



HAL
open science

Construction de modèles stratigraphiques à partir de données éparses

Jonathan Edwards

► **To cite this version:**

Jonathan Edwards. Construction de modèles stratigraphiques à partir de données éparses. Stratigraphie. Université de Lorraine, 2017. Français. NNT : 2017LORR0367 . tel-01836225

HAL Id: tel-01836225

<https://theses.hal.science/tel-01836225v1>

Submitted on 12 Jul 2018

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

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



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>

Construction de modèles stratigraphiques à partir de données éparses

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 27 octobre 2017
pour l'obtention du grade de

Docteur de l'Université de Lorraine

Spécialité Géosciences

par

Jonathan Edwards

Composition du jury :

<i>Rapporteurs :</i>	Emmanuelle VENNIN Jean BORGOMANO
<i>Examinatrice :</i>	Cécile ROBIN
<i>Directeur de thèse :</i>	Guillaume CAUMON
<i>Co-directeurs de thèse :</i>	Cédric CARPENTIER Florent LALLIER
<i>Invitée :</i>	Brigitte DOLIGEZ

“ARDET NEC CONSUMITUR”

Remerciements

Je remercie en premier lieu Guillaume Caumon pour m'avoir donné ma chance et proposé de faire une thèse dans l'équipe Ring. Je le remercie pour son encadrement bienveillant et ses avis pertinents tout au long de ces années. Merci aussi à mes codirecteurs de thèse Cédric Carpentier et Florent Lallier de m'avoir guidé de leurs conseils. Flo, merci aussi pour m'avoir offert l'opportunité du stage à Total E&P UK à Aberdeen, qui fut une expérience enrichissante. Mes remerciements vont également aux membres du jury pour m'avoir fait l'honneur de juger mon travail, Emmanuelle Vennin et Jean Borgomano en tant que rapporteurs et Cécile Robin en tant qu'examinatrice, ainsi que Brigitte Doligez en tant qu'invitée. Je remercie également Didier Granjeon, pour avoir pris le temps de me présenter Dionisos et de répondre à mes questions sur son utilisation.

Je voudrais maintenant remercier l'ensemble de l'équipe, pour produire une telle qualité de travail dans une aussi bonne ambiance. Ça a été vraiment un plaisir de venir travailler au labo avec vous. Pauline, heureusement que tu es là pour ajouter une touche de féminité (de dignité aussi?) aux conversations au RU ou à la cafet. Merci pour ta bonne humeur constante! Paul, j'ai adoré les discussions avec toi sur des sujets plus ou moins profonds, ton oreille attentive quand le besoin s'en fait sentir, ou juste le bon temps passé autour d'un verre au Saint-Germain ou à ton appart. Christine, merci pour être la maman de l'équipe. Merci pour m'avoir prêté les vêtements de ski de ton fils haha. Et merci à toi et Denis pour les soirées supporters chez vous! Christophe, merci pour ton aide pour tous les problèmes techniques que j'ai pu rencontrer (et non, ce n'est pas juste parce que je suis sur Windows!), mais tu aurais pu installer un serveur Minecraft dans un coin du réseau, quand même :D Merci Pierre J. pour ta gestion dans l'ombre. Ton départ à la retraite s'est bien fait sentir! Merci Fatima pour gérer aussi parfaitement le secrétariat de l'équipe et Sophie pour avoir réussi l'exploit de la remplacer à l'arrivée d'Isaac :) Merci à l'ASGA pour le financement de ma thèse, et à Nicole, Armelle, Élisabeth qui font tout pour nous simplifier la vie.

Merci Julien C. pour ton expertise sur les bilans sédimentaires, l'érosion et le transport des sédiments, les bassins sédimentaires... Mais aussi sur l'escalade! En parlant d'escalade, merci à un autre grimpeur, Benoit, pour ton humour et tes apéros dînatoires. On partage quand même une adresse, même numéro et même rue, bon c'est quand j'étais à Dijon, mais c'est pas rien!

Benj, mon frère de sang de thèse, on aura fini par y arriver finalement. Ensemble dans la douleur, on est arrivé au bout! *Victoriae mundis et mundis lacrima*. Bon, ça ne veut absolument rien dire, mais je trouve que c'est assez dans le ton.

Merci aux membres du bureau F221! Pablito, même si tous les problèmes étaient forcément de ta faute (:p), ton départ a créé un grand vide dans le bureau et dans le labo en général. Guillaume R., je mettrais bien un gif pour te remercier :D, vivement qu'on se refasse une soirée qui se finit hyper tard à débattre de tout et n'importe quoi! Masha, merci pour les bons moments qu'on a passés, le reste, somba les cui! Modeste, j'aurais pas réussi à te traîner dans un bar, mais on aura bien rigolé dans le bureau quand même;) Et tu es finalement le seul avec qui j'ai travaillé dans le labo, en discutant du DTW pour la corrélation de tes traces sismiques! Antoine, mon bro, on aura partagé de bonnes expériences durant ces années, entre le ski et le gala avec les infirmières, les fêtes de la bière à Achouffe ou Maxéville, les barathons,

Minecraft, les soirées en tout genre. Merci pour tout ça et merci aussi à Matmat, Mathilde Mazuyette ;)

On passe au bureau des râleurs, F220. Merci Jeanne pour ton canapé et ta machine à laver ! Merci Arnaud pour tes bons conseils et tes efforts pour mon intégration dans l'équipe à mon arrivée. Jérémy, merci pour ton humour noir, et les discussions autour de la culture geek. On ira au Saint-Germain un de ces jours, pour voir si on a encore le super pouvoir de commencer la soirée à deux et finir à vingt-cinq ?

On passe au F222, après le déménagement. Marion, merci pour avoir subi mes histoires de filles, pour les bons moments alcoolisés ou non, et pour ces discussions lors de pauses un peu trop longues pendant la rédaction de cette thèse. Pierre A. (#Hauts-de-France), j'espère qu'on partagera encore plein de bières ensemble. Des bières qu'on a pas encore goûtées, tant qu'à faire, comme ça on gagnera des badges sur Untapped :D Je vous remercie encore, toi et Pauline, pour vous être occupés de moi quand j'étais au plus mal ! Nico, vivement un concert de Justin(e) ;) Julien R., on s'est fait des bons souvenirs en Écosse, notamment un aller-retour assez mythique à Edimbourg pour le Fringe Festival !

On se déplace dans l'aile G, en commençant par le G209. Merci Charline, tu as toujours été de bon conseil. Dis-moi si tu repasses par Reims ! On se fera le Cabaret Vert à Charleville-Mézières un jour ? :D

Merci Gaby pour ton talent en matière de blagues plus ou moins bonnes (Gaby Approved !), au passage merci aussi à Faustine, on a SCube en commun quand même ! Margaux, en plus des souvenirs à Aberdeen, on aura passé des bons moments à Nancy aussi, notamment en profitant du soleil place Charles III :)

Dernier bureau à visiter, G210. Merci Fifi, et Julie, Némoto et Bob, pour votre gentillesse et hospitalité. Quand est-ce qu'on bute un Wu-Feng ? Merci Gauthier de me rappeler que malgré la difficulté, la vie trouve toujours son chemin ;)

Merci à la brigade de l'ambiance, Pierre M. (T'en es où ? Pierre ? Rep stp) et le King, Maxence. Heureusement qu'il y avait des gens solides pour être opé à tout moment pour un happy hour ou un apéro.

Merci à Maël, Oliv, Trams, Bout, Boule, pour être toujours présents, un peu plus bardés, malgré les années qui passent.

Merci Bruno pour m'avoir dirigé vers la géologie numérique quand j'ai dû abandonner la paléontologie.

Merci à mes parents et mes frères pour le soutien durant ma thèse.

Résumé

Toutes les analyses et les constructions de modèles stratigraphiques s'appuient sur des corrélations stratigraphiques entre unités sédimentaires observées au niveau de forages ou d'affleurements. Cependant, deux problèmes se posent aux géologues au moment de la construction de ces corrélations stratigraphiques. Premièrement, les données disponibles sont éparses et peu nombreuses. Deuxièmement, les processus sédimentaires menant à la mise en place des unités sédimentaires à corrélérer sont nombreux, interdépendants et partiellement connus. Ainsi la construction d'un modèle de corrélations stratigraphiques peut être vue comme un problème sous-contraint auquel plusieurs solutions peuvent être proposées.

L'objectif de cette thèse est de mettre en place un système numérique permettant de générer de manière stochastique des modèles stratigraphiques contraints localement par des données d'observation. Deux éléments sont nécessaires à la mise en place d'un tel système :

1. La mise en place de règles régissant l'organisation spatiale d'unités sédimentaires observées au niveau d'affleurements ou de puits. En ce qui concerne ces règles, deux voies seront explorées :
 - La mise en équation des règles définies dans le cadre de la stratigraphie séquentielle. Ces règles, exprimées d'un point de vue qualitatif dans la littérature sont traduites en termes quantitatifs afin d'évaluer la probabilité de deux unités sédimentaires observées d'être corrélées.
 - La déduction de la probabilité de corrélations entre deux unités sédimentaires observées à partir de modèles stratigraphiques construits par approche basée processus (*forward stratigraphic models*).
2. La mise en place d'un cœur algorithmique permettant de construire de façon stochastique un ensemble de modèles stratigraphiques plausibles à partir des règles précédemment présentées et des données d'observation.

Table des matières

Remerciements	iii
Résumé	v
Introduction	1
1 Revue de la corrélation stratigraphique de puits dans la littérature	7
1.1 Système sédimentaire	8
1.1.1 Comparaison entre la lithostratigraphie et la chronostratigraphie	8
1.1.2 Concepts de la stratigraphie séquentielle	9
Une théorie générale pour unifier la description de la pile sédimentaire	9
Des modèles qui divergent à partir de la théorie initiale	12
1.2 Des données de qualités variables	17
1.2.1 Observation directe	18
1.2.2 Mesures géophysiques	18
Mesures géophysiques au puits (1D)	18
Mesures géophysiques de surface (2D, 3D)	19
1.2.3 Utilisation des données dans la corrélation stratigraphique	19
Problématique d'intégration des données sismiques	19
Données de puits interprétées	20
1.3 Impact des incertitudes structurales	20
1.3.1 Incertitudes structurales dans les études de réservoirs d'hydrocarbures	20
1.3.2 Incertitudes structurales dans les études de bassins sédimentaires	21
1.4 Motivations pour une méthode automatique de corrélation stratigraphique	21
1.5 Historique des algorithmes de corrélation stratigraphique automatique	22
1.6 Algorithme de déformation temporelle dynamique	24
1.6.1 Algorithme original	24
1.6.2 Modifications de l'algorithme	25
Stochasticité	25
N-best	25
Contraintes	26
"One-to-many"	26
Corrélation multi-puits	28
1.7 Conclusion	30
2 Méthode de corrélation stratigraphique de puits et règles tirées de la stratigraphie séquentielle	31
2.1 Règles de corrélation dans le cadre de la stratigraphie séquentielle	31
2.1.1 Transgression/Régression	32
2.1.2 Variation latérale d'épaisseur	32
2.1.3 Variation latérale de pendage	36
2.1.4 Intégration des données de biostratigraphie	36

2.2	Application de l'algorithme de déformation temporelle à la stratigraphie séquentielle : association " <i>One-to-many</i> "	37
2.3	Tests des associations <i>one-to-many</i> et <i>n-best</i>	38
2.3.1	Données et paramètres	38
2.3.2	Résultats	40
2.4	Impact des incertitudes d'interprétation	40
2.4.1	Interprétation des données	42
2.4.2	Résultats et discussions	42
	Associations <i>one-to-one</i>	42
	Associations <i>one-to-many</i>	49
	Impact de l'information biostratigraphique	50
2.5	Conclusions	51
3	Corrélation stratigraphique de puits à l'aide d'un modèle analogue	53
3.1	Données d'entrée	54
3.1.1	Puits	54
3.1.2	Géomodèle 3D	54
	Modélisation stratigraphique par simulation de processus	54
3.1.3	Propriétés	55
3.2	Évaluation de la cohérence d'une unité stratigraphique à partir d'un modèle d'entraînement	57
3.2.1	Calcul du coût d'une association de marqueurs	57
	Coût d'une association d'unités	57
	Coût d'un hiatus	59
3.2.2	Conformité	60
	Intégration de la conformité dans l'algorithme DTW	60
	Obtention de la conformité	60
3.2.3	Stochasticité	61
3.3	Conclusion	61
4	Gestion des incertitudes dans la corrélation stratigraphique multi-puits :	
	Corrélation de colonne stratigraphique	63
4.1	Rappel du problème	63
4.2	Colonne Stratigraphique	64
4.3	Ajouter des puits à la Colonne Stratigraphique Globale	64
4.4	Mise à jour de la Colonne Stratigraphique Globale	66
4.4.1	Association d'unités	66
4.4.2	Hiatus	66
4.4.3	Mise à jour de la conformité	66
4.5	Ordre de corrélation des puits	66
4.5.1	Choix de l'ordre de corrélation des puits	66
4.5.2	Impact de l'ordre de corrélation des puits	66
4.6	Conclusion	67
5	Application et implications de la méthode de corrélation multi-puits avec modèle d'entraînement	69
5.1	Données	69
5.1.1	Modèle d'entraînement	69
5.1.2	Puits	70
5.2	Corrélation	71
5.3	Résultats	74
5.3.1	Construction de modèles à partir des corrélations stratigraphiques	74

5.3.2	Calcul d'une distance de temps géologique relatif	74
5.3.3	Analyse de la répartition des volumes dans les modèles réalisés	79
5.4	Discussion	79
5.4.1	Données	80
5.4.2	Méthode et algorithme	81
	Algorithme de corrélation stratigraphique	81
	Construction des modèles	81
5.4.3	Cas d'étude	81
5.4.4	Implications des résultats dans des applications	82
	Études de bassins sédimentaires	82
	Études de réservoirs	82
5.5	Conclusions et perspectives	83
	Conclusion générale	85
	Annexe 1 : Corrélation des données de puits aux données sismiques	105
	Annexe 2 : Outil de visualisation de corrélations stochastiques	113

Introduction

La stratigraphie est “l’étude de l’agencement dans l’espace et dans le temps des formations géologiques et des évènements qu’elles matérialisent, afin de reconstituer l’histoire de la Terre et ses divers états aux divers moments du temps” [Rey, 1983]. Elle permet de localiser les objets géologiques dans l’espace et le temps à l’aide de descriptions et d’interprétations de données de terrain.

Comprendre l’organisation et la nature des roches qui composent le sous-sol et appréhender les interactions entre les différents objets sédimentaires permet d’accéder à différentes informations géologiques. Par exemple, l’étude du sous-sol aide à anticiper et gérer les risques naturels (séismes, glissements de terrain...) (e.g. Scholz *et al.* [1973], Scheidegger [1973], Chung *et al.* [1999]).

L’étude de bassins sédimentaires silicoclastiques permet de comprendre les phénomènes physiques qui les contraignent et ainsi prévoir l’évolution des bassins actuels. Le taux de sédimentation, quantité de sédiment déposée par unité de temps, donne une indication sur l’érosion des reliefs du bassin versant correspondant. En comparant les variations de ce taux avec les variations du climat ou les mouvements tectoniques, il est possible d’étudier les interactions et liens de causalité entre le climat, l’érosion et la tectonique (e.g. Métivier *et al.* [1999], Rouby *et al.* [2009], Charreau *et al.* [2011], Bhattacharya *et al.* [2016]).

Les bassins carbonatés sont plus difficiles à interpréter car ils sont beaucoup plus sensibles aux facteurs climatiques et aux variations de la surface de production disponible.

L’exploitation de ressources (hydrocarbures, eau, ressources minérales...) nécessite également de bien se représenter l’agencement des strates (e.g. Vincent *et al.* [1999], Fredman *et al.* [2007]). En effet, pour limiter le coût de la production, il faut connaître précisément la position et le volume de la ressource, le filon du minéral exploité ou le réservoir de fluide, ainsi que les barrières imperméables à son écoulement ou au contraire les éventuels drains.

Pour obtenir ces informations, visualiser les unités, leurs volumes et leurs relations, et tester des scénarios, des géomodèles peuvent être construits. Ce sont des représentations en trois dimensions (3D) des unités et structures d’une région d’intérêt. Ils permettent en outre de caractériser les distributions de faciès [Homewood *et al.*, 1992] et leur impact sur les écoulements de fluides en subsurface [Jackson *et al.*, 2009, Lallier *et al.*, 2012, Cavero *et al.*, 2016], par exemple.

Il est possible de générer des modèles stratigraphiques grâce aux méthodes de modélisation directe. Ces méthodes sont basées sur l’implémentation des lois physiques qui régissent le transport des sédiments et la sédimentation [Tetzlaff et Harbaugh, 1989, Lawrence *et al.*, 1990, Kendall *et al.*, 1991, Granjeon, 1997, Burgess, 2012]. Les dépôts de sédiments sont calculés à chaque pas de temps. Cependant ces méthodes trouvent leurs limites dans le calage aux données (données de puits, affleurements et données sismiques, entre autres) [Cross et Lessenger, 1999], et dans le choix des paramètres contrôlant le transport et le dépôt des sédiments.

Une autre famille de méthodes, l’interpolation géométrique, permet de mieux contraindre le modèle aux données. Elles s’effectuent généralement en quatre étapes (fig. 1) :

1. tracer les corrélations stratigraphiques des horizons à partir des données disponibles,
2. extrapoler/interpoler leur géométrie,

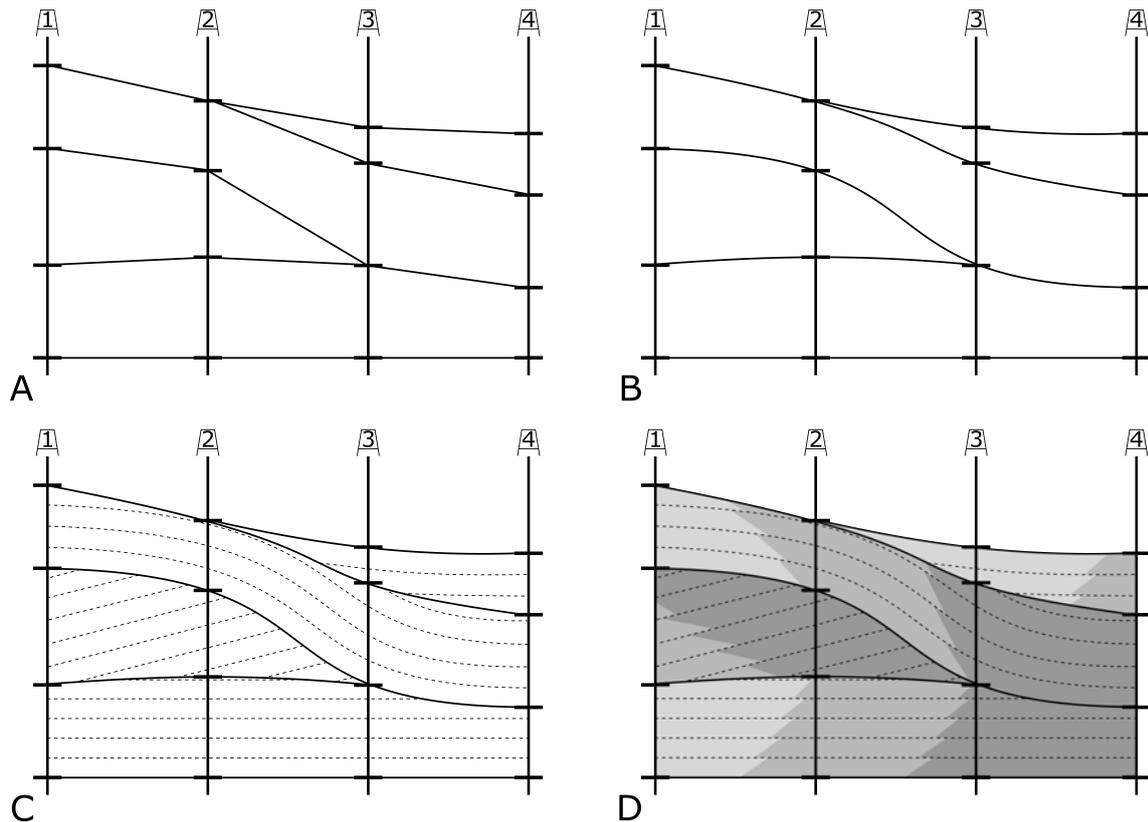


FIGURE 1 – Etapes de construction d’un géomodèle. A : Corrélations stratigraphiques. B : Extrapolation/Interpolation des géométries. C : Remplissage de la conformité. D : Remplissage des propriétés.

3. définir la conformité des unités, l’agencement des sédiments dans chaque unité et leurs relations avec les limites de ces unités,
4. remplir les unités avec des propriétés pétrophysiques (faciès ou porosité par exemple).

La première étape, la corrélation stratigraphique, est essentielle pour comprendre les agencements et architectures des unités. En effet, les surfaces stratigraphiques, surtout celles limitant des unités dont l’épaisseur les place sous la résolution des données sismiques, sont principalement documentées par des séries de carottes et logs présentant plusieurs propriétés physiques et lithologiques des sédiments comme la granulométrie, le rayonnement gamma et la résistivité, entre autres. Ces propriétés sont ensuite interprétées en termes de faciès, séquences stratigraphiques et/ou bathymétrie, par exemple.

La variabilité de la qualité, de la complétude et de la résolution des données, ajoutée au fait que les processus qui contrôlent le transport et le dépôt des sédiments soient complexes et interdépendants, induit des incertitudes quant à leur corrélation stratigraphique.

Les corrélations stratigraphiques sont généralement effectuées manuellement, ce qui en 3D est lent, laborieux et coûteux [Doveton, 1994]. Les incertitudes sont négligées, la corrélation étant déterministe, et différents sédimentologues peuvent avoir différentes interprétations [Vermaas *et al.*, 2016]. Ce problème de subjectivité a été montré par exemple par Bond *et al.* [2007] sur des problématique de géologie structurale.

Ainsi, la corrélation stratigraphique est un problème sous-contraint. Différentes causes pouvant produire les mêmes effets [Burton *et al.*, 1987, Galloway, 1989], plusieurs scénarios (un scénario étant une histoire géologique, une suite d’évènements) peuvent produire des successions d’unités similaires [Helland-Hansen et Gjølberg, 1994, Armitage *et al.*, 2015, Burgess et Prince, 2015], et un même lot de données peut avoir plusieurs corrélations stratigraphiques plausibles [Borgomano *et al.*, 2008, Koehrer *et al.*, 2011, Colombera *et al.*, 2012].

Différentes stratégies ont été élaborées dans la littérature pour faire des corrélations automatiques, notamment dans le domaine de l'intelligence artificielle. En effet, des algorithmes ont été appliqués à la corrélation stratigraphique tels que les systèmes experts [Olea *et al.*, 1986], les réseaux neuronaux [Baldwin *et al.*, 1989] et l'algorithme de déformation temporelle [Smith et Waterman, 1980] qui est utilisé dans cette thèse. Ces algorithmes utilisent des règles de corrélation, des applications numériques des lois qui définissent les dépôts sédimentaires. Bien qu'ils montrent des résultats cohérents, le principal problème est de définir les règles de corrélation utilisables par l'algorithme.

Dans cette thèse nous présentons quelques règles de corrélation applicables à des contextes de marges passives sans grands mouvements tectoniques et avec une subsidence uniforme, dans le cadre de la stratigraphie séquentielle

Mais la traduction des concepts de transport et dépôt des sédiments en règles de corrélation numériques, et leur donner une cohérence les unes par rapport aux autres, reste difficile.

Ainsi, plutôt que d'utiliser une liste de règles stratigraphiques, une autre méthode expliquée dans cette thèse est d'utiliser les modèles directs. Ces modèles présentent des architectures plausibles d'unités, et peuvent être utilisés pour calculer une probabilité d'existence des corrélations stratigraphiques des données de puits. Cette méthode est basée sur les statistiques multi-points [Guardiano et Srivastava, 1993].

La troisième étape, la détermination de la conformité des unités stratigraphiques, est également importante, notamment pour les études de réservoirs, pour bien capturer les unités d'écoulements de fluides. En effet, la conformité, la géométrie des contacts entre les différentes unités et la façon dont les sédiments se sont déposés dans une unité vont influencer sur les mouvements des fluides présents [Willis et White, 2000]. Nous allons donc nous intéresser aussi à cet aspect dans cette thèse en obtenant en sortie de la corrélation l'information de conformité des unités stratigraphiques.

L'objectif de cette thèse est donc de proposer des méthodes automatiques, reproductibles, de corrélation stratigraphique des données de puits. Les méthodes sont stochastiques, pour permettre d'échantillonner l'espace des incertitudes, et générer différentes corrélations stratigraphiques possibles.

Dans le premier chapitre, nous détaillerons ce qu'est la stratigraphie en faisant un historique de son étude. Ensuite, nous nous intéresserons aux différentes données utilisées dans la corrélation stratigraphique et aux limites de la corrélation manuelle. Enfin, nous passerons en revue les différentes méthodes de corrélation automatique.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modification de l'algorithme de déformation temporelle pour intégrer des concepts tirés du paradigme de la stratigraphie séquentielle. Nous verrons aussi comment implémenter des règles utilisables par l'algorithme qui quantifient certains de ces concepts.

Puis nous utiliserons les modèles directs pour calculer la probabilité d'association des unités dans le chapitre trois.

Nous présenterons dans le chapitre quatre une méthode pour gérer les ambiguïtés de la corrélation stratigraphique multi-puits.

Enfin, nous appliquerons les méthodes présentées dans les deux chapitres précédents dans le chapitre cinq.

Contexte

Cette thèse a été effectuée dans l'équipe RING du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine). Elle est financée par l'ASGA (Association Scientifique pour la Géologie et ses Applications) qui gère le consortium Gocad-RING.

Contributions scientifiques

- Premièrement, des règles de corrélation sont proposées, dans le cadre de la stratigraphie séquentielle, et utilisées dans une méthode stochastique de corrélation stratigraphique en prenant en compte les niveaux d'ordres d'interprétation des séquences stratigraphiques et la conformité de ces séquences. Ces travaux sont présentés dans le chapitre 2. Ils ont fait l'objet d'une présentation à la conférence *Second EAGE Integrated Reservoir Modeling Conference*, tenue du 16 au 19 Novembre 2014 à Dubaï (Emirats Arabes Unis), sous le titre *Assessing Uncertainty in Stratigraphic Correlation : A Stochastic Method Based on Dynamic Time Warping* [Edwards *et al.*, 2014].
- Deuxièmement, une technique de mesure de la probabilité d'association de marqueurs stratigraphiques à l'aide d'un modèle d'entraînement est présentée dans le chapitre 3.
- Enfin, une méthode de corrélation stratigraphique de lots de puits est développée, permettant de gérer les ambiguïtés résultant de la corrélation séquentielle de paires de puits en construisant des colonnes stratigraphiques. Cette méthode est explicitée dans le chapitre 4. Cette méthode, associée à la technique du point précédent, ont été présentées à la conférence *Second Conference on Forward Modelling of Sedimentary Systems*, qui a eu lieu du 25 au 28 Avril 2016 à Trondheim (Norvège), sous le titre *Using a Forward Model as Training Model for 3D Stochastic Multi-well Correlation* [Edwards *et al.*, 2016]. Elles ont également été détaillées dans un article intitulé *Uncertainty management in stratigraphic well correlation : A training based method* soumis au journal *Computers and Geoscience*.

Encadrement

Durant cette thèse j'ai eu l'opportunité d'encadrer différents travaux d'étudiants :

- Anaïs Pons a travaillé sur l'aspect stochastique de l'algorithme de déformation temporelle, et sur la visualisation des résultats [Pons *et al.*, 2015].
- Guillaume Vix s'est intéressé à l'élaboration d'une règle de corrélation des unités stratigraphiques basée sur leurs épaisseurs, en intégrant le partitionnement volumétrique [Vix *et al.*, 2015].
- Rémy Cheverry a développé un algorithme de déformation temporelle stochastique de corrélation sismique-puits [Cheverry *et al.*, 2015].
- Wesley Banfield a comparé et discuté différentes méthodes de corrélation multi-puits [Banfield *et al.*, 2016].
- Thomas Monin a implémenté une règle de corrélation stratigraphique en intégrant les différences de subsidence locale.
- Victor Haddad a travaillé sur la corrélation de données réelles contrainte par des données de biostratigraphie.

Aspects techniques

- L'algorithme et les règles de corrélation décrits dans cette thèse ont été implémentés dans le plugin SCube pour le logiciel SKUA-GOCAD de la société Paradigm (fig. 2). Il est codé en langage C++ et a été commencé dans le cadre de la thèse de Florent Lallier [Lallier, 2012].
- Les modèles directs ont été générés grâce au logiciel Dionisos (Beicip).
- Les résultats ont été compilés et traités avec le logiciel R.

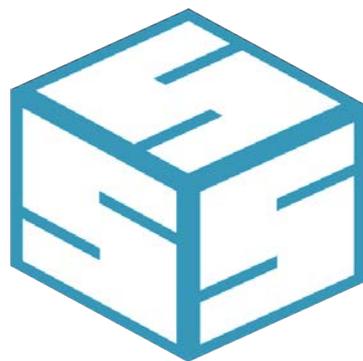


FIGURE 2 – Logo du plugin SCube pour le logiciel SKUA-GOCAD.

Chapitre 1

Revue de la corrélation stratigraphique de puits dans la littérature

Sommaire

1.1	Système sédimentaire	8
1.1.1	Comparaison entre la lithostratigraphie et la chronostratigraphie	8
1.1.2	Concepts de la stratigraphie séquentielle	9
	Une théorie générale pour unifier la description de la pile sédimentaire	9
	Des modèles qui divergent à partir de la théorie initiale	12
1.2	Des données de qualités variables	17
1.2.1	Observation directe	18
1.2.2	Mesures géophysiques	18
	Mesures géophysiques au puits (1D)	18
	Mesures géophysiques de surface (2D, 3D)	19
1.2.3	Utilisation des données dans la corrélation stratigraphique	19
	Problématique d'intégration des données sismiques	19
	Données de puits interprétées	20
1.3	Impact des incertitudes structurales	20
1.3.1	Incertitudes structurales dans les études de réservoirs d'hydrocarbures	20
1.3.2	Incertitudes structurales dans les études de bassins sédimentaires	21
1.4	Motivations pour une méthode automatique de corrélation stratigraphique	21
1.5	Historique des algorithmes de corrélation stratigraphique automatique	22
1.6	Algorithme de déformation temporelle dynamique	24
1.6.1	Algorithme original	24
1.6.2	Modifications de l'algorithme	25
	Stochasticité	25
	N-best	25
	Contraintes	26
	"One-to-many"	26
	Corrélation multi-puits	28
1.7	Conclusion	30

Nous allons commencer ce chapitre en définissant le système sédimentaire (section 1.1), puis nous verrons les données (section 1.2) et algorithmes (section 1.5) utilisés en corrélation stratigraphique, en faisant un historique des méthodes rencontrées dans la littérature. Nous expliciterons notamment l'algorithme de déformation temporelle dynamique (*Dynamic Time Warping*, DTW) que nous utilisons dans cette thèse (section 1.6).

1.1 Système sédimentaire

Les roches sédimentaires sont composées d'une succession de strates qui ont été étudiées depuis plusieurs siècles. Steno [1669] énonça trois principes il y a presque 350 ans :

- principe d'horizontalité : les strates se déposent de façon horizontale ou sub-horizontale.
- principe de continuité latérale : les strates se déposent de façon continue latéralement.
- principe de superposition : les strates plus récentes se déposent sur les strates plus anciennes.

Il explique que si ces principes ne sont pas vérifiés, cela est dû à des événements postérieurs au dépôt.

Hutton [1788, 1795] fut le premier à considérer que les causes de l'agencement des dépôts sédimentaires actuels étaient similaires dans le passé et avaient des effets comparables. Il s'opposa ainsi aux catastrophistes de l'époque qui expliquaient les dépôts par le Déluge décrit dans la Bible [Bushman, 1983]. Sir Charles Lyell appuya le discours d'Hutton [Lyell, 1830-1833], le généralisant dans la communauté scientifique de l'époque [Bushman, 1983], mais considérait que les processus n'avaient pas évolués et étaient restés constants au fil du temps. Ce concept fut finalement nommé principe d'uniformitarisme par Whewell [1837].

Un an plus tard, Gressly [1838] apporte le concept de faciès, qui est l'ensemble des caractéristiques pétrographiques et paléontologiques d'une unité stratigraphique [Cross et Homewood, 1997]. Il a remarqué que ces caractéristiques peuvent varier latéralement, par des changements de l'environnement de dépôt, et qu'un même faciès pouvait être observé dans différentes unités stratigraphiques. Gressly a également observé que les variations d'assemblages paléontologiques sont similaires latéralement, dans l'espace, dues aux environnements de dépôt à un moment donné, et verticalement, dans le temps, dues aux changements d'environnement de dépôt à un endroit donné. Il distingue aussi les fossiles qui marquent un faciès donné, indépendamment du temps, et les fossiles qui caractérisent une unité stratigraphique, permettant la biostratigraphie. Ainsi, Gressly a apporté des éléments majeurs pour la corrélation stratigraphique

Walther [1894] reprit les idées de Gressly et précisa l'ordre logique que présentent les successions de faciès dans la colonne stratigraphique. Cette règle est connue sous le nom de Loi de Walther de la Corrélation de Faciès. Elle indique que la progression verticale des faciès est le résultat de la succession des environnements de dépôts qui sont juxtaposés latéralement [Middleton, 1973, López, 2015]. Ce sont les prémices de la distinction entre lithostratigraphie et chronostratigraphie.

Ainsi, les faciès ne se déposent pas aléatoirement, mais sont dépendant de leur environnement et de leur profondeur de dépôt notamment. Plusieurs études ont donc eu pour but de déterminer les rapports entre le faciès déposé et la bathymétrie correspondante [Hallam, 1967, Benedict et Walker, 1978, Clifton, 1988].

1.1.1 Comparaison entre la lithostratigraphie et la chronostratigraphie

Pour corréler les données stratigraphiques, il faut définir un cadre d'étude. Deux grands paradigmes de corrélation se retrouvent dans la littérature : la lithostratigraphie et la chronostratigraphie [Ainsworth *et al.*, 1999, Gani, 2005].

La lithostratigraphie consiste à associer les unités sédimentaires selon les propriétés de la roche, en corrélant les unités présentant des caractéristiques similaires, pour retracer les contours des objets sédimentaires (fig. 1.1, A).

La chronostratigraphie, en revanche, consiste à corréler des dépôts de même âge (fig. 1.1, B). C'est donc une approche génétique. À part dans le cas d'échantillonnage intensif, avec des puits proches les uns des autres, où la lithostratigraphie s'apparente à de la chronostratigraphie, cette dernière permet de mieux comprendre les hétérogénéités et la connectivité d'un

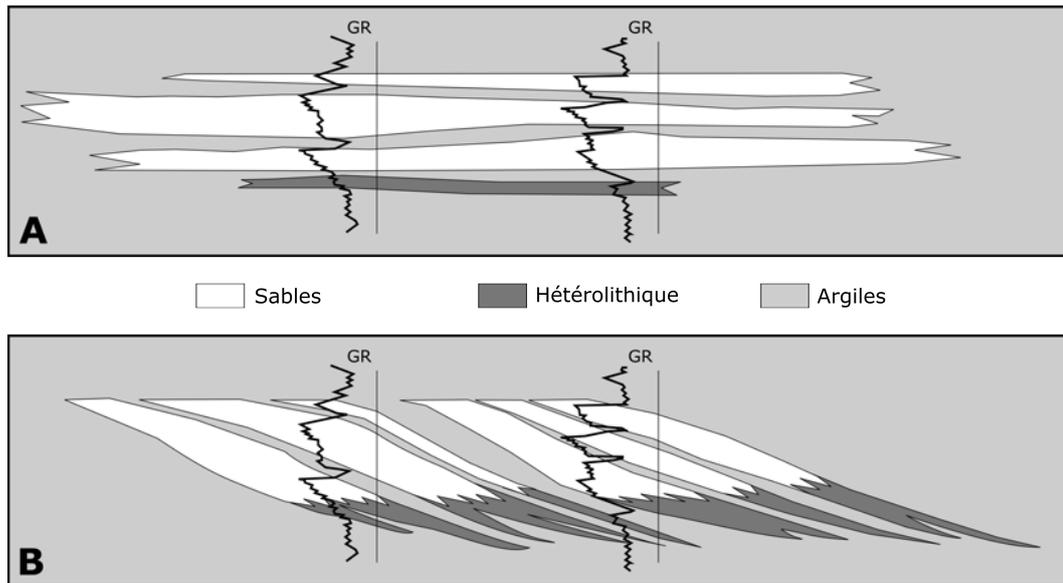


FIGURE 1.1 – Comparaison des corrélations lithostratigraphique et chronostratigraphique (modifié d’après Ainsworth *et al.* [1999]). Deux puits présentant un log de rayons gamma sont corrélés selon A- le paradigme de lithostratigraphie, B- le paradigme de chronostratigraphie. Dans cet exemple, la corrélation lithostratigraphique conduit à tracer des unités sub-horizontales continues alors que la corrélation chronostratigraphique présente des sigmoïdes avec des variations latérales de faciès.

réservoir par exemple. En effet, elle permet la compréhension des dépôts des sédiments dans l’espace et dans le temps, et ainsi de prévoir la continuité des objets sédimentaires.

La biostratigraphie, définie par des assemblages de fossiles dont les étendues temporelles sont connues, permet de dater de façon relative et/ou absolue des unités ou horizons (chronostratigraphie) et de définir des faciès grâce aux assemblages de fossiles (chronostratigraphie ou lithostratigraphie). Cependant, la répartition incomplète des fossiles dans le bassin, leurs conservations variables ou un échantillonnage inégal peuvent mener à des incohérences et des incertitudes importantes [Sadler et Cooper, 2003] (fig. 1.2).

Une fois les strates et surfaces datées relativement les unes aux autres, l’empilement stratigraphique peut être représenté dans un diagramme dit de Wheeler, selon les travaux de Wheeler [1958, 1964]. Dans un tel diagramme, l’axe vertical n’est pas la profondeur mais le temps (fig. 1.3). Cela permet de mettre en évidence différentes caractéristiques, notamment les hiatus, dus à l’érosion ou le non dépôt des sédiments.

1.1.2 Concepts de la stratigraphie séquentielle

Une théorie générale pour unifier la description de la pile sédimentaire

La stratigraphie séquentielle est l’étude de la subdivision des successions stratigraphiques en unités discrètes selon une approche génétique [Sloss, 1988, Van Wagoner *et al.*, 1988, Miall, 1997].

Une séquence stratigraphique est une succession de strates relativement conformes, limitée par des discordances [Mitchum *et al.*, 1977b] (fig. 1.4). Une discordance est une surface qui présente une exposition aérienne ou sub-aérienne, parfois avec érosion, avec un hiatus significatif [Van Wagoner *et al.*, 1988]. Une séquence peut être définie à différents ordres, une séquence d’ordre élevé contenant plusieurs séquences d’ordres inférieurs [Guillocheau, 1991, Neal *et al.*, 1993] (fig. 1.5).

Ces séquences et surfaces sont la conséquence du remplissage et de l’érosion du bassin sédimentaire, contrôlés par les variations de l’apport de sédiments (S) et de l’espace d’accom-

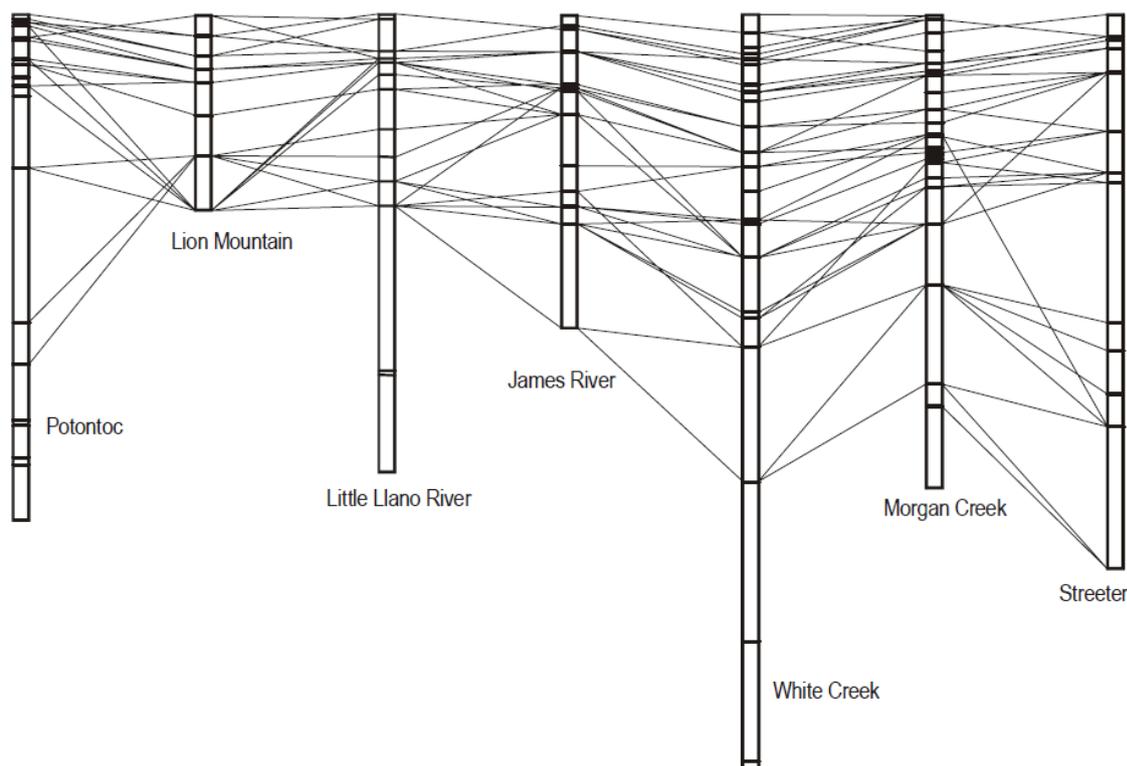


FIGURE 1.2 – Incertitudes de la corrélation biostratigraphique (modifié d’après [Sadler et Cooper, 2003]). Chaque corrélation marque les premières ou dernières occurrences d’un taxon sur deux sections voisines. Le problème d’intersection des corrélations qui apparaît ici n’est représenté que pour des paires de sections. Il faudrait représenter les corrélations de chaque puits avec chaque autre puits en 3D pour visualiser l’ensemble du problème.

modation (A) [Vail *et al.*, 1987, 1991, Fulthorpe, 1991, Schlager, 1993].

Les sédiments proviennent du continent, le pôle proximal, et se dirigent vers le bassin, le pôle distal. L’axe proximal-distal trace la direction de la distalité.

L’espace d’accommodation varie en fonction de la subsidence, l’enfoncement de la croûte terrestre (sous le poids des sédiments, sous l’influence des mouvements tectonique, et/ou sous influence thermique), et de l’eustatisme, les variations du niveau marin (fig. 1.6). Quand le niveau marin relatif monte, la mer gagne du terrain sur la terre, c’est une transgression. Quand ce niveau baisse, la ligne de côte se déplace vers le pôle distal, c’est une régression. La tectonique étant généralement non-périodique, les variations cycliques entre transgressions et régressions sont principalement dues aux variations eustatiques (dans le contexte de marge passive) [Guillocheau, 1995].

Le ratio $R = \frac{A}{S}$ contrôle la migration de la ligne de côte, dessinant une rétrogradation si $R > 1$, une aggradation si $R = 1$ et une progradation si $R < 1$ [Catuneanu *et al.*, 2009] (fig. 1.7). Ce concept simple a été modulé par Muto et Steel [1997], en notant qu’une rétrogradation est inévitablement observée, après un court événement progradant, pour des valeurs de A et S constantes. Cet effet s’applique à n’importe quelle valeur de A et S , mais il est d’autant plus prononcé que la valeur de A est supérieure à celle de S ($R > 1$).

Les sédiments sont préservés différemment selon le mouvement du niveau marin relatif. Lors d’une régression, les sédiments progradent, et les faciès marins déposés vers le pôle distal sont les mieux préservés. Les faciès continentaux sont eux érodés ou réduits par manque d’espace d’accommodation. En revanche, ces faciès sont mieux préservés lors d’une transgression, lorsque la ligne de côte montre une rétrogradation. Il y a moins de dépôts en milieu marin, qui sont réduits à des niveaux condensés [Guillocheau, 1995, Cross et Lessenger, 1998]. Cette

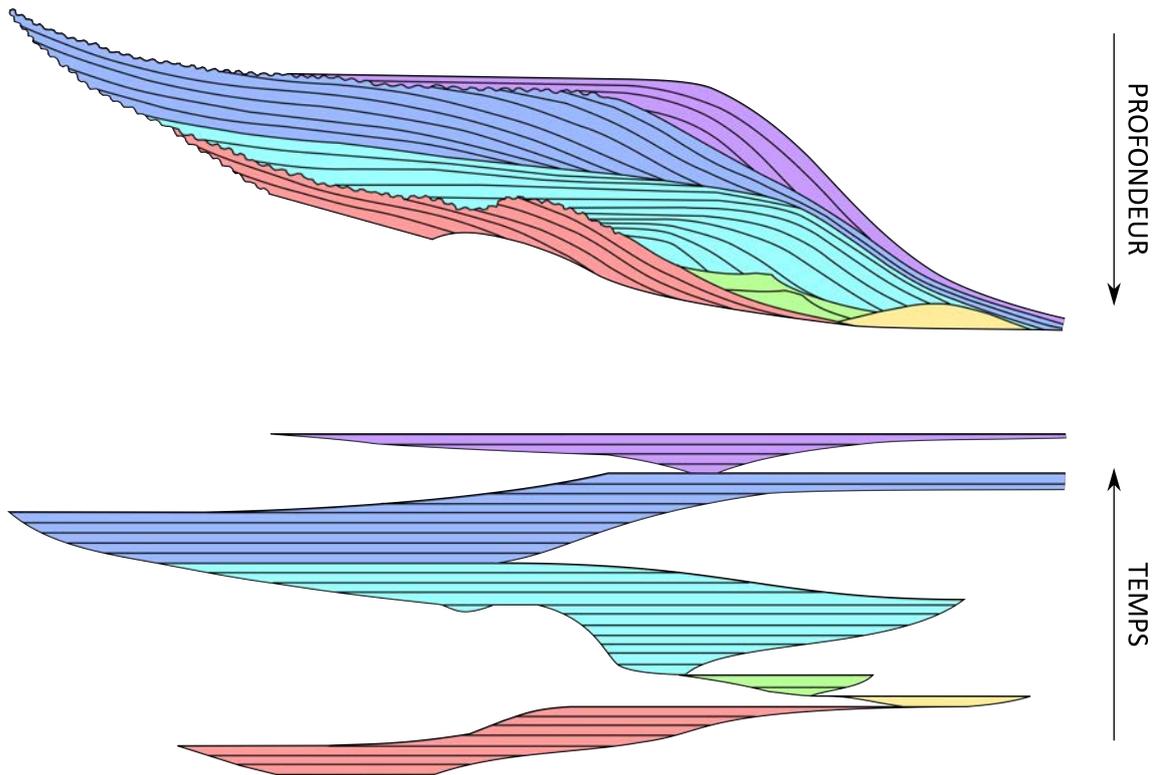


FIGURE 1.3 – Comparaison des représentations stratigraphiques en profondeur et en temps (modifié d’après Christie-Blick et Driscoll [1995]). La représentation en temps est appelée diagramme de Wheeler. Ce modèle correspond au modèle d’Exxon et les couleurs correspondent aux différents cortèges sédimentaires (fig. 1.4).

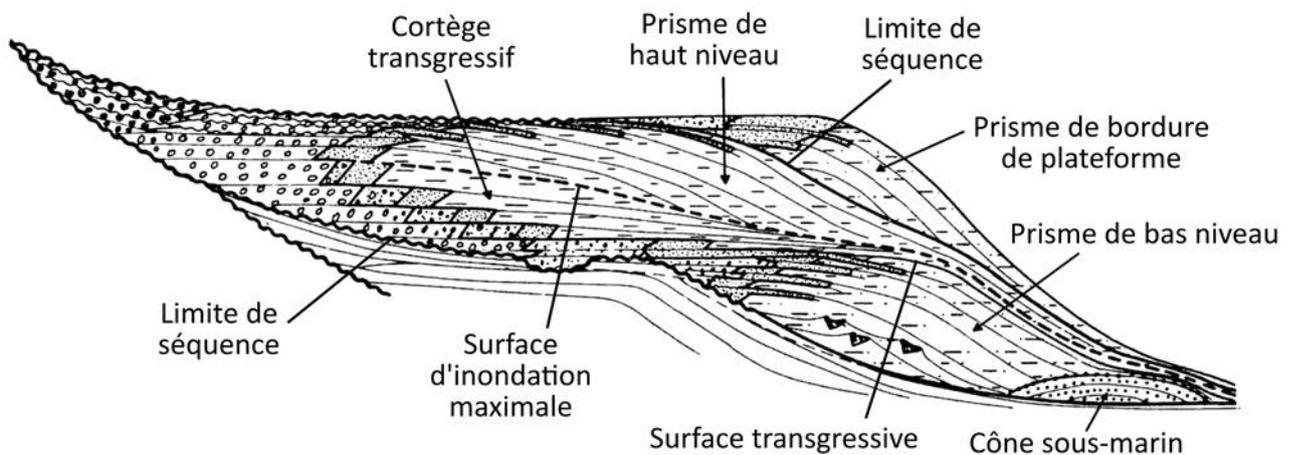


FIGURE 1.4 – Représentation d’une séquence stratigraphique selon le modèle d’Exxon (modifié d’après Vail *et al.* [1987]). Il est possible d’y repérer différents cortèges et surfaces remarquables.

