



HAL
open science

Segmentation morphologique et topologique de cubes sismiques

Timothée Faucon

► **To cite this version:**

Timothée Faucon. Segmentation morphologique et topologique de cubes sismiques. Mathematics [math]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2007. English. NNT: . pastel-00003029

HAL Id: pastel-00003029

<https://pastel.hal.science/pastel-00003029>

Submitted on 19 Oct 2007

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.



Collège doctoral

N° attribué par la bibliothèque

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

THÈSE

pour obtenir le grade de
Docteur de l'École des Mines de Paris
Spécialité "Morphologie Mathématique"

Présentée et soutenue publiquement
par

Timothée FAUCON

le 10 Janvier 2007

Segmentation morphologique et topologique de cubes sismiques

Directeur de thèse : Étienne DECENCIÈRE

Jury

Dominique Jeulin (ENSMP - CMM)	<i>Président</i>
Gilles Bertrand (ESIEE - A2SI)	<i>Rapporteur</i>
Jean-Marc Chassery (CNRS - LIS)	<i>Rapporteur</i>
Jean-Luc Piazza (TOTAL)	<i>Examineur</i>
Cédric Magneron (ERM.S)	<i>Examineur</i>
Étienne Decencièrè (ENSMP - CMM)	<i>Directeur de thèse</i>



À mes parents
À ma famille
À mes amis

Résumé

Dans un contexte d'exploration et d'exploitation pétrolières, le traitement des données acquises par sismique réflexion requiert une analyse structurale à des fins de modélisation. Cette analyse passe par une phase d'extraction des structures horizontales représentant les empilements géologiques.

Les techniques actuelles nécessitent beaucoup de temps et l'attention quasi permanente d'un spécialiste pour réaliser et valider cette opération effectuée structure par structure. De plus, la quantité de données sismiques augmentant rapidement avec l'évolution des techniques d'acquisition, leur traitement représente une charge de travail de plus en plus importante.

Dans cette thèse, nous nous proposons d'alléger la phase d'extraction des structures horizontales en réalisant une segmentation presque automatique de ces dernières à l'aide d'outils basés sur des techniques morphologiques et topologiques.

Nous présentons également quelques applications s'appuyant sur les structures que nous avons extraites. Ces applications facilitent l'analyse des données 3D en proposant de nouvelles méthodes de calcul d'attributs sismiques à partir des données d'amplitude.



Summary

In a context of oil and gaz exploration and production, much information can be extracted from 3D seismic cubes. This information provides the geophysician with a knowledge of the subsoil structure and the geometry of the geological layers. Geometrical information is important for further processing and extracting surfaces corresponding to geological layers is a necessary step.

Current techniques of extraction most of the time requires the help of a specialist to be correctly achieved. This is a tedious job which takes a lot of time.

The present work deals with semi-automatic extraction of main geological layers from seismic amplitude datasets acquired by seismic reflection. It consists in segmenting seismic data by means of morphological and topological tools. Our process is almost automatic and allows the user to save time.

Some applications to seismic data improvement are also given in this manuscript. They facilitate further processing and pattern extraction of 3D seismic data by providing methods to compute seismic attributes.



Table des matières

1	Introduction	15
1.1	Motivations	16
1.2	Approche	16
1.3	Plan de la thèse	17
2	Contexte	21
2.1	Contexte de la thèse	22
2.2	L'exploration et la production pétrolières	22
2.2.1	L'histoire du pétrole	22
2.2.2	Le contexte économique	23
2.2.3	Le pic pétrolier (« Peak-Oil »)	24
2.2.4	Caractérisation d'un gisement pétrolier	25
2.2.5	La caractérisation réservoir	28
2.3	La sismique réflexion	29
2.3.1	Principe	29
2.3.2	Acquisition sismique	30
2.3.3	Les différentes révolutions techniques	31
2.4	Traitement sismique	33
2.5	Les images sismiques	33
2.5.1	Définitions	35
2.5.2	Bestiaire	36
2.6	Conclusion	39
3	Segmentation morphologique d'images sismiques 3D	41
3.1	État de l'art de la segmentation d'images sismiques	42
3.1.1	Les techniques 2D	42
3.1.2	Les méthodes 3D	43
3.1.3	Choix de la technique	44
3.2	Présentation du jeu de test	45
3.3	Préalables à la segmentation	46
3.3.1	Anamorphose	46
3.3.2	Filtrage	46
3.3.3	Filtrage par krigeage factoriel	47
3.4	Outils de segmentation morphologique	48
3.4.1	La ligne de partage des eaux	49
3.4.2	Application de la ligne de partage des eaux	50

TABLE DES MATIÈRES

3.4.3	Hiérarchie de partitions et segmentation hiérarchique	51
3.5	Application naïve de la segmentation hiérarchique aux données sismiques 3D	56
3.5.1	Calcul des sources de l'inondation	56
3.5.2	Problème de la segmentaion naïve d'images sismiques : les fuites lors de l'inondation	57
3.6	La segmentation hiérarchique par cylindres appliquée aux images sismiques	61
3.6.1	Approche du problème des fuites	61
3.6.2	Solution proposée	61
3.7	Paramétrage et mesures de la qualité de la segmentation	68
3.7.1	Comportement de l'algorithme	68
3.7.2	Effet des différents paramètres	70
3.7.3	Compléments d'analyse	77
3.7.4	Exemples d'horizons obtenus	79
3.7.5	Temps de calcul	82
3.8	Une perspective intéressante : la segmentation d'images sismiques 4D	85
3.9	Conclusion	86
4	Segmentation topologique d'images sismiques 3D	87
4.1	Outils de topologie discrète	88
4.1.1	Quelques définitions	88
4.1.2	Les bords	92
4.2	Classification topologique des voxels	92
4.2.1	Résultat de la classification	93
4.3	Amincissement hiérarchique de surfaces sismiques	95
4.3.1	État de l'art	95
4.3.2	Point simple en trois dimensions	95
4.3.3	Description de la méthode	96
4.3.4	Convergence de l'algorithme	99
4.3.5	Discussion	103
4.3.6	Améliorations possibles	104
4.4	Segmentation topologique de surfaces sismiques	107
4.4.1	De la classification à la segmentation	107
4.4.2	Les limites de la classification	107
4.4.3	Est-il nécessaire de contrôler la 6-adjacence des composantes connexes du fond avec le point central ?	110
4.5	Séparation des structures multi-couches restantes	112
4.6	Résultats	115
4.7	Conclusion	118
5	Calcul d'attributs sismiques	121
5.1	Les attributs sismiques	122
5.1.1	Définition	122
5.1.2	Quelques exemples d'attributs	122
5.2	L'azimut et le pendage	122
5.2.1	Définitions	122
5.2.2	Calcul de l'azimut et du pendage	123
5.2.3	Applications	125

5.3	Le contrôle qualité du pointer d'horizon	126
5.4	Hierarchisation <i>a posteriori</i> des horizons extraits	130
5.4.1	Expérimentation	132
5.4.2	Résultats	133
5.4.3	Discussion	139
5.5	Conclusion	139
6	Variogramme géologiquement guidé	141
6.1	Le variogramme	142
6.1.1	Généralités	142
6.1.2	Caractéristiques du variogramme	144
6.1.3	Variogramme expérimental	146
6.1.4	Modélisation du variogramme	146
6.2	Calcul de variogrammes expérimentaux sur une image sismique	147
6.2.1	Le calcul de variogrammes expérimentaux en pratique	151
6.3	Variogramme géologiquement guidé	151
6.3.1	Définition du volume de travail	153
6.3.2	Calcul du variogramme géologiquement guidé	153
6.3.3	Résultats	157
6.3.4	Amélioration des résultats	169
6.4	Conclusion	169
7	Conclusion	171
7.1	Apports de ces travaux	172
7.2	Retombées académiques et industrielles	173
7.3	Perspectives	173

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements

Je souhaite tout d'abord remercier vivement Fernand Meyer, directeur du Centre de Morphologie Mathématique, ainsi que Luc Sandjivy, directeur de la société ERM.S Group, pour leur accueil au sein de leurs structures respectives.

Je tiens également à remercier tout particulièrement Étienne Decencière pour le CMM et Cédric Magneron pour ERM.S qui, tout au long de mes travaux de recherche, m'ont écouté (patiemment), conseillé et guidé et ont largement contribué à ce que ces travaux se réalisent.

J'adresse également tous mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté de se déplacer et qui ont montré un grand intérêt pour mes travaux au travers de leurs questions et de leurs remarques. Merci également à Total et Gaz De France pour le prêt des données qui illustrent ce manuscrit.

Tout au long de mes études, j'ai pu compter sur le soutien de mes parents, Dominique et Marie-Joseph, et de mes frères et sœurs, Hugo, Xavière, Félicie, Tiphaine, Damascène et Élise-Péroline, avec lesquels j'ai pu partager les moments de doute comme les moments heureux (très nombreux grâce à eux). Je tiens à les remercier de tout mon coeur pour leur présence, leur attention et leur aide. Merci aussi à Oncle Xavier pour son accueil et ses conversations très enrichissantes ainsi qu'à Amandine pour tout ce qu'elle m'a apporté et m'apporte encore.

Durant les trois ans qu'ont duré mes travaux, j'ai principalement vécu dans le bureau 2.18. J'y ai cohabité avec Romain, Gabriel puis Thibaud. Merci à eux pour leur aide, leurs conseils, leurs blagues (à la finesse parfois discutable...) et leur motivation.

Merci aux équipes du CMM, du CG et d'ERM.S dont tous les membres se sont montrés accueillants et attentifs. Je souhaite adresser un merci spécial à Catherine et Laura pour leur dévouement et leur patience ainsi qu'à Hervé, Hélène et Didier pour leur aide à l'écriture et à la relecture de quelques chapitres de mon manuscrit.

Nos répétitions de "musique" et nos concerts très (trop ?) privés avec Romain, Hugues B. et Michel (en guest star) m'ont permis de me changer les idées après des journées souvent bien remplies. Merci à eux trois pour leur humour, leur talent, leur temps de décalage et leur capacité à ignorer mes couacs. Vive les TSCB !

Passer trois années de thèse à Fontainebleau sans aller gravir les « cailloux » de la forêt au moins une fois relève de l'exploit. Je n'ai pas résisté très longtemps à l'appel du grès. Merci à mes initiateurs / pareurs / accompagnateurs (dans le désordre) : Hugues A., Esteban,

TABLE DES MATIÈRES

Gab, Romain, Anne, Cyrille, Shan, Emmanuelle, David et Thierry. Merci aussi aux footeux du Mercredi et aux volleyeurs du Mardi, trop nombreux pour pouvoir les nommer tous.

Enfin, un grand merci à tous les thésards et amis avec lesquels j'ai partagé d'excellents moments durant ces trois ans : les soirées, les repas, les apéros au bord du canal, les échanges pleins d'humour, les katas... Merci donc à Romain, Raffi, Thomas, Thibaud, Maxime, Thômas, Nicolas, Mathilde, Gab et Laurence, Hugues A., Hugues B., François P., Caroline R., David, Rosalie, Aurélie, Sunsearé, Pierre-Yves, Cédric, François S., Marc, Pierre, Caroline B.-M., Benjamin, Amélie, Marine pour ses photos dont certaines agrémentent cet ouvrage, Jean-Baptiste, Loic, Nathalie, Anne-Laure et Pierre-Léo.

Chapitre 1

Introduction

1.1 Motivations

L'imagerie sismique 3D constitue, depuis une quinzaine d'années, une mine d'informations pour tous les géologues et les ingénieurs qui tentent, depuis la surface, de percer les secrets des réservoirs pétroliers se trouvant à plusieurs milliers de mètres sous terre. Pour se rendre compte de ce que leur apporte cette technique, il faut imaginer pouvoir observer un gigantesque parallélépipède contenant une portion de l'écorce terrestre comme si on l'avait extrait de terre. Ce « cube » peut mesurer jusqu'à plusieurs kilomètres de côté dans chacune des trois dimensions. Il est également possible d'observer l'intérieur du cube comme si on pouvait naviguer dedans à notre gré.

Cependant, les techniques d'imagerie sismique sont des techniques indirectes à l'instar des méthodes de scanner ou d'échographie en imagerie médicale. Il en découle une réelle dépendance de l'image résultante vis à vis du contenu du matériau. Ainsi, les éléments de la proche surface de la terre qui présentent un contraste d'impédance (produit de la densité par la vitesse) fort peuvent nuire à la bonne détection des éléments qui se trouvent en dessous. Il est alors difficile de se faire une idée précise de ce qui se trouve en dessous tant les données correspondantes sont peu fiables. Si l'élément dense est assez localisé, les méthodes 3D permettent de pallier en partie à ce problème. L'interprétation des données sismiques requiert cependant l'expertise et l'expérience de professionnels. Leur tâche est rendue difficile par la relative mauvaise qualité des images.

Les techniques d'acquisition évoluant, les jeux de données sismiques deviennent non seulement de plus en plus gros mais également de plus en plus nombreux. Il est en effet courant, aujourd'hui, d'imager plusieurs fois un même champ d'exploitation pour, par exemple, réaliser une surveillance de l'évolution d'un réservoir en cours d'exploitation (« monitoring » réservoir). Le temps dont disposent les géophysiciens interprètes pour analyser les données se trouve alors considérablement réduit. Tout outil leur permettant de gagner du temps, ne serait-ce que sur une seule des nombreuses étapes de l'interprétation, leur est utile.

Lors d'une première interprétation, le spécialiste cherche à faire ressortir d'un cube sismique de grande taille, les données les plus importantes de l'empilement des couches géologiques. De cette façon, il simplifie en partie les données pour ne conserver que les informations morphologiques pertinentes pour trouver ce qu'il cherche dans les données : le réservoir pétrolier. L'étape d'extraction des éléments structuraux est une étape longue et fastidieuse qui est, certes, assistée par ordinateur mais qui donne au géophysicien interprète une charge de travail importante pour faire à la fois fonctionner les algorithmes de recherche des structures et pour valider les résultats.

1.2 Approche

De par sa nature, notre projet est, depuis le début, plongé dans un environnement industriel très prononcé. Un grand nombre de sujets de recherche intéressants autour des images sismiques se sont ébauchés au fur et à mesure des contacts avec des professionnels du secteur pétrolier. Nos recherches ont donc un cadre applicatif très large.

Le dénominateur commun à tous ces sujets de recherche s'est vite avéré être l'extraction et la séparation de structures géologiques horizontales à partir de données sismiques d'amplitude 3D. Nous avons donc débuté nos travaux avec cet objectif en ligne de mire. En particulier, les solutions existantes procèdent par extraction interactive d'un horizon à la fois. Nous avons choisi une approche globale, plus ambitieuse.

Un parcours de la littérature du domaine de la segmentation d'images sismiques 3D nous a permis de voir assez rapidement qu'il reste encore des domaines inexplorés avec des marges de progrès considérable. Le manque de documentation sur le sujet nous a également fait comprendre qu'une grande partie des recherches dans le domaine n'était pas publiée et que la « concurrence » d'autres équipes de recherche était à envisager. Pour ne pas risquer de voir l'intérêt de nos recherches atténué par d'autres travaux similaires, il nous a donc fallu trouver des solutions originales.

De plus, le contexte industriel nous a imposé des contraintes de temps d'exécution assez strictes compte tenu de la taille importante des données sismiques. Cela a ajouté une composante d'efficacité aux solutions originales que nous avons dû trouver.

Nous recherchions donc des solutions originales et efficaces. Parmi les techniques de traitement d'images, la morphologie mathématique répondait particulièrement bien au premier critère puisque, à notre connaissance, personne n'avait déjà appliqué ces techniques aux images sismiques 3D. De plus, en terme d'efficacité, les techniques de segmentation morphologiques étaient réputées pour être parmi les plus rapides. Les outils morphologiques ont donc constitué la base de nos algorithmes. Ils ont rapidement été épaulés par d'autres techniques de traitement d'images, comme des techniques topologiques, et quelques outils géostatistiques. Leur sélection s'est toujours faite selon les mêmes critères d'originalité et / ou de performance.

La segmentation de structures géologiques n'est pas une fin en soi, ni pour les géologues et les géophysiciens, ni pour les spécialistes du traitement d'image. C'est pourquoi, nous avons composé quelques outils à base des structures que nous avons segmentées dans le but d'améliorer quelques méthodes utilisées dans la chaîne de traitement géophysique des données sismiques.

Ainsi, nous proposons dans cet ouvrage un outil permettant d'extraire de manière quasiment automatique les structures à tendance horizontale correspondant aux empilements géologiques. Nous n'avons cependant pas la prétention de rendre l'interprétation automatique mais juste de fournir un outil au géophysicien interprète afin de le décharger d'une phase pénible de l'interprétation. Cet outil retourne une image contenant un nombre choisi de structures bien séparées. Libre ensuite au spécialiste de choisir celles qui lui semblent les plus pertinentes.

1.3 Plan de la thèse

Le contenu de cet ouvrage se répartit en cinq chapitres.

Premier chapitre : contexte

Cette partie, indépendante des autres, traite des bases de l'imagerie sismique. Nous nous y efforçons de présenter le plus clairement possible les tenants et les aboutissants de nos travaux. Dans un premier temps, nous exposons le cadre historique, économique et applicatif de nos recherches.

Nous présentons également le contexte technique, dont la sismique réflexion, méthode permettant d'obtenir les données sismiques et une partie de la chaîne de traitement de ces données. Nous présentons enfin les images sur lesquelles nous avons travaillé, qui sont obtenues à l'aide de ces traitements géophysiques .

Deuxième chapitre : segmentation morphologique d'images sismiques 3D

Dans cette partie, nous montrons que les techniques publiées de segmentation d'images sismiques 3D ne sont pas nombreuses avant de motiver le choix de la méthode que nous avons retenue.

La méthode que nous avons mise au point est basée sur des outils morphologiques, dont la segmentation hiérarchique à base de ligne de partage des eaux, que nous présentons de manière détaillée avant de l'appliquer aux images sismiques. Nous exposons les problèmes rencontrés alors, avant de présenter un algorithme original de segmentation basé sur des cylindres glissants qui nous permet de nous affranchir des problèmes de segmentation initiaux. Les résultats que nous obtenons sont illustrés à l'aide d'images sismiques réelles.

Cet algorithme est, par construction, paramétrable. Nous amorçons ensuite une discussion sur l'impact qu'ont les paramètres sur la qualité des résultats de la segmentation, ainsi que l'influence qu'ils ont sur le temps de traitement qui contraint le cadre de nos recherches. Nous exposons également quelques idées de développement permettant d'accélérer nos algorithmes.

La segmentation ou l'extraction des structures de sédimentation géologiques constituant le cœur de nos travaux de recherches, cette partie en est l'une des étapes importantes.

Troisième chapitre : segmentation topologique d'images sismiques 3D

L'algorithme de segmentation que nous proposons dans le *chapitre 3* produit des surfaces épaisses. Après une première partie consacrée à la présentation des outils de topologie discrète, nous montrons en quoi ils peuvent nous aider à résoudre en premier lieu le problème des surfaces épaisses. Nous proposons alors une adaptation d'algorithmes d'amincissement permettant de parvenir à notre but sans négliger les contraintes fixées par les applications industrielles.

Ces outils topologiques sont basés sur une méthode de classification des voxels des structures selon la configuration de leur proche voisinage. Ils permettent également de résoudre les problèmes de séparation des surfaces minces. Les structures géologiques étant complexes, de nombreux cas particuliers surviennent dans la phase de séparation des structures, pour lesquels nous proposons un traitement permettant de labelliser distinctement les surfaces.

Nous illustrons l'amincissement et la segmentation topologique des surfaces à partir d'images réelles que nous avons segmentées par méthode morphologique.

Cette partie constitue le deuxième volet de l'extraction / segmentation des structures horizontales des images sismiques. Les surfaces que nous extrayons sont alors fines et bien séparées les unes des autres.

Quatrième chapitre : calcul d'attributs sismiques

Ce chapitre constitue le premier chapitre applicatif de cet ouvrage. Nous y présentons les calculs de quelques attributs rendus possibles grâce à l'extraction préalable des horizons. Parmi ceux-ci, on trouve une méthode de calcul de l'azimut et du pendage qui servent dans de nombreuses applications en traitement sismique comme par exemple, en tomographie de temps de trajet pour la construction d'un modèle de vitesse de propagation des ondes. Leur détermination est basée sur les structures que nous avons extraites du cube sismique d'amplitude.

Nous proposons également une technique permettant de valider la qualité d'une structure sismique extraite à l'aide d'un algorithme automatique ou semi-automatique, comme ceux que l'on peut trouver dans l'industrie. La méthode est basée sur un second outil morphologique : la segmentation par marqueurs. Des illustrations basées sur des données réelles permettent de mesurer l'efficacité de cet outil.

Un troisième type d'attribut est également décrit dans cette partie qui traite de la hiérarchisation *a posteriori* des surfaces extraites. En traitement et en interprétation sismique, toutes les surfaces n'ont pas la même importance selon l'application. Nous présentons ici une classification des surfaces à l'aide des données extraites le long des structures segmentées dans les données sismiques d'amplitude et des caractères propres de ces surfaces.

Cinquième chapitre : variogramme géologiquement guidé

La seconde partie applicative de cet ouvrage se trouve dans ce chapitre. Dans de nombreuses applications de filtrage et de qualification des données sismiques, la géostatistique constitue un outil puissant. Nous décrivons tout d'abord le variogramme, l'un des instruments clefs des techniques géostatistiques, ainsi que les manières de le calculer dans différentes configurations de données.

Nous appliquons ensuite ces méthodes au calcul de variogrammes selon la géologie contenue dans les données. Nous nous basons alors sur les surfaces que nous avons extraites par méthode morphologique et topologique pour définir l'orientation du volume sur lequel est réalisé le calcul du variogramme. Les variogrammes expérimentaux ainsi obtenus sont ensuite analysés pour permettre à la fois de mieux cerner le fonctionnement du modèle et de dégager des axes d'amélioration de la technique.

Chapitre 2

Contexte

Ce travail de thèse est le résultat d'un partenariat entre la société Earth Resource Management Services (ERM.S) et le Centre de Morphologie Mathématique (CMM) de l'École des Mines de Paris. Il porte sur la mise en place d'outils morphologiques d'aide à l'interprétation de données sismiques 3D.

2.1 Contexte de la thèse

Afin de déterminer plus précisément les caractéristiques des gisements pétroliers, les compagnies pétrolières ont recours à l'imagerie sismique qui permet d'obtenir, par l'étude d'ondes sismiques générées en surface, une image indirecte du sous-sol. Une analogie parlante est celle des échographies en imagerie médicale, le géophysicien proposant à l'ingénieur réservoir (le chirurgien) une image précise de l'objet naturel à traiter. On parle même aujourd'hui de géophysique (ou sismique) de réservoir avec l'essor de la sismique 4D qui consiste à répéter des mesures sismiques 3D dans le temps afin de suivre l'évolution du gisement tout au long de sa phase de production, une échographie répétée dans le temps en quelque sorte.

En 2001-2002, la société ERM.S s'est positionnée clairement sur le marché des services en exploration / production pétrolière comme un prestataire spécialisé dans le couplage géophysique / géostatistique. ERM.S a ainsi développé un savoir-faire et des outils logiciels innovants sur le thème de la qualification réservoir des données sismiques par méthodes géostatistiques.

En accord avec sa stratégie de développement, ERM.S décide en 2003 de monter une collaboration avec le Centre de Morphologie Mathématique de l'École des Mines de Paris portant sur les applications de la morphologie mathématique pour la caractérisation et l'interprétation des réservoirs pétroliers. Cette collaboration dure un an.

En 2004, un second projet voit le jour sous la forme d'une convention CIFRE pour une durée de 3 ans. D'un point de vue technique, il s'agit alors de poursuivre les efforts engagés et les développements opérationnels entrevus lors de la collaboration de 2003. Le but est alors de trouver une solution industrielle englobant des outils permettant une caractérisation rapide de la géométrie des structures géologiques contenues dans une image sismique 3D.

2.2 L'exploration et la production pétrolières

Dans cette partie, nous nous sommes inspirés de l'ouvrage de X. Boy de la Tour ([13]) rassemblant de nombreuses informations sur le pétrole et son exploitation.

2.2.1 L'histoire du pétrole

Le pétrole est connu depuis plus de 3000 ans par les ethnies de la Mésopotamie qui l'utilisaient sous forme de bitume pour assurer l'étanchéité de leurs navires. Ils l'utilisaient également dans la construction de bâtiments et pour assurer l'étanchéité des conduites et des citernes d'eau. Le pétrole provient alors de suintements à la surface du sol.

On a également découvert des traces d'utilisation du pétrole dans les civilisations chinoises et siciliennes qui l'utilisaient pour s'éclairer il y a environ deux mille ans. En Europe les vertus du précieux liquide qui guérit de nombreux maux acquiert une excellente réputation mais reste au stade de curiosité.

C'est à l'apparition de la lampe à pétrole, à la fin du *XVIII^e* siècle, que l'on doit l'engouement pour ce produit commercialisé alors sous le nom de pétrole lampant. Ce dernier devient vite tellement recherché que la production peine à suivre la demande.

La ruée vers l'or noir commence dans la seconde partie du *XIX^e* siècle lorsque le succès commercial du *baume de Kier* déclenche l'exploitation pétrolière dans la vallée d'Oil Creek en Pennsylvanie. C'est à partir de 1875 que se constitue l'industrie pétrolière sous l'impulsion de John D. Rockefeller qui, constatant qu'il serait profitable d'organiser l'exploitation du brut, crée la Standard Oil, première compagnie pétrolière. D'autres suivent cet exemple et le nombre de compagnies pétrolières croît très rapidement. De nombreuses disparaîtront au profit des plus polyvalentes et des plus importantes : « les majors ».

Avec le moteur à explosion et la révolution industrielle qui en a résulté, le pétrole est très vite devenu synonyme de pouvoir et de richesse. Les pays possédant de grandes réserves de ce liquide comptent parmi les plus riches et les plus influents de la planète, aussi bien sur le plan politique qu'économique. Cependant, ces pays, n'ayant pas toujours les connaissances et les techniques pour chercher et extraire le pétrole, font appel aux services des « majors » qui trouvent et exploitent les gisements des dits pays contre une redevance le plus souvent conséquente. Les « majors » étant le plus souvent des compagnies de pays importateurs de pétrole, une sorte d'équilibre économique précaire se crée entre les producteurs et les importateurs. La cohabitation est délicate. En 1960, pour harmoniser la production de pétrole mondiale, des pays parmi les plus grands producteurs (Arabie Saoudite, Irak, Iran, Koweït et Vénézuéla) créent l'OPEP (Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole). Cette organisation régit le commerce du pétrole dans le monde et compte aujourd'hui onze membres. Son pouvoir n'a cessé de croître avec la demande grandissante de pétrole.

Un premier choc pétrolier survient en 1973, lors de la guerre du Kippour, et montre la dépendance des pays importateurs vis à vis du pétrole car la demande augmente encore malgré des hausses vertigineuses du prix du brut. Un second choc pétrolier survient en 1979 mais a moins de conséquences sur l'industrie pétrolière car de nouvelles sources d'approvisionnement apparaissent (en Alaska et en mer du Nord) et la demande diminue légèrement.

Ces crises pétrolières ont fait prendre conscience aux pays importateurs de pétrole qu'il était important de maîtriser leur consommation et qu'il fallait essayer de diversifier leurs sources d'énergie. Le pétrole reste cependant la première source d'énergie et constitue la base de l'économie de toutes les puissances industrialisées qui se doivent donc d'en conserver un approvisionnement régulier et suffisant.

2.2.2 Le contexte économique

Loin de vouloir alimenter les nombreux débats économiques ayant trait au pétrole, qui sont assez éloignés du sujet de cet ouvrage, nous souhaitons rappeler que les travaux de recherche liés à l'industrie pétrolière sont plus que jamais des travaux d'actualité liés à un contexte économique fort.

En effet, à l'heure où le pétrole défraye les chroniques des médias, à la fois sur les profits des grandes sociétés pétrolières, sur la demande supérieure à la production, qui provoque une situation de manque, et sur l'état des réserves mondiales qui s'épuisent de plus en plus vite avec la demande croissante, il apparaît évident que tout ce qui concerne ce liquide, qui est la base de notre civilisation, est un sujet brûlant.

De nombreuses questions se posent sur l'état des réserves mondiales et sur ce que deviendra notre société lorsque cette ressource énergétique fossile et non renouvelable sera épuisée. Le pétrole est partout dans notre vie : dans nos véhicules, certes, comme carburant et matériau d'aménagement, mais également dans nos habits, nos appareils électroniques, nos emballages plastiques, nos meubles, etc . . . Il semble évident qu'une baisse irrémédiable de la production pétrolière impactera directement le monde industriel et nos modes de vie.

D'un autre côté, sur le plan de la production, les gros gisements sont de plus en plus rares et, pour diversifier l'approvisionnement, les compagnies pétrolières prennent de plus en plus de risques. En effet, un forage coûte plusieurs millions de dollars (jusqu'à 100 millions de dollars pour l'« offshore » profond) et lorsque ce dernier se révèle sec (c'est à dire qu'il ne produit pas de pétrole), c'est en pure perte. Ce risque ayant un prix, il se répercute directement sur le prix du pétrole brut et donc sur l'économie mondiale. Pour éviter au maximum les erreurs de positionnement de forage, de nouvelles technologies se développent un peu plus chaque jour. Elles permettent de localiser avec plus de précision et de modéliser au mieux les réservoirs pétroliers, lors de l'exploration, et de les surveiller, durant l'exploitation.

C'est dans ce cadre qu'interviennent nos travaux, comme nous le verrons dans la suite de ce chapitre.

2.2.3 Le pic pétrolier (« Peak-Oil »)

Basé sur les travaux du géologue K.Hubbert ([34], [35]), le concept de pic pétrolier désigne le maximum prévisible ou historique de production pétrolière pour un gisement, un pays ou bien le monde entier. Après ce pic, la production pétrolière ne fera que décroître ([73]).

Les spécialistes sont assez divergents sur la date exacte à laquelle le pic mondial a eu ou aura lieu. En effet, il semble que nous soyons actuellement aux alentours du pic pétrolier mondial (un peu avant ou un peu après. . .).

Nous sommes donc proches du déclin de la production. Cela signifie que le pétrole va se raréfier à une vitesse plus ou moins importante selon que la demande des pays en pleine expansion, tels que la Chine ou l'Inde, va se stabiliser ou continuer à augmenter. Cela va également dépendre de l'évolution des techniques d'exploration et d'exploitation des gisements. Comme nous l'avons déjà évoqué dans la partie précédente, ces techniques évoluent très rapidement, mais est-ce suffisant pour que l'offre reste au niveau de la demande ?

Si de nouveaux gisements sont découverts grâce à ces nouvelles techniques, cela décalera à nouveau le pic pétrolier et repoussera l'échéance de diminution de la production. On peut également ajouter que la quantité de pétrole que l'on parvient actuellement à extraire des réservoirs pétroliers est proche des 40%. Il reste donc encore un fort potentiel d'hydrocarbures que l'on pourra peut-être extraire à l'aide de techniques à découvrir ou à développer.

De plus, sur un plan économique, si le pétrole vient à se raréfier, le prix du brut va augmenter ce qui pourra rendre des gisements qui étaient économiquement inexploitablement (trop peu de pétrole compte tenu des coûts d'exploration et d'extraction) rentables et ainsi en autoriser l'exploitation.

Une nouvelle fois, les avancées techniques apparaissent comme des facteurs importants dans le maintien, autant que faire se peut, de l'économie mondiale telle que nous la connaissons aujourd'hui.

2.2.4 Caractérisation d'un gisement pétrolier

Le gisement pétrolier est la cible de toute compagnie pétrolière. Une fois découvert, il est mesuré et analysé minutieusement pour être mieux connu, car ses caractéristiques recèlent les clefs d'une production réussie.

Qu'est-ce qu'un gisement ?

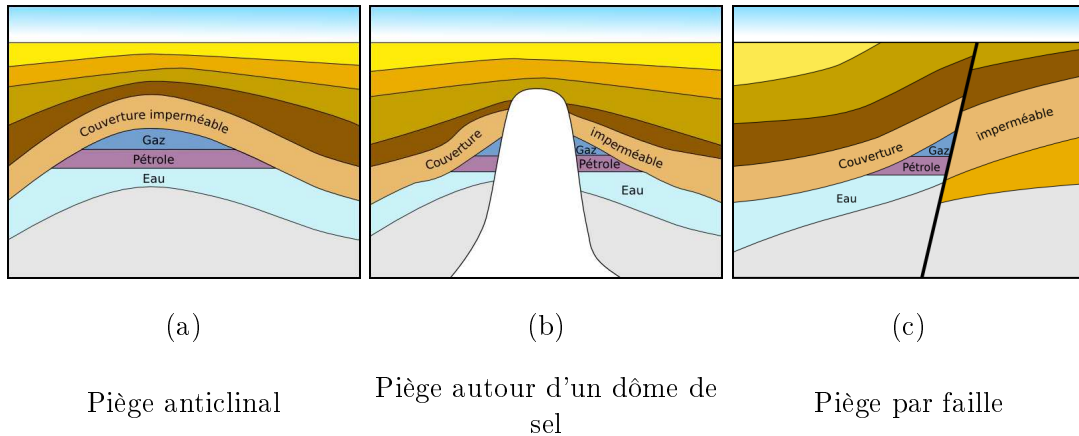


FIG. 2.1 – Exemples de gisements pétroliers : le pétrole stagne dans des roches poreuses, bloqué par des couches ou éléments géologiques imperméables (couverture)

Un gisement est formé d'un ou de plusieurs réservoir(s) poreux souterrain(s) contenant des hydrocarbures liquides et/ou gazeux. Ces réservoirs sont, par exemple, d'origine sédimentaire. La roche réservoir est poreuse et perméable. On peut l'assimiler à une grosse éponge solide (*figure 2.2*). La structure du réservoir est limitée par des couvertures imperméables qui piègent les hydrocarbures en les empêchant de remonter à la surface. Diverses configurations de réservoirs pétroliers sont illustrées par la *figure 2.1*

Comment exploite-t-on un gisement pétrolier ?

Les fluides présents dans le réservoir (eau, hydrocarbures) sont soumis aux pressions des roches environnantes (pression lithostatique). Un forage suffit en général pour que le pétrole sorte de lui-même du réservoir. Lorsque la pression n'est plus suffisante, on utilise alors des méthodes de pompage, d'injection d'eau (*figure 2.3*) ou de vapeur d'eau.

L'exploitation rationnelle d'un gisement d'hydrocarbures nécessite donc la meilleure connaissance possible des mécanismes naturels ou artificiels (injection d'eau, ...) les plus aptes à assurer la rentabilité de l'exploitation du gisement dans un contexte économique donné.

L'efficacité de ces modes d'exploitation est fonction non seulement des caractéristiques des fluides en place ou injectés, mais surtout du réservoir lui-même (géométrie, nature, caractéristiques pétrophysiques (propriétés des roches, ...)). Le choix du projet de développement le plus adapté nécessite en particulier l'estimation des :

- volumes d'hydrocarbures in situ (appelés accumulations),



FIG. 2.2 – Exemple de roche poreuse dont il faut estimer et/ou mesurer les propriétés pétro-physiques, en particulier la porosité et la perméabilité

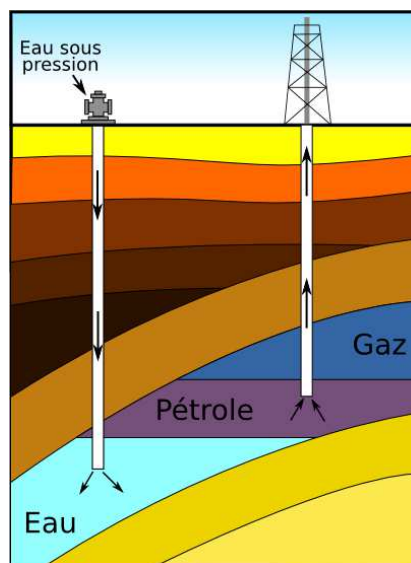


FIG. 2.3 – Pour une meilleure extraction du pétrole, on injecte de l'eau dans le réservoir (pour le maintien de la pression dans le réservoir)

- fracturations du réservoir et des connexions dans les différents compartiments (pour l'implantation d'un ou plusieurs puits)
- volumes récupérables effectivement avec le mode d'exploitation choisi (appelés réserves),
- potentiels de production des puits au cours de la « vie » du gisement (plusieurs dizaines d'années).

Pour acquérir le maximum de connaissances sur le gisement, il est alors nécessaire d'ana-

lyser les informations sur le réservoir pour pouvoir prendre les meilleures décisions concernant le mode d'exploitation du gisement. De nombreuses mesures sont alors nécessaires.

Les données sont acquises pour...

