal selon le contexte de dépôt. Modifié d'après [Ruiu, 2015].

Remplissage des hétérogénéités

Les hétérogénéités peuvent également se situer à l'intérieur des chenaux et avoir un impact sur l'écoulement et le volume de réservoir de roches poreuses.

La simulation de ces hétérogénéités est utile et pourrait être envisagée par exemple avec des méthodes géostatistiques de type SGS ou SIS sur la grille interne à l'objet chenal en NURBS développé par Ruiu [2015] (Figure 10) qui permettent de reproduire aussi le type de contexte de dépôt (Figure 11). Parmi les différents types de contextes de remplissage, le remplissage en progradation, en divergence ou en aggradation [McKee, 1957, Reineck and Singh, 1973]. D'autres techniques de remplissage des propriétés pétrophysiques pourraient aussi être envisagées [p.ex. Xu, 1996, Wen et al., 1998].

Simulation d'écoulement de fluides

Une fois les objets remplis des hétérogénéités surfaciques et internes, la modélisation de l'écoulement interne serait intéressante à simuler. Les principaux obstacles à une simulation directe est la difficulté de maillage des diverses hétérogénéités et de leur mise à l'échelle des mailles de simulation d'écoulement des logiciels courants.

L'utilisation d'un logiciel de simulation d'écoulement tel que CSMP++ (Complex Systems Modelling Platform ++) [Matthäi et al., 2007] ou IC-FERST [Jackson et al., 2015, Melnikova et al., 2016] pourrait être envisagé pour utiliser un maillage non-structuré du système chenalisé complet. Un tel maillage permet une plus grande liberté dans la représentation des hétérogénéités et d'autres zones d'intérêt.

Application à des données réelles 3D fluviatile/turbiditique

Les méthodes et outils présentés ici ont été appliqués sur des données satellites ou sismiques 2D. De telles applications ne permettent pas de mettre à l'épreuve la modélisation de la composante verticale de la migration rétro-chronologique. Il serait donc intéressant de tester la migration rétro-chronologique 3D sur des données 3D elles-aussi.

Enfin, les applications proposées ici sont essentiellement fluviatiles ou tidales. Par ailleurs, la méthode est principalement inspirée d'un analogue sédimentaire fluviatile. Afin de démontrer l'applicabilité de la méthode développée au contexte turbiditique, il faudrait enrichir la base de données par des contextes turbiditiques et tester la méthode sur des cas turbiditiques.

En conclusion, cette thèse propose une méthode de migration rétro-chronologique combinée aux techniques de simulation de chronologie et de simulation des structures érodées. Cette approche permet d'envisager des applications diverses à partir d'informations géologiques variées jusqu'à aujourd'hui ignorées en tant que données conditionnantes. Les premières applications sur des données 2D sont encourageantes dans l'attente d'une ou plusieurs applications en 3D.

Enfin, le travail effectué ici sur les chenaux méandriformes montre qu'une modélisation rétro-chronologique purement géométrique est possible et donne des résultats prometteurs. Il pourrait être intéressant de chercher à mettre en place d'autres méthodes de ce type pour divers contextes de dépôts sédimentaires (p.ex. éolien).

Appendix A

Modélisation de l'asymétrie du chenal

En section, les chenaux présentent des sections asymétriques d'un côté ou de l'autre selon la courbure de celui-ci [e.g., Hickin, 1974, Knighton, 1982, Peakall et al., 2000, Deptuck et al., 2007]. Cette asymétrie a été observée dans les systèmes turbiditiques et fluviatiles [e.g., Abreu et al., 2003, Babonneau et al., 2010, Reimchen et al., 2016].

C'est cette asymmétrie qui régit et entretient le méandrage du chenal. L'asymétrie est d'autant plus marquée que l'hydrodynamisme est fort.

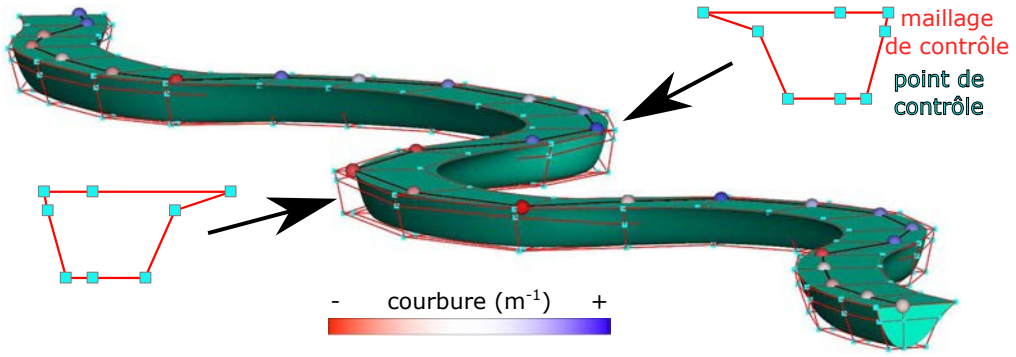


Figure A.12 Prise en compte de la corrélation entre la courbure du chenal et l'asymétrie de sa section dans la modélisation volumique par NURBS d'un chenal

La reproduction de cette asymétrie est indispensable dans une optique de reconstruction fidèle de l'empilement des structures chenalisées.

La modélisation des chenaux par leur enveloppe NURBS a été précisée en déviant la ligne centrale des points de contrôle d'un côté ou de l'autre du chenal.

(p) **M. Parquer**, Q. Corlay*, P. Marchive* (2017) *Improvements in reconstruction of channelized system stacking patterns.*, 2017 RING Meeting, Nancy, France

Appendix B

Simulation des hétérogénéités surfaciques des chenaux

Context Les réservoirs clastiques présentent des architectures internes complexes. Des hétérogénéités de toutes sortes peuvent y être observées, certaines souvent fines mais d'extension variable. Elles sont observées sur les surfaces érosives des chenaux.

Selon leur forme, leur étendue et leur nature, elles peuvent former des barrières à l'écoulement et influer de manière importante sur la connectivité des réservoirs.

Ce travail de master a porté sur la simulation de ces hétérogénéités sur les surfaces des objets modélisés par des NURBS. Les NURBS sont des surfaces paramétriques permettant la définition d'un repère local à la surface. Il permet la simulation de propriétés pétrophysiques par des méthodes géostatistiques directement sur la grille surfacique.

Une méthode de mise à l'échelle d'une grille réservoir est proposée. L'application à une simulation d'écoulement est une perspective à court terme.

M. Parquer, J. Ruiu, G. Caumon (2015) *Simulation of Surface Petrophysical Heterogeneities on Sedimentary Objects*, EAGE Petroleum Geostatistics Biarritz

PETROLEUM 2015
GEOSTATISTICS

Th P11

Simulation of Surface Petrophysical Heterogeneities on Sedimentary Objects

M. Parquer* (Université de Lorraine), J. Ruiu (Université de Lorraine) & G. Caumon (Université de Lorraine)

SUMMARY

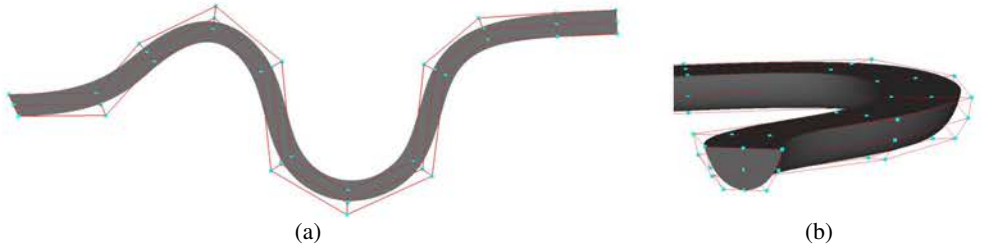
Accurate modelling of all scales of heterogeneities is necessary for a precise flow modelling inside clastic reservoir. We propose to simulate small scale heterogeneties that can be deposed at the interface between sedimentary structures (e.g. between accretion figure in channel point bars).
The geometries of the considered sedimentary structures are modelled as boundary representation using the Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) mathematical formulation. This representation of various sedimentary objects (channel, point bar, clinoform, lobe and levee) provides a curvilinear framework for petrophysical properties simulations. The spatial distribution of petrophysical properties such as permeabilities has been simulated using unconditional Sequential Gaussian Simulations (SGS). An upscaling is then performed in order to integrate the surface properties into flow simulation grid. Nevertheless, these features are often very thin and local and cannot be upscaled to a complete reservoir grid cell. Thus, these interface small-scale disparities are considered as transmissibility multipliers applied to the faces of the grid's cells. Moreover erosion due to the deposit of other geobodies can modify the repartition of surface heterogeneities. Thus, order of deposit and erosion between objects are taken into account through all these procedures.

Introduction

Clastic deposits can represent interesting reservoirs because of their potential important Net-To-Gross ratio despite the presence of shale. Detrital reservoirs (e.g. fluvial, turbiditic, deltaic) are often affected by complex heterogeneities controlled by the architecture of sedimentary objects, expressing the depositional contexts and processes (Miall, 1996). Sedimentary objects show various shapes and dimensions (e.g. channel, lobe, point bars, levee). These structures can be draped by thin shales at multiple scales (from ripple to genetic sequence) (Miall, 1996; Posamentier and Kolla, 2003).
These facies can compartmentalize the reservoir or modify the flow path and thus have impacts on the displacement phenomenon, recovery factor or field understanding (Jackson and Muggeridge, 2000; Jackson et al., 2009; Issautier et al., 2013). Complete integration of heterogeneities inside reservoir model is thus crucial for accurate flow simulation (Pranter et al., 2007). However, these elements can be very local and thin (Alpak et al., 2013) making them challenging to be integrated inside geological models.
The spatial distribution of surface heterogeneities can be simulated as proposed by Stright et al. (2006) who uses a Multiple Point Statistics Simulation method which permits to simulate the location of mud drapes along the channel but without considering the variety of geometries and orientations of these features. Another possibility is to adopt the method described by Yin (2013) who chooses a triangle distribution simulation to simulate mud drapes inside point bars which permits to respects the relation between these heterogeneities and the sedimentary elements but also the variety of size and orientation. These heterogeneities can be upscaled to reservoir scale using transmissibility multipliers as did Stright et al. (2006) in order to integrate them into the reservoir simulation grid.
In this paper, we propose to model small interface heterogeneities on NURBS based sedimentary objects developed by Ruiu et al. (2014). NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) are parametric surfaces which offer a great flexibility and precision in shape modelling. The principle is to deform theoretical reference boundary representations of objects so that meandering rivers, point-bars and lobes are generated. The technique used in this paper for the simulation of surface heterogeneities has been applied only on channels because it is the central structure around which the others are organized and it presents many types of disparities. The method corresponds to an unconditional Sequential Gaussian Simulation (SGS). It permits to generate the spatial distribution of these thin shales without strict geometrical constraints and randomly on the interface of the geobodies. Finally, reservoir models integrating heterogeneities can be upscaled to Eclipse software for flow simulation to study the relative influence of surface disparities, number of objects and variety of depositional environments.