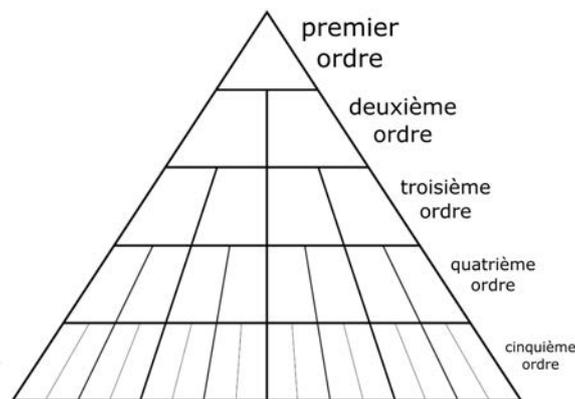


FIGURE 1.5 – Pyramide des ordres en stratigraphie séquentielle (modifié d’après Catuneanu *et al.* [2011]).

sédimentation et préservation différentielle est appelée partitionnement volumétrique (fig. 1.8) [Cross *et al.*, 1993].

Des modèles qui divergent à partir de la théorie initiale

Depuis les premiers travaux de subdivision de colonnes stratigraphiques en séquences [Sloss *et al.*, 1949], ou en unités [Wheeler, 1958], plusieurs approches ont été proposées (fig. 1.9) et discutées dans la littérature (voir Helland-Hansen et Gjelberg [1994], Catuneanu *et al.* [2009], par exemple). Chacun de ces modèles conceptuels est caractérisé par ses propres limites de séquences [Galloway, 1989a, Carter, 1998, Schlager, 1999], et peuvent aussi présenter différents cortèges de dépôts (fig. 1.12), qui sont des sous-unités d’une séquence avec leurs propres motifs [Catuneanu *et al.*, 2011, 2012].

Ces modèles peuvent également varier en fonction des sédiments considérés (dépôts carbonatés ou silicoclastiques). L’étude de Greenlee *et al.* [1992] montre que des différences peuvent apparaître entre le modèle d’Exxon [Vail *et al.*, 1987] (fig. 1.4) et une zone d’étude précise (ici, des dépôts Néogène d’une plateforme et d’un talus continentaux au New Jersey, figure 1.10). Cet exemple montre un modèle très progradant avec peu d’accommodation, contrairement au modèle d’Exxon qui montre un modèle aggradant avec beaucoup d’accommodation.

Miall [1997] explique également que le modèle d’Exxon, correspondant au modèle II sur la figure 1.12, est appliqué à une marge continentale extensive pour des sédiments silicoclastiques, et doit être modifié pour être appliqué à d’autres environnements. Posamentier et Allen [1993] insistent sur l’impact des facteurs locaux influant sur les architectures : les variations de niveau marin et la subsidence ou la surrection du fond marin déterminent l’apparition des limites de séquence, tandis que l’apport de sédiment et la physiographie du fond marin régissent l’architecture des sédiments entre ces limites. Posamentier et James [1993] expliquent que la stratigraphie séquentielle doit être utilisée comme un outil et non comme un modèle dans lequel il faut adapter ses données et observations.

Plusieurs auteurs suggèrent que différents paramètres (variation du niveau marin relatif, granulométrie, quantité de sédiments...) peuvent par différentes combinaisons donner les mêmes géométries (eg. Burgess et Allen [1996], Armitage *et al.* [2015], Burgess et Prince [2015], fig. 1.11). Ils défendent ainsi la non-unicité des architectures construites dans le cadre de la stratigraphie séquentielle.

Ce point ne fait toutefois pas l’unanimité dans la littérature et est toujours discuté [Catuneanu et Zecchin, 2016a,b, Burgess et Prince, 2016]. La difficulté à diviser une succession sédimentaire en unités hiérarchiques vient du fait que les processus interagissant dans le dépôt des séquences et la formation des cycles stratigraphiques sont continus dans le temps et l’es-

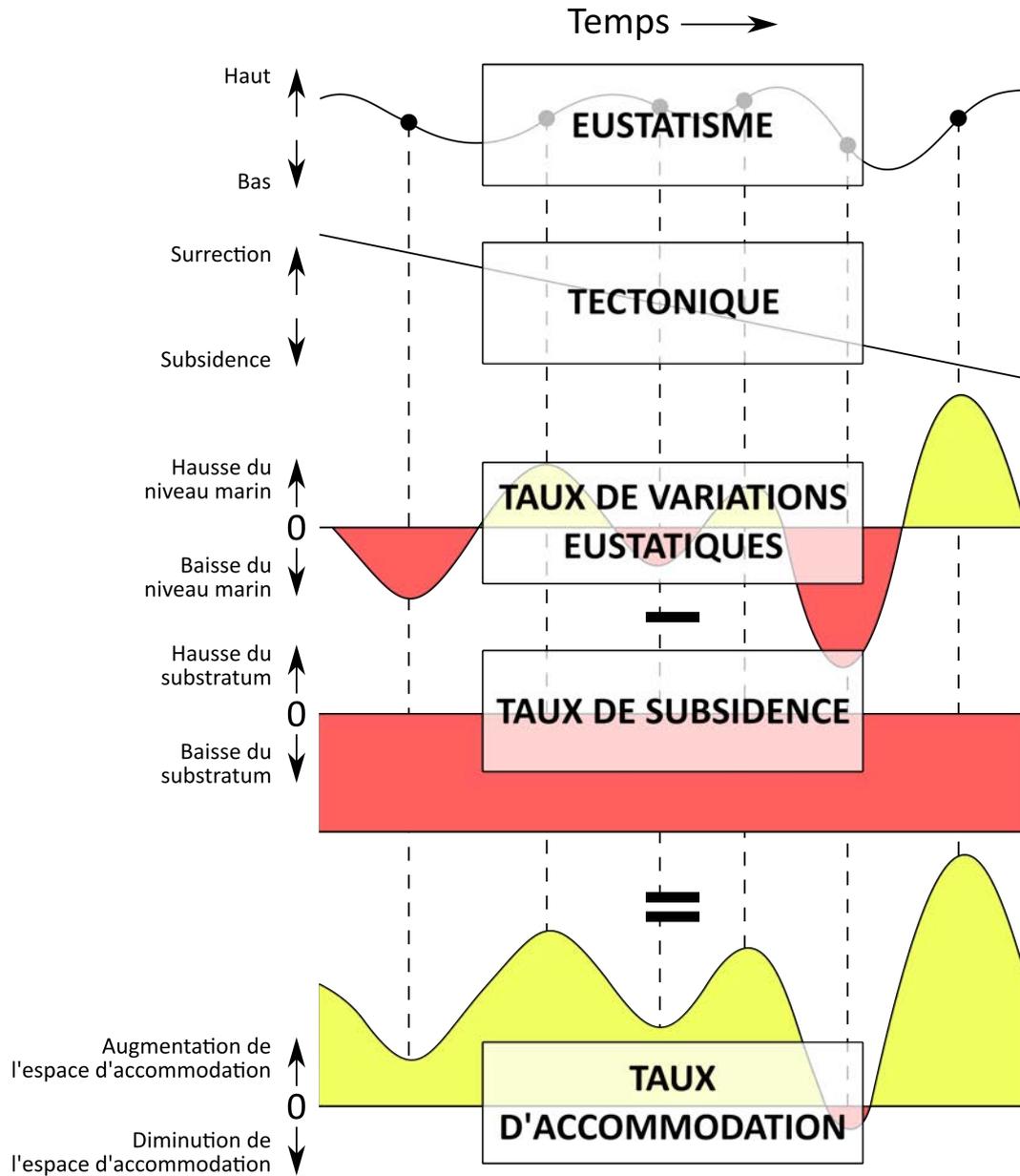


FIGURE 1.6 – Relation entre l'eustatisme, la subsidence et le taux d'accommodation (modifié d'après Posamentier [1988]). Les variations du niveau marin, associées aux variations de la subsidence, expliquent les taux d'accommodation. Ici, la subsidence est constante. Tant que le niveau marin monte, ou qu'il baisse mais moins vite que le substratum, de l'espace d'accommodation sera créé. Si le niveau marin baisse plus vite que le substratum, l'espace d'accommodation diminue.

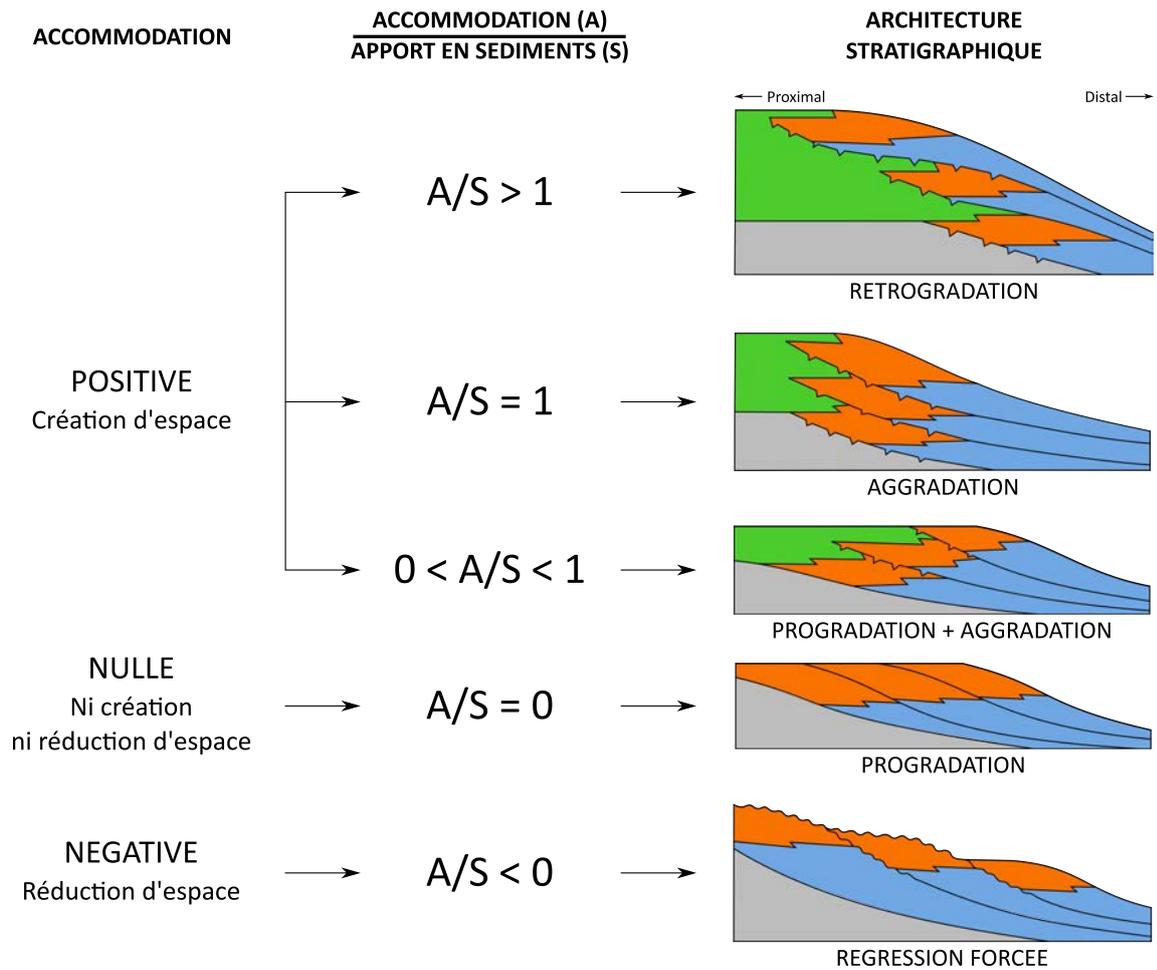


FIGURE 1.7 – Architectures stratigraphiques en fonction des variations d'accommodation (modifié d'après Homewood *et al.* [2000], Kedzierski [2007]).

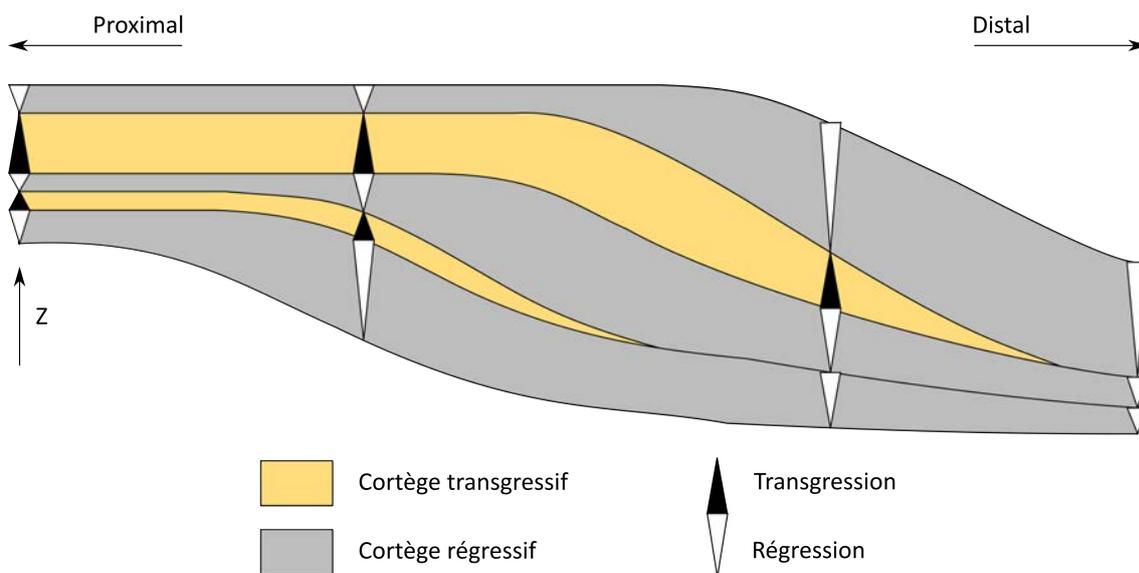


FIGURE 1.8 – Partitionnement volumétrique des sédiments en fonction des variations du niveau marin relatif (modifié d'après Kedzierski [2007]).

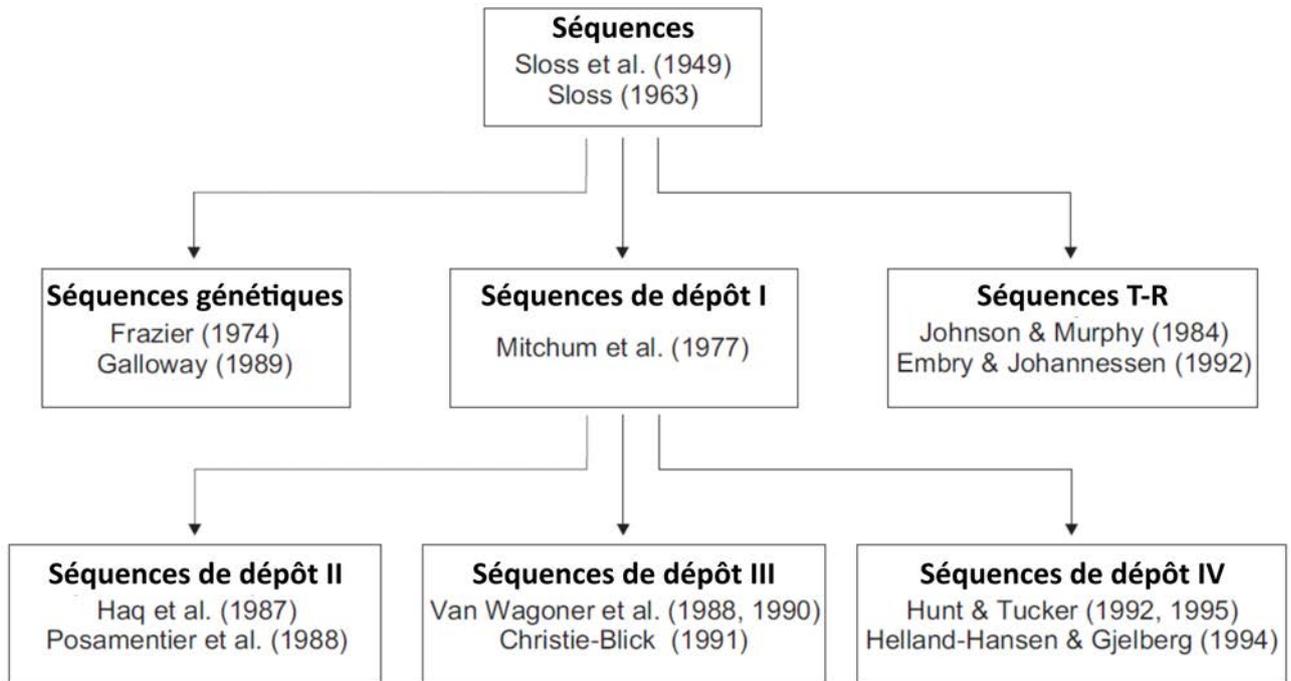


FIGURE 1.9 – Evolution des approches en stratigraphie séquentielle (modifié d'après Catuneanu *et al.* [2012]). Elles se distinguent surtout par l'identification des cortèges (voir fig. 1.12). Dans cette thèse nous considérons le modèle de séquences T-R, transgressions-régressions.

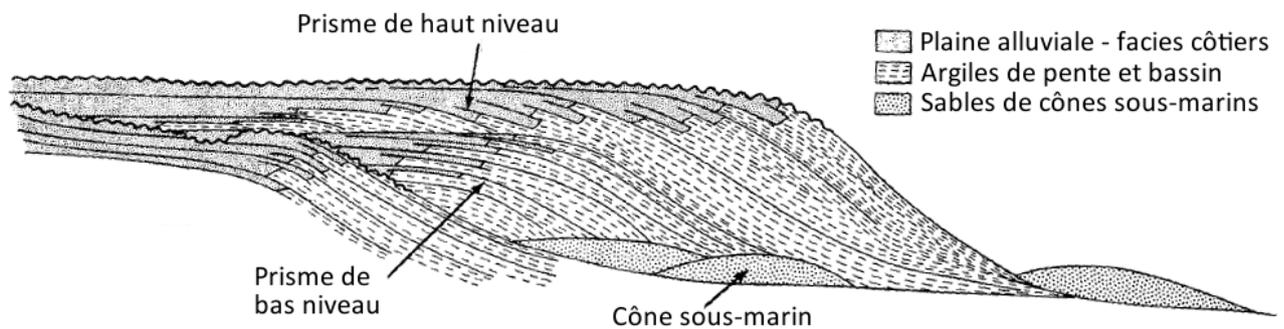


FIGURE 1.10 – Stratigraphie séquentielle et lithofacies du Néogène, New Jersey (modifié d'après Greenlee *et al.* [1992]). Ce modèle est plus progradant et moins aggradant que le modèle d'Exxon (fig. 1.4).

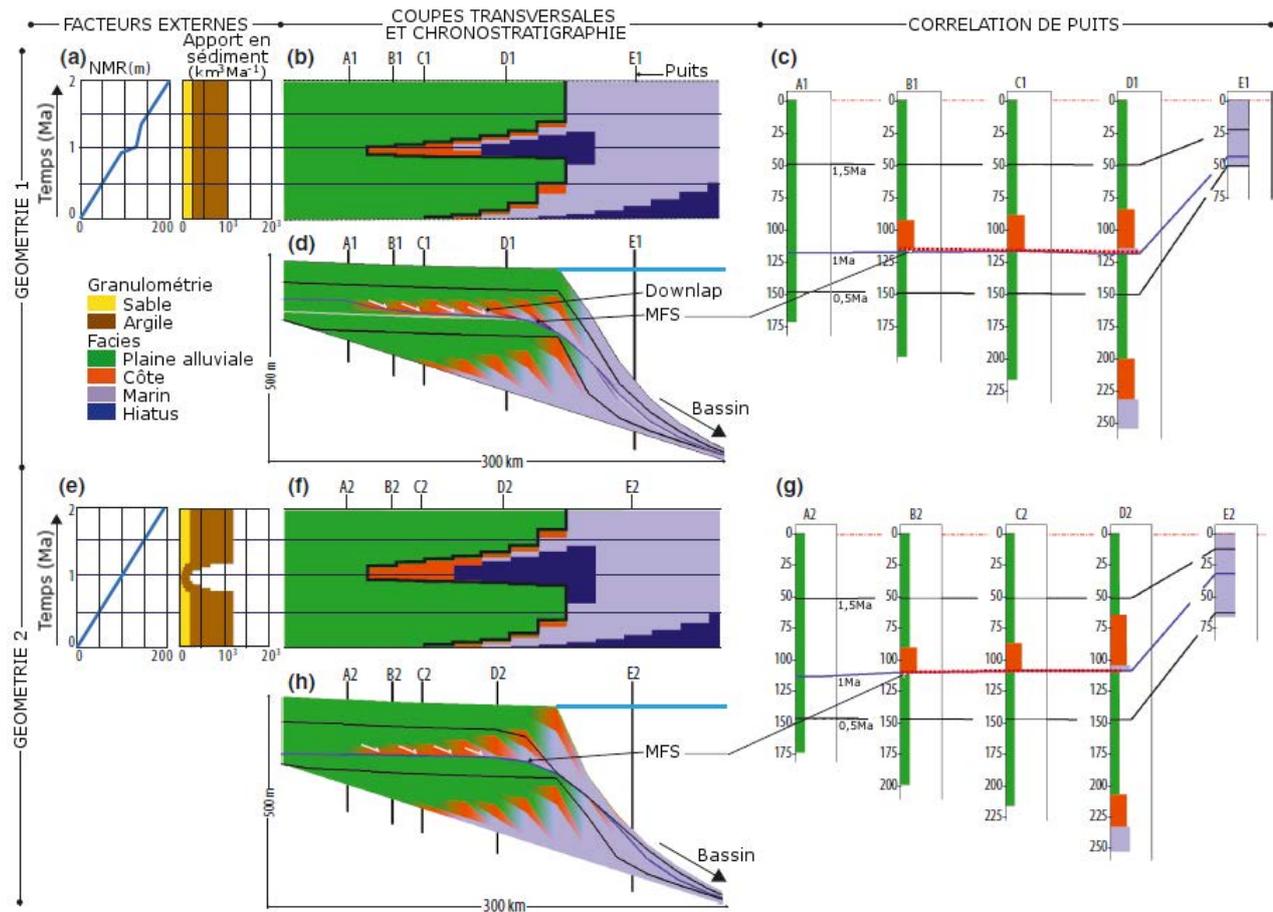


FIGURE 1.11 – Comparaison de deux architectures sédimentaires similaires obtenues en simulation basée processus à l'aide de différents paramètres (modifié d'après Burgess et Prince [2015]). NMR : niveau marin relatif.

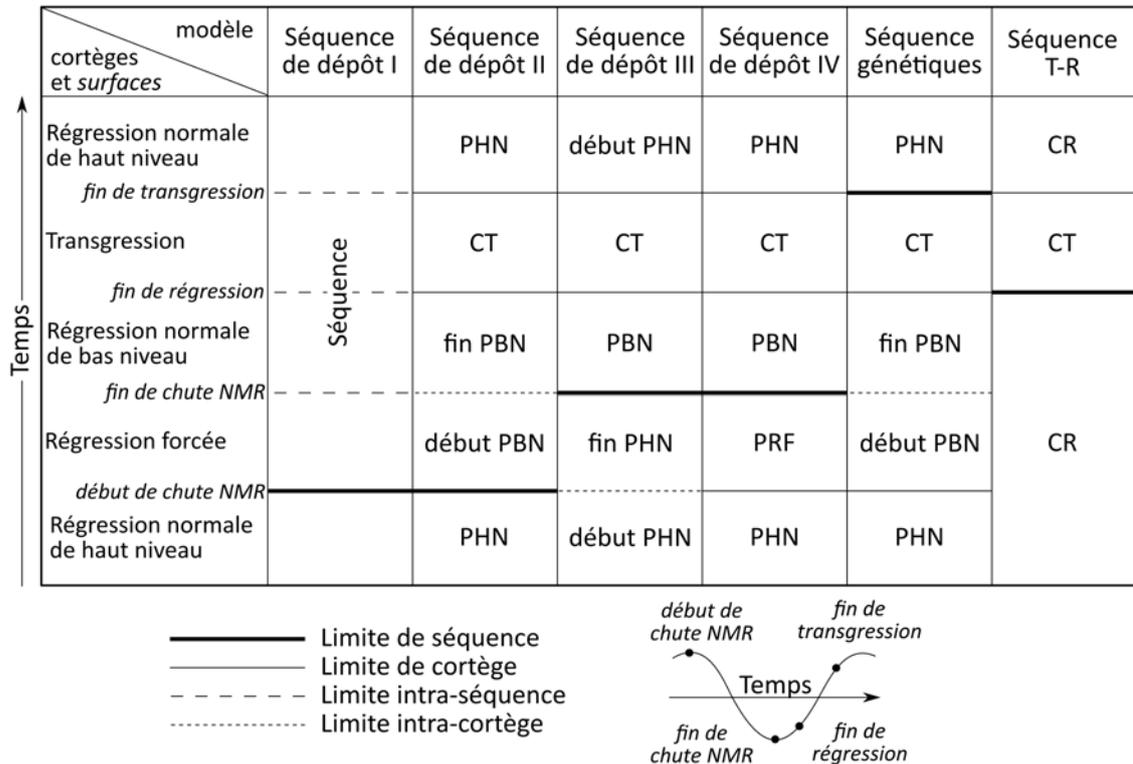


FIGURE 1.12 – Comparaison des cortèges sédimentaires et des limites de séquence entre différents modèles de stratigraphie séquentielle (modifié d'après Catuneanu *et al.* [2012]). CR - cortège régressif; CT - cortège transgressif; NMR - niveau marin relatif; PBN - prisme de bas niveau; PHN - prisme de haut niveau; PRF - prisme de régression forcée; T-R - transgression-régression

pace [Drummond et Wilkinson, 1996]. Cela implique souvent des interprétations arbitraires et spécifiques au bassin étudié [Catuneanu *et al.*, 2009, 2012].

Dans cette thèse, nous utilisons les concepts de la stratigraphie séquentielle pour la corrélation stratigraphique de puits. Elle permet l'interpolation de faciès et de lithologies, même loin des données, et permet de mieux représenter les hétérogénéités en faisant de la chronostratigraphie [Bashore *et al.*, 1994]. La hiérarchie de la stratigraphie séquentielle contrôle fortement les volumes, qualités et géométries des réservoirs Koehrer *et al.* [2011]. C'est donc un bon outil pour la modélisation en 3D.

La méthode décrite dans le chapitre 2 est basée sur la subdivision de la pile sédimentaire en unités en transgressions et régressions, suivant la variation relative du niveau marin (séquence T-R sur fig. 1.9, fig. 1.12, [Johnson et Murphy, 1984, Embry et Johannessen, 1992, Embry, 2002]), dans un contexte de marge passive sans grands mouvements tectoniques et avec une subsidence uniforme. Ce modèle permet de s'affranchir des différents cortèges sédimentaires, et simplifier l'interprétation des données. En effet, les informations disponibles sur les puits peuvent être insuffisantes pour déterminer avec précision les cortèges sédimentaires dans une séquence stratigraphique. Nous nous intéressons aux dépôts silicoclastiques [Ainsworth *et al.*, 1999, Ainsworth, 2005], mais ce concept peut être étendu aux dépôts carbonatés [Borgomano *et al.*, 2008]. Dans le chapitre 3, nous présentons une méthode de corrélation utilisant un modèle basé processus, qui peut être décrit dans le cadre de la stratigraphie séquentielle.

1.2 Des données de qualités variables

Différentes données, à différentes échelles et résolutions, peuvent être collectées pour étudier une région d'intérêt. Les données récoltées sur le terrain proviennent soit d'observations

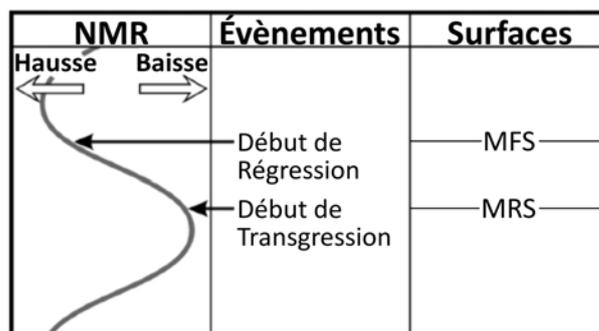


FIGURE 1.13 – Modèle Transgression-Régression (modifié d’après Embry [2002]). NMR - niveau marin relatif ; MFS - *Maximum Flooding Surface*, surface d’inondation maximum ; MRS - *Maximum Regressive Surface*, surface de régression maximum.

directes, sur des affleurements ou des forages, soit de mesures géophysiques sur la zone d’étude ou dans les forages.

1.2.1 Observation directe

Les roches peuvent être observées directement le long d’affleurements ou de carottages. Les affleurements permettent l’observation et l’étude des roches, et l’accès à des informations comme leur composition, leur agencement en strates, les interactions entre ces strates, la conformité des unités, et le pendage. Ces informations peuvent être à une ou deux dimensions suivant l’extension latérale disponible de l’affleurement, qui varie en fonction de la topographie et de la couverture végétale et sédimentaire. La dimension verticale est elle souvent plus limitée. Les forages permettent d’avoir des informations sur les roches à un endroit précis jusqu’à plusieurs kilomètres de profondeur. L’échelle d’observation des affleurements et forages peut être kilométrique à millimétrique, ou encore plus fine grâce à l’analyse d’échantillons en laboratoire (pétrographie, chimie...).

Les affleurements et les forages fournissent donc des données précises, potentiellement de haute résolution, mais sont très localisés, par leur nature pour les premiers et pour des raisons économiques pour les seconds.

Une première information utilisable sur ce type de données est la paléontologie (eg. Hazel [1970], Guex et Davaud [1984], Agterberg *et al.* [2013]). Le même genre de travaux peut être mené sur la palynologie [Clark *et al.*, 1986, Pels *et al.*, 1996].

La corrélation des roches observées à différentes localités peut aussi être effectuée en comparant les interprétations des unités en lithofaciès [Smith et Waterman, 1980, Howell, 1983, Waterman et Raymond, 1987]. Cette corrélation peut être contrainte, comme dans les travaux de Collins et Doveton [1993], en prenant en compte la loi de Walther.

1.2.2 Mesures géophysiques

Mesures géophysiques au puits (1D)

Des mesures géophysiques sont généralement effectuées le long de forages. Représentées sous forme de diagraphies (*logs*), elles peuvent servir de données à comparer entre les différents puits. Différents auteurs ont ainsi corrélé la résistivité [Preston et Henderson, 1964], la susceptibilité magnétique [Thompson et Clark, 1989, Hladil *et al.*, 2010], la magnétostratigraphie [Lallier *et al.*, 2013], la vitesse et les rayons gamma [Wheeler et Hale, 2014], ou un assemblage de différents logs [Lallier *et al.*, 2012]. Les lithologies peuvent aussi être déduites de ces mesures (rayons gamma, sonic...) [Griffiths et Bakke, 1990].

Mesures géophysiques de surface (2D, 3D)

Les mesures géophysiques effectuées en surface de la zone d'étude, notamment les différentes images sismiques, peuvent être corrélées entre elles [Hale, 2013], et également avec les puits [White et Simm, 2003]. En effet, la liaison des puits (dans un domaine spatial) avec l'image sismique (dans un domaine en temps) est encore sujet à de nombreux travaux [Compton et Hale, 2014, Herrera *et al.*, 2014, Cubizolle *et al.*, 2015, Muñoz et Hale, 2015, Wu et Caumon, 2016]. Dans ce contexte, j'ai encadré le stage de Master de Rémy Cheverry sur la corrélation sismique-puits stochastique [Cheverry *et al.*, 2015], présenté dans l'annexe 1.

1.2.3 Utilisation des données dans la corrélation stratigraphique

Problématique d'intégration des données sismiques

Julio *et al.* [2012] proposent d'utiliser les données sismiques pour contraindre les corrélations stratigraphiques de puits en calculant la convergence ou divergence des réflecteurs sismiques.

Néanmoins, comme présenté sur la figure 1.14, les données sismiques ont une résolution inférieure aux dimensions d'un réservoir [Ringrose et Bentley, 2016]. Elles ne permettent pas d'appréhender de manière précise les géométries des unités réservoirs et couvertures.

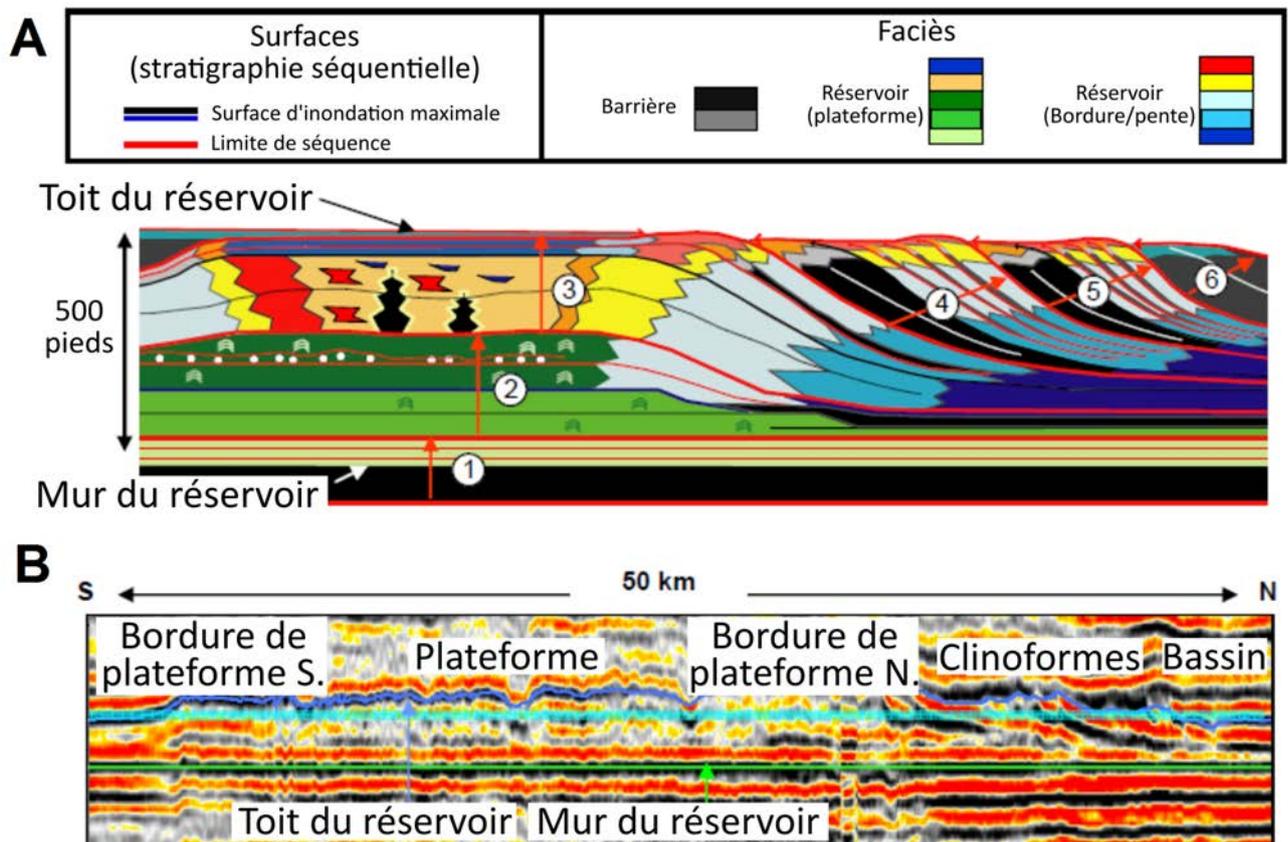


FIGURE 1.14 – Comparaison des dimensions d'un réservoir et des données sismiques correspondantes (modifié d'après Yose *et al.* [2004]). A. Interprétation des séquences stratigraphiques du réservoir. B. Coupe sismique du réservoir. Là où les données sismiques ne montrent que quelques réflecteurs, le réservoir compte plusieurs séquences stratigraphiques.

De plus, Lallier *et al.* [2012] ont montré que la variabilité des images sismiques possibles obtenues avec un même modèle de corrélation stratigraphique est comparable à la variabilité des images sismiques entre différents modèles de corrélation stratigraphique (fig. 1.15).

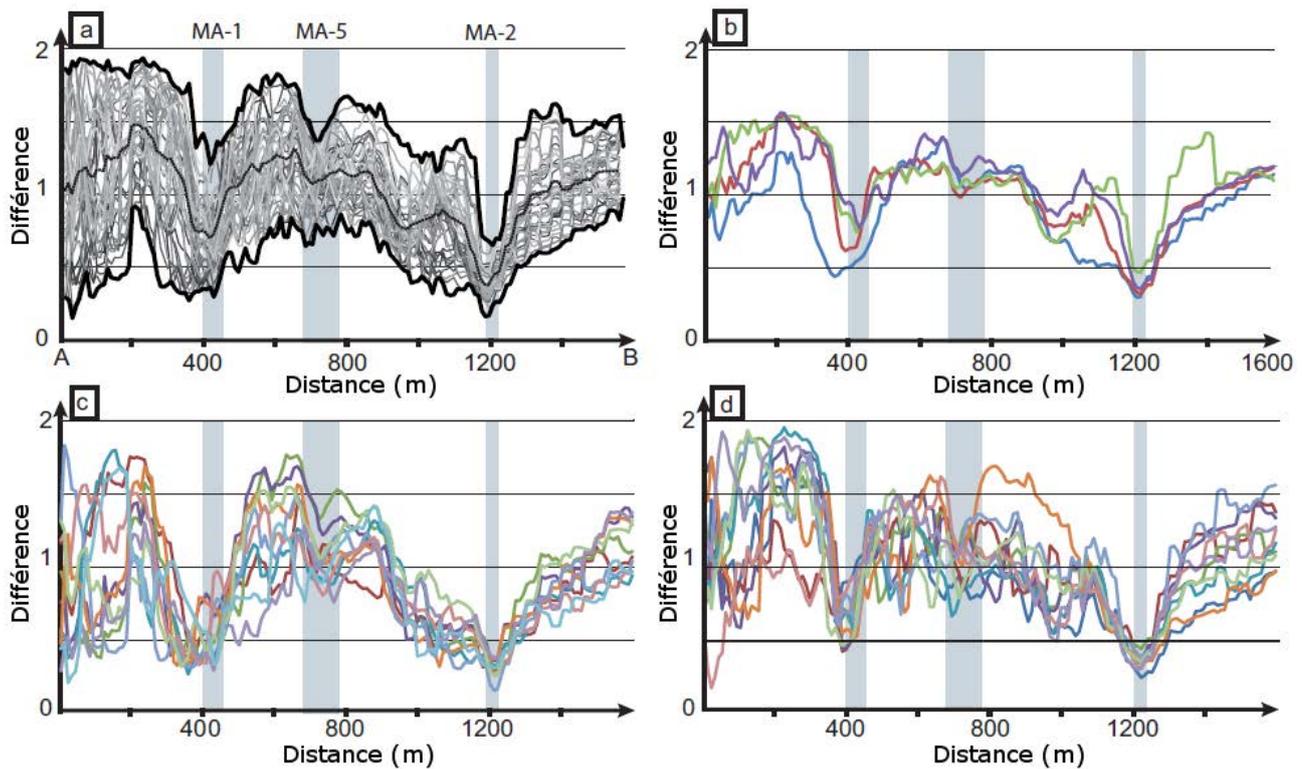


FIGURE 1.15 – Différence entre un modèle d’amplitude sismique de référence et quarante modèles alternatifs calculés sur 4 modèles de corrélation stratigraphiques (modifié d’après Lallier *et al.* [2012]). a. Les différences des quarante modèles (lignes gris clair), leurs valeurs minimum et maximum (lignes épaisses noires) et leur moyenne (ligne gris foncé). b. Valeurs moyennes des dix différences d’amplitude sismique pour chaque modèle de corrélation stratigraphique. c. Les dix différences d’amplitude sismique correspondant au modèle de corrélation stratigraphique déterministe. d. Les dix différences d’amplitude sismique correspondant à un modèle de corrélation stratigraphique stochastique. La variabilité entre modèles (b) est comparable à la variabilité des modèles sismiques calculés pour un modèle de corrélation stratigraphique donné (c et d). Les zones grisées sont les projections des puits sur la section.

Données de puits interprétées

Ainsi l’utilisation des données sismiques dans la corrélation stratigraphique n’est pas aisée. Dans ce manuscrit nous utilisons exclusivement les données de puits. Ces données peuvent être interprétées pour définir des unités stratigraphiques, en termes de lithostratigraphie ou de stratigraphie séquentielle, par exemple. Les mesures brutes le long des puits peuvent aussi être interprétées en termes de faciès, porosité, ou perméabilité par exemple.

1.3 Impact des incertitudes structurales

1.3.1 Incertitudes structurales dans les études de réservoirs d’hydrocarbures

Les incertitudes de l’architecture du sous-sol sont d’abord étudiées pour leur intérêt économique, lors de la gestion de réservoirs d’hydrocarbures (e.g. Jonkman *et al.* [2002], Manzocchi *et al.* [2008], Koehrer *et al.* [2011]). En effet, pour optimiser le rendement d’un réservoir, il faut pouvoir bien estimer les volumes et la répartition des fluides en place, localiser les drains et couvertures, pour forer aux endroits stratégiques. Cependant, les données permettant la prédiction de ces paramètres sont limitées, à cause de la complexité d’un réservoir et du coût

d'acquisition des données [Charles *et al.*, 2001].

Pour prendre en compte les incertitudes dans les études de réservoirs, différents auteurs proposent de générer des modèles stochastiques. Haldorsen et Damsleth [1990] détaillent les différentes approches (modèles discrets, modèles continus et modèles hybrides). Abrahamsen *et al.* [1992] proposent de générer plusieurs modèles de réservoir (géométrie et pétrophysique) pour estimer la probabilité de distribution de l'huile en place. Vincent *et al.* [1999] montrent l'impact des incertitudes structurales pendant des études de calage historique de réservoir mature. Thore *et al.* [2002] listent les différentes sources d'incertitudes dans l'utilisation de données sismiques (migration, pointé, et conversion temps-profondeur) et les risques engendrés dans l'exploration et le forage. La plupart de ces auteurs discutent également de la difficulté de quantifier ces incertitudes malgré quelques travaux qui ont présenté des méthodes pour les quantifier (e.g. Samson *et al.* [1996], Pyrcz et White [2015]).

Plusieurs études ont montré le rôle majeur des failles et réseaux de failles dans les calculs de volumes et de production de réservoirs [Knipe, 1992, England et Townsend, 1998, Gibson, 1998, Manzocchi *et al.*, 1999, Fisher et Knipe, 2001, Fisher *et al.*, 2001, Shipton *et al.*, 2002, Fredman *et al.*, 2007]. Ottesen *et al.* [2005] explicitent l'importance des incertitudes sur la géométrie des failles dans les réservoirs, et le besoin de les prendre en compte pour la production. En effet, les auteurs montrent que la production peut varier de 17% en faisant varier la géométrie des failles dans l'espace des incertitudes. Plusieurs auteurs ont proposé des approches stochastiques de gestion des failles dans les réservoirs [Damsleth *et al.*, 1998, Lecour *et al.*, 2001, Hollund *et al.*, 2002, Holden *et al.*, 2003, Røe *et al.*, 2014, Cherpeau et Caumon, 2015]. Suzuki *et al.* [2008], Seiler *et al.* [2010], Irving *et al.* [2010] proposent des méthodes d'optimisation par mise à jour de la position et de la géométrie des failles à l'aide de calage historique.

1.3.2 Incertitudes structurales dans les études de bassins sédimentaires

Les bilans sédimentaires sont un aspect essentiel des études de bassins. En effet, ils apportent les clés pour comprendre les relations complexes entre climat, érosion et mouvements tectoniques [Molnar et England, 1990, Métivier *et al.*, 1999, Zhang *et al.*, 2001, Molnar, 2004, Clift, 2006, Charreau *et al.*, 2011, Herman et Champagnac, 2016, Willenbring et Jerolmack, 2016]. La quantification des volumes de sédiments dans le temps est un composant essentiel du bilan sédimentaire qui repose sur les datations relatives de sections stratigraphiques, l'extrapolation géométrique des strates, et la datation absolue. Ces trois éléments ne sont jamais connus de manière déterministe et peuvent être source d'incertitude dans la quantification des volumes de sédiment [Dromart *et al.*, 2002].

1.4 Motivations pour une méthode automatique de corrélation stratigraphique

Par l'existence des incertitudes sur les données et les concepts vus précédemment, plusieurs corrélations stratigraphiques honorant les données peuvent être possibles [Borgomano *et al.*, 2008, Koehrer *et al.*, 2011]. Ainsi, comme les travaux de modélisation stochastique essaient d'explorer l'espace des incertitudes dans les zones pauvres en données (e.g. Haldorsen et Damsleth [1990], Eide *et al.* [1996], Massonnat *et al.* [1997], Caumon [2010], Colombera *et al.* [2012]), une méthode de corrélation stratigraphique stochastique permettrait de prendre en compte les incertitudes à cette étape.

La corrélation stratigraphique manuelle des données de forage est un travail lent, fastidieux et coûteux [Doveton, 1994]. Le géologue doit pouvoir interpréter les données et identifier la corrélation stratigraphique la plus probable à partir de données de qualités et de complétudes variables. Le nombre de corrélations stratigraphiques qu'il est possible de tracer augmentant

très rapidement avec le nombre d'unités stratigraphiques considérées (ou le nombre de forages), il est très difficile d'identifier une corrélation stratigraphique probable parmi celles-ci [Lallier *et al.*, 2016].

L'incertitude conceptuelle liée à la complexité des processus de transport et de dépôt des sédiments rend cette tâche subjective [Vermaas *et al.*, 2016], et le bagage scientifique du géologue peut biaiser son interprétation [Bond *et al.*, 2007].

Cette subjectivité induit également la non-reproductibilité du travail de corrélation stratigraphique.

1.5 Historique des algorithmes de corrélation stratigraphique automatique

Une première méthode présentée par Preston et Henderson [1964] utilise les analyses de Fourier pour développer des paramètres représentant les logs de résistivité et les utiliser pour corréler des formations sédimentaires. Les analyses de Fourier ont été utilisées jusque dans les années 80, avec par exemple les travaux de Martinson *et al.* [1982].

Holgate [1960] utilise la corrélation croisée pour aligner des données de carottages avec des données de logs dans un même puits et déduire des relations linéaires entre elles. Cela permet ensuite d'évaluer les informations des carottes (porosité) depuis les logs (sonic). Cette méthode consiste à "glisser" les séquences l'une contre l'autre, pour trouver le meilleur alignement. Moran *et al.* [1962] corrélent des logs de microrestivités lors de mesures de pendage dans un même puits également à l'aide de corrélation croisée. Matuszak [1972] discute de l'application de ces méthodes à la corrélation de données de différents puits.

Puis, l'association croisée fut utilisée pour comparer des successions d'unités [Sackin *et al.*, 1965, Harbaugh et Merriam, 1968, Merriam, 1971, Davis, 1973, Dean et Anderson, 1974]. Cet algorithme correspond à l'application de la corrélation croisée à des données non numériques [Sackin et Merriam, 1969]. Il fut le plus utilisé jusque dans les années 80 [Waterman et Raymond, 1987].

Un défaut principal des méthodes de corrélation croisée et d'association croisée est qu'elles ne prennent pas en compte les variations du taux de sédimentation, et par extension les hiatus.

Neidell [1969] a amélioré la méthode d'association croisée en suggérant d'utiliser la covariance entre deux sections pour créer une fonction d'étirement, qu'il appelle fonction d'ambiguïté ("*ambiguity function*"). Southam et Hay [1978] ont développé une méthode mêlant l'association croisée avec les analyses de Fourier, pour optimiser les étirements et compressions des unités corrélées ponctuellement par leurs horizons. Malgré ces améliorations, les hiatus ne sont pas gérés.

Testerman *et al.* [1962] proposent de définir des zones le long des puits. Ces zones minimisent les variations de la propriété considérée dans chaque zone, et maximisent les variations entre les différentes zones. Ensuite les moyennes de la propriété dans les zones sont comparées et les zones sont associées si la différence des moyennes est inférieure ou égale à la variation attendue. Cependant, cette technique ne considère pas la corrélation des puits sur toute leur longueur, et donc la corrélation dépend du sens de corrélation des puits (du bas vers le haut ou du haut vers le bas). De plus, les hiatus n'apparaissent que par défaut si une zone n'est corrélée à aucune zone de l'autre puits.

Mann et Dowell [1978] ont comparé des logs électriques à l'aide d'analyse spectrale et de facteurs d'échelle. Clark et Thompson [1979] utilisent la méthode des moindres carrés pour faire correspondre des splines cubiques. Ces deux méthodes permettent de déformer les signaux (étirement et compression) mais ne permettent pas les hiatus.

Kemp [1982] a présenté un algorithme de corrélation de segments de logs de puits, mais il impose au géologue de sélectionner les tronçons à corréler. Il n'est pas conçu pour chercher la corrélation stratigraphique correspondant à la corrélation optimale de l'ensemble des données.

Il demande donc une première corrélation au géologue. De plus, cette méthode est limitée à deux segments par tronçons à corrélés.

La programmation dynamique, basée sur le principe d’optimalité de Bellman [Bellman, 1957], consiste à décomposer un problème donné en sous-problèmes, les résoudre, et accumuler leurs résultats pour résoudre le problème initial [Dreyfus, 2002]. Différents algorithmes de programmation dynamique ont ainsi été développés. Gordon et Reymont [1979], Gordon [1980] ont adapté la “méthode d’encastrement” (*slotting method* en anglais [Delcoigne et Hansen, 1975]) à la corrélation de logs, en cherchant à encastrent les logs pour ne former qu’une seule séquence. Dans cette méthode, chaque élément est présent dans la corrélation des deux séquences sans être directement associé à un élément de l’autre séquence. Cela revient à imaginer que chaque élément n’a pas d’équivalent temporel sur l’autre séquence, qu’il a été érodé ou qu’il n’a pas été déposé, faisant de la corrélation une suite de hiatus. Thompson et Clark [1989] ont amélioré cette technique en apportant une contrainte de longueur des blocs d’éléments encastrents.