... l'image du gisement

Les techniques utilisées pour déterminer l'« image » d'un gisement ont pour bases la géophysique (sismique) et la géologie :

- La **sismique** utilise des méthodes inverses pour caractériser le réservoir, en particulier sa structure. Pour des acquisitions faites en surface, la résolution au niveau du réservoir se situe typiquement entre 10 et 100 mètres.
- La **géologie**, en particulier la **sédimentologie**, définit la nature des dépôts sédimentaires (exemple : fleuves, lacs, estuaires,...) qui sont à l'origine des types de roches présents dans les réservoirs. Une étude détaillée du contexte sédimentaire permet de déduire des informations qualitatives et quantitatives sur l'extension et les hétérogénéités présentes dans les différents types de roches (appelés faciès). La géologie permet également de connaître l'histoire du réservoir et de savoir comment il s'est mis en place.

... les propriétés physiques du gisement

Des forages dits d'exploitation ont pour but de mieux connaître les réservoirs en prenant de véritables échantillons de roches et de fluides.

Les données tirées de ces forages sont très précises (très bonne résolution à l'échelle du réservoir) mais de portée très réduite (limitée au forage lui-même, qui représente une partie infime du gisement). Elles sont de différentes natures :

- Les **carottes** permettent de caractériser la nature sédimentaire des roches et leurs caractéristiques pétrophysiques (porosité, perméabilité mesurées en laboratoire).
- Les **diagraphies** sont des mesures indirectes de la nature des roches et des fluides dans l'environnement immédiat des puits. Elles complètent l'information tirée des carottes, qui concerne une échelle plus réduite.
- Les **essais de puits** consistent à évaluer le comportement réel du réservoir en phase de production (pression, débit,...). Ils permettent de caractériser, de façon indirecte, la qualité du réservoir dans un domaine de taille hectométrique autour des puits, en particulier si le réservoir est compartimenté.

En compilant les données acquises, on peut alors acquérir une bonne connaissance du gisement grâce à la caractérisation réservoir.

2.2.5 La caractérisation réservoir

La caractérisation des réservoirs pétroliers consiste à faire la synthèse de toutes les données décrites ci-dessus, qu'elles soient ponctuelles (puits) ou globales (sismique, géologie) pour constituer une représentation aussi exacte que possible du réservoir, tant en ce qui concerne son extension et son volume que sa « qualité », c'est à dire ses caractéristiques pétrophysiques. C'est cette représentation qui servira de base pour l'évaluation de l'intérêt du développement du gisement concerné (calculs « économiques »).

Caractérisation géométrique du réservoir

Un réservoir pétrolier doit être caractérisé d'un point de vue géométrique. Quelle est sa structure, quelle est son extension ? Pour atteindre cet objectif, on interprète dans un premier temps les données sismiques ; c'est à dire que l'on identifie à la fois des horizons qui correspondent à des interfaces entre milieux de différentes propriétés physiques (densité et vitesse de propagation des ondes acoustiques) et des failles qui marquent la discontinuité latérale des horizons (*figure 2.4*). Les horizons marquent la transition entre couches sédimentaires successivement déposées dans le temps, alors que les failles marquent un décalage des couches survenu pendant ou après la sédimentation.

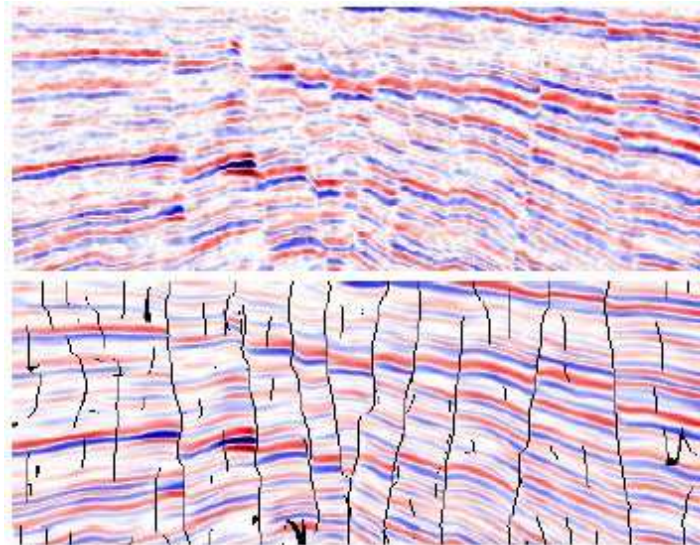


FIG. 2.4 – Illustration des réflexions (rouge et bleu) et des failles (traits verticaux noirs)

Les données sismiques interprétées et les données de puits sont utilisées pour contraindre le modèle réservoir.

Caractérisation pétrophysique du réservoir

Un réservoir pétrolier doit également être caractérisé en termes de propriétés pétrophysiques. Nature des roches, porosité, saturation en hydrocarbures, perméabilité, etc ... sont

estimées lors de cette étape. Ces propriétés n'étant disponibles qu'au niveau des puits, il faut les étendre sur le champ spatial délimité par le réservoir. Les données sismiques servent de guide (dérive) pour cette opération lors de laquelle les techniques géostatistiques sont couramment employées.

Calcul de volumes (volumétrie)

Une fois que le contenant et le contenu du réservoir sont caractérisés, il est possible de faire des estimations des volumes d'hydrocarbures en place. Quel volume d'hydrocarbures est-il possible de récupérer ? Et quel degré de confiance faut-il accorder à l'estimation de ce volume ? Pour répondre à cette dernière question, il est nécessaire de passer par des simulations qui, seules, sont capables d'appréhender correctement les incertitudes.

Simulation réservoir

Avant de se décider à exploiter un réservoir, il faut également procéder à des simulations de récupération des hydrocarbures. Les modèles de simulation réservoir, élaborés par des ingénieurs réservoir, sont des modèles dits fluides ou dynamiques.

La simulation requiert donc un grand nombre de données qui proviennent pour une partie de l'étude géologique et pour une autre partie de données acquises par sismique réflexion.

2.3 La sismique réflexion

La sismologie correspond à l'étude des tremblements de terre. Les fondements théoriques en ont été posés au début du *XIX^e* siècle et les premières expérimentations ont eu lieu à la fin de ce même siècle. La sismique réflexion naît au début des années 1920 lorsqu'une petite équipe de géophysiciens réalise une expérience dans le sud de l'Oklahoma. A l'aide d'une charge de dynamite et d'un sismographe, ils font le premier enregistrement d'ondes sonores qu'ils ont provoquées et qui se sont propagées au travers de la couche terrestre. Ce n'est qu'aux alentours de l'année 1929 qu'elle commence à intéresser les acteurs du monde pétrolier pour ensuite connaître un essor considérable après qu'on eut prouvé son efficacité dans la recherche des hydrocarbures. La qualité des données ainsi acquises ne cesse d'augmenter depuis cette époque grâce à l'évolution des techniques et des appareils de mesure.

2.3.1 Principe

Nous nous efforçons de présenter ici les bases de la sismique réflexion. Cette technique est décrite plus en détail dans [31], [66], [75], [32], [62] et [11]. La sismique réflexion est basée sur un phénomène familier : l'écho. Une partie de l'énergie de l'onde sismique qui se propage dans les matériaux constituant le sous-sol (solides, liquides ou gazeux) est réfléchi (ou diffractée) aux interfaces des matériaux présentant des impédances acoustiques¹ différentes. L'autre partie est transmise. Ces interfaces sont aussi appelées réflecteurs. On peut rapprocher ce phénomène de l'onde sonore de la voix qui se propage dans l'air et qui est réfléchi sur la surface d'un corps plus dense comme, par exemple, un mur ou la paroi d'une falaise. L'approximation de l'optique géométrique permet de bien comprendre comment l'énergie se propage dans le sous-sol.

¹produit de la densité du milieu par la vitesse de l'onde

2.3.2 Acquisition sismique

Pour acquérir des données en sismique réflexion, il est nécessaire de posséder un système émetteur – récepteur – laboratoire d’enregistrement numérique. L’émetteur, aussi appelé source, émet un signal acoustique qui se propage dans le sous-sol, se réfléchit et se transmet au niveau d’interfaces géologiques (discontinuité d’impédance entre deux couches). Les ondes réfléchies sont enregistrées en surface par des récepteurs (*figure 2.5*).

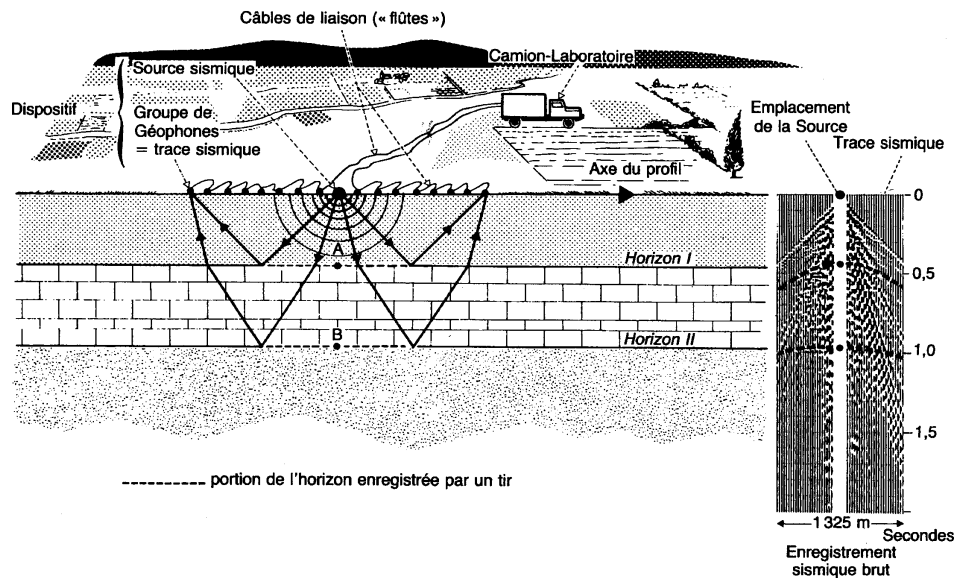


FIG. 2.5 – Principe de la méthode sismique et acquisition des données (document IFP)

Le temps mis par l’onde pour réaliser le trajet source – récepteur en étant réfléchi par une interface géologique permet d’estimer la profondeur du réflecteur, à condition de connaître les vitesses de propagation des ondes. L’amplitude de l’onde réfléchi est proportionnelle au contraste des impédances acoustiques entre les deux couches entourant le réflecteur pour une incidence perpendiculaire à l’interface.

Les sources sismiques utilisées en acquisition terrestre sont principalement l’explosif et les vibreurs. En acquisition marine, les sources sont des canons à air (*figure 2.6 (a)*) ou à eau. La fréquence de la source est typiquement comprise entre 5 et 70 Hz.

J.L. Mari décrit de façon détaillée dans [45] les capteurs sismiques que sont géophones et hydrophones. Un géophone est composé d’une bobine suspendue à un ressort. Lorsque le géophone vibre du fait des mouvements du sol, la bobine produit une force électromagnétique engendrant un signal électrique qui est proportionnel à la vitesse de déplacement du sol. Un hydrophone est un capteur piézo-électrique, équivalent à un condensateur. L’hydrophone fournit un signal proportionnel à la surpression produite par les ondes auxquelles il est soumis.

Une des caractéristiques des dispositifs d’acquisition actuels est qu’ils sont généralement directionnels. Les segments définis par les couples émetteur-récepteur sont souvent orientés dans une direction préférentielle. Ceci est d’autant plus vrai en acquisition marine où un bateau traîne derrière lui tout un dispositif émetteurs-récepteurs (*figure 2.6 (b)*). L’acquisition sismique n’est pas parfaitement régulière (à cause, par exemple, des courants marins) alors que

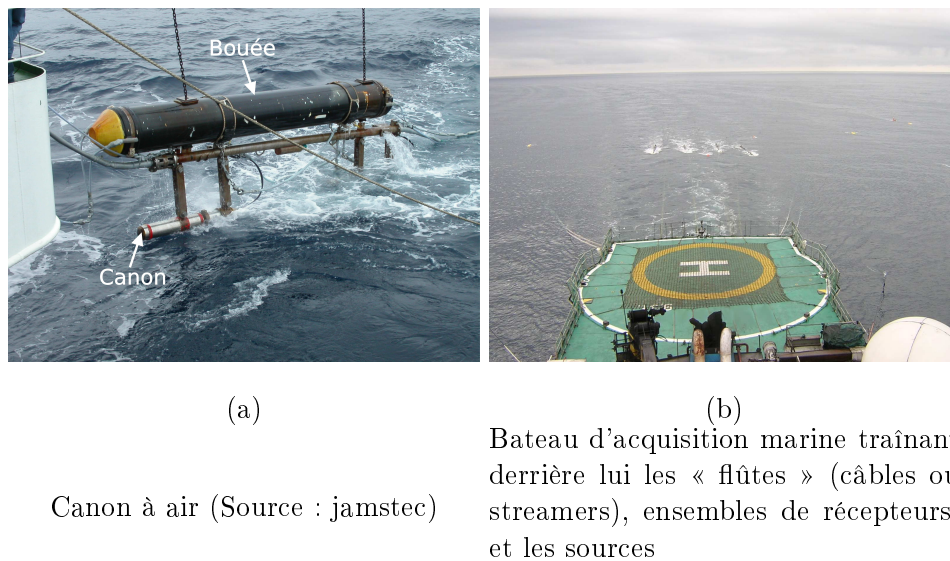


FIG. 2.6 – Outils d'acquisition marine

les traitements supposent en général une acquisition régulière. Il en résulte des artefacts dans les résultats comme, par exemple, des « footprints » (*figure 2.7*). Ces artefacts reproduisent, au niveau des données, la direction d'acquisition.

2.3.3 Les différentes révolutions techniques

Nous présentons ici les avancées majeures qui ont révolutionné à leur manière le monde de la sismique ces dernières années

Les années 80 : la révolution informatique

Dans les années 80, le traitement des données sismiques a connu un essor considérable grâce à l'évolution des technologies informatiques. En effet, les outils de traitement des données ont considérablement évolué – aussi bien en capacité mémoire qu'en puissance de calcul – et ont permis de traiter plus vite de grandes quantités de données. Les progrès informatiques ont également permis de visualiser ces données de manière plus interactive et ont ainsi autorisé une meilleure compréhension des données, donc une meilleure appréhension de la structure du sous-sol. Ainsi, grâce à l'évolution des outils informatiques, se sont ouvertes, et s'ouvrent encore aujourd'hui, de nouvelles perspectives de développement qui ont engendré de nombreuses solutions permettant le traitement des données sismiques.

Les années 90 : la sismique 3D

L'utilisation des acquisitions sismiques 3D a connu un réel essor industriel dans les années 1990. Elles représentent maintenant plus de 80% des campagnes d'acquisition. Les acquisitions 3D se sont imposées naturellement grâce à tous les avantages qu'elles présentent par rapport aux techniques 2D comme la redondance spatiale et une meilleure résolution.

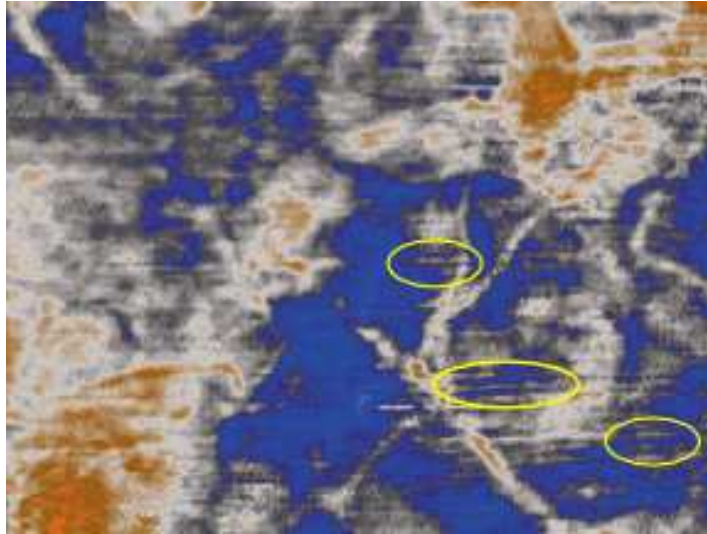


FIG. 2.7 – Exemple de footprint

Une campagne d'acquisition 3D peut couvrir une surface de 2000 km², ce qui génère un volume de données colossal. Les jeux de données actuels possèdent souvent plus de 10¹² points.

Le coût d'une campagne 3D dépend du terrain d'acquisition. On imagine bien qu'une acquisition en mer sera moins problématique, donc coûtera moins cher, qu'une acquisition en milieu accidenté (montagne ou jungle par exemple). Le coût supérieur à celui d'une campagne 2D est compensé par la précision des données récoltées qui diminue la probabilité d'un forage « sec », c'est à dire qui ne produit pas.

Les années 2000 : la sismique 4D

Le début du *XXI*^e siècle a vu l'avènement de la sismique 4D. Cette nouvelle technique consiste à répéter les acquisitions sismiques 3D sur un même champ afin de mesurer et quantifier l'évolution du réservoir durant la phase d'exploitation. Cette technique porte le nom de **monitoring de réservoir**. Elle a mis à profit les avancées technologiques engendrées par la sismique 3D, ainsi que les capacités de traitement de données des stations de travail. La sismique 4D a pour but d'optimiser l'exploitation des réservoirs. En effet, elle permet de les « voir » évoluer. Par exemple, lorsqu'une compaction d'une partie du réservoir survient et empêche le brut d'évoluer vers le point d'extraction, il est envisageable de comprendre pourquoi le puits ne produit plus et d'y remédier en forant à un autre point du réservoir. Une orientation du forage guidée par les informations des données 4D permet de pénétrer dans le réservoir contenant encore de l'hydrocarbure. La sismique 4D est promise à un bel avenir.

On peut noter que de nombreuses autres évolutions techniques ont vu le jour ces dernières années dans tous les domaines en rapport avec l'exploitation des réservoirs pétroliers. On peut citer comme exemple les techniques de forage qui permettent de forer à l'horizontal depuis un point situé assez profondément sous le sol (forage à grand départ) ou encore de drainer plusieurs puits à la fois grâce aux forages directionnels.

Les techniques sismiques sont en constante évolution et chaque gain de temps, de qualité et de précision est un élément important à la fois pour l'exploration et l'exploitation pétrolières.

Les données sismiques, une fois acquises, ne sont pas exploitables telles quelles. Elles doivent subir un traitement long et complexe avant d'être fournies au géologue et à l'interpréteur.

2.4 Traitement sismique

L'objectif principal du traitement sismique est de retrouver certaines propriétés du sous-sol (contraste des impédances) à partir d'enregistrements en temps fait à la surface. L'opération d'imagerie que l'on appelle migration profondeur consiste à refocaliser à la bonne position en profondeur les signaux enregistrés en surfaces. Elle nécessite la connaissance d'un modèle de vitesse de propagation des ondes dans le sous-sol. Il peut être obtenu en exploitant les redondances des données sismiques qui illuminent un même point en profondeur selon différents angles ou différents offsets. Une simplification de la migration consiste à sommer les données selon une loi simplifiée. Elle est valable pour des données homogènes et des interfaces horizontales (milieu tabulaire).

Le traitement sismique se décompose en plusieurs étapes [45]. Nous ne décrivons dans la suite que la sommation qui est l'une des étapes importantes du traitement des données sismiques. Elle aide à comprendre certains artefacts présents dans les cubes sismiques. La sommation consiste à sommer en une seule trace toutes les traces illuminant des points miroirs situés sur une même verticale. Dans l'exemple de la *figure 2.8*, les systèmes source-récepteur 1, 2 et 3 permettent de mesurer la réflexion d'un même point sur le réflecteur (*figure (a)*). Les traces alors obtenues pour chaque enregistrement sont données dans la *figure (b)*. L'onde ayant parcouru plus de chemin dans le cas du système 3, l'empreinte du point mesuré apparaît plus tard dans l'enregistrement 3 que dans l'enregistrement 1. Pour réaliser la sommation il est alors nécessaire de corriger le décalage à l'aide d'un modèle de vitesse adapté. On réalise ainsi une horizontalisation des traces appelée correction dynamique (NMO en anglais) (*figure (c)*) que l'on peut ensuite sommer pour en obtenir une seule, comme celle de la *figure (d)*. La sommation est une étape majeure du traitement sismique. Cette opération est appelée « stack » en anglais.

Cette opération nécessite de faire l'hypothèse que les réflecteurs sont horizontaux. En effet, dans le cas contraire, l'image finale ne pourra pas être focalisée correctement. Des techniques existent pour résoudre ces problèmes ([45]) mais nous ne les développons pas ici.

Lors du traitement sismique, des artefacts sont générés, appelés artefacts de traitement. Ils se cumulent avec les artefacts d'acquisition (voir ci-dessus). Il existe tout un pan du traitement qui a pour objectif de réduire ces artefacts. Les techniques de filtrage spatial linéaire sur les données post-stack y trouvent leur place. Nous décrivons une de ces méthodes dans la *section 3.3.2*

2.5 Les images sismiques

Dans cette partie, nous présentons quelques unes des images sismiques que nous avons eues à notre disposition pour tester et mettre au point les méthodes que nous avons implémentées.

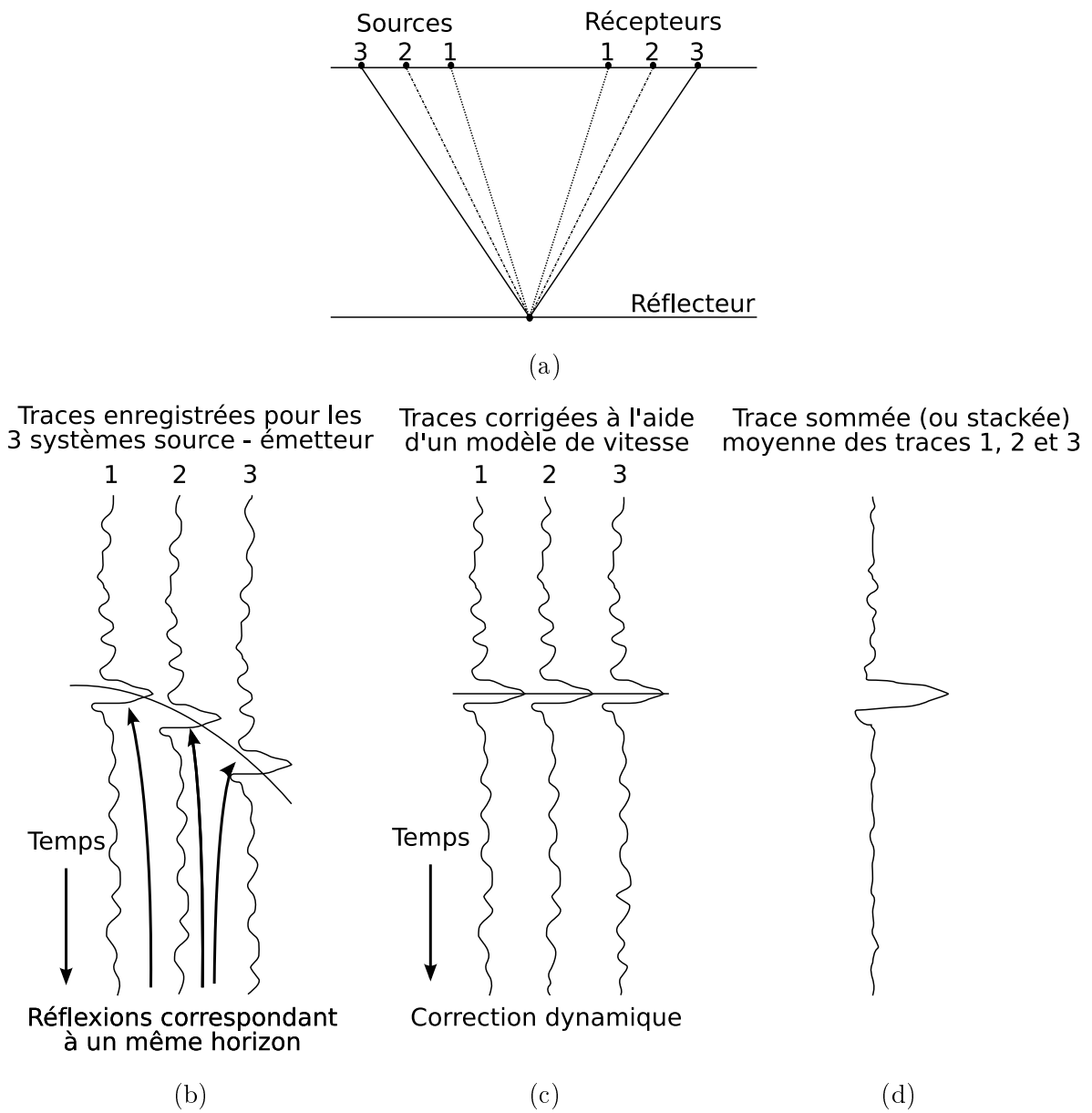


FIG. 2.8 – Illustration de la méthode de sommation des traces correspondant au même point miroir (Source : Schlumberger)

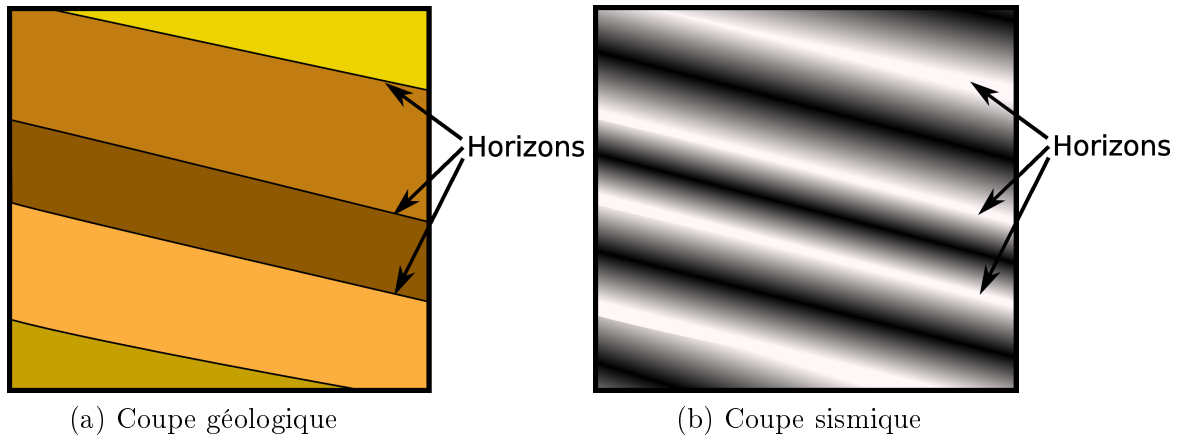


FIG. 2.9 – Illustration d'un horizon sismique

2.5.1 Définitions

Quelques termes empruntés au vocabulaire géophysique, pétrolier ou sismique sont définis ci-dessous :

- Un **horizon** sismique correspond à l'interface entre deux couches géologiques présentant une différence d'impédance acoustique, donc sur laquelle peuvent se réfléchir les ondes sonores servant à imager le sous-sol (*figure 2.9 (a)*). On parle aussi de réflecteur. Les horizons sont les structures géologiques que nous cherchons à extraire. Ils correspondent à un maximum local de l'onde sismique (*figure 2.9 (b)* pour un signal à phase nulle (symétrique)). Sur les images présentées ci-dessous, ce sont les couches les plus claires.
- Par abus de langage, on appelle **cube sismique**, ou **cube**, un bloc de données 3D, même si les dimensions ne sont pas forcément égales entre elles. On désigne par **cube** ou **image 3D d'amplitude** les données 3D représentant l'amplitude de l'onde sismique pour chacun des points du volume de données.
- Le terme **inline** correspond à la direction d'acquisition des données sismiques. Il peut également désigner la longueur du cube dans cette direction (*figure 2.10*).
- Le terme **crossline** correspond à la direction perpendiculaire à la direction d'acquisition des données sismiques. De la même manière, on peut faire référence à la longueur du cube correspondante à l'aide de ce terme (*figure 2.10*).
- La troisième dimension du cube sismique peut être définie de deux manières : soit elle correspond au **temps** qu'ont mis les ondes sismiques pour aller de la source au récepteur en passant par le réflecteur (temps double), soit elle réfère à la **profondeur** à laquelle se trouvent les réflecteurs après opération de migration en profondeur (*figure 2.10*). On passe du temps à la profondeur par une conversion appropriée. L'unité de temps est la seconde pour le temps de parcours source – réflecteur – récepteur (stwt en anglais (« second two way time »)).
- L'ensemble des points situés sur une même ligne verticale (ayant mêmes coordonnées

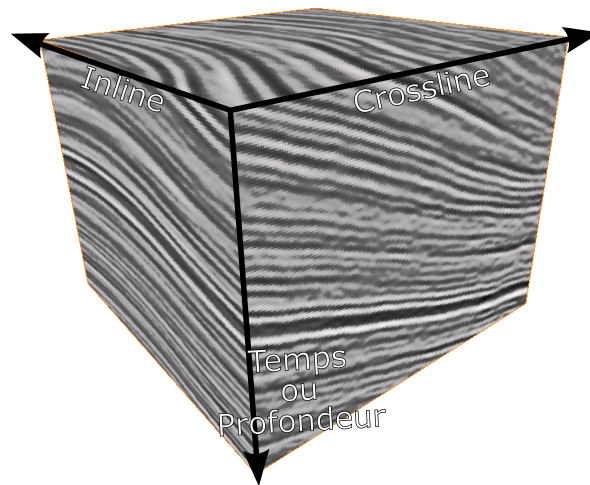


FIG. 2.10 – Dimensions d'un cube sismique : Inline, Crossline et Temps ou Profondeur

inline et crossline) constitue une **trace sismique**.

- **Pointer** un horizon consiste à associer ensemble les points de l'image appartenant à un même réflecteur de façon à pouvoir extraire ce dernier des données ou à réaliser des calculs le long de l'horizon.
- Une **faille** correspond au plan de rupture de deux blocs de roches qui ont glissé l'un par rapport à l'autre le long de ce plan.

2.5.2 Bestiaire

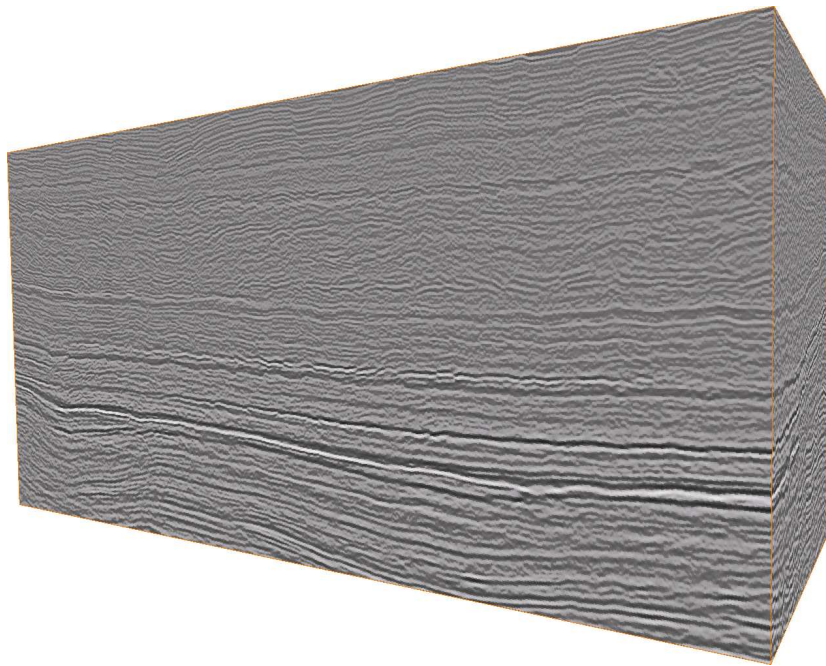
Un grand nombre des images que nous avons utilisées nous a été fourni par des industriels du monde pétrolier, qui nous ont permis d'améliorer progressivement nos algorithmes au travers des retours constructifs qu'ils ont pu nous faire sur les résultats que nous leur avons présentés.

Nous présentons dans cette partie quelques uns de nos jeux de données de tests. Nous avons essayé de présenter les images telles qu'elles sont dans la réalité, c'est à dire avec des tailles variées, des qualités d'acquisition diverses, etc . . . Bien que souvent de taille déjà conséquente, ces images sont pour la plupart des sous-ensembles de jeux de données bien plus grands.

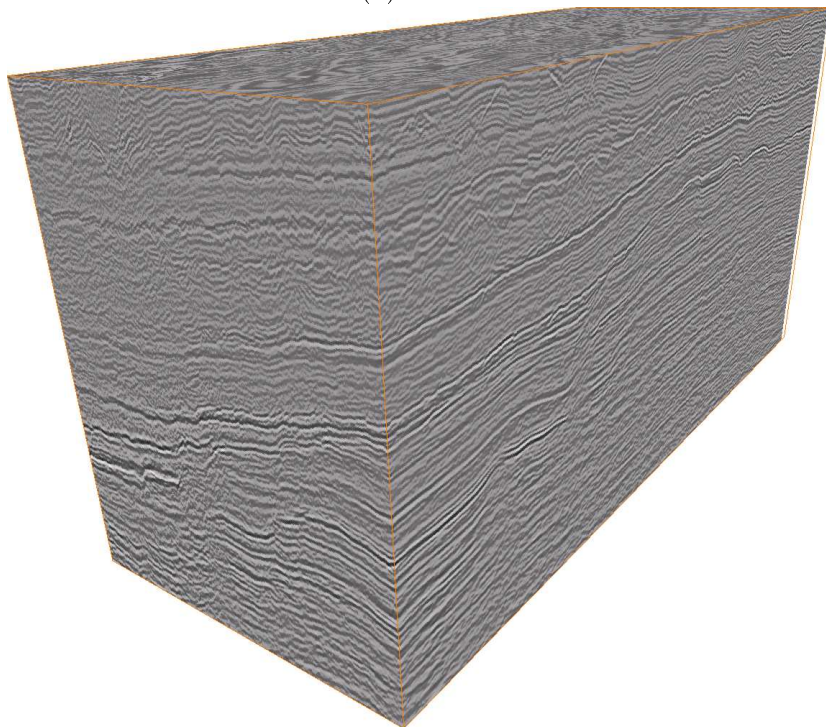
Nous avons aussi travaillé avec des données sismiques que nous ne pouvons montrer pour des raisons de confidentialité.

La *figure 2.11* montre deux vues d'un jeu de données présentant assez bien la structure des images sismiques avec une superposition de couches alternées de niveaux de gris sombres et de niveaux de gris clairs. Elles correspondent aux variations de pressions dues à l'onde sismique qui s'est propagée dans le sous sol. On remarque également la présence de quelques discontinuités sur les horizons ainsi que des zones chaotiques où les réflecteurs ne sont pas très bien imagés et apparaissent un peu confus.