Modelling sedimentary elements with NURBS

Many studies have been conducted on the modelling of sedimentary objects. The different approaches can be either probabilistic (e.g.Hassanpour et al. (2013); Stright et al. (2006)) or deterministic (e.g.Pyrcz et al. (2009)) and rely on different types of parameterisations. Hybrid methods also exist which try to mix advantages and to mitigate inconvenients of both approaches (e.g.Lopez (2003)).
In particular, Ruiu et al. (2014) proposed to use NURBS to model a catalog of sedimentary structures (channel, point bar, clinoform, levee, lobe). NURBS are a mathematical model commonly used in



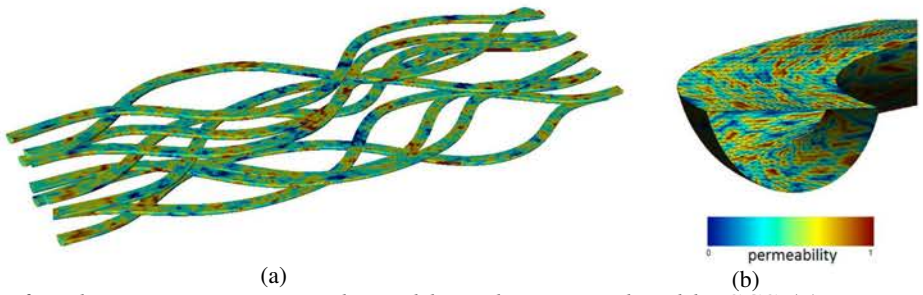
(a) (b)

Figure 1 *Modelling of a channel using 5 NURBS surfaces. Red lines are the control point net and the blue points are control points. (a) Map view (b) Cross view.*

computer-aided design (CAD) for representing curves, surfaces and solids. An example of parameterisation is showed in Figure 1 for a channel. Using NURBS allows to generate flexible and compact models of sedimentary objects defined by their bounding surfaces created as parameterised deformable surfaces. The main advantage of this approach is that the object can be divided into discretized faces between control points. The work described here rely on the use of this object-based modelling method to generate geobodies on which simulation of surface heterogeneities is advantageous.

Simulation of surface heterogeneities

Before simulating anykind of property on the boundaries of objects, surface property implementation has been done on surfaces of NURBS objects and has been an important part of this project. The discretization of the surfaces of the objects creates a curvilinear space used as a parametric framework to simulate surface properties such as porosity or permeability. The precision of the framework is defined by the user and so can be adapted to the kind of property simulated. Then, the filling of such database is done for these surface heterogeneities of sedimentary objects.
Interface permeabilities are simulated using SGS as showed in Figure 2. This technique permits to simulate the location of the shale drapes randomly on the interface of the geobody and with specifical dimension characteristics or density. Shale drapes do not have a precise geometry and dimension. So one of the advantages of using SGS method is that depending on the kind of variogram chosen, the elements can be more or less elongated in one or two directions.



(a) (b)

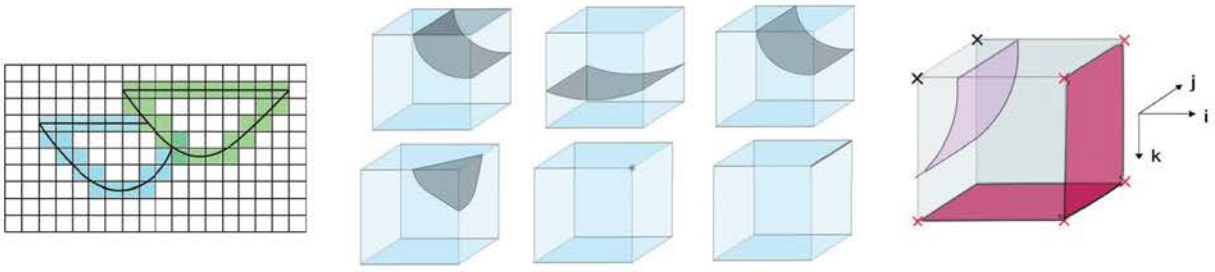
Figure 2 *Surface heterogeneities on a channel boundaries simulated by SGS (a) Map view (b) Cross view.*

Upscaling of surface heterogeneities

In order to study the impact of surface heterogeneities on the fluid flow, a method is required to transfer the surface heterogeneities into the simulation grid. Usually, this grid is coarser than the modelled details. Thus, property values of a cell are upscaled to a bigger cell of simulation through an harmonic or arithmetic mean of all the values to be considered in a simulation cell (Durlofsky, 2003). Nevertheless, surface heterogeneities are too thin and local to be assimilated to a complete cell of simulation grid. So the idea is to render the barrier behaviour of these shales as a property borne by the faces of the grid cells. The proposed approach starts with the detection of the list of grid cells intersected by the object boundaries permitted by a method developped by (Ruiu et al., 2014) (Figure 3(a)).

Rasterization of NURBS surface

The NURBS surface can cross the faces of the cells of the simulation grid by many ways (Figure 3(b)). Determination of a systematic technique which would be applicable to every cases is needed. Only external faces of intersected cells are kept. For each cell which is cut by the NURBS surface, each corner point is tested for inclusion in the geobody (Figure 3(c)). If all the corners of a face are found external to the object and if the face is not intersected by the object itself, the corresponding face is external and composes the rasterization of the object.
In the case of a channel belt deposit, younger structures erode and recover older ones. Considering



(a) (b) (c)

Figure 3 *(a) Detection of grid cells intersected by channel boundaries and accounting for the deposit order and erosional process. The blue channel is the oldest one and is rasterized in first. The rasterization of the green one erases the part geologically eroded. (b) Diversity of intersection between NURBS surface in grey and reservoir grid cells in blue. (c) Rasterization technique of NURBS surface in pink into grid. Red points are outside the object while black ones are inside.*

the deposit order and the erosional process is crucial to model the last mud deposits preserved. The algorithm rasterizes the structures one after each other according to the order of deposit described by Miall (2010) from the older to the younger one. Therefore, each time a younger structure eroding another is rasterized, the part eroded is erased by the new rasterized envelope (Figure 3(a)).

Principle of transmissibility multipliers

The rasterized faces are upscaled to the reservoir grid as transmissibility multipliers applied on faces in order to transfer the small scale surfacic permeability information in the grid. The discretization of flow barriers for the flow simulator permits to respect the thickness and the orientation of heterogeneities.
In corner-point grid-based flow simulator software as Eclipse, three different components of the transmissibility multiplier exist for the three directions of the space X, Y and Z (Figure 4(a)) and control the flow between two nodes as explained in Equations 1 and 2:

$$q_f = \upsilon_{i-1/2}(p_i - p_{i-1}) \tag{1}$$

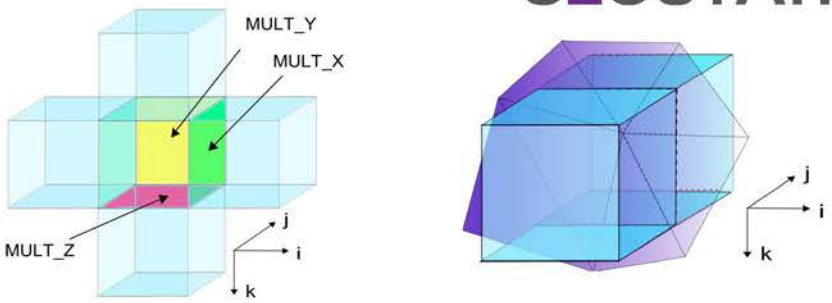
Where q_f is the flow between cells i and $i-1$ given by p_i is the pressure inside cell i and $\upsilon_{i-1/2}$ is the transmissibility on the face between cells i and $i-1$.

$$\upsilon_{i-1/2} = \frac{A\lambda}{B\Delta x} k_{x_{i-1/2}} \upsilon_m \tag{2}$$

With υ_m the transmissibility multiplier, A the cross sectional area across which the flow occurs, λ the fluid mobility, B the fluid formation volume factor, Δx the distance between nodes i and $i-1$ and $k_{x_{i-1/2}}$ an harmonic average of the two effective block permeabilities of nodes i and $i-1$. The computation of the υ_m can be done on the basis of the ratio of areas of shale on the ones of sand on the NURBS surface inside the cell. Nevertheless, this technique does not take into account the connectivity of shale drapes while Jackson and Muggeridge (2000) describes its importance on the flow path.
Once the list of the surface triangles inside the considered cell have been identified (Figure 4(b)), the value of the permeability to put inside the grid cell is deduced. A mean of all values bore by nodes of triangles is computed and assigned to the grid cell which has a cell-centered property. Depending on the selected face of the grid cell, the value is assigned to the $MULTX$, $MULTY$ or $MULTZ$ property.

Conclusion and discussion

Sedimentary objects modelled with NURBS such as channels, clinoforms, lobes and levees can integrate surface properties simulated through their particular parametric space. It permits to model boundary heterogeneities of sedimentary elements in order to approach as much as possible the repartition of shale elements through a SGS. Nevertheless, the upscaling of surface heterogeneities can be improved by estimating the ratio of the volume of object inside the cell volume during the rasterization process.



(a) (b)

Figure 4 *(a) Computation of the permeability value assigned to the rasterized face. The NURBS value is in purple and cut one cell of the voxet in blue. (b) Detection of the area of NURBS surface (in purple) inside a grid cell (in blue) for the computation of the permeability value assigned to the face rasterized.*

A perspective for that work would be to run flow simulation on that models completed with heterogeneities upscaled at the reservoir scale. The upscaled model would integrate interface barriers and a variable number of geobodies in order to assess the influence of surface heterogeneities on flow path.

Acknowledgements

Companies and universities members of the GOCAD consortium managed by ASGA (www.gocad.org) are acknowledged for their support.

References

Alpak, F.O., Barton, M.D. and Naruk, S.J. [2013] The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance. *AAPG bulletin*, **97**(2), 251–284.

Durlofsky, L.J. [2003] Upscaling of geocellular models for reservoir flow simulation: A review of recent progress. *Bulletin de la Société Géologique de France*, **175**(1), 11–20.

Hassanpour, M.M., Pyrcz, M.J. and Deutsch, C.V. [2013] Improved geostatistical models of inclined heterolithic strata for McMurray Formation, Alberta, Canada. *AAPG bulletin*, **97**(7), 1209–1224.

Issautier, B., Fillacier, S., Le Gallo, Y., Audigane, P., Chiaberge, C. and Viseur, S. [2013] Modelling of CO2 injection in fluvial sedimentary heterogeneous reservoirs to assess the impact of geological heterogeneities on CO2 storage capacity and performance. *AAPG bulletin*, **37**, 5181–5190.