Pour résumer, nous avons vu jusque ici que la majorité des méthodes de corrélation stratigraphique automatique s’appliquent à des logs. La corrélation de logs correspond à une corrélation lithostratigraphique. En effet, les niveaux sont associés en fonction de caractéristiques similaires, ignorant la variation latérale de faciès. Ces méthodes ne sont donc pas recommandées pour faire des corrélations dans le cadre de la stratigraphie séquentielle et reconstruire des horizons isochrones. L’association croisée permet la corrélation d’unités, et peut donc s’adapter au cadre de la stratigraphie séquentielle, mais elle ne prend pas en compte les hiatus qui peuvent survenir dans le cas d’érosion ou non-dépôt des sédiments. Nous voulons pouvoir considérer les hiatus car ils composent la majorité de l’enregistrement sédimentaire [Ager, 1981, 1993, Miall, 2016].

La distance de Levenshtein [Levenshtein, 1966] correspond au nombre de modifications minimum nécessaires pour passer d’une séquence d’éléments à une autre (insertion, délétion, substitution). Cette distance est à la source de plusieurs algorithmes de déformation temporelle dynamique (*Dynamic Time Warping* en anglais, DTW). Ces algorithmes sont efficaces pour corréler deux séquences d’éléments en utilisant des règles de corrélation, dans différents domaines comme la bioinformatique, la vidéo et le son. Liner et Clapp [2004] appliquent par exemple l’algorithme de Needleman-Wunsch [Needleman et Wunsch, 1970, Subbiah et Harrison, 1989] pour la corrélation de traces sismiques. Smith et Waterman [1980] ont appliqué un algorithme similaire à la corrélation stratigraphique de séquences stratigraphiques. Les auteurs ont ensuite développé un algorithme qui a l’avantage de ne pas chercher uniquement l’alignement global entre les séquences, comme dans l’algorithme de Needleman-Wunsch, mais aussi les alignements locaux [Smith *et al.*, 1981].

D’autres algorithmes provenant du milieu de l’intelligence artificielle ont été utilisés. Les systèmes experts [Olea *et al.*, 1986, Peveraro *et al.*, 1988, Olea, 1994, 2004] permettent de corréler des données à l’aide de règles déterminées *a priori*, à partir des règles empiriques que les géologues appliquent pour faire les corrélations manuellement. Il a été montré que les systèmes experts sont efficaces pour des cas simples, mais peuvent échouer pour des cas plus complexes, correspondant aux zones où les géologues hésitent ou ne sont pas d’accord entre eux [Doveton et Prenskey, 1992]. Einstein *et al.* [1990] ont comparé les résultats d’un système expert avec les corrélations de géologues spécialistes. Bien qu’ils montrent des limites et conseillent un contrôle humain sur certains points, ils proposent d’utiliser cet outil pour permettre à des géologues moins expérimentés d’atteindre des résultats de corrélation aussi bons que des géologues spécialistes.

Les réseaux neuronaux [Baldwin *et al.*, 1989, Luthi et Bryant, 1997, Bursik et Rogova, 2006], développés par Rumelhart et McClelland [1986], consistent à extraire des règles d’un ensemble de corrélations connues *a priori* pour déterminer les corrélations de la zone d’intérêt. Cette méthode demande une certaine quantité de données d’entrée pour être efficace et l’étape d’apprentissage peut prendre un certain temps [Doveton et Prenskey, 1992].

Ainsi, parmi ces algorithmes, le DTW répond le mieux à nos besoins. Il permet de corréler deux séquences, en associant les éléments et en permettant à un élément d'une séquence de ne pas être corrélé à un élément de l'autre séquence, donc les hiatus sont pris en compte dans la corrélation. De plus, il est possible de définir des règles de corrélation, et ces règles peuvent être déduites de la stratigraphie séquentielle. Nous avons donc choisi d'utiliser cet algorithme dans les méthodes présentées dans ce manuscrit.

1.6 Algorithme de déformation temporelle dynamique

L'algorithme de déformation temporelle dynamique, *Dynamic Time Warping* (DTW), a été développé par Sakoe et Chiba [1978] dans le cadre de la reconnaissance vocale et son but est d'obtenir la meilleure association de deux séries temporelles. Il a été utilisé dans différents domaines comme la vidéo, l'audio, le graphisme et la bioinformatique. Son application à la corrélation stratigraphique est due à Smith et Waterman [1980]. Dans leur étude, les deux signaux correspondent aux lithologies dans les deux puits et la meilleure corrélation traduit l'arrangement des unités le plus probable.

1.6.1 Algorithme original

La corrélation des unités stratigraphiques peut-être représentée par la corrélation des marqueurs de toit de ces unités. Pour ce faire, une table de coût est construite, dont les lignes et colonnes correspondent aux marqueurs stratigraphiques. Ainsi, une cellule (i, j) dans la table de coût représente l'association des marqueurs stratigraphiques i et j . Une transition oblique entre deux cellules traduit donc l'association de deux unités, tandis qu'une transition horizontale ou verticale traduit un hiatus (fig. 1.16).

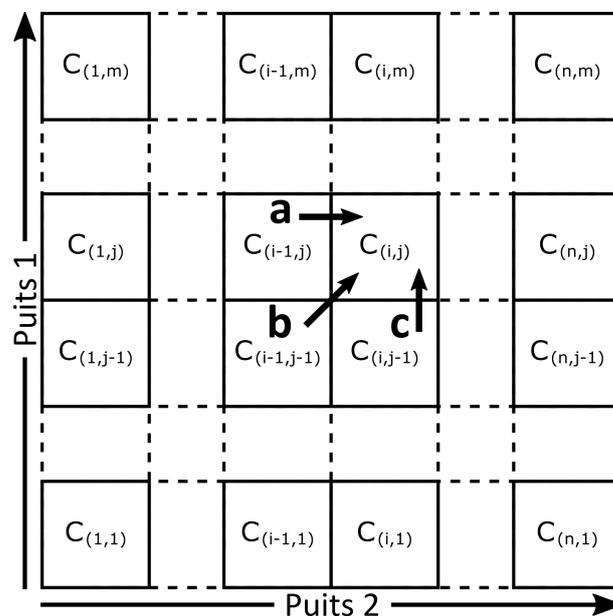


FIGURE 1.16 – Table de coûts de l'algorithme de déformation temporelle dynamique. n et m sont les nombres de marqueurs stratigraphiques sur les puits 1 et 2 respectivement. $c_{(i,j)}$ est le coût d'association des marqueurs i et j . Les trois flèches montrent les trois transitions possibles : association (b), et hiatus (a and c).

Ces transitions ne peuvent mener vers des marqueurs plus profonds, car cela pourrait amener à des corrélations qui s'intersectent, ce qui n'a aucun sens en stratigraphie. La table

est remplie du coin inférieur gauche au coin supérieur droit, avec des coûts définis par des règles (section 2.1). Les coûts sont calculés suivant l'équation suivante :

$$C_{(i,j)} = c_{(i,j)} + \min \left\{ \begin{array}{l} t_{i,i-1}^{j,j-1} + C_{(i-1,j-1)} \\ t_{i,i-1}^{j,j} + C_{(i-1,j)} \\ t_{i,i}^{j,j-1} + C_{(i,j-1)} \end{array} \right\} \quad (1.1)$$

où $c_{(i,j)}$ est le coût d'association des marqueurs i et j . Le terme t remplace les différentes transitions possibles (association et gaps). Le coût de la case précédente ($C_{(i-1,j-1)}$, $C_{(i-1,j)}$, ou $C_{(i,j-1)}$) est ajouté pour être sûr d'obtenir le coût minimal global quand la table est remplie. $C_{(i,j)}$ est donc le coût cumulé de l'association des marqueurs correspondant à cette case et des associations des cases précédentes dans le chemin. Chaque chemin du coin inférieur gauche au coin supérieur droit représente une corrélation. Le chemin de moindre coût correspond à la corrélation la plus probable selon les règles de corrélation stratigraphique utilisées.

1.6.2 Modifications de l'algorithme

Stochasticité

Une première modification est de générer des corrélations stochastiques pour prendre en compte les incertitudes.

Nakagawa et Nakanishi [1988] calculent des probabilités de transitions entre les éléments à corréler dans le cadre de la reconnaissance vocale et utilisent un modèle de Markov caché pour générer les corrélations.

Lallier *et al.* [2009] proposent une méthode similaire en choisissant les transitions de façon inversement proportionnelle au coût de chaque transition, suivant l'équation suivante :

$$C_{(i,j)} = \begin{pmatrix} \frac{1}{a} & \text{si } p \in \left[0, \frac{a}{a+b+c} \right] \\ \frac{1}{b} & \text{si } p \in \left[\frac{a}{a+b+c}, \frac{a+b}{a+b+c} \right] \\ \frac{1}{c} & \text{si } p \in \left[\frac{a+b}{a+b+c}, 1 \right] \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

avec p un nombre aléatoire tiré dans une distribution uniforme $U[0,1]$, et a , b et c les probabilités des transitions oblique, verticale et horizontale respectivement, suivant :

$$\begin{aligned} a &= 1/(c_{(i,j)} + t_{i,i-1}^{j,j-1} + C_{(i-1,j-1)}) \\ b &= 1/(c_{(i,j)} + t_{i,i-1}^{j,j} + C_{(i-1,j)}) \\ c &= 1/(c_{(i,j)} + t_{i,i}^{j,j-1} + C_{(i,j-1)}) \end{aligned} \quad (1.3)$$

En calculant des corrélations à partir des mêmes données, l'algorithme va pouvoir générer différentes stratigraphies, en échantillonnant l'espace des incertitudes. Ces réalisations peuvent être comparées, pour observer les régions les plus incertaines de la zone d'étude et en mesurer l'impact sur la production éventuelle de ressources, à l'aide de géomodèles et de simulations d'écoulements de fluides par exemple.

La visualisation des résultats de corrélations stochastiques a été le sujet de Master d'Anaïs Pons que j'ai encadrée. Ce travail est présenté dans l'annexe 2.

N-best

L'algorithme peut aussi être modifié pour obtenir n meilleures corrélations au lieu d'une seule [Pels *et al.*, 1996, Lallier *et al.*, 2013]. Cela correspond à obtenir les n corrélations de

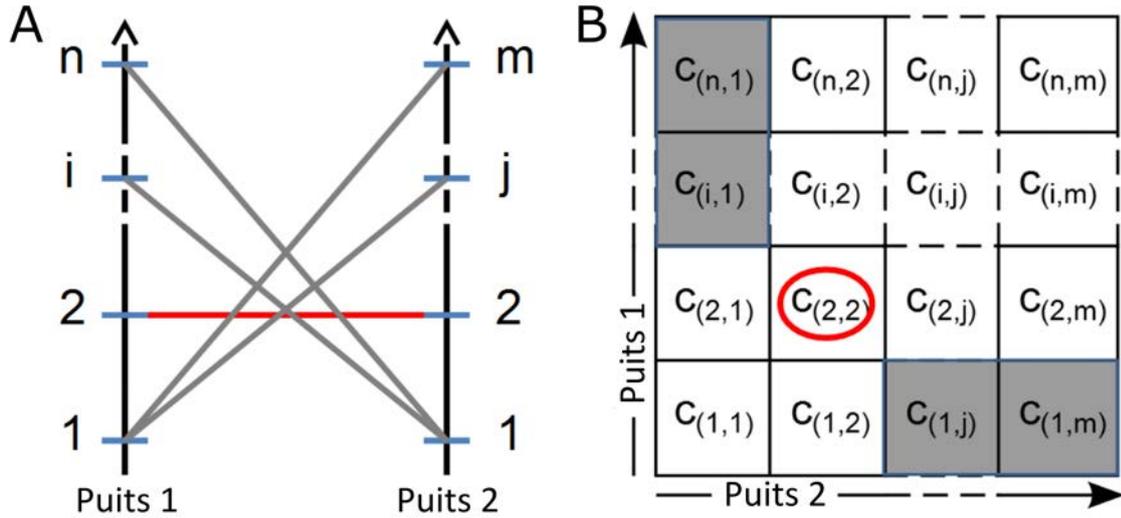


FIGURE 1.17 – Association contrainte de marqueurs. A : Une contrainte observée sur les puits, en rouge. B : Traduction de la contrainte dans la table de coûts. Le chemin doit passer par la case $C_{(2,2)}$. Les associations grises sont impossibles, les zones grisées dans la table de coût sont donc interdites.

moindre coût. L'équation de l'algorithme devient :

$$C_{(i,j)}^n = c_{(i,j)} + \min^n \left\{ \begin{array}{l} t_{i,i-1}^{j,j-1} + C_{(i-1,j-1)}^n \\ t_{i,i-1}^{j,j} + C_{(i-1,j)}^m \\ t_{i,i}^{j,j-1} + C_{(i,j-1)}^n \end{array} \right\} \quad (1.4)$$

avec C^n le coût d'une cellule pour la corrélation n .

Alors que les corrélations stochastiques permettent d'explorer l'espace des incertitudes, parcourir les n meilleures corrélations permet d'obtenir des corrélations alternatives et de mettre en valeur les associations les plus incertaines.

Contraintes

Si des associations de marqueurs sont connues avant la corrélation, elles peuvent être prises en compte lors de la corrélation [Pels *et al.*, 1996, Lallier *et al.*, 2009] (fig. 1.17). Cela assure d'honorer les données et rend l'algorithme plus rapide en évitant de calculer des coûts d'associations qui sont fausses. Lallier *et al.* [2009] corrélaient les séquences stratigraphiques d'ordres supérieurs en premier, afin de contraindre la corrélation des séquences d'ordres inférieurs.

“One-to-many”

Il est possible de corréler plusieurs unités d'un des puits à une unité du deuxième puits en autorisant de nouvelles transitions dans la table de coûts (fig. 1.18). Par exemple, si trois unités peuvent être associées à une, les transitions $(i + 3, j + 1)$ et $(i + 1, j + 3)$ doivent être autorisées. Cela correspond à l'association *one-to-many* (*une-à-plusieurs* en français) [Howell, 1983, Waterman et Raymond, 1987].

L'algorithme DTW a été appliqué avec l'association *one-to-many* par Waterman et Raymond [1987] sur des données lithostratigraphiques de façon déterministe, et de façon stochastique par Lallier *et al.* [2013] sur des données de magnétostratigraphie (fig. 1.19). En effet, en fonction d'éventuels hiatus dus à la qualité de l'enregistrement ou à la précision de l'échantillonnage, des inversions de la polarité du champ magnétique terrestre peuvent ne pas être observées.

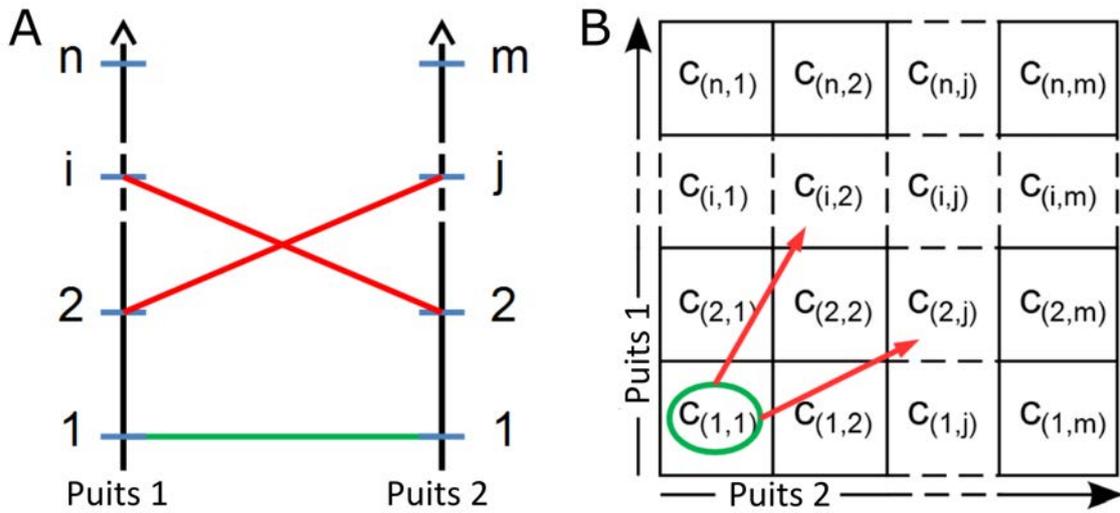


FIGURE 1.18 – Association *one-to-many*. A : deux associations *one-to-many* représentées sur les puits, en rouge. B : Traduction de ces associations dans la table de coûts.

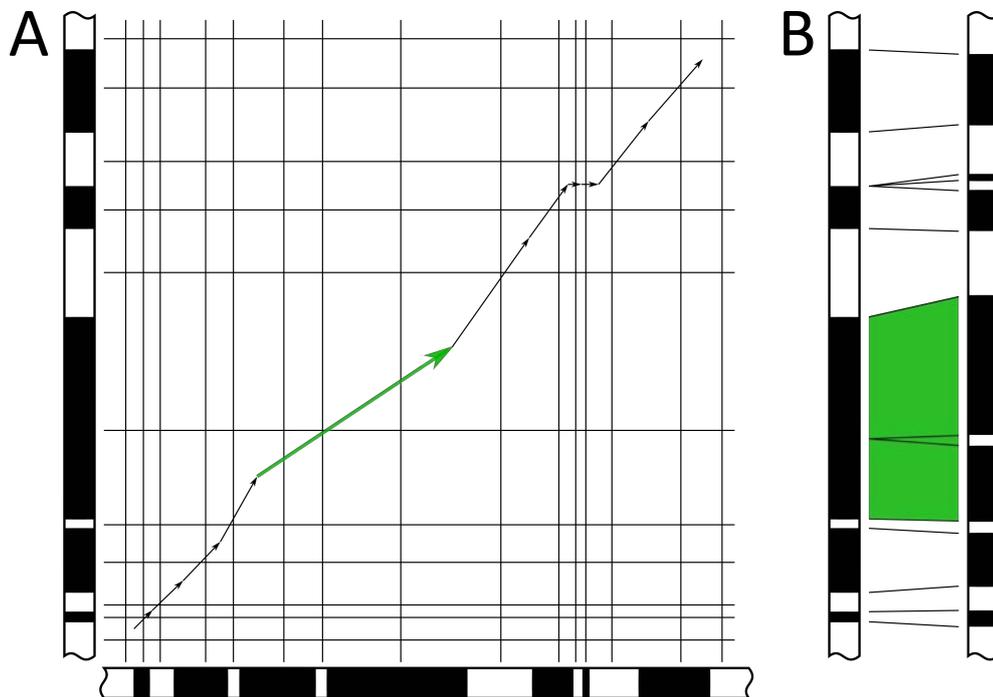


FIGURE 1.19 – Association *one-to-many* appliquée à la magnétostratigraphie (modifié d'après Lallier *et al.* [2013]). A : La table de corrélation de l'algorithme de déformation temporelle de deux séries d'unités de magnétostratigraphie. B : Représentation des corrélations sur les deux séries. L'association *one-to-many* est montrée en vert sur les séries corrélées et par une flèche verte dans la table.

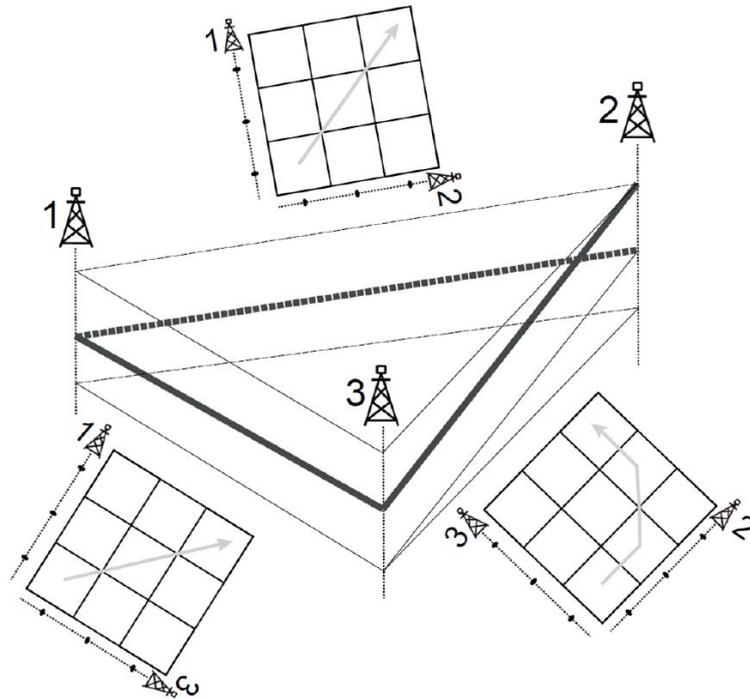


FIGURE 1.20 – Problème de corrélation stratigraphique incohérente lors de plusieurs corrélations stratigraphiques de puits deux à deux (modifié d’après Lallier *et al.* [2016]).

Corrélation multi-puits

Deux problèmes principaux apparaissent lors de corrélation multi-puits :

Premièrement, des incohérences peuvent apparaître, comme explicité par Lallier *et al.* [2016] (fig. 1.20). Lors de cycles, de corrélations deux à deux successives jusqu’à corréler le dernier puits avec le premier, différents marqueurs stratigraphiques du même puits peuvent être associés au même horizon. Cela pose un problème car l’horizon est censé être un isochron, il correspond à une surface topographique à un instant t . Si deux marqueurs sur le même puits correspondent au même horizon, tout ce qui se situe entre les deux est considéré instantané dans un espace de Wheeler. Deuxièmement, des ambiguïtés peuvent subsister après corrélation, comme présenté sur la figure 1.21.

Ainsi, deux approches existent dans la littérature pour pallier à ces problèmes.

— Corrélation simultanée

Brown [1997] a développé un programme d’alignement de multiple séquences (“*MSA : Multiple Sequence Alignment*”), basé sur l’algorithme DTW, en augmentant les dimensions de la table de coût (fig. 1.22). Cependant, cette technique devient rapidement couteuse en mémoire avec l’augmentation du nombre d’unités par puits et/ou le nombre de puits [Brown, 1997, Lallier *et al.*, 2016]. Ce problème est également connu en bioinformatique, qui a notamment été discuté pour l’alignement de séquences de protéines (voir par exemple Carrillo et Lipman [1988], Wang et Jiang [1994]).

Wheeler et Hale [2014] ont présenté une méthode utilisant également le DTW pour aligner simultanément des logs corrélés deux à deux, en minimisant les déplacements de marqueurs le long des puits.

— Corrélation itérative

Les puits sont corrélés séquentiellement et les informations des corrélations précédentes sont prises en compte à chaque étape [Lallier *et al.*, 2016]. C’est la méthode choisie dans le cadre de cette thèse. Nous verrons dans le chapitre 4 comment gérer les ambiguïtés vues sur la figure 1.21.

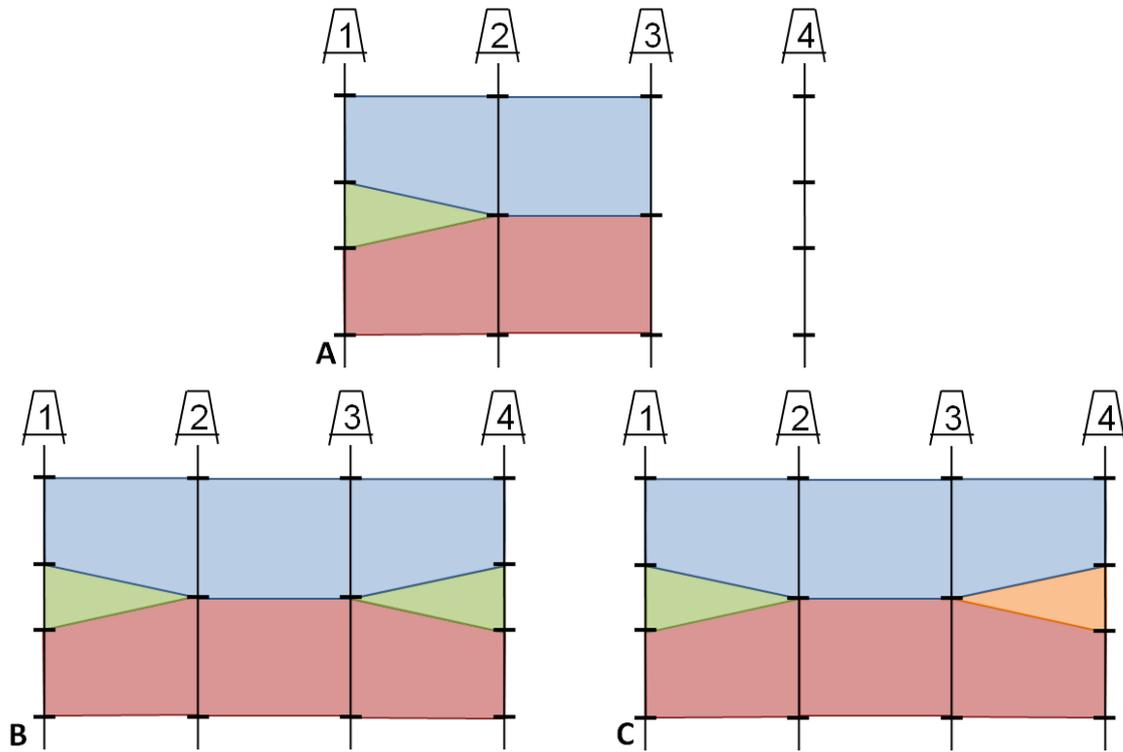


FIGURE 1.21 – Ambiguïtés lors de corrélation stratigraphique multi-puits. A - Les puits 1, 2 et 3 sont corrélés et le puits 4 va leur être corrélé. B et C - Résultats possibles de la corrélation stratigraphique du puits 4.

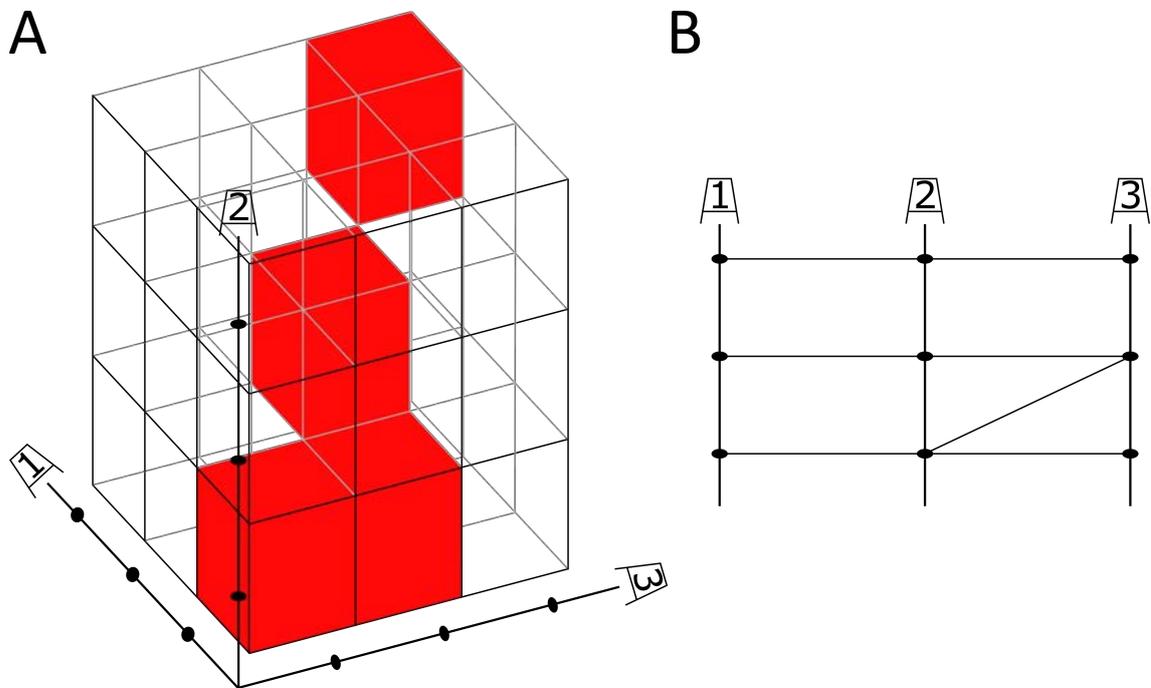


FIGURE 1.22 – Table de cout du DTW à 3 dimensions. *Gauche* : Les axes correspondent aux trois puits corrélés avec leurs marqueurs respectifs. Les cellules rouges correspondent au chemin de moindre cout dans la grille. *Droite* : Résultat de la corrélation stratigraphique.

1.7 Conclusion

L'utilisation des ordinateurs pour la corrélation stratigraphique permet donc d'atteindre un ou plusieurs objectifs parmi les suivants : reproductibilité, rapidité, objectivité, et stochasticité. Dans cette thèse nous utilisons l'algorithme de déformation temporelle. Comme d'autres algorithmes, il nécessite des règles de corrélation. Les chapitres 2 et 3 traitent de ces règles.

Chapitre 2

Méthode de corrélation stratigraphique de puits et règles tirées de la stratigraphie séquentielle

Sommaire

2.1	Règles de corrélation dans le cadre de la stratigraphie séquentielle . . .	31
2.1.1	Transgression/Régression	32
2.1.2	Variation latérale d'épaisseur	32
2.1.3	Variation latérale de pendage	36
2.1.4	Intégration des données de biostratigraphie	36
2.2	Application de l'algorithme de déformation temporelle à la stratigraphie séquentielle : association "One-to-many"	37
2.3	Tests des associations one-to-many et n-best	38
2.3.1	Données et paramètres	38
2.3.2	Résultats	40
2.4	Impact des incertitudes d'interprétation	40
2.4.1	Interprétation des données	42
2.4.2	Résultats et discussions	42
	Associations <i>one-to-one</i>	42
	Associations <i>one-to-many</i>	49
	Impact de l'information biostratigraphique	50
2.5	Conclusions	51

Le dépôt des sédiments obéissant à des processus physiques, il est possible de définir des règles d'association des unités stratigraphiques identifiées le long des forages. Ces règles peuvent être utilisées par les algorithmes de corrélation automatique vus dans la section 1.5. Dans ce chapitre nous utilisons les concepts de stratigraphie séquentielle, vus dans la section 1.1.2, dans la corrélation stratigraphique de puits en adaptant l'algorithme de déformation temporelle (section 2.2) et en définissant des règles de corrélation (section 2.1). Enfin, la méthode est appliquée sur des données de puits du Nord de la Tunisie (section 2.3) et d'Europe du Nord (section 2.4).

2.1 Règles de corrélation dans le cadre de la stratigraphie séquentielle

Les règles de corrélation définissent les coûts d'association de deux séquences stratigraphiques sur deux puits distincts. Les coûts sont normalisés entre 0 et 1 pour être comparables

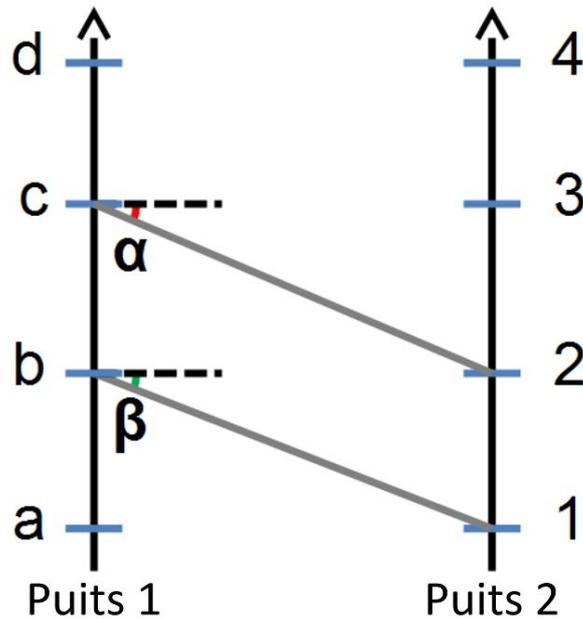


FIGURE 2.1 – Règle de corrélation stratigraphique minimisant la variation latérale d’épaisseur des unités stratigraphiques Pour chaque unité, les pentages du toit de l’unité [c;2] d’une part, et du mur [b;1] de cette même unité d’autre part sont comparés. Le coût est calculé suivant l’équation : $t_{(c,2)} = \frac{|\alpha-\beta|}{180}$. Les angles sont exprimés en degrés.

les uns avec les autres. Les règles peuvent être dominantes ou récessives [Lallier *et al.*, 2012]. Une règle dominante détermine si une association est possible ou non et est généralement associée à des données discrètes (type de séquence, mesure magnétostratigraphique...). Une règle récessive donne un coût à l’association et est associée à des données continues (logs, épaisseurs...).

Les règles décrites ici sont applicables dans un contexte de marge passive sans mouvements de tectonique active significatifs et avec une subsidence relativement uniforme.

2.1.1 Transgression/Régression

Les unités stratigraphiques considérées sont des successions de transgressions et régressions. La première règle choisie est d’associer ces unités respectivement, suivant le modèle T-R [Johnson et Murphy, 1984, Embry et Johannessen, 1992, Embry, 2002] (fig. 1.13, section 1.1.2), en rendant l’association d’une transgression et d’une régression impossible. C’est donc une règle dominante. Le coût d’un hiatus ou d’une association correcte vaut 0.

Dans le cas de différences de subsidence, des dépôts de transgression en un endroit donné pourraient être synchrones d’une érosion due à une surrection, et donc une régression, en un autre endroit (e.g. Varban et Guy Plint [2008]).

2.1.2 Variation latérale d’épaisseur

Cette deuxième règle, récessive, favorise l’association d’unités d’épaisseurs similaires. Autrement dit, elle consiste à minimiser la variation latérale d’épaisseur pour une même unité. Elle est principalement applicable dans le cas de puits avec un espacement relativement faible.

Pour ce faire, le pendance du toit de cette unité et celui du mur de cette même unité sont comparés (fig. 2.1). Nous avons préféré comparer les pentages des horizons plutôt que les épaisseurs des unités pour pouvoir normaliser facilement le coût. De plus, comparer les angles permet de prendre en compte la distance séparant les puits. Une même variation d’épaisseur

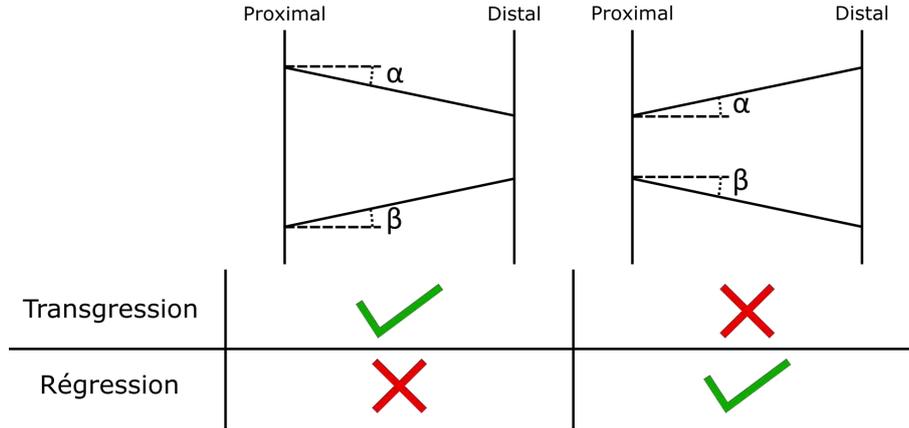


FIGURE 2.2 – Différents cas favorables ou non de variation d'épaisseur de l'unité. En transgression : amincissement plus probable. En régression : épaissement plus probable. Dans les cas favorables, le coût sera réduit, et il sera augmenté dans les cas non-favorables.

pour des puits plus éloignés donnera des angles moins différents, et donc un coût plus faible, que pour des puits plus proches l'un de l'autre. C'est l'épaisseur des unités formées par les corrélations qui est mesurée, donc ce sont les coûts des transitions dans la table de coût qui sont considérées dans cette règle. Le coût de l'association suit l'équation :

$$t_{(i,j)} = \frac{|\alpha - \beta|}{180}, \quad (2.1)$$

avec i et j les marqueurs associés et α et β les angles comparés. La différence est normalisée en divisant par 180.

Dans le cas d'une marge passive, cette règle peut-être modulée en fonction de la distalité. Ce travail a fait l'objet du projet 3A de Guillaume Vix que j'ai encadré en 2014-2015 dans l'équipe RING du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine) [Vix *et al.*, 2015].

La modification du coût se base sur le principe de partitionnement volumétrique des sédiments vu dans le chapitre 1 [Cross *et al.*, 1993]. Une unité correspondant à une transgression tend à avoir une épaisseur qui décroît du pôle proximal au pôle distal. Inversement, une unité correspondant à une régression a une épaisseur qui augmente avec la distalité.

Pour favoriser ce type d'association, un coefficient est calculé en fonction de la direction d'épaissement de l'unité et de son statut, transgression ou régression (fig. 2.2). Le coût d'association des unités est augmenté ou diminué d'un pourcentage de sa valeur à l'aide de ce coefficient (s sur la fig. 2.3).

La position relative des puits considérés par rapport à la distalité est prise en compte pour pondérer ce coefficient (fig. 2.4). En effet, si le vecteur formé par les puits est orienté perpendiculairement à la direction de la distalité, l'effet de partitionnement des volumes de sédiments est théoriquement nul (dans le cas de dépôts cylindriques). Le coefficient est pondéré d'un poids de 0, annulant son action. La règle de corrélation se rapporte donc à minimiser les variations latérales d'épaisseur des unités. En revanche, si le vecteur formé par les puits est parallèle au vecteur de la distalité, la pondération est maximale et vaut 1.

Ainsi, le coût d'association de deux unités suit l'équation :

$$t_{(i,j)} = \frac{|\alpha - \beta|}{180} * (1 + s * d), \quad (2.2)$$

avec $c_{(i,j)}$ le coût vu précédemment, s le coefficient qui suit la loi présentée sur la figure 2.3

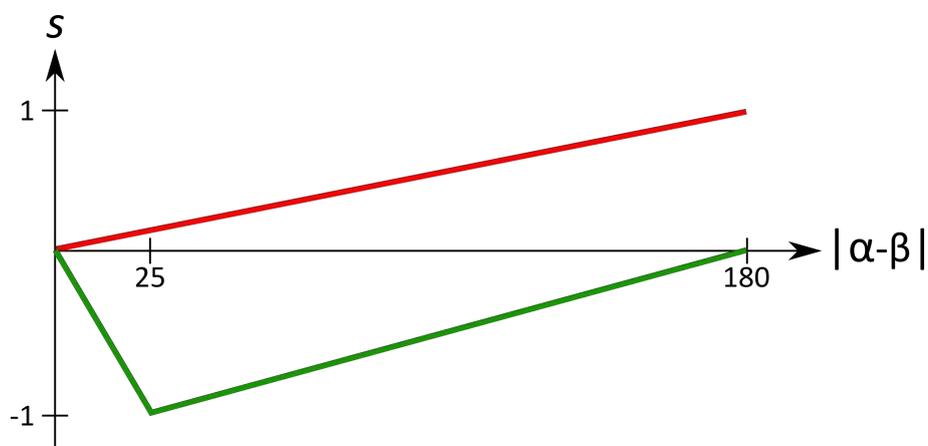


FIGURE 2.3 – Valeur du coefficient en fonction des cas favorables ou non. Courbe rouge : cas non favorables, courbe verte : cas favorables (définis sur la fig. 2.2). La valeur 25° est empirique et peut être définie par l'utilisateur.

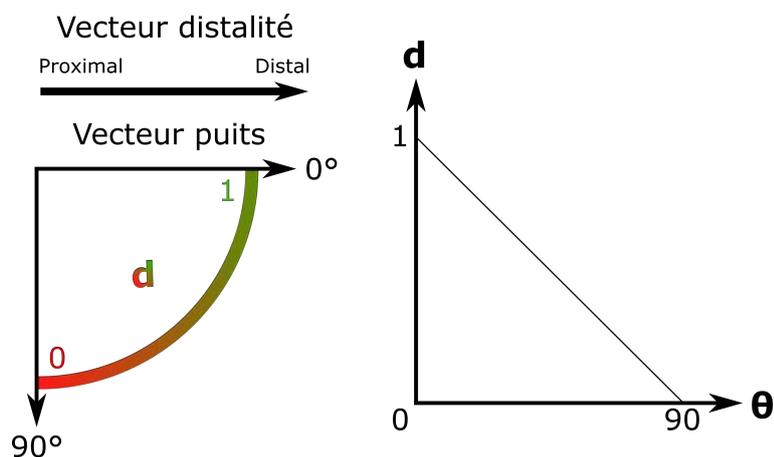


FIGURE 2.4 – Pondération du coefficient en fonction de la position des puits par rapport à la distalité. Gauche : visualisation de la valeur de d en fonction de l'orientation des vecteurs : si le vecteur formé par les deux puits est parallèle au vecteur distalité, le poids est maximum et vaut 1. Si en revanche les deux vecteurs sont perpendiculaires, le poids est minimum et vaut 0. Droite : Valeur de d en fonction de l'angle θ entre les vecteurs.

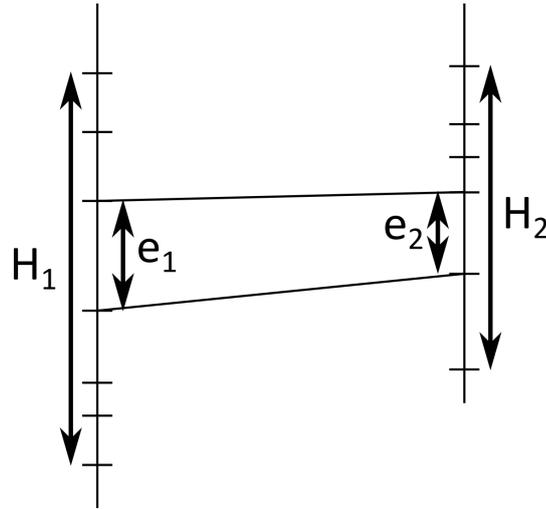


FIGURE 2.5 – Longueurs utilisées pour le calcul du ratio entre l'unité et le puits. e_1 et e_2 les épaisseurs des unités considérées et H_1 et H_2 les hauteurs des puits.

en fonction des cas favorables ou non (fig. 2.2) :

$$s = \begin{cases} \frac{|\alpha - \beta|}{180} & \text{si le cas est défavorable} \\ \left\{ \begin{array}{ll} \frac{|\alpha - \beta|}{25} & \text{si } 0 \leq |\alpha - \beta| \leq 25 \\ \frac{|\alpha - \beta| - 25}{155} - 1 & \text{si } 25 < |\alpha - \beta| \leq 180 \end{array} \right\} & \text{si le cas est favorable} \end{cases} \quad (2.3)$$

et d le poids dépendant de la position relative des puits en fonction de la direction de la distalité, autrement dit le cosinus de l'angle θ entre le vecteur distalité et le vecteur formé par les puits (fig. 2.4) :

$$d = \cos(\theta), \quad (2.4)$$

Le taux de sédimentation apparent peut être inégal sur les forages considérés (faille active entre les deux forages, répartition inégale des sédiments). Si la sédimentation est continue pendant les mouvements tectoniques, des éventails sédimentaires peuvent être observés [Suppe *et al.*, 1992, Shaw *et al.*, 2005].

Ce cas a été considéré pendant le projet 3A de Thomas Monin que j'ai encadré en 2015-2016. Dans ce cas, les épaisseurs peuvent être rapportées aux hauteurs totales entre deux marqueurs stratigraphiques de référence sur chaque puits, suivant l'équation :

$$t_{(i,j)} = \left(\frac{e_1}{H_1} - \frac{e_2}{H_2} \right)^2, \quad (2.5)$$

avec e_1 et e_2 les épaisseurs des unités considérées et H_1 et H_2 les épaisseurs entre les marqueurs stratigraphiques de référence considérés (fig. 2.5). Ces marqueurs peuvent être le dernier marqueur pré-tectonique et le premier marqueur post-tectonique sur chaque puits. Ici, nous comparons les épaisseurs et non les angles pour éviter les divisions par 0.

Cette règle repose sur deux hypothèses. D'une part, les taux de sédimentation sont constants dans le temps. D'autre part, les marqueurs de toits et murs des deux puits sont corrélés respectivement. C'est une information qui peut être obtenue grâce à des horizons caractéristiques, des surfaces remarquables ou en utilisant des données sismiques.

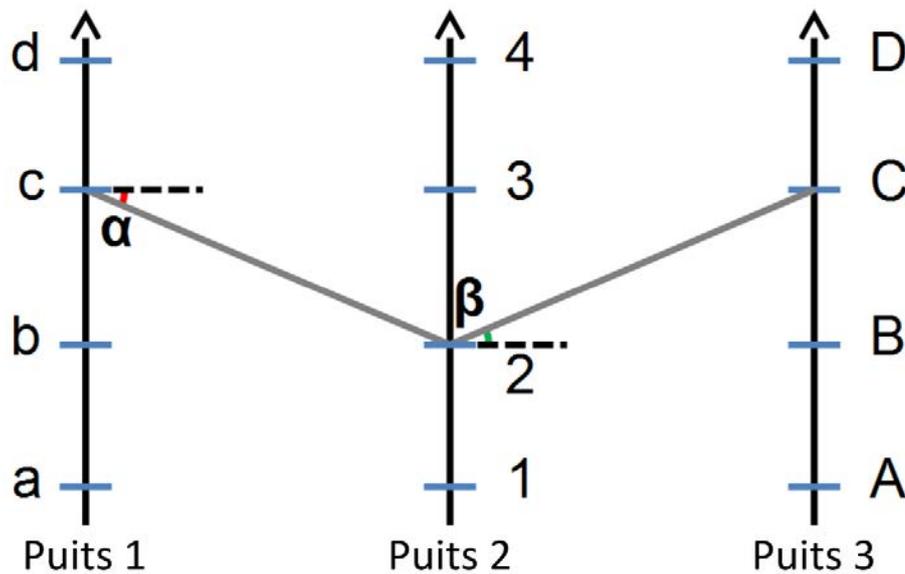


FIGURE 2.6 – Règle de corrélation stratigraphique minimisant la variation latérale de pendage. Dans le cas de corrélation stratigraphique multi-puits, les pendages de l’horizon entre les différents puits sont comparés. Le coût est calculé suivant l’équation : $c_{(c,2)} = \frac{|\alpha-\beta|}{180}$. Les angles sont exprimés en degrés.

2.1.3 Variation latérale de pendage

Cette troisième règle, récessive, permet de minimiser la variation latérale de pendage des horizons lors d’une corrélation stratigraphique multi-puits (fig. 2.6). Les puits sont corrélés séquentiellement. Le pendage de l’horizon considéré lors de la précédente corrélation est comparé au pendage de l’horizon résultant de l’association testée, suivant l’équation : $c_{(i,j)} = \frac{|\alpha-\beta|}{180}$, avec i et j les marqueurs associés et α et β les angles des pendages comparés. Si le marqueur est commun à plusieurs horizons de la corrélation stratigraphique précédente (en cas de hiatus), le coût sera nul si l’angle formé par la nouvelle association est compris entre l’angle minimum et l’angle maximum formés par ces horizons.

2.1.4 Intégration des données de biostratigraphie

Les données de biostratigraphie peuvent être utilisées pour contraindre les corrélations des séquences stratigraphiques. Des biozones correspondant à des assemblages particuliers de fossiles peuvent être définies le long des puits. Ces assemblages correspondent à des périodes précises, et permettent donc de contraindre les corrélations chronostratigraphiques.

En revanche, des incertitudes subsistent. En effet, l’extension maximum d’une biozone dépend des premières et dernières occurrences des taxons qui la composent. Plusieurs problèmes peuvent rendre la définition des limites des biozones difficiles. Tout d’abord, la résolution de l’échantillonnage, la distance séparant deux échantillons consécutifs, a un impact sur la précision de la position des limites. Ensuite, la qualité de préservation des espèces considérées est aussi un facteur à prendre en compte, pouvant altérer la définition des limites des biozones. Enfin, l’environnement, la topographie et les courants marins par exemple, contrôlent la répartition des fossiles dans la région d’étude. Ces problèmes peuvent rendre les corrélations biostratigraphiques compliquées [Sadler et Cooper, 2003].