Les images des *figures 2.12 (a)* et *(b)* représentent deux vues d'un même jeu de données. Hormis un horizon très énergétique, on ne distingue que difficilement les structures. On peut

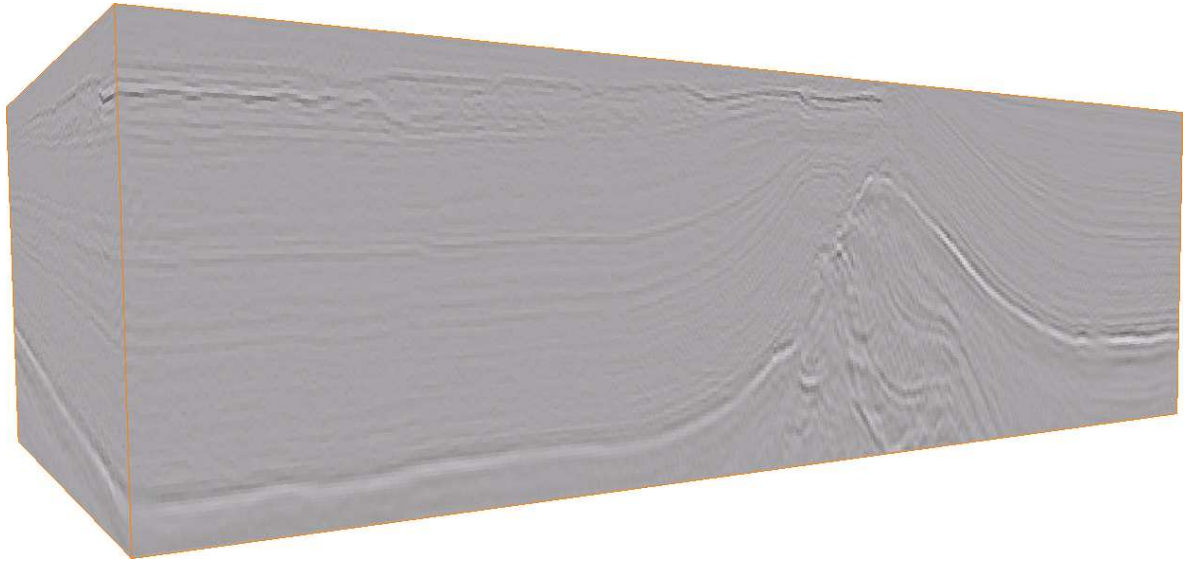


(a) Vue 1

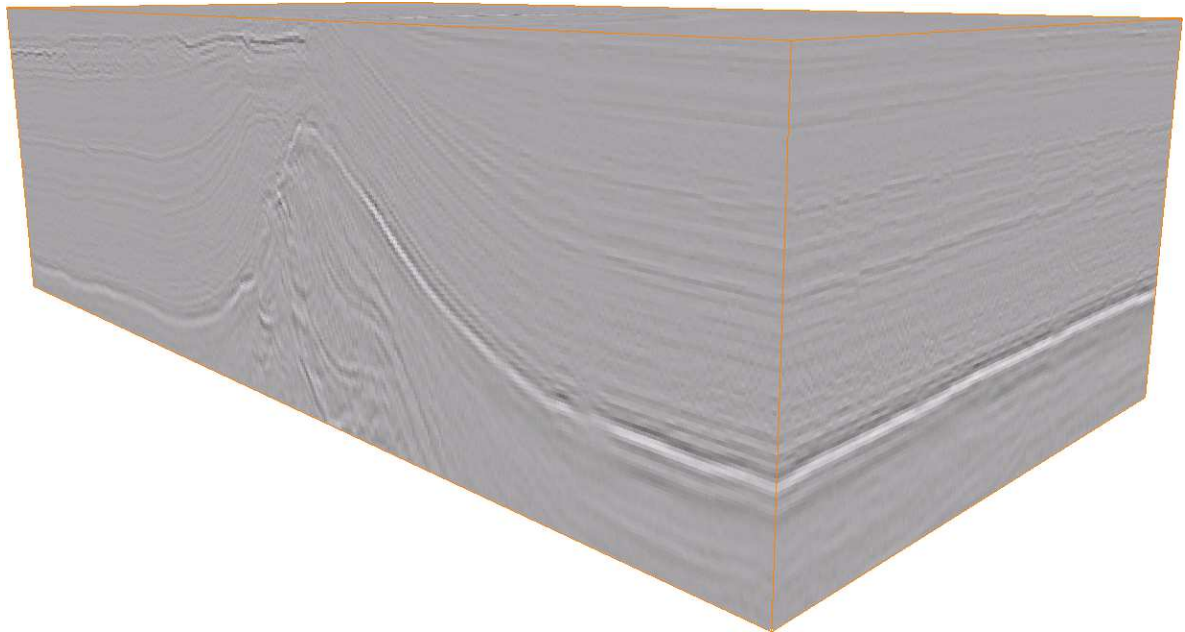


(b) Vue 2

FIG. 2.11 – Image de dimensions $1001 \times 401 \times 501$



(a) Vue 1



(b) Vue 2

FIG. 2.12 – Image de dimensions $400 \times 200 \times 121$

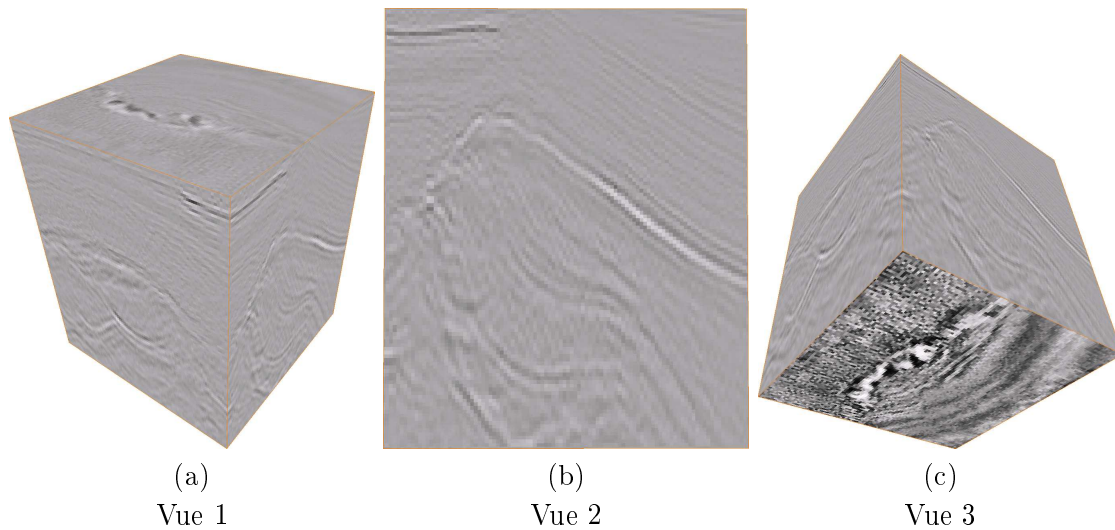


FIG. 2.13 – 3 vues d’un sous-cube de l’image de la *figure 2.12*. Image de dimensions $100 \times 100 \times 121$

cependant voir que les horizons ne sont pas toujours bien horizontaux. On peut également observer de nombreuses discontinuités structurales. Ces dernières semblent provenir à la fois de discontinuités géologiques mais également d’artefacts de reconstruction.

La *figure 2.13* présente trois vues d’un sous-cube des données de la *figure 2.12*. On peut remarquer sur la vue (c) que les données sont en plus très bruitées.

Il existe de nombreux types d’artefacts que l’on peut rencontrer dans des images sismiques 3D. On trouve tout d’abord des artefacts dus au traitement qui peut produire des zones mal illuminées (on a alors localement une image de mauvaise qualité). On trouve également des artefacts provenant d’une prise en compte insuffisante de la physique comme par exemple la migration de multiples. Le traitement appliqué semble être, pour les images présentées ici, un stack seul alors que des traitements plus poussés, comme la migration par exemple, auraient sans doute pu résoudre une grande partie des problèmes. Quelques exemples sont illustrés par les *figures 2.14 (a) et (c)*. La *figure 2.14 (b)* présente des structures non horizontales qui compliquent le traitement des données brutes.

2.6 Conclusion

Nous avons ainsi présenté brièvement la chaîne d’acquisition et une partie de la chaîne de traitement des données sismiques. Les informations données dans ce chapitre sur le comment et le pourquoi des images sismiques doivent, nous l’espérons, permettre au lecteur d’aborder les chapitres suivants, car c’est dans ce contexte dynamique et actuel que nos travaux prennent tout leur sens.

La suite de cet ouvrage traite de la segmentation / extraction de surfaces sismiques correspondant aux interfaces entre couches géologiques. Ces dernières ont une importance dans la détection et la définition des limites structurales des réservoirs pétroliers ainsi que dans le traitement des données sismiques en permettant la construction d’un modèle de vitesse plus

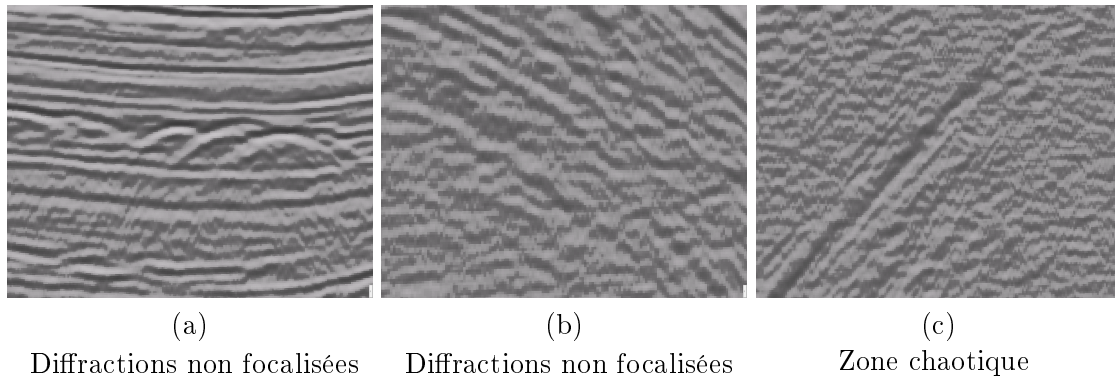


FIG. 2.14 – Illustration des principaux problèmes que l'on peut rencontrer sur des images sismiques

précis pour la conversion temps / profondeur (migration).

Chapitre 3

Segmentation morphologique d'images sismiques 3D

Ce chapitre traite de l'application de la segmentation morphologique à l'extraction de structures formées par les horizons géologiques. Dans un premier temps, nous présentons la segmentation hiérarchique. Nous appliquons ensuite cette dernière à des images sismiques 3D.

L'interprétation d'images sismiques consistant à apporter une vision plus synthétique des données sismiques, il est nécessaire d'extraire de ces données les événements géologiques importants qui permettent de mieux appréhender la structure de l'image et ainsi de trouver plus facilement les informations utiles pour l'interprétation.

Après avoir présenté les différentes techniques existantes, nous proposons une nouvelle méthode permettant d'extraire des horizons sismiques des images d'amplitude. Comme l'algorithme que nous proposons est modulable à l'aide de paramètres, nous nous efforçons ensuite de donner un guide dans le choix des valeurs de ces paramètres.

3.1 État de l'art de la segmentation d'images sismiques

Le présent état de l'art a pour but de donner un panorama aussi large que possible de ce qui se fait actuellement ou s'est fait en segmentation d'images sismiques. Comme nous l'avons vu dans le *chapitre 2*, les techniques d'acquisition 3D sont assez récentes par rapport aux techniques 2D. Ceci induit une différence significative dans le volume de documentation que l'on peut trouver à ce sujet. Bien qu'il y ait de moins en moins d'acquisitions 2D, et que la segmentation d'images 2D ne soit pas le sujet de ces travaux, nous présentons tout d'abord quelques méthodes de segmentation 2D parmi les plus significatives. Nous présentons ensuite les méthodes permettant de segmenter des images sismique 3D.

3.1.1 Les techniques 2D

Parmi les méthodes de segmentation 2D, on trouve plusieurs travaux basés sur l'étude de la structure caractéristique des images sismiques ([36], [42], [60], [61] et [2]). En effet, l'alternance plus ou moins régulière et orientée des empilements géologiques apporte une grande quantité d'information qui peut être utilisée pour calculer des attributs de texture pour tout ou partie des points de l'image, et ainsi permettre une segmentation robuste des horizons. Cette étude de la structure est le plus souvent couplée à d'autres techniques qui réalisent la segmentation proprement dite.

On trouve des méthodes par ondelettes dans les techniques de segmentation des images sismiques ([67], [59], [25], [12] et [54]). Parmi ces techniques sont décrites des méthodes multi-échelles de filtrage de sections sismiques 2D à des fins d'extraction d'horizon et de pointer de failles.

Lomask et al., dans [41], segmentent des sections sismiques afin d'extraire les frontières d'un faciès géologique de type dôme de sel dans des sections sismiques 2D. Pour cela, ils se basent sur les techniques de coupe normalisée, ce qui les contraint à n'extraire qu'une surface à la fois.

Enfin, dans [52], Moueddene présente l'utilisation de filtres et d'outils de segmentation morphologiques qu'il applique à des images sismiques 2D dans le but d'extraire des structures caractéristiques de ces sections.

Ces techniques sont appliquées sur des images sismiques 2D et sont donc amenées à ne plus être utilisées dans les années à venir, car comme nous l'avons vu dans le *chapitre 2*, les données 3D on supplanté les données 2D, ces dernières étant moins porteuses d'information.

On peut remarquer cependant que certaines méthodes 2D peuvent servir de base de réflexion pour trouver de nouvelles méthodes de segmentation applicables aux images 3D. D'autres ont déjà été transposées en 3D.

3.1.2 Les méthodes 3D

Dans le *chapitre 2*, nous avons présenté les intérêts indéniables de la sismique 3D. Cependant, les références concernant la segmentation de données sismiques tridimensionnelles sont moins nombreuses que celles concernant la segmentation de sections sismiques. On peut les classer dans plusieurs catégories : les techniques qui visent l'extraction de structures géologiques, comme les horizons ou les failles, et celles qui cherchent à segmenter les données en zones d'intérêt.

La segmentation appliquée à l'extraction d'horizons sismiques

Les techniques mettant en œuvre les coupes normalisées sont également utilisées en segmentation d'images sismiques 3D. Par exemple, Hale et Emanuel, dans [26] et [27], après avoir établi un maillage adéquat de l'image, le segmentent à l'aide d'une itération de coupes normalisées appliquées à ce maillage, ou bien appariant les mailles, selon des critères de ressemblance, de manière à obtenir une partition de l'image d'origine. Les méthodes utilisant les coupes normalisées sont cependant coûteuses en temps de calcul et dans un contexte d'extraction d'horizons dans des images de grande taille sous contraintes temporelles, il semble difficile de pouvoir les utiliser.

Les réseaux de neurones trouvent également une application en extraction d'horizons sismiques dans les travaux de Harrigan et al. ([29]). Après un apprentissage sur quelques structures, le réseau de neurones est capable de classer chaque point d'une trace sismique en deux classes : point de surface et autres points. Travailler trace par trace ne renseigne cependant pas sur la cohérence latérale des points de surface. Il semble alors assez délicat, à la vue des images sismiques et de leur complexité, de pouvoir apparier correctement tous les points ainsi extraits en des surfaces géologiquement cohérentes.

Une méthode de pointer d'horizons par combinaison de morceaux de surfaces est décrite par Faraklioti et Petrou dans [20]. Les fragments d'horizons détectés point par point le long de chaque trace sont ensuite associés en prenant en compte leur orientation principale donnée par leur vecteur normal.

O'Maley et Kakadiaris, quant à eux, proposent, dans [55], une solution complète permettant de réaliser un filtrage, basé sur la structure des images sismiques, couplé à un outil de pointer des horizons inspiré de celui de Faraklioti et Petrou ([20]) et à un algorithme permettant d'apparier ces horizons de part et d'autre des failles.

Blinov et Petrou, dans [10], présentent une chaîne de traitement permettant d'extraire des horizons d'une image sismique. Après avoir réalisé un filtrage de l'image s'appuyant sur une estimation préalable de la direction de l'horizon en chaque point de l'image, ils réalisent une segmentation en appariant les points d'horizons potentiels calculés trace par trace. Une dernière étape consiste à produire des surfaces maillées à partir des points extraits. Dans chacun de ces trois derniers cas, la sélection des points susceptibles d'appartenir à une surface s'effectue trace par trace ce qui ne permet pas d'exploiter au maximum la structure spatiale des données.

La segmentation en régions des données sismiques 3D

Comme nous l'avons évoqué dans la partie précédente, on trouve, en 3D, quelques techniques semblables à celles décrites en 2D comme, par exemple, les travaux de Fernández et al. ([24]) sur la segmentation de texture d'images 3D à l'aide de transformées en ondelettes. Cette dernière permet de segmenter une image 3D en régions, parmi lesquelles les géologues parviennent à trouver des structures géologiques remarquables.

Dans les travaux de Keskes et al. ([37]), les auteurs proposent une méthode d'interprétation des données sismiques permettant une segmentation chrono-stratigraphique des données d'amplitude.

Valet et al. ([71]) proposent une technique de segmentation d'images sismiques à partir de la fusion floue d'attributs qualifiant les voxels de l'image. Ils parviennent, par exemple, à extraire des zones de l'image correspondant à des régions chaotiques où les structures n'ont pas des orientations homogènes.

L'utilisation d'outils morphologiques pour la segmentation de cubes sismiques 3D est envisagée par Monsen et al. dans [50]. Les auteurs créent une segmentation de volumes sismiques en sous-volumes représentant des faciès géologiques. Pour y parvenir, ils réalisent une segmentation hiérarchique du cube sismique en valant les arêtes du graphe à l'aide des deux premiers moments statistiques des régions qui fusionnent. Cette dernière méthode est basée sur les mêmes outils que ceux que nous avons utilisés dans ce chapitre ; il n'y a cependant pas concurrence entre les deux méthodes car la finalité est différente : nous cherchons à extraire des horizons sismiques et non des zones d'intérêt. Cela corrobore le bien fondé de l'utilisation d'outils morphologiques pour segmenter des images sismiques.

De nombreux outils de pointer d'horizons et de segmentation d'images sismiques 3D industriels existent. Ils sont toutefois peu documentés. Selon les connaissances que nous pouvons avoir, ils sont, le plus souvent, basés sur des méthodes de croissance de régions qui sont assez rapides mais ne donnent pas toujours des résultats très fiables. Ils nécessitent, en outre, l'intervention d'un spécialiste pour désigner les germes utiles au fonctionnement des algorithmes. Ces méthodes apparaissent donc au final assez gourmandes en temps et en ressources humaines.

Parmi les techniques d'extraction d'horizons présentées ici, certaines, comme par exemple [20], apparaissent moins coûteuses en temps de calcul que les autres. Ceci leur ouvre les portes d'une possible application industrielle. Nous entrons alors directement en concurrence avec ces méthodes. La finalité est la même mais les techniques pour y parvenir sont différentes. L'originalité de la méthode que nous proposons ici réside dans le fait que c'est une approche globale. A l'inverse de la plupart des méthodes présentées au préalable, notre calcul de la segmentation prend en compte une grande partie, voire la totalité, de l'image, contre un voisinage réduit pour les autres méthodes. Ces dernières peuvent cependant constituer des pistes pour améliorer les algorithmes que nous développons.

Cette concurrence est souvent une concurrence *a posteriori* car de nombreux travaux ont été réalisés en même temps que les nôtres comme par exemple [55], [20], [50], [10]. Cela montre le caractère actuel de la problématique de segmentation d'images sismiques 3D.

3.1.3 Choix de la technique

A la vue des méthodes que nous avons présentées dans la section précédente, on peut se demander ce qui nous a poussés à nous tourner vers une approche différente. Tout d'abord, une

approche morphologique du problème de segmentation d'images sismiques 3D constituait, au moment du choix, une approche originale. En effet, comme nous l'avons évoqué dans l'état de l'art, l'application de techniques morphologiques n'avait pas encore été réalisée sur des volumes de données sismiques. En outre, une étude préalable réalisée par Beucher et Decencière pour la société ERM.S ([17]) a montré l'intérêt et le potentiel de l'utilisation de la morphologie mathématique en analyse d'images sismiques 3D. De plus, le contexte industriel de l'étude nécessitait des outils souples permettant de répondre assez vite à une problématique. La multitude de filtres et d'outils morphologiques le permettent. Enfin, l'algorithme breveté de segmentation par files d'attente hiérarchiques ([47]) développé au CMM est très rapide et permet de réaliser des segmentations d'images 3D de grande taille en des temps très concurrentiels.

Le choix des techniques utilisées dans ce chapitre s'est donc fait sur des critères raisonnés sous les contraintes d'une application industrielle nécessitant des algorithmes rapides et robustes.

3.2 Présentation du jeu de test

Le jeu de test que nous avons utilisé pour illustrer nos travaux est un cube de dimensions $201 \times 201 \times 150$. C'est naturellement un sous-cube d'un jeu de données de plus grande taille. Il a été filtré à l'aide de méthodes géostatistiques. Il fait partie des cubes les plus « propres » que nous ayons, mais n'est cependant pas exempt de défauts et convient tout à fait pour l'illustration, car il permet de se rendre compte des problèmes rencontrés sans pour autant présenter des résultats trop difficiles à voir. Nous présentons plusieurs vues de ce cube dans la *figure 3.1*.

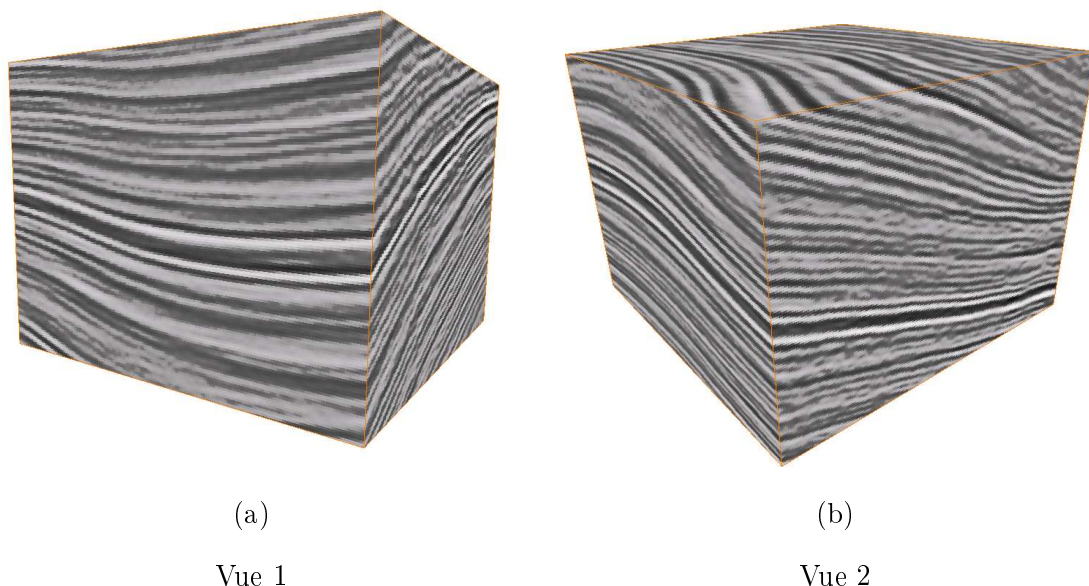


FIG. 3.1 – Cube sismique d'illustration de ces travaux

3.3 Préalables à la segmentation

Les processus de segmentation sont classiquement précédés par un ensemble d'étapes de préparation des données. Ces pré-traitements ont pour but de rendre plus efficace la segmentation proprement dite.

3.3.1 Anamorphose

Dans l'industrie pétrolière, les images sismiques usuelles sont codées en flottant, sur 16 ou 32 bits, pour avoir le plus de précision possible sur l'amplitude de l'onde qui se propage dans le sous-sol. Dans un contexte de pointer d'horizon, nous cherchons à extraire les maximums locaux d'amplitude. Nous n'avons donc pas besoin de cette précision requise par d'autres utilisations des données sismiques, mais seulement des valeurs relatives de l'amplitude en chaque point. De plus, pour la plupart des images que nous avons traitées, la dynamique des données ne justifiait pas d'être codée sur 32 bits.

Les données sismiques ont souvent de grandes dimensions et il est de plus en plus fréquent d'avoir des jeux de données de plusieurs milliards de points. Bien que nous n'ayons pas traité des images de cette taille, nous avons eu entre les mains des jeux de données conséquents, comme nous le verrons par la suite.

Avant de réaliser nos tests sur de telles images, nous avons donc réduit la dimension des données pour se ramener à des images codées sur 8 bits. Afin de ne pas trop modifier l'information contenue dans l'image originale, nous avons procédé par anamorphose, comme l'ont suggéré Decencière et Beucher dans [17], qui ont soumis plusieurs transformations à l'approbation d'industriels pétroliers. Ces derniers ont désigné l'anamorphose géométrique comme étant la meilleure. Cette anamorphose transforme une valeur x en une valeur x' de la manière suivante :

$$x' = 255 \times \frac{\operatorname{sgn}(x) \sqrt{x} - \operatorname{sgn}(\min) \sqrt{|\min|}}{\sqrt{|\max|} + \sqrt{|\min|}}$$

où \min et \max correspondent au minimum et au maximum des données, et où la fonction $\operatorname{sgn}(\alpha)$ renvoie le signe de α .

Le résultat de l'anamorphose géométrique est présenté dans la *figure 3.2 (b)*. Par comparaison, la *figure 3.2 (a)* présente le résultat obtenu avec une anamorphose linéaire.

En entrée de nos algorithmes, nous avons des images codées sur 256 niveaux de gris.

3.3.2 Filtrage

Dans le *chapitre 2*, nous avons montré quelques exemples d'images sismiques. Afin d'améliorer leur qualité, nous avons testé plusieurs filtres. Pour boucher les trous des surfaces, nous avons appliqué différentes fermetures morphologiques. Les résultats ont été assez décevants, car les filtres connectaient les structures recherchées avant de boucher certains trous de grande taille, empêchant ainsi toute segmentation dans de bonnes conditions.

Il est possible d'améliorer la qualité visuelle des données à l'aide de filtres diffusifs ou de h-maxima. Ils améliorent le contraste entre les phases claires et les phases sombres, mais écrasent la dynamique à l'intérieur de ces phases. Dans un contexte de pointer d'horizon qui consiste à extraire les valeurs maximales, ce type de filtres est à proscrire.

De plus, on peut se demander si essayer de boucher les trous existant dans les surfaces est opportun étant donné que la plupart de ces trous ont un sens géologique. Il semble alors peu

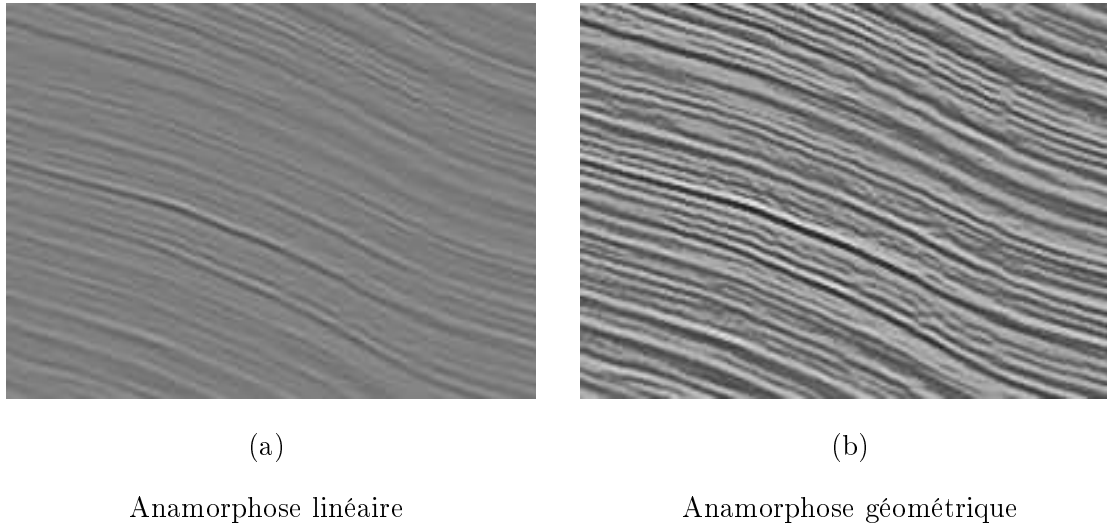


FIG. 3.2 – Anamorphoses transformant les données sismiques initiales codées sur 16 ou 32 bits en données 8 bits

souhaitable de les éliminer. De plus, boucher un trou causé par une faille peut entraîner la connexion de deux réflecteurs ne correspondant pas à la même déposition sédimentaire ce qui fausserait l'analyse des données basée sur les résultats de la segmentation.

Jusqu'à un certain niveau de bruit, l'algorithme de segmentation est assez robuste et permet quand même d'obtenir des résultats convenables. Les images trop bruitées ont été filtrées à l'aide de techniques géostatistiques très performantes, car bien adaptées aux données sismiques

En effet, la géostatistique propose une famille d'estimateurs particulièrement intéressante pour le filtrage de données spatialement échantillonnées.

3.3.3 Filtrage par krigeage factoriel

Le krigeage factoriel [46] permet en effet de décomposer un jeu de données en plusieurs composantes d'après une interprétation et une modélisation variographique. C'est ainsi qu'il est envisageable, grâce à cette technique, de filtrer les artefacts d'un jeu de données.

Un processus de filtrage spatial est réalisé en plusieurs étapes :

- une analyse de stationnarité des données,
- une analyse variographique
- la mise en œuvre du filtrage proprement dit.

Analyse de stationnarité des données

Les données sismiques, qu'elles soient 2D ou 3D, présentent souvent une dérive spatiale, caractérisée par une non-stationnarité de la moyenne à l'échelle du champ de données. La théorie des covariances généralisées permet de gérer la non stationnarité. Le problème est qu'une covariance généralisée ne peut pas être interprétée « à la main » en termes de composantes spatiales. Si une dérive est présente au niveau des données, on décide alors de l'extraire et de

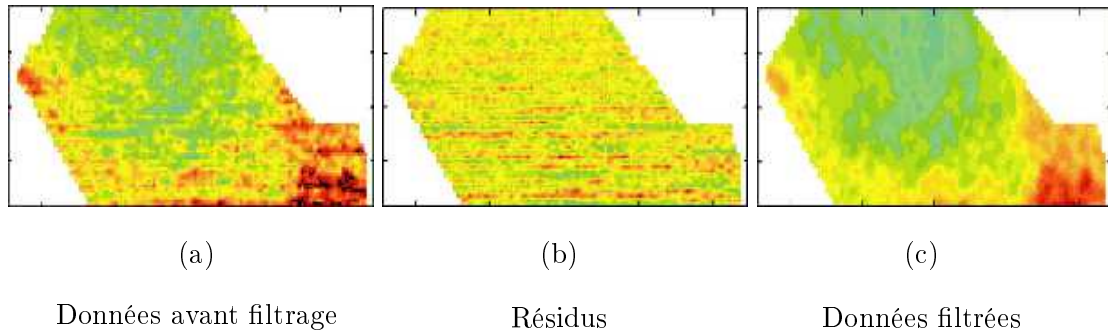


FIG. 3.3 – Exemple de filtrage sur un jeu de vitesses de stack en time-slice

travailler sur les résidus associés, qui eux sont stationnaires. Généralement, cette étape permet d'isoler les artefacts au niveau des résidus stationnaires. On « traque » alors ces artefacts au niveau des résidus.

Analyse variographique et filtrage

Le variogramme expérimental d'un jeu de données stationnaire permet de quantifier le degré de corrélation spatiale d'un jeu de données à plusieurs échelles. Nous parlerons plus longuement de cet outil dans le *chapitre 6*.

Une fois le variogramme interprété et modélisé en termes de composantes cohérentes et anormales, il est possible d'estimer chacune de ces dernières par la technique du krigeage factoriel ([46]). On arrive ainsi à « filtrer » les artefacts des données, comme le montre la *figure 3.3*.

Les avantages de ce type de filtre spatial sont :

- une mise en œuvre possible, quelle que soit la structure d'échantillonnage des données (scatter (échantillonnage irrégulier) ou grille),
- une possibilité d'interpolation « en même temps » que le filtrage,
- une incertitude de l'estimation disponible (variance de krigeage),
- une prise en compte aisée des bruits, artefacts structurés de type footprint par exemple.

Les difficultés de mise en œuvre sont principalement liées au volume des données à traiter. Les techniques de krigeage sont relativement coûteuses en temps de calcul. Il reste que, en pratique, nous avons rarement eu besoin de filtrer nos images. Comme nous le verrons dans la suite, la méthode de segmentation que nous avons mise au point est relativement robuste au bruit que l'on peut trouver dans les images sismiques tant que ce dernier n'altère pas trop la structure globale des réflecteurs.

3.4 Outils de segmentation morphologique

Cette section présente la base des algorithmes de segmentation que nous avons utilisés pour la segmentation d'images sismiques. La segmentation hiérarchique ([53], [69] et [48]) est une technique permettant d'obtenir une hiérarchie de partitions de l'image traitée. A l'aide de cette hiérarchie, il est alors possible, en une seule étape de calcul, d'obtenir aussi

bien une segmentation fine qu'une segmentation grossière de l'image et également de passer progressivement de l'une à l'autre très efficacement sans avoir à recommencer la segmentation. La segmentation hiérarchique que nous avons utilisée est basée sur un algorithme de ligne de partage des eaux (LPE, « watershed » en anglais).

3.4.1 La ligne de partage des eaux

La ligne de partage des eaux (LPE) est un algorithme de segmentation d'image initialement proposé par Beucher et Lantuéjoul [7]. Il s'inspire de l'inondation imaginaire du relief topographique donné par la fonction qui représente l'image. L'inondation provient de sources définies par un autre algorithme ou placées à dessein par un utilisateur. Dans notre cas, la détermination des sources se fait automatiquement, comme nous le verrons par la suite. Nous donnons ci-dessous une description intuitive de la méthode. Une description complète est disponible dans [7] ou [49].

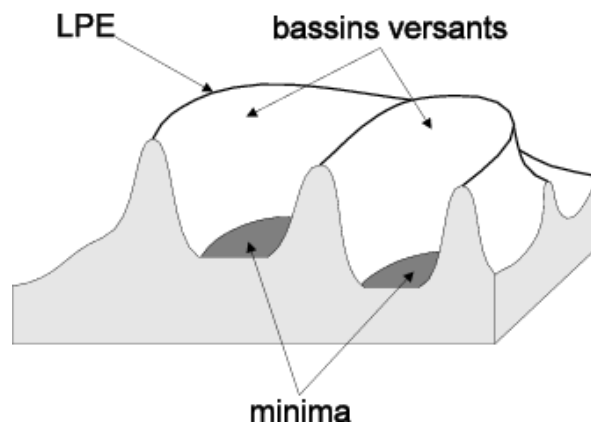


FIG. 3.4 – Illustration de la LPE

En pratique, on fait donc croître le niveau de liquide depuis les sources. Le liquide emplit les bassins versants – terme issu du domaine de l'hydrogéologie qui désigne l'ensemble des lieux géographiques tels que, si on déposait une bille en ces points, elle roulerait vers un même point qui correspond au minimum du bassin versant – jusqu'à ce que son niveau atteigne la hauteur maximum définie par la profondeur de l'image (par exemple, 255 pour une image codée sur 8 bits).

Pendant l'inondation, on érige un barrage en tout point où le liquide de deux bassins versants devrait entrer en contact. Ce barrage constitue la frontière qui sépare les différentes régions de l'image correspondant aux sources de l'inondation. L'ensemble des barrages ainsi construits donne, à la fin du processus d'inondation, la ligne de partage des eaux (*figure 3.4*).

Il existe plusieurs algorithmes efficaces pour mettre en œuvre cette approche. En particulier, les algorithmes à base de files d'attente hiérarchiques ([47]) permettent d'obtenir une complexité linéaire en fonction du nombre de pixels ou de voxels de l'image.

3.4.2 Application de la ligne de partage des eaux

Habituellement, la LPE est appliquée au gradient de l'image étudiée. Ceci permet d'obtenir les contours des objets comme résultat de la segmentation. Dans l'exemple de la *figure 3.5*, on voit, dans le premier cas (*figure 3.5 (a), (b) et (c)*), que la LPE appliquée à l'image gradient produit bien les régions désirées ((*c*)). En effet, le calcul du gradient donne de faibles valeurs aux points appartenant à une région homogène, et de fortes valeurs aux points des zones de transition. Lors de l'inondation, les sources sont placées aux minima de l'image gradient (dans les zones homogènes) et les lignes de crête sont donc formées par les fortes valeurs du gradient (donc les zones de transition, les contours). Ces lignes de crête formant la LPE, on obtient bien les contours des objets au final.