Jackson, M.D., Hampson, G.J. and Sech, R.P. [2009] Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog: Part 2. Geologic controls on fluid flow and hydrocarbon recovery. *AAPG Bulletin*, **93**(9), 1183–1208.

Jackson, M. and Muggeridge, A. [2000] Effect of discontinuous shales on reservoir performance during horizontal waterflooding. *SPE Journal*, **Volume 5, Number 4**, 446–455.

Lopez, S. [2003] *Modélisation de Réservoirs Chenalisés Méandriformes: Approche Génétique et Stochastique*. Ph.D. thesis, Ecole des Mines de Paris.

Miall, A. [1996] *The geology of fluvial deposits*. Springer-verlag edn.

Miall, A. [2010] Alluvial deposits. In: *Facies Models*.

Posamentier, H.W. and Kolla, V. [2003] Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, **73**(3), 367–388.

Pranter, M.J., Ellison, A.I., Cole, R.D. and Patterson, P.E. [2007] 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.

Pyrcz, M., Boisvert, J. and Deutsch, C. [2009] Alluvsim: A program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Computers Geosciences*, **35**(8), 1671 – 1685, ISSN 0098-3004.

Ruiu, J., Caumon, G., Viseur, S. and Antoine, C. [2014] Modeling Channel Forms and Related Sedimentary Objects using a Boundary Representation Based on Non Uniform Rational B-Splines. *In Proc. 34th Gocad Meeting*, 1–23.

Stright, L., Caers, J., Li, H., Van Der Vlugt, F., Pirmez, C. and Barton, M. [2006] Modeling, upscaling, and history matching thin, irregularly-shaped flow barriers: a comprehensive approach for predicting reservoir connectivity. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, ATCE*, 5075–5082.

Yin, Y. [2013] A new stochastic modeling of 3-D mud drapes inside point bar sands in meandering river deposits. *Natural resources research*, **22**(4), 311–320.

Bibliographie

P. Abrahamsen, B. Fjellvoll, R. Hauge, J. Howell, and T. Aas. Stochastic modelling of deep marine deposits. *Production Geoscience*, (November) :5–6, 2007. *(Cited page 16)*

V. Abreu, M. Sullivan, C. Pirmez, and D. Mohrig. Lateral accretion packages (LAPs) : an important reservoir element in deep water sinuous channels. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6-8) :631–648, jun 2003. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2003.08.003. *(Cited pages 2, 3, 33, and 133)*

F. Alabert, G. Massonnat, et al. Heterogeneity in a complex turbiditic reservoir : stochastic modelling of facies and petrophysical variability. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 1990. *(Cited page 12)*

J. R. Allen. A review of the origin and characteristics of recent alluvial sediments. *Sedimentology*, 5(2) :89–191, 1965. *(Cited page 3)*

F. O. Alpak, M. D. Barton, and D. Castineira. Retaining geological realism in dynamic modelling : a channelized turbidite reservoir example from West Africa. *Petroleum Geoscience*, 17(1) :35–52, feb 2011. ISSN 1354-0793. doi : 10.1144/1354-079309-033. *(Cited page 3)*

F. O. Alpak, M. D. Barton, and S. J. Naruk. The impact of fine-scale turbidite channel architecture on deep-water reservoir performance. *AAPG Bulletin*, 97(2) :251–284, feb 2013. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/04021211067. *(Cited page 15)*

D. A. Armitage, T. McHargue, A. Fildani, and S. A. Graham. Postavulsion channel evolution : Niger Delta continental slope. *AAPG Bulletin*, 96(5) :823–843, 2012. doi : 10.1306/09131110189. *(Cited page 33)*

N. Babonneau, B. Savoye, M. Cremer, and B. Klein. Morphology and architecture of the present canyon and channel system of the Zaire deep-sea fan. *Marine and Petroleum Geology*, 19(4) :445–467, apr 2002. ISSN 02648172. doi : 10.1016/S0264-8172(02)00009-0. *(Cited pages 2 and 3)*

N. Babonneau, B. Savoye, M. Cremer, and M. Bez. Sedimentary Architecture in Meanders of a Submarine Channel : Detailed Study of the Present Congo Turbidite Channel (Zaiango Project). *Journal of Sedimentary Research*, 80(10) :852–866, oct 2010. ISSN 1527-1404. doi : 10.2110/jsr.2010.078. *(Cited pages 9, 10, and 133)*

J. Barrell. Rhythms and the measurements of geologic time. *Geological Society of America Bulletin*, 28 :745–904, 1917. doi : 10.1130/GSAB-28-745. *(Cited page 98)*

M. Barton, C. O'Byrne, C. Pirmez, B. Prather, F. Van der Vlugt, F. O. Alpak, and Z. Sylvester. Turbidite channel architecture : Recognizing and quantifying the distribution of channel-base drapes using core and dipmeter data. 2010. *(Cited page 15)*

C. Benyon, A. Leier, D. A. Leckie, A. Webb, S. M. Hubbard, and G. Gehrels. Provenance of the cretaceous athabasca oil sands, canada : Implications for continental-scale sediment transport. *Journal of Sedimentary Research*, 84(2) :136–143, 2014. *(Cited page 85)*

P. E. Bézier. Unisurf, from styling to tool-shop. *Computers in Industry*, 4(2) :115–126, 1983. doi : 10.1016/0166-3615(83)90017-9. *(Cited page 59)*

M. Blum and M. Pecha. Mid-cretaceous to paleocene north american drainage reorganization from detrital zircons. *Geology*, 42(7) :607–610, 2014. *(Cited page 85)*

M. D. Blum and T. E. Törnqvist. Fluvial responses to climate and sea-level change : a review and look forward. *Sedimentology*, 47 :2–48, feb 2000. ISSN 00370746. doi : 10.1046/j.1365-3091.2000.00008.x. *(Cited pages 5 and 126)*

A. Botella. *Génération de maillages non structurés volumiques de modèles géologiques pour la simulation de phénomènes physiques*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2016. *(Cited page 54)*

S. Bourquin, S. Peron, and M. Durand. Lower triassic sequence stratigraphy of the western part of the germanic basin (west of black forest) : fluvial system evolution through time and space. *Sedimentary Geology*, 186(3-4) :187–211, 2006. *(Cited pages 5 and 126)*

J.-P. Bravard and D. Gilvear. Hydrological and geomorphological structure of hydrosystems. In *The Fluvial Hydrosystems*, pages 98–116. Springer, 1996. *(Cited page 7)*

J. C. Brice. Evolution of meander loops. *Geological Society of America Bulletin*, 85(4) :581–586, 1974. doi : 10.1130/0016-7606. *(Cited pages 5, 38, 44, 46, 99, and 100)*

S. G. Buck. The Saaiplaas Quartzite Member : A Braided System of Gold- and Uranium-Bearing Channel Placers within the Proterozoic Witwatersrand Supergroup of South Africa. In J. D. Collinson and J. Lewin, editors, *Modern and Ancient Fluvial Systems*, pages 549–562. Blackwell Publishing Ltd., 1983. ISBN 978-1-4443-0377-3. *(Cited page 8)*

D. Burbank and R. Anderson. *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science, 2000. ISBN ISBN-10/ASIN : 0632043865\nISBN-13/EAN : 9780632043866. *(Cited page 127)*

J. Caers. Geostatistical reservoir modelling using statistical pattern recognition. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 29(3-4) :177–188, may 2001. ISSN 09204105. doi : 10.1016/S0920-4105(01)00088-2. *(Cited page 13)*

C. Camporeale, P. Perona, A. Porporato, and L. Ridolfi. Hierarchy of models for meandering rivers and related morphodynamic processes. *Reviews of Geophysics*, 45 :1–28, 2007. doi : 10.1029/2005RG000185.1. *(Cited page 32)*

K. Charvin, K. Gallagher, G. L. Hampson, and R. Labourdette. A Bayesian approach to inverse modelling of stratigraphy, part 1 : method. *Basin Research*, 21(1) :5–25, feb 2009. ISSN 0950091X. doi : 10.1111/j.1365-2117.2008.00369.x. *(Cited page 17)*

M. Church. Bed Material Transport and the Morphology of Alluvial River Channels. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 34(1) :325–354, may 2006. ISSN 0084-6597. doi : 10.1146/annurev.earth.33.092203.122721. *(Cited page 5)*

M. Church. Channel stability : morphodynamics and the morphology of rivers. In *Rivers–Physical, Fluvial and Environmental Processes*, pages 281–321. Springer, 2015. *(Cited page 1)*

J. D. Clark, N. H. Kenyon, and K. T. Pickering. Quantitative analysis of the geometry of submarine channels : implications for the classification of submarine fans. *Geology*, 20(7) :633–636, 1992. ISSN 00917613. doi : 10.1130/0091-7613(1992)020<0633:QAOTGO>2.3.CO. *(Cited page 3)*

I. Cojan, O. Fouché, S. Lopéz, and J. Rivoirard. Process-based reservoir modelling in the example of meandering channel. *Geostatistics Banff 2004*, pages 611–619, 2005. *(Cited page 17)*

L. Colombera, F. Felletti, N. P. Mountney, and W. D. McCaffrey. A database approach for constraining stochastic simulations of the sedimentary heterogeneity of fluvial reservoirs. *AAPG bulletin*, 96(11) :2143–2166, 2012. *(Cited page 121)*

L. Colombera, N. P. Mountney, D. M. Hodgson, and W. D. McCaffrey. The shallow-marine architecture knowledge store : a database for the characterization of

shallow-marine and paralic depositional systems. *Marine and Petroleum Geology*, 75 :83–99, 2016. *(Cited page 121)*

J. A. Constantine and T. Dunne. Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes. *Geology*, 36(1) :23–26, 2008. *(Cited pages 7 and 102)*

J. A. Constantine, S. R. McLean, and T. Dunne. A mechanism of chute cutoff along large meandering rivers with uniform floodplain topography. *Bulletin of the Geological Society of America*, 122(5-6) :855–869, 2010. ISSN 00167606. doi : 10.1130/B26560.1. *(Cited pages 7, 77, and 102)*

J. A. Constantine, T. Dunne, J. Ahmed, C. Leigleiter, and E. D. Lazarus. Sediment supply as a driver of river meandering and floodplain evolution in the Amazon Basin. *Nature Geoscience*, 7(12) :899, 2015. ISSN 0090-3558. doi : 10.7589/2012-06-150. *(Cited pages 7 and 102)*

R. M. Corbeanu, K. Soegaard, R. B. Szerbiak, J. B. Thurmond, G. A. McMechan, D. Wang, S. Snelgrove, C. B. Forster, and A. Menitove. Detailed internal architecture of a fluvial channel sandstone determined from outcrop, cores, and 3-D ground-penetrating radar : Example from the middle Cretaceous Ferron sandstone, East-Central Utah. *AAPG Bulletin*, 85(9) :1583–1608, 2001. ISSN 01491423. doi : 10.1306/8626CCCB-173B-11D7-8645000102C1865D. *(Cited pages 9 and 10)*