Il est toutefois possible de définir des profondeurs minimales et maximales des horizons délimitant les biozones. À partir de ces données, les associations des marqueurs stratigraphiques situées sous la valeur de profondeur maximale d’un horizon sur un puits avec les marqueurs stratigraphiques situés au dessus de la valeur minimale de profondeur de ce même horizon sur

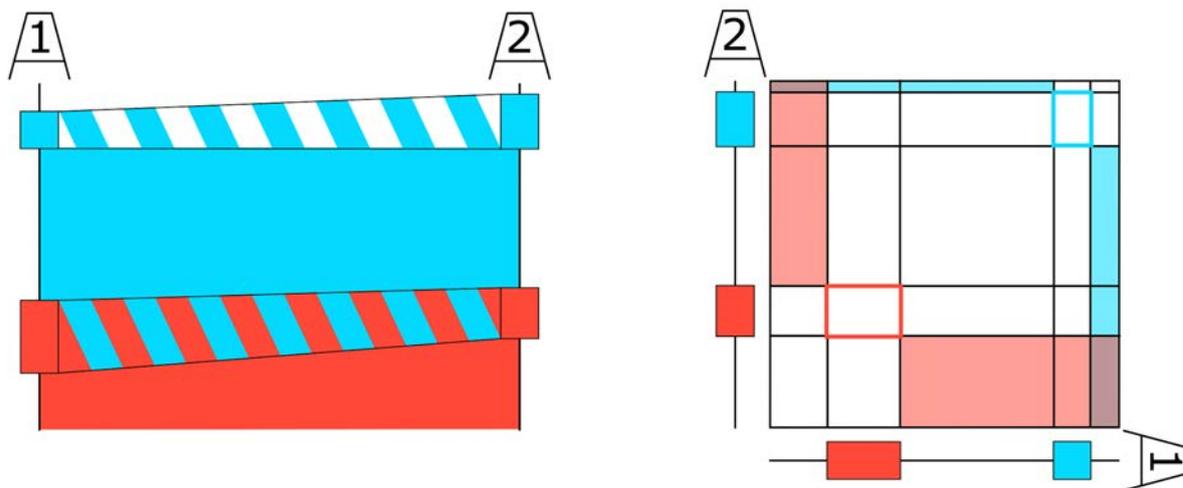


FIGURE 2.7 – Contrainte de la corrélation stratigraphique à l’aide d’information biostratigraphique. Gauche : Corrélation des biozones sur deux puits. Les plages colorées correspondent aux biozones. Les plages hachurées sont les zones d’incertitudes quant à la position des horizons délimitant les biozones. Les boîtes colorées sur les puits délimitent les positions possibles des horizons délimitant les biozones. Droite : Table de corrélation stratigraphique des puits. Les zones colorées sont interdites. Les zones encadrées doivent forcément contenir chacune au moins une association.

l’autre puits peuvent être interdites. Autrement dit, il doit y avoir au moins une association entre les valeurs minimales et maximales de profondeur de chaque horizon (fig. 2.7). Cette règle peut être appliquée exactement quand les limites des biozones correspondent aux limites des séquences stratigraphiques. Puisque ce n’est pas le cas ici, les limites des biozones sont étendues aux limites de séquences supérieures les plus proches. Dans l’algorithme de corrélation, nous traduisons cette information par une règle dominante, en excluant certaines zones de la table de coût du DTW.

2.2 Application de l’algorithme de déformation temporelle à la stratigraphie séquentielle : association “*One-to-many*”

Nous avons vu que les séquences stratigraphiques pouvaient être identifiées à différents ordres (section 1.1.2) : plusieurs séquences d’un puits peuvent correspondre à une seule séquence d’un autre puits si ces deux puits sont interprétés à différents ordres. Autoriser les associations *one-to-many* [Howell, 1983, Waterman et Raymond, 1987] vues dans la section 1.6.2 permet de gérer ces différences de niveau d’interprétation. Cela peut aussi permettre de prendre en compte des unités manquantes sur un puits. Par exemple, une longue transgression sur un puits distal peut correspondre à deux petites transgressions avec une régression intercalée entre les deux sur un puits proximal.

Le nombre maximum de séquences d’un premier puits qui peuvent être associées à une séquence d’un second puits est un paramètre d’entrée de l’algorithme. Le coût d’une association *one-to-many* doit être supérieur au coût d’une association *one-to-one* pour éviter de favoriser l’association *one-to-many*. En effet, plus il y a de marqueurs impliqués dans une association *one-to-many*, moins d’associations sont nécessaires pour corréler les deux puits par rapport à des associations *one-to-one*. L’algorithme pourrait donc sélectionner préférentiellement ces associations pour corréler l’ensemble des puits avec un coût faible.

Nous ajoutons donc une pénalité au coût calculé via les règles de corrélation. Cette pénalité vaut k/N , avec k le nombre de séquences d’un puits associées à une séquence de l’autre puits, et N le nombre maximum de séquences d’un puits qui peuvent être associées à une séquence

du second puits.

L'équation du DTW peut être formulée comme suit :

$$C_{(i,j)} = c_{(i,j)} + \min \left\{ \begin{array}{l} t_{i,i-1}^{j,j-1} + C_{(i-1,j-1)+1/N} \\ t_{i,i}^{j,j-1} + C_{(i,j-1)} \\ t_{i,i-1}^{j,j} + C_{(i-1,j)} \\ t_{i,i-k}^{j,j-1} + C_{(i-k,j-1)+k/N} \\ t_{i,i-1}^{j,j-k} + C_{(i-1,j-k)+k/N} \end{array} \right\} \quad (2.6)$$

avec k compris entre 2 et N .

2.3 Tests des associations *one-to-many* et *n-best*

La méthode est appliquée à des puits tirés de l'étude de Carpentier *et al.* [2016], dans un bassin du Trias supérieur et Lias, du Sud de la Tunisie. Ce bassin est un rift qui évolue vers un bassin à subsidence uniforme, dont la transition est discutée dans la littérature. Au centre de la Tunisie, on trouve la faille normale décrochante de Jeffara, qui borde la plaine de Jeffara et le bassin de Subratah. Un peu plus au Sud se trouve une faille normale synthétique parallèle à la faille de Jeffara qui borde le plateau de Dahar au Sud-Ouest et le Jebel Rehach au Sud. Tout au Sud, près des frontières algérienne et lybienne, le bassin Ghadames présente une géométrie monoclinale avec un léger pendage vers le Sud-Ouest, pour devenir le bassin Berkine en Algérie.

Les puits à corrélés se trouvent dans le Sud de la Tunisie, près de la frontière algérienne (fig. 2.8). La région des puits que nous avons corréler correspond à deux grandes séquences, présentant principalement des marnes pendant l'ennoiement, et des évaporites, des grès ou des dolomites, pendant la baisse du niveau marin relatif.

2.3.1 Données et paramètres

Les unités stratigraphiques des puits sont interprétées en termes de stratigraphie séquentielle. Les puits sont corrélerés avec les deux premières règles présentées ci-dessus : Transgressions et régressions corrélerés respectivement, et minimisation des variations latérales d'épaisseur. Les deux puits considérés présentent des taux de sédimentation différents, mais ils sont considérés proportionnels dans chaque séquence. Un nombre maximum de cinq séquences d'un puits peuvent être corrélerés à une séquence de l'autre puits (association *one-to-many*).

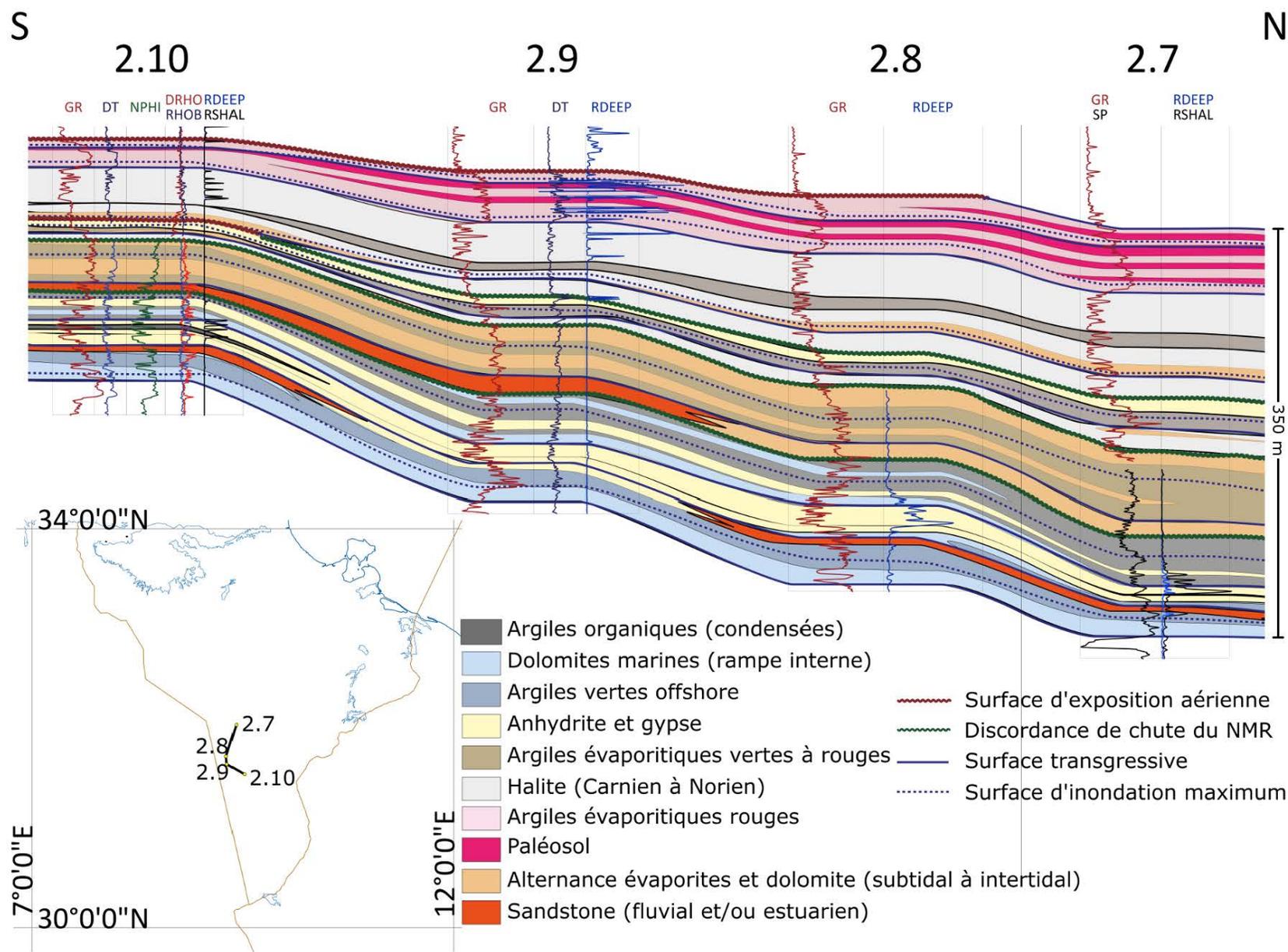


FIGURE 2.8 – Position du transect dans le Sud de la Tunisie et corrélation stratigraphique manuelle entre les puits 2.7 et 2.10 (modifié d'après Carpentier *et al.* [2016]).

2.3.2 Résultats

La figure 2.9 montre qu'autoriser l'association de cinq séquences d'un puits à une séquence de l'autre puits (C) permet de mieux respecter la règle de variation d'épaisseur que sans association *one-to-many* (B). En calculant la somme des variations d'épaisseurs de chaque unités entre les deux puits pour les deux corrélations stratigraphiques, on obtient 1404,25 m pour B et 1073,29 m pour C. Cette comparaison montre aussi l'impact de l'interprétation des données sur la corrélation finale. La corrélation stratigraphique B montre plus de hiatus que la corrélation stratigraphique C, traduisant un scénario différent de dépôt des sédiments.

Les trois meilleures corrélations stratigraphiques sont obtenues en sortie (fig. 2.9C, D, E), avec des coûts croissants. En les comparant, il est possible de remarquer les horizons qui diffèrent (flèches sur la figure). Ces zones des puits correspondent aux sections les plus incertaines, selon les données et les règles utilisées. Ces différences pourraient avoir des conséquences importantes dans des études ultérieures, sur les éventuels pièges stratigraphiques présents, par exemple. Comme ce sont les meilleures corrélations stratigraphiques, elles présentent peu de différences les unes par rapport autres.

Dans cet exemple, on retrouve les lignes de corrélation [1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10] de la corrélation stratigraphique manuelle (A) dans les corrélations stratigraphiques B, C et E et la corrélation stratigraphique D présente les mêmes lignes exceptée la ligne 3. Ces corrélations stratigraphiques paraissent sûres, étant confirmées par les corrélations stratigraphiques automatiques. En revanche, les lignes 5 et 6 ne sont pas retrouvées avec les règles utilisées. Soit la corrélation stratigraphique manuelle présente une erreur à ce niveau, soit l'interprétation des séquences stratigraphiques est fautive à ce niveau, soit les règles ne suffisent pas pour retrouver la corrélation stratigraphique réelle de cette zone d'étude.

2.4 Impact des incertitudes d'interprétation

Statoil a mis à notre disposition six puits d'Europe du Nord portant plusieurs logs (densité, rayons gamma, résistivité, etc...), présentés sur la figure 2.10, ainsi que des données de biostratigraphie. La région d'intérêt est l'intervalle Jurassique, pendant lequel les dépôts se sont faits avec une orientation générale SE-NW. Ils correspondent à un environnement marin restreint dans un estuaire, dominé par des faciès boueux dans une eau saumâtre. Les facteurs principaux contrôlant l'architecture stratigraphique pendant le Jurassique sont considérés comme étant les variations eustatiques globales, l'apport sédimentaire, les mouvements tectoniques et les processus autocycliques [Hallam, 2001]. Les puits montrent globalement des faciès continentaux au bas des puits, puis des faciès sableux (sandstone) qui traduisent un delta progradant dans un contexte globalement transgressif (des faciès marins profonds - *offshore* - apparaissent en haut des puits).

Les puits 4 et 5 étant situés dans une zone d'intérêt pour Statoil, les corrélations stratigraphiques effectuées sont concentrées sur ces deux puits. Les données de biostratigraphie ont permis d'identifier plusieurs biozones plus ou moins précisément. La biostratigraphie est basée sur l'association d'espèces (taxons) dont les durées d'existence sont connues. Cependant, plusieurs problèmes apparaissent. L'absence d'un fossile donné à une profondeur donnée peut soit signifier que l'espèce n'existait pas, soit qu'elle n'a pas été déposée à l'endroit du puits. De plus, l'intervalle de temps exact d'existence d'une espèce donnée est rarement connu parfaitement. Ainsi, des incertitudes subsistent sur la position des horizons délimitant les différentes zones, définies par des profondeurs minimales et maximales pour chaque horizon (Tableau 2.1). Les corrélations stratigraphiques ont été faites à l'aide des règles suivantes : corrélations des transgressions et régressions respectivement, minimisation de la variation latérale d'épaisseur et contrainte à l'aide de la biostratigraphie. Il a été précisé que ces règles doivent être appliquées dans un contexte sans contrainte tectonique majeure et dans ce cas, le rift jurassique a perturbé le dépôt des sédiments. Mais les deux puits considérés se trouvent dans

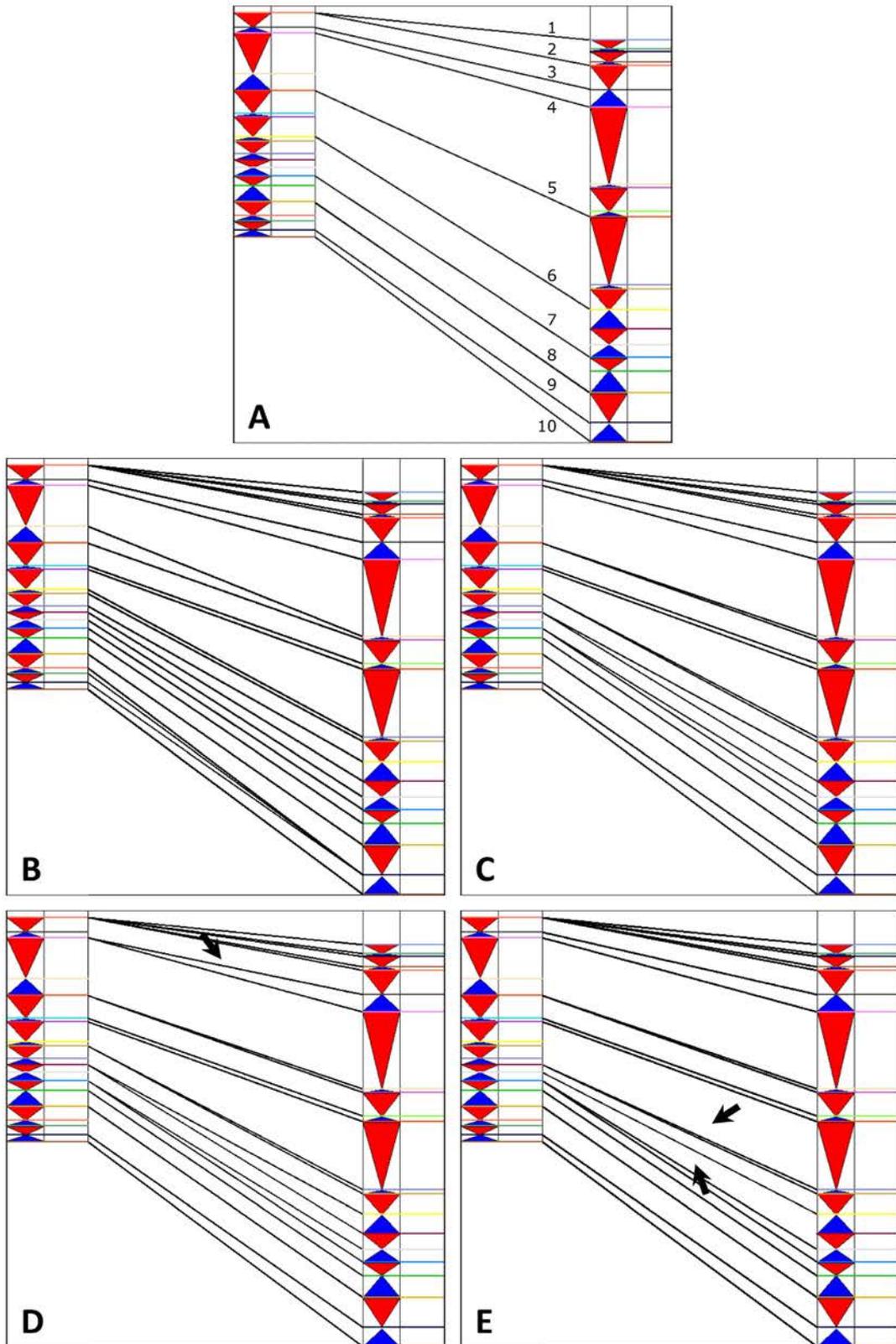


FIGURE 2.9 – Résultats des corrélations stratigraphiques des puits et comparaison avec la corrélation stratigraphique manuelle. A. Corrélation stratigraphique manuelle des puits. Les lignes d'association sont numérotées pour les remarques dans le texte. B. Corrélation stratigraphique sans association *one-to-many*. C., D. et E. Trois premières meilleures corrélations stratigraphiques avec association *one-to-many* en autorisant l'association d'une à cinq séquences d'un puits à une séquence de l'autre puits. Les flèches localisent les différences des deuxième et troisième meilleures corrélations stratigraphiques avec la meilleure.

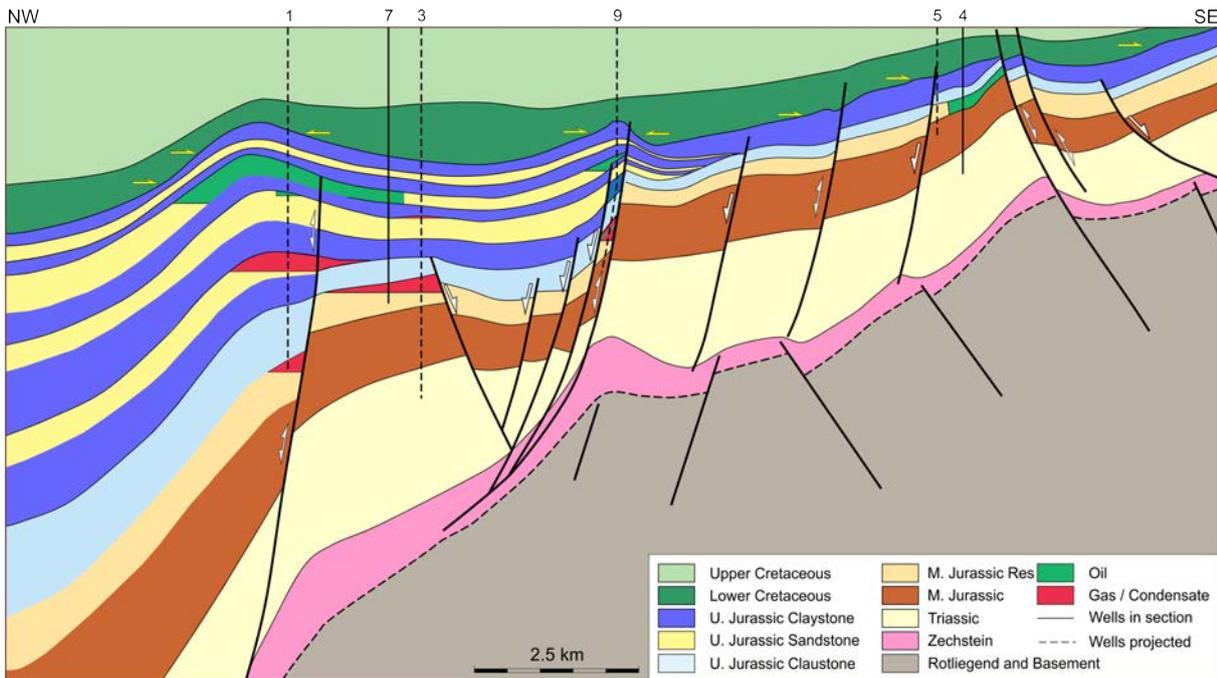


FIGURE 2.10 – Coupe présentant les grandes structures de la zone d'étude et les positions des six puits (donnée Statoil). Les puits en pointillés sont projetés.

le même bloc de faille, et sont orientés parallèlement aux structures. Ainsi, nous considérons la perturbation due aux mouvements tectoniques suffisamment négligeable pour pouvoir appliquer ces règles de corrélation. Ce travail a été réalisé en partie dans le cadre du stage de Master de Victor Haddad dans l'équipe RING du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine).

2.4.1 Interprétation des données

Nous avons également une interprétation et une corrélation stratigraphique de référence des puits (fig. 2.11), faites par des sédimentologues à partir des données disponibles et de concepts géologiques, dans le cadre de la stratigraphie séquentielle.

Cette interprétation montre cinq unités qui corréleront le bas des deux puits. Elles présentent peu de variation latérale d'épaisseur.

Une deuxième interprétation a été faite par Victor Haddad pendant son stage (fig. 2.12). Les deux puits sont divisés en séries de séquences stratigraphiques transgressives et régressives. Ces interprétations sont basées principalement sur l'analyse de logs (électrofaciès) et de reconnaissance de chenaux et de lobes progradants.

Plusieurs corrélations des puits interprétés par Victor Haddad ont été effectuées avec et sans associations *one-to-many*, et ont été comparées à la corrélation stratigraphique de référence.

2.4.2 Résultats et discussions

Associations *one-to-one*

Les 100 meilleures corrélations des puits interprétés par Victor Haddad ont été calculées. La corrélation la plus probable est présentée sur la figure 2.13. Plus de séquences étant identifiées sur le puits 5 que sur le puits 4, des hiatus sont inévitables. Des petites séquences qui ne sont pas observées sur l'autre puits, correspondant à des hiatus, peuvent être rencontrées ponctuellement tout au long des puits. On trouve surtout les plus grosses unités corréliées à

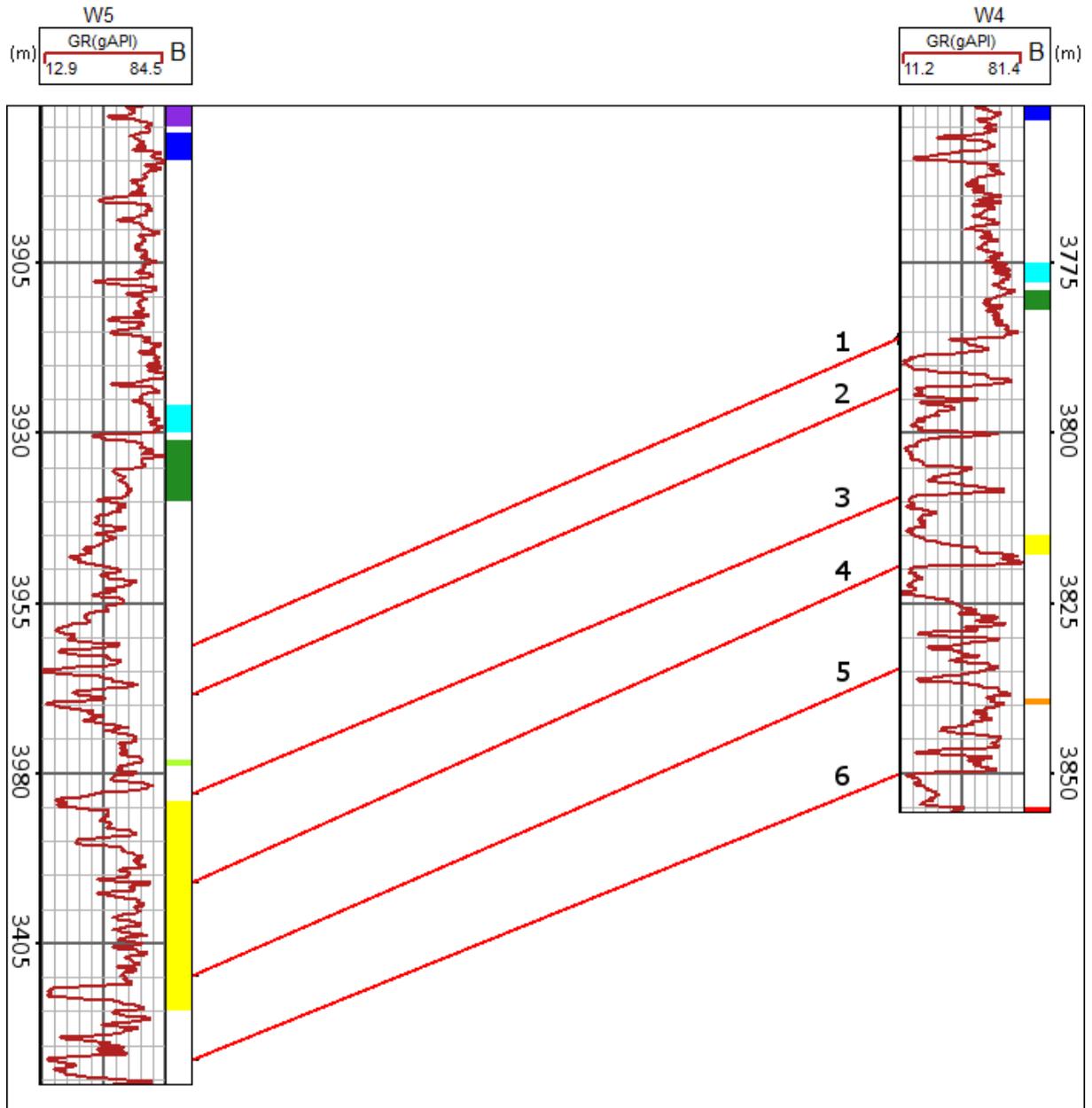


FIGURE 2.11 – Corrélation stratigraphique de référence des puits 4 et 5 selon des sédimentologues (données Statoil). Le log correspond aux rayons gamma et les unités colorées correspondent aux positions possibles des horizons supérieurs des biozones. Les numéros des lignes de corrélation sont utilisés pour des remarques dans le texte.

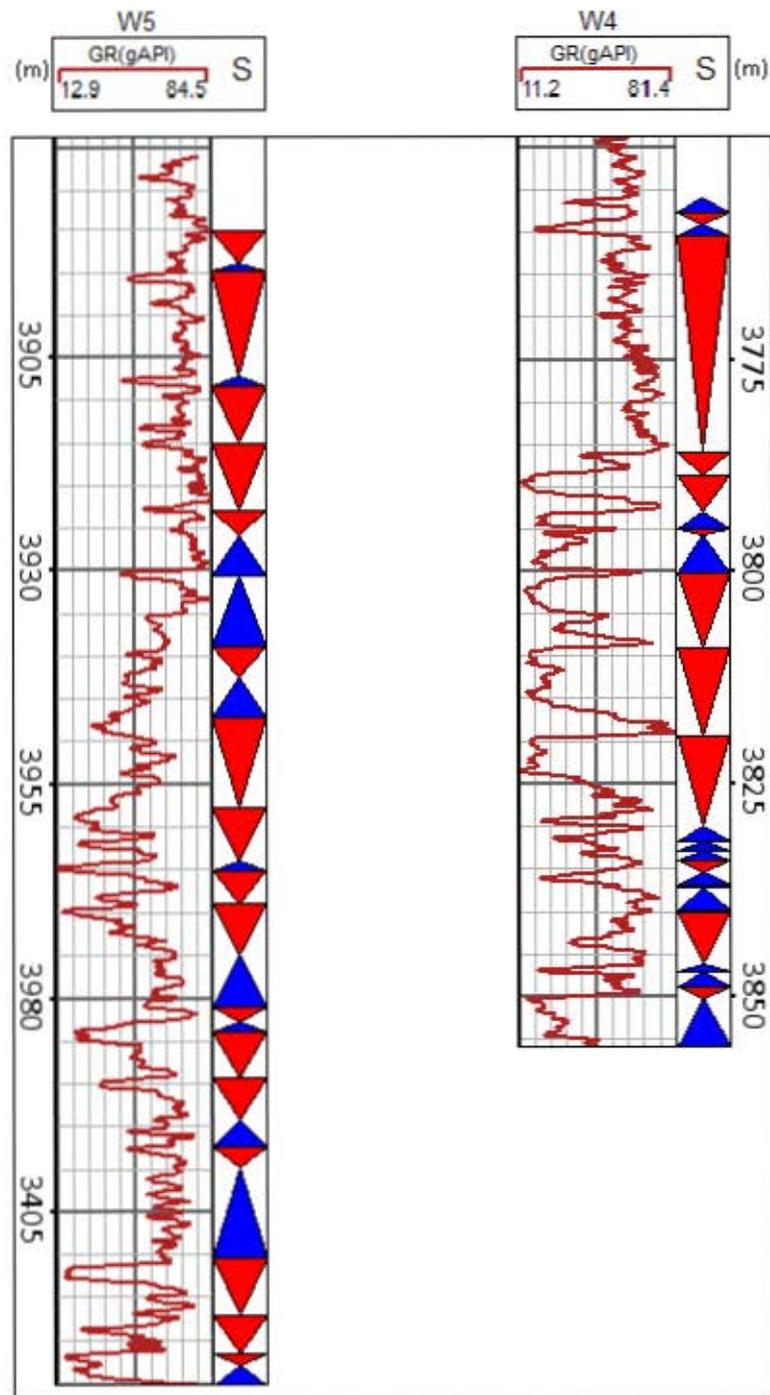


FIGURE 2.12 – Interprétation des puits 4 et 5 en termes de stratigraphie séquentielle. Le log présenté correspond aux rayons gamma, mais l'interprétation des séquences stratigraphiques a été faite à l'aide du lot de logs et des positions des veines de charbon disponibles. S : Stratigraphie séquentielle.

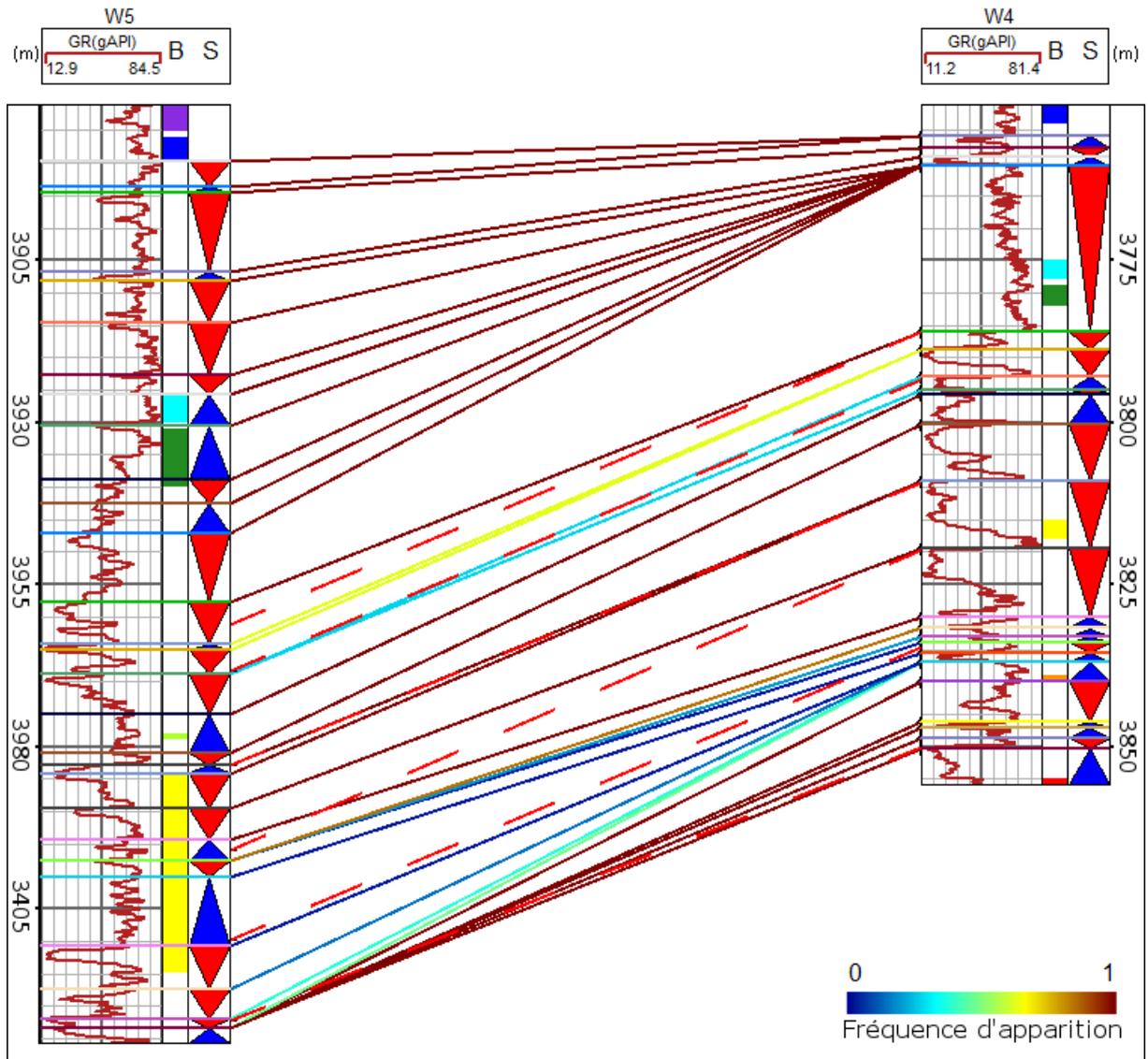


FIGURE 2.13 – Meilleure corrélation stratigraphique des puits 4 et 5 sans association *one-to-many*. Les règles utilisées sont la corrélation des transgressions et régressions respectivement, minimisation de la variation latérale d'épaisseur, et contrainte par les informations de biostratigraphie. Les couleurs des associations correspondent à leurs fréquence d'apparition dans les 100 meilleures corrélations. Les lignes pointillées rouges correspondent à la corrélation stratigraphique de référence. B : Biostratigraphie ; S : Stratigraphie séquentielle.

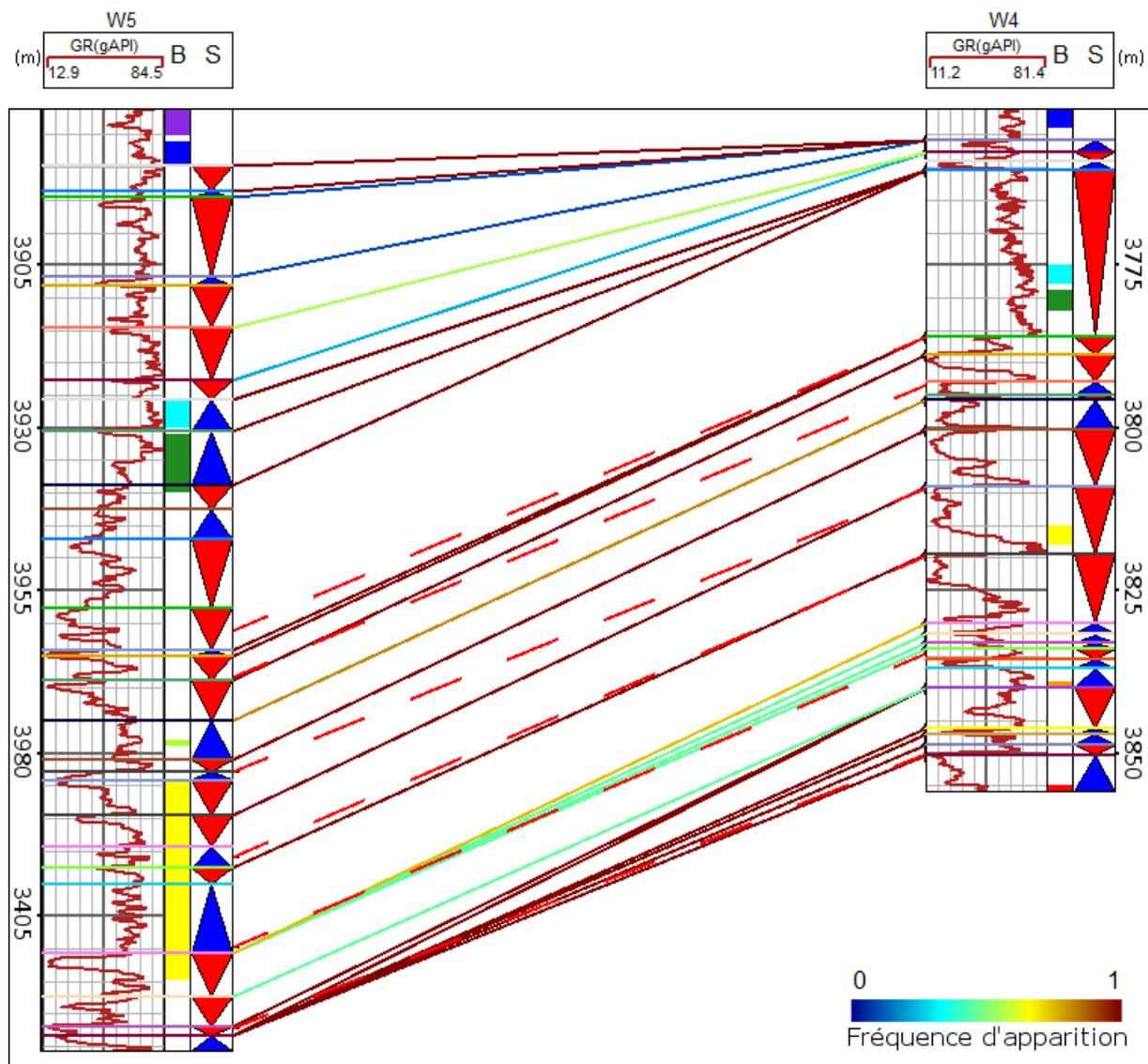


FIGURE 2.14 – Meilleure corrélation stratigraphique des puits 4 et 5 avec association *one-to-many*. Les règles utilisées sont la corrélation des transgressions et régressions respectivement, minimisation de la variation latérale d'épaisseur, et contrainte par les informations de biostratigraphie. Jusqu'à cinq séquences d'un puits peuvent être corrélés à une séquence de l'autre puits. Les couleurs des associations correspondent à leurs fréquence d'apparition dans les 100 meilleures corrélations. Les lignes pointillées rouges correspondent à la corrélation stratigraphique de référence. B : Biostratigraphie ; S : Stratigraphie séquentielle.

Biozone		Puits 4	Puits 5
Z1	min	3747	3881
	max	3750	3885
Z2	min	3751	3886
	max	3754	3890
Z3	min	3775	3926
	max	3778	3930
Z4	min	3779	3931
	max	3782	3940
Z5	min	NO	3978
	max	NO	3979
Z6	min	3815	3984
	max	3818	4015
Z7	min	3839	4029
	max	3840	4030
Z8	min	3855	4031
	max	3858	4040

TABLE 2.1 – Profondeurs minimum et maximum des limites supérieures de chaque biozone sur les puits 4 et 5. NO : non observé.

des hiatus tout en bas des puits et au sommet (Une partie significative du haut du puits 5 semble ne pas être présente sur les données du puits 4). Les toits des biozones Z3 et Z4 (cyan et vert foncé) correspondant à des régressions sur le puits 5 et à une transgression sur le puits 4, l'algorithme ne peut pas associer ces biozones. Cela illustre l'importance de l'identification des séquences, qui devraient dans ce cas être reconsidérées pour être cohérentes avec les biozones. Certains marqueurs stratigraphiques plus profonds que les toits des biozones Z3 et Z4 sur le puits 5 sont associés à des marqueurs stratigraphiques moins profonds que ces horizons sur le puits 4, ce qui revient à des horizons qui s'intersectent et cela devrait être impossible. Le toit de la biozone Z6 (jaune) contraint peu les corrélations sur le puits 5 car l'incertitude sur sa position est grande.

Les lignes de corrélation 2, 3 et 6 sur la corrélation stratigraphique de référence semblent correspondre globalement à ce qui est observé sur la corrélation obtenue avec l'algorithme. Cependant, les lignes de corrélation 1, 4 et 5 ne correspondent pas. On remarque notamment les deux séquences transgressives entre 3985 m et 3995 m sur le puits 5 qui sont corrélées selon la corrélation de référence avec la séquence transgressive située entre 3810 m et 3820 m sur le puits 4, alors que sur la corrélation obtenue, seule la plus profonde de ces séquences sur le puits 5 est corrélée à la séquence du puits 4.

Les différentes associations de marqueurs stratigraphiques sont colorées en fonction de leurs fréquences d'apparition dans les 100 meilleures corrélations. On trouve donc en rouge foncé les associations qu'on trouve dans les 100 meilleures corrélations. Ce sont donc les plus certaines, selon les règles et les données utilisées. En bleu, ce sont les associations les moins rencontrées dans les 100 meilleures corrélations des deux puits. Ce sont donc les associations les plus incertaines. On remarque des hiatus à la base des puits qui paraissent "certains". On observe ensuite une série de lignes incertaine (entre 3995 m et la base sur le puits 5, et entre 3830 m et 3840 m sur le puits 4). Au dessus, une région qui semble certaine est rencontrée (entre 3975 m et 3995 m sur le puits 5 et entre 3795 m et 3830 m sur le puits 4). Une autre zone incertaine est observable au dessus (entre 3960 m et 3970 m sur le puits 5 et entre 3787 m et 3795 m sur le puits 4). Finalement, le sommet des puits présente des lignes de corrélation certaines.

On remarque donc que les différences obtenues entre cette corrélation et la corrélation de référence, ainsi que les sources d'incertitudes dans les corrélations, correspondent souvent à

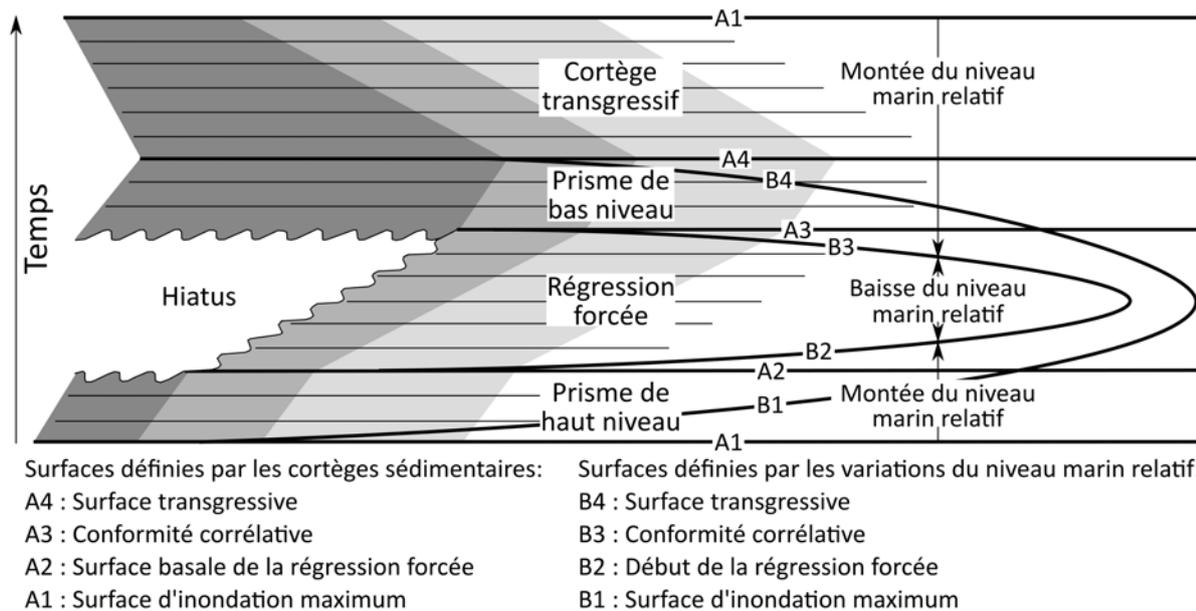


FIGURE 2.15 – Comparaison des surfaces remarquables synchrones et diachrones (d'après Catuneanu *et al.* [1998]).

l'association de petites séquences. Cela peut être dû à des niveaux d'interprétations différents entre les deux puits, ou des unités détectées sur un puits et non-enregistrées sur l'autre puits. En effet, les petites séquences peuvent correspondre à une subdivision des séquences plus longues sur l'autre puits, plutôt qu'être associées à des hiatus. Cela peut avoir deux causes. Premièrement, les séquences stratigraphiques peuvent être identifiées à des ordres différents, plusieurs séquences d'un ordre élevé correspondant à une séquence d'ordre inférieur. En fonction de l'ordre d'interprétation des séquences sur un puits, une séquence d'ordre élevé sur un puits peut correspondre à plusieurs séquences d'ordre inférieur sur l'autre puits.

Deuxièmement, des aggradations peuvent être difficilement découpées en unités stratigraphiques en ne considérant que les logs, car le signal peut être relativement homogène dans ces séquences. Par exemple, sur la figure 2.16 le puits le plus proximal présente une aggradation de faciès continentaux qui pourraient être considérés comme une seule unité stratigraphique, mais pourraient aussi contenir plusieurs surfaces d'érosion correspondant à des périodes de régression. De même pour le puits le plus distal qui montre une aggradation de faciès marins fins, dans lesquels il serait difficile de distinguer des séquences stratigraphiques. Cet aspect hiérarchique des unités stratigraphique a notamment été discuté par Campbell [1967]. La lecture des logs et leur interprétation en termes de stratigraphie séquentielle sont difficiles et demandent de l'expérience. Parfois, même avec de l'expérience il peut être impossible de différencier une ou plusieurs séquences. Les cortèges aggradants sont d'autant plus difficiles à interpréter qu'ils peuvent être corrélés de plusieurs façons (comme sur le puits 5, du sommet à 3800 m). Par exemple, un long cortège aggradant en position proximale peut être corrélé à plusieurs séquences en position distale : une transgression qui débute en position distale peut être synchrone avec un empilement de chenaux en position proximale, et de la même façon, ces chenaux peuvent correspondre à la fin d'une régression. Cela pose problème pour situer les limites de séquence, et met en avant le côté diachrone de ces limites (fig. 2.15).

Ces deux problèmes soulèvent l'importance du problème d'interprétation des données, et de la subjectivité de cette étape, sur les résultats et donc de la prise en compte de toutes les incertitudes à cette étape.

Une méthode possible pour gérer les incertitudes d'interprétation des séquences est de définir la probabilité qu'une séquence soit transgressive en tant que paramètre d'entrée de la

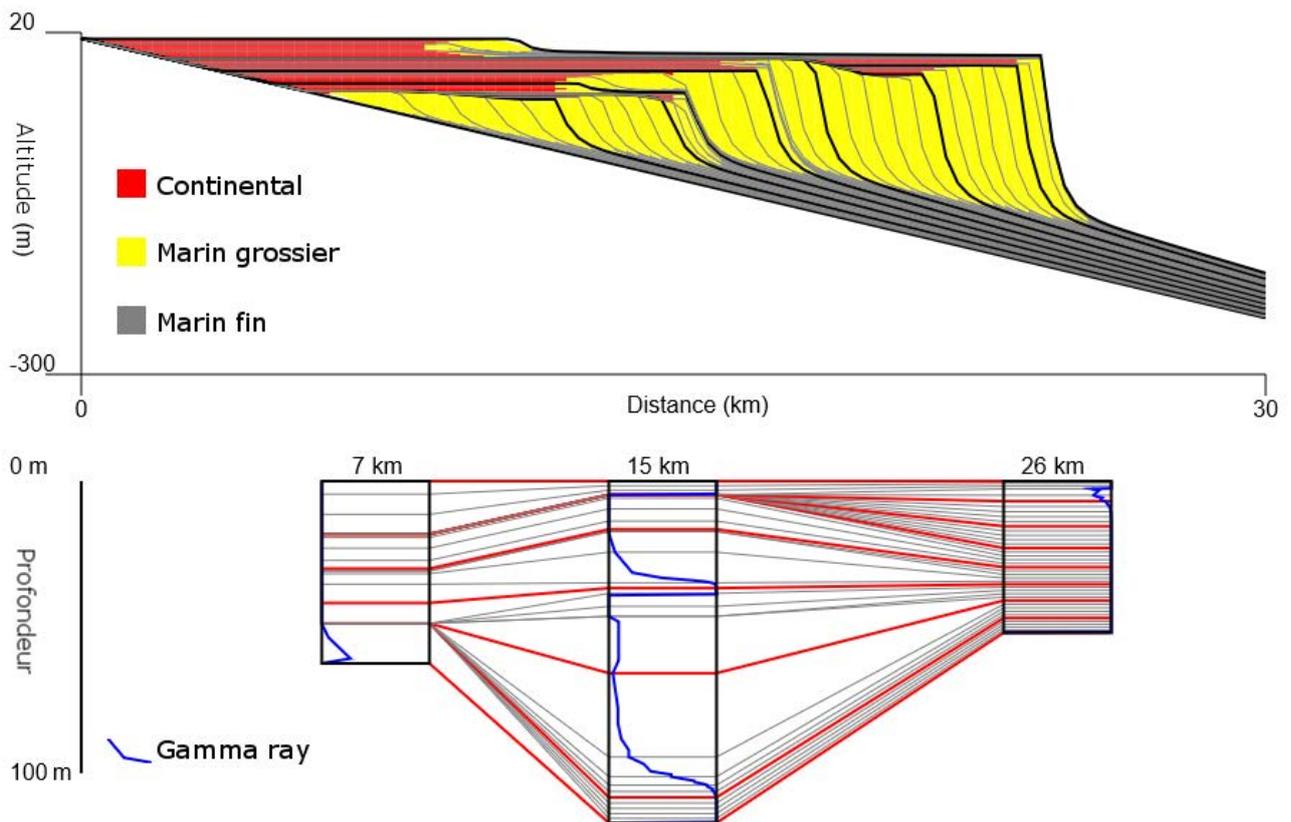


FIGURE 2.16 – Exemple d'aggradations (proximale et distale) générées à l'aide d'un modèle basé processus (*Delta Modelling*, [Waltham et Burgess, 2015]). Haut : section des dépôts sédimentaires. Bas : Corrélation stratigraphique de trois puits dans ces sédiments. Le puits le plus proximal (7 km) présente à son sommet une épaisse aggradation de faciès continentaux. Le puits le plus distal (20 km) montre une aggradation de faciès marins fins. Dans ces deux cas, différencier des séquences stratigraphiques est très difficile.

corrélation stratigraphique (100% : séquence transgressive; 0% : séquence régressive; 50% : séquence indéterminée). Quand la corrélation stratigraphique est calculée, les transgressions et régressions sont tirées stochastiquement. Cela permet de tester différents scénarios en calculant plusieurs corrélations stratigraphiques possibles entre les puits considérés. Une autre méthode pourrait être d'interpréter des séquences progradantes, rétrogradantes et aggradantes, et définir une règle de coût récessive d'association de ces différentes séquences entre elles. De plus, simuler aléatoirement des hiatus érosifs à l'intérieur de séquences stratigraphiques aggradantes pourrait aider à gérer les incertitudes d'interprétation.