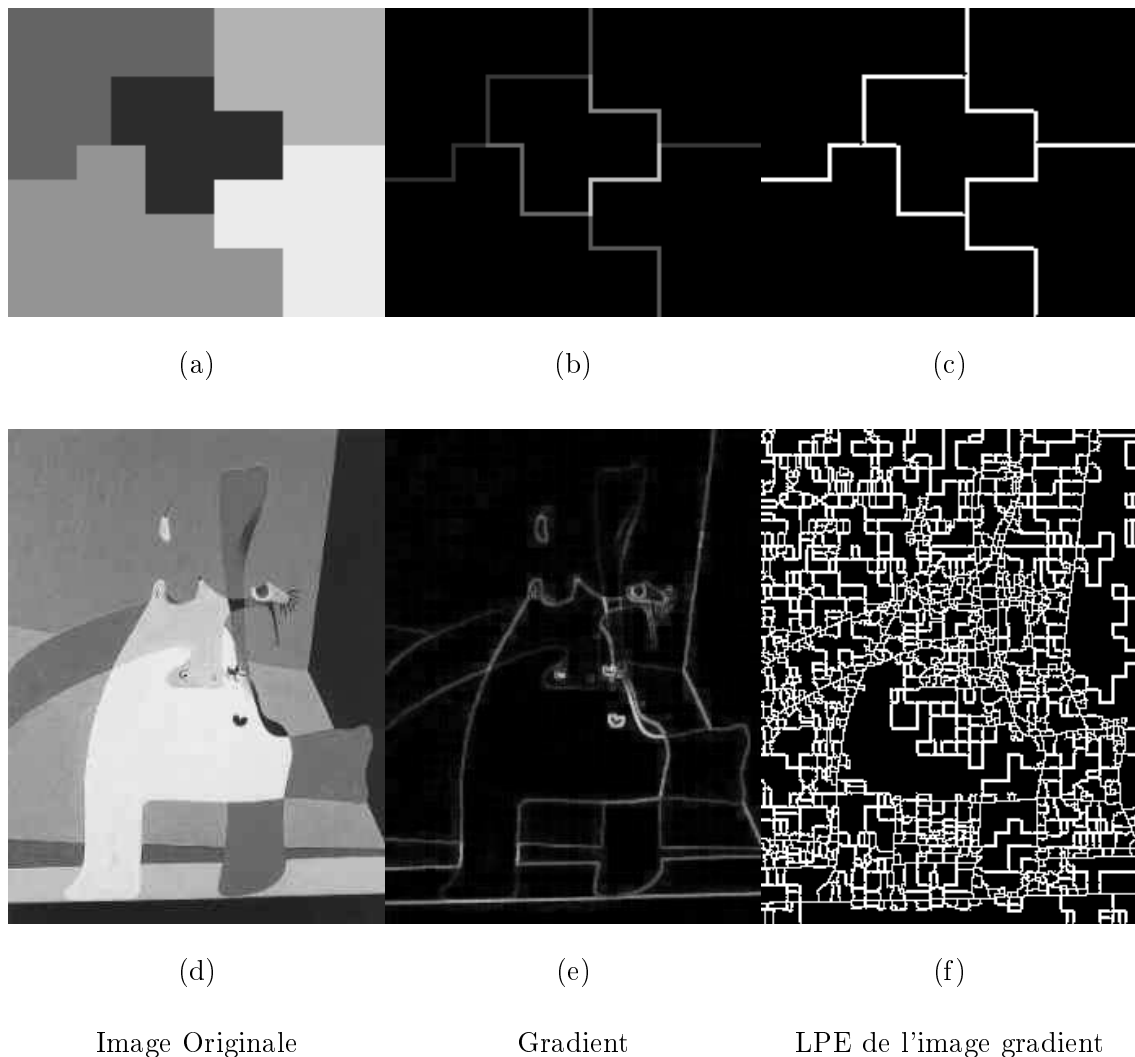


FIG. 3.5 – Illustration de l'utilisation de la LPE

Le second exemple de la *figure 3.5* montre bien que si on réalise la segmentation d'une image sans filtrage préalable ou sans prétraitement, on obtient dans la plupart des cas une multitude de petites régions ((*c*)), qui n'ont pas directement de réel intérêt pour les applica-

tions ultérieures. On parle alors de « sursegmentation ». Si on souhaite pouvoir extraire des objets de l'image, il apparaît donc nécessaire de réunir ces petites régions de façon à produire celles qui nous intéressent.

Il existe plusieurs méthodes pour y parvenir. L'une d'elles consiste à réaliser un prétraitement adéquat de l'image originale afin de réduire le bruit. Nous avons cependant vu dans la *section 3.3.2* que cette solution n'est pas satisfaisante. De plus, lorsque nous en avons besoin, nous avons appliqué des filtres géostatistiques (*section 3.3.3*).

Il serait également possible de réaliser un filtrage sur les minima qui engendrent des bassins versants de taille jugée insuffisante. Il faudrait alors faire deux inondations, ce qui doublerait le temps de calcul. Lors du traitement de grosses images (et, rappelons-le, c'est le cas des images sismiques), ce critère prend une grande importance. De plus, pour éliminer les régions jugées trop petites, il faudrait avoir recours à un seuillage dont la valeur serait assez délicate à trouver. Il est possible de traiter les cas particuliers, mais la mise en œuvre est alors de plus en plus complexe et le filtrage perd de son intérêt. Pour obtenir les plus grandes parties de l'image - souvent représentatives des objets les plus intéressants - il apparaît alors opportun d'utiliser la segmentation hiérarchique.

3.4.3 Hiérarchie de partitions et segmentation hiérarchique

Hiérarchie de partitions

Dans cette partie, on définit ce qu'est une hiérarchie de partitions, fondement de la segmentation hiérarchique décrite par la suite.

Soit E un ensemble. On dit qu'une partition P de E est incluse dans une partition Q de E , et on note $P \leq Q$, si et seulement si tout élément de P est inclus dans un élément de Q .

Une famille indexée de partitions de E , $\{P_i\}_{0 \leq i \leq n}$ est une hiérarchie de partition si et seulement si, $\forall i, j, 0 \leq i < j \leq n$, P_j est incluse dans P_i .

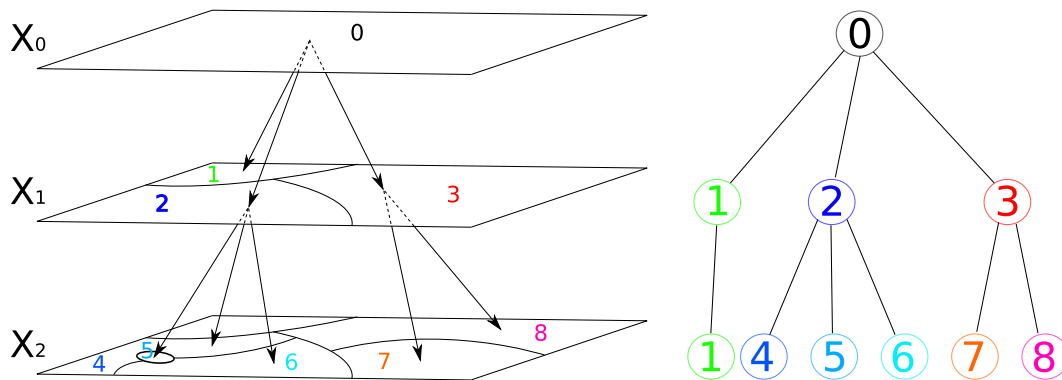


FIG. 3.6 – Illustration d'une hiérarchie de partitions. Chacune des partitions inférieures est plus fine que la partition juste au dessus. Le dendrogramme schématise la dépendance entre les régions et leur resegmentation

La *figure 3.6* montre un exemple de hiérarchie de partitions. La partition X_2 constitue la partition fine. Elle comporte six régions qui correspondent à une resegmentation de la partition X_1 qui comporte trois régions. La région 2 a ainsi été repartitionnée en trois régions : 4, 5 et

6 tandis que la région 3 a été repartitionnée en deux régions (7 et 8). La région 1 n'a quant à elle pas été repartitionnée.

Nous avons ainsi défini ce qu'est une hiérarchie de partitions. Dans la partie suivante, nous voyons comment calculer une hiérarchie de partitions à partir d'une image, à l'aide de la LPE.

La segmentation hiérarchique

Dans cette partie, nous présentons la segmentation hiérarchique à base de LPE introduite par Meyer [49]. Afin de construire une hiérarchie de partitions d'une image, on associe un graphe à l'image mosaïque obtenue par LPE. Chaque nœud du graphe correspond à une source de l'inondation.

Durant l'inondation, lorsque deux bassins versants fusionnent, une arête est créée entre les nœuds correspondant aux bassins. L'arête est pondérée par un poids égal à la valeur la plus faible d'un critère donné dépendant des caractéristiques de chaque bassin versant.

La *figure 3.7*, illustre la méthode de segmentation hiérarchique. Les quatre sources correspondent aux minima de l'image (*a*) Le niveau de liquide croît progressivement (*b*) et lorsqu'il arrive au point col entre les bassins 1 et 2 (*c*), l'arête $H2$ est créée entre les nœuds correspondants. Le critère de pondération des arêtes est le critère dynamique, qui assigne à l'arête la plus petite des profondeurs des bassins. Un barrage est également érigé entre les deux bassins (pointillés sur les images (*d*), (*e*) et (*f*)). De même, lorsque le niveau de liquide atteint de point col se trouvant entre les bassins 3 et 4 (*d*), une nouvelle arête est créée avec la valeur $H4$. Lorsque l'inondation se termine, nous obtenons l'image mosaïque (pointillés) et le graphe associé (*f*).

Le graphe final contient donc un nœud par région de l'image mosaïque et des arêtes reliant les régions mitoyennes qui ont un lien de fusion. Ce graphe est un arbre couvrant de poids minimal. Un exemple de ce graphe, pour une image 2D, est donné dans la *figure 3.8*.

En ôtant les arêtes qui ont les poids les plus importants, on peut obtenir la partition de l'image de notre choix. En d'autres termes, on peut choisir le nombre de régions que l'on veut tout en sachant que les régions que nous obtiendrons seront les plus grandes au sens du critère que nous avons choisi.

Les partitions que nous obtenons sont hiérarchisées, puisqu'à chaque fois que nous ôtons une arête du graphe, nous ne faisons que resegmenter une région de la partition du dessus dans la hiérarchie : les nouvelles régions sont toutes incluses dans une seule des anciennes régions. Ainsi, nous obtenons une segmentation plus fine de l'image sans avoir modifié les arêtes existantes.

En reprenant le schéma de la *figure 3.8*, on peut obtenir n'importe quelle partition de la hiérarchie en retirant le nombre d'arêtes adéquat du graphe. Le résultat est donné dans la *figure 3.9*. Plus on retire d'arêtes et plus le nombre de régions obtenues est grand. On peut ainsi choisir le degré de finesse de segmentation que l'on veut.

Critères de pondération des arêtes du graphe

On a vu que, lors de la création des arêtes du graphe, un poids leur est assigné. Ce poids dépend d'une mesure associée à un critère, aussi appelé critère d'extinction, que l'on donne en paramètre à l'algorithme de segmentation. Lors de la fusion de deux bassins, la mesure donne deux valeurs, chacune étant associée à l'un des bassins. Parmi ces deux valeurs, la plus petite

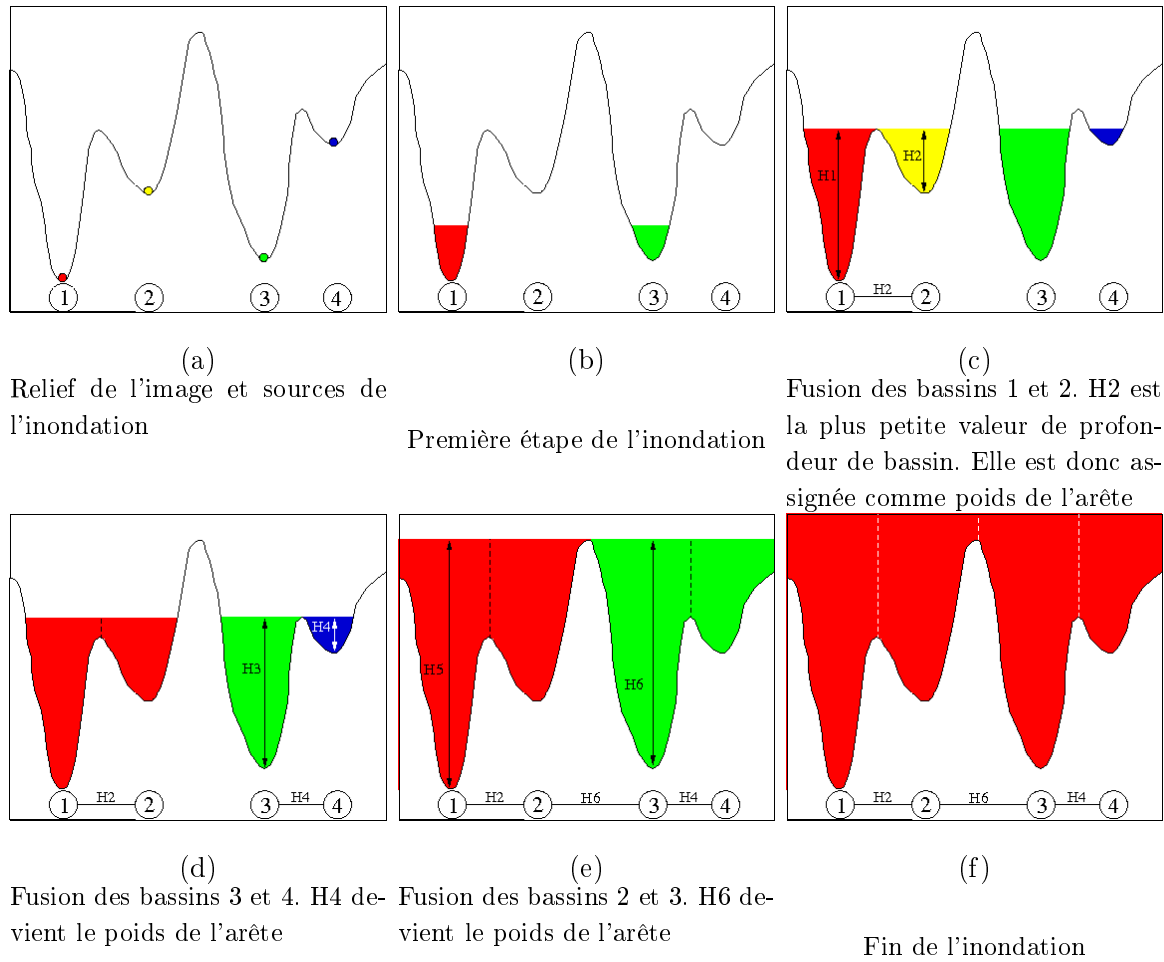


FIG. 3.7 – Segmentation hiérarchique d'une image 1D. Le critère de fusion est le critère dynamique.

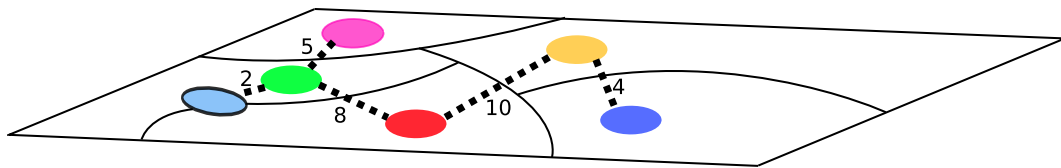


FIG. 3.8 – Arbre couvrant de poids minimum pour une image 2D

sert à pondérer l'arête du graphe. De cette façon, nous obtenons bien les plus grandes régions possibles (toujours au sens du critère donné) en ôtant les arêtes dans l'ordre décroissant ([70]). On peut imaginer toutes sortes de critères pour pondérer les arêtes du graphe dès lors que l'on est capable de mesurer ce critère pour chaque bassin versant qui fusionne. En pratique, les plus utilisés sont :

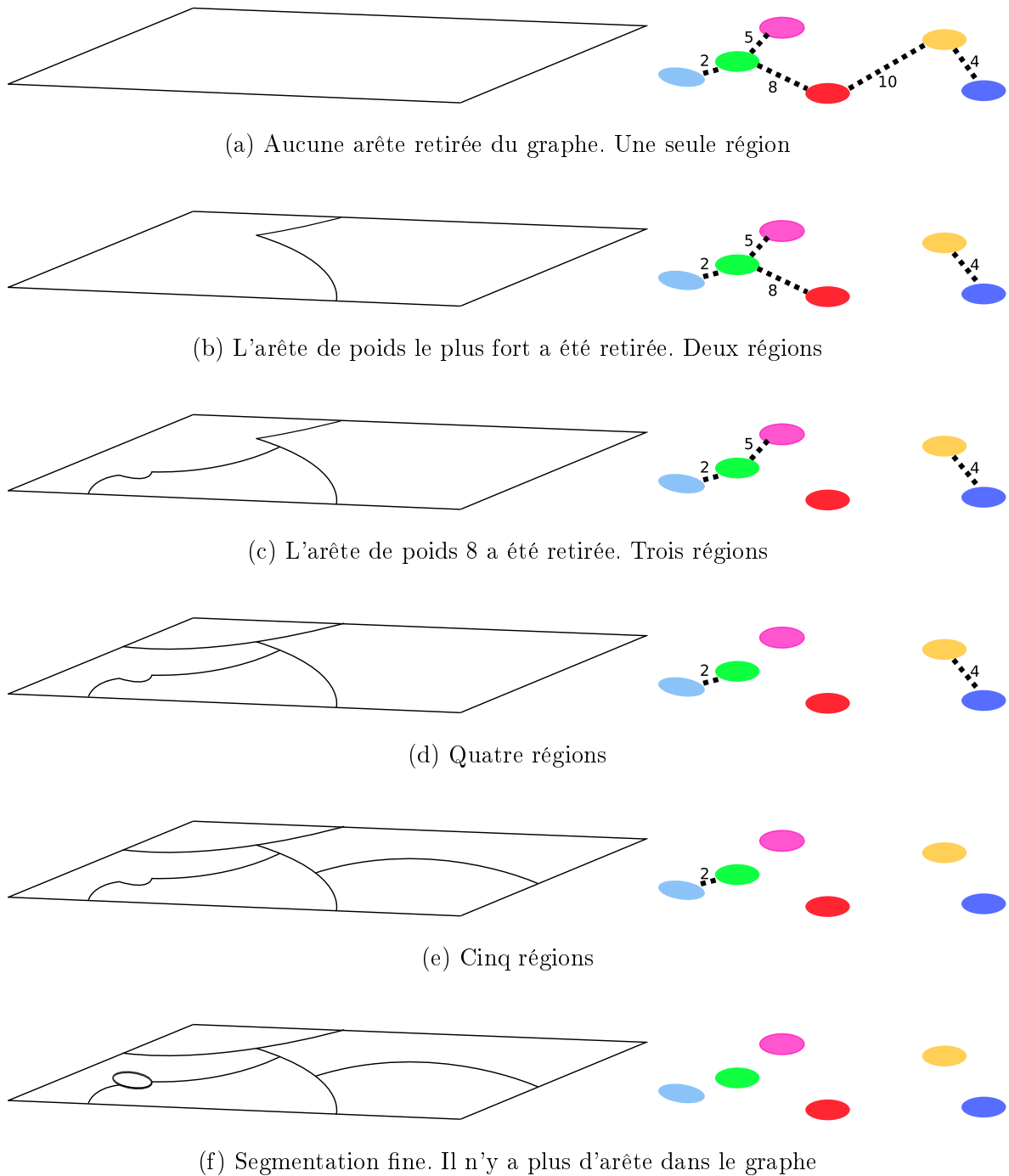


FIG. 3.9 – Résultats de la segmentation pour différents niveaux de hiérarchie. Les arêtes du graphe sont retirées dans l'ordre de poids décroissant

- **le dynamique** qui est la hauteur relative de liquide dans le bassin, au moment de la fusion,

- **le surfacique** qui mesure l'aire du bassin, toujours au moment de la fusion,
- **le volumique** qui est la somme des aires du bassin à chaque niveau d'inondation depuis la source jusqu'au niveau de liquide au moment de la fusion.

Les différences entre les résultats obtenus avec les critères énoncés ci-dessus sont notables. La *figure 3.10* présente le résultat obtenu pour la segmentation hiérarchique de deux images (*a*) et (*e*). Le premier exemple (images (*a*), (*b*), (*c*) et (*d*)) permet d'appréhender en détail les nuances de chaque critère. Le second exemple, montre le résultat obtenu pour chaque critère sur une image réelle. On remarque que le critère dynamique privilégie les régions de l'image les plus contrastées, ces régions étant souvent de petites tailles (*f*). Le critère surfacique produit plutôt des régions ayant de grandes surfaces (*g*) et le critère volumique réalise une sorte de combinaison des deux autres critères en mettant en avant les régions de plus grand volume.

Le critère de pondération des arêtes du graphe influe beaucoup sur le résultat de la segmentation. De son choix dépendent les caractéristiques des régions que l'on obtient au final.

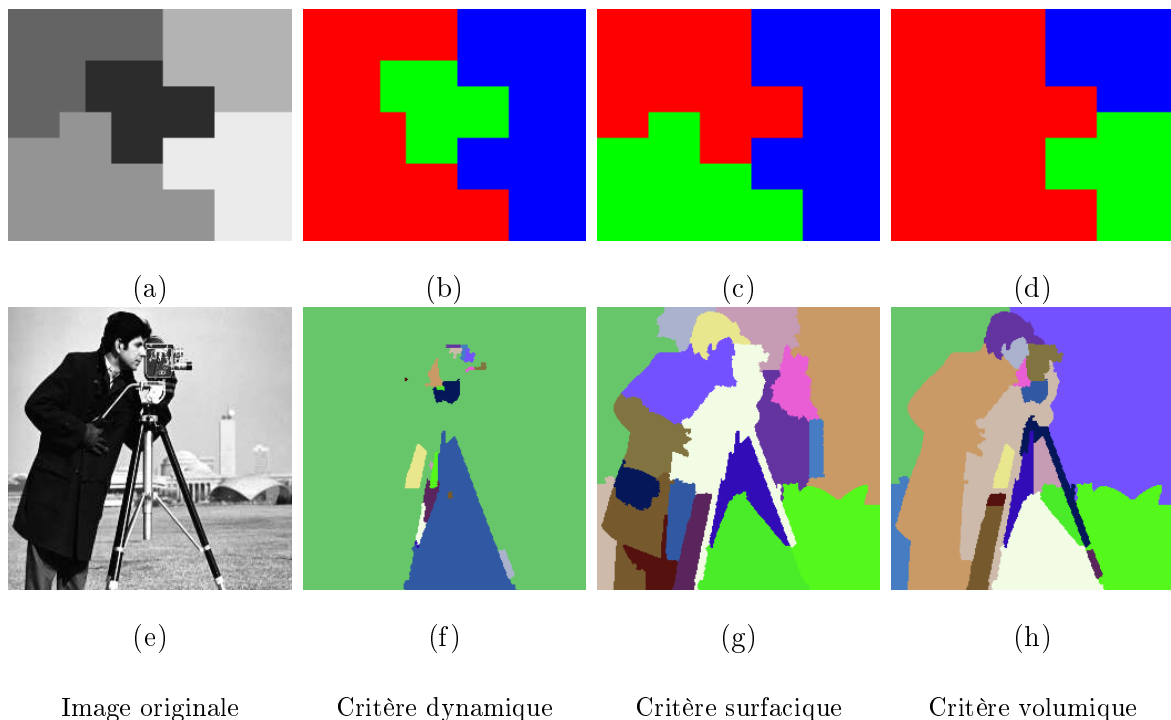


FIG. 3.10 – Illustration d'un niveau de hiérarchie pour des critères de fusion différents. On ne montre que les niveaux de hiérarchie contenant trois régions pour les images (*b*), (*c*) et (*d*) et vingt régions pour les images (*f*), (*g*) et (*h*)

3.5 Application naïve de la segmentation hiérarchique aux données sismiques 3D

Nous avons vu que, classiquement, on applique la LPE à l'image du gradient car elle fait ressortir les zones de transition entre les objets. La segmentation de l'image gradient permet, la plupart du temps, d'obtenir les contours des objets.

Nous travaillons sur des images d'amplitude et nous cherchons à extraire les horizons sismiques. Les horizons sismiques étant des surfaces constituées par les points de plus forte amplitude, on peut considérer qu'ils sont déjà des contours – ceux des régions de plus basse amplitude – que nous devrions pouvoir extraire directement de l'image originale. Nous appliquons donc la segmentation directement sur cette dernière en plaçant les sources de l'inondation aux minima de l'image. On peut d'ailleurs noter qu'une image sismique d'amplitude est en quelque sorte le gradient des impédances acoustiques des couches géologiques du sous-sol. La ligne de partage des eaux devrait alors suivre les « lignes de crête » que sont les horizons. Ces lignes de crête sont en réalité des surfaces, car nous travaillons en trois dimensions.

3.5.1 Calcul des sources de l'inondation

Le calcul des sources se fait alors assez aisément en repérant les minima de l'image. Cependant, si nous utilisons un élément structurant 26-connexe, il apparaît évident que les minima que nous obtenons sont bien séparés, ce qui, dans une certaine mesure, peut nuire à la qualité des résultats.

En effet, si on tient compte de la structure stratifiée des images sismiques les nappes de maxima locaux se trouvent entourées par des nappes de minima locaux. Nous souhaitons obtenir des surfaces plutôt horizontales. Pour éviter les petites régions parasites, il apparaît préférable que les minima appartenant à une même nappe soient connectés latéralement. Le calcul des minima à l'aide d'un voisinage 26-connexe exclut cette possibilité comme le montre la *figure 3.11*.

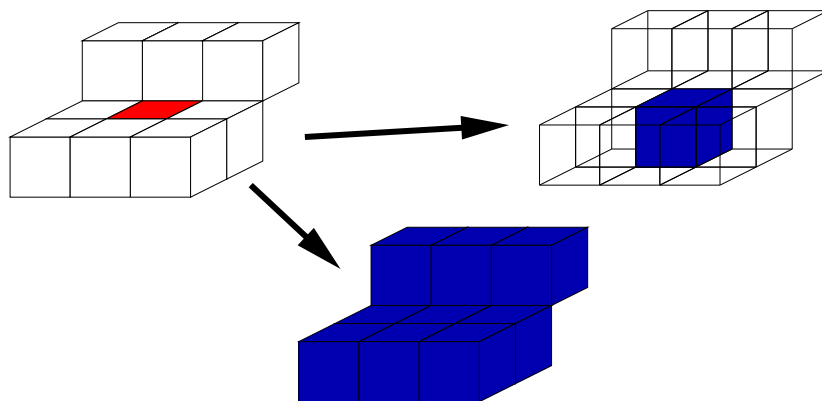


FIG. 3.11 – Calcul des minima. On considère la nappe de minima locaux par trace à gauche avec un minimum global (en rouge). Si on calcule les minima dans un voisinage N_{26} , on obtient un seul minimum (point bleu en haut). Si on les calcule avec un voisinage vertical, on obtient une nappe de minima (en bleu en bas)

Pour obtenir un maximum de connexité latérale pour les minima, il convient alors de travailler perpendiculairement à la stratification de l'image. Pour cela, nous avons calculé les minima dans un voisinage vertical $1 \times 1 \times 3$. Nous pouvons alors obtenir des ensembles de points sources pour l'inondation. Les minima sont ensuite labellisés à l'aide d'un voisinage 26-connexe afin d'agréger les minima connectés latéralement.

3.5.2 Problème de la segmentation naïve d'images sismiques : les fuites lors de l'inondation

Présentation du problème

Comme nous l'avons présenté un peu plus haut, nous inondons l'image à partir des minima labellisés. Nous devrions donc obtenir une ligne de partage des eaux le long des horizons d'intensité la plus forte. Les résultats que nous obtenons en réalité sont tout autres (*figure 3.12*). Ils présentent, en effet, quelques surfaces qui apparaissent dès les premiers niveaux de hiérarchie. Comme les données sont de bonne qualité et bien filtrées, cela pourrait sembler assez normal. Cependant, plus nous descendons dans la hiérarchie et plus nous obtenons des surfaces de petites tailles et de formes diverses qui ne représentent pas de réels événements géologiques.

La *figure 3.12* illustre l'évolution des résultats de la segmentation hiérarchique naïve de l'image pour des nombres de régions de 10, 100 et 500. On constate que dès 10 régions (*(b)*), on obtient cinq surfaces bien segmentées. Les cinq autres régions étant des petites surfaces insignifiantes sur le plan géologique. Seulement, l'augmentation du nombre de régions ne produit pas plus de surfaces sismiques. Seul augmente vraiment le nombre de petites régions (*(c)* et *(d)*).

Nous souhaitons extraire des horizons sismiques. Ces surfaces rendent donc les résultats difficiles à exploiter dans le cadre de notre étude. Il faut donc trouver ce qui provoque ce phénomène et faire en sorte de contrer son effet afin d'obtenir les surfaces que nous souhaitons.

Causes du problème

Ces surfaces « parasites » que nous obtenons ne suivant pas, comme nous l'aurions souhaité, les lignes de crête formées par les horizons, on peut se demander ce qui s'est passé pendant le processus de segmentation. Ce phénomène provient, en réalité, de fuites lors de l'inondation. Ces fuites sont causées par des défauts dus à l'acquisition des données (bruit), au traitement des données sismiques ou encore à la composition locale du sous-sol. Ces zones présentent souvent un niveau de gris différent de celui des voxels qui les entourent. Il y a alors une hétérogénéité dans les structures telles que les horizons. Si ces hétérogénéités se produisent sur un horizon assez haut en intensité, elles abaissent localement le seuil de fusion des bassins versants qui entourent la surface. Ce faisant, les bassins fusionnent plus tôt qu'ils ne le devraient et avec une valeur de fusion qui les place beaucoup plus bas dans la hiérarchie. Ainsi, l'horizon qui fait la frontière entre les deux bassins, même s'il apparaît être l'un des plus importants de l'image, ne sortira pas forcément dans l'image finale si le niveau de hiérarchie demandé n'est pas suffisamment bas.

De plus, dans le cas de failles ou d'érosion post-sédimentation, il se peut qu'un horizon soit interrompu nettement à un endroit. Les zones de minima qui se trouvent alors de part et

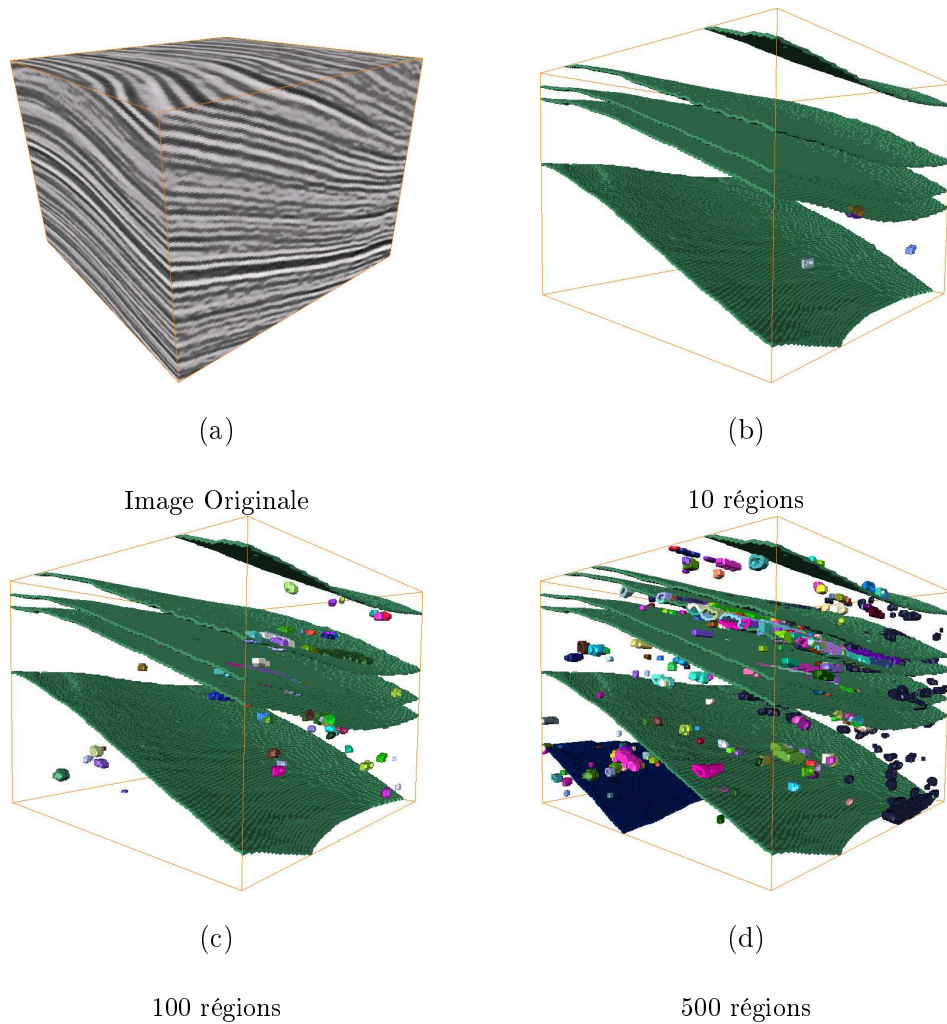


FIG. 3.12 – Exemples de segmentation hiérarchique naïve d'un cube sismique. Alors que nous attendons des surfaces planes, nous obtenons un grand nombre de petites surfaces qui n'ont pas de sens géologique.

d'autre de cet horizon communiquent. Nous avons donc deux possibilités :

1. soit les deux ensembles de minima qui se trouvent de part et d'autre de la structure ne sont, au départ, pas connexes et la structure apparaîtra très bas dans la hiérarchie car les deux bassins versants fusionneront à une hauteur proche de celle des minima,
2. soit les deux ensembles de minima sont connexes et la structure n'apparaîtra même pas dans la hiérarchie car elle sera entièrement entourée par une même source.

Tout ceci explique pourquoi il est possible qu'une structure forte en amplitude n'apparaisse pas dans les plus hauts niveaux de la hiérarchie de la segmentation. Si il y a plusieurs zones de fuite sur la même structure, il est possible que nous obtenions les surfaces fermées de la

figure 3.12.

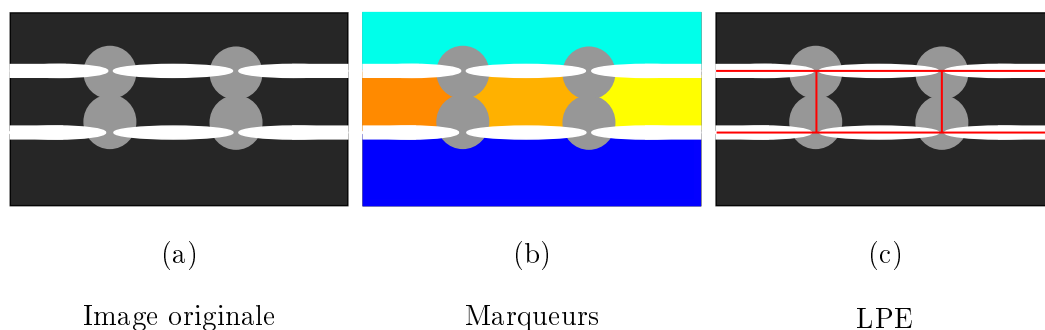


FIG. 3.13 – Schéma de l'obtention des surfaces fermées de la figure 3.12. Les zones blanches représentent les horizons, les zones grises, les zones de fuite. La LPE, en rouge, montre que l'on peut obtenir un contour fermé (en 2D) qui serait une surface fermée en 3D

La figure 3.13 illustre, en 2D, ce qui se passe alors : les zones de fuite créent un passage pour l'inondation sur un horizon, mais peuvent également créer une zone un peu plus haute en amplitude que les minima. Il est alors possible que la segmentation donne le résultat de la figure 3.13 (c) à savoir un contour qui donnera une petite surface parasite, comme celles que nous avons observées dans la figure 3.12, en 3D. S'il y a un grand nombre de fuites dans l'image, il est possible que des surfaces de ce type apparaissent assez tôt dans l'image résultat, car les bassins versants correspondants peuvent avoir une forte valeur au sens du critère de fusion relativement aux autres régions.

Illustration du phénomène de fuite

Nous présentons une illustration du phénomène de fuite par l'intermédiaire de la figure 3.14. Pour des questions de représentation, cette illustration est en deux dimensions. Dans la figure 3.14 (a), nous avons deux lignes de crête correspondant à deux horizons. L'une des deux est plus haute que l'autre et devrait donc apparaître plus haut dans la hiérarchie finale. Cependant, elle possède une échancrure en son centre laquelle abaisse localement le niveau de gris de l'image en dessous du niveau de gris de la seconde structure.

Lors de l'inondation (figure 3.14 (b), (c), (d), (e)), l'échancrure provoque la fusion des bassins versants bordant la plus grande des deux structures (le bassin rouge et le bassin bleu) plus tôt qu'escompté (figure 3.14 (d)). Le critère de valuation de l'arête joignant les nœuds du graphe correspondant sera moins grand que si les deux bassins avaient fusionné plus tard. Si, lors de la fusion des bassins bleu et jaunes de la figure (d), la valeur d'extinction est plus élevée, la plus petite des deux structures apparaîtra plus haut que l'autre dans la hiérarchie. Dans le cas où nous désirons une segmentation en 2 régions, nous n'obtenons alors pas la segmentation de l'image que nous attendons.

Ceci illustre le problème que nous avons rencontré en appliquant directement la ligne de partage des eaux aux images sismiques 3D. Ce problème produisant dans le résultat final des petites surfaces parasites, il est nécessaire de trouver une solution permettant d'obtenir les surfaces que nous souhaitons.