J. A. Covault, Z. Sylvester, S. M. Hubbard, Z. R. Jobe, and S. R. P. The stratigraphic record of submarine-channel evolution. *The Sedimentary Record*, 14(3) :4–11, 2016. doi : 10.2110/sedred.2016.3. *(Cited page 30)*

N. E. Cross, A. Cunningham, R. J. Cook, A. Taha, E. Esmaie, and N. El Swidan. Three-dimensional seismic geomorphology of a deep-water slope-channel system : The Sequoia field, offshore west Nile Delta, Egypt. *AAPG Bulletin*, 93(8) :1063–1086, aug 2009. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/05040908101. *(Cited page 3)*

S. Cullis, L. Colombera, M. Patacci, and W. McCaffrey. Metadata approaches and their effects on deep-marine system analysis, analogue selection and reservoir characterisation. In *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 2017. *(Cited page 121)*

M. E. Deptuck, Z. Sylvester, C. Pirmez, and C. O'Byrne. Migration–aggradation history and 3-D seismic geomorphology of submarine channels in the Pleistocene Benin-major Canyon, western Niger Delta slope. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6-9) : 406–433, jun 2007. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2007.01.005. *(Cited pages 3 and 133)*

C. V. Deutsch and P. W. Cockerham. Practical considerations in the application of simulated annealing to stochastic simulation. *Mathematical Geology*, 26(1) :67–82, jan 1994. ISSN 0882-8121. doi : 10.1007/BF02065876. *(Cited page 13)*

C. V. Deutsch and A. G. Journel. *GSLIB : Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, New York, 1992. ISBN 978-0-19-510015-0. *(Cited page 12)*

C. V. Deutsch and T. T. Tran. FLUVSIM : a program for object-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Computers and Geosciences*, 28 :525–535, 2002. doi : 10.1016/S0098-3004(01)00075-9. *(Cited pages 14, 32, and 104)*

C. V. Deutsch and L. Wang. Hierarchical object-based stochastic modeling of fluvial reservoirs. *Mathematical Geology*, 28(7) :857–880, 1996. *(Cited page 14)*

P. Durkin. *The Evolution of Fluvial Meander Belts and Their Product in the Rock Record*. PhD thesis, University of Calgary, 2016. *(Cited pages 71 and 86)*

P. R. Durkin, S. M. Hubbard, R. L. Boyd, and D. A. Leckie. Stratigraphic expression of intra-point-bar erosion and rotation. *Journal of Sedimentary Research*, 85(10) : 1238–1257, Oct. 2015. doi : 10.2110/jsr.2015.78. *(Cited pages 33 and 85)*

P. R. Durkin, R. L. Boyd, S. M. Hubbard, A. W. Shultz, and B. M. D. Three-dimensional reconstruction of meander-belt evolution, Cretaceous McMurray Formation, Alberta Foreland Basin, Canada. *Journal of Sedimentary Research*, 87(10) :1075–1099, Oct. 2017. doi : 10.2110/jsr.2017.59. *(Cited pages 72 and 89)*

B. F. Edwards and D. H. Smith. River meandering dynamics. *Physical review E*, 65(4 Pt 2B) :046303, Apr. 2002. doi : 10.1103/PhysRevE.65.046303. *(Cited pages 17 and 32)*

J. Eekhout and A. Hoitink. Chute cutoff as a morphological response to stream reconstruction : The possible role of backwater. *Water Resources Research*, 51(5) : 3339–3352, 2015. *(Cited page 102)*

W. Erskine, C. McFadden, and P. Bishop. Alluvial cutoffs as indicators of former channel conditions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17(1) :23–37, 1992. ISSN 10969837. doi : 10.1002/esp.3290170103. *(Cited pages 7, 70, and 75)*

H. N. Fisk. *Geological investigation of the alluvial valley of the lower Mississippi River*. U.S Army Corps of Engineers Mississippi River Commission, 1944. *(Cited pages 9, 10, 34, 72, 75, 121, and 122)*

D. V. Fitterman, C. M. Menges, A. M. Al Kamali, and F. E. Jama. Electromagnetic mapping of buried paleochannels in eastern Abu Dhabi Emirate, UAE. *Geoexploration*, 27(1-2) :111–133, 1991. doi : 10.1016/0016-7142(91)90018-8. *(Cited pages 7 and 30)*

R. D. Flood and J. E. Damuth. Quantitative characteristics of sinuous distributary channels on the Amazon Deep-Sea Fan. *Geological Society of America Bulletin*, 98 (June) :728–738, 1987. *(Cited page 4)*

G. L. Ford and 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) :1273–1303, jul 2014. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/12171313052. *(Cited page 8)*

A. Frascati and S. Lanzoni. Morphodynamic regime and long-term evolution of meandering rivers. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 114(F2), Apr. 2009. doi : 10.1029/2008JF001101. *(Cited pages 17 and 32)*

D. J. Furbish. River-bend curvature and migration : How are they related ? *Geology*, 16(8) :752–755, 1988. doi : 10.1130/0091-7613(1988)016<0752:RBCAMH>2.3.CO;2. *(Cited page 34)*

A. Galli, H. Beucher, G. L. Loc'h, B. Doligez, and H. Group. The Pros and Cons of the Truncated Gaussian Method. In M. Armstrong and P. A. Dowd, editors, *Geostatistical Simulations*, number 7 in Quantitative Geology and Geostatistics, pages 217–233. Springer Netherlands, 1994. ISBN 978-90-481-4372-6 978-94-015-8267-4. doi : 10.1007/978-94-015-8267-4_18. *(Cited page 12)*

W. E. Galloway. Clastic depositional systems and sequences : applications to reservoir prediction, delineation, and characterization. *The Leading Edge*, 17(2) :173–180, 1998. *(Cited page 1)*

A. García-Gil, E. Vázquez-Suñe, M. M. Alcaraz, A. S. Juan, J. Á. Sánchez-Navarro, M. Montlleó, G. Rodríguez, and J. Lao. GIS-supported mapping of low-temperature geothermal potential taking groundwater flow into account. *Renewable Energy*, 77 : 268–278, 2015. doi : 10.1016/j.renene.2014.11.096. *(Cited pages 7 and 30)*

G. R. Gay, H. H. Gay, W. H. Gay, H. a. Martinson, R. H. Meade, and J. a. Moody. Evolution of cutoffs across meander necks in Powder River, Montana, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(7) :651–662, jul 1998. ISSN 01979337. doi : 10.1002/(SICI)1096-9837(199807)23:7<651::AID-ESP891>3.0.CO;2-V. *(Cited page 102)*

M. Gee, R. Gawthorpe, K. Bakke, and S. Friedmann. Seismic Geomorphology and Evolution of Submarine Channels from the Angolan Continental Margin. *Journal of Sedimentary Research*, 77(5) :433–446, 2007. ISSN 1527-1404. doi : 10.2110/jsr.2007.042. *(Cited page 5)*

M. Ghinassi, A. Ielpi, M. Aldinucci, and M. Fustic. Downstream-migrating fluvial point bars in the rock record. *Sedimentary Geology*, 334 :66–96, Apr. 2016. doi : 10.1016/j.sedgeo.2016.01.005. *(Cited pages 31, 70, 99, 100, and 102)*

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, jun 2006. ISSN 1527-1404. doi : 10.2110/jsr.2006.060. *(Cited page 4)*

B. Grappe. *Modèles d'écoulement à surface libre pour la simulation à long terme de la migration des systèmes méandriformes*. PhD thesis, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2014. *(Cited page 16)*

M. C. Grenfell, A. Nicholas, and R. Aalto. Mediative adjustment of river dynamics : The role of chute channels in tropical sand-bed meandering rivers. *Sedimentary Geology*, 301 :93–106, 2014. *(Cited page 102)*

I. Güneralp and B. L. Rhoads. Empirical analysis of the planform curvature-migration elation of meandering rivers. *Water Resources Research*, 45(9) :1–15, 2009. ISSN 00431397. doi : 10.1029/2008WR007533. *(Cited page 5)*

N. Gupta, M. G. Kleinhans, E. a. Addink, P. M. Atkinson, and P. a. Carling. One-dimensional modeling of a recent Ganga avulsion : Assessing the potential effect of tectonic subsidence on a large river. *Geomorphology*, 213 :24–37, may 2014. ISSN 0169555X. doi : 10.1016/j.geomorph.2013.12.038. *(Cited pages 7 and 124)*

E. A. Hajek and M. A. Wolinsky. Simplified process modeling of river avulsion and alluvial architecture : Connecting models and field data. *Sedimentary Geology*, 257-260 :1–30, June 2012. doi : 10.1016/j.sedgeo.2011.09.005. *(Cited pages 7, 16, 31, and 124)*

M. M. Hassanpour, M. J. Pyrcz, and C. V. Deutsch. Improved geostatistical models of inclined heterolithic strata for McMurray Formation, Alberta, Canada. *AAPG Bulletin*, 97(7) :1209–1224, 2013. *(Cited pages 14 and 104)*

F. J. Hein and D. K. Cotterill. The athabasca oil sands—a regional geological perspective, fort mcmurray area, alberta, canada. *Natural Resources Research*, 15(2) : 85–102, 2006. *(Cited page 85)*

E. J. Hickin. The development of meanders in natural river-channels. *American journal of science*, 274(4) :414–442, 1974. *(Cited page 133)*

E. J. Hickin and G. C. Nanson. Lateral migration rates of river bends. *J Hydr Eng*, 110(11) :1557–1567, 1975. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9429. *(Cited pages 21 and 34)*

J. Hoffimann, C. Scheidt, A. Barfod, and J. Caers. Stochastic simulation by image quilting of process-based geological models. *Computers and Geosciences*, 106 (February) :18–32, 2017. ISSN 00983004. doi : 10.1016/j.cageo.2017.05.012. *(Cited page 16)*

J. Holbrook. Expansion to contraction, translation to retreat, osculation or toggle, and degree of wobble, and the many means by which a meander may move. *11th International Conference on Fluvial Sedimentology, Calgary, Canada*, 2017. *(Cited pages 5, 70, 99, and 102)*

J. Holbrook and S. A. Schumm. Geomorphic and sedimentary response of rivers to tectonic deformation : a brief review and critique of a tool for recognizing subtle epeirogenic deformation in modern and ancient settings. *Tectonophysics*, 305(1-3) : 287–306, 1999. *(Cited pages 5 and 126)*

J. Holbrook, W. J. Autin, T. M. Rittenour, S. Marshak, and R. J. Goble. Stratigraphic evidence for millennial-scale temporal clustering of earthquakes on a continental-interior fault : Holocene Mississippi River floodplain deposits, New Madrid seismic zone, USA. *Tectonophysics*, 420(3) :431–454, 2006. ISSN 00401951. doi : 10.1016/j.tecto.2006.04.002. *(Cited pages 33 and 72)*