Associations *one-to-many*

Du fait de ces deux problèmes (ordre stratigraphique et détection d'unités) une séquence sur un puits peut correspondre à plusieurs séquences sur l'autre puits. Cette corrélation a donc été recalculée en autorisant les associations *one-to-many* (fig. 2.14). Nous avons choisi empiriquement d'autoriser jusqu'à cinq séquences d'être associées à une séquence.

En autorisant les associations *one-to-many*, il y a moins de hiatus le long des puits que sans association *one-to-many*. Ces associations permettent de mieux limiter la variation latérale d'épaisseur des séquences. Les lignes de corrélation 4, 5 et 6 sur la corrélation stratigraphique de référence correspondent aux associations observées sur la corrélation stratigraphique obtenue. En revanche, les lignes de corrélation moins profondes ne sont pas retrouvées. L'informa-

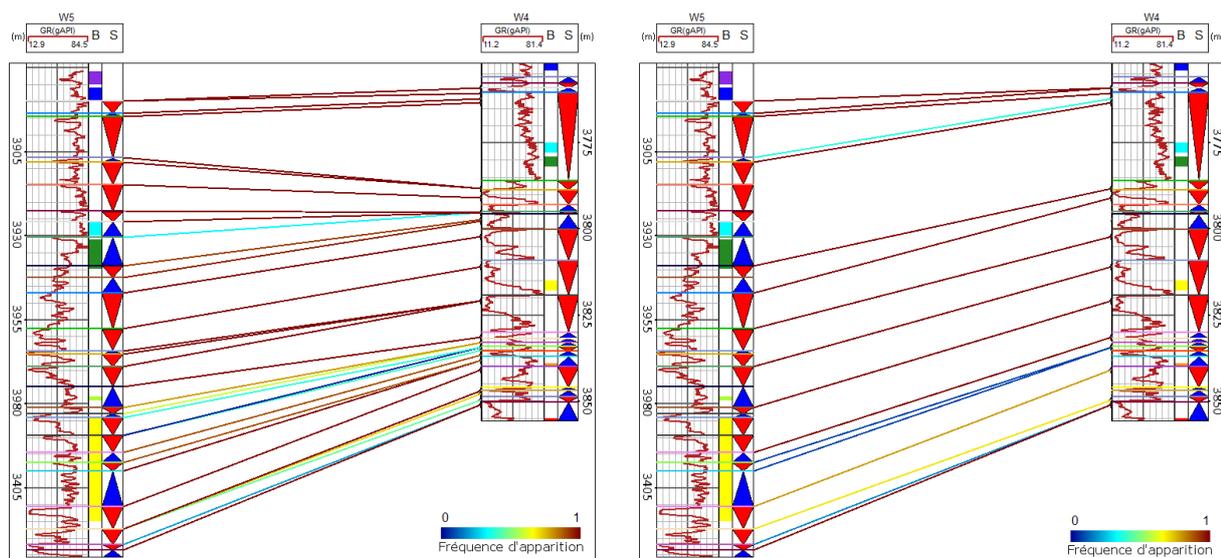


FIGURE 2.17 – Meilleure corrélation stratigraphique des puits 4 et 5 sans contrainte par les informations de biostratigraphie sans association *one-to-many* (gauche) et avec association *one-to-many* (droite). Les règles utilisées sont la corrélation des transgressions et régressions respectivement et la minimisation de la variation latérale d'épaisseur. Jusqu'à cinq séquences d'un puits peuvent être associées à une séquence de l'autre puits pour la corrélation stratigraphique de droite. Les couleurs des associations correspondent à leurs fréquence d'apparition dans les 100 meilleures corrélations stratigraphiques. B : Biostratigraphie ; S : Stratigraphie séquentielle.

tion biostratigraphique est mieux honorée sur la corrélation stratigraphique avec association *one-to-many* que sur la corrélation stratigraphique sans association *one-to-many*. Aucune ligne de corrélation ne croise un horizon de toit de biozone.

Comparée à la corrélation stratigraphique sans association *one-to-many* (fig. 2.13), la corrélation stratigraphique avec association *one-to-many* (fig. 2.14) semble plus incertaine, puisqu'on y trouve moins de lignes de corrélation sûres (en rouge). Cependant, l'analyse est plus complexe car les dimensions combinatoires des deux corrélations sont différentes. En effet, en faisant des associations *one-to-many*, moins d'associations sont nécessaires pour corréler les puits. Sans association *one-to-many*, l'exploration des incertitudes avec les n meilleures corrélations stratigraphiques tend à modifier seulement quelques lignes de corrélation locales. Cela signifie que 100 meilleures corrélations stratigraphiques ne sont pas suffisantes pour explorer les incertitudes. Avec les associations *one-to-many*, il semble que l'espace des incertitudes est mieux exploré, des changements à plus large échelle pouvant apparaître entre une corrélation et la suivante.

Impact de l'information biostratigraphique

Les biozones n'étant pas toujours disponibles, nous avons calculé les deux variantes de la méthode sans contrainte biostratigraphique (fig. 2.17). Malheureusement, seules quelques biozones sont situées dans de la zone d'étude sur les puits. En effet, seules les toits des biozones Z3, Z4 et Z6 contraignent la corrélation. Cependant, on peut voir que ces quelques contraintes modifient fortement les lignes de corrélations par rapport aux corrélations stratigraphiques sans contraintes de biostratigraphie pour la corrélation sans association *one-to-many* et légèrement pour la corrélation avec association *one-to-many*.

En particulier, le toit de la biozone Z6 n'est pas honoré dans les deux cas, mais la meilleure corrélation avec association *one-to-many* honore directement les toits des biozones Z3 et Z4. Nous pouvons aussi noter l'impact des données de biostratigraphie sur la distribution de la variabilité dans les lots de réalisations. Cela met en valeur cet impact non seulement local sur

la meilleure corrélation stratigraphique, mais aussi global sur le lot de réalisations des données biostratigraphiques.

Cette étude montre l'importance de l'information qu'apportent les données, et du choix des règles de corrélation utilisées. L'algorithme peut toujours calculer la meilleure corrélation stratigraphique des puits selon les règles choisies. Mais si les règles ne correspondent pas aux données disponibles, ou si elles ne sont pas suffisantes, le résultat de la corrélation stratigraphique peut être très différent de la réalité.

2.5 Conclusions

Ainsi de simples règles logiques et géométriques peuvent donner des résultats cohérents pour des données et des environnements peu complexes. Il faut toutefois allonger cette liste de règles pour prendre en compte plus de facteurs et de milieux de dépôts. Par exemple, Lineman *et al.* [1987] listent de nombreuses règles, triées en règles lithologiques, règles structurales et règles de distance. Sélectionner les règles à appliquer et calibrer ces règles les unes par rapport aux autres est un sujet important à considérer dans de futures études.

Les règles présentées ici sont simples et sont adaptées à des milieux sans mouvements tectoniques majeurs. Ce sujet, et la corrélation de puits en domaine plissé ou faillé notamment, est discuté dans la conclusion de ce manuscrit.

Nous avons vu que les corrélations stratigraphiques dépendent beaucoup de l'interprétation des données, et que cette étape peut se révéler difficile. Différents scénarios pouvant expliquer les données observées, il peut être préférable de ne pas sélectionner une seule interprétation, mais tester toutes les interprétations possibles, pour prendre en compte le maximum d'incertitudes dans l'étude.

Chapitre 3

Corrélation stratigraphique de puits à l'aide d'un modèle analogue

Sommaire

3.1	Données d'entrée	54
3.1.1	Puits	54
3.1.2	Géomodèle 3D	54
	Modélisation stratigraphique par simulation de processus	54
3.1.3	Propriétés	55
3.2	Évaluation de la cohérence d'une unité stratigraphique à partir d'un modèle d'entraînement	57
3.2.1	Calcul du coût d'une association de marqueurs	57
	Coût d'une association d'unités	57
	Coût d'un hiatus	59
3.2.2	Conformité	60
	Intégration de la conformité dans l'algorithme DTW	60
	Obtention de la conformité	60
3.2.3	Stochasticité	61
3.3	Conclusion	61

Nous avons vu que plusieurs méthodes automatiques (section 1.5), et notamment l'algorithme de déformation temporelle (section 1.6), se basent sur des règles de corrélation. Le chapitre 2 nous a permis de voir que traduire la stratigraphie séquentielle en règles mathématiques permettant de générer des coûts d'associations d'unités nécessite de prendre en compte de nombreux paramètres indépendamment les uns des autres et donc lister de nombreuses règles. En effet, les règles contrôlant la stratigraphie séquentielle étant multi-échelles et multi-dimensionnelles, il est difficile d'en faire une liste exhaustive et cohérente.

Le but de ces règles est de contraindre suffisamment la corrélation pour obtenir des unités géologiquement plausibles. Dans ce chapitre, nous abordons le problème avec une autre approche. Pour vérifier la vraisemblance des unités, il est possible de comparer les associations de la corrélation avec d'autres modèles dont la cohérence géologique est vérifiée. Si les processus sédimentaires permettent de générer une association donnée alors son existence dans la corrélation considérée est possible.

Nous allons utiliser un modèle analogue, ici un modèle construit par méthode basée processus, pour évaluer la probabilité d'existence d'une unité.

3.1 Données d'entrée

Cette méthode nécessite des puits à corrélérer et un modèle, appelé modèle d'entraînement, pour y mesurer la probabilité d'association des unités stratigraphiques identifiées sur les puits.

3.1.1 Puits

Les données à corrélérer sont des puits de forage de la zone d'étude. Ils portent des marqueurs stratigraphiques, des repères de positions des différents horizons traversés. Les horizons correspondent aux surfaces limites de séquence selon le paradigme de stratigraphie séquentielle. Deux marqueurs consécutifs délimitent donc une séquence stratigraphique.

Les positions relatives des puits à corrélérer et de ceux déjà corrélés forment un motif, appelé *data event* dans les méthodes MPS (fig. 3.1A, e.g. [Strebelle, 2002, Mariethoz *et al.*, 2010]).

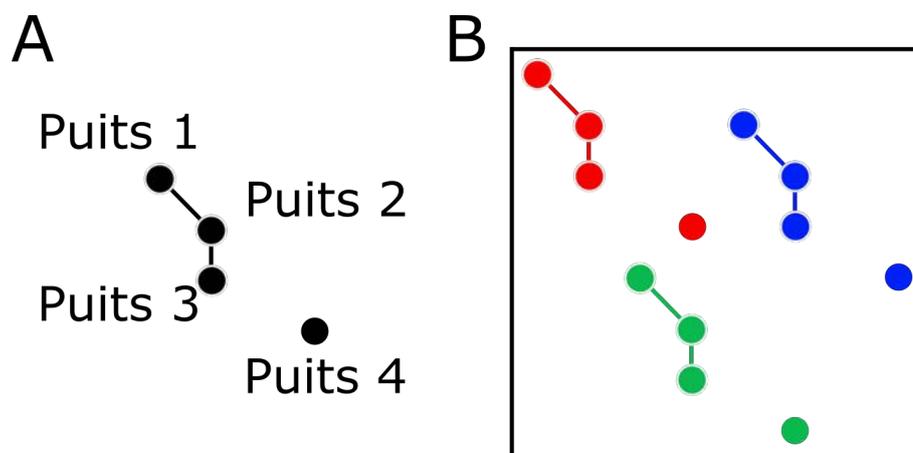


FIGURE 3.1 – Motif (*Data event*) et parcours du géomodèle pour évaluer la vraisemblance d'une unité. A) Vue de dessus du motif formé par les trois puits corrélés (1, 2 et 3) et le puits à corrélérer (4). B) Vue de dessus du modèle d'entraînement (carré noir), et trois positions de comparaison des puits avec le modèle d'entraînement. La propriété des unités sur les puits est comparée avec celle trouvée dans le modèle d'entraînement, à leurs positions respectives. Plus les valeurs de la propriété dans le modèle sont similaires à celles observées sur les puits, plus l'association est plausible.

3.1.2 Géomodèle 3D

Le but de cette méthode est de parcourir le géomodèle utilisé comme modèle d'entraînement à l'aide du motif formé par les puits pour évaluer la vraisemblance des corrélations stratigraphiques (fig. 3.1B). Il doit être analogue aux données de puits. Cela signifie qu'il doit correspondre au même environnement de dépôt pour présenter des unités comparables à celles qui se trouvent dans la zone étudiée. Il doit être d'une extension plus grande que les données de puits pour avoir une grande diversité de positions du motif à échantillonner. Il doit être orienté de la même façon que les données de puits (pôle proximal - pôle distal).

Il peut provenir d'une autre région similaire à la zone d'étude, dont l'architecture stratigraphique est connue. Il peut également être construit par méthode basée processus, et nous détaillons cet exemple dans ce manuscrit.

Modélisation stratigraphique par simulation de processus

Ces méthodes permettent de générer une stratigraphie à partir d'une surface topographique initiale et de paramètres tels que l'apport en sédiment et la courbe de variations eustatiques. Elles sont utilisées en modélisation de bassins et de réservoirs comme une source d'information.

En effet, elles permettent de générer des modèles d'une qualité généralement inégalable avec les méthodes géostatistiques et d'interpolation géométrique traditionnelles, en implémentant la physique de transport, dépôt et érosion des sédiments [Tetzlaff et Harbaugh, 1989, Lawrence *et al.*, 1990, Kendall *et al.*, 1991, Burgess, 2012]. Différents modèles numériques ont été créés pour simuler les processus de dépôt des sédiments (voir par exemple Granjeon [1997], Caumon [2003] pour des revues de différents modèles basés processus).

Les modèles utilisés dans cette thèse sont construits à l'aide du logiciel Dionisos [Granjeon, 1997], développé à l'origine par l'IFP (Institut Français du Pétrole) puis maintenu par le Beicip. Les géométries des sédiments sont calculées à chaque pas de temps, à partir d'une paléotopographie initiale, de cartes de subsidence et surrection, et de courbes de variations du niveau marin. L'apport de sédiments clastiques est défini à des moments précis au niveau de sources situées sur les bords du modèle. Différents processus physiques régissent le transport et le dépôt des sédiments : la diffusion par l'eau (selon le flux d'eau et la pente), la diffusion gravitaire (selon la pente) et la rupture de pente (traduisant des coulées, ou turbidites). Les équations de ces processus sont définies pour chaque classe de sédiment, et chaque environnement. Ces équations traduisant de manière déterministe la moyenne de nombreux facteurs individuels dans le temps, elles s'appliquent à des modèles à large échelle et sur des grands pas de temps [Burgess *et al.*, 2006]. La sédimentation et l'érosion sont déduites des variations de transport des sédiments et du niveau marin relatif, et la compaction est simulée à l'aide de courbes porosité-profondeur [Gvirtzman *et al.*, 2014, Falivene *et al.*, 2014].

Plusieurs auteurs proposent d'utiliser des méthodes inverses (fig. 3.2) pour honorer des données avec des modèles basés processus [Cross et Lessenger, 1999, Charvin *et al.*, 2009, Falivene *et al.*, 2014, Sacchi *et al.*, 2015]. Cela signifie ajuster automatiquement les paramètres d'entrée des méthodes basées processus pour faire coïncider le modèle généré avec les observations [Cross et Lessenger, 1999]. Bien que ces tentatives soient prometteuses, elles demandent beaucoup de calcul, et peuvent ne pas bien honorer des lots denses de données, comme par exemple des données sismiques ou des données de campagnes de forages intensives.

Ainsi, d'autres travaux intègrent indirectement l'information des modèles directs dans la modélisation. Par exemple, Sacchi *et al.* [2016] utilisent de tels modèles comme contrainte pour la simulation géostatistique dans des réservoirs. Une des principales méthodologies utilise les modèles directs pour générer des images d'entraînement pour des algorithmes de simulation de statistique multi-points (MPS, pour *Multiple-Points Statistics* [Guardiano et Srivastava, 1993]), voir Harris *et al.* [2011] par exemple.

En suivant la même philosophie, nous présentons une règle de corrélation des données de puits inspirée de la méthode d'échantillonnage direct (*Direct Sampling*, [Mariethoz *et al.*, 2010, Mariethoz et Renard, 2010]) pour évaluer la probabilité d'existence des unités.

3.1.3 Propriétés

Au moins une propriété doit être présente sur les puits et dans le modèle basé processus pour permettre de comparer les unités stratigraphiques sur les puits et dans le modèle. Une propriété est une mesure, une valeur attribuée en différents points d'un objet considéré. Elle peut être discrète (e.g. faciès) ou continue (e.g. porosité, gamma ray).

Il faut également une propriété stratigraphique, discrète, délimitant les différentes unités stratigraphiques le long des puits et dans le modèle. Les sédiments étant déposés à chaque pas de temps, il est possible de repérer des isochrons, des surfaces qui marquent un instant donné. Grâce à ces surfaces, des séquences stratigraphiques peuvent être déterminées (faisant l'hypothèse que les limites de séquences sont isochrones, voir Catuneanu *et al.* [1998]). Ces séquences dépendent du modèle de stratigraphie séquentielle utilisé. Ici, nous considérons le modèle d'Embry ([Embry, 2002], voir section 1.1.2).

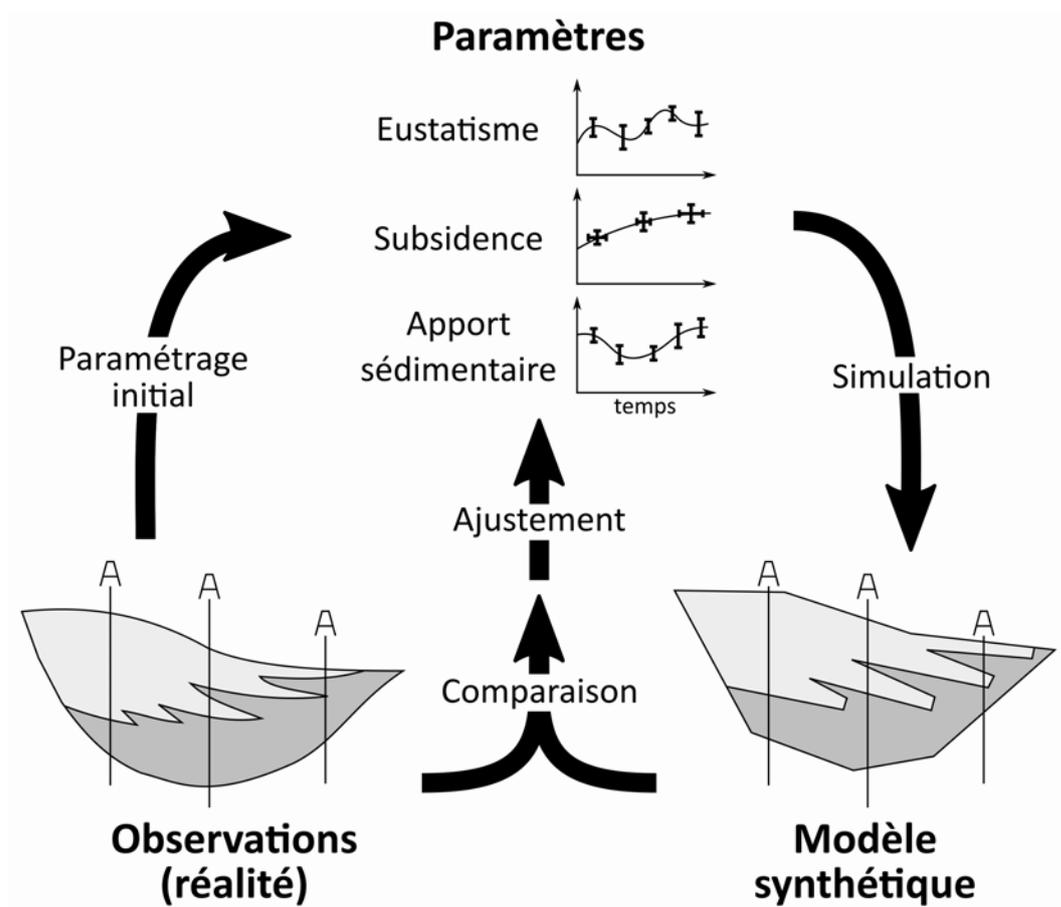


FIGURE 3.2 – Principe de la méthode inverse de modélisation (modifié d'après Cross et Lessenger [1999]). Les paramètres initiaux sont déduits des observations. Un premier modèle synthétique est généré puis comparé aux données d'observation. Les paramètres sont ensuite ajustés en fonction des résultats de la comparaison. Un nouveau modèle synthétique peut être généré. La boucle s'arrête quand les différences entre le modèle synthétique et les données d'observation sont suffisamment faibles.

3.2 Évaluation de la cohérence d'une unité stratigraphique à partir d'un modèle d'entraînement

3.2.1 Calcul du coût d'une association de marqueurs

Comme pour la méthode d'échantillonnage direct, le parcours du modèle d'entraînement nécessite un certain nombre de balayages, qui correspond au nombre de comparaisons du motif avec le modèle d'entraînement pour chaque association de marqueurs stratigraphiques. À chaque balayage un coût est calculé, selon la comparaison effectuée. Le plus faible coût de balayage sera attribué à l'association considérée et sa conformité dans le modèle donne celle de l'unité formée par l'association.

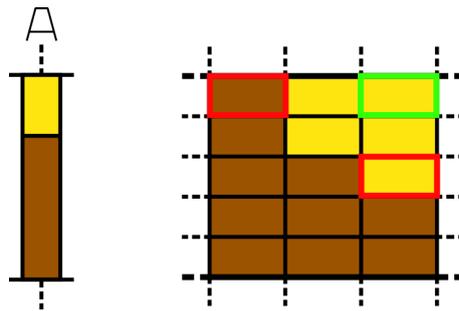


FIGURE 3.3 – Sélection d'une cellule dans le modèle d'entraînement correspondant au sommet de l'unité présente sur le puits à corrélérer. Elle doit se trouver au sommet d'une unité du modèle d'entraînement et présenter la même valeur de propriété que le sommet de l'unité présente sur le puits à corrélérer. Gauche : L'unité considérée sur le puits qui est testé, présentant une variation verticale de faciès. Droite : Section d'une unité dans le modèle d'entraînement. Les deux encadrés rouges montrent deux cellules qui ne peuvent être sélectionnées comme première cellule de l'algorithme, car celle sur la droite n'est pas au sommet d'une unité, et celle sur la gauche présente un faciès différent de celui au sommet de l'unité du puits. L'encadré vert montre une cellule qui valide ces critères et correspond comme première cellule. Une fois que la cellule est trouvée, l'ensemble de la hauteur de l'unité sera comparée sur le puits et dans le modèle, puis la comparaison de la même unité sera faite pour chaque autre puits corrélé, à leurs positions respectives dans le modèle d'entraînement.

L'algorithme procède comme suit, pour chaque calcul de coût. Pour chaque balayage dans le modèle d'entraînement, une cellule au sommet de l'unité est choisie aléatoirement dans le modèle. Si la propriété considérée est discrète, la cellule doit présenter la même valeur de propriété que le sommet de l'unité présente sur le puits ajouté à la corrélation (fig. 3.3). Cela permet d'être sûr de comparer des associations comparables, qui ne sont pas entièrement différentes. À noter que la première cellule est trouvée en utilisant une graine, un nombre donné en entrée de l'algorithme, qui est utilisé pour générer une suite de nombres aléatoires. La même graine générant les mêmes nombres, cela permet de s'assurer d'avoir une méthode stochastique mais reproductible. L'association de deux marqueurs sur les deux puits peut conduire soit à l'association de deux unités, soit à la formation d'un hiatus.

Coût d'une association d'unités

Quand une association d'unités est testée (fig. 3.4, C), une unité des puits déjà corrélés (en rouge sur la fig. 3.4) est associée à une unité du puits corrélé (en bleu sur la fig. 3.4). Les valeurs de la propriété sur les unités présentes sur les puits sont comparées aux valeurs de cette même propriété à leurs positions respectives dans le modèle d'entraînement (fig. 3.4, E)

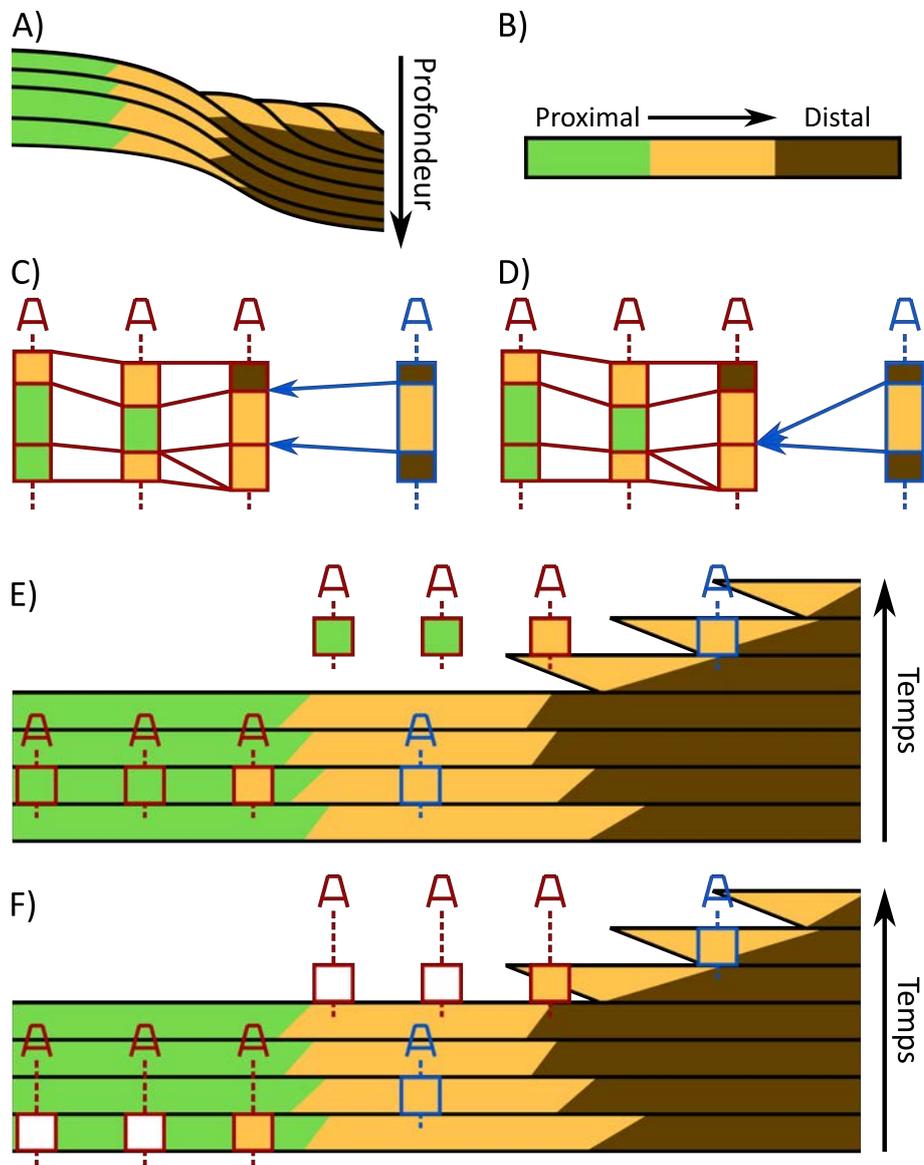


FIGURE 3.4 – Calcul du coût d'une association et d'un hiatus, en considérant les faciès. A) Section dans le modèle d'entraînement. B) Classification des faciès. C) L'association à tester. D) Le hiatus à tester. E) et F) Deux balayages pour calculer le coût d'une association et d'un hiatus respectivement, dans le modèle d'entraînement représenté selon un diagramme de Wheeler [Wheeler, 1958].

pour donner le coût de l'association, suivant :

$$c_{association}(u_i^w, u_j^{1:K}) = p(u_i^w) + \sum_{k=1}^K p(u_j^k), \quad (3.1)$$

avec u_i l'unité sur le puits ajouté w , u_j l'unité sur les K puits déjà corrélés, et p un coût de dissimilarité entre les valeurs de la propriété sur un puits et dans le modèle d'entraînement. Ce coût dépend de deux choses : si l'unité présente une variation verticale de la propriété considérée et si la propriété est discrète ou continue. Sans variation verticale d'une propriété discrète, le coût vaut 1 si les valeurs sont différentes sur le puits et dans le modèle d'entraînement, 0 sinon. Si la propriété est continue, elle est normalisée, et le coût suit :

$$p(u_i) = |valeur(u_i) - valeur(u_i')|, \quad (3.2)$$

avec u_i' l'unité dans le modèle à la position relative de l'unité u_i du puits.

Dans le cas d'une variation verticale de la propriété, la première étape est de convertir cette propriété sur les puits et dans le modèle d'entraînement en chaînes de caractères pour faciliter leur comparaison. Pour une propriété discrète, un caractère est attribué par valeur que peut prendre la propriété. Pour une propriété continue, nous utilisons la méthode décrite par Fang *et al.* [1992], Lallier *et al.* [2012], par comparaison de forme de log. Un caractère est donné pour un intervalle de valeurs de la dérivée de la fonction représentant la propriété le long de l'unité stratigraphique. Les deux chaînes de caractères, correspondant aux unités stratigraphiques sur le puits et dans le modèle, sont ensuite corrélées à l'aide de l'algorithme de déformation temporelle (section 1.6). Une règle simple est utilisée : pour une association, le coût vaut 1 si les caractères sont différents, et 0 sinon. Le coût vaut 0,6 pour un hiatus (pour que deux hiatus coûtent plus qu'une association de caractères différents). En sortie de cet algorithme nous récupérons la dissimilarité entre les unités du puits et du modèle.

Coût d'un hiatus

Le test d'un hiatus (fig. 3.4D) correspond à une unité u_i sur un puits qui n'est pas observée sur l'autre, et qui est corrélée à un hiatus h_j . Le coût suit :

$$c_{hiatus}(u_i^w, h_j^{1:K}) = p(u_i^w) + \sum_{k=1}^K \{\alpha * t(h_j^k) + \beta * p(u_{j+1}^k)\}. \quad (3.3)$$

La propriété sur l'unité u_i^w est comparée comme pour une association (fig. 3.4F). La propriété ne peut pas être comparée au niveau du hiatus. Donc, pour vérifier la validité de l'existence d'un hiatus à cet endroit, la valeur de la propriété de l'unité u_{j+1}^w située sous le hiatus est comparée. De plus, la variation latérale d'épaisseur de l'unité $t(h_j^k)$ est calculée dans le modèle d'entraînement, entre les positions respectives du puits ajouté w et des K puits déjà corrélés, suivant :

$$t(h_j^k) = |épaisseur(u_i^w') - épaisseur(u_j^k')|, \quad (3.4)$$

avec u_i^w' , respectivement u_j^k' , l'unité dans le modèle à la position relative de l'unité u_i du puits w , respectivement u_j du puits k .

Les facteurs α et β dans l'équation (3.3) sont des poids relatifs qui équilibrent l'influence du hiatus et l'influence de la propriété de l'unité située sous le hiatus. Ces poids sont arbitraires et doivent être définis tels que $\alpha + \beta = 1$, pour avoir un coût comparable à celui d'une association d'unités.

Si le hiatus est situé en bas d'un puits, ou qu'il est testé en bas du modèle d'entraînement, la propriété ne pourra pas être comparée sous le hiatus. Dans ce cas, α vaut 1 et β vaut 0.

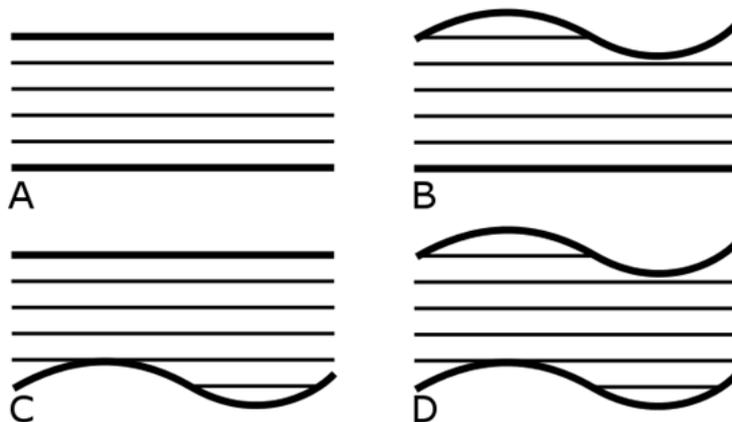


FIGURE 3.5 – Les différents cas de conformité pour une séquence stratigraphique. A : Mur et toit conformes - B : Toit érodé et mur conforme - C : Toit conforme et mur en baselap - D : Toit érodé et mur en baselap.

3.2.2 Conformité

Les précédents travaux de corrélation stratigraphique automatique vus dans la section 1.5 ne prennent pas en compte la conformité des différentes unités. La conformité donne la géométrie des contacts entre les unités et la façon dont se sont déposés les sédiments dans l'unité (le *layering* interne). Cette donnée peut ensuite être stockée dans une Colonne Stratigraphique (chapitre 4), qui permet ensuite de construire des grilles stratigraphiques. De telles grilles présentent des surfaces qui suivent les horizons et le *layering* des unités. C'est un donc un élément important pour comprendre et prédire les architectures stratigraphiques entre les données d'observation, construire des modèles géologiques, et modéliser des réservoirs [Miall, 1988].

Allen [1963] présente une revue des différentes géométries observables dans une unité en discordance, et discute leurs origines respectives. Christie-Blick [1991] s'intéresse aux causes des surfaces de discordance dans le cadre de la stratigraphie séquentielle. Quatre cas géométriques ont été tirés de ces différents travaux : mur et toit conformes, mur conforme et toit érodé, mur en baselap et toit conforme, et mur en baselap et toit érodé (fig. 3.5).

La méthode décrite ici permet de prendre en compte l'information de conformité des unités.

Intégration de la conformité dans l'algorithme DTW

L'algorithme DTW a donc été modifié pour prendre en compte les différents cas de conformité des unités et son équation devient donc :

$$C_{(i,j)} = c_{(i,j)} + \min \left\{ t_{i,i-n}^{j,j-m} + C_{(i-n,j-m)} + \min \begin{Bmatrix} a & b \\ c & d \end{Bmatrix} \right\}. \quad (3.5)$$

Dans cette équation, les lettres a, b, c, d représentent les quatre types de conformité.

Obtention de la conformité

Lors du parcours d'une unité pour comparer la propriété considérée sur les puits et dans le modèle d'entraînement, l'information de conformité est récupérée. Pour ce faire, les cellules sont parcourues sur toute l'épaisseur de l'unité. Si aucune cellule morte (à volume nul) n'est rencontrée, la conformité est "*conforme*". La conformité est "*érodée*" si des cellules mortes sont trouvées au sommet, et "*baselap*" si les cellules mortes sont trouvées à la base. Si le sommet et la base présentent des cellules mortes, la conformité est "*érodée et baselap*".

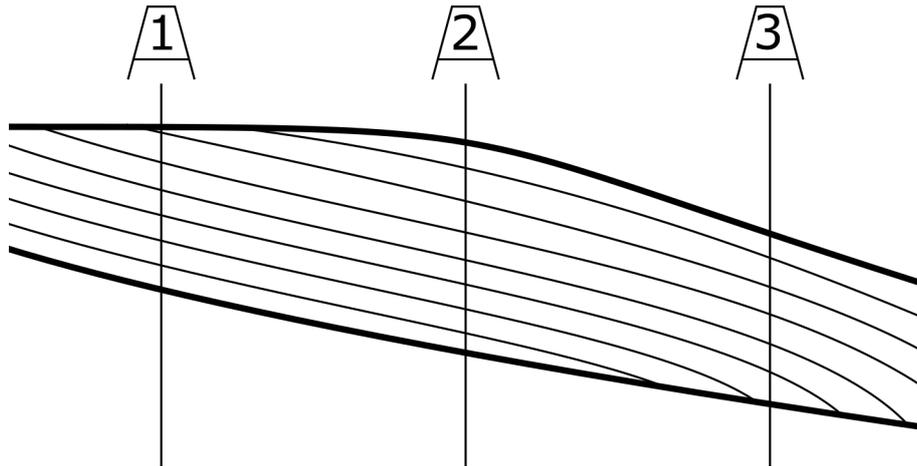


FIGURE 3.6 – Plusieurs conformités dans la même unité stratigraphique Les lignes épaisses sont les limites de l’unité. Les lignes fines montrent les dépôts internes. Le puits 1 présente une unité érodée, le puits 2 une unité conforme, et le puits 3 une unité en baselap.

Quand plusieurs puits sont corrélés, l’unité est comparée avec une unité du modèle d’entraînement pour les positions respectives de chaque puits. Différentes conformités peuvent donc être rencontrées pour la même unité pendant un balayage (fig. 3.6). Une limite de la méthode actuelle, due à la technique de construction des grilles stratigraphiques (“*3D Reservoir Grid Building Workflow*”, dans le logiciel SKUA-Gocad, développé par Paradigm, voir Mallet [2002]), est d’imposer de n’avoir qu’une conformité pour une unité. C’est une limite car si une unité présente des conformités différentes en différents points, cela aura un impact sur la construction de la grille et donc sur les conséquences qui peuvent en découler (simulations d’écoulements, par exemple). Les conformités rencontrées pour chaque puits sont donc dans ce cas présent ajoutées les unes aux autres selon les règles suivantes :

- Unité conforme + unité érodée = unité érodée
- Unité conforme + unité en baselap = unité en baselap
- Unité conforme + unité érodée et en baselap = unité érodée et en baselap
- Unité érodée + unité en baselap = unité érodée et en baselap

3.2.3 Stochasticité

Comme nous ne testons pas toutes les positions possibles du motif dans le modèle d’entraînement, une stochasticité est induite. Ainsi, en faisant plusieurs réalisations d’une corrélation et en faisant varier la graine utilisée pour récupérer la première position dans le modèle d’entraînement, il est possible d’obtenir différentes associations des puits. En comparant ces réalisations, des conclusions peuvent être tirées sur les différents scénarios géologiques possibles ou sur les zones des corrélations qui semblent les plus incertaines.

Il est aussi possible de faire varier l’ordre de corrélation des puits. Une autre option pour ajouter de la stochasticité dans la méthode en appliquant une version stochastique de l’algorithme DTW (section 1.6).

3.3 Conclusion

Nous avons décrit dans ce chapitre une règle de coût d’association de marqueurs stratigraphiques synthétisant les concepts de stratigraphie séquentielle. Un modèle d’entraînement construit à partir de modélisation directe permet de mesurer la probabilité d’association de ces marqueurs. Elle sera appliquée dans le chapitre 5.

Chapitre 4

Gestion des incertitudes dans la corrélation stratigraphique multi-puits : Corrélation de colonne stratigraphique

Sommaire

4.1	Rappel du problème	63
4.2	Colonne Stratigraphique	64
4.3	Ajouter des puits à la Colonne Stratigraphique Globale	64
4.4	Mise à jour de la Colonne Stratigraphique Globale	66
4.4.1	Association d'unités	66
4.4.2	Hiatus	66
4.4.3	Mise à jour de la conformité	66
4.5	Ordre de corrélation des puits	66
4.5.1	Choix de l'ordre de corrélation des puits	66
4.5.2	Impact de l'ordre de corrélation des puits	66
4.6	Conclusion	67

Dans ce chapitre nous introduisons une structure de donnée, la Colonne Stratigraphique. Elle permet de gérer les corrélations stratigraphiques multi-puits et de contenir les informations nécessaires pour construire des géomodèles.

4.1 Rappel du problème

Comme vu dans le chapitre 2, corréler des sets de puits simultanément avec une méthode automatique demande beaucoup de ressources informatiques. C'est pourquoi nous considérons la corrélation stratigraphique de puits séquentiellement.

Cependant, contrairement à la corrélation stratigraphique simultanée, la corrélation stratigraphique séquentielle de paires de puits ne prend pas en compte l'ensemble des données lors de la corrélation des premiers puits. Des erreurs mineures pendant les premières étapes de la corrélation stratigraphique peuvent se répercuter sur les dernières et avoir un gros impact sur le résultat. Pour résoudre les ambiguïtés, nous allons considérer la corrélation stratigraphique de puits comme un problème de construction de la Colonne Stratigraphique (fig. 4.1).

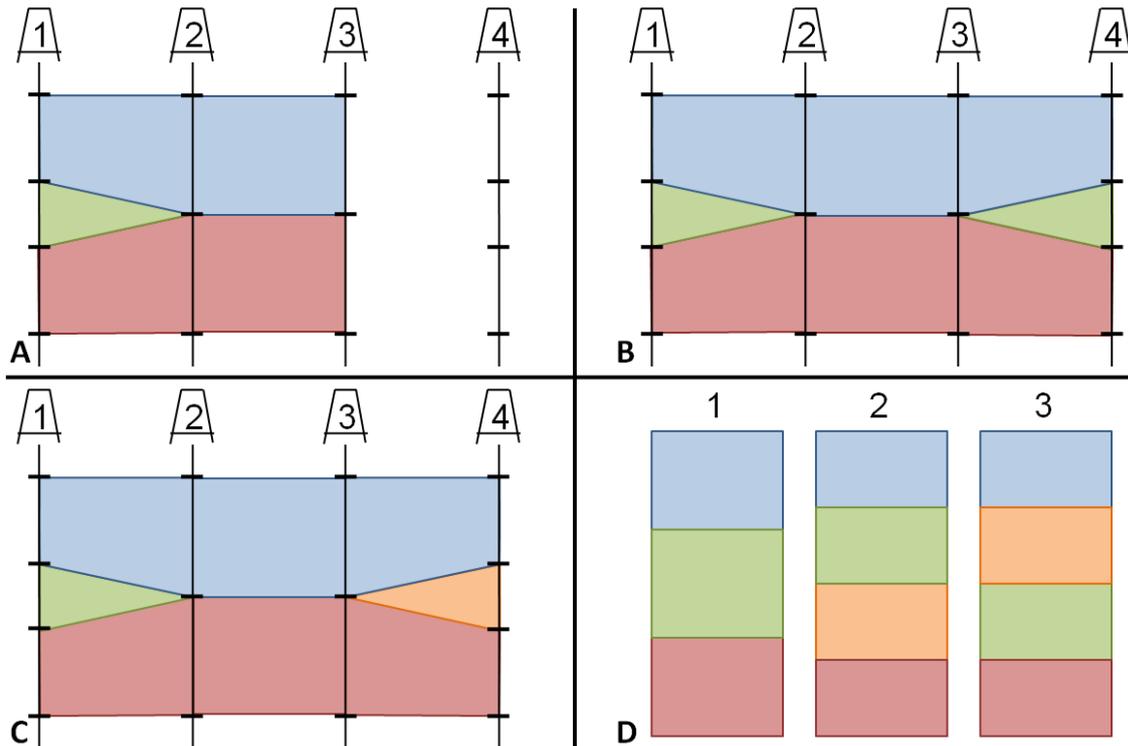


FIGURE 4.1 – Ambiguïtés lors d’une corrélation stratigraphique itérative. A - Les puits 1, 2 et 3 sont corrélés et le puits 4 va leur être corrélé. B et C - Résultats possibles. D - Trois Colonnes Stratigraphiques possibles correspondant aux corrélations B (1) et C (2 et 3).

4.2 Colonne Stratigraphique

Une Colonne Stratigraphique contient les informations géométriques d’un enregistrement sédimentaire. Elle est composée d’unités stratigraphiques, définies par les marqueurs stratigraphiques de leurs horizons murs et toits respectifs, ainsi que leur conformité.

Les puits sont traduits en Colonnes Stratigraphiques Locales (CSL), chacun correspondant à l’enregistrement sédimentaire en un point précis. La corrélation stratigraphique d’un lot de CSL donne une Colonne Stratigraphique Globale (CSG) correspondant à l’enregistrement sédimentaire dans la région couverte par les puits pris en compte.

4.3 Ajouter des puits à la Colonne Stratigraphique Globale

Comme Lallier *et al.* [2016], les puits sont ajoutés itérativement pendant la corrélation stratigraphique. À chaque étape, la région couverte par les puits corrélés à l’étape précédente et le puits ajouté pendant l’étape en cours est prise en compte. Ainsi les cas vus dans la figure 4.1 peuvent être différenciés, et les erreurs qui peuvent apparaître pendant les corrélations stratigraphiques par paires de puits peuvent être évitées [Wheeler, 2015, Lallier *et al.*, 2016]. Après chaque corrélation stratigraphique d’une CSL avec la CSG précédente, la CSG est mise à jour pour ajouter les informations de cette dernière corrélation (fig. 4.2A-C). Cela crée une nouvelle CSG à chaque itération. Quand tous les puits sont corrélés, la CSG correspond à l’ensemble de la région d’étude (fig. 4.2).

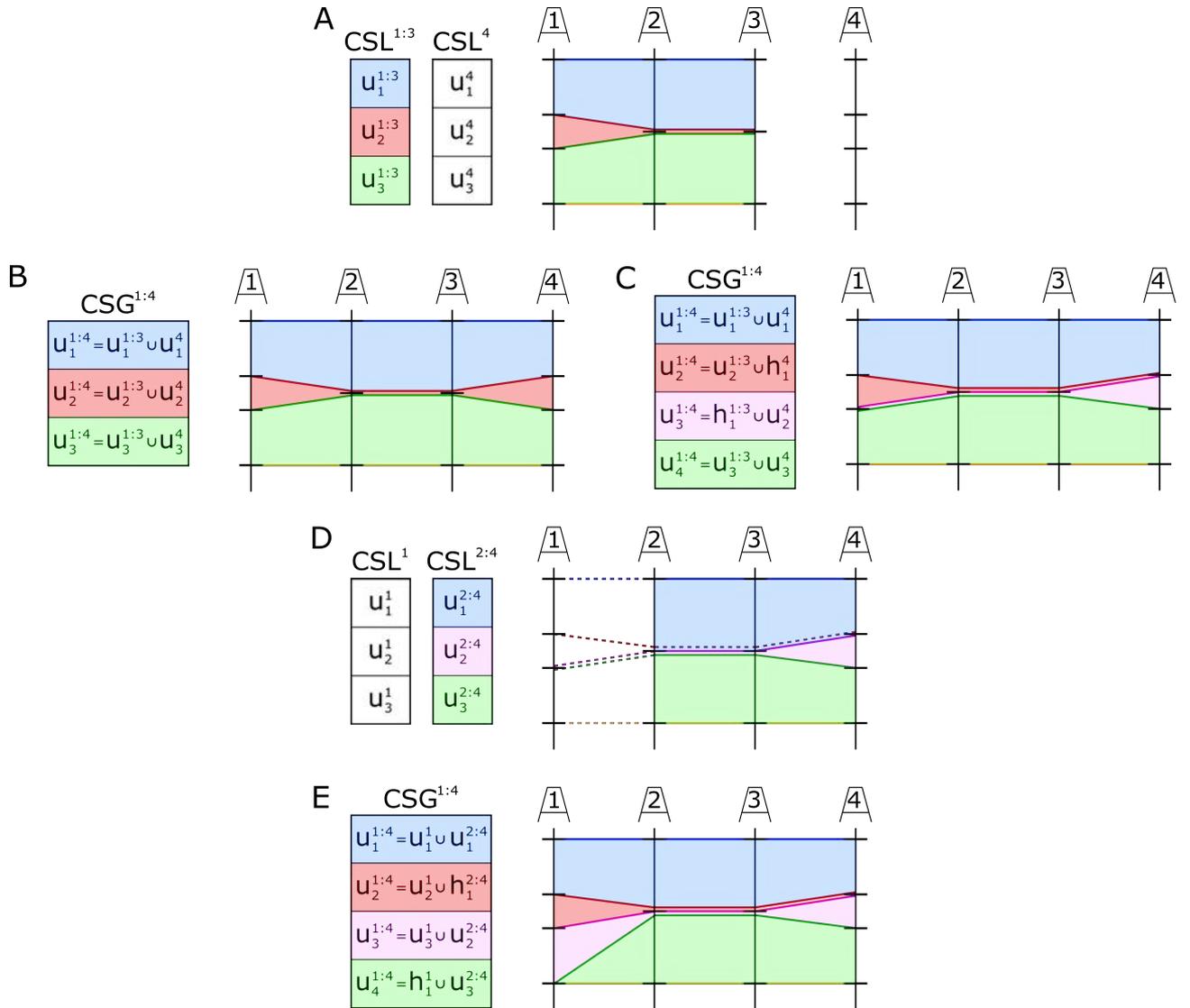


FIGURE 4.2 – Corrélation stratigraphique de Colonnes Stratigraphiques. A) Trois puits sont corrélés (1, 2, 3) et un autre (4) va leur être corrélé. Sa Colonne Stratigraphique est composée de trois unités $[u_1^4, u_2^4, u_3^4]$ tandis que la Colonne Stratigraphique des trois premiers puits est faite des unités $[u_1^{1:3}, u_2^{1:3}, u_3^{1:3}]$. B) et C) Deux résultats possibles, avec la même corrélation stratigraphique (association, *pinch out*, association) mais deux Colonnes Stratigraphiques différentes : $[u_1^{1:4} = u_1^{1:3} \cup u_1^4, u_2^{1:4} = u_2^{1:3} \cup u_2^4, u_3^{1:4} = u_3^{1:3} \cup u_3^4]$ pour B) et $[u_1^{1:4} = u_1^{1:3} \cup u_1^4, u_2^{1:4} = u_2^{1:3} \cup h_1^4, u_3^{1:4} = h_1^{1:3} \cup u_2^4, u_4^{1:4} = u_3^{1:3} \cup u_3^4]$ pour C). D) La corrélation stratigraphique obtenue en C) est détruite entre les puits 1 et 2 pour être reconstruite en prenant en compte les corrélations entre les puits 2 et 4. Les Colonnes Stratigraphiques sont mises à jour : $[u_1^1, u_2^1, u_3^1]$ pour le puits 1, et $[u_1^{2:4}, u_2^{2:4}, u_3^{2:4}]$ pour les autres puits, car $u_3^{1:4}$ n'est pas observée sur le puits 1 et $u_2^{1:4}$ n'est pas observée sur les autres puits. E) Reconstruction possible de la corrélation stratigraphique entre les puits 1 et 2.