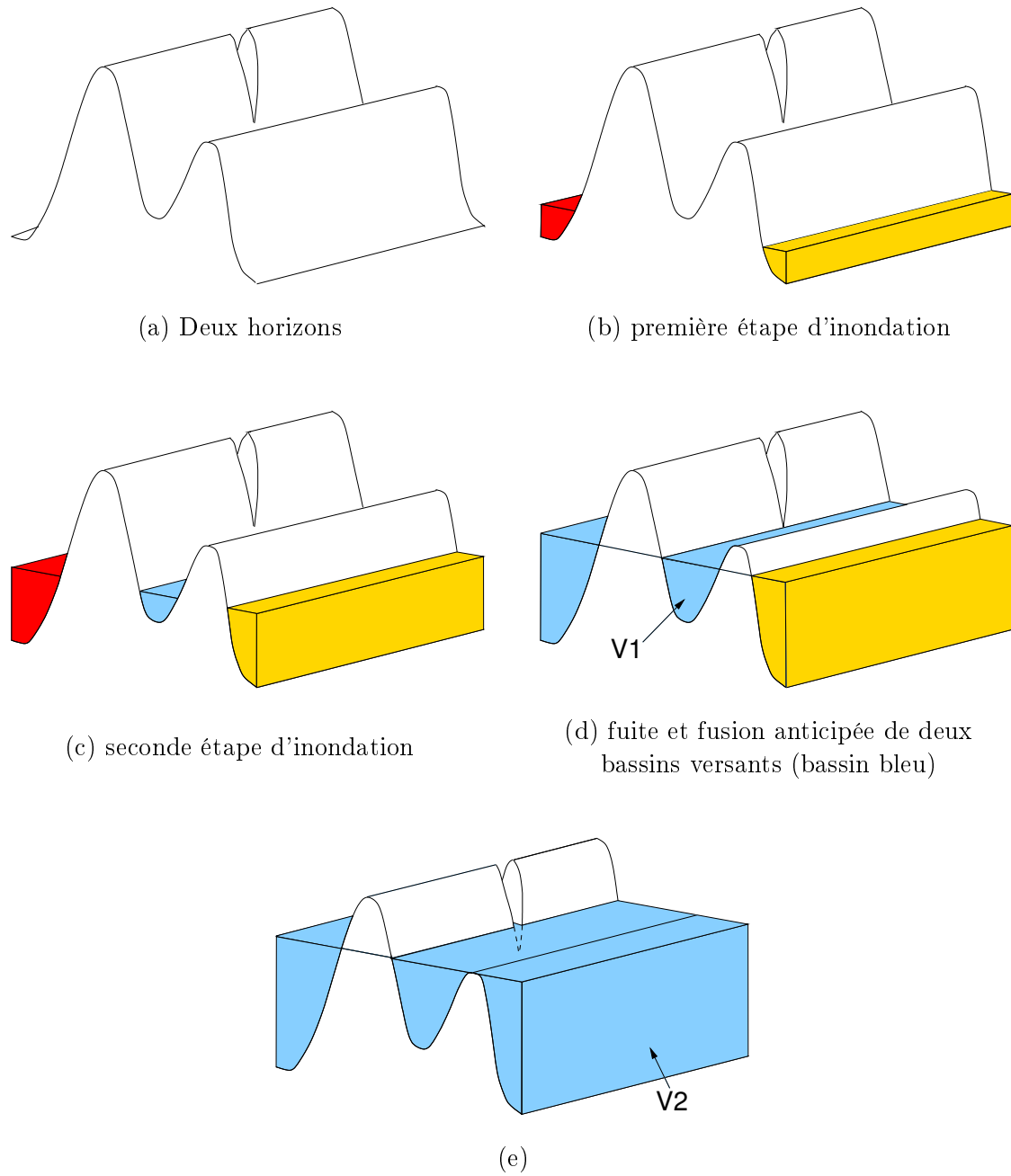


FIG. 3.14 – Processus de fuite lors de l'inondation. Si $V2 > V1$, alors l'horizon d'amplitude la plus basse se trouvera plus haut que l'autre dans la hiérarchie

3.6 La segmentation hiérarchique par cylindres appliquée aux images sismiques

3.6.1 Approche du problème des fuites

Les zones de fuite semblent être dues à des défauts provenant des traitements qui transforment les données brutes en images d'amplitudes (multiples, ...) ou encore à des défauts structuraux naturels de l'image. Parmi ces derniers, on peut citer les failles, qui créent des discontinuités dans les horizons sismiques, ou encore les horizons qui se terminent car la couche géologique correspondante a été érodée.

La *figure 3.15* montre quelques exemples de zones de fuites. Les voxels d'amplitude plus faible que la moyenne d'amplitude de la structure constituent de véritables points de fuite, tout comme les interruptions nettes des horizons.

Pour pallier ces problèmes de fuite, nous avons plusieurs approches possibles. L'une d'elles consistait à essayer de détecter les zones de fuite et à filtrer l'image de manière à éliminer l'effet qu'elles produisent. La plupart des zones de fuite sont en fait des zones « floues » : le niveau de gris de l'image se détériore progressivement et provoque un fondu entre des zones de minima locaux et des zones de maxima locaux. Elles sont donc difficiles à localiser avec précision. De plus, filtrer ces zones pour éviter les fuites reviendrait à interpoler les valeurs entre deux morceaux d'horizon. Comme on ne connaît pas la vraie configuration de la géologie il est possible que le « raccord » ne soit pas le bon. Cela impliquerait alors nécessairement un biais dans les utilisations futures d'une telle segmentation.

Les fuites sont des phénomènes très locaux. Comme nous avons pris le parti de ne pas essayer de les éliminer par filtrage, il reste la solution consistant à restreindre leur portée de manière à ce qu'une fuite n'affecte pas le reste de l'image. Cette solution est détaillée dans la section suivante.

3.6.2 Solution proposée

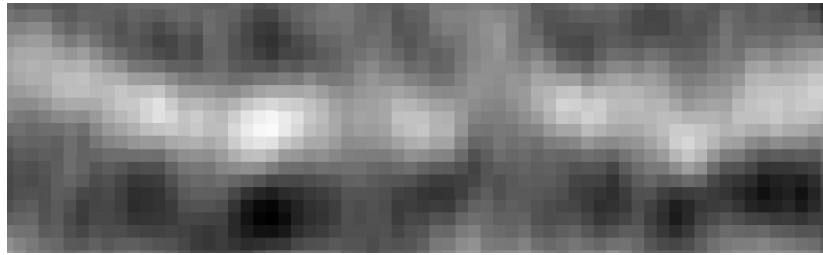
Segmentation par cylindres : du global au local

La solution que nous avons retenue consiste à contraindre l'influence des fuites à une zone de taille restreinte autour de la fuite. Pour ce faire, il faut trouver un sous-ensemble de l'image adapté, c'est à dire une région dans laquelle on pourra effectuer une segmentation sans subir les effets d'une fuite éloignée.

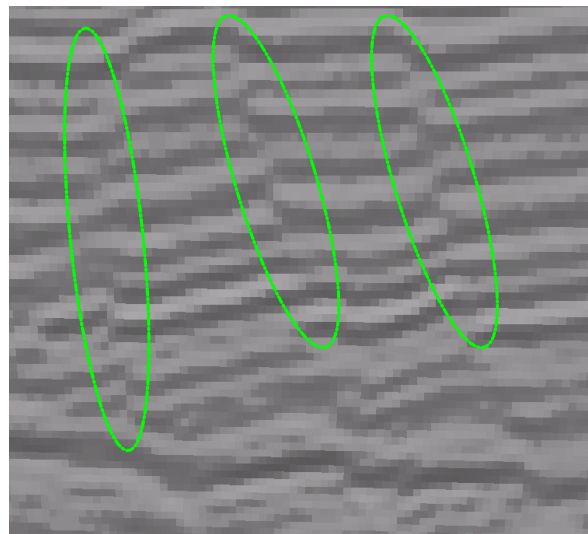
En nous inspirant des travaux de Decencière et Beucher ([17]), nous avons à nouveau exploité la structure stratifiée des données. En effet, le dépôt sédimentaire s'effectuant à plat, par gravité, les couches géologiques ont tendance à avoir une direction principale horizontale (voir *chapitre 2*).

Ainsi, les horizons que nous recherchons, tout comme les zones de minima, sont plutôt horizontaux. Lors de la segmentation, l'inondation tendant à inonder les fonds de vallée en premier, le liquide va avoir tendance à s'étaler préférentiellement dans les directions parallèles aux horizons (à savoir les directions horizontales, inline et crossline). Pour contraindre la segmentation, et ainsi éviter les problèmes de fuites, il faut restreindre la zone de segmentation en réduisant les dimensions horizontales de l'image

Pour cela, nous avons réalisé la segmentation de l'image initiale d'amplitudes à l'aide d'une série de segmentations de sous-images de cette dernière. Ces sous-images – que nous



(a) Horizon mal défini



(b) Failles

FIG. 3.15 – Exemples de zones de fuites. Dans la *figure (a)*, ces zones sont les régions floues qui coupent la structure blanche à plusieurs endroits. Dans la *figure (b)*, nous avons des zones de fuite dues à des discontinuités des horizons provoquées par des failles

appellerons « cylindres » par la suite – ont une hauteur égale à celle de l'image d'amplitude et des dimensions horizontales réduites, la direction verticale étant, bien entendu, la direction perpendiculaire aux couches géologiques. On réalise ainsi un pavage de l'image à l'aide de cylindres comme le montre la *figure 3.16*.

Chaque cylindre est ensuite segmenté à l'aide de la segmentation hiérarchique et le résultat est accumulé dans une image résultat (aussi appelée, par la suite, image accumulateur ou image compteur). Le résultat de la segmentation correspond à la ligne de partage des eaux. Il se trouve donc sous la forme d'une image binaire où les points non nuls correspondent aux réflecteurs (cf *figure 3.19 (c)*)

Ainsi, si une fuite se produit dans l'un des cylindres, cette dernière n'affecte en aucune façon les cylindres voisins. De ce fait, en fin de segmentation, nous obtenons des horizons presque entiers. Presque, car certaines parties manquent à cause des fuites comme le montrent les *figures 3.17 (a) et (b)*. Ces résultats valident l'approche que nous avons quant à la cause

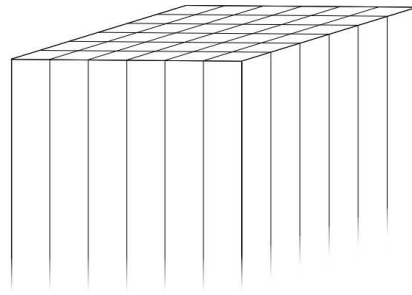


FIG. 3.16 – Pavage de l'image à l'aide de cylindres

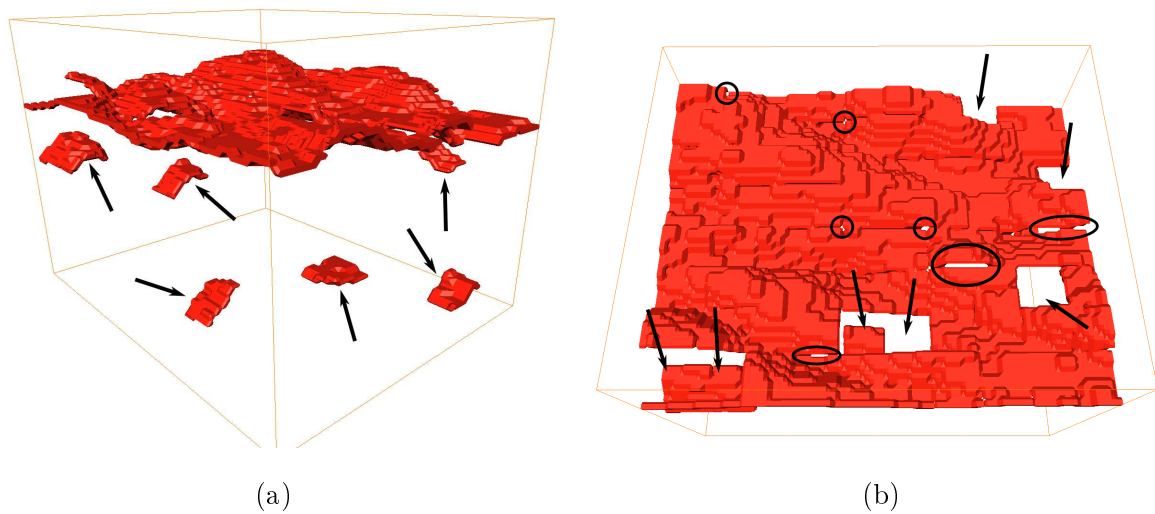


FIG. 3.17 – Illustration d'une segmentation par cylindres (sans glissement). Les anomalies de la surface extraite, dues à des fuites, sont indiquées par les flèches. Les trous dans les surfaces sont repérés par les cercles et les ellipses

des artefacts de segmentation lors de l'application directe de la segmentation hiérarchique.

Il subsiste cependant deux petits inconvénients inhérents à la méthode utilisée :

- Les trous n'ont pas été comblés, mais nous avons expliqué que cela ne constituait pas en soi un réel problème,
- Il est possible que deux portions d'une même structure soient décalées et qu'il existe alors une discontinuité dans la surface finale (*figure 3.17 (b)*).

Ces discontinuités latérales des structures sont assez problématiques car il est alors difficile de dire avec certitude à quelle surface peut appartenir un morceau de surface. Il est nécessaire de trouver une solution pour reconnecter les portions d'horizon.

Les cylindres glissants : du local au global

Le problème est posé par des décalages de fragments de surfaces de quelques voxels. Les fragments peuvent alors être déconnectés de la surface à laquelle ils appartiennent. Cela provient du fait que les cylindres sont indépendants les uns des autres. Il n'y a pas de cohérence latérale entre les portions d'horizon segmentées dans deux cylindres voisins.

Pour améliorer la cohérence horizontale des structures extraites, nous utilisons alors des cylindres glissants. Ces derniers se recouvrent en partie et rendent les éléments segmentés plus continus. Le taux de recouvrement – que l'on appelle également « pas de déplacement »¹ – des cylindres est paramétrable et permet de conserver un contrôle sur l'aspect du résultat de la segmentation finale, comme nous le verrons dans la *partie 3.7.2*.

Se pose maintenant le problème de la fusion des résultats de la segmentation de chaque cylindre. En effet, comme les cylindres se recouvrent, il est possible d'avoir des segmentations semblables, avec pour certaines portions des décalages d'un ou deux voxel en temps (dimension verticale) dus à des fluctuations locales dans les niveaux de gris des voxels. Dans ce cas, quelle segmentation choisir ?

Nous avons pris le parti de conserver tous les résultats, que nous ajoutons dans l'image d'accumulation. Ainsi, dans cette image, le niveau de gris du voxel représente le nombre de fois qu'il est apparu dans une segmentation. C'est à dire le nombre de fois où il a appartenu à la ligne de partage des eaux lors de la segmentation d'un cylindre. Nous appelons ce nombre « taux d'illumination ». Le taux d'illumination de chaque point dépend de plusieurs critères :

1. les paramètres des cylindres :
 - les dimensions du cylindre : plus le cylindre est gros et plus les points peuvent avoir des valeurs fortes (à pas de recouvrement égal),
 - le taux de recouvrement : plus le taux de recouvrement est faible et moins les points auront des valeurs fortes (pour une taille de cylindres donnée).

2. la configuration de l'horizon et la position du point :
 - Si le voxel se trouve sur une surface très énergétique, il a plus de chance d'être segmenté dans une majorité des cylindres qui le contiennent. Il aura alors une forte valeur,
 - si un point appartient à une structure très régulière, qui ne présente globalement pas de défaut pouvant occasionner des fuites, il aura une forte valeur si le niveau choisi dans la hiérarchie est en dessous de son niveau d'apparition,
 - la distance à la fuite si la structure présente une fuite. En effet, plus un point est proche d'un point de fuite, et plus il est « contaminé » par les effets de la fuite. Il n'est alors pas illuminé dans de nombreuses segmentations et sa valeur est donc moins forte.

¹Le pas de déplacement varie à l'inverse du taux de recouvrement : ce dernier croît lorsque le pas de déplacement diminue

Si deux fragments d'horizons appartenant à la même surface étaient auparavant disjoints, ils sont maintenant progressivement liés par les fragments issus de la segmentation de cylindres « intermédiaires » dus au glissement.

La *figure 3.18* donne un aperçu, en deux dimensions, de ce à quoi ressemble une image compteur à la sortie de la segmentation. On remarque que, dans ce cas, la partie moins bien imagée, à mi-hauteur sur le côté gauche de l'image, donne des valeurs moins fortes et des structures plus épaisses.

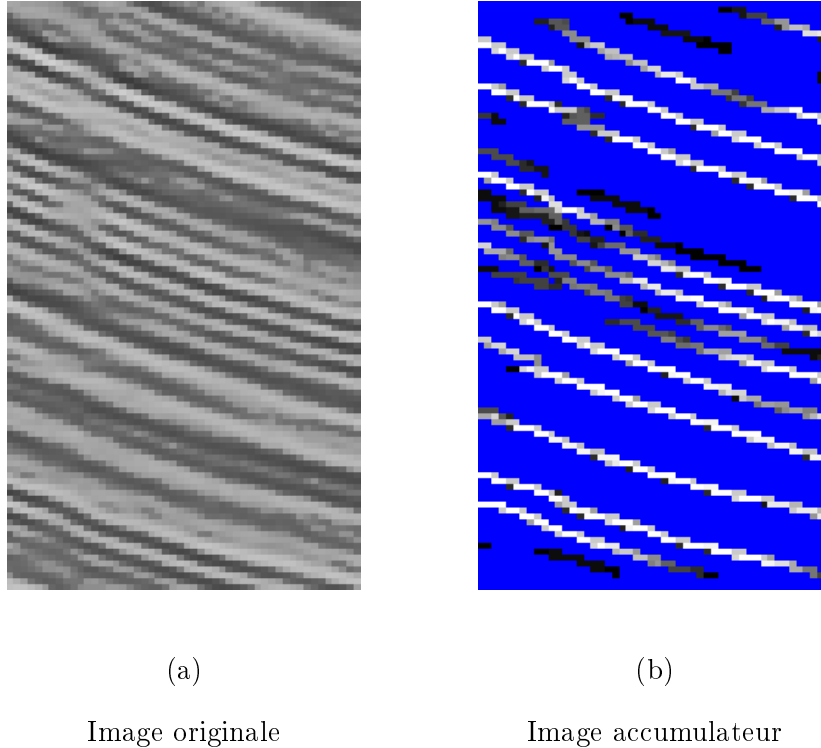


FIG. 3.18 – Section de l'image accumulateur. Le fond de l'image (valeur 0) est coloré en bleu. Comme nous avons calculé la segmentation à l'aide d'un cylindre de taille $10 \times 10 \times \text{Hauteur_de_l'image}$, avec un pas de déplacement de 2 dans les directions inline et crossline, la valeur maximale d'un voxel est 25 (points les plus clairs).

Les voxels qui appartiennent à des structures de forte amplitude ne présentant pas de défaut pouvant engendrer des fuites, auront donc une valeur forte, car ils apparaîtront dans un grand nombre, voire la totalité, des segmentations des cylindres auxquels ils appartiennent. Dans le cas où il y a une fuite, les voxels voisins de la fuite seront d'autant plus affectés qu'ils se trouvent près de cette dernière. Le niveau de gris des voxels de l'image compteur est compris entre 0 et le produit des dimensions horizontales du cylindre utilisé pour la segmentation. Il est modulé par le pas de déplacement du cylindre. Plus ce dernier augmente et plus le taux d'illumination maximum diminue.

Nous cherchons à extraire les horizons les plus importants de l'image, c'est à dire les voxels les plus hauts en amplitude appartenant à des structures sans défauts. Ces points doivent logiquement avoir une valeur forte dans l'image compteur. Il apparaît donc possible de sélectionner les points les plus représentatifs de ce que nous cherchons en réalisant un

seuillage de l'accumulateur. Cela permet d'influer sur l'aspect des structures extraites. Nous discutons de cette possibilité dans la *partie 3.7.2*.

La *figure 3.19* illustre la chaîne de traitement, de l'extraction du cylindre à l'accumulation du résultat de la segmentation dans l'image compteur.

Gestion des bords

Ajoutons que les cylindres se déforment au niveau des bords de l'image de manière à segmenter tous les points de l'image dans les mêmes conditions. En effet, si nous nous contentions de réaliser des segmentations avec des cylindres qui ne se déforment pas sur les bords de l'image, les points des bords auraient un taux d'illumination plus faible en moyenne que les autres points, car le nombre de cylindres les contenant serait plus petit que celui des autres points. Pour rétablir l'équilibre, nous modifions donc localement les dimensions des cylindres afin de pouvoir illuminer le même nombre de fois tous les points (*figure 3.20*).

Pour garder un minimum de redondance latérale, il apparaît nécessaire d'avoir une taille minimum pour un cylindre de $2 \times 2 \times \text{Hauteur_de_l'image}$. Suivant la taille du cylindre et le pas de déplacement, les points des premières rangées sur tout le bord de l'image risquent donc d'être moins bien imagés que les autres points. En effet, il est possible que, par rapport aux points situés dans la partie centrale de l'image, le nombre de cylindres qui parcourent les points de bord soit inférieur. De fait, il en résulte une différence d'illumination pour les points de bord, cette différence dépendant de la dimension du cylindre dans la direction parallèle au bord en question. On notera que les points des coins de l'image cumulent les effets de bords et sont donc encore moins bien imagés.

Par exemple, un point sur le bord bas de l'image de la *figure 3.20* aura une valeur maximale d'illumination inférieure de 6 unités à la valeur maximale d'illumination d'un point « normal ». La valeur 6 correspond à la dimension du cylindre dans la direction horizontale. Sur le bord gauche, cette différence ne sera que de 3 unités. Un point dans la partie centrale de l'image aura donc un taux maximal d'illumination de 18 (correspondant au produit des dimensions du cylindre) alors que les points du bord bas auront un maximum d'illumination de 12.

Comme nous l'avons brièvement évoqué ci-dessus, la différence d'illumination des points de bord dépend des dimensions du cylindre et du pas de déplacement. Ces deux variables font partie d'un ensemble de paramètres qui rendent l'algorithme plus facilement adaptable à tous les jeux de données sismiques.

Paramètres de l'algorithme

La segmentation par cylindres comporte de nombreux paramètres qui lui confèrent une grande capacité d'adaptation non seulement au regard des différences que l'on peut trouver entre deux cubes sismiques mais également suivant la qualité des résultats que l'on souhaite obtenir. Ce paramètre sont les suivants. :

- le critère d'extinction
- les dimensions du cylindre,
- le pas de déplacement du cylindre,
- le nombre de régions,
- le type de segmentation,

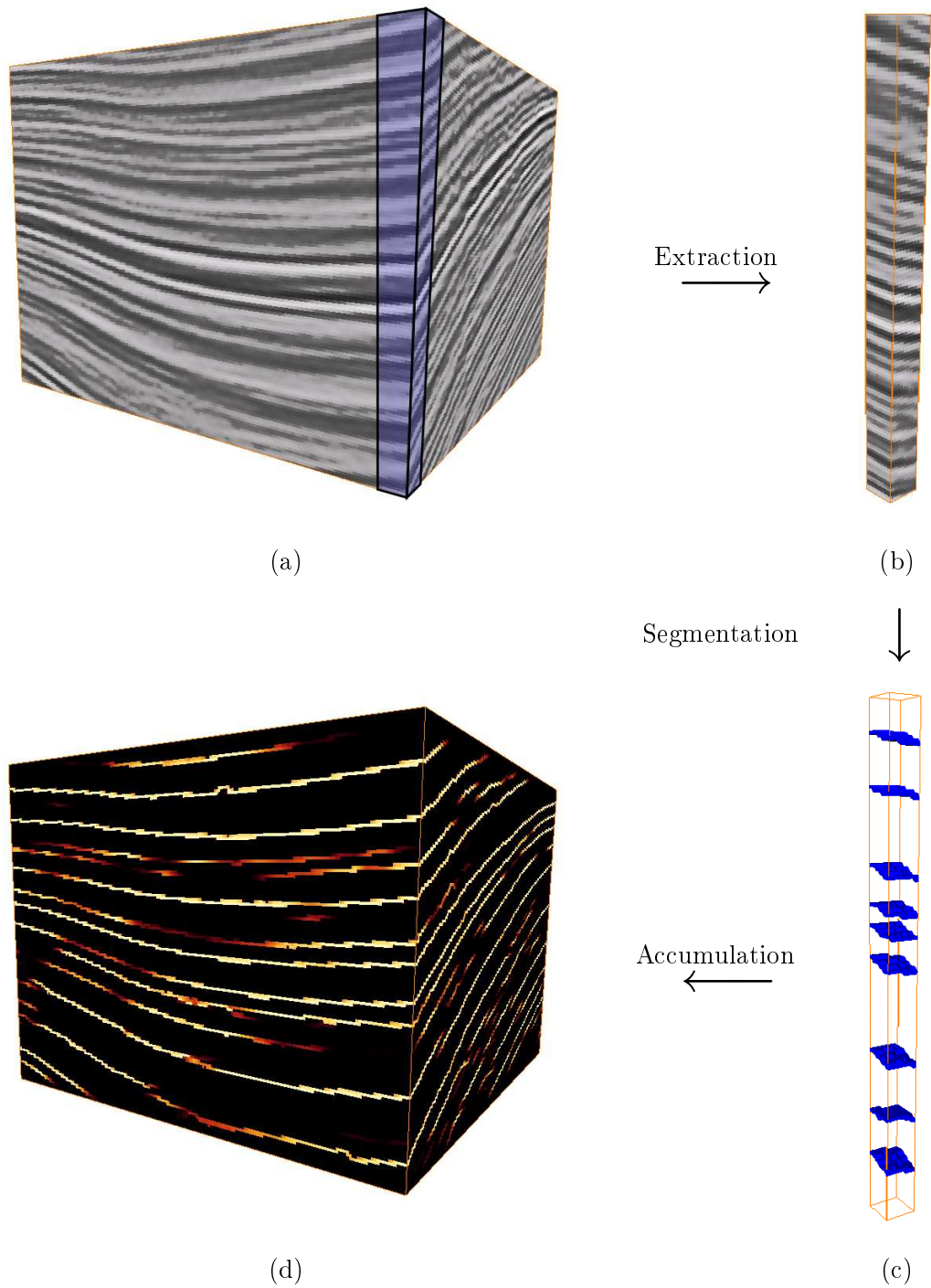


FIG. 3.19 – Chaîne de traitement de la segmentation par cylindre. On extrait de l'image d'amplitude (*figure (a)*) un cylindre (*figure (b)*) que l'on segmente en autant de régions que l'on veut avec la segmentation hiérarchique (*figure (c)*). On accumule ensuite le résultat dans l'image compteur (*figure (d)*).

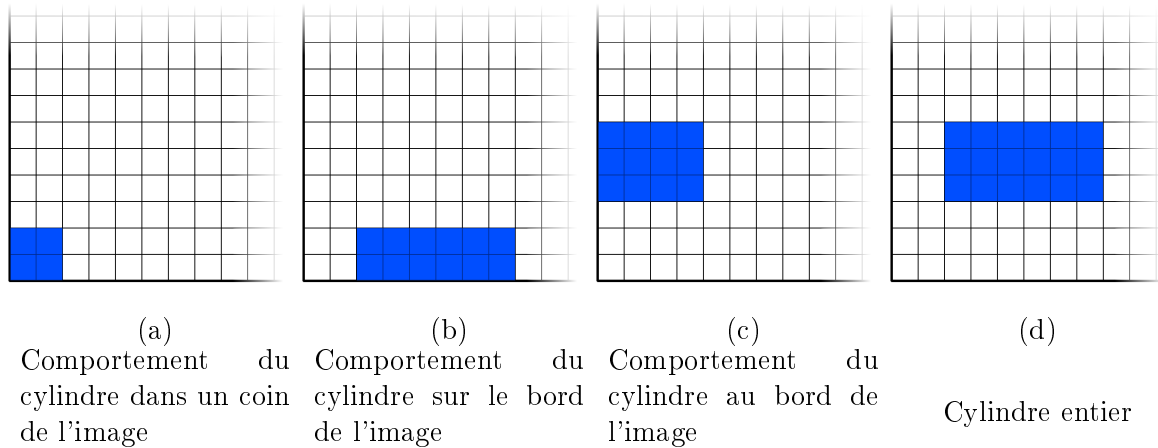


FIG. 3.20 – Vue de dessus du comportement du cylindre de segmentation suivant l'endroit où il se trouve dans l'image

- le niveau de seuillage de l'image compteur.

Nous étudions ces paramètres plus en détail dans la *partie 3.7.2*. Nous y présentons leur influence sur le résultat de la segmentation finale.

La méthode de segmentation par cylindres permet ainsi de s'affranchir de l'effet des fuites lors de la segmentation de l'image. Quelques problèmes persistent mais sont localisés à une zone restreinte autour de la fuite. Un autre atout de cette technique de segmentation par cylindres est qu'elle permet de paralléliser le calcul de la segmentation. Cela peut permettre un gain de temps pour la phase de segmentation. Nous présentons quelques façons de procéder pour y parvenir dans la *partie 3.7.5*.

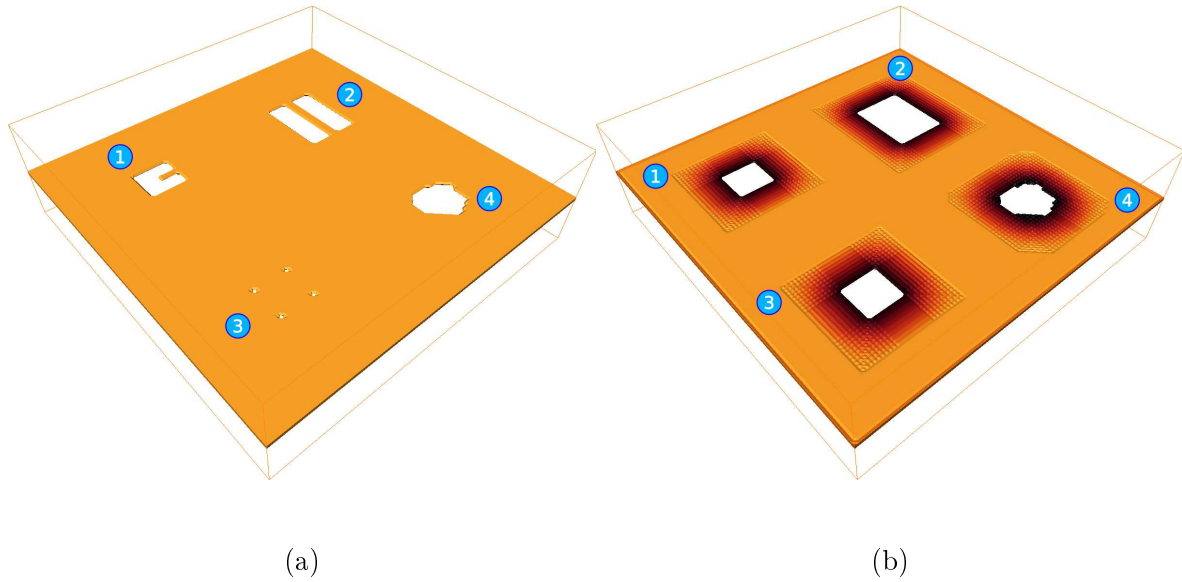
3.7 Paramétrage et mesures de la qualité de la segmentation

Le choix des paramètres d'une méthode de segmentation et l'évaluation objective de la qualité du résultat restent des problèmes sans solution satisfaisante. Dans la suite, nous nous efforçons de donner un guide permettant de mieux appréhender le comportement de l'algorithme en fonction des valeurs des différents paramètres. Nous essayons également d'analyser les résultats que nous avons obtenus afin d'établir un moyen d'évaluer la qualité de ces résultats.

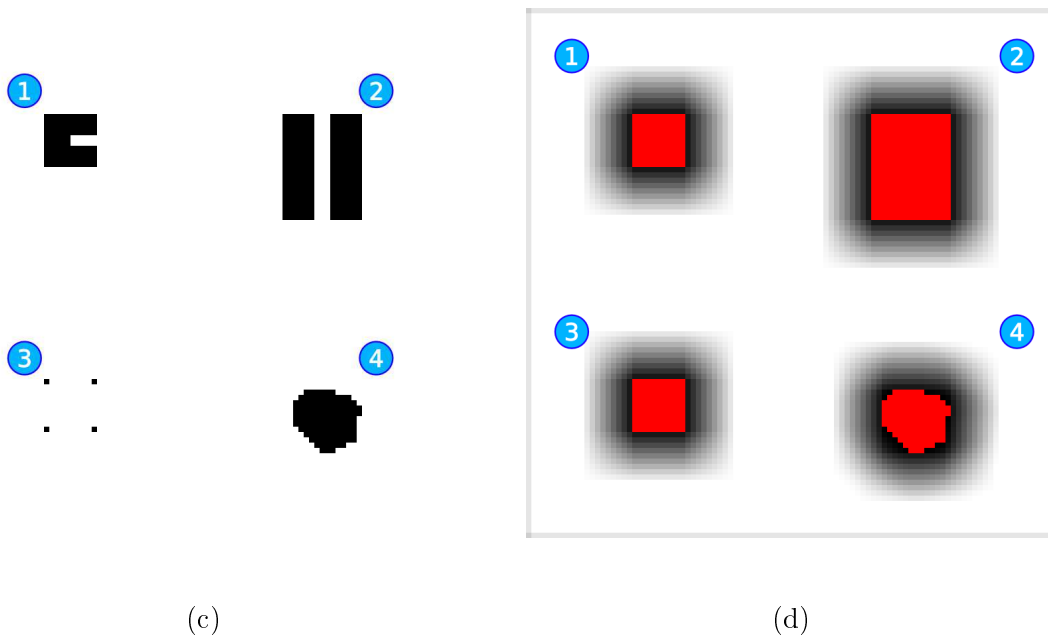
3.7.1 Comportement de l'algorithme

Pour illustrer le comportement de l'algorithme, nous avons réalisé une segmentation d'un cube de dimensions $100 \times 100 \times 30$ contenant une seule surface horizontale, fine et bien contrastée (*figures 3.21 (a) et (c)*). Cette surface comporte des trous permettant de voir comment se comporte l'algorithme dans différentes configurations. Nous utilisons un cylindre de dimensions $10 \times 10 \times 30$ et un pas de déplacement de 1 dans chacune des dimensions horizontales. Les dimensions du trou numéro 1 sont 10×10 , celles des trous 2 sont de 6×15 . Ces derniers sont séparés d'une bande de points de largeur trois. Les quatre trous repérés par le numéro 3

sont les angles d'un carré de côté 10. Le trou numéro 4 est un trou de forme quelconque plus représentatif de ce que l'on peut avoir dans la réalité.



Vues 3D



Vues 2D

FIG. 3.21 – Illustration du comportement de l'algorithme de segmentation par cylindres sur une image synthétique

Le résultat de la segmentation de cette surface est donné dans les *figures 3.21 (b) et (d)*. Si on observe ces résultats, on remarque tout d'abord que la languette que l'on trouvait dans

le trou 1 a disparu comme le ruban de points qui séparait les trous repérés par le numéro 2. Ces deux objets ayant une largeur inférieure aux dimensions du cylindre, aucun des points leur appartenant n'a pu être extrait d'une segmentation car à chaque fois, comme le cylindre était trop large, il y avait un point de fuite causé par les trous. Il n'y avait donc pas de ligne de partage des eaux dans le résultat de la segmentation du cylindre.

De même pour les points qui se trouvent dans le carré limité par les quatre trous du numéro 3. Les trous ont provoqué des fuites. Il est donc impossible de segmenter la partie de la surface comprise entre ces quatre trous.

Les différences de niveau de gris que l'on peut observer pour chaque point dans la *figure 3.21 (d)* indiquent le nombre de carrés de côté 10 (dimensions horizontales du cylindre) entièrement contenus dans la surface et contenant le point considéré. Ils correspondent aux valeurs d'accumulation.

On remarque que si le pas de déplacement du cylindre lors de la segmentation vaut 1 (c'est le cas dans notre exemple) et que l'on seuille l'image à la valeur 1 (on considère alors tous les points autres que les points rouges dans la *figure 3.21 (d)*), le résultat est identique à celui d'une ouverture de la surface par le polygone qui constitue la base du cylindre.

On peut également observer que si on seuille l'image à la valeur 1, la forme des trous convexes n'est pas modifiée. Il n'y a alors pas de perte additionnelle d'information causée par la segmentation. Pour les trous de forme concave, comme le montre le résultat pour le trou numéro 1, cela dépend des dimensions du cylindre et de la partie concave. Dans la section suivante, nous observons la dépendance des résultats de la segmentation aux différents paramètres.

3.7.2 Effet des différents paramètres

L'algorithme de segmentation par cylindres comporte six paramètres. Trouver la bonne combinaison est assez aisé dès lors que l'on sait ce à quoi chacun d'eux contribue. Leur influence sur le résultat final est décrite ci-dessous.

Choix du critère d'extinction

Choisir le bon critère pour pondérer les arêtes des graphes n'est pas une tâche facile. Cependant, en comparant les critères dynamique, surfacique et volumique sur quelques jeux de données, nous nous sommes vite rendus à l'évidence que c'est le critère volumique qui répondait le mieux à ce que nous recherchions, à savoir des événements géologiques forts et contrastés. Ce choix était corroboré par les travaux de C.Vachier et F.Meyer [70] sur les critères d'extinction pour la segmentation hiérarchique.

Les exemples de la *figure 3.22* montrent les différences induites par le choix du critère sur le résultat de la segmentation d'un cube sismique. À première vue, les résultats sont très proches. Cela peut s'expliquer par le fait que les structures sismiques sont assez régulièrement espacées et que le contraste entre une phase claire et une phase sombre est lui aussi assez régulier. Tout cela fait que les résultats produits par les trois critères d'extinction sont assez proches. Il y a donc une forte ressemblance entre les *figures 3.22 (b), (c) et (d)*.