J. M. Holbrook. Funny Things Meanders Do : A Summary of the Diversity of Meander Processes and Morphology and Implications for Reservoir Geometry and Quality within Channel Belts *. 50907, 2013. *(Cited page 5)*

J. Hooke. Changes in river meanders : a review of techniques and results of analyses. *Physical Geography*, 8(4) :473–508, 1984. doi : 10.1177/030913338400800401. *(Cited pages 34, 99, and 102)*

A. D. Howard. Modeling channel migration and floodplain sedimentation in meandering streams. *Lowland floodplain rivers : Geomorphological perspectives*, pages 1–41, 1992. *(Cited page 17)*

A. D. Howard. Modelling channel evolution and floodplain morphology. In M. G. Anderson, D. E. Walling, and P. D. Bates, editors, *Floodplain Processes*, pages 15 – 62. John Wiley & Sons Ltd, 1996. *(Cited page 127)*

A. D. Howard. How to make a meandering river. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(41) :17245–17246, 2009. ISSN 0027-8424. doi : 10.1073/pnas.0910005106. *(Cited pages 1 and 5)*

A. D. Howard and A. T. Hemberger. Multivariate characterization of meandering. *Geomorphology*, 4 :161–186, 1991. doi : 10.1016/0169-555X(91)90002-R. *(Cited pages 17, 32, and 33)*

J. a. Howell, a. Skorstad, a. MacDonald, a. Fordham, S. Flint, B. Fjellvoll, and T. Manzocchi. Sedimentological parameterization of shallow-marine reservoirs. *Petroleum Geoscience*, 14(1) :17–34, feb 2008. ISSN 1354-0793. doi : 10.1144/1354-079307-787. *(Cited page 4)*

H. Huang, J. Imran, and C. Pirmez. The depositional characteristics of turbidity currents in submarine sinuous channels. *Marine Geology*, 329-331 :93–102, 2012. ISSN 00253227. doi : 10.1016/j.margeo.2012.08.003. *(Cited page 3)*

S. M. Hubbard, D. G. Smith, H. Nielsen, D. a. Leckie, M. Fustic, R. J. Spencer, and 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, jul 2011. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/12131010111. *(Cited pages 72, 85, and 89)*

S. Ikeda, G. Parker, and K. Sawai. Bend theory of river meanders. Part 1. Linear development. *Journal of Fluid Mechanics*, 112 :363, Apr. 1981. doi : 10.1017/S0022112081000451. *(Cited pages 8, 17, 32, and 33)*

J. Imran, G. Parker, and C. Pirmez. A nonlinear model of flow in meandering submarine and subaerial channels. *Journal of Fluid Mechanics*, 400 :295–331, 1999. *(Cited page 3)*

C. C. Inglis. The behavior and control of rivers and canals. *Research Publication No. 13 Central Water Power*, 1949. *(Cited page 79)*

R. P. Irwin, A. D. Howard, and R. A. Craddock. Fluvial Valley Networks on Mars. *River Confluences, Tributaries and the Fluvial Network*, pages 419–451, 2008. doi : 10.1002/9780470760383.ch19. *(Cited page 1)*

B. Issautier, S. Fillacier, Y. Le Gallo, P. Audigane, C. Chiaberge, and S. Viseur. Modelling of CO2 Injection in Fluvial Sedimentary Heterogeneous Reservoirs to Assess the Impact of Geological Heterogeneities on CO2 Storage Capacity and Performance. *Energy Procedia*, 37 :5181–5190, 2013. ISSN 18766102. doi : 10.1016/j.egypro.2013.06.434. *(Cited pages 8 and 11)*

B. Issautier, S. Viseur, P. Audigane, and Y.-M. Le Nindre. Impacts of fluvial reservoir heterogeneity on connectivity : Implications in estimating geological storage capacity for co 2. *Int J Greenhouse Gas Control*, 20 :333–349, 2014. doi : 10.1016/j.ijggc.2013.11.009. *(Cited pages 30, 31, and 70)*

M. Jackson, J. Percival, P. Mostaghimi, B. Tollit, D. Pavlidis, C. Pain, J. Gomes, A. H. Elsheikh, P. Salinas, A. Muggeridge, et al. Reservoir modeling for flow simulation by use of surfaces, adaptive unstructured meshes, and an overlapping-control-volume finite-element method. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 18(02) :115–132, 2015. *(Cited page 131)*

M. D. Jackson and A. H. Muggeridge. Effect of discontinuous shales on reservoir performance during horizontal waterflooding. *SPE Journal*, 5(4) :446 – 455, 2000. doi : 10.2118/69751-PA. *(Cited pages 8, 11, and 31)*

M. D. Jackson, G. J. Hampson, and R. P. Sech. Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog : Part 2. Geologic controls on fluid flow and hydrocarbon recovery. *AAPG Bulletin*, 93(9) :1183–1208, Sept. 2009. doi : 10.1306/05110908145. *(Cited pages 8 and 11)*

M. Janocko, M. B. Cartigny, W. Nemec, and E. W. Hansen. Turbidity current hydraulics and sediment deposition in erodible sinuous channels : Laboratory experiments and numerical simulations. *Marine and Petroleum Geology*, 41(1) :222–249, 2013a. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2012.08.012. *(Cited page 3)*

M. Janocko, W. Nemec, S. Henriksen, and M. Warchoł. The diversity of deep-water sinuous channel belts and slope valley-fill complexes. *Marine and Petroleum Geology*, 41 :7–34, mar 2013b. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2012.06.012. *(Cited pages 2, 9, and 10)*

Z. R. Jobe, N. C. Howes, and N. C. Auchter. Comparing submarine and fluvial channel kinematics : Implications for stratigraphic architecture. *Geology*, 44(11) :G38158.1, 2016. doi : 10.1130/G38158.1. *(Cited pages 3, 30, 34, 64, 98, 99, and 111)*

A. Journel and T. Zhang. The necessity of a multiple-point prior model. *Mathematical geology*, 38(5) :591–610, 2006. *(Cited page 13)*

A. G. Journel and W. Xu. Posterior identification of histograms conditional to local data. *Mathematical Geology*, 26(3) :323–359, 1994. *(Cited page 12)*

P. Jussel, F. Stauffer, and T. Dracos. Transport modeling in heterogeneous aquifers : 1. Statistical description and numerical generation of gravel deposits. *Water Resources Research*, 30(6) :1803–1817, 1994. doi : 10.1029/94WR00162. *(Cited page 7)*

D. Karssenberg, T. E. Törnqvist, and J. S. Bridge. Conditioning a process-based model of sedimentary architecture to well data. *Journal of Sedimentary Research*, 71(6) : 868–879, 2001. doi : 1527-1404/01/071-868. *(Cited page 16)*

A. Knighton. Asymmetry of river channel cross-sections : Part ii. mode of development and local variation. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7(2) :117–131, 1982. *(Cited page 133)*

V. Kolla, H. Posamentier, and L. Wood. Deep-water and fluvial sinuous channels—Characteristics, similarities and dissimilarities, and modes of formation. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6-9) :388–405, jun 2007. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2007.01.007. *(Cited page 3)*

C. E. Koltermann and 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 13)*

D. G. Krige. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6) :119–139, 1951. *(Cited page 12)*

R. Labourdette. Integrated three-dimensional modeling approach of stacked turbidite channels. *AAPG Bulletin*, 91(11) :1603–1618, nov 2007. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/06210706143. *(Cited pages 3, 18, 20, and 64)*

R. Labourdette. 'LOSCS' Lateral Offset Stacked Channel Simulations : Towards geometrical modelling of turbidite elementary channels. *Basin Research*, 20(3) :431–444, 2008. doi : 10.1111/j.1365-2117.2008.00361.x. *(Cited pages 33 and 103)*

R. Labourdette and M. Bez. Element migration in turbidite systems : Random or systematic depositional processes ? *AAPG Bulletin*, 94(3) :345–368, Mar. 2010. doi : 10.1306/09010909035. *(Cited pages 30 and 44)*

R. Labourdette, J. Poncet, J. Seguin, F. Temple, J. Hegre, and A. Irving. Three-dimensional modelling of stacked turbidite channels in West Africa : impact on dynamic reservoir simulations. *Petroleum Geoscience*, 12(4) :335–345, 2006. doi : 10.1144/1354-079306-705. *(Cited pages 15, 32, 54, and 125)*

P. A. Labrecque, J. L. Jensen, S. M. Hubbard, and H. Nielsen. Sedimentology and stratigraphic architecture of a point bar deposit, lower cretaceous mcmurray formation, alberta, canada. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 59(2) :147–171, 2011. *(Cited page 85)*

W. Langbein and L. Leopold. River meanders-theory of minimum variance. *Physiographic and Hydraulic studies of rivers*, 15, 1966. *(Cited pages 17, 32, 33, and 49)*

M. Leeder. Tectonic controls upon drainage basin development, river channel migration and alluvial architecture : implications for hydrocarbon reservoir development and characterization. *Geological Society, London, Special Publications*, 73(1) :7–22, 1993. *(Cited pages 5 and 126)*

M. Leeder and P. Bridges. Flow seperation in meander bends. *Nature*, 253 :338 – 339, 1975. ISSN 0028-0836. doi : doi:10.1038/253338a0. *(Cited page 102)*

M. Lemay, I. Cojan, F. Ors, and J. Rivoirard. Potential of flumy, a meandering fluvial process-based model, to simulate submarine channels. In *Second Conference on Forward Modelling of Sedimentary Systems*, 2016. *(Cited page 17)*

B. Y. L. B. Leopold and M. G. Wolman. River meanders. *Bulletin of the Geological society of America*, 71 :769–794, 1960. *(Cited pages 2, 4, 5, 6, and 79)*

L. B. Leopold and W. B. Langbein. River meanders. *Sci Am*, 214 :60–70, 1966. doi : 10.1038/scientificamerican0666-60. *(Cited pages 2, 5, 6, and 30)*

L. B. Leopold and M. G. Wolman. *River channel patterns : braided, meandering, and straight*. US Government Printing Office, 1957. *(Cited page 1)*

L. B. Leopold, M. G. Wolman, and J. P. Miller. *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco, 1964. *(Cited pages 2, 4, 5, 6, and 34)*

W. Li. Markov chain random fields for estimation of categorical variables. *Mathematical Geology*, 39(3) :321–335, 2007. *(Cited page 13)*

A. Lindenmayer. Mathematical models for cellular interactions in development II. Simple and branching filaments with two-sided inputs. *Journal of Theoretical Biology*, 18(3) :300–315, 1968. ISSN 10958541. doi : 10.1016/0022-5193(68)90080-5. *(Cited page 20)*