4.4 Mise à jour de la Colonne Stratigraphique Globale

En ajoutant une CSL à une CSG, plusieurs cas peuvent se produire. La figure 4.2A-C présente la corrélation stratigraphique de puits portant des unités u , bornées par deux marqueurs stratigraphiques. Ces unités ont un exposant correspondant à leur Colonne Stratigraphique, donnée par le numéro de leur puits respectif. Elles portent également chacune un indice qui montre leurs places dans la Colonne Stratigraphique correspondante.

4.4.1 Association d'unités

Dans le cas de l'association de deux unités, comme $u_3^{1:3}$ associée avec u_3^4 sur la figure 4.2B-C, une unité formée de leur union ($u_3^{1:4}$) est ajoutée à la CSG, correspondant aux puits 1 à 4 dans ce cas.

4.4.2 Hiatus

Dans le cas d'un hiatus, une unité d'une Colonne Stratigraphique n'est pas observée sur l'autre, comme u_2^4 sur la figure 4.2C. Une unité d'épaisseur nulle est ajoutée aux puits correspondant à la Colonne Stratigraphique ne présentant pas cette unité, en ajoutant un marqueur stratigraphique de toit à la même profondeur que le marqueur stratigraphique de mur. Cela permet d'avoir le même nombre d'unités et de marqueurs stratigraphiques sur tous les puits, et donc toute l'information stratigraphique (nombre et géométrie des unités) sur l'ensemble de la région d'étude. Cette nouvelle unité est ajoutée à la CSG.

Par exemple, en corrélant le puits 4 aux puits 1, 2 et 3, l'unité u_2^4 est comparée aux unités de la GSC^{1:3}. Selon les coûts de la corrélation globale, la méthode pourra associer l'unité u_2^4 avec l'unité $u_2^{1:3}$ (figure 4.2B) ou l'insérer en un hiatus $h_1^{1:3}$ (figure 4.2C). Il est important de comprendre que bien que u_2^4 présente un *pinch out* entre les puits 3 and 4 sur la figure 4.2B, ce n'est pas un hiatus entre les deux Colonnes Stratigraphiques, l'unité u_2^4 étant associée à l'unité $u_2^{1:3}$.

4.4.3 Mise à jour de la conformité

Pendant la mise à jour, la conformité d'une unité peut être modifiée. Si une unité conforme est corrélée avec une unité érodée (respectivement en *baselap*), l'unité résultante sera érodée (respectivement en *baselap*). Si une unité érodée est corrélée avec une unité en *baselap*, ou si une unité conforme est corrélée avec une unité érodée et en *baselap*, il en résultera une unité érodée et en *baselap*.

4.5 Ordre de corrélation des puits

4.5.1 Choix de l'ordre de corrélation des puits

Dans cette thèse, nous préférons corréler les puits selon un chemin parallèle à la direction de la distalité, considérée comme la direction de plus grande variation latérale des propriétés considérées. Cela permet de corréler des puits similaires, proches les uns des autres, avant de prendre en compte des puits plus différents.

Un autre choix pourrait être de corréler des puits distants d'abord, pour donner un cadre à la corrélation stratigraphique, et raffiner ensuite le modèle en ajoutant les puits intermédiaires.

4.5.2 Impact de l'ordre de corrélation des puits

Le résultat de la corrélation stratigraphique dépend de l'ordre de corrélation des puits. Pour minimiser l'impact de l'ordre d'ajout des puits, les corrélations peuvent être détruites et

reconstruites, comme proposé par Lallier *et al.* [2016]. Dans ce cas, la CSG est découpée en deux CSLs. Les unités qui pourraient subsister avec des épaisseurs nulles sur une CSL sont supprimées, et leurs marqueurs de toit sont retirés des puits (fig. 4.2D). Ensuite, les CSLs sont corrélées à nouveau, permettant de prendre en compte des corrélations plus récentes. Un autre choix pourrait être de permuter l'ordre d'ajout des puits dans la corrélation dans différentes réalisations, et en étudier l'impact sur la CSG finale.

4.6 Conclusion

Ainsi, les ambiguïtés qui surviennent lors de la corrélation stratigraphique multi-puits itérative sont gérées grâce aux Colonnes Stratigraphiques qui contiennent les informations des précédentes itérations. La CSG résultant de la corrélation stratigraphique contient les informations de chaque horizon dans chaque puits. Elle stocke aussi l'information de conformité et peut donc être utilisée pour générer un géomodèle.

Il serait intéressant de permettre aux unités d'une Colonne Stratigraphique de contenir plusieurs informations de conformité. En effet, comme vu sur la figure 3.6, une unité peut présenter plusieurs conformités, être érodée en un endroit et en baselap en un autre, par exemple. Ainsi, prendre en compte ces différentes conformités et leur localisation aiderait à produire des géomodèles conformes aux données.

Chapitre 5

Application et implications de la méthode de corrélation multi-puits avec modèle d'entraînement

Sommaire

5.1	Données	69
5.1.1	Modèle d'entraînement	69
5.1.2	Puits	70
5.2	Corrélation	71
5.3	Résultats	74
5.3.1	Construction de modèles à partir des corrélations stratigraphiques	74
5.3.2	Calcul d'une distance de temps géologique relatif	74
5.3.3	Analyse de la répartition des volumes dans les modèles réalisés	79
5.4	Discussion	79
5.4.1	Données	80
5.4.2	Méthode et algorithme	81
	Algorithme de corrélation stratigraphique	81
	Construction des modèles	81
5.4.3	Cas d'étude	81
5.4.4	Implications des résultats dans des applications	82
	Études de bassins sédimentaires	82
	Études de réservoirs	82
5.5	Conclusions et perspectives	83

Nous allons appliquer la méthode de corrélation stratigraphique multi-puits vue dans le chapitre 4 avec la règle de corrélation utilisant un modèle d'entraînement vue dans le chapitre 3 sur des données synthétiques, pour tester la sensibilité de la méthode en fonction du nombre de puits ou de balayages dans le modèle d'entraînement.

5.1 Données

5.1.1 Modèle d'entraînement

Le modèle d'entraînement est un modèle basé processus construit à l'aide du logiciel de modélisation stratigraphique directe DionisosFlow, développé par le Beicip [Granjeon, 1997]. Il correspond à une marge passive, avec des dépôts clastiques.

Les dimensions du modèle sont présentées dans le tableau 5.1. La topographie initiale du fond marin est montrée sur la carte de la figure 5.1. L'apport de sédiment est constant et

vaut $20 \text{ km}^3/\text{Ma}$, en provenance du bord Est du modèle, de façon homogène le long du bord. La figure 5.2 présente les variations eustatiques. La subsidence est identique en tout point et baisse le fond marin de 120m.

Longueur du modèle	100km
Largeur du modèle	100km
longueur d'une cellule	0.5km
largeur d'une cellule	0.5km
Intervalle de temps	10My
Pas de temps	0,2My

TABLE 5.1 – Dimensions temporelles et spatiales du modèle direct.

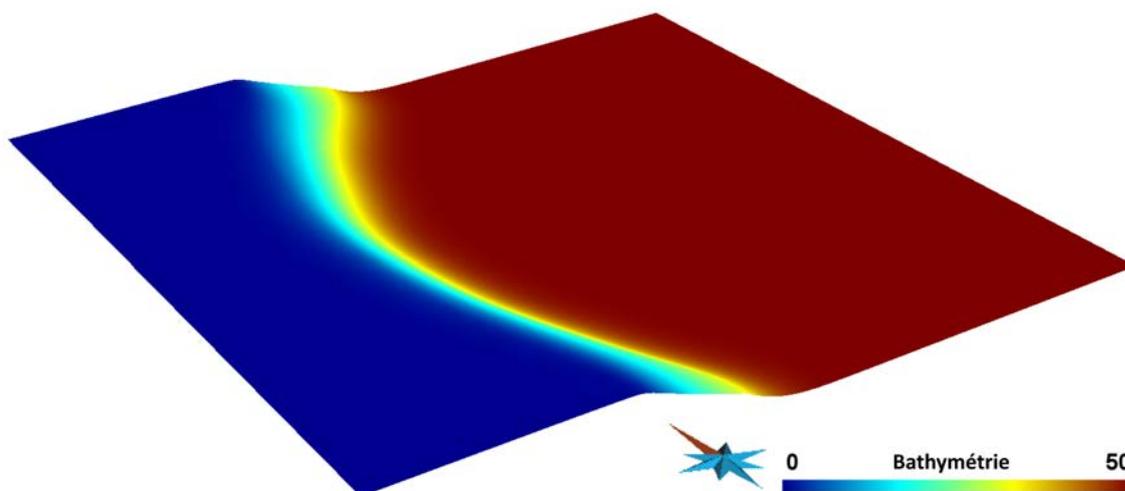


FIGURE 5.1 – Bathymétrie du fond marin à $t=0$ (m).

Le modèle est constitué d'une succession d'unités, remplie de plusieurs propriétés (âge, pente, distance à la côte, bathymétrie, proportions d'argiles, silts, sables et sables grossiers, et taux de sédimentation). Chacune de ces propriétés pourrait être utilisée pour la corrélation. Ici nous considérons la bathymétrie, la profondeur de dépôt, comme premier exemple (fig. 5.3). Ce n'est pas une donnée directement observable sur les puits, mais elle peut être déduite de l'interprétation des logs. Cette propriété a déjà été utilisée plusieurs fois dans la littérature pour la corrélation stratigraphique de puits sur des données réelles [Massonnat *et al.*, 2002, Gari, 2007, Borgomano *et al.*, 2008, Lallier *et al.*, 2016].

D'autres propriétés du modèle basé processus peuvent être considérées. [Yoon *et al.*, 2017], par exemple, comparent les faciès présents sur les puits à ceux trouvés dans le modèle d'entraînement, ainsi que la variation d'épaisseur des unités.

La bathymétrie a été utilisée pour identifier les séquences stratigraphiques selon le modèle d'Embry [2002], dont les limites de séquence sont les surfaces de régression maximum.

5.1.2 Puits

Le modèle a été échantillonné par un lot de puits, avec les unités repérées par des marqueurs stratigraphiques et des logs représentant la bathymétrie (fig. 5.4). Ce cas idéal, avec une parfaite correspondance entre le modèle d'entraînement et les puits, permet de tester l'efficacité de la méthode à échantillonner les incertitudes.

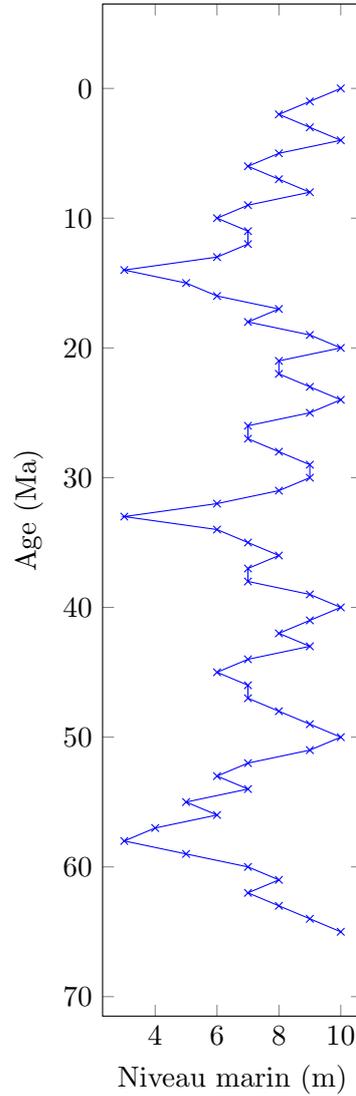


FIGURE 5.2 – Courbe de variations du niveau marin en fonction du temps utilisée pour générer le modèle d’entraînement.

5.2 Corrélation

Plusieurs sets de 100 corrélations stratigraphiques de ces puits ont été effectués, en changeant le nombre de puits corrélés et leurs positions, et le nombre de balayages dans le modèle d’entraînement pour calculer le coût d’association de marqueurs. La figure 5.5 présente les différentes configurations des puits, les motifs, utilisés pour les corrélations stratigraphiques.

Pour chaque set de paramètres, le premier puits de la corrélation stratigraphique est tiré aléatoirement, et les autres sont ajoutés un par un de proche en proche en suivant un chemin, un ordre. Ce chemin est construit pour être parallèle à la direction de plus grande variation latérale de la propriété, généralement suivant la distalité. Le premier puits et l’ordre d’ajout des puits sont les mêmes pour les 100 corrélations d’un set. Les facteurs de pondération α et β pour le calcul du coût d’un hiatus valent respectivement 0,3 et 0,7 :

$$c_{hiatus}(u_i^w, h_j^{1:K}) = p(u_i^w) + \sum_{k=1}^K \{0,3 * t(h_j^k) + 0,7 * p(u_{j+1}^k)\}. \quad (5.1)$$

Nous avons préféré concentrer le coût sur les données de logs plutôt que sur des mesures

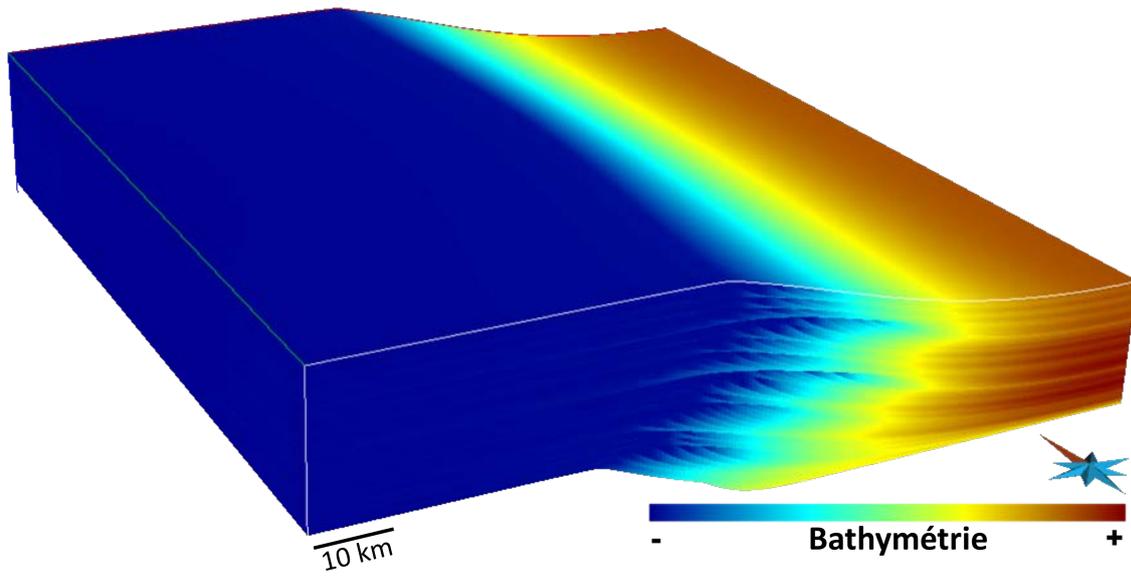


FIGURE 5.3 – Le modèle direct utilisé comme modèle d’entraînement. Le modèle est rempli d’une propriété, la bathymétrie.

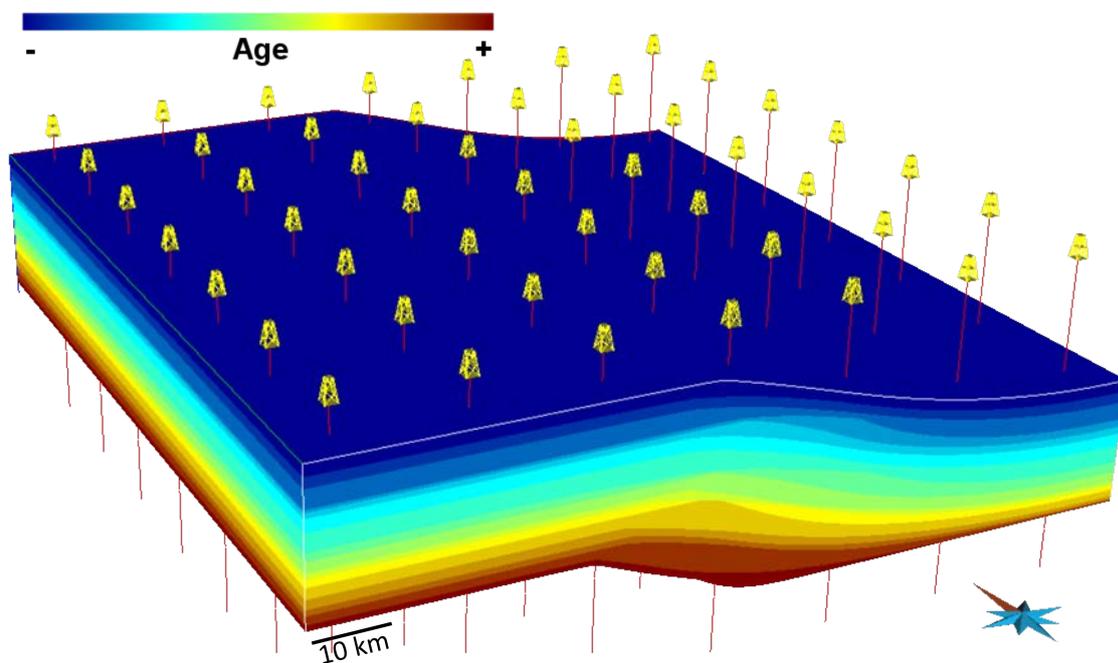


FIGURE 5.4 – Le modèle d’entraînement et les puits à corrélérer. Le modèle d’entraînement présente les unités interprétées. Les puits échantillonnent ce modèle, avec les unités identifiées par des marqueurs stratigraphiques et des logs de bathymétrie.

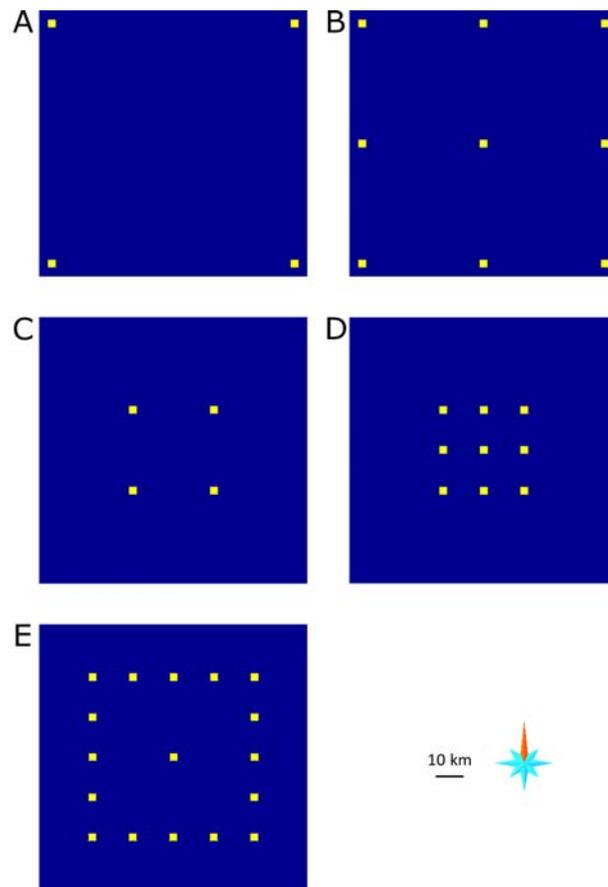


FIGURE 5.5 – Les différents motifs utilisés pour les corrélations stratigraphiques. En bleu, le modèle d'entraînement vu de dessus. En jaune, les puits qui échantillonnent le modèle.

géométriques.

5.3 Résultats

5.3.1 Construction de modèles à partir des corrélations stratigraphiques

Un modèle est construit pour chaque corrélation stratigraphique à l'aide du “*3D Reservoir Grid Building Workflow*”, dans le logiciel SKUA-Gocad, développé par Paradigm, voir Mallet [2002]. La figure 5.6 présente quatre exemples de modèles construits à partir des corrélations stratigraphiques obtenues, comparées au modèle de référence. Bien qu'étant globalement similaires, avec des unités plutôt conformes et d'épaisseurs assez constantes (excepté l'unité la plus profonde), de petites différences peuvent être remarquées. Notamment, les unités les plus récentes (bleu foncé) des deux modèles possédant les distances au modèle de référence les plus faibles sont continues le long de la section, comme pour la référence. En revanche, sur les deux autres modèles, ces unités ne sont présentes que dans la partie centrale de la section.

5.3.2 Calcul d'une distance de temps géologique relatif

À l'aide de la même méthode que citée ci-dessus, un modèle est construit pour chaque motif présenté sur la figure 5.5, en utilisant les surfaces supérieure et inférieure du modèle d'entraînement et les puits correspondant au motif, corrélés selon le modèle d'entraînement. Ils seront appelés modèles d'entraînement reconstruits dans la suite.

Un test de cohérence est effectué, en calculant une distance entre ces modèles et chaque modèle généré à partir des corrélations. Ainsi, l'accent est mis sur les différences dues aux corrélations des unités stratigraphiques, en évitant les différences dues à la construction du modèle. Nous nous attendons à ce que cette distance décroisse avec le nombre de puits impliqués dans la corrélation et/ou avec l'augmentation du nombre de balayages dans le modèle d'entraînement. En effet, plus de données prises en compte devraient mieux contraindre la corrélation stratigraphique, et plus de balayages devraient permettre d'augmenter les chances d'échantillonner les associations les moins coûteuses.

Comparer les modèles n'est pas si simple, car le nombre d'unités, la position des inconformités et la géométrie des horizons peuvent varier. Nous commençons par faire l'hypothèse que le sommet et la base de l'intervalle stratigraphique considéré sont connus. Cette hypothèse est cohérente pour notre modèle, et serait valable dans la plupart des études utilisant des données sismiques 3D, où la corrélation stratigraphique pourrait être effectuée entre des horizons sismiques. Dans cet intervalle, nous étudions le temps géologique relatif. Plus précisément, les deux modèles sont échantillonnés avec des puits virtuels pour des positions $(u; v)$ correspondantes. Un log est créé le long de chaque puits, échantillonnant régulièrement le temps géologique relatif. La distance entre deux modèles est calculée suivant :

$$D = \frac{1}{P} \sum_{p=0}^P \sqrt{\sum_{e=0}^E |\tau_{\text{entraînement}}^e - \tau_{\text{réalisation}}^e|^2}, \quad (5.2)$$

avec p l'indice du puits virtuel et P le nombre de positions à tester ; e est l'échantillon courant le long des deux logs, et E le nombre d'échantillons. $\tau_{\text{entraînement}}$ et $\tau_{\text{réalisation}}$ correspondent aux temps géologiques relatifs du modèle d'entraînement reconstruit et du modèle réalisé à partir de la corrélation stratigraphique respectivement. Ils sont calculés suivant :

$$\tau = \frac{n-1}{N} + \frac{z_e - z_{\text{base}}}{z_{\text{sommet}} - z_{\text{base}}} * \frac{1}{N}, \quad (5.3)$$

avec n l'indice de la séquence stratigraphique et N le nombre total de séquences stratigraphiques dans le modèle. z_e est la profondeur de l'échantillon, z_{base} est la profondeur de la base

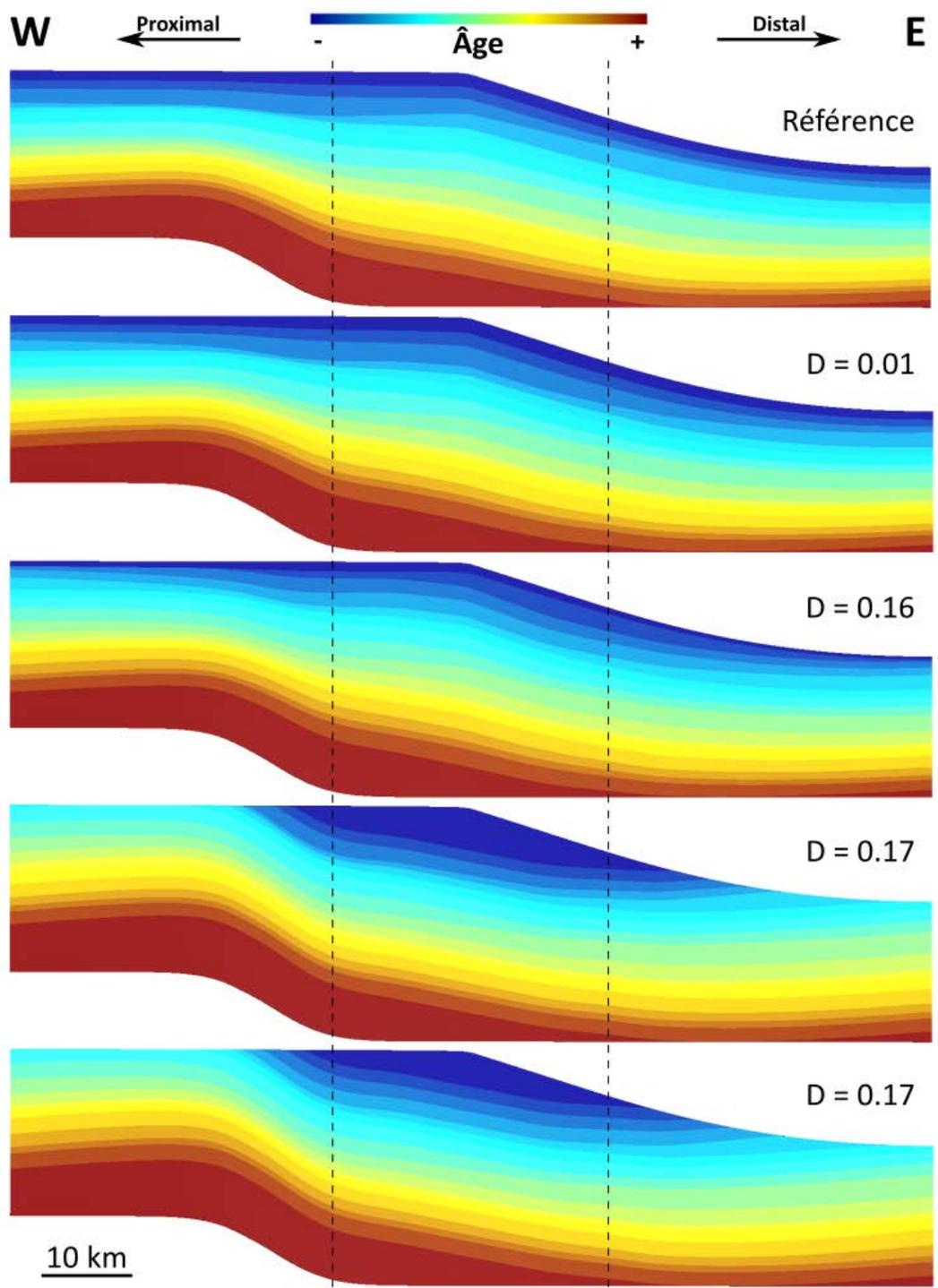


FIGURE 5.6 – Comparaison de quatre modèles construits à partir de corrélations stratigraphiques avec le modèle de référence. Paramètres utilisés : motif C dans la figure 5.5, 50 balayages dans le modèle d’entraînement. Ils sont classés par distance aux puits croissante (voir texte pour le calcul de cette distance). Les lignes pointillées correspondent aux positions projetées des puits. Les modèles se ressemblent mais présentent des différences. Les corrélations ont légèrement varié et entraînement une répartition différente des volumes.

de la séquence, et z_{sommet} la profondeur du sommet de la séquence. Cela suppose l'hypothèse que le taux de sédimentation est constant dans la séquence.

Deux types de distances sont calculées :

- Distance globale, correspondant à un échantillonnage régulier dans l'ensemble du modèle (9 puits).
- Distance aux puits, correspondant à un échantillonnage au niveau des puits utilisés pour la corrélation stratigraphique.

Pour les deux distances et pour chaque set de paramètres de corrélation, les valeurs minimum et maximum, et les premier, deuxième et troisième quartiles ont été calculés. Les résultats sont compilés dans le tableau 5.2. Ils sont présentés sous forme graphique dans les figures 5.7 et 5.8 pour la distance aux puits et la distance globale respectivement.

Motif		A			B			C		
Balayages		1	50	100	1	50	100	50	100	1000
Distance globale	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.02
	P25	0.00	0.00	0.00	0.001	0.01	0.01	0.06	0.06	0.06
	P50	0.05	0.00	0.00	0.15	0.01	0.01	0.06	0.06	0.06
	P75	0.13	0.00	0.00	0.20	0.17	0.02	0.18	0.07	0.06
	Max	0.27	0.04	0.07	0.26	0.26	0.27	0.61	0.60	0.13
Distance aux puits	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
	P50	0.13	0.00	0.00	0.10	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
	P75	0.15	0.00	0.00	0.11	0.10	0.00	0.14	0.01	0.01
	Max	0.27	0.13	0.13	0.20	0.17	0.18	0.23	0.20	0.02

Motif		D			E				
Balayages		50	100	1000	50	100	100	1000	1000
Distance globale	Min	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.02	0.03
	P25	0.12	0.09	0.06	0.13	0.11	0.10	0.04	0.13
	P50	0.38	0.32	0.10	0.15	0.12	0.13	0.09	0.16
	P75	0.43	0.38	0.14	0.17	0.14	0.15	0.12	0.20
	Max	0.55	0.53	0.55	0.30	0.23	0.24	0.41	0.33
Distance aux puits	Min	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	P25	0.10	0.10	0.07	0.08	0.07	0.07	0.08	0.00
	P50	0.11	0.11	0.09	0.11	0.08	0.08	0.10	0.07
	P75	0.14	0.15	0.11	0.14	0.09	0.10	0.14	0.08
	Max	0.19	0.24	0.21	0.23	0.16	0.17	0.27	0.36

TABLE 5.2 – Distance globale et distance aux puits. Valeur minimum, premier, deuxième et troisième quartiles, et valeur maximum de la distance globale et la distance aux puits entre les modèles réalisés et les modèles d'entraînements reconstruits pour 100 réalisations de corrélations stratigraphiques, pour différents nombres de balayages dans le modèle d'entraînement, et différents puits (A, B, C, D, E correspondant aux motifs de la figure 5.5).

Pour le même nombre de puits et balayages dans le modèle d'entraînement, les motifs A et B présentent des distances plus faibles que C et D respectivement. Les deux premiers motifs étant presque des mêmes dimensions que le modèle d'entraînement, la fenêtre de balayage est très contrainte, permettant ainsi de trouver les meilleures corrélations plus facilement.

Étrangement, la comparaison de A avec B et C avec D montre qu'ajouter des puits pour

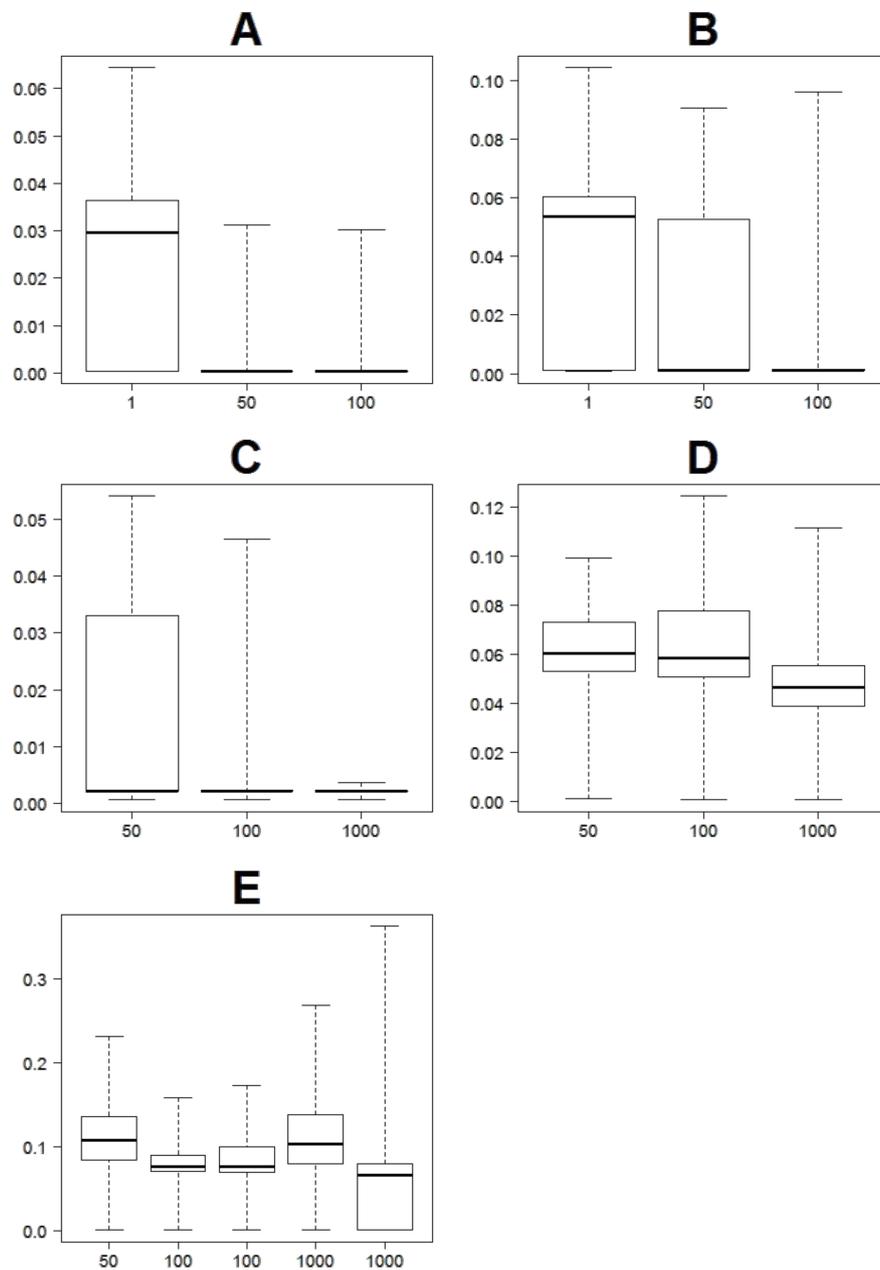


FIGURE 5.7 – Distance aux puits pour chaque motif (fig. 5.5), pour 100 réalisations de corrélations stratigraphiques avec différents nombres de balayages (positions du motif testées) dans le modèle d’entraînement. La distance aux puits est une différence de temps géologique relatif entre le modèle d’entraînement et le modèle réalisé à partir des corrélations de puits, au niveau des puits utilisés pour la corrélation stratigraphique.

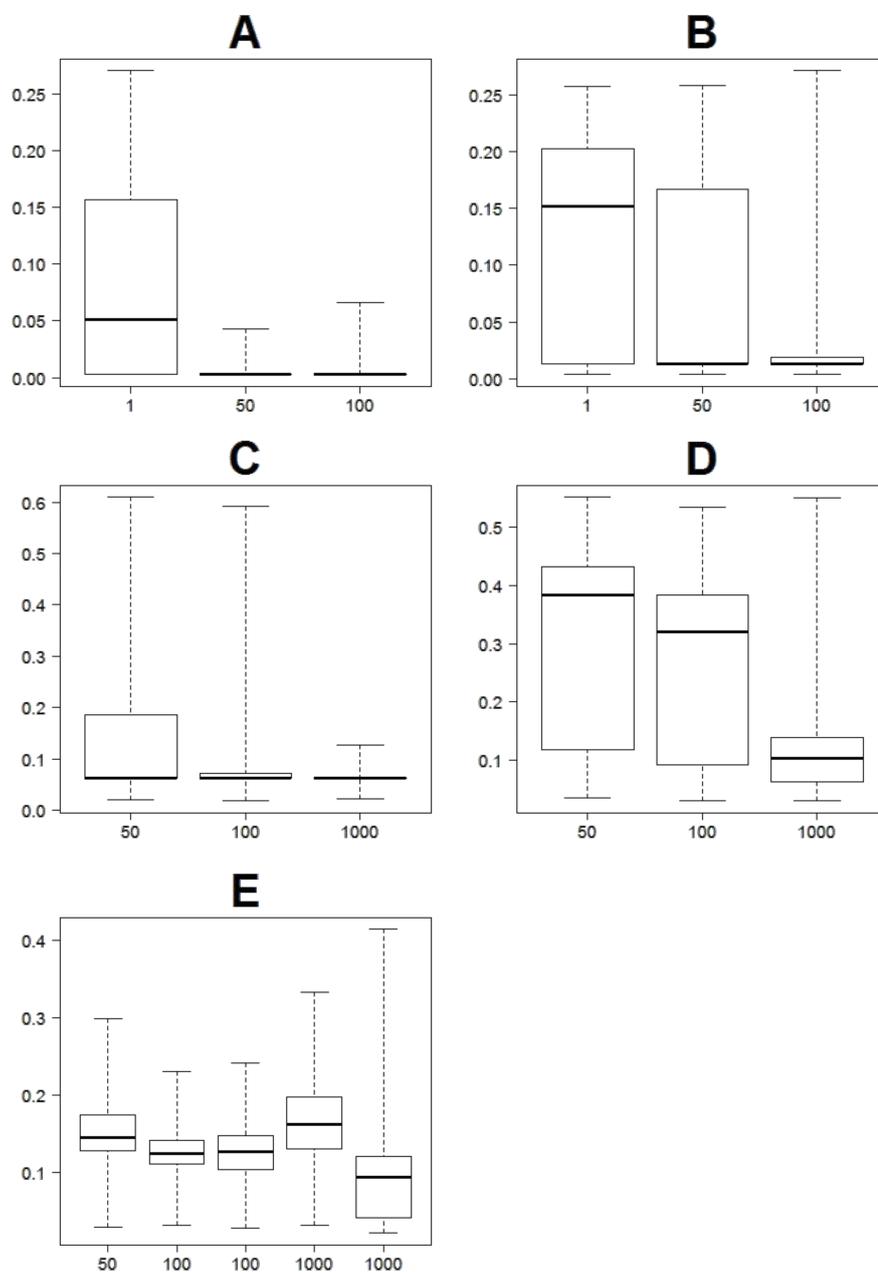


FIGURE 5.8 – Distance globale pour chaque motif (fig. 5.5), pour 100 réalisations de corrélations stratigraphiques avec différents nombres de balayages dans le modèle d’entraînement. La distance globale est une différence de temps géologique relatif entre le modèle d’entraînement et le modèle réalisé à partir des corrélations de puits, à neuf positions échantillonnées régulièrement dans les modèles.

contraindre le modèle tend à augmenter les distances pour le même nombre de balayages dans le modèle d'entraînement. Plus de balayages sont nécessaires pour converger vers une distance de 0. Cela peut être dû au fait qu'il est plus difficile de trouver un cas optimal avec plus de données à honorer, le nombre de balayages n'étant qu'une fraction du nombre total de positions possibles dans le modèle d'entraînement. De plus, un plus grand nombre de puits pris en compte implique plus de corrélations stratigraphiques possibles [Lallier *et al.*, 2016]. Cela peut aussi être la conséquence de corrélérer les puits de proche en proche. Il devrait y avoir moins de variabilité entre ces puits qu'entre des puits distants. La corrélation stratigraphique est moins contrainte entre les puits proches et des erreurs mineures peuvent apparaître et se propager à l'ensemble de la corrélation stratigraphique de tous les puits.

Pour chaque motif, augmenter le nombre de balayages dans le modèle d'entraînement a tendance à faire décroître les médianes des deux distances. Pour le motif E, deux lots de 100 corrélations stratigraphiques ont été calculées pour 100 et 1000 balayages dans le modèle d'entraînement. Les résultats sont similaires pour 100 balayages, mais différent pour les sets de 1000 balayages, l'un d'eux ayant même une médiane plus haute que pour 50 balayages. De la même façon que précédemment, cela peut s'expliquer par l'ordre de corrélation des puits. Le premier puits étant sélectionné aléatoirement, les données à honorer à chaque étape de la corrélation stratigraphique et la propagation des erreurs diffèrent.

La figure 5.7 montre globalement les mêmes tendances que la figure 5.8. Dans le détails, les statistiques varient légèrement à cause de l'interpolation des horizons loin des puits qui peut augmenter ou diminuer les distances entre les modèles, selon les données. Cela met en avant la sensibilité de l'interpolation aux petites variations entre des réalisations qui ont la même distance aux puits. En d'autres termes, deux corrélations stratigraphiques qui diffèreraient d'un seul horizon pourraient avoir la même distance aux puits, mais une distance globale significativement différente, l'interpolation augmentant l'impact de petits changements au niveau des données. Ainsi, la figure 5.7B-C présentant des statistiques écrasées pour 100 balayages, la figure 5.8B-C prouve que les modèles diffèrent légèrement les uns des autres et que la méthode permet d'explorer les incertitudes locales pour un ordre donné de corrélation stratigraphique des puits.

5.3.3 Analyse de la répartition des volumes dans les modèles réalisés

Les volumes des différentes unités des modèles réalisés ont été mesurés. La figure 5.9 montre les volumes cumulés des modèles par temps géologique relatif de modèles construits à partir de corrélations stratigraphiques des puits du motif B avec 1, 50 et 100 balayages dans le modèle d'entraînement. La comparaison des courbes permet de mettre en valeur les régions du modèle les plus incertaines, et les unités les moins probables.

Avec peu de balayages, il y a de nombreux chemins différents, traduisant différents scénarios de remplissage du bassin. En revanche, avec plus de balayages, les courbes présentent moins de chemins possibles. L'ensemble paraît moins flou, la tendance globale est plus facilement identifiable et suit la courbe des volumes cumulés du modèle d'entraînement reconstruit.

5.4 Discussion

La méthode présentée ici permet de construire différents modèles possibles à partir d'un lot de données, et donne des résultats cohérents en termes de distance entre les modèles réalisés et le modèle d'entraînement reconstruit, et en termes de distribution des volumes dans le modèle. Cependant, plusieurs points peuvent être discutés.

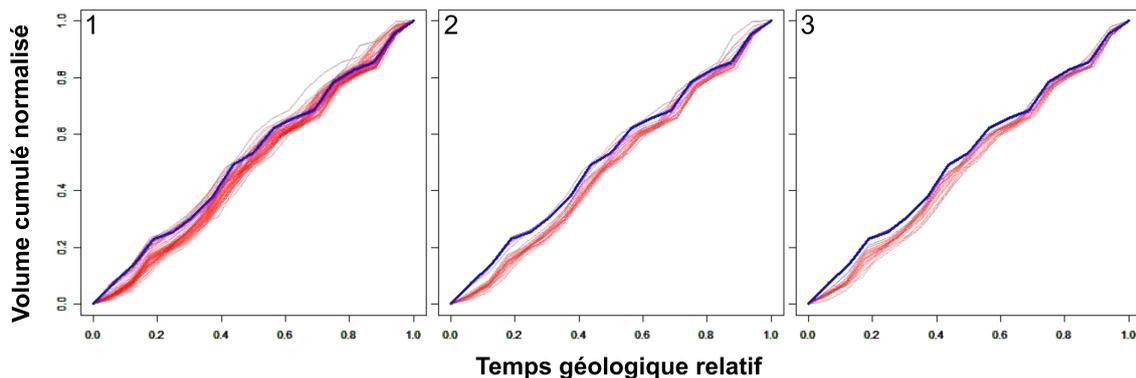


FIGURE 5.9 – Courbes des volumes cumulés par temps géologique relatif. Volumes cumulés de 100 modèles construits à partir de corrélations stratigraphiques des puits du motif B sur la figure 5.5. 1, 50 et 100 balayages dans le modèle d’entraînement pour 1, 2 et 3 respectivement. La courbe bleue représente le volume cumulé du modèle d’entraînement reconstruit avec les puits du motif B. Augmenter le nombre de balayages augmente les chances de trouver les associations les plus probables et donc baisse le nombre possible de chemins dans ces graphiques.

5.4.1 Données

La méthode nécessite un modèle d’entraînement pour évaluer la probabilité d’existence d’associations d’unités. Cela implique que ce modèle et les données à corréler doivent être cohérents. Le modèle d’entraînement doit présenter une bonne représentation des unités et des géométries qui peuvent exister. Cela signifie que le modèle doit correspondre à un environnement de dépôt similaire à celui dans lequel les sédiments des puits se sont déposés.

Dans cette thèse, nous utilisons un modèle basé processus pour calculer les coûts d’association des unités, mais des modèles analogues [Colombera *et al.*, 2012] apportant la même information que celle disponible sur les puits peuvent être envisagés. En effet, le modèle d’entraînement et les données de puits doivent porter la même propriété pour pouvoir comparer leurs unités. Cette propriété peut être interprétée (e.g., faciès), d’après des propriétés venant des mesures brutes (e.g., gamma ray, sonic, densité). Dans ce cas, les incertitudes à cette étape et leur impact sur le reste de l’étude doivent être considérés.

Le dépôt des sédiments n’étant pas uniforme dans le bassin, le modèle d’entraînement n’est pas stationnaire. La stationnarité est un problème connu dans les études de statistique multi-points (e.g., Caers et Zhang [2005], Strebelle et Zhang [2005], Mirowski *et al.* [2009]). L’image d’entraînement doit montrer une distribution statistique stationnaire, une orientation stationnaire, et une échelle stationnaire [Mirowski *et al.*, 2009]. Ici, la première condition n’est pas remplie : les dépôts montrent une nette tendance depuis le pôle proximal vers le pôle distal. Si le modèle d’entraînement n’est pas parcouru entièrement, le résultat va dépendre des régions du modèle qui ont été échantillonnées. L’information de distalité peut être utilisée comme variable secondaire. En la considérant comme une variable continue, elle peut aider à prendre en compte l’orientation, comme proposé par Strebelle et Zhang [2005]. La distalité peut aussi être discrétisée pour partager le modèle de dépôt en différentes zones pour échantillonner les informations correspondantes, comme de Vries *et al.* [2009] le suggèrent.

De plus, la méthode repose sur l’identification de séquences stratigraphiques sur les données de puits et dans le modèle direct. Ainsi, la résolution des séquences stratigraphiques, l’ordre stratigraphique des unités, doivent être les mêmes sur les puits et dans le modèle. Des erreurs pouvant intervenir à cette étape ayant des impacts majeurs sur les corrélations stratigraphiques, les incertitudes doivent être prises en compte. Par exemple, plusieurs personnes peuvent donner leurs interprétations et elles peuvent ensuite être testées [Wood et Curtis, 2004, Bond *et al.*, 2008].

Enfin, l’aire couverte par le modèle d’entraînement doit être plus grande que celle cou-

verte par les données de puits pour permettre de chercher les corrélations, en utilisant la configuration des puits, en différentes positions. Dans notre cas, la configuration A présente de bons résultats bien qu'elle soit presque aussi grande que le modèle, mais nous savions *a priori* qu'elle était à la bonne place dans le modèle.

5.4.2 Méthode et algorithme

Algorithme de corrélation stratigraphique

Nous avons vu que les distances entre les modèles réalisés et le modèle d'entraînement reconstruit augmentent avec le nombre de puits impliqués dans la corrélation, et qu'elles peuvent également augmenter avec le nombre de balayages, en fonction de l'ordre de corrélation stratigraphique des puits. C'est un problème combinatoire. Le nombre de corrélations stratigraphiques possibles croissant avec la complexité de la configuration des données, il est plus difficile de trouver un motif correspondant dans le modèle d'entraînement, et les erreurs apparaissant pendant les corrélations des premiers puits sont propagées aux corrélations des derniers puits. Différentes stratégies peuvent être envisagées pour gérer ce problème.

Premièrement, l'espace des incertitudes peut être exploré, en changeant l'ordre de corrélation stratigraphique des puits pour chaque réalisation.

Deuxièmement, la méthode peut être optimisée. Lallier *et al.* [2016] proposent de détruire et reconstruire les corrélations stratigraphiques entre des paires de puits séquentiellement, pour prendre en compte les derniers puits ajoutés dans la corrélation des premiers puits corrélés. Wheeler [2015] suggère d'utiliser une méthode d'optimisation d'alignement global *a posteriori*.

Troisièmement, une approche multi-échelles peut être considérée, similaire au concept de grilles multiples utilisé dans des méthodes MPS [Tran, 1994, Strebelle, 2002, Liu, 2006, Hu et Chugunova, 2008]. Les puits éloignés les uns des autres peuvent être corrélés avant de préciser la colonne stratigraphique avec des puits intermédiaires. De manière similaire, les séquences stratigraphiques le long des puits peuvent être considérées selon leur ordre stratigraphique, en corrélant les séquences d'ordres supérieurs avant les séquences d'ordres inférieurs, comme expliqué par Lallier *et al.* [2016].