Cependant, on remarque que le critère surfacique permet d'extraire une structure beaucoup plus propre que les autres critères dans le coin en haut à droite de l'image. Lorsqu'on regarde sur l'image d'origine, on voit que cette structure n'est pas très marquée et qu'elle possède un gros défaut en son centre. Elle apparaît haut dans la hiérarchie surfacique car la zone floue la

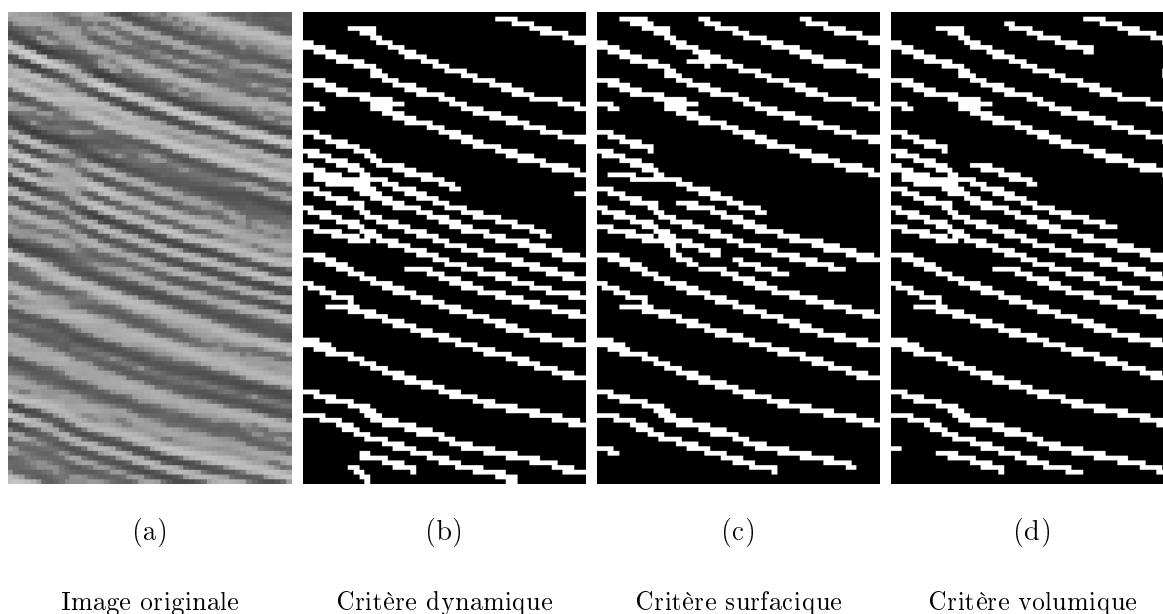


FIG. 3.22 – Différences des résultats de segmentation d’un cube sismique avec des critères de fusion des bassins versants différents.

rend très large. De plus, le critère surfacique détecte moins bien les structures qui se trouvent au centre de l’image, alors que les deux autres critères les trouvent. Le critère surfacique n’est donc pas à retenir pour la segmentation d’images sismiques.

Le résultat obtenu à l’aide du critère dynamique est assez proche de ce que produit le critère volumique. Cependant, certaines zones de structures bien marquées apparaissent moins contrastés qu’avec le critère volumique. De plus, il manque certaines structures. Nous avons par conséquent retenu le critère volumique dans notre méthode de segmentation.

Niveau de seuillage de l’image compteur

Le niveau de seuillage de l’image compteur influe de manière significative sur le résultat de la segmentation. En effet, le niveau de seuillage de l’image compteur agit sur :

- le nombre de trous dans les surfaces.

Lorsqu’une partie d’une surface est moins bien définie que le reste de cette surface (zone floue), les voxels appartenant à la partie de plus faible amplitude et leurs voisins dans la direction verticale ont de fortes chances d’avoir une valeur inférieure à celle des voxels du reste de la surface. Si le seuil est supérieur à leur valeur, un trou apparaîtra à la place de ces points dans l’image finale (*figure 3.23 (b), (c), (d), (e) et (f)*).

- la taille de ces trous.

Un défaut dans une structure provoquant une fuite dans tous les cylindres comportant les points appartenant au dit défaut, un trou apparaîtra dans la structure finale. Maintenant, on peut s’interroger sur la taille que pourra avoir ce trou. En règle générale, si le niveau de seuillage de l’image compteur est assez bas, le trou obtenu à la fin sera proche de sa taille réelle. Plus le seuil sera haut et plus le trou sera grand, car plus on

se rapproche du trou et moins la valeur des points dans l'image compteur est forte. De plus, pour un même seuil donné, les gros cylindres produiront des trous plus petits que les petits cylindres. En effet, la valeur issue de la segmentation par un gros cylindre pour un point donné sera, dans l'absolu, plus importante que celle issue de la segmentation par un petit cylindre pour ce même point. Dans chaque cas, lorsque le seuil se rapproche de la valeur limite – donnée par le produit des dimensions horizontales du cylindre – ce sont logiquement les cylindres les plus gros qui produiront les discontinuités les plus larges.

– l'épaisseur des structures.

Comme nous l'avons déjà évoqué, il est possible que dans quelques cylindres les surfaces détectées aient une position qui fluctue légèrement par rapport aux cylindres adjacents, ce qui donne une certaine épaisseur aux surfaces. Les points correspondant à l'horizon auront une valeur supérieure à celle des autres. Il est alors possible d'obtenir des surfaces moins épaisses en choisissant un seuil plus haut. Il faut cependant veiller à ne pas créer de nouveaux trous. Il est également possible de recourir à un amincissement des surfaces (voir la *partie 4.3*).

Ainsi, ce paramètre de seuillage de l'image d'accumulation a une grande influence sur l'apparence des structures que nous obtenons à la fin de la segmentation morphologique. Bien choisir sa valeur revêt une grande importance si on veut obtenir un bon résultat. La *figure 3.23* illustre l'influence du seuillage sur le résultat et montre qu'un seuillage trop élevé peut engendrer un très mauvais résultat : le nombre et la taille des trous dans les structures sont alors accrus et certaines structures sont éliminées. Pour ne pas trop altérer la qualité de la segmentation, il est préférable de choisir un seuil assez bas afin de n'enlever que les points les moins significatifs. Le choix de ce paramètre reste empirique et peut très bien être choisi après la phase de segmentation suivant le résultat de cette dernière. En pratique, un seuil situé aux alentours de 10% de la valeur d'illumination maximale est une bonne valeur. Dans le reste de cet ouvrage, nous avons choisi de seuiller l'image compteur à la valeur 1 pour conserver tous les points segmentés.

Les dimensions du cylindre

Les cylindres, comme nous l'avons décrit plus haut, ont deux dimensions variables (les dimensions horizontales qui correspondent aux coordonnées géographiques inline et crossline) et une dimension fixe (la dimension verticale qui correspond au temps). Comment les dimensions horizontales influent-elles sur le résultat de la segmentation ? On connaît déjà le résultat donné par une segmentation faite à partir d'un cylindre de la taille de l'image. Outre le fait que cela ne présente pas de réel intérêt, le résultat n'est pas exploitable. De plus, une segmentation à base de cylindres de taille $1 \times 1 \times \text{Hauteur_de_l'image}$ ne présente pas beaucoup d'intérêt, puisque cela engendre des maxima qui ne sont pas nécessairement connectés spatialement, donc des structures qui ont de fortes chances d'être très morcelées. On peut donc dire que les dimensions horizontales du cylindre varient de 2 à la *Taille_de_l'image* - 1. Pour connaître l'influence de ces paramètres, nous distinguerons deux cas :

1. le cas des cylindres de faible section

Les cylindres de faible section peuvent influencer de manière très importante sur la segmentation des images comportant des structures de forte pente (nous atteignons alors les limites d'application générales de notre méthode). En effet, les surfaces extraites par chaque cylindre ne sont pas forcément connectées, ce qui introduit des trous dans les surfaces comme le montre la *figure 3.24*. De plus, comme la taille du cylindre impose un pas de déplacement plus restreint, il y a une perte de redondance d'information et

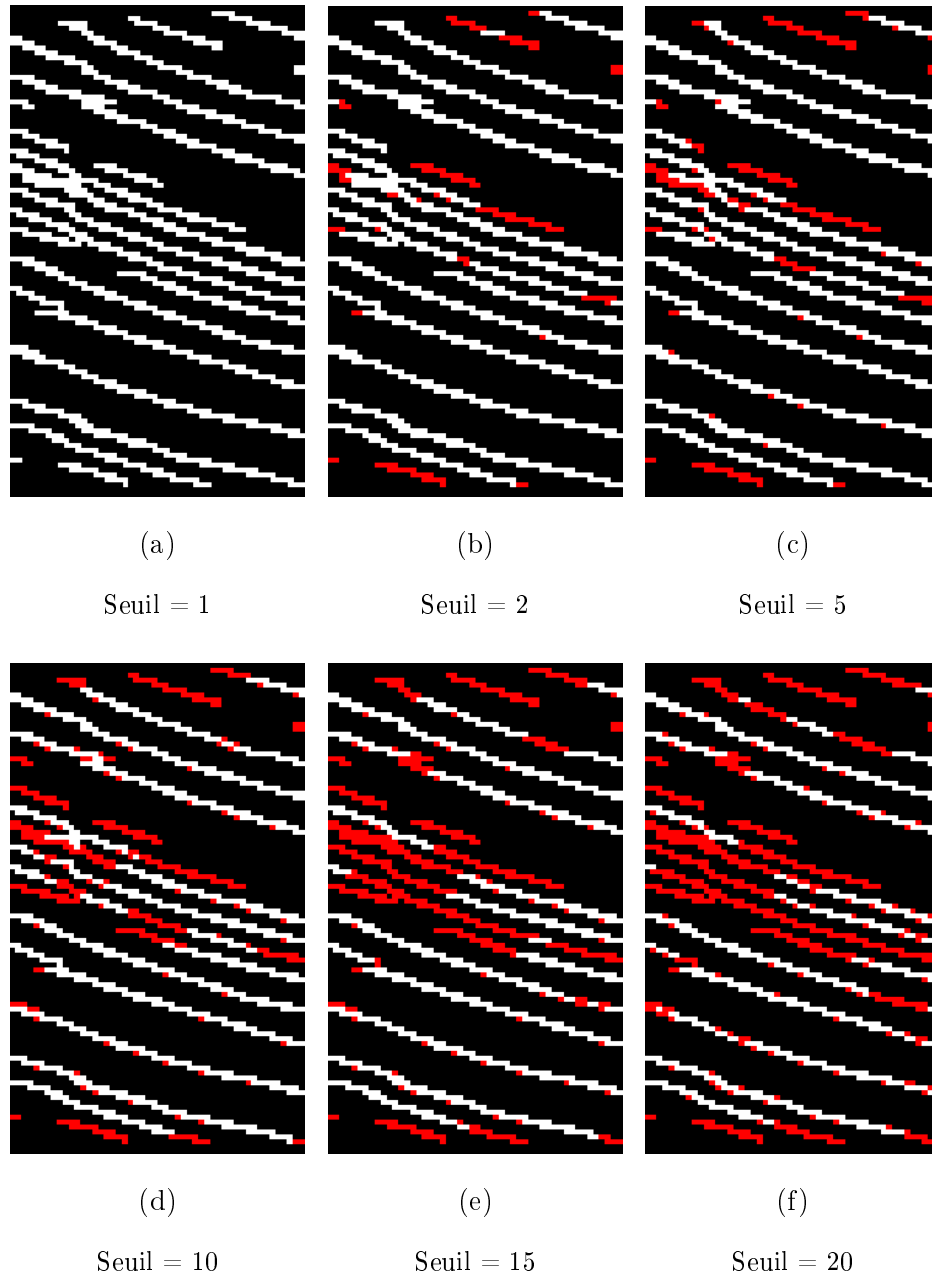


FIG. 3.23 – Sections de l'image accumulateur seuillées à différents niveaux. Les voxels retirés par rapport au niveau de seuil 1 sont en rouge

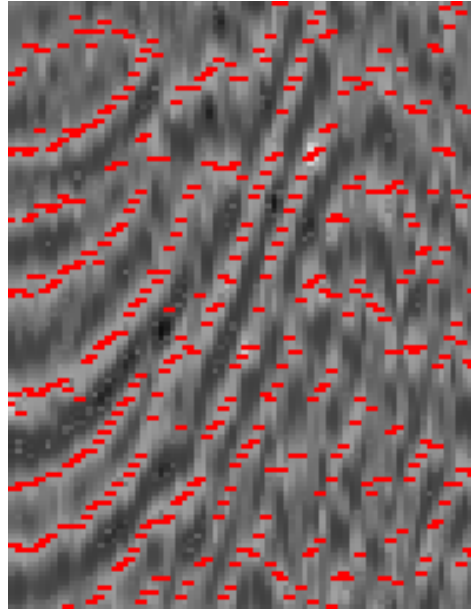


FIG. 3.24 – Surfaces extraites non connectées verticalement à cause de la forte pente. Taille du cylindre : 2. Pas de déplacement : 1. Seuil : 1

donc la robustesse des résultats est moins bonne. Sur le plan du temps de calcul, le fait d'utiliser de petits cylindres rend la segmentation plus rapide car, par rapport à un cylindre de plus grande taille et pour un même pas de déplacement donné, il y a moins de cylindres à segmenter et les segmentations sont plus rapides à calculer (voir *section 3.7.2*).

2. le cas des cylindres de forte section

Ainsi, au contraire, plus la taille des cylindres est grande et plus le temps de segmentation est long. Cependant, les cylindres de grande taille procurent une segmentation plus proche de ce qu'on attend. En effet, comme nous cherchons à extraire des surfaces de forte intensité, de grande taille et les plus régulières possibles, des grands cylindres sont plus efficaces dans une telle recherche car ils ne « voient » pas les petites surfaces, certes hautes en amplitude mais de petite taille et peu importantes au final. Le revers de la médaille est qu'avec un cylindre de grande taille, un petit défaut sur une grande surface haute en amplitude pourra très bien causer la non détection de cette dernière. de plus, comme nous l'avons vu dans la *section 3.7.1*, si une grande structure très énergétique contient plusieurs petits trous distants les uns des autres d'une longueur inférieure aux dimensions du cylindre, nous obtiendrons un trou de grande taille dont le bord passera par ces trous. Plus le cylindre est grand et plus on se rapproche du problème de la segmentation naïve de l'image entière.

De plus, on pourrait penser que, lorsqu'il y a un trou dans la surface, un gros cylindre provoquera un trou plus important et donc une plus grande perte de données qu'un cylindre de

petite taille. Cela dépend, comme nous l'avons vu, du niveau de seuillage de l'image compteur.

Ainsi, la taille des cylindres influe sur le temps de calcul, mais également sur la qualité de la segmentation. L'idéal consiste à trouver une taille de cylindre assez grande pour éviter d'obtenir un trop grand nombre de petites structures très fortes en amplitude, tout en restant de taille raisonnable pour ne pas trop allonger les temps de calcul et ne pas extraire des petites surfaces parasites du même type que celles que nous avons obtenues en segmentant naïvement l'image entière (*partie 3.5*).

Le pas de déplacement du cylindre

Nous parlons le plus souvent du pas de déplacement au singulier. Ce paramètre en cache en fait deux : un pas de déplacement dans la direction inline et un dans la direction crossline. En pratique, on prend souvent la même valeur pour les deux paramètres. Pour certaines configurations de trous, il peut cependant être plus avantageux de choisir deux valeurs différentes.

Le pas de déplacement du cylindre est, en partie, lié à la taille du cylindre. En effet, sa valeur est bornée par cette dernière, puisque si on prend une valeur de déplacement supérieure à la taille du cylindre, on ne segmente pas toute l'image. Ce paramètre influe sur la redondance que l'on souhaite avoir concernant les structures à segmenter. Si l'image est très bruitée, un pas de déplacement faible permettra de faire ressortir les points les plus importants. Au contraire, dans une image peu bruitée et de bonne qualité, le pas de déplacement ne sera utile que pour connecter latéralement les structures segmentées.

Il y a alors un compromis à trouver entre la qualité de l'image de départ, qui impose une certaine valeur pour ce paramètre, et le temps de calcul qui dépend aussi fortement de ce dernier. En effet, un pas de 2 dans chaque dimension diminue le temps de calcul d'un facteur d'environ 4 par rapport à un pas de 1, puisqu'il y a environ quatre fois moins de cylindres à segmenter, comme le montre la *figure 3.25*.

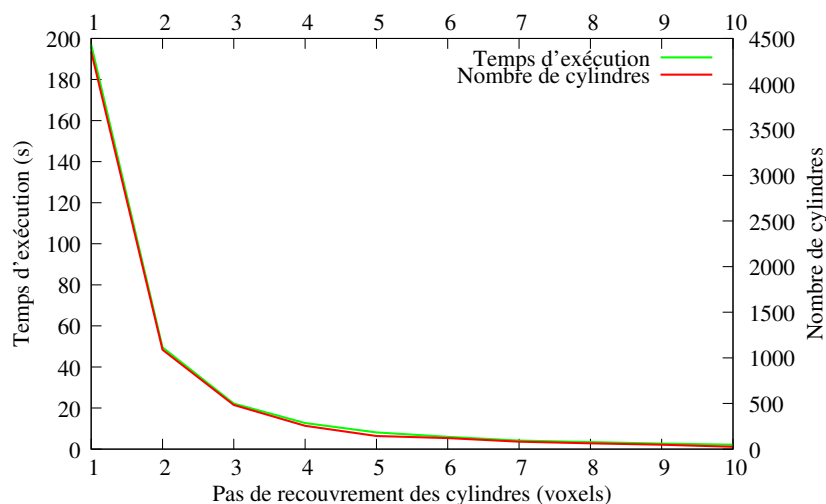


FIG. 3.25 – Influence du pas de recouvrement des cylindres sur le temps d'exécution de l'algorithme de segmentation et le nombre de cylindres traités pour l'image de la *figure 3.18*

Si on en a la possibilité, prendre un pas de 1 permet d'obtenir un résultat de segmentation

complet, c'est à dire avec une plus grande redondance. En pratique, pour des images sismiques de qualité « normale », cela s'avère souvent superflu et prendre un pas de 2 produit des résultats similaires.

Le nombre de régions

Comme le montre le graphique de la *figure 3.26*, le nombre de régions n'a aucune influence sur le temps de segmentation d'une image puisque le temps de réarrangement du graphe est négligeable devant le temps d'inondation.

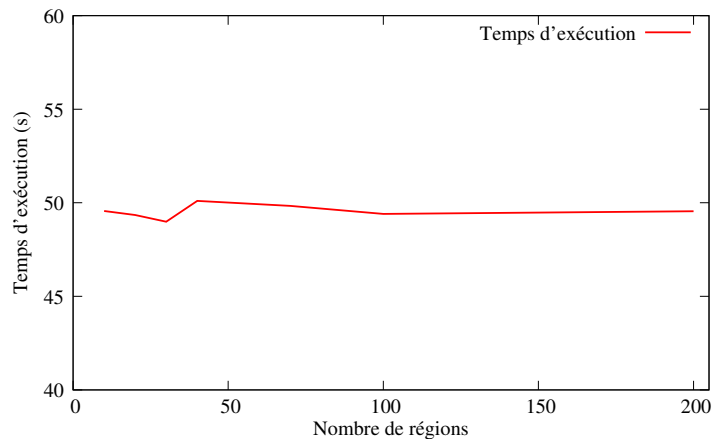


FIG. 3.26 – Influence du nombre de régions sur le temps d'exécution de l'algorithme de segmentation

D'un autre côté, ce paramètre a un impact certain sur la qualité de la segmentation finale. En effet, si le nombre de régions demandées est trop grand par rapport au nombre réel de structures dans l'image, il se produit un phénomène de « bourrage » qui engendre de fausses détections et des surfaces parasites. Pour un homme de l'art de l'interprétation de données sismiques, la connaissance *a priori* de ce paramètre n'est pas un écueil, puisqu'il est capable d'évaluer rapidement soit le nombre de structures maximales, soit le nombre de structures dont il a besoin. Les effets néfastes induits par un nombre de régions trop important est annulé par les traitements que nous appliquons par la suite, mais il allonge alors considérablement leur temps de calcul

On peut évaluer le nombre approximatif de réflecteurs qui se trouvent dans l'image en mesurant la résolution en temps de la sismique (épaisseur d'une couche géologique). Cette évaluation permet d'avoir une idée de la valeur du nombre de régions à entrer en paramètre. Cependant, comme nous venons de le voir, si cette évaluation est trop optimiste, nous risquons d'obtenir des effets indésirables. Choisir un nombre légèrement inférieur se révèle alors être un bon choix. Effectivement, en prenant un peu moins de régions que le nombre optimal (inconnu), nous obtiendrons, certes, moins de régions mais les régions qui ne seront pas détectées seront, en général, les moins significatives. La perte est ainsi assez faible pour un gain en qualité de segmentation appréciable. De plus, en pratique, on obtient plus de surfaces que le nombre de régions demandées.

3.7.3 Compléments d'analyse

Nombre réel de surfaces obtenues

En observant les images d'accumulation que nous avons obtenues à la sortie de l'algorithme de segmentation par cylindres comme, par exemple, la *figure 3.18*, nous observons que le nombre de surfaces que nous obtenons au final est supérieur au nombre de surfaces entré en paramètre. Dans l'exemple de la *figure 3.18*, nous avons souhaité extraire 10 régions. On en compte bien plus.

Il semble alors intéressant de pouvoir quantifier ce phénomène afin de voir dans quelle mesure la segmentation par cylindres augmente le nombre de structures que l'on obtient au final.

Pour ce faire, nous devons d'abord estimer l'épaisseur moyenne des structures. Nous remarquons qu'effectivement ces dernières ne sont pas fines ; c'est un effet indésirable de la segmentation par cylindres. La segmentation peut, en effet, osciller légèrement entre deux cylindres consécutifs et ne pas pointer exactement les mêmes points. Le décalage induit des surfaces épaisses.

Pour estimer l'épaisseur moyenne des surfaces, nous calculons le nombre de surfaces présentes sur chaque trace. Nous effectuons, pour cela, une labellisation de l'image trace par trace à l'aide d'un élément structurant vertical. Sur chaque trace, on a ainsi autant de labels différents que de structures qui intersectent la trace. Le nombre de labels dans l'image finale est alors égal à la somme du nombre de labels pour toutes les traces. On peut, dès lors, calculer l'épaisseur moyenne des structures de la manière suivante :

$$e_m = \frac{n_{points}}{n_{labels}} \quad (3.1)$$

où e_m est l'épaisseur moyenne des structures, n_{points} est le nombre de points total de l'objet et n_{labels} est le nombre de labels obtenus dans la labellisation par trace pour toute l'image.

Si nous reprenons l'exemple basé sur l'image accumulateur de la *figure 3.18*, avec 10 régions, nous obtenons, par ce mode de calcul, une épaisseur moyenne égale à 1,5 environ. Cette valeur semble assez cohérente avec la réalité car, mises à part quelques zones très épaisses et localisées, les structures ont rarement une épaisseur supérieure à 2.

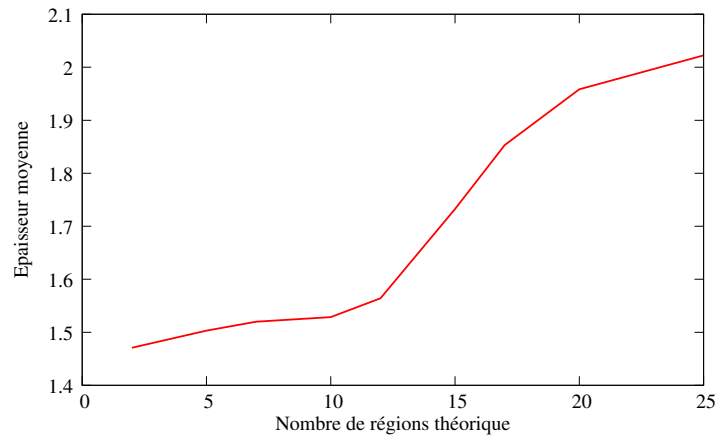
Grâce à ce dernier, nous pouvons calculer le nombre de surfaces que nous avons réellement dans l'image accumulateur. Le calcul est le suivant :

$$n_{surfaces} = \frac{n_{points}}{e_m \times surf_{theo}} = \frac{n_{labels}}{surf_{theo}} \quad (3.2)$$

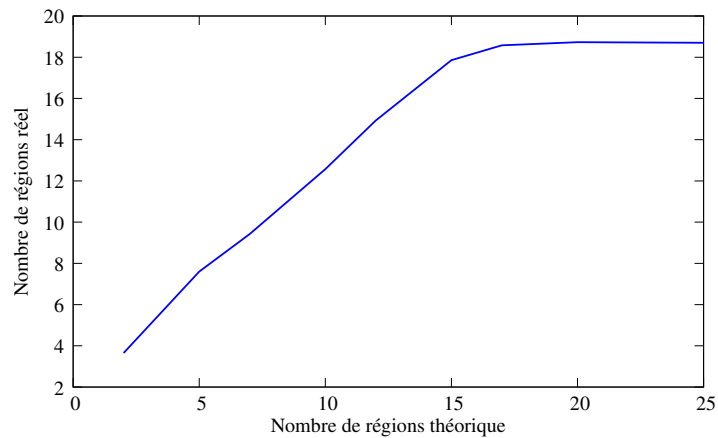
où $n_{surfaces}$ est le nombre de surfaces et $surf_{theo}$ représente la valeur théorique d'une surface idéale, soit la surface horizontale de l'image. Elle est donc égale au produit des coordonnées inline et crossline

Le nombre de surfaces que l'on obtient est un nombre moyen en supposant que nous avons des surfaces complètes. Il est extrêmement rare que ce soit le cas car les surfaces ont des trous ou sont des portions d'horizon.

Les courbes des *figures 3.27 (a)* et *(b)* présentent l'évolution de l'épaisseur des structures *((a))* et du nombre de structures réellement obtenues en sortie de l'algorithme *((b))* de segmentation par cylindres en fonction du nombre de régions entrées en paramètre à cet algorithme.



(a)



(b)

FIG. 3.27 – Évolution de l'épaisseur des structures extraites et de l'estimation du nombre réel de structures en fonction du nombre de régions demandées en entrée de l'algorithme de segmentation

La *figure (a)* montre que l'épaisseur des structures est constante jusqu'à un nombre de 12 régions demandées. Il croît ensuite assez rapidement. Dans la *figure (b)*, la variation du nombre de régions obtenues par rapport au nombre de régions demandées croît linéairement jusqu'à un nombre de régions demandées de 15, il atteint ensuite un pallier situé aux alentours de 18 régions réellement trouvées.

A partir de ces deux courbes, on peut déterminer que le nombre de surfaces optimal à entrer en paramètre à la fonction. En effet, le phénomène de « bourrage », dont nous avons parlé dans la *partie 3.7.2*, est démontré ici : à partir d'une certaine valeur, le nombre de structures obtenues à la fin de l'algorithme ne progresse plus mais l'épaisseur augmente. Cela explique pourquoi à partir d'un certain nombre de régions demandées, nous avons une valeur du nombre de régions obtenues inférieure au nombre de régions demandées. Pour avoir une segmentation de qualité, il faut donc éviter de demander un nombre de régions trop grand.

Dans le cas de la *figure 3.27*, le nombre optimal se situe entre 10 et 12 régions demandées. On obtient au final entre 12 et 14 régions selon la courbe (*b*).

Nous pouvons ainsi obtenir une indication sur le nombre de surfaces qui se trouvent effectivement dans l'image ce qui nous permet de choisir, de façon un peu plus sûre, le paramètre du nombre de régions.

Étude de l'histogramme de l'image compteur

L'étude des histogrammes de l'image accumulateur montre quelques effets intéressants de la segmentation par cylindre. En général, le fait que dans chacun des deux cas le mode correspondant à la plus forte valeur possible soit le plus important rassure quant au bienfondé de la méthode : le nombre de points illuminés dans la segmentation de tous les cylindres les comportant est le plus grand dans tous les cas (*figure 3.28*).

On peut également remarquer d'autres pics à des valeurs multiples d'une dimension du cylindre. Nous n'avons pas eu le temps d'étudier plus avant les raisons d'être de ces pics, mais nous restons persuadés qu'ils peuvent apporter des enseignements intéressants sur les horizons extraits. En effet, si on utilise un cylindre dont les dimensions ne sont pas les mêmes en inline et en crossline, comme c'est le cas de la courbe *figure 3.28 (c)*, il semble possible de corrélérer la taille des pics correspondants à chacune des dimensions avec la direction principale des trous de la surfaces.

Quelques pics ne sont pas situés à des valeurs multiples des dimensions du cylindre. Il correspondent sans doute à des points de bord qui, comme nous en avons déjà parlé sont souvent moins bien imagés ou alors à des configurations de trous particulières.

L'histogramme de l'image compteur semble ainsi constituer une source de renseignement qu'il peut être intéressant d'approfondir dans de futures recherches.

3.7.4 Exemples d'horizons obtenus

Les *figures 3.29* et *3.30* présentent une image d'amplitude de taille $1001 \times 53 \times 1000$, ainsi que le résultat de la segmentation de cette image pour des dimensions de cylindre de $10 \times 10 \times 1000$, un pas de recouvrement de 1 dans chaque direction (inline et crossline) et un nombre de 30 régions. La valeur d'illumination la plus forte est donc de 100. Elle est de couleur blanche sur l'image de la *figure 3.30*. Les valeurs d'illumination tendent vers le rouge puis le noir en diminuant.

On remarque que les horizons de forte amplitude sont en général bien repérés (majorité de points blancs). Les zones plus chaotiques sont reconnaissables à une grande quantité de petits morceaux de structures à faible taux d'illumination.

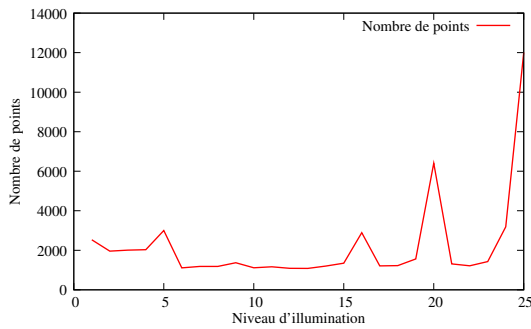
On peut également noter quelques structures particulières. Notamment le fond de la mer repéré par le rectangle 1 sur la *figure 3.29*. La différence d'impédance acoustique entre l'eau et le sol est importante. Cette interface constitue donc un très bon réflecteur qui est très bien imagé et que l'on peut donc extraire facilement comme le montre la *figure 3.30*.

Entre les repères notés 2, on note une légère rupture de pente des horizons ce qui indique qu'il y a probablement des failles à ces endroits. On peut même noter des ruptures de continuité des horizons. L'algorithme de segmentation respecte ces dernières : l'intensité des points

diminue autour des trous mais il n'y a pas de connexion intempstive des surfaces.

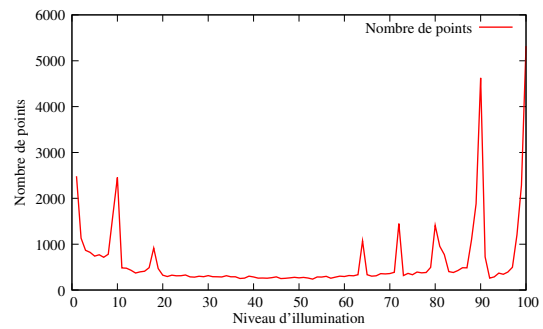
Les oscillations dans le cadre 3 sont, sans doute, dues à des points diffractants. Ils correspondent à des hétérogénéités de la composition du sous-sol ou des discontinuités dans les structures. Ces points se comportent comme des sources secondaires ce qui explique les formes en calotte (forme du front d'onde). Lors du traitement des données, une migration permet de s'affranchir de ces artefacts. Cependant, l'algorithme de segmentation extrait ces calottes telles qu'elles se trouvent dans l'image. Ceci est un comportement normal de l'algorithme.

La zone assez mal imagée repérée par le numéro 4 est sans doute due à un anticlinal. Sur cette image, il semble que le traitement qui ait été appliqué sur les données d'acquisitions soit un stack simple (sans migration). Or, comme nous l'avons vu dans le *chapitre 2*, le stack nécessite l'hypothèse de réflecteurs horizontaux et d'un milieu homogène ce qui n'est pas le cas



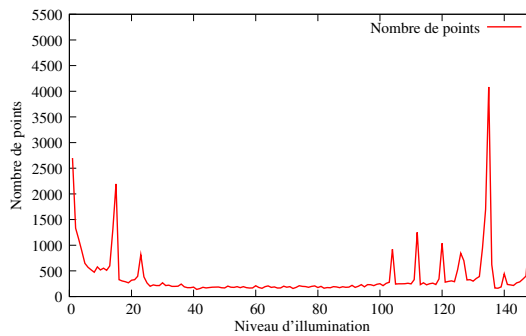
(a)

Taille du cylindre : $10 \times 10 \times 150$. Pas de déplacement de 2 dans chaque direction. Chaque point peut donc être illuminé au plus 25 fois



(b)

Taille du cylindre : $10 \times 10 \times 150$. Pas de déplacement de 1 dans chaque direction. Chaque point peut donc être illuminé au plus 100 fois



(c)

Taille du cylindre : $10 \times 15 \times 150$. Pas de déplacement de 1 dans chaque direction. Chaque point peut donc être illuminé au plus 150 fois

FIG. 3.28 – Histogrammes d'une image accumulateur issue de la segmentation hiérarchique pour différentes tailles de cylindres et différents pas de déplacement des cylindres

d'un anticlinal. Cela explique pourquoi seules les parties quasiment horizontales de la structure sont bien imagées et pourquoi la zone qui se situe en dessous ne l'est pas.

Enfin, le trou repéré par le numéro 5 (sans doute causé par une faille qui se termine à cet endroit) illustre assez bien le comportement de l'algorithme de segmentation lorsqu'une telle structure se présente. Le niveau d'illumination diminue quand on s'approche du trou.

Ces exemples montrent que l'algorithme extrait les structures telles qu'elles se trouvent dans les données. Il ne fait donc pas d'interprétation du cube sismique et produit une information objective. Le taux d'illumination donne une idée de la qualité du réflecteur en chaque point extrait.

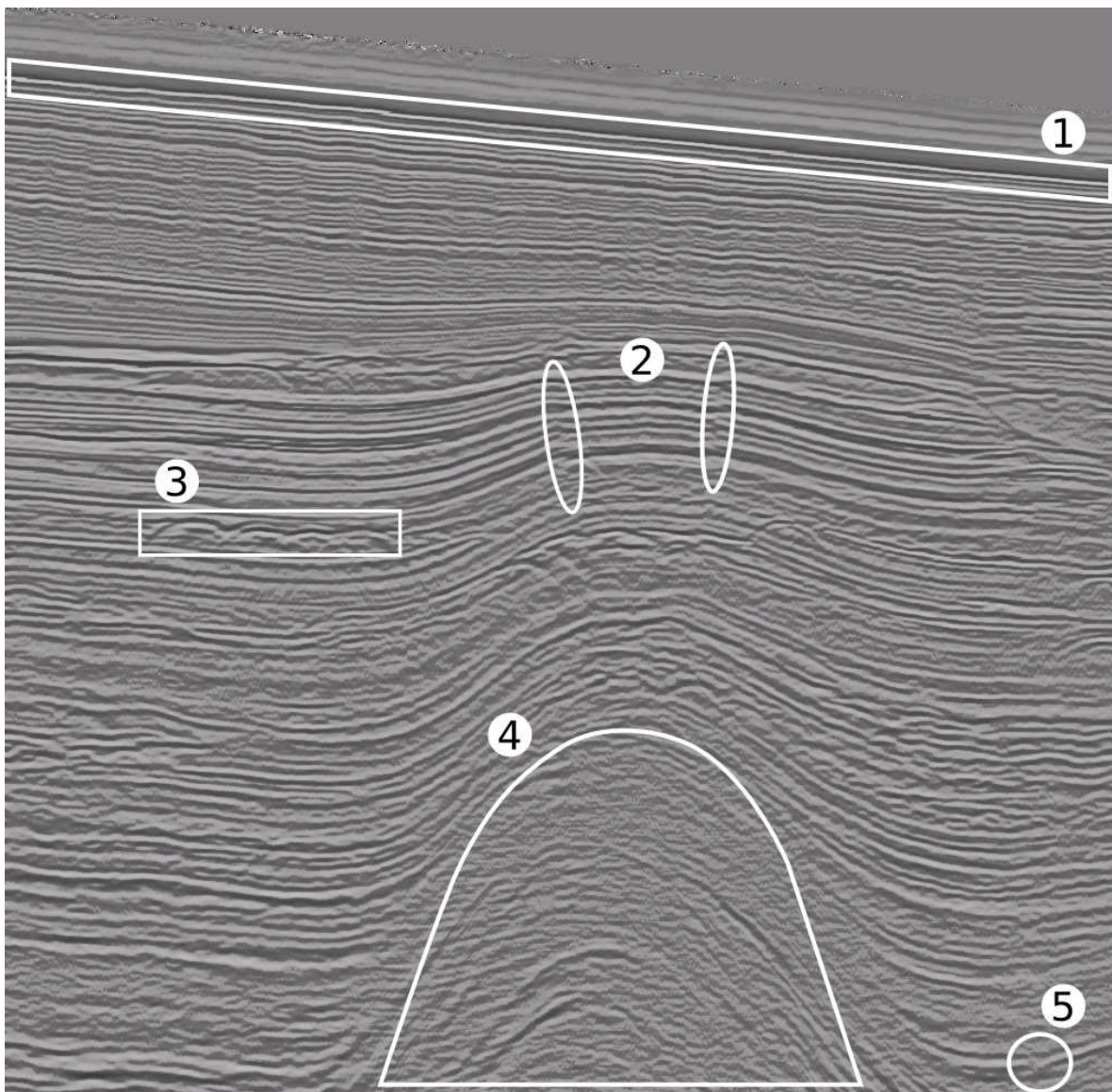


FIG. 3.29 – Coupe de l'image originale (taille : $1001 \times 53 \times 1000$)

3.7.5 Temps de calcul

En traitement d'images, les performances n'ont une réelle importance que dans deux cas. Le traitement d'images en temps réel, qui contraint les algorithmes à s'exécuter dans un temps suffisamment court pour être considérés comme instantanés ou, comme dans notre cas, lorsque les quantités de données sont importantes et peuvent mettre à mal bien des ordinateurs performants. Dans le cadre de notre application, des temps de segmentation qui restent de l'ordre de la journée semblent donner satisfaction aux industriels.