P. Lonsdale and C. D. Hollister. Cut-offs at an abyssal meander south of Iceland. *Geology*, 7(12) :597–601, 1979. ISSN 00917613. doi : 10.1130/0091-7613(1979)7<597:CAAAMS>2.0.CO;2. *(Cited pages 3, 7, 70, and 75)*

S. Lopez. *Modélisation de réservoirs chenalisés méandriformes : approche génétique et stochastique*. PhD thesis, Ecole des Mines de Paris, 2003. *(Cited pages 17, 18, 32, and 104)*

R. D. Lorenz, R. M. Lopes, F. Paganelli, J. I. Lunine, R. L. Kirk, K. L. Mitchell, L. A. Soderblom, E. R. Stofan, G. Ori, M. Myers, et al. Fluvial channels on Titan : Initial Cassini RADAR observations. *Planetary and Space Science*, 56(8) :1132–1144, 2008. ISSN 00320633. doi : 10.1016/j.pss.2008.02.009. *(Cited page 1)*

D. R. Lowe. Sediment gravity flows : Ii depositional models with special reference to the deposits of high-density turbidity currents. *Journal of Sedimentary Research*, 52(1), 1982. *(Cited page 3)*

R. V. Macauley and S. M. Hubbard. Slope channel sedimentary processes and stratigraphic stacking, cretaceous tres pasos formation slope system, chilean patagonia. *Marine and Petroleum Geology*, 41 :146–162, 2013. *(Cited page 3)*

S. D. Mackey and J. S. Bridge. Three-Dimensional Model of Alluvial Stratigraphy : Theory and Application. *Journal of Sedimentary Research*, B65(1) :7–31, 1995. *(Cited page 16)*

K. L. Maier, A. Fildani, T. R. McHargue, C. K. Paull, S. A. Graham, and D. W. Caress. Punctuated Deep-Water Channel Migration : High-Resolution Subsurface Data from the Lucia Chica Channel System, Offshore California, U.S.A. *Journal of Sedimentary Research*, 82(1) :1–8, 2012. doi : 10.2110/jsr.2012.10. *(Cited page 33)*

J.-R. Malavoi and J.-P. Bravard. *River hydrogeomorphology : A primer*. Onema edition, 2010. *(Cited page 79)*

G. Mariethoz, A. Comunian, I. Irarrazaval, and P. Renard. Analog-based meandering channel simulation. *Water Resources Research*, 50 :1–18, 2014. doi : 10.1002/2013WR013730. *(Cited page 13)*

J. H. Martin. A review of braided fluvial hydrocarbon reservoirs : the petroleum engineer's perspective. *Geological Society, London, Special Publications*, 75(1) :333–367, 1993. doi : 10.1144/GSL.SP.1993.075.01.20. *(Cited page 7)*

B. Y. G. Massart, M. D. Jackson, G. J. Hampson, and H. D. Johnson. Effective flow properties heterolithic, cross-bedded tidal sandstones : Part 2. Flow simulation. *AAPG Bulletin*, 100(05) :723–742, 2016. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/02011614222. *(Cited pages 11 and 54)*

S. Matthäi, S. Geiger, S. Roberts, A. Paluszny, M. Belayneh, A. Burri, A. Mezentsev, H. Lu, D. Coumou, T. Driesner, et al. Numerical simulation of multi-phase fluid flow in structurally complex reservoirs. *Geological Society, London, Special Publications*, 292(1) :405–429, 2007. *(Cited page 131)*

M. Mayall, E. Jones, and M. Casey. Turbidite channel reservoirs — Key elements in facies prediction and effective development. *Marine and Petroleum Geology*, 23(8) : 821–841, 2006. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2006.08.001. *(Cited pages 7 and 30)*

P. J. McCabe, D. L. Gautier, M. D. Lewan, and C. Turner. The future of energy gases. USGS Numbered Series Circular 1115, Dept. of the Interior, U.S. Geological Survey, USGS Map Distribution ; U.S. G.P.O., 1993. *(Cited page 7)*

T. McHargue, M. Pyrcz, M. Sullivan, J. Clark, A. Fildani, B. Romans, J. Covault, M. Levy, H. Posamentier, and N. Drinkwater. Architecture of turbidite channel systems on the continental slope : Patterns and predictions. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3) :728–743, mar 2011. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2010.07.008. *(Cited page 30)*

J. McKean, D. Nagel, D. Tonina, P. Bailey, C. W. Wright, C. Bohn, and A. Nayegandhi. Remote sensing of channels and riparian zones with a narrow-beam aquatic-terrestrial lidar. *Remote Sensing*, 1(4) :1065–1096, 2009. *(Cited page 9)*

E. D. McKee. Flume experiments on the production of stratification and cross-stratification. *Journal of Sedimentary Research*, 27(2), 1957. *(Cited page 130)*

Y. Melnikova, C. Jacquemyn, H. Osman, P. Salinas, G. Gorman, G. Hampson, and M. Jackson. Reservoir modelling using parametric surfaces and dynamically adaptive fully unstructured grids. In *ECMOR XV-15th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery*, 2016. *(Cited page 131)*

H. W. Menard. Deep-sea channels, topography, and sedimentation. *AAPG Bulletin*, 39(2) :236–255, 1955. *(Cited page 3)*

F. Métivier and L. Barrier. Alluvial landscape evolution : What do we know about metamorphosis of gravel-bed meandering and braided streams ? *Gravel-bed Rivers : processes, tools, environments*, pages 474–501, 2012. *(Cited page 1)*

A. D. Miall. Alluvial deposits. chapter Facies Mod, pages 105 – 137. Geotext edition, 2010. *(Cited page 8)*

A. D. Miall. *Fluvial depositional systems*, volume 14. Springer, 2014. *(Cited pages 31 and 71)*

A. D. Miall. Facies models. In *Stratigraphy : A Modern Synthesis*, pages 161–214. Springer, 2016. *(Cited pages 8 and 98)*

H. a. Michael, H. Li, a. Boucher, T. Sun, J. Caers, and S. M. Gorelick. Combining geologic-process models and geostatistics for conditional simulation of 3-D subsurface heterogeneity. *Water Resources Research*, 46(5) :n/a–n/a, may 2010. ISSN 00431397. doi : 10.1029/2009WR008414. *(Cited page 16)*

D. Mohrig, P. L. Heller, C. Paola, and W. J. Lyons. Interpreting avulsion process from ancient alluvial sequences : Guadalope-matarranya system (northern spain) and wasatch formation (western colorado). *Geological Society of America Bulletin*, 112 (12) :1787–1803, 2000. *(Cited page 3)*

H. Morvan, G. Pender, N. Wright, and D. Ervine. Three-dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7) : 674–682, 2002. *(Cited page 121)*

G. D. Mossop and P. D. Flach. Deep channel sedimentation in the lower cretaceous mcmurray formation, athabasca oil sands, alberta. *Sedimentology*, 30(4) :493–509, 1983. *(Cited page 85)*

D. Motta, J. D. Abad, E. J. Langendoen, and M. H. Garcia. A simplified 2D model for meander migration with physically-based bank evolution. *Geomorphology*, 163-164(March 2016) :10–25, aug 2012. ISSN 0169555X. doi : 10.1016/j.geomorph.2011.06.036. *(Cited page 16)*

G. Musial, J.-Y. Reynaud, M. K. Gingras, H. Féniès, R. Labourdette, and O. Parize. Subsurface and outcrop characterization of large tidally influenced point bars of the cretaceous mcmurray formation (alberta, canada). *Sedimentary Geology*, 279 : 156–172, 2012. *(Cited page 85)*

E. Mutti and W. R. Normark. An integrated approach to the study of turbidite systems. In *Seismic facies and sedimentary processes of submarine fans and turbidite systems*, pages 75–106. Springer, 1991. *(Cited page 3)*

T. Nakajima, J. Peakall, W. D. McCaffrey, D. A. Paton, and P. J. P. Thompson. Outer-Bank Bars : A New Intra-Channel Architectural Element within Sinuous Submarine Slope Channels. *Journal of Sedimentary Research*, 79(12) :872–886, nov 2009. doi : 10.2110/jsr.2009.094. *(Cited page 33)*

K. Nordahl, P. S. Ringrose, and R. Wen. Petrophysical characterization of a heterolithic tidal reservoir interval using a process-based modelling tool. *Petroleum Geoscience*, 11(1) :17–28, jan 2005. ISSN 1354-0793. doi : 10.1144/1354-079303-613. *(Cited page 16)*

W. R. Normark, H. Posamentier, and E. Mutti. Turbidite systems : state of the art and future directions. *Reviews of Geophysics*, 31(2) :91–116, 1993. *(Cited pages 3 and 8)*

G. Parker and H. Johannesson. Observations on several recent theories of resonance and overdeepening in meandering channels. *River meandering*, pages 379–415, 1989. *(Cited page 17)*

G. Parker, P. Diplas, and J. Akiyama. Meander bends of high amplitude. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(10) :1323–1337, 1983. ISSN 0733-9429. doi : 10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:10(1323). *(Cited page 8)*

M. Parquer, J. Ruiu, and G. Caumon. Simulation of surface petrophysical heterogeneities on sedimentary objects. In *In Proc. 34th Gocad Meeting*, 2014. *(Cited page 129)*

M. Parquer, P. Collon, and G. Caumon. Reconstruction of channelized systems through a conditioned reverse migration method. *Mathematical Geosciences*, 49(8) : 965–994, nov 2017. *(Cited pages 22, 72, 74, 80, 82, 88, 89, 98, 103, and 119)*

J. Peakall, B. McCaffrey, and B. Kneller. A process model for the evolution, morphology, and architecture of sinuous submarine channels. *Journal of Sedimentary Research*, 70(3) :434–448, 2000. doi : 10.1306/2DC4091C-0E47-11D7-8643000102C1865D. *(Cited pages 3, 5, 30, 32, 33, 44, 98, and 133)*

L. Piegl and W. Tiller. *The NURBS book*. Springer-Verlag, London, UK, 1997. *(Cited pages 14 and 59)*

L. A. Piegl and W. Tillert. Geometry-based triangulation of trimmed NURBS surfaces. *Computer-Aided Design*, 30(1) :11–18, 1998. *(Cited page 128)*

C. Pirmez and J. Imran. Reconstruction of turbidity currents in Amazon Channel. *Marine and Petroleum Geology*, 20(6-8) :823–849, 2003. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2003.03.005. *(Cited page 2)*

H. W. Posamentier and V. Kolla. Seismic geomorphology and stratigraphy of depositional elements in deep-water settings. *Journal of Sedimentary Research*, 73(3) :367–388, May 2003. doi : 10.1306/111302730367. *(Cited pages 3, 5, 8, 9, 31, 32, 33, and 71)*

M. J. Pranter and N. K. Sommer. Static connectivity of fluvial sandstones in a lower coastal-plain setting : An example from the Upper Cretaceous lower Williams Fork Formation, Piceance Basin, Colorado. *AAPG Bulletin*, 95(6) :899–923, 2011. doi : 10.1306/12091010008. *(Cited page 7)*