Construction des modèles

La variabilité des modèles construits à partir des corrélations stratigraphiques est contrainte par le déterminisme de la méthode de construction des modèles ("*3D Reservoir Grid Building Workflow*", dans le logiciel Gocad). En pratique, des incertitudes significatives peuvent exister à cause du manque de données. Cette étude pourrait donc être complétée en considérant une géométrie stochastique [Abrahamsen *et al.*, 1992, Goff, 2000, Caumon, 2010, Cherpeau et Caumon, 2015]. En effet, une telle méthode permettrait de mieux échantillonner l'espace des incertitudes quant à la forme des horizons, et une variabilité des volumes des unités plus continue pourrait être attendue. La forme des horizons, ou de façon équivalente la variation latérale d'épaisseur, et les contours des érosions pourraient être simulés dans une gamme de valeurs possibles, d'une manière similaire à la méthode de génération de géométries de failles de Røe *et al.* [2014].

5.4.3 Cas d'étude

Nous avons choisi de nous concentrer sur quelques paramètres dans cette étude pour analyser la méthode. D'autres travaux doivent être menés pour étudier la sensibilité des résultats aux variations d'autres paramètres comme les facteurs α et β , ou les coûts de la règle de comparaison de l'unité d'un puits avec celle du modèle, par exemple.

La règle pourrait aussi être adaptée pour prendre en compte l'histoire du bassin et créer des successions d'unités cohérentes, le calcul des coûts de l'association et du hiatus pourraient prendre en compte les unités situées au-dessus et sous l'unité considérée (au lieu de ne comparer que l'unité sous un hiatus). De plus, cette règle pourrait être associée à d'autres règles pour tenir compte d'autres concepts géologiques.

Le modèle basé processus utilisé dans cette étude est très simple, et l'efficacité de la méthode sur des modèles plus complexes doit être étudiée.

Fondamentalement, une variété de variables sédimentaires sont produites par les simulations basées processus. Nous pensons que la méthode proposée peut être utilisée pour tester quel paramètre (ou combinaison de paramètres) permet le mieux de récupérer les architectures depuis un lot de puits dans un contexte de dépôt donné.

Après avoir testé la sensibilité de la méthode, elle devrait être testée sur des données réelles. Obtenir un modèle d'entraînement analogue à la région d'intérêt pour appliquer la méthode à des données de terrain est une tâche difficile. Cependant, une étude rapide des données disponibles peut donner des informations à large échelle comme la source de sédiment ou les variations globales de niveau marin. Si des incertitudes demeurent, plusieurs modèles basé processus peuvent être construits pour échantillonner ces incertitudes, et ils peuvent ensuite être chacun utilisé comme modèle d'entraînement pour la corrélation stratigraphique des données de puits.

5.4.4 Implications des résultats dans des applications

Études de bassins sédimentaires

Les variations entre les différentes corrélations stratigraphiques d'un même motif, traduites en différentes courbes de volumes cumulés (fig. 5.9), sont dues aux positions des hiatus, interprétés comme des érosions ou non-dépôts des sédiments. Les taux de sédimentation varient localement et les sédiments sont répartis différemment dans le temps (verticalement dans le modèle).

Le taux de sédimentation est une mesure clé pour les études de bassin, notamment pour comprendre le couplage entre le climat et la tectonique [Molnar et England, 1990, Métivier *et al.*, 1999, Zhang *et al.*, 2001, Molnar, 2004, Clift, 2006, Charreau *et al.*, 2011, Herman et Champagnac, 2016, Willenbring et Jerolmack, 2016, Bhattacharya *et al.*, 2016]. Aucune matière n'étant perdue dans les processus d'érosion, transport et sédimentation, les bassins sédimentaires apportent des données clés pour reconstruire les paléo-taux d'érosion (e.g., Hay *et al.* [1989], Dromart *et al.* [2002], Rouby *et al.* [2009], Guillocheau *et al.* [2012], Nicholson *et al.* [2016]). La compréhension de l'évolution géodynamique des reliefs et son impact sur les taux de sédimentation dans les bassins voisins ont été beaucoup discutés dans la littérature [Hanks *et al.*, 1984, Weldon et Sieh, 1985, Armijo *et al.*, 1986, Tapponnier *et al.*, 1990, Gaudemer *et al.*, 1995, Burbank *et al.*, 1996, Métivier et Gaudemer, 1997, Métivier *et al.*, 1999].

Études de réservoirs

Les différences de distributions des volumes de sédiments peuvent avoir un impact important dans les études de réservoirs, particulièrement pour les calculs de volumes de fluides et d'écoulements de fluides [Jackson *et al.*, 2009, Lallier *et al.*, 2012, Cavero *et al.*, 2016]. En effet, ajoutée à la répartition des faciès, la position des hiatus peut être critique pour la connectivité entre différents réservoirs.

5.5 Conclusions et perspectives

Nous avons appliqué les méthodes vues dans les deux chapitres précédents sur des données synthétiques : le calcul du coût de l'association de marqueurs stratigraphiques en mesurant sa vraisemblance à l'aide d'un modèle d'entraînement (chapitre 3), et la gestion de la corrélation stratigraphique multi-puits avec des colonnes stratigraphiques (chapitre 4).

Chaque corrélation stratigraphique stochastique a permis de construire la colonne stratigraphique correspondante de la région. Les puits sont corrélés itérativement en considérant leurs Colonnes Stratigraphiques respectives, et la Colonne Stratigraphique globale est mise à jour. La Colonne Stratigraphique globale est utilisée pour générer un modèle, et la géométrie des différentes unités ainsi que leurs relations topologiques.

Ces modèles ont ensuite été comparés au modèle d'entraînement, reconstruit en prenant en compte les données utilisées pour la corrélation stratigraphique, en calculant une distance entre ces modèles. Les résultats sont assez cohérents et montrent l'impact de la variation des corrélations stratigraphiques possibles à partir d'un même lot de données sur la répartition des volumes dans le modèle, et donc sur l'histoire géologique qui peut mener à ce modèle. Ils mettent cependant en évidence les défis pour explorer l'espace des modèles possibles.

Conclusion générale

La corrélation stratigraphique de puits est une étape cruciale dans les études de réservoirs d'hydrocarbures ou de bassins sédimentaires. Étant une étape précoce de ces études, les éventuelles erreurs qui peuvent apparaître auront un impact important sur les étapes suivantes, et sur les résultats des études.

C'est pourquoi il est nécessaire d'avoir une méthode qui génère des corrélations stratigraphiques de puits géologiquement cohérentes, qui honorent les données, et qui prennent en compte les incertitudes.

Les travaux de cette thèse se placent donc dans la continuité des travaux de corrélation stratigraphique automatiques de données de puits pour pallier aux limites des précédentes études.

Différentes règles de corrélation stratigraphique définies dans le cadre de la stratigraphie séquentielle sont proposées dans ce manuscrit pour construire les unités génétiques du bassin étudié et appréhender les hétérogénéités qui le composent. Ces règles peuvent être logiques, comme associer les unités en transgression et les unités en régression respectivement, ou géométriques, contraindre les variations latérales d'épaisseur par exemple.

Lister et équilibrer les règles pour bien contraindre une corrélation stratigraphique pouvant être fastidieux, une autre règle a été proposée pour prendre en compte tous les paramètres physiques de transport et dépôt des sédiments. La vraisemblance des unités construites par la corrélation stratigraphique est mesurée dans un modèle analogue. Les méthodes basées processus implémentant les processus physiques, elles peuvent produire ce type de modèle analogue.

Les ambiguïtés de la corrélation stratigraphique multi-puits peuvent être gérées en construisant la colonne stratigraphique de la zone d'étude au fur et à mesure de l'ajout de puits dans la corrélation. Cette colonne stratigraphique contenant également l'information de conformité des unités stratigraphiques la constituant, il est possible de l'utiliser pour construire des géomodèles.

Les méthodes de corrélation stratigraphique présentées dans ce manuscrit sont automatiques, mais l'intervention du géologue est nécessaire en amont. En effet, l'interprétation des données de puits brutes en séquences stratigraphiques et en propriétés (faciès, bathymétrie...) doit être effectuée par un géologue. Cette étape étant subjective et pouvant être difficile, il peut être préférable de considérer plusieurs interprétations possibles des données pour prendre en compte le maximum d'incertitudes et générer plusieurs corrélations stratigraphiques de ces interprétations, pour couvrir l'ensemble de l'espace des possibles. Cette approche a été appliquée depuis plus d'un siècle (e.g. Gilbert [1886], Chamberlin [1890], sur les différentes origines possibles des Grands Lacs) jusque des études plus récentes (e.g. Bond *et al.* [2008], sur l'étude de différents modèles conceptuels de contexte tectonique dans l'industrie pétrolière).

C'est aussi au géologue de choisir les règles de corrélation stratigraphique adéquates pour son étude, ou le modèle analogue à utiliser dans le cas de la règle utilisant un modèle d'entraînement. Si le modèle d'entraînement est un modèle direct, plusieurs valeurs et combinaisons de paramètres pourront être testées pour générer des modèles directs et ainsi considérer différents scénarios possibles.

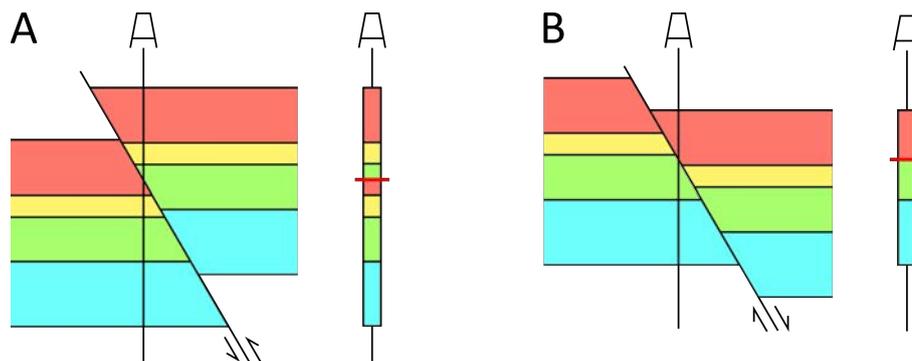


FIGURE 5.10 – Schéma de l'enregistrement sédimentaire dans le cas de failles inverses et normales. A) Faille inverse. Les unités rouge, jaune et verte sont en double dans l'enregistrement sédimentaire au niveau du puits. B) Faille normale, l'unité jaune n'est pas rencontrée dans l'enregistrement sédimentaire au niveau du puits.

Perspectives

Il serait intéressant d'intégrer les failles qui découpent les puits dans le processus de corrélation stratigraphique (fig. 5.10). Nous avons commencé à travailler sur ce sujet avec Wesley Banfield que j'ai encadré pendant l'année 2015-2016. L'approche proposée a été la suivante : Avant la corrélation, les puits sont parcourus pour vérifier la présence de marqueurs de failles (cette approche nécessite donc une interprétation structurale des puits *a priori*). Si un marqueur est trouvé, le puits concerné est découpé en deux parties au niveau de ce marqueur. Si le marqueur correspond à une faille normale, une partie de la stratigraphie ne sera pas représentée sur les deux parties du puits. Les deux parties sont corrélées avec les autres puits successivement comme des puits indépendants, avec une contrainte pour interdire aux deux parties du puits de se recouper. Si le marqueur de faille correspond à une faille inverse, une partie de la stratigraphie est présente en double sur le puits. Les deux parties du puits sont d'abord corrélées l'une avec l'autre, puis avec les autres puits.

Un travail similaire pourrait être fait sur les plis (inversions lors de plis couchés) et sur les puits sub-horizontaux, qui peuvent traverser les mêmes unités plusieurs fois.

Le problème combinatoire de l'ordre de corrélation stratigraphique des puits a été soulevé dans le chapitre 5. Dans ce manuscrit, nous avons choisi de corréler les puits les plus proches les uns des autres, en suivant la direction de la distalité. Des méthodes existent en biologie moléculaire pour corréler des séquences de protéines. Ces méthodes améliorent les corrélations itératives en optimisant l'ordre de corrélation des séquences. L'algorithme CLUSTAL W [Thompson *et al.*, 1994] calcule des distances entre séquences de protéines deux à deux, en construisant ainsi un arbre phylogénétique. Puis les les séquences sont corrélées toutes ensembles itérativement, en ajoutant à chaque fois la séquence avec la distance la plus faible. Notredame *et al.* [2000] présentent l'algorithme T-Coffee, qui permet d'attribuer des poids à chaque alignement possible entre deux séquences, en prenant en compte les autres séquences à corréler. Mais peut-être que plutôt que corréler les puits les plus proches en premier, il vaudrait mieux corréler les puits les plus éloignés, et préciser la corrélation stratigraphique ensuite en ajoutant les puits intermédiaires ensuite, en suivant la philosophie des méthodes multi-grilles de statistiques multi-points comme Liu [2006], par exemple. Une étude de sensibilité et des comparaisons de différents ordres d'ajout des puits seraient intéressantes.

La construction de la colonne stratigraphique dans la corrélation stratigraphique multi-puits présentée dans ce manuscrit permet d'associer une conformité à une unité, définissant ainsi une unité en baselap, une unité érodée, etc. Nous avons vu dans le chapitre 3 qu'une même unité peut présenter différentes conformités sur différents puits. Nous choisissons de combiner ces conformités pour donner la conformité générale de l'unité. Ce choix s'explique

par le fait que la plupart des logiciels de modélisation 3D n'acceptent qu'une conformité par unité (e.g., Gocad, Petrel). Cependant, il serait plus intéressant d'attribuer une conformité par puits, pour prendre en compte l'information spatiale observée sur les puits, et mieux contraindre la modélisation de l'unité.

L'information sismique pourrait être utilisée pour contraindre la corrélation stratigraphique de puits. Julio *et al.* [2012] ont proposé une méthode pour utiliser les informations géométriques observables sur les données sismique dans la corrélation stratigraphique de puits. Qayyum *et al.* [2017] utilisent les réflecteurs sismiques pour corrélérer des marqueurs stratigraphiques à une échelle intra-réservoir, grâce à un "traceur d'inconformité". Il serait intéressant de coupler des méthodes similaires avec les méthodes décrites dans ce manuscrit (multi-puits, modèle d'entraînement...). Pour ce faire, il serait utile d'inclure également la corrélation sismique-puits stochastique [Cheverry *et al.*, 2015, Wu et Caumon, 2016].

L'extrapolation de la géométrie des horizons, est effectuée dans cette thèse en utilisant le logiciel Gocad ("*3D Reservoir Grid Building Workflow*"). C'est une étape déterministe dans ces travaux, mais une piste de futures recherches pourrait être de faire de la modélisation structurale stochastique pour intégrer les incertitudes géométriques dans la méthode. Ainsi, plus de variabilité pourrait être prise en compte dans les contours des fronts d'érosion qui déterminent la position des hiatus entre les puits. De même, les incertitudes sur la géométrie des horizons dans les zones les moins contraintes pourraient être étudiées.

Bibliographie

- P. Abrahamsen, O. Lia, H. Omre, *et al.* An integrated approach to prediction of hydrocarbon in place and recoverable reserve with uncertainty measures. In *European Petroleum Computer Conference*, 1992.
- D. V. Ager. *The nature of the stratigraphical record (second edition)*. John Wiley, New York, 1981.
- D. V. Ager. *The new catastrophism*. Cambridge University Press, 1993.
- F. P. Agterberg, F. Gradstein, Q. Cheng, et G. Liu. The rasc and casc programs for ranking, scaling and correlation of biostratigraphic events. *Computers & Geosciences*, 54 : 279–292, 2013.
- E. R. Ainsworth. Sequence stratigraphic-based analysis of reservoir connectivity : influence of depositional architecture in a case study from a marginal marine depositional setting. *Petroleum Geoscience*, 11(3) : 257–276, 2005.
- E. R. Ainsworth, M. Montree, et S. T. C. Duivenvoorden. Correlation techniques, perforation strategies, and recovery factors : An integrated 3D reservoir modeling study, Sirikit Field, Thailand. *AAPG Bulletin*, 83(10) : 1535–1551, 1999.
- J. R. Allen. The classification of cross-stratified units. with notes on their origin. *Sedimentology*, 2(2) : 93–114, 1963.
- P. Anderson et R. Newrick. Strange but true stories of synthetic seismograms. *CSEG Recorder*, 12(12), 2008.
- G. Angeleri. A statistical approach to the extraction of the seismic propagating wavelet. *Geophysical Prospecting*, 31(5) : 726–747, 1983.
- R. Armijo, P. Tapponnier, J. Mercier, et T.-L. Han. Quaternary extension in southern tibet : Field observations and tectonic implications. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 91(B14) : 13803–13872, 1986.
- J. J. Armitage, P. A. Allen, P. M. Burgess, G. J. Hampson, A. C. Whittaker, R. A. Duller, et N. A. Michael. Sediment transport model for the eocene escanilla sediment-routing system : Implications for the uniqueness of sequence stratigraphic architectures. *Journal of Sedimentary Research*, 85(12) : 1510–1524, 2015.
- J. L. Baldwin, D. N. Otte, C. Whealtley, *et al.* Computer emulation of human mental processes : Application of neural network simulators to problems in well log interpretation. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1989.
- W. Banfield, J. Edwards, et G. Caumon. Challenges in current simultaneous well log correlation techniques. In *2016 RING Meeting*, 2016.

- W. Bashore, U. Araktingi, M. Levy, et W. J. Schweller. Importance of a geological framework and seismic data integration for reservoir modeling and subsequent fluid-flow predictions. In *Stochastic modeling and geostatistics : Principles, Methods, and Case Studies*, p. 159–175. AAPG Computer Applications in Geology 3, 1994.
- R. Bellman. *Dynamic programming* : Princeton univ. press, 1957.
- G. Benedict et K. Walker. Paleobathymetric analysis in paleozoic sequences and its geodynamic significance. *American Journal of Science*, 278(4) : 579–607, 1978.
- J. P. Bhattacharya, P. Copeland, T. F. Lawton, et J. Holbrook. Estimation of source area, river paleo-discharge, paleoslope, and sediment budgets of linked deep-time depositional systems and implications for hydrocarbon potential. *Earth-Science Reviews*, 153 : 77–110, 2016.
- C. Bond, A. Gibbs, Z. Shipton, S. Jones, et G. Stracher. What do you think this is? ”conceptual uncertainty” in geoscience interpretation. *GSA TODAY*, 17(11), 2007.
- C. E. Bond, Z. K. Shipton, A. D. Gibbs, et S. Jones. Structural models : optimizing risk analysis by understanding conceptual uncertainty. *First Break*, 26(6) : 65–71, 2008.
- J. R. F. Borgomano, F. Fourrier, S. Viseur, et L. Rijkels. Stratigraphic well correlations for 3D static modeling of carbonate reservoirs. *AAPG Bulletin*, 92 : 789–824, 2008.
- I. M. Brown. A new method for correlation of multiple stratigraphic sequences. *Computers and Geosciences*, 23 : 697–700, 1997.
- D. W. Burbank, J. Leland, E. Fielding, R. S. Anderson, N. Brozovic, M. R. Reid, et C. Duncan. Bedrock incision, rock uplift and threshold hillslopes in the northwestern himalayas. *Nature*, 379(6565) : 505–510, 1996.
- P. Burgess et P. Allen. A forward-modelling analysis of the controls on sequence stratigraphical geometries. *Geological Society, London, Special Publications*, 103(1) : 9–24, 1996.
- P. Burgess et G. Prince. Reply to comment of o. catuneanu and m. zecchin on non-unique stratal geometries : implications for sequence stratigraphic interpretations, by : Pm burgess and gd prince, basin research (2015) 27, 351–365. *Basin Research*, 2016.
- P. M. Burgess. A brief review of developments in stratigraphic forward modelling, 2000–2009. *Regional Geology and Tectonics : Principles of Geologic Analysis*, p. 378–404, 2012.
- P. M. Burgess et G. D. Prince. Non-unique stratal geometries : implications for sequence stratigraphic interpretations. *Basin Research*, 27(3) : 351–365, 2015.
- P. M. Burgess, H. Lammers, C. van Oosterhout, et D. Granjeon. Multivariate sequence stratigraphy : Tackling complexity and uncertainty with stratigraphic forward modeling, multiple scenarios, and conditional frequency maps. *AAPG bulletin*, 90(12) : 1883–1901, 2006.
- M. Bursik et G. Rogova. Use of neural networks and decision fusion for lithostratigraphic correlation with sparse data, Mono-Inyo craters, California. *Computers and Geosciences*, 32(10) : 1564–1572, 2006.
- R. Burton, C. G. S. C. Kendall, et I. Lerche. Out of our depth : on the impossibility of fathoming eustasy from the stratigraphic record. *Earth-Science Reviews*, 24(4) : 237–277, 1987.

- J. R. Bushman. Hutton's uniformitarianism. *Brigham Young University Studies*, p. 41–48, 1983.
- J. Caers et T. Zhang. Multiple-point geostatistics : a quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models. *AAPG Memoir*, p. 383–394, 2005.
- C. V. Campbell. Lamina, laminaset, bed and bedset. *Sedimentology*, 8(1) : 7–26, 1967.
- C. Carpentier, S. Hadouth, S. Bouaziz, B. Lathuilière, et J.-L. Rubino. Basin geodynamics and sequence stratigraphy of upper triassic to lower jurassic deposits of southern tunisia. *Journal of African Earth Sciences*, 117 : 358–388, 2016.
- H. Carrillo et D. Lipman. The multiple sequence alignment problem in biology. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 48(5) : 1073–1082, 1988.
- R. M. Carter. Two models : global sea-level change and sequence stratigraphic architecture. *Sedimentary Geology*, 122 : 23–36, 1998.
- O. Catuneanu et M. Zecchin. Comment on “non-unique stratal geometries : implications for sequence stratigraphic interpretations”, by : Pm burgess and gd prince, basin research (2015) 27, 351-365. *Basin Research*, 2016a.
- O. Catuneanu et M. Zecchin. Unique vs. non-unique stratal geometries : Relevance to sequence stratigraphy. *Marine and Petroleum Geology*, 78 : 184–195, 2016b.
- O. Catuneanu, A. J. Willis, et A. D. Miall. Temporal significance of sequence boundaries. *Sedimentary Geology*, 121(3) : 157–178, 1998.
- O. Catuneanu, V. Abreu, J. P. Bhattacharya, M. D. Blum, R. W. Dalrymple, P. G. Eriksson, C. R. Fielding, W. L. Fisher, W. E. Galloway, M. R. Gibling, K. A. Giles, J. M. Holbrook, R. Jordan, C. G. S. C. Kendall, B. Macurda, O. J. Martinsen, A. D. Miall, J. E. Neal, D. Nummedal, L. Pomar, H. W. Posamentier, B. R. Pratt, J. F. Sarg, K. W. Shanley, R. J. Steel, A. Strasser, M. E. Tucker, et C. Winker. Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Reviews*, 92 : 1–3, 2009.
- O. Catuneanu, W. E. Galloway, C. G. S. C. Kendall, A. D. Miall, H. W. Posamentier, A. Strasser, et M. E. Tucker. Sequence stratigraphy : Methodology and nomenclature. *Newsletters on Stratigraphy*, 44(3) : 173–245, 2011.
- O. Catuneanu, M. A. Martins-Neto, et P. G. Eriksson. Sequence stratigraphic framework and application to the Precambrian. *Marine and Petroleum Geology*, 33 : 26–33, 2012.
- G. Caumon. *Représentation, visualisation et modification de modeles volumiques pour les géosciences*. PhD thesis, éditeur inconnu, 2003.
- G. Caumon. Towards stochastic time-varying geological modeling. *Mathematical Geosciences*, 42(5) : 555–569, 2010.
- J. Cavero, N. Orellana, I. Yemez, V. Singh, et E. Izaguirre. Importance of conceptual geological models in 3d reservoir modelling. *First Break*, 34(7) : 39–49, 2016.
- T. C. Chamberlin. The method of multiple working hypotheses. *Science*, 15(366) : 92–96, 1890.
- T. Charles, J. Guemene, B. Corre, G. Vincent, O. Dubrule, *et al.* Experience with the quantification of subsurface uncertainties. In *SPE Asia Pacific Oil and Gas Conference and Exhibition*, 2001.

- J. Charreau, P.-H. Blard, N. Puchol, J.-P. Avouac, E. Lallier-Verges, D. Bourlès, R. Braucher, A. Gallaud, R. Finkel, M. Jolivet, *et al.* Paleo-erosion rates in central asia since 9ma : A transient increase at the onset of quaternary glaciations? *Earth and Planetary Science Letters*, 304(1) : 85–92, 2011.
- K. Charvin, K. Gallagher, G. L. Hampson, et R. Labourdette. A bayesian approach to inverse modelling of stratigraphy, part 1 : Method. *Basin Research*, 21(1) : 5–25, 2009.
- N. Cherpeau et G. Caumon. Stochastic structural modelling in sparse data situations. *Petroleum Geoscience*, 21(4) : 233–247, 2015.
- R. Cheverry, J. Edwards, et G. Caumon. Seismic-to-well tie using stochastic dynamic time warping. In *35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*, 2015.
- N. Christie-Blick. Onlap, offlap, and the origin of unconformity-bounded depositional sequences. *Marine Geology*, 97(1-2) : 35–56, 1991.
- N. Christie-Blick et N. W. Driscoll. Sequence stratigraphy. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23(1) : 451–478, 1995.
- C.-J. F. Chung, A. G. Fabbri, *et al.* Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 65(12) : 1389–1399, 1999.
- J. Clark, J. Overpeck, T. Webb, et W. Patterson. Pollen stratigraphic correlation and dating of barrier-beach peat sections. *Review of palaeobotany and palynology*, 47(1) : 145–168, 1986.
- R. Clark et R. Thompson. A new statistical approach to the alignment of time series. *Geophysical Journal International*, 58(3) : 593–607, 1979.
- P. D. Clift. Controls on the erosion of cenozoic asia and the flux of clastic sediment to the ocean. *Earth and Planetary Science Letters*, 241(3) : 571–580, 2006.
- H. E. Clifton. Sedimentologic approaches to paleobathymetry, with applications to the merced formation of central california. *Palaios*, p. 507–522, 1988.
- D. R. Collins et J. H. Doveton. Automated correlation based on Markov analysis of vertical successions and Walther’s law. In *Computers in geology - 25 years of progress*, p. 121–132. Oxford University Press, Inc., New York, NY, USA, 1993.
- L. Colombera, F. Felletti, N. P. Mountney, et W. D. McCaffrey. A database approach for constraining stochastic simulations of the sedimentary heterogeneity of fluvial reservoirs. *AAPG Bulletin*, 96(11) : 2143–2166, 2012. doi : 10.1306/04211211179.
- S. Compton et D. Hale. Estimating vp/vs ratios using smooth dynamic image warping. *Geophysics*, 79(6) : V201–V215, 2014.
- T. Cross, M. Baker, M. Chapin, M. Clark, M. Gardner, M. Hanson, M. Lessenger, L. Little, K. McDonough, M. Sonnenfeld, *et al.* Applications of high-resolution sequence stratigraphy to reservoir analysis. *Collection Colloques et Seminaires-Institut Francais Du Petrole*, 51 : 11–11, 1993.
- T. A. Cross et P. W. Homewood. Amantz gressly’s role in founding modern stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 109(12) : 1617–1630, 1997.
- T. A. Cross et M. A. Lessenger. Sediment volume partitioning : rationale for stratigraphic model evaluation and high-resolution stratigraphic correlation. *Predictive High Resolution Sequence Stratigraphy : Norwegian Petroleum Society, Special Publication*, 8 : 171–196, 1998.

- T. A. Cross et M. A. Lessenger. Construction and application of a stratigraphic inverse model. In *Numerical Experiments in Stratigraphy : Recent Advances in Stratigraphic and Sedimentologic Computer Simulations*, vol. 62, p. 69–83. SEPM, Special Publications, 1999.
- F. Cubizolle, T. Valding, S. Lacaze, F. Pauget, *et al.* Global method for seismic-well tie based on real time synthetic model. In *2015 SEG Annual Meeting*, 2015.
- E. Damsleth, V. Sangolt, G. Aamodt, *et al.* Sub-seismic faults can seriously affect fluid flow in the njord field off western norway-a stochastic fault modeling case study. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1998.
- J. C. Davis. *Statistics and Data Analysis in Geology*. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 1973. ISBN 0471198951.
- L. M. de Vries, J. Carrera, O. Falivene, O. Gratacós, et L. J. Slooten. Application of multiple point geostatistics to non-stationary images. *Mathematical Geosciences*, 41(1) : 29–42, 2009.
- W. E. Dean et R. Y. Anderson. Application of some correlation coefficient techniques to time-series analysis. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 6(4) : 363–372, 1974.
- A. Delcoigne et P. Hansen. Sequence comparison by dynamic programming. *Biometrika*, p. 661–664, 1975.
- J. Doveton. Chapter 6 : Lateral correlation and interpolation of logs. In *Geologic log analysis using computer methods*, p. 127–150. American Association of Petroleum Geologists, 1994.
- J. Doveton et S. Prenskey. Geological applications of wireline logs : a synopsis of developments and trends. *The Log Analyst*, 33(3) : 286–303, 1992.
- S. Dreyfus. Richard bellman on the birth of dynamic programming. *Operations Research*, 50(1) : 48–51, 2002.
- G. Dromart, J.-P. Garcia, P. Allemand, F. Gaumet, et B. Rousselle. A volume-based approach to calculation of ancient carbonate accumulations. *The Journal of geology*, 110(2) : 195–210, 2002.
- C. N. Drummond et B. H. Wilkinson. Stratal thickness frequencies and the prevalence of orderedness in stratigraphic sequences. *The Journal of Geology*, 104(1) : 1–18, 1996.
- M. Dupertuis, B. Acklin, et M. Proctor. Generalization of complex snell–descartes and fresnel laws. *JOSA A*, 11(3) : 1159–1166, 1994.
- J. A. Edgar et M. van der Baan. How reliable is statistical wavelet estimation? *Geophysics*, 76(4) : V59–V68, 2011.
- J. Edwards, F. Lallier, G. Caumon, et C. Carpentier. Assessing uncertainty in stratigraphic correlation : A stochastic method based on dynamic time warping. In *Second EAGE Integrated Reservoir Modelling Conference*, 2014.
- J. Edwards, F. Lallier, et G. Caumon. Using a forward model as training model for 3d stochastic multi-well correlation. In *Second Conference on Forward Modelling of Sedimentary Systems*, 2016.
- A. L. Eide, H. Omre, B. Ursin, *et al.* Stochastic reservoir characterization conditioned on seismic data. In *Scho (eds), Geostatistics Wollongong'96*, 1996.
- E. E. Einstein, K. W. Edwards, *et al.* Comparison of an expert system to human experts in well-log analysis and interpretation. *SPE Formation Evaluation*, 5(01) : 39–45, 1990.

- A. Embry et E. Johannessen. T–r sequence stratigraphy, facies analysis and reservoir distribution in the uppermost triassic–lower jurassic succession, western sverdrup basin, arctic canada. *Arctic Geology and Petroleum Potential, Special Publication, 2* : 121–146, 1992.
- A. F. Embry. Transgressive-regressive (tr) sequence stratigraphy. In *Gulf Coast SEPM Conference Proceedings, Houston*, p. 151–172, 2002.
- W. England et C. Townsend. The effects of faulting on production from a shallow marine reservoir : a study of the relative importance of fault parameters. In *SPE annual technical conference*, p. 279–294, 1998.
- O. Falivene, A. Frascati, S. Gesbert, J. Pickens, Y. Hsu, et A. Rovira. Automatic calibration of stratigraphic forward models for predicting reservoir presence in exploration. *AAPG Bulletin*, 98(9) : 1811–1835, 2014.
- J. H. Fang, H. C. Chen, A. W. Shultz, et W. Mahmoud. Computer-aided well log correlation. *AAPG Bulletin*, 76(3) : 307–317, 1992.
- Q. Fisher et R. Knipe. The permeability of faults within siliciclastic petroleum reservoirs of the north sea and norwegian continental shelf. *Marine and Petroleum Geology*, 18(10) : 1063–1081, 2001.
- Q. Fisher, S. Harris, E. McAllister, R. Knipe, et A. Bolton. Hydrocarbon flow across faults by capillary leakage revisited. *Marine and Petroleum Geology*, 18(2) : 251–257, 2001.
- S. Fomel. Local seismic attributes. *Geophysics*, 72(3) : A29–A33, 2007.
- N. Fredman, J. Tveranger, S. Semshaug, A. Braathen, et E. Sverdrup. Sensitivity of fluid flow to fault core architecture and petrophysical properties of fault rocks in siliciclastic reservoirs : a synthetic fault model study. *Petroleum Geoscience*, 13(4) : 305–320, 2007.
- C. S. Fulthorpe. Geological controls on seismic sequence resolution. *GEOLOGY*, 19 : 61–65, 1991.
- W. E. Galloway. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis i : architecture and genesis of flooding-surface bounded depositional units. *AAPG bulletin*, 73(2) : 125–142, 1989.
- W. E. Galloway. Genetic stratigraphic sequences in basin analysis I : Application to northwest Gulf of Mexico Cenozoic basin. *AAPG Bulletin*, 73(2) : 125–142, 1989a.
- M. R. Gani. Lithostratigraphy versus chronostratigraphy in facies correlations of quaternary deltas : Application of bedding correlation. *Special Publications of SEPM*, 2005.
- J. Gari. *Modélisation stratigraphique haute résolution 3D de systèmes sédimentaires carbonatés : les affleurements de la marge carbonatée du Beausset d’âge Cénomanién à Coniacien moyen (Provence, France)*. PhD thesis, Université de Provence, Marseille, France, 2007.
- Y. Gaudemer, P. Tapponnier, B. Meyer, G. Peltzer, G. Shunmin, C. Zhitai, D. Huagung, et I. Cifuentes. Partitioning of crustal slip between linked, active faults in the eastern qilian shan, and evidence for a major seismic gap, the ‘tianshu gap’, on the western haiyuan fault, gansu (china). *Geophysical Journal International*, 120(3) : 599–645, 1995.
- R. G. Gibson. Physical character and fluid-flow properties of sandstone-derived fault zones. *Geological Society, London, Special Publications*, 127(1) : 83–97, 1998.
- G. K. Gilbert. The inculcation of scientific method by example, with an illustration drawn from the quaternary geology of utah. *american Journal of science*, 31(184) : 284–299, 1886.

- J. A. Goff. Simulation of stratigraphic architecture from statistical and geometrical characterizations. *Mathematical Geology*, 32(7) : 765–786, 2000. doi : 10.1023/A:1007579922670.
- A. Gordon. Slotseq : a fortran iv program for comparing two sequences of observations. *Computers & Geosciences*, 6(1) : 7–20, 1980.
- A. Gordon et R. Reyment. Slotting of borehole sequences. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 11(3) : 309–327, 1979.
- D. Granjeon. *Modélisation stratigraphique déterministe : conception et applications d'un modèle diffusif 3 D multilithologique*. PhD thesis, Université de Rennes 1, 1997.
- S. M. Greenlee, W. J. Devlin, K. G. Miller, G. S. Mountain, et P. B. Flemings. Integrated sequence stratigraphy of neogene deposits, New Jersey continental shelf and slope : Comparison with the Exxon model. *Geological Society of America Bulletin*, 104 : 1403–1411, 1992.
- A. Gressly. Observations géologiques sur le jura soleurois (vol. 2). *Neuchâtel : Nouveaux mémoires de la Société Helvétique des Sciences Naturelles*, 1838.
- C. M. Griffiths et S. Bakke. Interwell matching using a combination of petrophysically derived numerical lithologies and gene-typing techniques. *Geological Society, London, Special Publications*, 48(1) : 133–151, 1990.
- F. B. Guardiano et R. M. Srivastava. Multivariate geostatistics : beyond bivariate moments. In *Geostatistics Troia'92*, p. 133–144. Springer, 1993.
- J. Guex et E. Davaud. Unitary associations method : use of graph theory and computer algorithm. *Computers & Geosciences*, 10(1) : 69–96, 1984.
- F. Guillocheau. Modalités d'empilement des séquences génétiques dans un bassin de plateforme (Dévonien Armoricaïn) : nature et distorsion des différents ordres de séquences de dépôts emboîtés. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 15(2) : 383–410, 1991.
- F. Guillocheau. Nature, rank and origin of phanerozoic sedimentary cycles. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2. Sciences de la terre et des planètes*, 320(12) : 1141–1157, 1995.
- F. Guillocheau, D. Rouby, C. Robin, C. Helm, N. Rolland, C. Le Carlier de Veslud, et J. Braun. Quantification and causes of the terrigenous sediment budget at the scale of a continental margin : a new method applied to the namibia–south africa margin. *Basin Research*, 24(1) : 3–30, 2012.
- Z. Gvirtzman, I. Csato, et D. Granjeon. Constraining sediment transport to deep marine basins through submarine channels : The levant margin in the late cenozoic. *Marine Geology*, 347 : 12–26, 2014.
- H. H. Haldorsen et E. Damsleth. Stochastic modeling. *Journal of Petroleum Technology*, 42 : 404–412, 1990.
- D. Hale. Dynamic warping of seismic images. *Geophysics*, 78(2) : S105–S115, 2013.
- A. Hallam. The depth significance of shales with bituminous laminae. *Marine Geology*, 5(5-6) : 481–493, 1967.
- A. Hallam. A review of the broad pattern of jurassic sea-level changes and their possible causes in the light of current knowledge. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 167(1) : 23–37, 2001.

- T. C. Hanks, R. C. Bucknam, K. R. Lajoie, et R. E. Wallace. Modification of wave-cut and faulting-controlled landforms. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth (1978–2012)*, 89(B7) : 5771–5790, 1984.
- J. W. Harbaugh et D. F. Merriam. *Computer applications in stratigraphic analysis*. Wiley, 1968.
- P. M. Harris, J. Kenter, T. Playton, M. Andres, G. Jones, et M. Levy. Enhancing subsurface reservoir models—an integrated mps approach using outcrop analogs, modern analogs, and forward stratigraphic models. In *Annual Convention and Exhibition*, 2011.
- W. W. Hay, C. A. Shaw, et C. N. Wold. Mass-balanced paleogeographic reconstructions. *Geologische Rundschau*, 78(1) : 207–242, 1989.
- J. E. Hazel. Binary coefficients and clustering in biostratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 81(11) : 3237–3252, 1970.
- W. Helland-Hansen et J. G. Gjelberg. Conceptual basis and variability in sequence stratigraphy : a different perspective. *Sedimentary Geology*, 92(1) : 31–52, 1994.
- F. Herman et J.-D. Champagnac. Plio-pleistocene increase of erosion rates in mountain belts in response to climate change. *Terra Nova*, 28(1) : 2–10, 2016.
- R. H. Herrera, S. Fomel, et M. van der Baan. Automatic approaches for seismic to well tying. *Interpretation*, 2(2) : SD9–SD17, 2014.
- J. Hladil, M. Vondra, P. Cejchan, R. Vich, L. Koptikova, et L. Slavik. The dynamic time warping approach to comparison of magnetic-susceptibility logs and application to Lower Devonian calciturbidites (Prague synform, Bohemian Massif). *Geologica Belgica*, 13(4) : 385–406, 2010.
- L. Holden, P. Mostad, B. F. Nielsen, J. Gjerde, C. Townsend, et S. Ottesen. Stochastic structural modeling. *Mathematical geology*, 35(8) : 899–914, 2003.
- M. Holgate. The microlog as a porosity datum for the neutron log in the swan hills field, alberta. *Trans., CIM*, p. 324–328, 1960.
- K. Hollund, P. Mostad, B. F. Nielsen, L. Holden, J. Gjerde, M. G. Contursi, A. J. McCann, C. Townsend, et E. Sverdrup. Havana—a fault modeling tool. *Norwegian Petroleum Society Special Publications*, 11 : 157–171, 2002.
- P. Homewood, F. Guillocheau, R. Eschard, et T. Cross. Corrélations haute résolution et stratigraphie génétique : une démarche intégrée. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 16(2) : 357–381, 1992.
- P. Homewood, P. Mauriaud, et F. Lafont. *Best practices in sequence stratigraphy : for explorationists and reservoir engineers*, vol. 25. Editions Technip, 2000.
- J. A. Howell. A fortran 77 program for automatic stratigraphic correlation. *Computers and Geosciences*, 9(3) : 311–327, 1983.
- L. Hu et T. Chugunova. Multiple-point geostatistics for modeling subsurface heterogeneity : A comprehensive review. *Water Resources Research*, 44(11), 2008.
- J. Hutton. X. theory of the earth ; or an investigation of the laws observable in the composition, dissolution, and restoration of land upon the globe. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 1(02) : 209–304, 1788.

- J. Hutton. *Theory of the earth : With proofs and illustrations*, vol. 1. Library of Alexandria, 1795.
- A. Irving, E. Robert, *et al.* Optimisation of uncertain structural parameters using production and observation well data. In *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, 2010.
- M. D. Jackson, G. J. Hampson, et R. P. Sech. Three-dimensional modeling of a shoreface-shelf parasequence reservoir analog : Part 2. geologic controls on fluid flow and hydrocarbon recovery. *AAPG bulletin*, 93(9) : 1183–1208, 2009.
- J. Johnson et M. Murphy. Time-rock model for siluro-devonian continental shelf, western united states. *Geological Society of America Bulletin*, 95(11) : 1349–1359, 1984.
- R. Jonkman, C. Bos, J. Breunese, D. Morgan, J. Spencer, E. Søndena, *et al.* Best practices and methods in hydrocarbon resource estimation, production and emissions forecasting, uncertainty evaluation and decision making. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 5 (02), 2002.
- C. Julio, F. Lallier, et G. Caumon. Accounting for seismic trends in stochastic well correlation. In *Geostatistics Oslo 2012*, p. 251–262. Springer, 2012.
- P. Kedzierski. *Intégration de connaissances sédimentologiques et stratigraphiques dans la modélisation 3D des faciès sédimentaires marins*. PhD thesis, Vandoeuvre-les-Nancy, INPL, 2007.
- F. Kemp. An algorithm for the stratigraphic correlation of well logs. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 14(3) : 271–285, 1982.
- C. S. C. Kendall, J. Strobel, R. Cannon, J. Bezdek, et G. Biswas. The simulation of the sedimentary fill of basins. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 96(B4) : 6911–6929, 1991.
- R. Knipe. Faulting processes and fault seal. *Structural and tectonic modelling and its application to petroleum geology*, p. 325–342, 1992.
- B. Koehrer, T. Aigner, et M. Pöppelreiter. Field-scale geometries of upper khuff reservoir geobodies in an outcrop analogue (oman mountains, sultanate of oman). *Petroleum Geoscience*, 17(1) : 3–16, 2011.
- F. Lallier. *Corrélation stratigraphique stochastique de puits*. PhD thesis, Université de Lorraine, 2012.
- F. Lallier, S. Viseur, J. Borgomano, G. Caumon, *et al.* 3D stochastic stratigraphic well correlation of carbonate ramp systems. In *International Petroleum Technology Conference*, 2009.
- F. Lallier, G. Caumon, J. Borgomano, S. Viseur, F. Fournier, C. Antoine, et T. Gentilhomme. Relevance of the stochastic stratigraphic well correlation approach for the study of complex carbonate settings : application to the Malampaya buildup (offshore Palawan, Philippines). *Geological Society, London, Special Publications*, 370(1) : 265–275, 2012.
- F. Lallier, C. Antoine, J. Charreau, G. Caumon, et J. Ruiu. Management of ambiguities in magnetostratigraphic correlation. *Earth and Planetary Science Letters*, 371 : 26–36, 2013.
- F. Lallier, G. Caumon, J. Borgomano, S. Viseur, J.-J. Royer, et C. Antoine. Uncertainty assessment in the stratigraphic well correlation of a carbonate ramp : Method and application to the beausset basin, se france. *Comptes Rendus Geoscience*, 2016.

- D. T. Lawrence, M. Doyle, et T. Aigner. Stratigraphic simulation of sedimentary basins : Concepts and calibration (1). *AAPG Bulletin*, 74(3) : 273–295, 1990.
- M. Lecour, R. Cognot, I. Duvinage, P. Thore, et J.-C. Dulac. Modelling of stochastic faults and fault networks in a structural uncertainty study. *Petroleum Geoscience*, 7(S) : S31–S42, 2001.
- V. Levenshtein. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. In *Soviet Physics-Doklady*, vol. 10, p. 707–710. 1966.
- D. Lineman, J. Mendelson, et M. N. Toksoz. Well-to-well log correlation using knowledge-based systems and dynamic depth warping. Technical report, Massachusetts Institute of Technology. Earth Resources Laboratory, 1987.
- C. L. Liner et R. G. Clapp. Nonlinear pairwise alignment of seismic traces. *The Leading Edge*, 23(11) : 1146–1150, 2004.
- Y. Liu. Using the snesim program for multiple-point statistical simulation. *Computers & Geosciences*, 32(10) : 1544–1563, 2006.
- G. I. López. Walther’s law of facies. *Encyclopedia of Scientific Dating Methods*, p. 957–958, 2015.
- S. M. Luthi et I. D. Bryant. Well-log correlation using a back-propagation neural network. *Mathematical geology*, 29(3) : 413–425, 1997.
- C. Lyell. *Principles of geology*. John Murray, London, 1830-1833.
- J.-L. Mallet. *Geomodeling*. Oxford University Press, 2002.
- C. J. Mann et T. P. Dowell. Quantitative lithostratigraphic correlation of subsurface sequences. *Computers & Geosciences*, 4(3) : 295–306, 1978.
- T. Manzocchi, J. Walsh, P. Nell, et G. Yielding. Fault transmissibility multipliers for flow simulation models. *Petroleum Geoscience*, 5(1) : 53–63, 1999.
- T. Manzocchi, J. N. Carter, A. Skorstad, B. Fjellvoll, K. D. Stephen, J. Howell, J. D. Matthews, J. J. Walsh, M. Nepveu, C. Bos, *et al.* Sensitivity of the impact of geological uncertainty on production from faulted and unfaulted shallow-marine oil reservoirs : objectives and methods. *Petroleum Geoscience*, 14(1) : 3–15, 2008.
- G. Mariethoz et P. Renard. Reconstruction of incomplete data sets or images using direct sampling. *Mathematical Geosciences*, 42(3) : 245–268, 2010.
- G. Mariethoz, P. Renard, et J. Straubhaar. The Direct Sampling method to perform multiple-point geostatistical simulations. *Water Resources Research*, 46(11), 2010.
- D. G. Martinson, W. Menke, et P. Stoffa. An inverse approach to signal correlation. *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*, 87(B6) : 4807–4818, 1982.
- G. Massonnat, E. Pernarcic, *et al.* Neptune : An innovative approach to significantly improve reservoir modeling in carbonate reservoirs. In *Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference*, 2002.
- G. Massonnat *et al.* Sampling space of uncertainty through stochastic modelling of geological facies. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1997.
- D. Matuszak. Stratigraphic correlation of subsurface geologic data by computer. *Journal of the International Association for Mathematical Geology*, 4(4) : 331–343, 1972.

- D. F. Merriam. Computer applications in stratigraphic problem solving. *Decisionmaking in the mineral industry : Canadian Inst. Mining & Metallurgy, Sp*, 12 : 139–147, 1971.
- F. Métivier et Y. Gaudemer. Mass transfer between eastern tien shan and adjacent basins (central asia) : constraints on regional tectonics and topography. *Geophysical Journal International*, 128(1) : 1–17, 1997.
- F. Métivier, Y. Gaudemer, P. Tapponnier, et M. Klein. Mass accumulation rates in asia during the cenozoic. *Geophysical Journal International*, 137(2) : 280–318, 1999.
- A. D. Miall. Reservoir heterogeneities in fluvial sandstones : lessons from outcrop studies. *AAPG bulletin*, 72(6) : 682–697, 1988.
- A. D. Miall. *The Geology of Stratigraphic Sequences*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1997.
- A. D. Miall. Stratigraphy : The future of time. In *Stratigraphy : A Modern Synthesis*, p. 371–433. Springer, 2016.
- G. V. Middleton. Johannes walther’s law of the correlation of facies. *Geological Society of America Bulletin*, 84(3) : 979–988, 1973.
- P. W. Mirowski, D. M. Tetzlaff, R. C. Davies, D. S. McCormick, N. Williams, et C. Signer. Stationarity scores on training images for multipoint geostatistics. *Mathematical geosciences*, 41(4) : 447–474, 2009.
- R. M. Mitchum, P. R. Vail, et J. B. Sangree. Seismic stratigraphy and global changes of sea level : Part 6. stratigraphic interpretation of seismic reflection patterns in depositional sequences : Section 2. application of seismic reflection configuration to stratigraphic interpretation. In *Seismic Stratigraphy : Applications to Hydrocarbon Exploration*. AAPG Special Volumes, 1977b.
- P. Molnar. Late cenozoic increase in accumulation rates of terrestrial sediment : how might climate change have affected erosion rates ? *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 32 : 67–89, 2004.
- P. Molnar et P. England. Late cenozoic uplift of mountain ranges and global climate change : chicken or egg ? *Nature*, 346(6279) : 29–34, 1990.
- J. Moran, M. Couffleau, G. Miller, J. Timmons, *et al.* Automatic computation of dipmeter logs digitally recorded on magnetic tapes. *Journal of Petroleum Technology*, 14(07) : 771–782, 1962.
- A. Munoz et D. Hale. Automatically tying well logs to seismic data. *Center for Wave Phenomena, Colorado School of Mines, Golden, CO80401, USA*, p. 253–260, 2012.
- A. Muñoz et D. Hale. Automatic simultaneous multiple well ties. *Geophysics*, 80(5) : IM45–IM51, 2015.
- T. Muto et R. J. Steel. Principles of regression and transgression : the nature of the interplay between accommodation and sediment supply : perspectives. *Journal of Sedimentary Research*, 67(6), 1997.
- S. Nakagawa et H. Nakanishi. Speaker-independent english consonant and japanese word recognition by a stochastic dynamic time warping method. *Journal of the Institution of Electronics and Telecommunication Engineers*, 34(1) : 87–95, 1988.
- J. Neal, D. Risch, et P. Vail. Sequence stratigraphy—a global theory for local success. *Oilfield review*, 2(1) : 51–62, 1993.