Dans le cas de notre algorithme, si on recherche les ressources nécessaires pour réaliser la

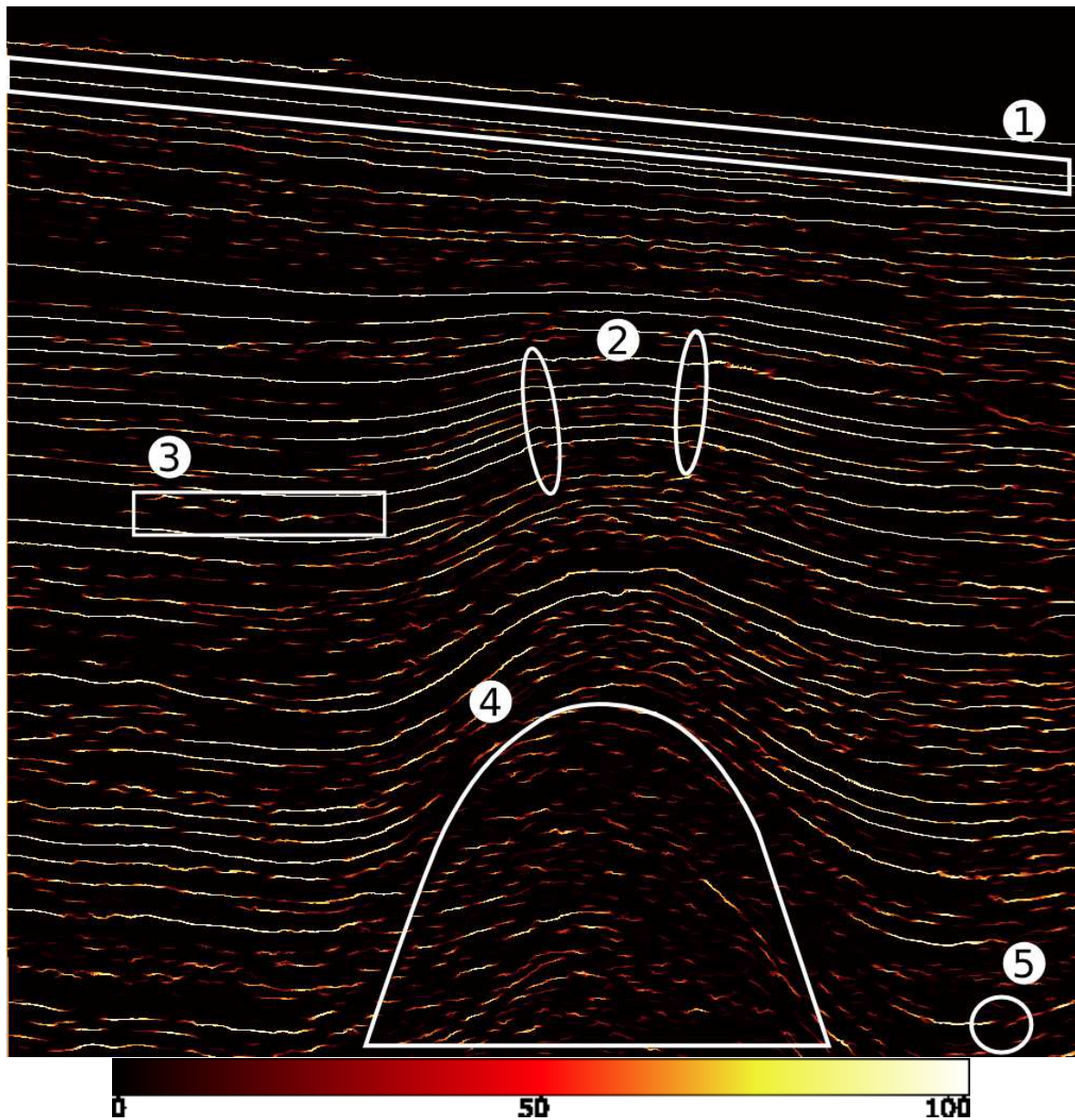


FIG. 3.30 – Compteur de segmentation de l'image de la *figure 3.29* (valeur maximum : 100)

segmentation, on s'aperçoit que c'est surtout la vitesse du processeur qui est pénalisante. En effet, il faut réaliser un grand nombre de segmentations hiérarchiques (donc un grand nombre d'inondations).

La mémoire n'a qu'une importance secondaire. Elle doit permettre d'allouer deux fois la taille de l'image et six fois la taille d'un cylindre si l'algorithme nécessite le chargement de l'intégralité du cube. Sinon, la capacité de pouvoir gérer six fois la taille du cylindre est suffisante. Donc, tant que la taille d'un cylindre reste « raisonnable », la mémoire n'est pas un facteur limitant. Par exemple, avec 1 Go de mémoire vive, il est possible de traiter un cube d'environ 325 millions de points ($695 \times 935 \times 501$), avec des cylindres de taille $10 \times 10 \times 501$, sans problème. La vitesse de traitement dépend essentiellement de la vitesse du processeur.

On peut estimer la complexité théorique de l'algorithme de segmentation par cylindres de deux manière possibles. On peut, en effet, calculer, en nombre de cubes équivalents, le nombre de points traités au total, c'est à dire le nombre de points effectivement traités durant la segmentation ramené au nombre de cubes de la taille du cube initial que cela représente.

Si on note IL_{im} et XL_{im} les dimensions respectives de l'image dans les directions inline et crossline, IL_{cyl} et XL_{cyl} les dimensions respectives du cylindre et p_{IL} et p_{XL} les pas de déplacement, respectivement selon inline et crossline, le nombre de points traités en nombre de cubes équivalents est :

$$N_{cube} \simeq \frac{IL_{cyl} \times XL_{cyl}}{p_{IL} \times p_{XL}}$$

En effet, chaque point est illuminé N_{cube} fois.

Un calcul du nombre de cylindre semble être plus juste pour estimer la complexité de l'algorithme car c'est l'unité « de base » du calcul de la segmentation par cylindre. Une approximation de ce nombre peut être obtenue par le calcul suivant :

$$N_{cyl} \simeq \frac{IL_{im} \times XL_{im}}{p_{IL} \times p_{XL}}$$

Cette estimation ne prend pas en compte l'écrasement des cylindres sur le bord, c'est pourquoi elle est légèrement inférieure au nombre de cylindres effectivement traités. Pour une image de grande taille, comme c'est le cas de images sismiques, et pour des dimensions des cylindres assez faibles, l'approximation réalisée est cependant négligeable. Si on rajoute à ceci le fait que la complexité de l'algorithme de ligne de partage des eaux par file d'attente hiérarchique est linéaire en fonction du nombre d'éléments de l'image, nous obtenons donc une complexité théorique tout à fait satisfaisante.

Exemples et améliorations

Les exemples qui suivent s'efforcent de balayer un large panel de possibilités de manière à donner une idée assez large des performances de l'algorithme.

Nous avons eu à notre disposition pour ces tests de nombreux jeux de données de différentes tailles. De plus, nous avons disposé de trois ordinateurs assez différents pour exécuter l'algorithme de segmentation. Leurs caractéristiques principales sont résumées dans le *tableau 3.1*.

Dans le *tableau 3.2* sont données les dimensions de plusieurs cubes sismiques, les caractéristiques des cylindres utilisés pour la segmentation, ainsi que le temps de segmentation dans chaque cas. Entre parenthèse, le chiffre indique le numéro de l'ordinateur utilisé. Ce chiffre correspond à un des ordinateurs du *tableau 3.1*.

Numéro	Type d'ordinateur	Processeur	Mémoire vive	Système
1	Ordinateur portable	Intel Centrino 1,7 GHz	1 Go	Linux Debian
2	Ordinateur de bureau	Intel Pentium IV 3 GHz	1 Go	Linux Debian
3	Calculateur	Bi-processeur AMD 2,2 GHz	16 Go	Linux Debian

TAB. 3.1 – Ordinateurs à notre dispositions pour exécuter l'algorithme de segmentation

Cube	Cylindre	Pas	Nombre de cylindres traités	Temps de calcul
$695 \times 935 \times 501$	$10 \times 10 \times 501$	2	165321	9 h 50 min (3)
$695 \times 935 \times 501$	$10 \times 10 \times 501$	2	165321	12 h 20 min (1)
$100 \times 100 \times 121$	$10 \times 10 \times 121$	2	2916	3 min (1)
$100 \times 54 \times 100$	$10 \times 10 \times 100$	2	6527	5 min 40 s (1)
$201 \times 201 \times 150$	$10 \times 10 \times 150$	1	43264	50 min (3)
$201 \times 201 \times 150$	$10 \times 10 \times 150$	1	43264	1 h 07 min (2)
$50 \times 50 \times 150$	$10 \times 10 \times 150$	1	3249	3 min 20 s (1)
$1001 \times 53 \times 1000$	$10 \times 10 \times 1000$	1	60480	9 h 17 min (1)
$80 \times 100 \times 70$	$10 \times 10 \times 70$	2	9309	5 min 35 s (1)

TAB. 3.2 – Exemple de temps de segmentation

Le *tableau 3.2* présente des temps d'exécution variés allant de l'ordre de la minute à une demi-journée. Le pas de déplacement donne les pas de déplacement selon les directions inline et crossline et le nombre de cylindres traités indique combien de segmentations hiérarchiques ont été effectuées (une par cylindre extrait).

Ces temps de calcul donnent pleine satisfaction à nos partenaires industriels. Cependant, comme nous en avons également déjà parlé, il est possible d'améliorer ces résultats grâce à une caractéristique de cette méthode par cylindres : on peut segmenter chaque cylindre individuellement. Ceci offre une possibilité de parallélisation de l'algorithme.

Parallélisation

Les dimensions de certains cubes présentés dans le tableau de la section précédente peuvent déjà sembler très importantes. Cependant, ce ne sont que des extraits de jeux de données pouvant aller jusqu'à plusieurs milliards de points (environ dix fois la taille du plus gros jeu traité). Il apparaît alors illusoire de vouloir traiter de telles quantités de données avec les machines présentées plus haut pour des questions de mémoire essentiellement. Une solution pour segmenter de tels cubes serait de trouver des machines encore plus performantes. Cependant, la taille des cubes va croissant et la quantité de campagnes d'acquisition 3D est de plus en plus importante car les techniques d'acquisition s'améliorent tous les jours comme nous l'avons vu dans le *chapitre 2*. Il y a donc de plus en plus de données à traiter, et ce toujours de plus en plus vite.

L'algorithme de segmentation présenté ici peut faire face à ce défi, car il est parallélisable de plusieurs manières. La première consiste en une machine maître qui envoie à toutes les

machines esclaves les cylindres à traiter. Les machines esclaves exécutent la segmentation et renvoient le résultat à la machine maître qui l'ajoute à l'image compteur. Cette méthode est la méthode à utiliser si on ne peut pas faire de copie de l'image sur les machines esclaves. Elle nécessite cependant des temps de communication entre la machine maître et les machines exécutantes assez courts. De plus, pour obtenir de bonnes performances, il faut que le réseau reliant les machines supporte les quantités de données qui vont y circuler, et ce surtout si la taille des cylindres est importante.

Une autre technique permettant de réaliser la segmentation d'un cube de grande taille sans surcharger les communications entre les ordinateurs consiste à réaliser une copie du jeu de données sur toutes les machines esclaves. La machine maître n'a alors plus qu'à calculer la position des cylindres à traiter et à la communiquer aux machines esclaves. Ces dernières extraient le cylindre correspondant à la position qu'elles ont reçue, réalisent la segmentation et ajoutent le résultat dans une image compteur locale. Lorsque tous les cylindres ont été traités, la machine maître collecte toutes les images compteur et les somme de manière à obtenir l'image compteur finale. Cette méthode permet d'améliorer le temps brut de traitement, qui est alors quasiment égal au temps de traitement sur une machine divisé par le nombre de machines esclaves. Elle ne résout cependant pas le problème de mémoire, car pour ouvrir une image de trois milliards de points en huit bits, plus une image compteur de la même taille, il est nécessaire d'avoir au minimum 6 Go de mémoire vive. Il faudrait alors ajouter un moyen de lire des morceaux d'image sur le disque dur. Ceci est tout à fait faisable, mais le fait que l'accès au disque dur est plus lent que l'accès à la mémoire vive est à prendre en compte.

Enfin, une solution hybride est envisageable. En effet, il est possible de découper l'image en autant de sous-images (de même hauteur que l'image originale) qu'il y a de machines esclaves et d'en faire une copie sur chacune de ces machines exécutantes qui en effectuent la segmentation et qui renvoient le résultats à la machine maître, qui crée alors l'image compteur finale. Moyennant un recouvrement astucieux de ces sous-images, il est possible d'améliorer correctement les performances de la segmentation, et même de pouvoir exécuter l'algorithme sur des jeux de données qu'il est impossible de traiter en l'état sur une seule machine.

Aucune de ces méthodes n'a été testée réellement. Elles sont données à titre d'exemple sur ce qu'il est possible de faire afin d'illustrer le fait que l'algorithme de segmentation par cylindre est tout à fait parallélisable. Il est donc possible de trouver de meilleures manières d'implémenter ce dispositif suivant le nombre de machines et le type de réseau dont on dispose.

3.8 Une perspective intéressante : la segmentation d'images sismiques 4D

Durant nos travaux, nous avons eu l'occasion d'initier une application des techniques de segmentation de cube sismique à deux jeux de données d'un même champ acquis à des temps différents. La problématique consistait à segmenter ces deux cubes de manière à trouver d'éventuelles modifications de la géométrie du sous-sol entre les deux dates d'acquisition.

Pour y parvenir, nous avons travaillé sur un cylindre que nous avons extrait du cube original comme pour une segmentation par cylindres classique. Nous l'avons ensuite segmenté. Cette fois-ci, au lieu d'obtenir la ligne de partage des eaux comme résultat de la segmentation,

nous avons travaillé à partir de l'image mosaïque. En effet, nous obtenons alors un empilement de régions correspondant aux régions inter horizons. A partir de cet empilement, nous avons érodé les régions et nous nous sommes servis du résultat de cet érodé comme source pour inonder le cylindre correspondant dans la seconde image. De cette manière, nous avons obtenu deux segmentations presque identiques des deux cubes, une simple soustraction permettant d'obtenir les différences entre les deux cylindres.

Les résultats que nous avons obtenus semblent prometteurs car ils permettent de mettre en évidence des différences significatives entre les cylindres extraits de chacun des cubes. En revanche, la grande variabilité des résultats entre deux paires de cylindres ainsi que le manque de validations sur le plan industriel nous ont amenés à ne pas illustrer cette partie.

Ces premières études ont montré qu'il était possible d'appliquer des méthodes de segmentation morphologique à des cas d'étude 4D et ouvrent les portes de nombreuses applications et évolutions de telles techniques.

3.9 Conclusion

La méthode que nous avons présentée ici permet d'extraire des structures géologiques des données sismiques d'amplitude 3D. En remplaçant les temps de calcul que nous obtenons dans un contexte d'interprétation structurale qui peut durer jusqu'à quatre jours, nous pouvons voir qu'effectivement, ils ne sont pas pénalisants. L'algorithme de segmentation par cylindres que nous avons utilisé autorise, en outre, une parallélisation du processus de segmentation. Cette parallélisation peut améliorer sensiblement des temps de traitement déjà considérés comme bons par les industriels.

L'algorithme de segmentation par cylindres comporte certains paramètres qui ont pour but de le rendre adaptatif, non seulement aux données à traiter, mais également au contexte d'application des résultats de la segmentation. Nous avons engagé une discussion autour de la valeur que peuvent prendre ces paramètres, qui nous a permis de dégager une heuristique autorisant la prise en considération des particularités de chaque image sismique.

Enfin, nous avons constaté et montré, exemples à l'appui, que les structures que nous obtenons à la sortie du processus de segmentation ne sont pas des structures fines. Cela pose un problème évident de compatibilité avec la plupart des logiciels de traitement et d'interprétation sismique du marché, qui ne prennent que des structures dont l'épaisseur est d'un voxel au plus. Il est donc nécessaire d'amincir les surfaces que nous avons obtenues. Nous proposons, entre autres, une solution à ce problème dans le chapitre suivant.

Chapitre 4

Segmentation topologique d'images sismiques 3D

Le présent chapitre traite de techniques topologiques de traitement d'images appliquées à l'amincissement et à la segmentation de surfaces sismiques.

Dans le chapitre précédent, nous avons extrait des horizons sismiques de cubes sismiques d'amplitude à l'aide de techniques morphologiques. Pour des intégrations dans des logiciels d'interprétation et de traitement de données sismiques, ces surfaces présentent l'inconvénient de ne pas être minces. Il nous faut donc remédier à cet inconvénient afin de pouvoir introduire les horizons extraits dans la chaîne de traitement géophysique.

De plus, le résultat de la segmentation morphologique produit un ensemble de surfaces qui, pour la plupart, sont connectées les unes aux autres. De nombreuses opérations basées sur l'utilisation des horizons nécessitent de pouvoir les distinguer entre eux (calcul d'amplitude moyenne, de pente, de surface, etc ...). Pour y parvenir, nous avons utilisé une approche topologique afin de séparer les surfaces sismiques segmentées par les méthodes morphologiques.

Dans ce chapitre, nous verrons tout d'abord les fondements de la topologie discrète puis, dans un second temps, leur application à l'amincissement et à la séparation de surfaces sismiques. Nous présenterons enfin les résultats que nous obtenons sur un cube d'amplitude 3D.

4.1 Outils de topologie discrète

La topologie discrète permet l'étude des propriétés topologiques des images numériques. Elle pose les fondements mathématiques de techniques de traitement d'images parmi lesquelles on trouve, entre autres, les amincissements, le suivi de contours et le décompte d'objets. Bien que la topologie discrète puisse être appliquée à des images à niveaux de gris, il est d'usage de travailler avec des images binaires.

La compréhension des techniques topologiques est rendue plus aisée par l'adoption d'un certain formalisme et de certaines notations. On notera tout d'abord qu'un élément d'image 2D est appelé pixel (pour « picture element ») et qu'en 3D, il devient voxel (extension de la terminologie 2D pour « volume element »). On associe usuellement chaque pixel ou voxel d'une image à un point d'une grille, c'est à dire à un point dont les coordonnées sont des valeurs entières. Dans la suite, les termes « voxel » (respectivement « pixel ») et « point » référeront à la même partie élémentaire de l'image, le terme « point » ayant l'avantage de convenir à toutes les images, indépendamment de leur nombre de dimensions.

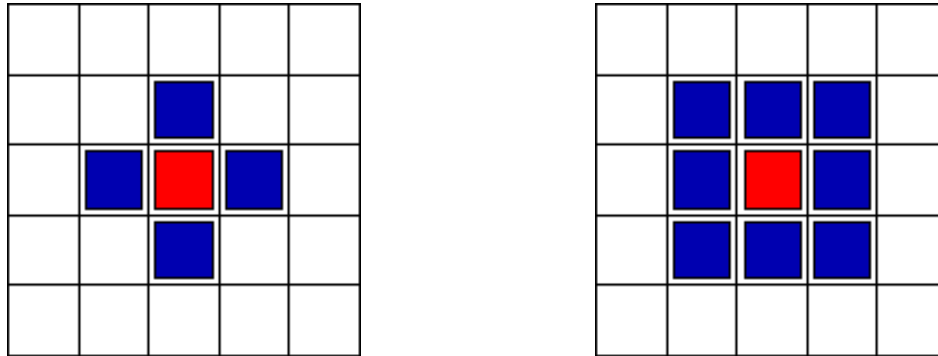
En géométrie discrète 3D, une image est donc considérée comme un sous-ensemble de \mathbb{Z}^3 et tous ses points sont repérés par un triplet de coordonnées entières. A cela s'ajoutent quelques caractéristiques qu'il est nécessaire de préciser pour fixer le cadre de travail.

4.1.1 Quelques définitions

L'adjacence

Il existe plusieurs manières équivalentes de définir l'adjacence de deux points d'une grille 2D ou 3D. Nous définissons et illustrons ci-dessous l'adjacence à 2 et 3 dimensions. Par la suite, nous ne le ferons plus qu'en trois dimensions pour ne pas alourdir inutilement la présentation des concepts abordés.

On dit donc que deux points d'une image 2D sont 4-adjacents s'ils sont distincts et s'ils partagent un côté. Ils sont dits 8-adjacents s'ils sont distincts et ont en commun un côté ou un angle. Les illustrations de la 4- et de la 8-adjacences sont données en *figure 4.1*.



(a) En bleu : les points 4-adjacents au point central (en rouge) (b) Le point central (en rouge) et ses 8 voisins 8-adjacents (en bleu)

FIG. 4.1 – Adjacence de deux points dans une image 2D

On dit d'autre part que deux points distincts d'une image 3D sont 6-adjacents s'ils partagent une face. Ils sont 18-adjacents s'ils ont en commun soit une face soit une arête et ils sont 26-adjacents s'ils partagent soit une face, soit une arête soit un coin comme le montre la figure 4.2.

Par extension, on peut définir l'adjacence entre un point et un ensemble de points, ainsi que l'adjacence entre deux ensembles de points. Soit p un point d'une image numérique et S un ensemble de points de la même image ne contenant pas p . Pour $n \in \{4, 8\}$ en deux dimensions et $n \in \{6, 18, 26\}$ en trois dimensions, on dit que p est n -adjacent à S si p est n -adjacent à au moins un point de S .

De plus, si on appelle T un autre ensemble de points de la même image, disjoint de S , on dit que S et T sont n -adjacents si un point de S est n -adjacent à un point de T .

Notion de voisinage

On peut définir un voisinage d'un point p d'une image comme un ensemble de points de cette image qui contient p . Cette définition est assez vague et, en pratique, on restreint cet ensemble de points à une structure plus régulière, constituée des points qui se trouvent à une distance du point p inférieure ou égale à une distance de référence donnée.

Soit p un point d'une image 3D, on définit les voisinages les plus courants en trois dimensions de la manière suivante :

$$N_n(p) = \{p'/p' \text{ est } n\text{-adjacent à } p\} \cup \{p\}$$

avec $n \in \{6, 18, 26\}$.

La figure 4.3 illustre les voisinages N_6 , N_{18} et N_{26} . Dans chaque cas, on ne voit pas le point central. Le voisinage N_6 peut être vu comme une croix dans les trois dimensions, le voisinage N_{26} est un cube de $3 \times 3 \times 3$ voxels, et le voisinage N_{18} est un voisinage N_{26} auquel on a ôté les 8 coins.

On note habituellement $N_n^*(p) = N_n(p) \setminus \{p\}$ le voisinage privé du point central avec $n \in \{6, 18, 26\}$.

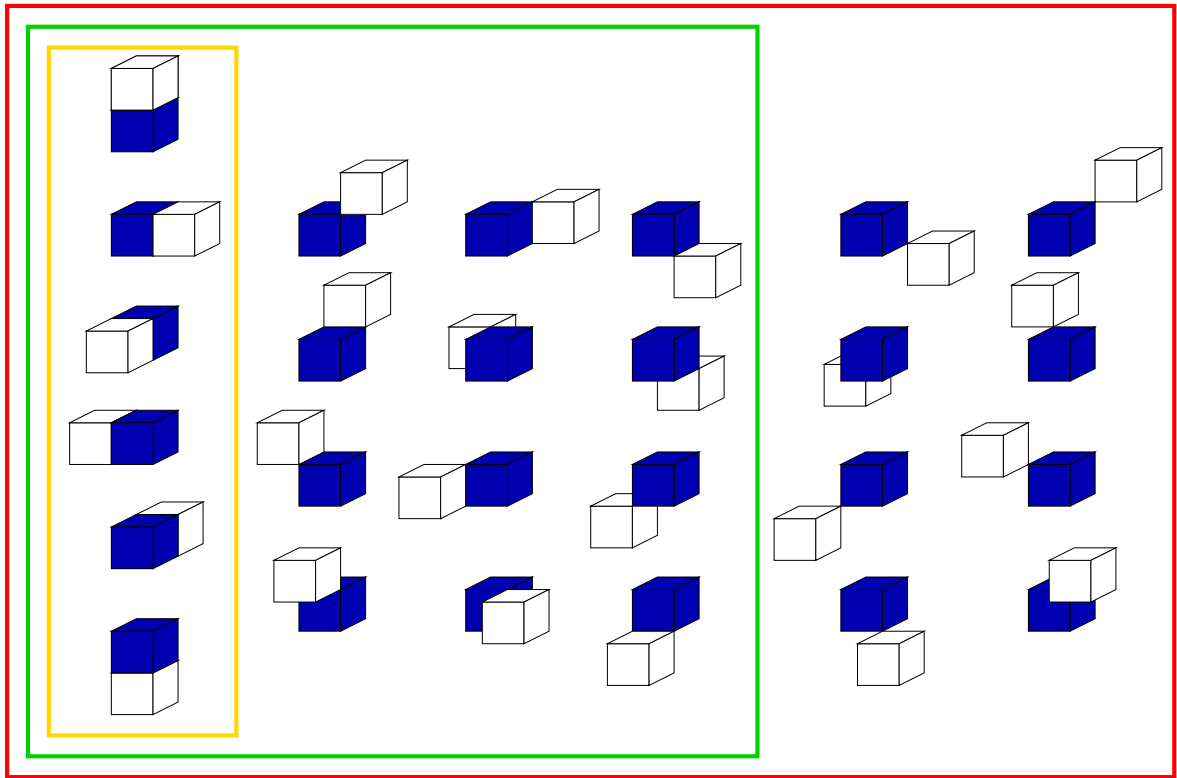


FIG. 4.2 – Adjacence de deux points dans une image 3D. Les paires de points 6-adjacents sont illustrées dans le cadre jaune, les paires de points 18-adjacents dans le cadre vert et les paires de points 26-adjacents dans le rouge

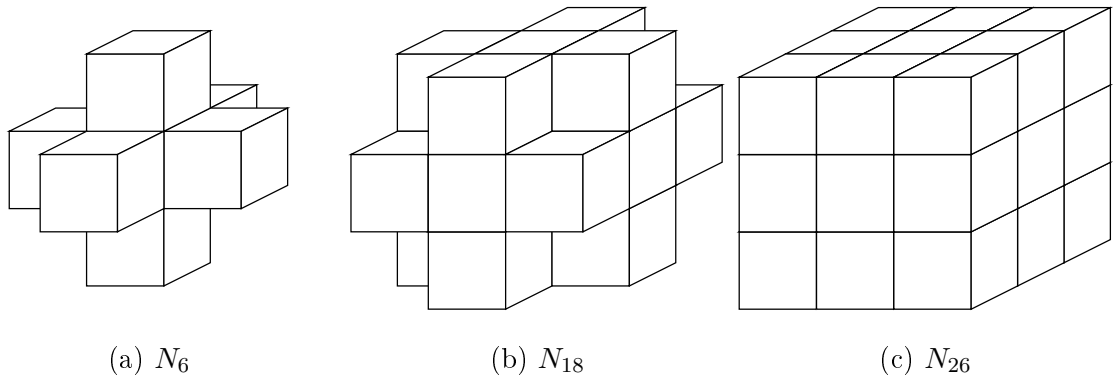


FIG. 4.3 – Les 3 voisinages les plus utilisés en 3D : N_6 , N_{18} et N_{26}

Notion de chemin entre deux points d'un objet

Soit S un ensemble de points représentant un objet dans une image binaire. Soient x et y deux points de S . π est un n -chemin de x à y si et seulement si il existe une séquence de points x_0, \dots, x_k appartenant à S et tels que, pour $i = 0, \dots, k - 1$, x_i est n -adjacent à x_{i+1} , avec $x_0 = x$ et $x_k = y$. Si $x = y$, on dit que le chemin est fermé.

Notion de connexité

Soit S un ensemble de points de même type (objet ou fond) d'une image numérique binaire. On dit que S est n -connexe si pour tout couple de points (x, y) de cet objet il existe un n -chemin de x à y dans S .

Composante connexe

Soit S un ensemble de points de même type n -connexe ou non. On appelle composante connexe de X tout sous-ensemble n -connexe maximal de X .

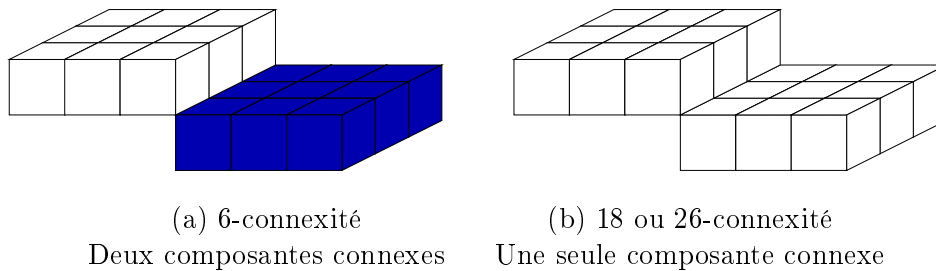


FIG. 4.4 – Différence entre la 6-connexité et la 18- ou 26-connexité pour un même objet.

La *figure 4.4* donne un exemple de la différence du nombre de composantes connexes que l'on obtient pour un même objet suivant que l'on a choisi la 6-connexité ou la 18- ou 26-connexité.

Type d'adjacence pour le fond et l'objet

Comme nous l'avons dit plus haut, en topologie discrète, nous travaillons sur des images binaires. Dans ce chapitre, les points de l'objet sont illustrés par des points noirs et les points du fond par des blancs.

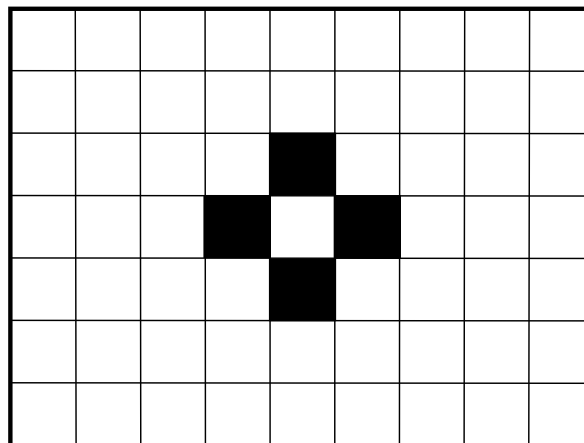


FIG. 4.5 – Paradoxe de connectivité

La *figure 4.5* présente un problème qui se pose à la fois en 2D et en 3D mais qu'il est plus facile d'illustrer en 2D. Si on choisit la même 4-adjacence pour les points de l'objet et les points du fond, les 4 points de l'objet sont tous déconnectés et l'ensemble des points du fond est séparé en deux composantes connexes. D'un autre côté, si on choisit la 8-adjacence pour les points de l'objet et ceux du fond, on obtient pour les points noirs une courbe de Jordan [74] discrétisée qui ne parvient cependant pas à séparer le fond en deux composantes connexes distinctes, puisque tous les points blancs sont également 8-connexes. Ce problème se résout en définissant des adjacences différentes pour les points de l'objet et pour les points du fond.

Ainsi, dans l'exemple de la *figure 4.5*, si on assigne la 4-adjacence aux points du fond et la 8-adjacence aux points de l'objet, le fond est alors bien séparé en deux composantes 4-connexes et l'objet comporte bien une seule composante 8-connexe. On peut très bien inverser les adjacences du fond et de l'objet.

D'après Kong et Rosenfeld ([38]), si on donne à l'objet la m -adjacence et au fond la n -adjacence, les paires d'adjacences possibles pour le couple (m, n) sont :

- en 2D : $(m, n) \in \{(8, 4), (4, 8)\}$,
- en 3D : $(m, n) \in \{(26, 6), (18, 6), (6, 26), (6, 18)\}$.

Usuellement, en 3D, on choisit $(m, n) \in \{(26, 6), (18, 6)\}$.

4.1.2 Les bords

En topologie discrète, les points de bord d'une image sont des points particuliers, puisqu'ils n'ont pas le même nombre de voisins ni la même configuration de voisinage que les autres points. Dans la plupart des algorithmes, ils se comportent différemment des autres points de l'image et produisent souvent des cas problématiques à traiter. Nombre d'algorithmes possèdent alors une ou plusieurs conditions permettant de traiter chacun des cas particuliers dépendant de la position du point (bord régulier ou coin de l'image) et du type de voisinage choisi.

Dans les algorithmes qui suivent, nous avons choisi de ne pas traiter les points de bord, car la plupart du temps, nous travaillons sur des images de grande taille et perdre un point de chaque côté de l'image ne semble pas critique pour la finalité de nos algorithmes. Ainsi, définir des cas particuliers pour traiter les points de bord aurait inutilement allongé les temps de calcul pour un apport minime aux résultats. De plus, bien que nous prenions en considération les bords de l'image lors de la segmentation morphologique par cylindres, les points de bord ne sont pas toujours bien imagés, comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent. Ils apportent donc une information moins significative que les autres points de l'image. Enfin, nous pouvons nous permettre d'ignorer les points de bord car nous ne faisons que peu d'itérations de l'algorithme de labellisation des points (cf. *sections 4.3* et *4.4*).

4.2 Classification topologique des voxels

La classification topologique de voxels est une transformation locale qui assigne à chaque point de l'objet dans une image binaire une valeur correspondant à sa classe. Cette classe est déterminée par la configuration topologique locale de l'objet et du fond.

L'étude de la connexité du voisinage d'un pixel dans une image binaire est un thème de recherche ancien, au moins en deux dimensions. Rutovitz [63], Hilditch [33] et Yokoi [76] ont proposé les premières mesures visant à caractériser topologiquement le voisinage d'un point.

A trois dimensions, nos recherches concernant les méthodes de classification des points d'un objet se sont avérées vaines, hormis la technique que nous présentons ci-dessous.

Cette méthode a été mise au point par Malandain et al. dans [44] en 1993. Elle est basée sur l'étude de la connexité de l'objet et la connexité du fond dans un voisinage défini autour de chaque point, et permet de qualifier chaque voxel de l'objet individuellement.

Soit X L'ensemble des points de l'objet d'une image binaire, x un point de cet objet et $V(x)$ le voisinage de ce point. On désigne par $V^*(x) = V(x) \setminus x$ le voisinage de x privé du centre (ie. de x).

Les deux nombres C^* et \bar{C} décrivant la topologie du voisinage de chaque voxel sont définis de la manière suivante :

- C^* représente le nombre de composantes 26-connexes de $X \cap V^*(x)$, 26-adjacentes au point central x ,
- \bar{C} donne le nombre de composantes 6-connexes de $\bar{X} \cap V(x)$, 6-adjacentes à x .

L'objet a une connexité 26 et le fond une connexité 6. Cela signifie que la préférence est donnée aux points de l'objet sur les points du fond en ce qui concerne la classification.

Choix du voisinage

La valeur de C^* et \bar{C} dépend du voisinage V utilisé pour les calculer. La taille et la forme du voisinage influent sur la détermination de la topologie locale du point de l'objet que nous considérons. Dans un cas idéal, il conviendrait d'utiliser le plus petit voisinage possible afin d'avoir une connaissance plus fine de la topologie locale. Cependant, en géométrie discrète, le choix des voisinages est assez restreint. Pour calculer C^* , il est nécessaire de pouvoir mesurer la 26-connexité des composantes de l'objet et le plus petit voisinage qui permet ce calcul est le voisinage N_{26} . C'est donc ce dernier qui a été retenu.