M. Pyrcz, J. Boisvert, and C. Deutsch. ALLUVSIM : A program for event-based stochastic modeling of fluvial depositional systems. *Computer Geosciences*, 35(8) :1671–1685, Aug. 2009. doi : 10.1016/j.cageo.2008.09.012. *(Cited pages 17, 19, and 32)*

M. J. Pyrcz, R. P. Sech, J. A. Covault, B. J. Willis, Z. Sylvester, and T. Sun. Stratigraphic rule-based reservoir modeling. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 63(4) :287–303, 2015. *(Cited pages 54 and 125)*

M. J. Ranger and S. G. Pemberton. Elements of a stratigraphic framework for the mcmurray formation in south athabasca area, alberta. 1997. *(Cited page 85)*

A. P. Reimchen, S. M. Hubbard, L. Stright, and B. W. Romans. Using sea-floor morphometrics to constrain stratigraphic models of sinuous submarine channel systems. *Marine and Petroleum Geology*, 77 :92–115, 2016. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2016.06.003. *(Cited page 133)*

H. Reineck and I. Singh. Depositional sedimentary structures, 1973. *(Cited page 130)*

J. Riquier. *Réponses hydrosédimentaires de chenaux latéraux restaurés du Rhône français*. PhD thesis, Université Lumière Lyon 2, 2015. *(Cited page 7)*

B. W. Romans and S. A. Graham. A Deep-Time Perspective of Land-Ocean Linkages in the Sedimentary Record. *Annual Review of Marine Science*, 5(1) :69–94, 2013. ISSN 1941-1405. doi : 10.1146/annurev-marine-121211-172426. *(Cited page 3)*

G. Rongier, P. Collon, P. Renard, J. Straubhaar, and J. Sausse. Comparing connected structures in ensemble of random fields. *Advances in water resources*, 96 :145–169, 2016. *(Cited page 13)*

G. Rongier, P. Collon, and P. Renard. A geostatistical approach to the simulation of stacked channels. *Marine and Petroleum Geology*, 2017a. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2017.01.027. *(Cited pages 20, 21, 46, 103, 104, and 125)*

G. Rongier, P. Collon, P. Renard, G. Rongier, P. Collon, P. Renard, G. Rongier, P. Collon, and P. Renard. Stochastic simulation of channelized sedimentary bodies using a constrained L-system. *Computers and Geosciences*, 105 :158–168, 2017b. doi : 10.1016/j.cageo.2017.05.006. *(Cited pages 20, 33, 119, and 124)*

J. C. Rowland, K. Lepper, W. E. Dietrich, C. J. Wilson, and R. Sheldon. Tie channel sedimentation rates, oxbow formation age and channel migration rate from optically stimulated luminescence (OSL) analysis of floodplain deposits. *Earth Surface Processes and Landforms*, 30(9) :1161–1179, aug 2005. ISSN 0197-9337. doi : 10.1002/esp.1268. *(Cited pages 33 and 72)*

J. Ruiu. *Modélisation d´objets sédimentaires par des surfaces paramétriques et application à l´analyse d´image*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2015. *(Cited pages 18, 27, 88, 103, 104, 121, 123, 125, 127, 128, and 130)*

J. Ruiu, G. Caumon, and S. Viseur. Semiautomatic interpretation of 3D sedimentological structures on geologic images : An object-based approach. *Interpretation*, 3 (3) :63–74, 2015. doi : 10.1190/INT-2015-0004.1. *(Cited pages 33, 46, and 54)*

J. Ruiu, G. Caumon, and 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, dec 2016. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-015-9629-3. *(Cited pages 14, 20, 43, 59, and 123)*

M. Rusnák, M. Lehotský, and A. Kidová. Channel migration inferred from aerial photographs, its timing and environmental consequences as responses to floods : A case study of the meandering Topl'a River, Slovak Carpathians. *Moravian Geographical Reports*, 24(3) :32–43, 2016. ISSN 12108812. doi : 10.1515/mgr-2016-0015. *(Cited page 5)*

P. Sadler. Sediment accumulation rates and the completeness of stratigraphic sections. *Journal of Geology*, 89 :569–584, 1981. doi : 10.1086/628623. *(Cited pages 77 and 98)*

I. J. Schoenberg. *Cardinal spline interpolation*. SIAM, 1973. *(Cited page 104)*

D. M. Schook, S. L. Rathburn, J. M. Friedman, and J. M. Wolf. A 184-year record of river meander migration from tree rings, aerial imagery, and cross sections. *Geomorphology*, 293(June) :227–239, 2017. ISSN 0169555X. doi : 10.1016/j.geomorph.2017.06.001. *(Cited page 5)*

S. A. Schumm. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9) :1089–1100, 1963. *(Cited page 4)*

S. A. Schumm. Alluvial river response to active tectonics. *Active tectonics*, pages 80–94, 1986. *(Cited pages 5 and 126)*

S. A. Schumm. *River variability and complexity*. Cambridge University Press, 2007. *(Cited page 1)*

S. A. Schumm and H. R. Khan. Experimental study of channel patterns. *Geological Society of America Bulletin*, 83(June) :1755–1770, 1972. *(Cited page 5)*

J. Schwenk and E. Foufoula-Georgiou. Meander cutoffs nonlocally accelerate upstream and downstream migration and channel widening. *Geophysical Research Letters*, 43(24), 2016. *(Cited pages 7 and 99)*

J. Schwenk, S. Lanzoni, and E. Foufoula-Georgiou. The life of a meander bend : Connecting shape and dynamics via analysis of a numerical model. *J Geophys Res : Earth Surfa*, 120 :690–710, 2015. doi : 10.1002/2014JF003252. *(Cited pages 7 and 99)*

R. P. Sech, M. D. Jackson, and 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. ISSN 0149-1423. doi : 10.1306/05110908144. *(Cited page 15)*

T. W. Sederberg, G. T. Finnigan, X. Li, H. Lin, and H. Ipson. Watertight trimmed NURBS. *ACM SIGGRAPH 2008 papers on - SIGGRAPH '08*, page 1, 2008. doi : 10.1145/1399504.1360678. *(Cited page 128)*

G. Seminara. Meanders. *Journal of Fluid Mechanics*, 554 :271–297, 2006. ISSN 00221120. doi : 10.1017/S0022112006008925. *(Cited page 5)*

G. Seminara. Fluvial sedimentary patterns. *Annu Rev Fluid Mech*, 42 :43–66, 2010. doi : 10.1146/annurev-fluid-121108-145612. *(Cited page 30)*

G. Shanmugam. 50 years of the turbidite paradigm (1950s—1990s) : deep-water processes and facies models—a critical perspective. *Marine and petroleum Geology*, 17(2) :285–342, 2000. *(Cited page 4)*

R. P. Sharp and M. C. Malin. Channels on Mars. *Geological Society of America Bulletin*, 86(5) :593 – 609, 1975. doi : 10.1130/0016-7606(1975)86<593:COM>2.0.CO;2. *(Cited page 1)*

W. Sikkema and K. Wojcik. 3d visualization of turbidite systems, lower congo basin, offshore angola. In *Deep-Water Reservoirs of the World, Gulf Coast Section Society of Economic Palaeontologists & Mineralogists Foundation, 20th Annual Conference of Deep-Water Reservoirs of the World Proceedings, December*, pages 3–6, 2000. *(Cited page 120)*

R. Slingerland and N. D. Smith. River avulsions and their deposits. *Annu Rev Earth Pl Sc*, 32(1) :257–285, May 2004. doi : 10.1146/annurev.earth.32.101802.120201. *(Cited pages 7, 8, 31, and 124)*

M. Słowik. Changes of river bed pattern and traces of anthropogenic intervention : The example of using GPR method (the Obra River, western Poland). *Applied Geography*, 31(2) :784–799, 2011. ISSN 01436228. doi : 10.1016/j.apgeog.2010.08.004. *(Cited page 5)*

M. Słowik. The influence of meander bend evolution on the formation of multiple cutoffs : Findings inferred from floodplain architecture and bend geometry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 41(5) :626–641, 2016. ISSN 10969837. doi : 10.1002/esp.3851. *(Cited pages 5 and 102)*

R. S. Snow. Fractal sinuosity of stream channels. *Pure and Applied Geophysics PAGEOPH*, 131(1-2) :99–109, 1989. ISSN 00334553. doi : 10.1007/BF00874482. *(Cited page 5)*

M. Srivastava. Iterative methods for spatial simulation. *Stanford Center for Reservoir Forecasting Rep*, (5), 1992. *(Cited page 13)*

J. C. Stella, M. K. Hayden, J. J. Battles, H. Piégay, S. Dufour, and A. K. Fremier. The role of abandoned channels as refugia for sustaining pioneer riparian forest ecosystems. *Ecosystems*, 14(5) :776–790, 2011. *(Cited page 1)*

H.-H. Stølum. River meandering as a self-organization process. *Science*, 271(5256) : 1710–1713, 1996. *(Cited page 102)*

H. H. Stølum. Planform geometry and dynamics of meandering rivers. *Bulletin of the Geological Society of America*, 110(11) :1485–1498, 1998. ISSN 00167606. doi : 10.1130/0016-7606(1998)110<1485:PGADOM>2.3.CO;2. *(Cited page 5)*

E. Stouthamer and H. J. A. Berendsen. Avulsion frequency, avulsion duration, and interavulsion period of Holocene channel belts in the Rhine-Meuse delta, The Netherlands. *Journal of Sedimentary Research*, 71(4) :589–598, July 2001. doi : 10.1306/112100710589. *(Cited pages 7, 31, and 124)*

J. Straubhaar and D. Malinverni. Addressing Conditioning Data in Multiple-Point Statistics Simulation Algorithms Based on a Multiple Grid Approach. *Mathematical Geosciences*, 46(2) :187–204, jul 2014. ISSN 1874-8961. doi : 10.1007/s11004-013-9479-9. *(Cited page 13)*

S. Strebelle. Conditional Simulation of Complex Geological Structures Using Multiple-Point Statistics. *Mathematical Geosciences*, 34(1) :1–21, 2002. *(Cited page 13)*

L. Stright et al. Modeling, upscaling, and history matching thin, irregularly-shaped flow barriers : a comprehensive approach for predicting reservoir connectivity. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 2006. *(Cited pages 11 and 15)*

T. Sun, P. Meakin, T. Jossang, and K. Schwarz. A simulation model for meandering rivers. *Water Resources Research*, 32(9) :2937–2954, 1996. doi : 10.1029/96WR00998. *(Cited pages 3, 17, and 32)*

T. Sun, P. Meakin, and T. Jøssang. Meander migration and the lateral tilting of floodplains. *Water Resources Research*, 37(5) :1485–1502, 2001. *(Cited page 17)*