- S. B. Needleman et C. D. Wunsch. A general method applicable to the search for similarities in the amino acid sequence of two proteins. *Journal of molecular biology*, 48(3) : 443–453, 1970.
- N. Neidell. Ambiguity functions and the concept of geological correlation. In *Symposium on computer applications in petroleum exploration*, vol. 40, p. 19–33, 1969.
- U. Nicholson, B. Es, P. D. Clift, R. Flecker, et D. I. Macdonald. The sedimentary and tectonic evolution of the amur river and north sakhalin basin : new evidence from seismic stratigraphy and neogene–recent sediment budgets. *Basin Research*, 2016.
- C. Notredame, D. G. Higgins, et J. Heringa. T-coffee : A novel method for fast and accurate multiple sequence alignment. *Journal of molecular biology*, 302(1) : 205–217, 2000.
- R. Olea. Expert systems for automated correlation and interpretation of wireline logs. *Mathematical Geology*, 26(8) : 879–897, 1994.
- R. Olea, J. Davis, *et al.* An artificial intelligence approach to lithostratigraphic correlation using geophysical well logs. In *SPE Annual Technical Conference and Exhibition*, 1986.
- R. A. Olea. Correlator 5.2 - a program for interactive lithostratigraphic correlation of wireline logs. *Computers and Geosciences*, 30(6) : 561–567, 2004.
- S. Ottesen, C. Townsend, et K. M. Øverland. Investigating the effect of varying fault geometry and transmissibility on recovery : Using a new workflow for structural uncertainty modeling in a clastic reservoir. In *Evaluating fault and cap rock seals : AAPG Hedberg Series*, vol. 2, p. 125–136. AAPG Special Volumes, 2005.
- Paradigm. SKUA-GOCAD. <http://www.pdgm.com/products/skua-gocad/>, 2015.
- B. Pels, J. J. Keizer, et R. Young. Automated biostratigraphic correlation of palynological records on the basis of shapes of pollen curves and evaluation of next-best solutions. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 124 : 17–37, 1996.
- R. Peveraro, J. Lee, *et al.* Hesper : An expert system for petrophysical formation evaluation. In *European Petroleum Conference*, 1988.
- A. Pons, J. Edwards, et G. Caumon. Uncertainty method and visualization in stratigraphic correlations - method and example in a sequence stratigraphic setting. In *35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*, 2015.
- H. Posamentier. Eustatic controls on clastic deposition ii—sequence and systems tract models. *Special Publications of SEPM*, 1988.
- H. Posamentier et D. James. An overview of sequence-stratigraphic concepts : uses and abuses. *Sequence stratigraphy and facies associations*, p. 3–18, 1993.
- H. W. Posamentier et G. P. Allen. Variability of the sequence stratigraphic model : effects of local basin factors. *Sedimentary geology*, 86(1-2) : 91–109, 1993.
- F. W. Preston et J. Henderson. *Fourier series characterization of cyclic sediments for stratigraphic correlation*. Kansas Geological Survey, 1964.
- M. J. Pyrcz et C. D. White. Uncertainty in reservoir modeling. *Interpretation*, 3(2) : SQ7–SQ19, 2015.
- F. Qayyum, N. Sakuyama, V. Romanova, A. Huck, et P. de Groot. Seismic correlations of well markers in difficult settings-an example from the nelson field-forties sandstones. In *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 2017.

- U. Rathmann et J. Wilgen. Qwt user's guide. <http://qwt.sourceforge.net>, 2011.
- J. Rey. *Biostratigraphie et lithostratigraphie : principes fondamentaux, méthodes et applications*. Editions Technip, 1983.
- P. Ringrose et M. Bentley. *Reservoir model design*. Springer, 2016.
- P. Røe, F. Georgsen, et P. Abrahamsen. An uncertainty model for fault shape and location. *Mathematical Geosciences*, 46(8) : 957–969, 2014.
- D. Rouby, S. Bonnet, F. Guillocheau, K. Gallagher, C. Robin, F. Biancotto, O. Dauteuil, et J. Braun. Sediment supply to the orange sedimentary system over the last 150my : An evaluation from sedimentation/denudation balance. *Marine and Petroleum Geology*, 26(6) : 782–794, 2009.
- D. Rumelhart et J. McClelland. *Parallel Distributed Processing*. MIT Press, Cambridge, MA, 1986.
- Q. Sacchi, G. J. Weltje, et F. Verga. Towards process-based geological reservoir modelling : Obtaining basin-scale constraints from seismic and well data. *Marine and Petroleum Geology*, 61 : 56–68, 2015. doi : 10.1016/j.marpetgeo.2014.11.002.
- Q. Sacchi, E. S. Borello, G. J. Weltje, et R. Dalman. Increasing the predictive power of geostatistical reservoir models by integration of geological constraints from stratigraphic forward modeling. *Marine and Petroleum Geology*, 69 : 112–126, 2016.
- M. Sackin et D. Merriam. Autoassociation, a new geological tool. *Mathematical Geology*, 1 (1) : 7–16, 1969.
- M. J. Sackin, P. H. A. Sneath, et D. F. Merriam. *ALGOL program for cross-association of nonnumeric sequences using a medium-size computer*. State Geological Survey, University of Kansas, 1965.
- P. Sadler et R. Cooper. Chapter 2 best-fit intervals and consensus sequences : Comparison of the resolving power of traditional biostratigraphy and computer-assisted correlation. *TOPICS IN GEOBIOLOGY*, 21 : 50–91, 2003.
- H. Sakoe et S. Chiba. Dynamic programming algorithm optimization for spoken word recognition. *IEEE transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 26(1) : 43–49, 1978.
- P. Samson, O. Dubrule, N. Euler, *et al.* Quantifying the impact of structural uncertainties on gross-rock volume estimates. In *European 3-D Reservoir Modelling Conference*, 1996.
- A. E. Scheidegger. On the prediction of the reach and velocity of catastrophic landslides. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 5(4) : 231–236, 1973.
- W. Schlager. Accomodation and supply - a dual control on stratigraphic sequences. *Sedimentary Geology*, 86 : 111–136, 1993.
- W. Schlager. Type 3 sequence boundaries. *Special Publications of SEPM*, 63 : 35–45, 1999.
- C. H. Scholz, L. R. Sykes, et Y. P. Aggarwal. Earthquake prediction : A physical basis. *Science*, 181(4102) : 803–810, 1973.
- A. Seiler, S. Aanonsen, G. Evensen, O. Lia, *et al.* An elastic grid approach for fault uncertainty modelling and updating using the ensemble kalman filter. In *SPE EUROPEC/EAGE Annual Conference and Exhibition*, 2010.

- J. H. Shaw, C. D. Connors, J. Suppe, *et al.* Seismic interpretation of contractional fault-related folds : An aapg seismic atlas. *Studies in Geology*, 53, 2005.
- Z. K. Shipton, J. P. Evans, K. R. Robeson, C. B. Forster, et S. Snelgrove. Structural heterogeneity and permeability in faulted eolian sandstone : Implications for subsurface modeling of faults. *AAPG bulletin*, 86(5) : 863–883, 2002.
- R. Shuey. A simplification of the zoeppritz equations. *Geophysics*, 50(4) : 609–614, 1985.
- R. Simm et R. White. Tutorial : Phase, polarity and the interpreter’s wavelet. *first break*, 20(5), 2002.
- L. Sloss. Forty years of sequence stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 100(11) : 1661–1665, 1988.
- L. L. Sloss, W. C. Krumbein, et E. C. Dapples. Integrated facies analysis. In *Sedimentary Facies in Geologic History*, vol. 39 of *Memoir*, p. 91–124. Geological Society of America, 1949.
- T. F. Smith et M. S. Waterman. New stratigraphic correlation techniques. *Journal of Geology*, 88(4) : 451–457, 1980.
- T. F. Smith, M. S. Waterman, et W. M. Fitch. Comparative biosequence metrics. *Journal of Molecular Evolution*, 18(1) : 38–46, 1981.
- J. R. Southam et W. W. Hay. Correlation of stratigraphic sections by continuous variables. *Computers & Geosciences*, 4(3) : 257–260, 1978.
- N. Steno. *De solido intra solidum naturaliter contento dissertationis prodromus*. Florence, 1669.
- S. Strebelle. Conditional simulation of complex geological structures using multiple-point statistics. *Mathematical Geology*, 34(1) : 1–21, 2002.
- S. Strebelle et T. Zhang. Non-stationary multiple-point geostatistical models. *Geostatistics Banff 2004*, p. 235–244, 2005.
- S. Subbiah et S. Harrison. A method for multiple sequence alignment with gaps. *Journal of molecular biology*, 209(4) : 539–548, 1989.
- J. Suppe, G. T. Chou, et S. C. Hook. Rates of folding and faulting determined from growth strata. In *Thrust tectonics*, p. 105–121. Springer, 1992.
- S. Suzuki, G. Caumon, et J. Caers. Dynamic data integration for structural modeling : model screening approach using a distance-based model parameterization. *Computational Geosciences*, 12(1) : 105–119, 2008.
- P. Tapponnier, B. Meyer, J. P. Avouac, G. Peltzer, Y. Gaudemer, G. Shunmin, X. Hongfa, Y. Kelun, C. Zhitai, C. Shuahua, *et al.* Active thrusting and folding in the qilian shan, and decoupling between upper crust and mantle in northeastern tibet. *Earth and Planetary Science Letters*, 97(3) : 382–403, 1990.
- J. Testerman *et al.* A statistical reservoir-zonation technique. *Journal of Petroleum Technology*, 14(08) : 889–893, 1962.
- D. M. Tetzlaff et J. W. Harbaugh. *Simulating clastic sedimentation*. Computer Methods in the Geosciences. Springer, 1989.

- J. D. Thompson, D. G. Higgins, et T. J. Gibson. Clustal w : improving the sensitivity of progressive multiple sequence alignment through sequence weighting, position-specific gap penalties and weight matrix choice. *Nucleic acids research*, 22(22) : 4673–4680, 1994.
- R. Thompson et R. Clark. Sequence slotting for stratigraphic correlation between cores : theory and practice. In *Paleolimnology and the Reconstruction of Ancient Environments*, p. 229–240. Springer, 1989.
- P. Thore, A. Shtuka, M. Lecour, T. Ait-Ettajer, et R. Cognot. Structural uncertainties : Determination, management, and applications. *Geophysics*, 67(3) : 840–852, 2002.
- T. T. Tran. Improving variogram reproduction on dense simulation grids. *Computers & Geosciences*, 20(7-8) : 1161–1168, 1994.
- Trolltech. Qt. <https://www.qt.io/>, 1995.
- P. R. Vail, J.-P. Colin, R. J. D. Chêne, J. Kuchly, F. Mediavilla, et V. Triflieff. La stratigraphie séquentielle et son application aux corrélations chronostratigraphiques dans le jurassique du bassin de Paris. *Bulletin de la Société géologique de France*, 3(7) : 1301–1321, 1987.
- P. R. Vail, F. Audemard, S. A. Bowman, P. N. . Eisner, et C. Perez-Cruz. The stratigraphic signatures of tectonics, eustasy and sedimentology - an overview. In *Cycles and Events in Stratigraphy*, p. 617–659. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1991.
- J. Van Wagoner, H. Posamentier, R. Mitchum Jr, P. Vail, J. Sarg, T. Loutit, et J. Hardenbol. An overview of the fundamentals of sequence stratigraphy and key definitions. *Special Publications of SEPM*, 42 : 39–45, 1988.
- B. L. Varban et A. Guy Plint. Sequence stacking patterns in the western canada foredeep : Influence of tectonics, sediment loading and eustasy on deposition of the upper cretaceous kaskapau and cardium formations. *Sedimentology*, 55(2) : 395–421, 2008.
- T. Vermaas, A. Forzoni, et J. Storms. Drawing the line, when do we need process-based models? In *Second Conference on Forward Modelling of Sedimentary Systems*, 2016.
- G. Vincent, B. Corre, P. Thore, et al. Managing structural uncertainty in a mature field for optimal well placement. *SPE Reservoir Evaluation & Engineering*, 2(04) : 377–384, 1999.
- G. Vix, J. Edwards, et G. Caumon. Distality management in automatic well correlation. In *35th Gocad Meeting - 2015 RING Meeting*, 2015.
- D. Waltham et P. Burgess. Delta Modelling. <http://davidwaltham.com/wp-content/uploads/2014/01/DeltaModel.html>, 2015.
- J. Walther. *Einleitung in die Geologie als historische Wissenschaft : Beobachtungen über die Bildung der Gesteine und ihrer organischen Einschlüsse*. G. Fischer, 1894.
- L. Wang et T. Jiang. On the complexity of multiple sequence alignment. *Journal of computational biology*, 1(4) : 337–348, 1994.
- M. S. Waterman et R. Raymond. The match game : New stratigraphic correlation algorithms. *Mathematical Geology*, 19(2) : 109–127, 1987.
- R. J. Weldon et K. E. Sieh. Holocene rate of slip and tentative recurrence interval for large earthquakes on the san andreas fault, cajon pass, southern california. *Geological Society of America Bulletin*, 96(6) : 793–812, 1985.
- H. E. Wheeler. Time-stratigraphy. *AAPG Bulletin*, 42(5) : 1047–1063, 1958.

- H. E. Wheeler. Baselevel, lithosphere surface, and time-stratigraphy. *Geological Society of America Bulletin*, 75(7) : 599–610, 1964.
- L. Wheeler et D. Hale. Simultaneous correlation of multiple well logs. In *2014 SEG Annual Meeting*, 2014.
- L. F. Wheeler. *Automatic and simultaneous correlation of multiple well logs*. Colorado School of Mines, 2015.
- W. Whewell. *History of the Inductive Sciences : From the Earliest Times to the Present*. John W. Parker, 1837.
- R. White et R. Simm. Tutorial : Good practice in well ties. *First Break*, 21(10), 2003.
- J. K. Willenbring et D. J. Jerolmack. The null hypothesis : globally steady rates of erosion, weathering fluxes and shelf sediment accumulation during late cenozoic mountain uplift and glaciation. *Terra Nova*, 28(1) : 11–18, 2016.
- B. J. Willis et C. D. White. Quantitative outcrop data for flow simulation. *Journal of Sedimentary Research*, 70(4) : 788–802, 2000.
- R. Wood et A. Curtis. Geological prior information and its applications to geoscientific problems. *Geological Society, London, Special Publications*, 239(1) : 1–14, 2004.
- X. Wu et G. Caumon. Simultaneous multiple well-seismic ties using flattened synthetic and real seismograms. *Geophysics*, 82(1) : IM13–IM20, 2016.
- D. Yoon, L. Lallier, et L. Lanteaume. Inferring stratigraphic forward models quantitative information to asses stratigraphic well correlation uncertainty. In *79th EAGE Conference and Exhibition 2017*, 2017.
- L. Yose, A. Ruf, K. Al-Amari, I. A. Al-Hosani, S. Al-Maskari, S. Bachtel, N. Bin-Brek, G. Bloch, A. Gombos, B. Gorea, *et al.* New frontiers in 3d seismic characterization of carbonate reservoirs : Example from a supergiant field in abu Dhabi. In *Abu Dhabi International Conference and Exhibition*, 2004.
- P. Zhang, P. Molnar, et W. R. Downs. Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 myr ago due to the influence of climate change on erosion rates. *Nature*, 410(6831) : 891–897, 2001.

Annexe 1 : Corrélation des données de puits aux données sismiques

Ce travail a été réalisé dans le cadre du stage de Master de Rémy Cheverry dans l'équipe RING du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine) [Cheverry *et al.*, 2015].

Introduction

Les données de puits étant mesurées en profondeur et les données sismiques en temps double, c'est au géophysicien de corrélérer les surfaces géologiques aux réflecteurs sismiques. Bien que la corrélation sismique-puits soit une étape essentielle de la calibration sismique, cela reste un défi pour l'interpréteur. La méthode repose sur une suite d'étapes, décrites par White et Simm [2003]. Malgré cette démarche bien connue, le processus est long, et soumis aux erreurs humaines, notamment aux compétences de l'interpréteur, pouvant fausser la corrélation [Anderson et Newrick, 2008]. Pour réduire l'impact humain, Munoz et Hale [2012] et Herrera *et al.* [2014] développent indépendamment des méthodes automatiques de corrélation sismique-puits. Les deux méthodes sont basées sur l'algorithme de déformation temporelle (voir section 1.6).

Le processus de corrélation sismique-puits peut être divisé en différentes étapes, présentées sur la figure 11. Une fois que les données de puits sont importées, l'impédance acoustique et la réflectivité sont générées à partir des logs de densité et de vitesse. D'autre part, une ondelette est estimée à partir des données sismiques. L'ondelette traduit le signal acoustique qui est propagé dans les strates. Puis, le signal de réflectivité est converti de profondeur en temps double, en utilisant une fonction de conversion initiale. Enfin, le sismogramme synthétique est construit en convoluant la réflectivité avec l'ondelette. Un sismogramme synthétique, ou trace sismique, peut être défini comme une réponse temporelle directe unidimensionnelle (verticale) des surfaces au passage d'un pulse d'énergie à travers les strates. Cette réponse est régie par les lois de réflexion et réfraction de Snell-Descartes [Dupertuis *et al.*, 1994]. Les équations de Zoeppritz décrivent le partitionnement d'une onde d'énergie à une interface entre deux couches. En considérant comme première approximation un puits vertical, la réponse dépend seulement de deux propriétés des roches : la densité et la vitesse des ondes P [Shuey, 1985].

Une fois que les signaux (les sismogrammes sismique et synthétique) sont générés, le synthétique doit être étiré et compressé pour correspondre au mieux au sismogramme sismique. Ces déformations impliquent des variations de la fonction de conversion profondeur vers temps qui est récupérée. Nous proposons ici d'appliquer le DTW stochastique présenté par Lallier *et al.* [2012] à la corrélation des deux sismogrammes pour obtenir différentes fonctions de conversion temps-profondeur.

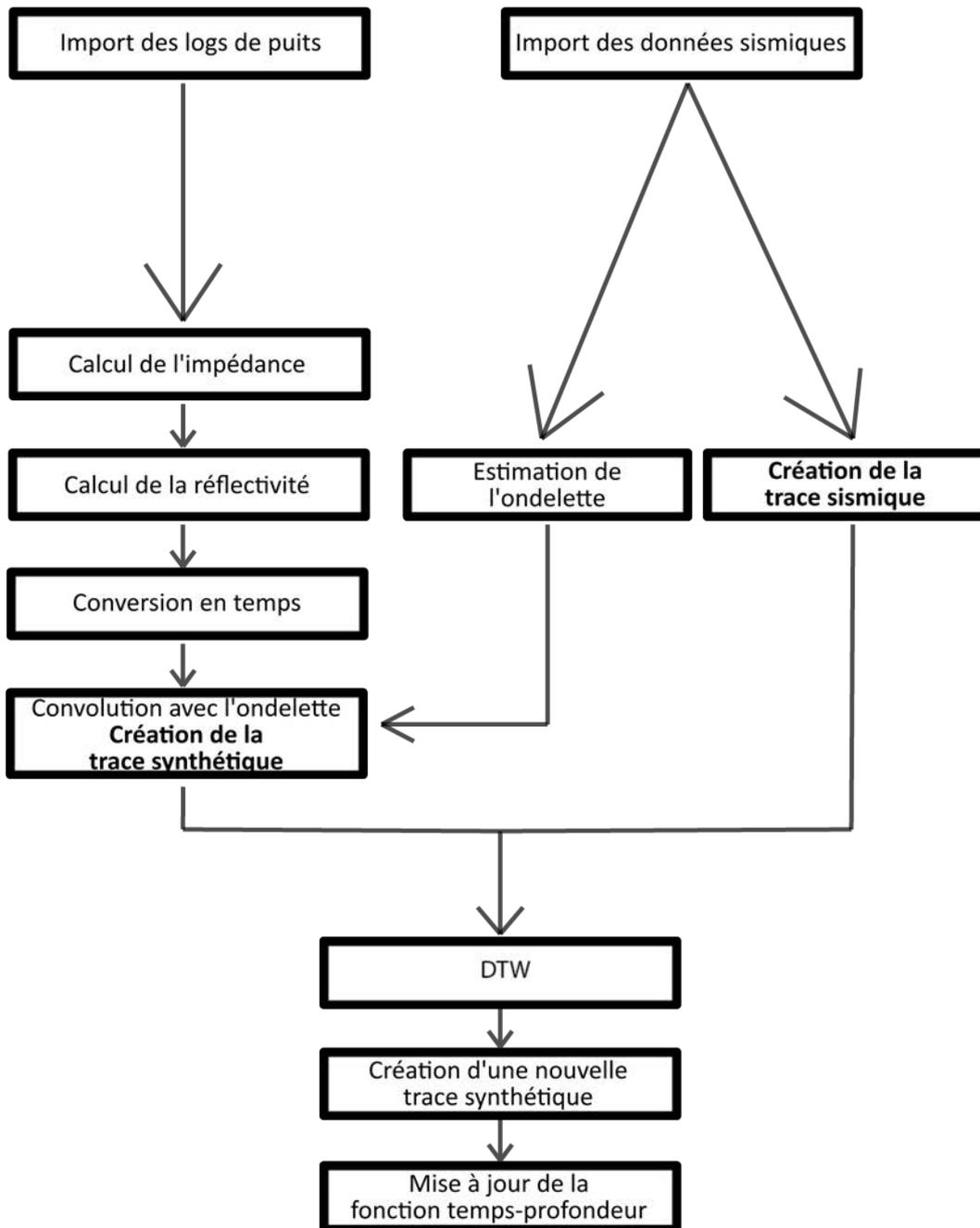


FIGURE 11 – Diagramme des étapes des méthodes de corrélation sismique-puits. Ces étapes peuvent varier légèrement entre différents auteurs ou logiciels. La conversion de profondeur vers temps peut intervenir avant le calcul de réflectivité.

Création de la trace synthétique

La méthode est appliquée sur un puits (API 49025230540000) tiré des données du Teapot Dome (Wyoming, États-Unis) du Rocky Mountain Oilfield Testing Center (RMOTC). Ce puits a été choisi car il ne présente aucun hiatus dans les données, des logs de densité et de lenteur des ondes P, échantillonnés tous les 0,5 pieds (0.15m) d'environ 200m de profondeur à 1,8km.

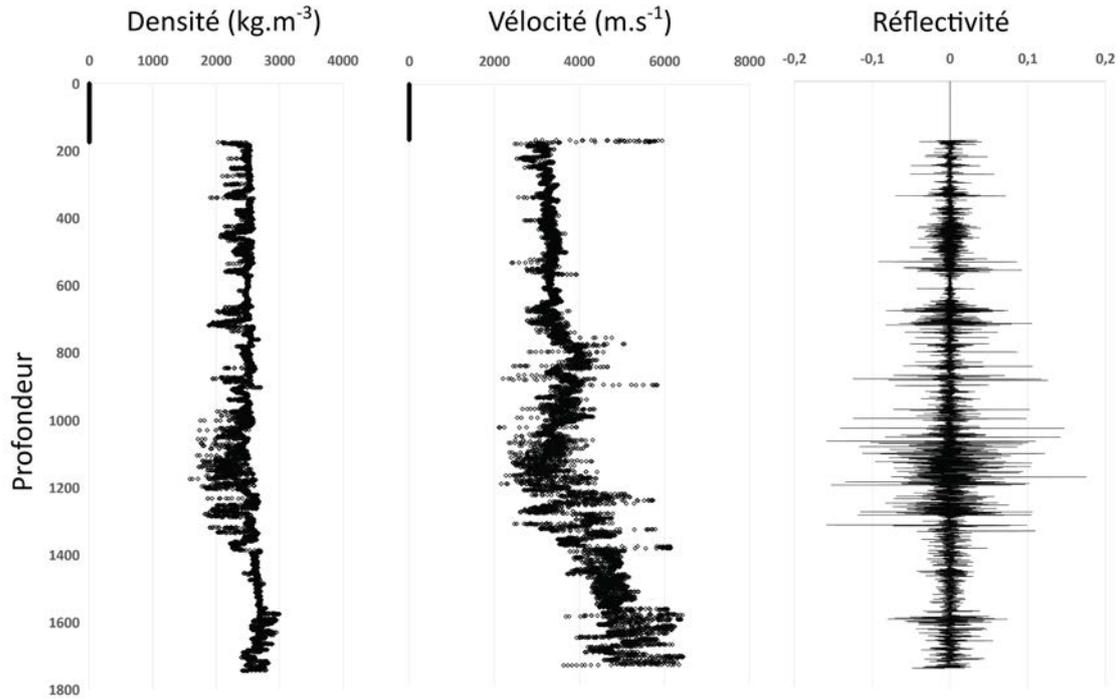


FIGURE 12 – logs et réflectivité sur le puits 49025230540000. Gauche : log de densité. Milieu : log de vélocité des ondes P. Droite : Réflectivité générée à partir de l’impédance acoustique.

Calcul de l’impédance acoustique

L’impédance acoustique correspond à l’opposition du milieu considéré au passage de l’onde acoustique. Elle est calculée selon les équations de Zoeppritz comme le produit de la vélocité des ondes P et du densité, suivant :

$$I(z) = \rho(z) * v(z) \quad (4)$$

avec I l’impédance, ρ le densité, v la vélocité des ondes P et z la profondeur. La vélocité des ondes P est obtenue en calculant l’inverse de la lenteur.

Calcul de la réflectivité

La réflectivité peut-être définie comme un contraste d’impédance acoustique (figure 12). Elle dépend donc des transitions entre les strates. Elle est calculée selon :

$$r(z) = \frac{I(z + \Delta z) - I(z)}{I(z + \Delta z) + I(z)} \quad (5)$$

avec r la réflectivité, I l’impédance acoustique et z la profondeur.

Estimation de l’ondelette

L’ondelette a un impact significatif sur la génération du sismogramme synthétique, et c’est donc une étape clé de la corrélation sismique-puits qui reste difficile [Angeleri, 1983]. De nombreuses méthodes existent pour estimer l’ondelette, des approches statistiques ou déterministes Edgar et van der Baan [2011]. Nous avons choisi une méthode simple, en considérant une ondelette Ricker constante avec un pic de fréquence (35Hz) équivalant à celui de la trace sismique, sans prendre en compte les changements nécessaires de la forme de l’ondelette avec

la profondeur en réponse à l'atténuation et aux effets de réflexions inter-bancs [Simm et White, 2002].

Conversion de la réflectivité de profondeur en temps

La réflectivité doit être convertie de profondeur en temps avant la convolution. La fonction de conversion initiale est généralement calculée à partir de mesures de tirs de test de vitesse ("check shot" en anglais), si disponible, ou du log de vélocité des ondes P. Ici, sans tirs de test, nous avons calculé la fonction de conversion suivant :

$$\tau_o(z) = \tau_{min} + 2 \int_{z_{min}}^z \frac{d\xi}{v_o(\xi)} \quad (6)$$

τ_{min} est la meilleure estimation de temps double vertical à la profondeur z_0 (approximativement 200m, ici). Sans information géologique pour la partie la plus en surface du puits, le temps double est défini en moyennant les premières vélocités mesurées sur le log. La fonction de conversion initiale est représentée sur la figure 13.

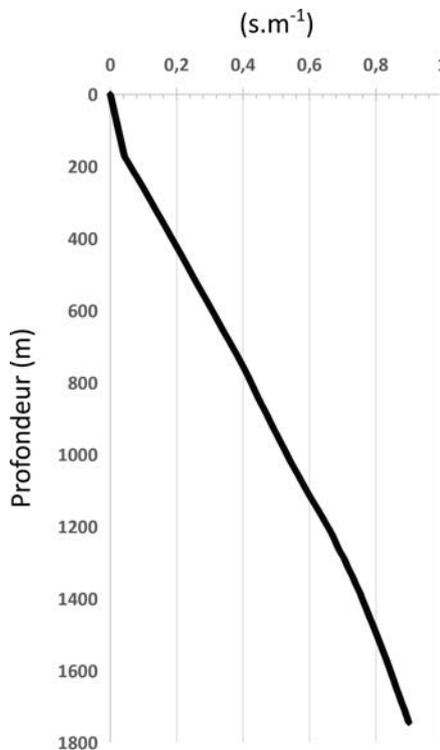


FIGURE 13 – Fonction initiale de conversion profondeur vers temps.

Convolution de la réflectivité avec l'ondelette

Une fois la réflectivité transformée en temps, elle peut être convoluée avec l'ondelette choisie. La convolution suit l'équation :

$$f(\tau) = \int_{z_{min}}^{z_{max}} r(z)wa[\tau - \tau_0(z)]dz \quad (7)$$

Nous avons décidé de convoluer la réflectivité directement avec l'expression analytique de

l'ondelette Ricker :

$$RickerWlt = (1 - 2\pi^2 f^2 t^2) e^{-\pi^2 f^2 t^2} \quad (8)$$

La convolution permet d'obtenir une trace synthétique. Les amplitudes des traces sismique et synthétique sont ensuite normalisées pour garantir qu'elles soient comparables. Pour ce faire, les amplitudes sont modifiées de sorte que leurs valeurs maximales soient identiques.

Puis, les traces sont interpolées, pour assurer que les deux signaux sont définis sur les mêmes pas de temps, en utilisant une interpolation Lagrangienne segmentée. Les traces sont ensuite ré-échantillonnées avec $\Delta t = 0.3ms$. Les deux signaux sont présentés sur la figure 14. Les signaux sont très différents, et leur corrélation n'est pas triviale. Nous allons donc utiliser l'algorithme de déformation temporelle dynamique (DTW) pour corrélérer les traces.

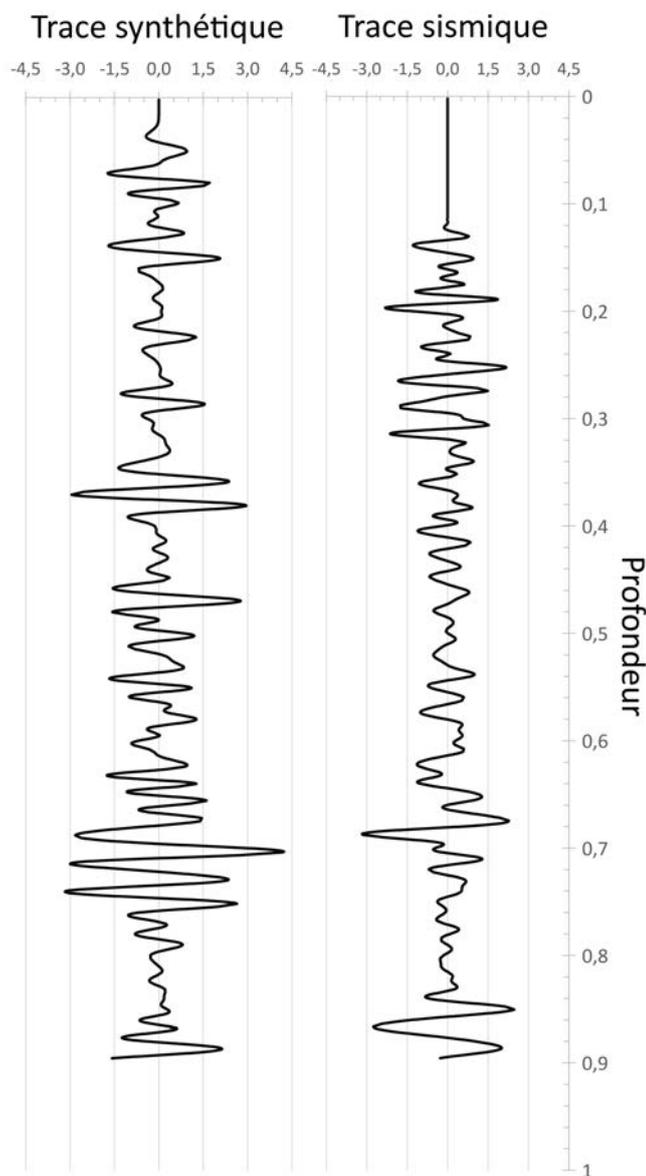


FIGURE 14 – Profil vertical des traces synthétique (gauche) et sismique (droite). Certains détails sont similaires, comme la dernière ondulation par exemple, mais les signaux sont toutefois difficilement corrélables.

Corrélation sismique-puits à l'aide de l'algorithme de déformation temporelle dynamique

Le DTW permet de définir une fonction $\tau(t)$ d'alignement de la trace synthétique $f(\tau)$ avec la trace sismique $g(t)$ [Muñoz et Hale, 2015]. Cette fonction satisfait l'équation :

$$f(\tau(t)) \approx g(t) \quad (9)$$

Herrera *et al.* [2014] ont comparé le DTW à une méthode utilisant des attributs sismiques locaux, présentée par Fomel [2007]. Ils ont montré que le DTW obtenait un plus grand coefficient de corrélation entre les signaux.

Approche stochastique

Ici nous appliquons la modification apportée par Lallier *et al.* [2012] au DTW pour ajouter une composante stochastique aux corrélations stratigraphiques (voir section 1.6). Cela permet de générer différents scénarios qui honorent les données.

Ainsi, nous pouvons générer différentes fonctions d'alignement des deux traces (figure 15). Ici, les chemins dans la table du DTW sont contraints par une “fenêtre” de 250 éléments d'épaisseur [Sakoe et Chiba, 1978].

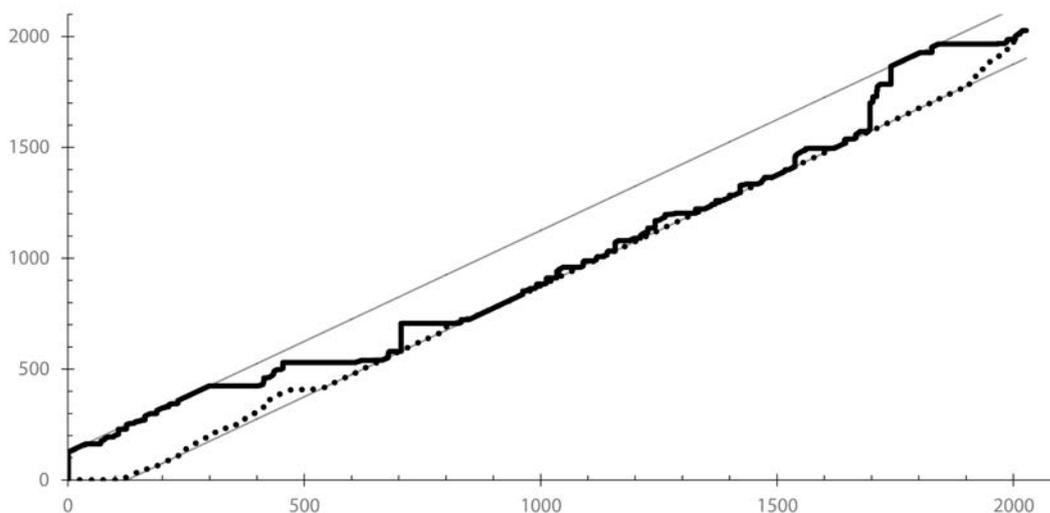


FIGURE 15 – Comparaison des chemins résultants de corrélations contrainte classique et stochastique. La contrainte est une “fenêtre” de 250 éléments d'épaisseur.

Récupération de la fonction de conversion temps-profondeur mise à jour

La dernière étape de la corrélation sismique-puits consiste à récupérer la fonction de conversion temps-profondeur mise à jour à l'aide du résultat de la corrélation (figure 16). Cela se fait facilement en remplaçant les séries temporelles initiales par les séries modifiées par la fonction d'alignement.

Conclusion

La corrélation sismique-puits est une tâche fastidieuse, impliquant de nombreuses étapes. Des méthodes manuelles existent mais sont déterministes et non reproductibles. Nous avons utilisé une version stochastique de l'algorithme de déformation temporelle pour aligner une

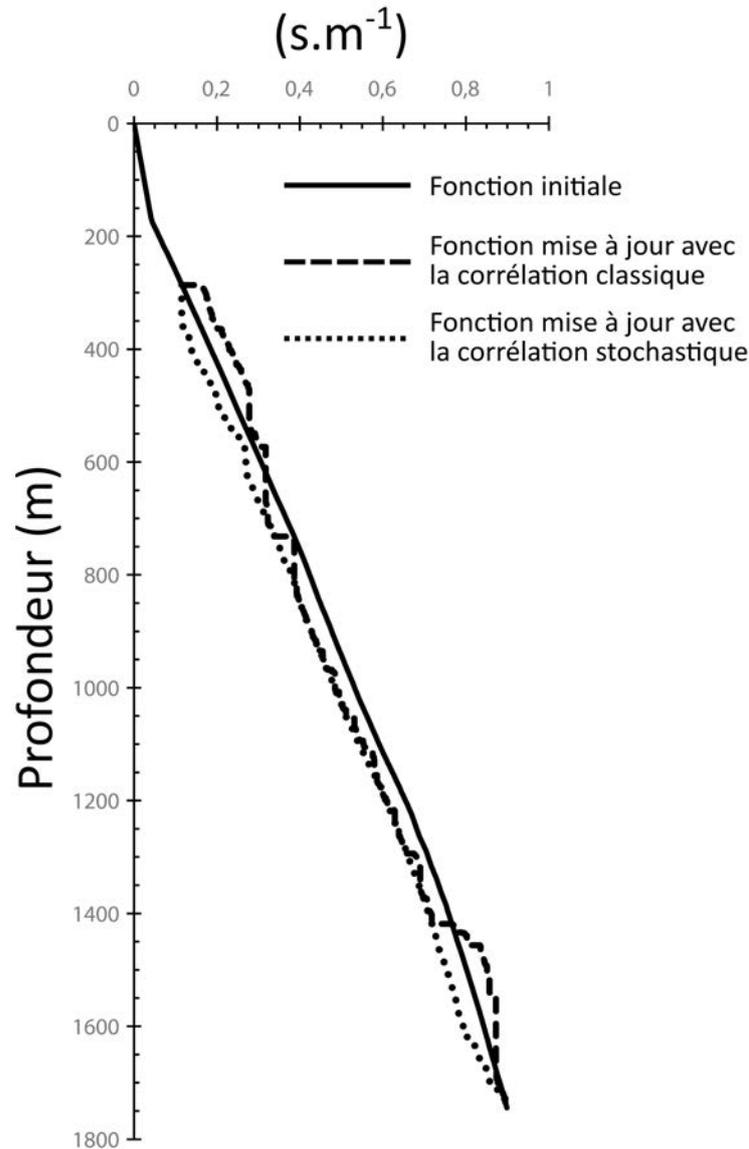


FIGURE 16 – Comparaison entre les fonctions de conversion temps-profondeur mises à jour et la fonction initiale.

trace synthétique générée à partir des logs de puits à une trace sismique. Cette corrélation permet d'obtenir une fonction de conversion temps-profondeur mise à jour. Ces travaux peuvent être améliorés, notamment pour contrôler la qualité des corrélations, comme la mesure des déformations ou la modification relative de la vitesse décrites par Herrera *et al.* [2014]. Selon les hypothèses faites par White et Simm [2003], trop de compression ou d'étirement du signal n'est pas recommandé. De plus, il manque à l'algorithme une contrainte de pente, interdisant l'apparition de lignes horizontales dans le chemin de corrélation. Cependant, cette méthode permet à l'interpréteur d'estimer rapidement une corrélation entre le puits et la sismique et d'améliorer la précision de la corrélation.

Annexe 2 : Outil de visualisation de corrélations stochastiques

Ce travail a été réalisé dans le cadre du stage de Master d'Anaïs Pons dans l'équipe RING du laboratoire GeoRessources (Université de Lorraine) [Pons *et al.*, 2015].

Introduction

Comparer différentes corrélations stratigraphiques entre elles manuellement est difficile. Un géologue peut vouloir générer de nombreuses corrélations stochastiques pour échantillonner au mieux l'espace des incertitudes et observer les zones des données les moins contraintes, les plus incertaines. Le but de ce travail est de faciliter l'interprétation des résultats en proposant des outils visuel de compilation des différentes corrélations stratigraphiques. Ils ont été codés en C++ dans le plugin SCube pour le logiciel Skua-Gocad [Paradigm, 2015].

Méthode stochastique

Les méthodes stochastiques considérées sont d'une part la méthode décrite par Lallier *et al.* [2009]. D'autre part, nous proposons de générer un grand nombre de corrélations et d'en tirer un certain nombre aléatoirement. Pour n corrélations voulues en sortie, les $100n$ meilleures corrélations sont générées et les n tirées aléatoirement parmi celles-ci.

Fréquence des associations de marqueurs d'une corrélation

Une première méthode de visualisation des résultats est de colorer chaque corrélation de paire de marqueurs stratigraphique en fonction de leur fréquence dans les n corrélations obtenues (fig. 17).

Fréquence des associations de marqueurs et de séquences de l'ensemble des corrélations

Une autre façon de visualiser l'ensemble des résultats en une seule image a été créée à l'aide de la librairie Qwt [Rathmann et Wilgen, 2011]. Cette librairie permet de rajouter des fonctionnalités graphiques à la librairie Qt qui est utilisée pour construire des interfaces graphiques [Trolltech, 1995].

Une fenêtre a été implémentée, représentant l'ensemble des corrélations dans la table de coûts du DTW, comme présentée sur la figure 18 Les axes des abscisses et ordonnées représentent les deux puits corrélés. Un point dans la table représente la corrélation de deux marqueurs stratigraphiques et une ligne représente la corrélation de deux séquences. Deux

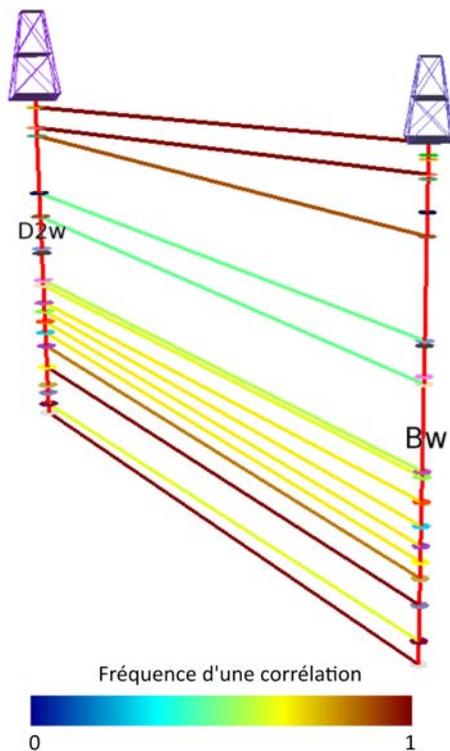


FIGURE 17 – Coloration des associations de marqueurs d’une corrélation en fonction de leurs fréquences dans les résultats.

échelles de couleur permettent de colorer les points et lignes respectivement en fonction de leurs fréquences dans les corrélations obtenues.

Conclusion

Ainsi, ces deux outils permettent de comparer et d’analyser de nombreuses corrélations, notamment les résultats de corrélations stochastiques avec plusieurs réalisations en sortie. Ils sont complémentaires. L’un colore les associations de marqueurs d’une corrélation en particulier en fonction de leurs fréquences dans les résultats, l’autre colore les associations de marqueurs et les associations de séquences de toutes les corrélations en même temps en fonctions de leurs fréquences dans la table de cout du DTW. Le premier met en valeur les associations d’une corrélation les plus certaines et les plus incertaines. Le deuxième aide à voir les chemins de corrélations préférentiels.

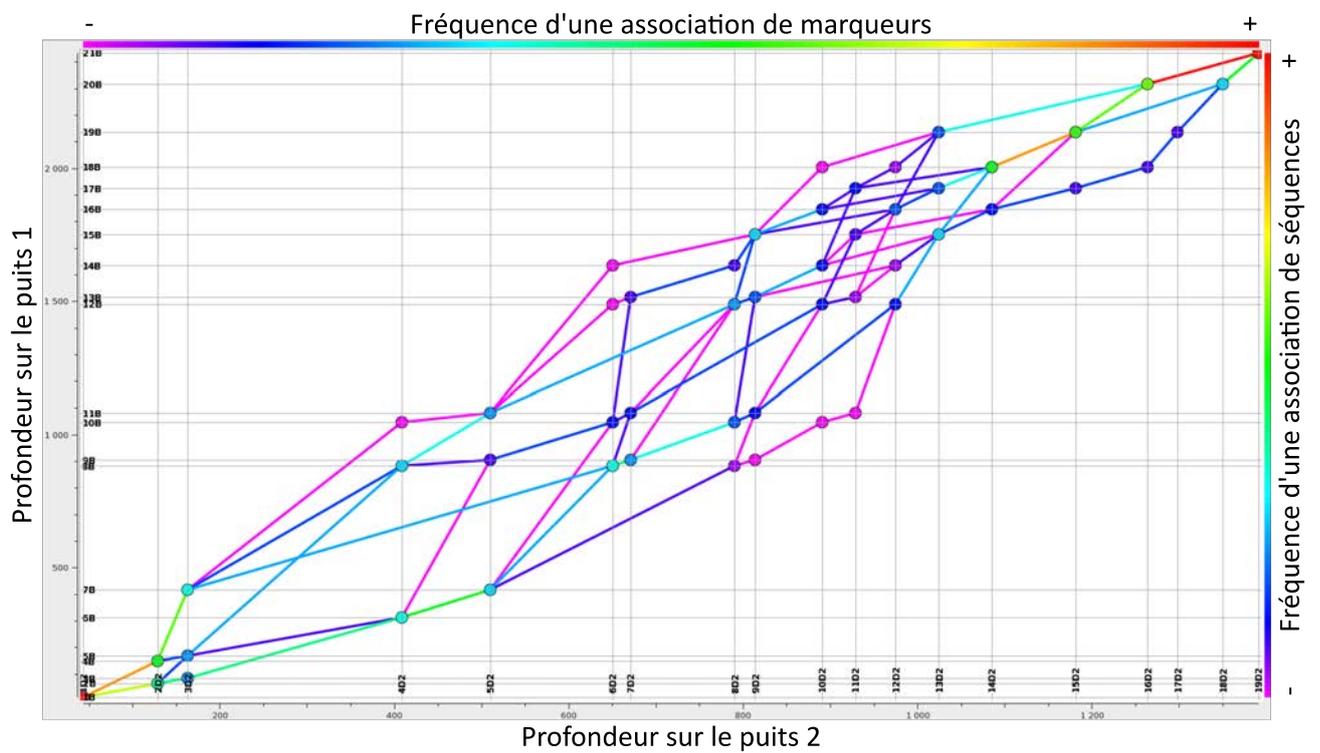


FIGURE 18 – Coloration des corrélations en fonction de leurs fréquences dans les résultats. Ici, 20 corrélations sont tirées parmi les 2000 meilleures corrélations. On peut voir des associations One-to-many, avec trois séquences associées à une séquence (voir section 1.6.2).

Construction de modèles stratigraphiques à partir de données éparses

Résumé : Toutes les analyses et les constructions de modèles stratigraphiques s'appuient sur des corrélations stratigraphiques entre unités sédimentaires observées au niveau de forages ou d'affleurements. Cependant, deux problèmes se posent aux géologues au moment de la construction de ces corrélations stratigraphiques. Premièrement, les données disponibles sont éparses et peu nombreuses. Deuxièmement, les processus sédimentaires menant à la mise en place des unités sédimentaires à corrélérer sont nombreux, interdépendants et partiellement connus. Ainsi la construction d'un modèle de corrélations stratigraphiques peut être vue comme un problème sous-contraint auquel plusieurs solutions peuvent être proposées.

L'objectif de cette thèse est de mettre en place un système numérique permettant de générer de manière stochastique des modèles stratigraphiques contraints localement par des données d'observation. Deux éléments sont nécessaires à la mise en place d'un tel système :

1. La mise en place de règles régissant l'organisation spatiale d'unités sédimentaires observées au niveau d'affleurements ou de puits. En ce qui concerne ces règles, deux voies seront explorées :
 - La mise en équation des règles définies dans le cadre de la stratigraphie séquentielle. Ces règles, exprimées d'un point de vue qualitatif dans la littérature sont traduites en termes quantitatifs afin d'évaluer la probabilité de deux unités sédimentaires observées d'être corrélées.
 - La déduction de la probabilité de corrélations entre deux unités sédimentaires observées à partir de modèles stratigraphiques construits par approche basée processus (*forward stratigraphic models*).
2. La mise en place d'un cœur algorithmique permettant de construire de façon stochastique un ensemble de modèles stratigraphiques plausibles à partir des règles précédemment présentées et des données d'observation.

Mots-clés : corrélation, stochastique, géomodèle, stratigraphie séquentielle

Building stratigraphic models from sparse data

Summary : All stratigraphic models building and analysis are based on stratigraphic correlations of sedimentary units observed on wells or outcrops. However, the geologist building these stratigraphic correlations faces two main problems. First, the data available are few and sparse. Second, the sedimentary processes leading to the deposition of the units are numerous, interdependent and poorly known. So, the construction of a stratigraphic correlation model might be seen as an under-constrained problem with several possible solutions.

The aim of this thesis is to create a numeric method to generate stochastic stratigraphic models that are locally constrained by observation data. Two steps are necessary :

1. The establishment of rules describing the spatial organization of sedimentary units observed on outcrops and wells. For these rules, two axis are explored :
 - The formulation in equations of rules defined in the sequence stratigraphy framework. These rules, presented qualitatively in the literature are translated in quantitative terms to evaluate the probability of two sedimentary units to be correlated.
 - The deduction of the probability of two sedimentary units to be correlated from stratigraphic models built from forward stratigraphic methods.
2. The development of an algorithm to build possible stochastic stratigraphic models from the rules cited above and observation data.

Keywords : correlation, stochastic, geomodel, sequence stratigraphy