Z. Sylvester, C. Pirmez, and A. Cantelli. A model of submarine channel-levee evolution based on channel trajectories : Implications for stratigraphic architecture. *Marine and Petroleum Geology*, 28(3) :716–727, mar 2011. ISSN 02648172. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2010.05.012. *(Cited pages 3 and 88)*

Z. Sylvester, J. Covault, and P. Durkin. High curvatures drive river meandering. pages 1–11, 2017. *(Cited pages 5, 21, 102, and 127)*

P. Tahmasebi, A. Hezarkhani, and M. Sahimi. Multiple-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions. *Computational Geosciences*, 16(3) :779–797, 2012. ISSN 14200597. doi : 10.1007/s10596-012-9287-1. *(Cited page 13)*

P. Tahmasebi, M. Sahimi, and J. Caers. MS-CCSIM : Accelerating pattern-based geostatistical simulation of categorical variables using a multi-scale search in fourier space. *Computers and Geosciences*, 67 :75–88, 2014. ISSN 00983004. doi : 10.1016/j.cageo.2014.03.009. *(Cited page 13)*

V. Teles, G. de Marsily, and E. Perrier. A new approach for modelling sediment deposition in an alluvial plain in order to display its heterogeneity. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*, 327(9) :597–606, Nov. 1998. doi : 10.1016/S1251-8050(99)80113-X. *(Cited pages 17 and 32)*

W. Tiller. Application of knot-removal algorithms for NURBS curves and surfaces. *Comput aided design*, 24(8) :445–453, 1992. doi : 0010-4485/92/080445-09. *(Cited page 59)*

J. C. Tipper. Measured rates of sedimentation : What exactly are we estimating, and why ? *Sedimentary Geology*, 339 :151–171, 2016. ISSN 00370738. doi : 10.1016/j.sedgeo.2016.04.003. *(Cited pages 5 and 98)*

W. H. Toonen, M. G. Kleinhans, and K. M. Cohen. Sedimentary architecture of abandoned channel fills. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4) :459–472, 2012. ISSN 01979337. doi : 10.1002/esp.3189. *(Cited pages 7, 70, 99, and 111)*

T. T. Tran. Improving variogram reproduction on dense simulation grids. *Computers & Geosciences*, 20(7-8) :1161–1168, 1994. *(Cited page 13)*

P. C. Veeken. *Seismic stratigraphy, basin analysis and reservoir characterisation*, volume 37. Elsevier, 2006. *(Cited pages 31 and 70)*

S. Viseur. Caractérisation de réservoirs turbiditiques : simulations stochastiques basées-objet de chenaux méandriformes. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 1(75) :11–20, 2004. *(Cited pages 14, 32, and 46)*

J. Ward. Riverine landscapes : biodiversity patterns, disturbance regimes, and aquatic conservation. *Biological conservation*, 83(3) :269–278, 1998. *(Cited page 1)*

R. Wen, A. W. Martinius, A. Næss, and 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)*, pages 129–134, 1998. *(Cited page 130)*

G. P. Williams. River meanders and channel size. *Journal of Hydrology*, 88 :147–164, 1986. doi : 10.1016/0022-1694(86)90202-7. *(Cited page 4)*

B. J. Willis and H. Tang. Three-dimensional connectivity of point-bar deposits. *Journal of Sedimentary Research*, 80(5) :440–454, Apr. 2010. doi : 10.2110/jsr.2010.046. *(Cited page 31)*

R. B. Wynn, B. T. Cronin, and J. Peakall. Sinuous deep-water channels : genesis, geometry and architecture. *Marine and Petroleum Geology*, 24(6-9) :341–387, June 2007. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2007.06.001. *(Cited pages 3, 5, 30, 32, and 44)*

Y. E. Xiaoming, H. U. O. Chunliang, W. Pengfei, Y. Jianmin, and L. I. Junfei. Quantitative Relation of the Point BarWidth and Meander Belt Width of Subsurface Reservoir. *Advances in Petroleum Exploration and Development*, 13(1) :17–24, 2017. doi : 10.3968/9465. *(Cited page 4)*

W. Xu. Conditional curvilinear stochastic simulation using pixel-based algorithms. *Mathematical Geology*, 28(7) :937–949, 1996. *(Cited page 130)*

W. Xu, T. Tran, R. Srivastava, A. G. Journel, et al. Integrating seismic data in reservoir modeling : the collocated cokriging alternative. In *SPE annual technical conference and exhibition*. Society of Petroleum Engineers, 1992. *(Cited page 12)*

N. Yan, N. P. Mountney, L. Colombera, and R. M. Dorrell. A 3D forward stratigraphic model of fluvial meander-bend evolution for prediction of point-bar lithofacies architecture. *Computers and Geosciences*, 105(April) :65–80, 2017. ISSN 00983004. doi : 10.1016/j.cageo.2017.04.012. *(Cited page 14)*

R. A. Young, J. G. Staggs, R. M. Slatt, et al. Identifying a sinuous deepwater channel in outcrop using gpr imaging. In *2003 SEG Annual Meeting*. Society of Exploration Geophysicists, 2003. *(Cited page 9)*

J. H. Youngson and D. Craw. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behavior down gravel bed-load rivers ; an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha River system, Otago, New Zealand. *Economic Geology*, 94(5) : 615–633, 1999. doi : 10.2113/gsecongeo.94.5.615. *(Cited page 8)*

Modélisation rétro-chronologique de systèmes chenalisés méandriformes à partir d'observations géologiques

Résumé : Les systèmes méandriformes constituent la plupart des rivières terrestres ou subaquatiques qui modèlent les paysages par leur évolution temporelle et spatiale. Les témoins de leur évolution peuplent les plaines traversées par ces systèmes. Parmi ces témoins, des barres d'accrétion latérale traduisant la migration des boucles du chenal peuvent être identifiées, tout comme des méandres abandonnés par simplification naturelle de la trajectoire du chenal ou encore des chenaux entiers abandonnés lors d'un changement de direction principale du chenal par avulsion.

La diversité et le volume des dépôts résultant font des systèmes chenalisés, une fois enfouis, de bons candidats pour le stockage de ressources naturelles. L'étude de la disposition des différents faciès est donc cruciale pour leur exploitation.

Les techniques d'imagerie satellitaire ou LIDAR (Light Detection and Ranging) permettent l'étude des systèmes actuels. L'architecture en subsurface peut être imagée par image sismique ou GPR (Ground Penetrating Radar), ou localement par des puits d'investigation. Ces techniques permettent d'avoir une bonne évaluation du dernier état du système chenalisé. Les états précédents, quant à eux, peuvent être observés par morceaux lorsqu'ils ont été épargnés par l'érosion. En effet, le remaniement de la ceinture de méandres par migration latérale des chenaux rend souvent difficile l'analyse des états antérieurs tant en matière de géométrie que de chronologie des dépôts.

Cette thèse propose une méthode de simulation de reconstruction des systèmes chenalisés en trois dimensions qui respecte au mieux les informations disponibles de nature et d'échelle diverses. Parmi ces données, souvent, l'imagerie permet d'identifier le dernier état du système et des boucles de méandres abandonnés en contrastant avec la ceinture de méandres par des dépôts souvent plus argileux et datant de la période succédant l'abandon. Des barres d'accrétion latérale peuvent aussi être observées, témoignant des directions de migration des méandres. Parfois, des données de puits sont accessibles et informent sur la nature des faciès rencontrés (p. ex., sableux, argileux). La méthode présentée dans ce manuscrit part du dernier état du système observé. Une simulation rétro-chronologique de la migration du chenal, inspirée par l'analyse des cartes chronologiques du Mississippi, est appliquée et permet, pas de temps par pas de temps, de retrouver de potentiels états antérieurs. Selon une simulation de la chronologie estimée par des critères spatiaux et statistiques (p. ex., distance et orientation au chenal courant, probabilité d'abandon), les méandres abandonnés sont intégrés à l'étape de temps appropriée dans le chenal principal. Les boucles de méandres disparues par érosion ou invisibles à l'imagerie sont compensées par la simulation d'autres méandres dans la ceinture de méandres. Cette simulation respecte les critères géométriques observés sur les méandres épargnés par l'érosion mais également d'autres critères statistiques tels que la probabilité d'érosion observée sur des analogues sédimentaires (p.ex. le fleuve Mississippi).

Cette approche ouvre la possibilité d'honorer les faciès observés sur les puits par la simulation de méandres abandonnés en ces points.

Elle a été appliquée sur deux jeux de données bidimensionnels satellite ou sismique. **Mots-clefs :**

système chenalisé migration méandre abandonné simulation stochastique enregistrement sédimentaire réservoir

---

Reverse-time modeling of channelized meandering systems from geological observations

Summary: Meandering systems constitute the majority of aerial and subaquatic channels which shape the landscapes by their temporal and spatial evolution. The witnesses of this evolution can be observed on the plains crossed by these channels. Among them, lateral point bars result from the channel migration, abandoned meanders are created by the natural stream rectifying and abandoned channels originate from the main direction change by avulsion.

Once buried, the channelized systems are good candidates for natural resources storage thanks to the diversity and the volume of the resulting deposits. The understanding of the internal architecture of facies is thus crucial for resource exploitation.

Satellite and LIDAR (Light Detection and Ranging) images permit current system studies. Subsurface architecture can be imaged by seismic or GPR (Ground Penetrating Radar) images. These techniques give a good evaluation of the whole system of the last channel path. However, anterior stages, when spared by the erosion can only be observed locally. Indeed, the reworking of the channel belt by lateral and downstream migration makes it difficult to observe the geometrical or chronological features of anterior deposits.

This thesis proposes a 3D reconstruction simulation method of channelized systems conditioning to sparse and diverse available information. Among them, the subsurface imaging often permits to identify the last system stage and the abandoned meanders, thanks to their muddy filling after the abandonment time, contrasting with the channel belt. Lateral point bars can also be observed, witnessing of meander paleo-migration direction. Sometimes, well data inform on the facies (e.g., muddy, sandy). The method presented here starts from the last channel path observed on the seismic image and goes back in time by reverse migration to reconstruct anterior channel paths. This stochastic migration model is inspired by the analysis of historic Mississippi maps. According to a chronology simulation based on spatial and statistical criteria (e.g., distance and orientation to the current channel, abandonment probability distribution), abandoned meanders are integrated at the relevant time step inside the main channel path. Erosion and difficulty of imaging of abandoned meanders is addressed by abandoned meander simulation inside the meander belt. This stochastic simulation conditions to geometrical criteria observed on the abandoned meanders spared by the erosion but also to statistical criteria observed on sedimentary analogs such as the Mississippi river (e.g., erosion probability distribution).

One of the main perspectives is to condition to well data through the simulation of abandoned meanders.

This technique has been applied on two satellite and seismic 2D case studies.

Keywords:

channelized system migration abandoned meander stochastic simulation sedimentary record reservoir