D'après Malandain et al., pour le calcul de C^* et \bar{C} , les points des voisinages V et V^* doivent former une seule composante connexe. Ainsi, pour obtenir \bar{C} on ne peut donc pas compter le nombre de composantes 6-connexes dans un voisinage N_6 . En effet, dans ce cas, V^* n'est pas connecté. Pour le calcul de \bar{C} , sous la contrainte de taille qui doit être la plus petite possible, il reste donc les voisinages N_{18} et N_{26} . Idéalement, le voisinage N_{18} serait préférable au voisinage N_{26} car il est plus petit et que les coins de N_{26} n'apportent pas d'informations supplémentaires. Contrairement à Malandain et al., nous avons cependant choisi ce dernier pour sa facilité d'implémentation.

4.2.1 Résultat de la classification

Cette méthode ordonne les voxels de l'objet en 8 classes (9, dont 2 doublées) qui sont résumées dans le *tableau 4.1*. On remarque que grâce à cette classification, il est possible de caractériser des structures filaires, planaires ou volumiques dans des images 3D.

La *figure 4.6* montre un exemple de calcul de C^* et \bar{C} pour un point de jonction de surfaces. Les composantes connexes sont repérées par des couleurs autres que le rouge (point central) dans les vues éclatées du volume.

Type A	point intérieur	$\bar{C} = 0$	
Type B	point isolé		$C^* = 0$
Type C	point de bordure	$\bar{C} = 1,$	$C^* = 1$
Type D	point de courbe	$\bar{C} = 1,$	$C^* = 2$
Type E	point de jonction de courbes	$\bar{C} = 1,$	$C^* > 2$
Type F	point de surface	$\bar{C} = 2,$	$C^* = 1$
Type G	point de jonction surface-courbe	$\bar{C} = 2,$	$C^* \geq 2$
Type H	point de jonction de surfaces	$\bar{C} > 2,$	$C^* = 1$
Type I	point de jonction surface-courbe	$\bar{C} > 2,$	$C^* \geq 2$

TAB. 4.1 – Classes de points en fonction des valeurs de C^* et \bar{C}

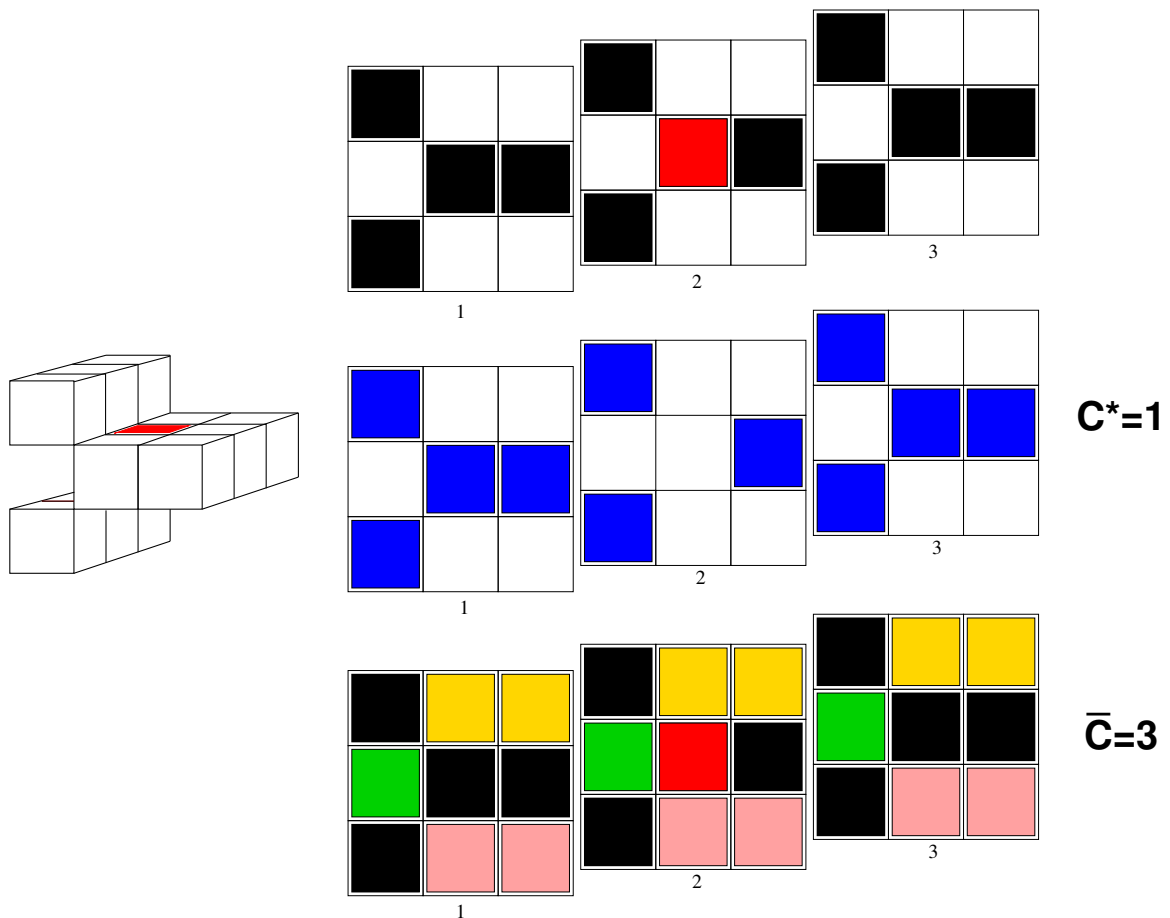


FIG. 4.6 – Exemple de classification du point de jonction de surfaces, en rouge sur la vue 3D et sur la décomposition en sections 2D du haut. $C^* = 1$, comme le montre la décomposition centrale, et $\bar{C} = 3$ (décomposition du bas)

Nous avons utilisé cette méthode de classification dans deux contextes de traitement d'images sismiques que nous présentons pas la suite : l'amincissement et la séparation des surfaces sismiques.

4.3 Amincissement hiérarchique de surfaces sismiques

Comme nous l'avons vu dans le *chapitre 3*, les surfaces extraites par segmentation morphologique ont localement une épaisseur supérieure à 1. Cela est problématique pour plusieurs raisons. Tout d'abord, par définition, un horizon sismique est un événement d'épaisseur égale à un qui doit donc être modélisé par au plus un point par trace. De plus, pour des raisons de représentation, la plupart des outils d'interprétation sismique ne fonctionnent pas correctement si la surface n'est pas fine. En outre, une surface épaisse fausse les résultats des calculs et des traitements effectués sur les données extraites le long des surfaces. Enfin, le fait d'avoir une surface fine permet d'améliorer les performances des algorithmes postérieurs à la phase de segmentation.

Il apparaît donc nécessaire d'amincir les surfaces extraites tout en veillant cependant à ne pas dégrader la qualité de ces surfaces. Pour cela, il faut conserver au maximum leur topologie, c'est à dire ne pas créer de trous, et ne pas trop éroder les surfaces latéralement afin de ne pas réduire leur aire de façon importante.

4.3.1 État de l'art

Plusieurs techniques existent pour amincir des surfaces. Parmi celles-ci, on trouve celle de Svensson et al. [64], qui s'applique plus particulièrement aux objets de type quasi-surfaces, c'est à dire aux surfaces dont l'épaisseur est légèrement supérieure à un. Cette méthode met en place une classification de voxels analogue à celle de Malandain et al., mais utilise des éléments structurants non isotropes pour résoudre les cas problématiques décrits dans [44]. Ces éléments structurants apportent des nouvelles conditions permettant de préciser la nature de chaque voxel, et donc de pouvoir les classer correctement dans le cas problématique de surfaces d'épaisseur égale à deux. Comme certaines parties de nos surfaces ont une épaisseur supérieure à deux, nous avons abandonné cette solution.

L'approche de K. Palágyi, présentée dans [56], permettant d'extraire les surfaces médianes d'objets 3D pourrait résoudre notre problème. Cependant, la contrainte de conservation des points de plus forte amplitude nous impose de ne pas éliminer les points sur le seul critère géométrique, car nous ne pouvons pas éliminer les points de façon arbitraire. Si deux points ont géométriquement la même chance d'être retirés de l'objet, nous devons conserver le point dont l'amplitude est la plus forte.

Il existe aussi des méthodes d'amincissement en niveaux de gris, telles que celles décrites par Beucher dans [5] en deux dimensions. A trois dimensions, on trouve les travaux concernant la ligne de partage des eaux topologique développée par Couprie et Bertrand dans ([15]). Nous n'avons cependant pas testé cette dernière par manque de temps et parce qu'avec la classification des voxels que nous avons déjà implémentée, nous avons pu développer rapidement l'algorithme d'amincissement des surfaces sismiques. Les méthodes d'amincissement sont souvent basées sur la notion de point simple dont nous donnons une définition dans la section suivante.

4.3.2 Point simple en trois dimensions

Par définition, un point simple est un point d'un objet que l'on peut ôter sans modifier la topologie de cet objet, c'est à dire, en 3D, sans changer le nombre de composantes connexes, ni le nombre de trous, ni le nombre de cavités de l'objet.

Le concept de point simple est l'une des bases fondamentales de l'amincissement d'objets, aussi bien en 2D qu'en 3D. On peut les retirer sans perdre d'information topologique sur l'objet.

Il existe plusieurs définitions plus formelles d'un point simple en 3D. L'une des plus anciennes est celle que D.G. Morgenthaler a donnée dans [51]. Elle est basée sur la comparaison de deux de ces trois paramètres (nombre de composantes connexes, de trous et de cavités) calculés pour l'objet et pour le fond dans un voisinage restreint.

Kong et Rosenfeld proposent dans [38] une autre caractérisation des points simples 3D en se basant sur la caractérisation de Morgenthaler et sur les travaux de Tsao et Fu ([68]).

Enfin, G. Bertrand et G. Malandain proposent dans [44] et [4] une autre définition des points simples basée sur la caractérisation de la topologie locale des objets présentée dans la partie 4.2. Ainsi, un point x d'un objet S est dit simple si et seulement si il vérifie les deux conditions suivantes :

$$C^* = 1 \tag{4.1}$$

et

$$\bar{C} = 1, \tag{4.2}$$

ce qui revient à dire que les points simples sont les points classifiés comme des points de bord dans la classification donnée dans le *tableau 4.1*. C'est cette définition que nous utilisons dans notre algorithme d'amincissement.

4.3.3 Description de la méthode

Pour amincir les surfaces sismiques issues de la segmentation morphologique, nous disposons de l'image originale – ou image d'amplitude –, de l'image compteur issue de la segmentation morphologique par cylindres et d'une image binaire provenant du seuillage de cette dernière et qui contient donc les surfaces à amincir. Nous n'utilisons que l'image d'amplitude et l'image binaire (*figure 4.7*).

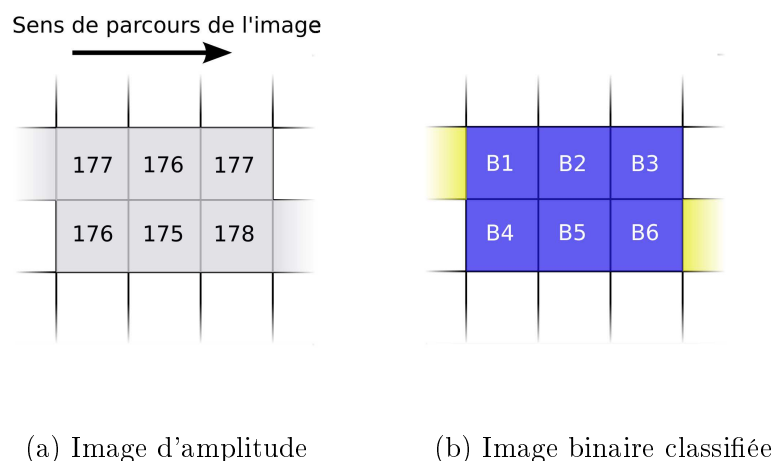


FIG. 4.7 – Amplitude des points d'une portion de surface à amincir (a) et classification de ces derniers (b)

La méthode que nous proposons consiste à éliminer itérativement de l'image binaire les points simples qualifiés selon la méthode de Malandain et al., que nous avons décrite plus haut. Nous commençons par calculer la classe de tous les points de l'objet. Les points sur lesquels va se porter notre attention sont les points simples (c'est à dire les points de bord). Comme nous souhaitons conserver les points qui ont les amplitudes les plus fortes, nous commençons par retirer de l'objet les points simples dont la valeur dans l'image d'amplitude est la plus basse.

Chaque fois que nous retirons un point simple de l'objet, cela modifie la configuration locale. Comme cela implique la modification du voisinage de tous les points de l'objet voisins du point retiré, nous recalculons la classe de chacun de ces derniers. Si l'un des points a changé de classe, nous modifions sa valeur dans l'image de classe. S'il est devenu un point simple, il est traité comme les autres points simples en observant les mêmes règles de priorité sur le niveau de gris des points.

Un point de surface ne change jamais de classe. Ainsi, un point qui devient un point simple ne changera plus de type et appartiendra à la surface finale. Cela évite aux surfaces de s'amenuiser jusqu'à devenir un squelette. Les autres points pouvant toujours changer de type à loisir.

L'algorithme d'amincissement, décrit en pseudo-code par l'*algorithme 1*, utilise une file d'attente hiérarchique (FAH) pour gérer les priorités de traitement des points simples. Chaque file d'attente (FA) de la FAH correspond à un niveau de gris de l'image originale. Nous travaillons sur des images d'amplitude codées sur 8 bits ; il y a donc 256 FA. Nous dépilons en priorité les points des FA les plus basses. Si le point dépilé est toujours un point simple, nous le retirons de l'image binaire des horizons puis nous vérifions que le type des points voisins n'a pas changé et nous les modifions si besoin est sauf dans le cas des points de surface. Nous itérons jusqu'à ce que la FAH soit vide

L'algorithme de segmentation est illustré sur un cas simple par les *figures 4.8, 4.9 et 4.10*.

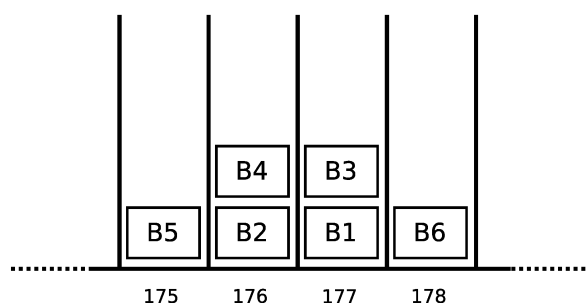
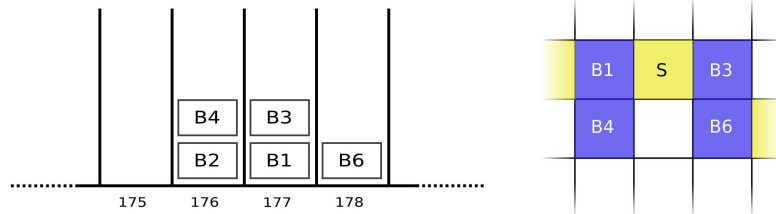
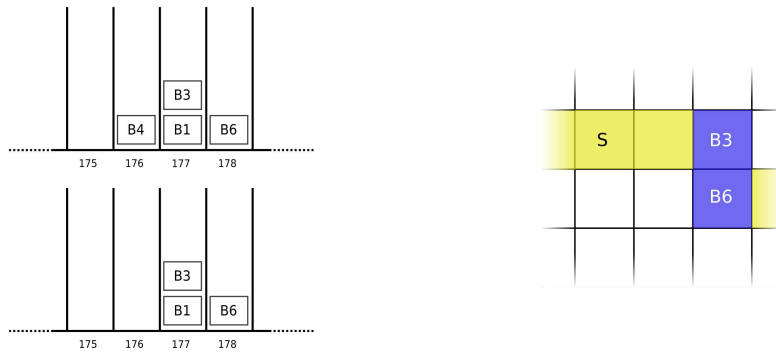


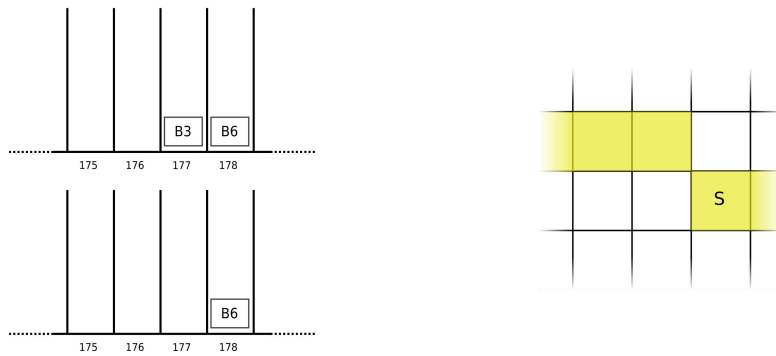
FIG. 4.8 – File d'attente hiérarchique remplie avec les points de bord (ou point simples) de la *figure 4.7*



(a) Étape d'amincissement n°1



(b) Étape d'amincissement n°2



(c) Étapes d'amincissement n°3 et 4

FIG. 4.9 – Processus d'amincissement

Étape d'amincissement n°1 (*figure 4.9 (a)*) : le point B5, qui se trouve dans la file d'attente la plus basse, est dépilé en premier. Comme c'est toujours un point de bord, il est retiré de l'image binaire et tous les points de son voisinage (B1, B2, B3, B4 et B6), appartenant à l'objet, sont reclassifiés. Seul B2 change de classe et devient un point de surface.

Étape d'amincissement n°2 (*figure 4.9 (b)*) : le point B2 est retiré de la file d'attente (FA) 176. Ce n'est plus un point de bord donc il n'est pas retiré de l'image binaire. La configuration topologique de l'ensemble des points ne change pas, donc on ne recalcule pas la classe des points du voisinage de B2. Le point B4 est ensuite retiré de la FA 176. Il est toujours classifié comme un point simple donc on le retire de l'image binaire et on recalcule la classe des points de son voisinage (constitué de B1 et B2). Seul B1 change et devient un point de surface. B2 ne peut pas changer car un point de surface ne peut plus changer de classe.

Étapes d'amincissement n°3 et 4 (*figure 4.9 (c)*) : Les points de la FA 177 sont maintenant dépilés séquentiellement. B1, le premier, n'est plus un point de bord il n'y a donc aucun changement. Lorsque B3 est sorti de la file d'attente, il est retiré de l'image binaire et les points de son voisinage différents des points de surface sont reclassifiés. Il n'y a donc que B6 qui change de classe et passe de point de bord à point de surface. Lorsque B6 est retiré de la FA 178, il n'est donc plus un point de bord. Rien ne change dans la configuration et l'amincissement s'arrête ici car la file d'attente hiérarchique est vide.

Au final, on obtient bien l'amincissement contraint que nous voulions avoir, à savoir des surfaces fines constituées des points de plus forte amplitude (*figure 4.10*).

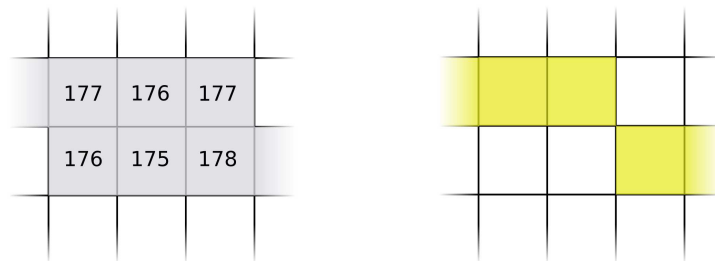


FIG. 4.10 – Résultat de l'amincissement hiérarchique de la surface de la *figure 4.7*

4.3.4 Convergence de l'algorithme

La question de la convergence de l'algorithme est légitime, car il est possible qu'un point soit empilé plusieurs fois dans la file d'attente au cours du processus. En effet, un point peut changer plusieurs fois de type et devenir plusieurs fois un point simple. Comme le montre l'exemple de la *figure 4.11*, un point simple (en bleu sur la *figure 4.11 (a)*) peut très bien devenir un point de courbe si le point jaune – qui est aussi un point simple – est retiré avant lui. Ensuite, si on traite en priorité le point jaune de la *figure 4.11 (b)*, le point bleu devient à nouveau un point simple. Enfin, suivant le scénario, ce point bleu peut soit être retiré (*figure*

Algorithme 1 : Algorithme d'amincissement de surfaces sismiques guidé par les amplitudes

Entrée : ImAmp : image d'amplitudes 8 bits

Entrée : ImSeg : image binaire issue du seuillage de l'accumulateur

Entrée : FAH : file d'attente hiérarchique composée d'une file d'attente (FA) FIFO par niveau de gris possible (soit 256 FA)

Sortie : ImThin : image binaire amincie

Note 1 : Classe() retourne la classe du point selon la classification de Malandain et al.

Note 2 : ImClasse est l'image des classes. La valeur de chaque point indique son type.

début

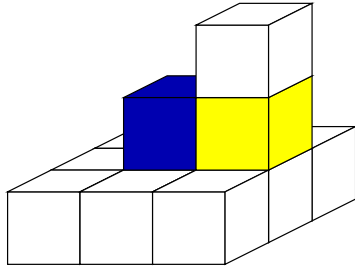
```

Minimum ← 255;
pour chaque point P de ImSeg faire
    ImClass(P) ← Classe(P) ;
    si Classe(P) = PointSimple alors
        NiveauDeGris ← ImAmp(P);
        empiler P dans FAH(NiveauDeGris) ;
        si NiveauDeGris < Minimum alors
            Minimum ← NiveauDeGris ;
        fin
    fin
fin

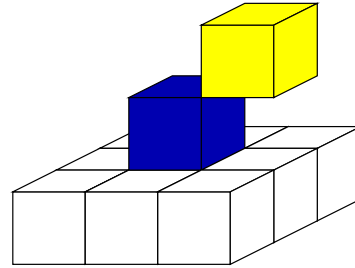
tant que Minimum ≠ 256 faire
    tant que FAH(Minimum) n'est pas vide faire
        dépiler point P ;
        si Classe(P) = PointSimple alors
            ImSeg(P) ← 0 ;
            pour chaque point Q du Voisinage(P) faire
                si ImSeg(Q) = 1 alors
                    si ImClass(Q) ≠ PointDeSurface alors
                        si ImClass(Q) ≠ Classe(Q) alors
                            ImClass(Q) ← Classe(Q) ;
                        si ImClass(Q) = PointSimple alors
                            NiveauDeGris ← ImAmp(Q);
                            empiler Q dans FAH(NiveauDeGris) ;
                            si NiveauDeGris < Minimum alors
                                Minimum ← NiveauDeGris ;
                            fin
                        fin
                    fin
                fin
            fin
        fin
        Minimum ++ ;
    fin
fin

```

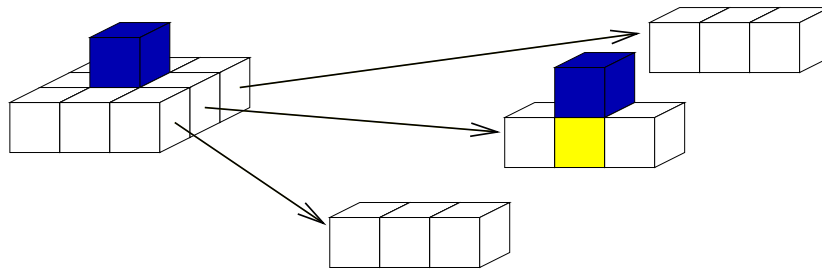
4.11 (d) soit devenir un point de surface (figure 4.11 (e)) selon que l'on retire le point bleu ou le point jaune de la figure 4.11 (c). Dans ce dernier cas, le point a changé trois fois de type.



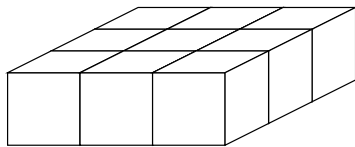
(a) Un point simple, en bleu, devient un point de courbe si on retire le point simple jaune



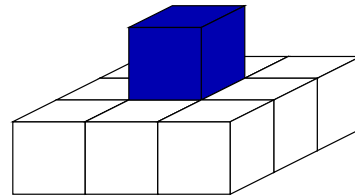
(b) Le même point redevient un point simple si on retire le point simple jaune



(c) il y a maintenant deux possibilités...



(d) ... soit le point bleu est éliminé



(e) ... soit il est conservé et devient alors un point de surface lorsqu'on retire le point jaune de la figure (c)

FIG. 4.11 – Multiples changements de type d'un point

On peut alors se demander s'il ne serait pas possible qu'un point change de type de manière cyclique et que l'algorithme boucle et ne termine jamais. Si on considère l'image de classes que nous avons au début de l'algorithme d'amincissement, on peut distinguer quatre classes de points :

- les points de fond,
- les points de surface,
- les points simples,
- les points « autres ».

Parmi tous ces points, les points de fond ne sont pas traités par l'algorithme et les points de surface sont invariants. Considérons maintenant l'ensemble des points simples et des points « autres ». Cet ensemble décroît forcément puisque lorsqu'on retire un point de la FAH, soit ce n'est plus un point simple, auquel cas rien ne se passe, soit c'est toujours un point simple et on le retire de l'image à amincir, ce qui diminue le nombre global de l'ensemble de points simples et de points « autres ». La somme des points de cet ensemble converge donc vers une valeur finie. L'algorithme s'arrêtera lorsque la file d'attente sera vide.

Temps d'amincissement des surfaces sismiques

Le temps d'exécution de l'algorithme d'amincissement dépend de plusieurs facteurs dont :

- Le nombre de points à traiter,
- La configuration des structures : plus il y a des zones épaisses dans les structure et plus le nombre de points simples que l'algorithme aura à traiter sera important
- Le nombre de fois qu'un point peut devenir un point simple, comme nous l'avons vu ci-dessus.

Les temps d'amincissement des surfaces sismiques sont, en général, assez longs. Nous avons, pour les réduire un peu, utilisé une technique d'indexation de configurations de voisinages de points analogue à celle décrite dans [18]. A partir de chacune des configurations du voisinage du point central, nous générons une clef qui nous permet de connaître le type – donc la valeur – du point central très rapidement. Là encore, nous n'avons pas réalisé les optimisations proposées par Halle et Hu dans [28] qui prennent en compte le fait que de nombreuses configurations se ressemblent à une rotation près et qui modélisent ce phénomène par des tableaux hiérarchiques. Les outils informatiques que nous avons actuellement sont suffisamment puissants pour nous permettre de nous en passer. Avec cette amélioration, nous avons réduit le temps d'exécution d'un facteur six.

Le temps d'amincissement des surfaces sismiques reste cependant assez important. Par exemple, l'amincissement des surfaces de la *figure 3.19* prend un peu moins de douze heures.

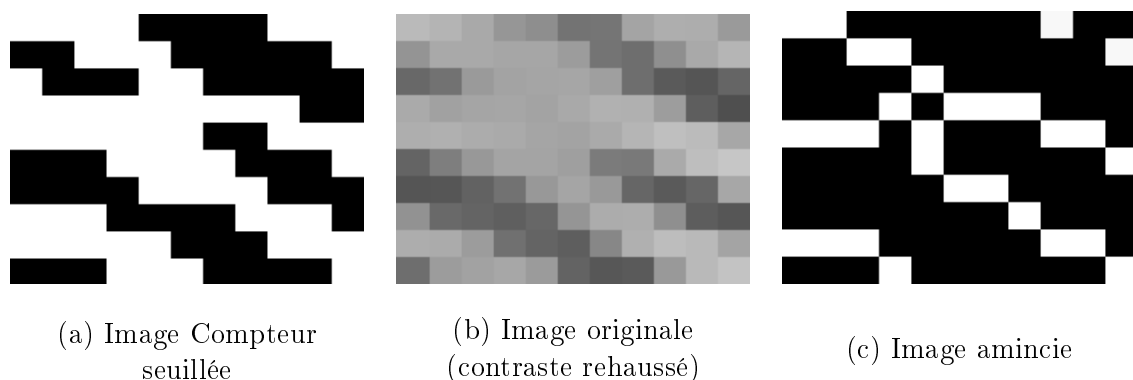


FIG. 4.12 – Exemple de résultat d'amincissement (section i)

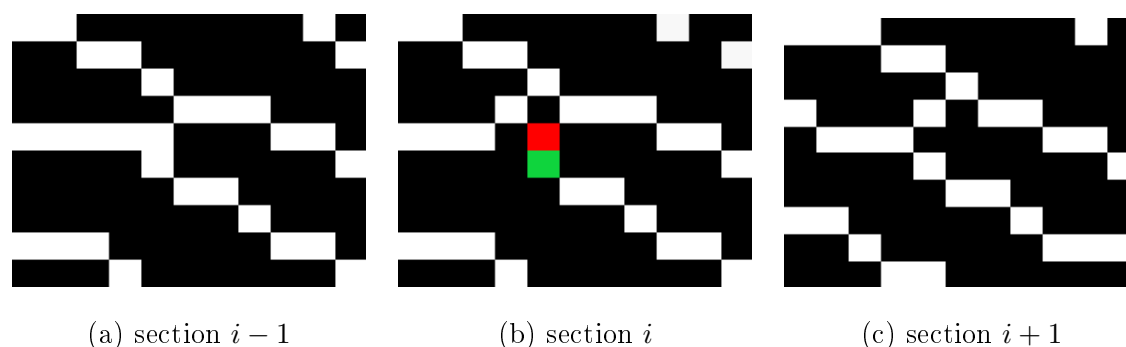


FIG. 4.13 – Sections successives de l’image amincie permettant de vérifier la classe des points superposés de la *figure 4.12 (c)*. Le point rouge de la section i est un point de jonction de surfaces ($C^* = 1$ et $\bar{C} = 3$). Le point vert est un point de surface ($C^* = 1$ et $\bar{C} = 2$)

Illustration par un exemple réel

La *figure 4.12* montre les résultats que nous obtenons pour l’amincissement d’une structure réelle. Les deux points superposés (en rouge et vert sur la *figure 4.13 (b)*) ne sont pas des points problématiques puisqu’ils sont correctement labellisés en points de jonction de surface et en point de surface, respectivement.

En observant la *figure 4.12 (c)*, on peut se dire qu’une cavité s’est formée entre deux structures lors de l’amincissement et que l’algorithme a modifié la topologie de l’objet. Cependant, si on considère la section précédente illustrée par la *figure 4.13 (a)*, on voit que ce point dans la section i est bien connexe au fond de l’image et n’est donc pas une cavité.

4.3.5 Discussion

Nous avons deux informations provenant de l’image initiale qui vont nous permettre, sinon de mesurer efficacement le résultat de l’algorithme d’amincissement, au moins de pouvoir réaliser une comparaison entre l’image issue du seuillage de l’image accumulateur de la segmentation morphologique qu’on met en entrée et l’image des structures amincies que l’on obtient en sortie ou bien une comparaison entre deux méthodes d’amincissement.

L’épaisseur moyenne des structures

Si nous reprenons l’exemple utilisé dans le *chapitre 3*, nous obtenons une épaisseur moyenne des structures amincies de 1,0073 contre 1,64 pour les structures non amincies. Ce résultat, et son mode de calcul, valident l’hypothèse que nous avons faite au départ, à savoir que les horizons sismiques sont en grande majorité horizontaux.

La différence de niveau d’illumination moyen

Une autre méthode pour mesurer l’impact de l’amincissement sur l’amélioration de l’image segmentée se base sur le critère de hiérarchisation de la méthode d’amincissement, à savoir le niveau de gris des voxels de l’objet. Comme les points qui ont été retirés sont sensés avoir les amplitudes les plus faibles parmi les points de l’objet initial, nous devons logiquement avoir

une augmentation de la valeur moyenne de niveau de gris des voxels dans l'objet final :

$$\overline{NG}_{seg} < \overline{NG}_{amin} \quad (4.3)$$

avec :

- \overline{NG}_{seg} : niveau de gris moyen de l'objet extrait par seuillage de l'image accumulateur,
- \overline{NG}_{amin} : niveau de gris moyen de l'objet après amincissement.

Toujours dans notre exemple, nous avons, $\overline{NG}_{seg} = 163$ et $\overline{NG}_{amin} = 174$. Le niveau de gris moyen de l'objet a donc bien augmenté et l'amincissement semble avoir respecté également cette partie du cahier des charges.

En mesurant \overline{NG}_{amin} sur le résultat de deux algorithmes d'amincissement différents, on peut les comparer. Dans notre cas, le meilleur sera celui qui élève le plus le niveau de gris moyen de l'objet. Comme nous le voyons dans la section suivante, ce critère peut également permettre de mesurer l'impact d'une modification même légère de l'algorithme sur la qualité de l'amincissement.

4.3.6 Améliorations possibles

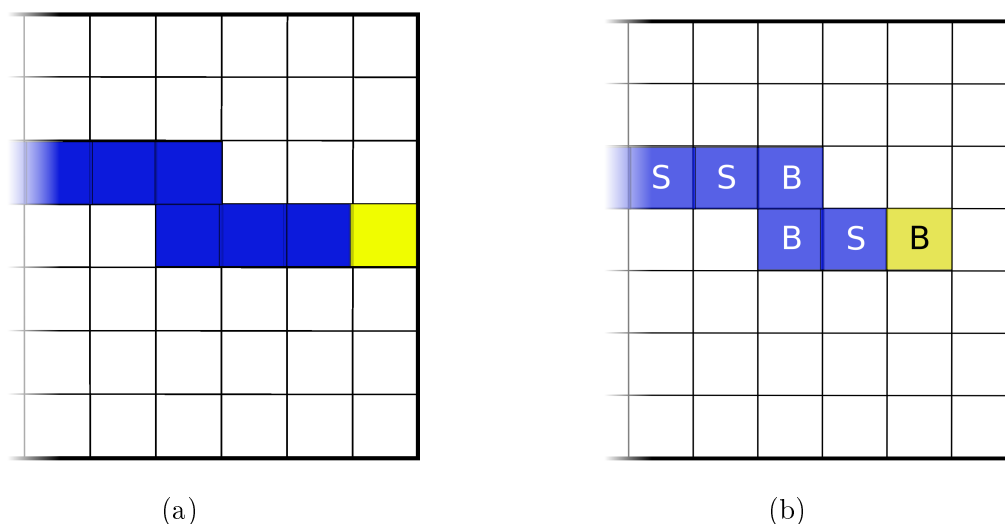
La qualité des résultats est assez visible. Les surfaces obtenues sont bien fines et elles ne comportent plus que les points les plus hauts en amplitude. Il existe cependant un léger inconvénient dû à cet amincissement. En effet, tel qu'il est décrit ici, l'amincissement érode légèrement les surfaces sur leur périphérie. Rien d'alarmant toutefois mais chaque surface peut perdre, durant l'amincissement, jusqu'à deux voxels sur tout le pourtour.

Un premier voxel peut en effet être retiré lors de la phase d'initialisation de la FAH. Les points concernés sont les points de l'objet qui touchent le bord de l'image. Pour ces derniers, le voisinage est mal défini et la classification telle que nous l'avons décrite dans la *section 4.4* ne permet pas de traiter ces points. Il faudrait étudier chacun de manière particulière ce qui complexifierait et ralentirait considérablement l'algorithme. Comme nous l'avons déjà dit, nous avons choisi de ne pas traiter ces points. Ils sont alors simplement éliminés de l'objet (*figure 4.14 (a)*).

On note cependant que les points ainsi éliminés sont quand même utilisés dans le calcul de la classe de leurs voisins. Leur élimination ne fausse donc pas le calcul de la classe des autres points.

Les autres points qui peuvent être retirés lors de la phase d'amincissement sont les points du pourtour de surfaces qui sont déjà fines. Les points sont alors naturellement classés en points de bord, mais pourraient l'être en points de surface. Ils ne seraient ainsi pas retirés aveuglément comme c'est le cas. Pour pallier ce problème d'élimination des points de bords fins, il est possible de réaliser lors de la phase d'initialisation de l'algorithme un test sur chaque point de bord empilé. On regarde les voisins au dessus et au dessous du point considéré, et si ce sont tous les deux des points du fond, le point n'est pas empilé et il est alors classifié comme point de surface. Cette méthode s'inspire de la définition et de la caractérisation des points de surface terminaux introduits par K.Palágyi et A.Kuba dans [57].

Cette méthode permet donc de ne pas perdre les points qui se trouvent sur les bords fins des surfaces, comme le montre la *figure 4.15*. L'un des effets secondaires est que l'on a alors une baisse de l'amplitude moyenne des points de l'objet. Cette baisse n'est pas très importante dans notre exemple (173 contre 174) mais elle peut s'avérer plus importante pour des images de taille supérieure. Elle s'explique en majeure partie par le fait que les points qui se trouvent



(a)
Élimination des voxels qui touchent le bord de l'image

(b)
Élimination des voxels de bord des surfaces minces. B et S désignent respectivement des points de bord et des points de surface

FIG. 4.14 – Problème d'élimination inopinée de voxels sur le bord des surfaces

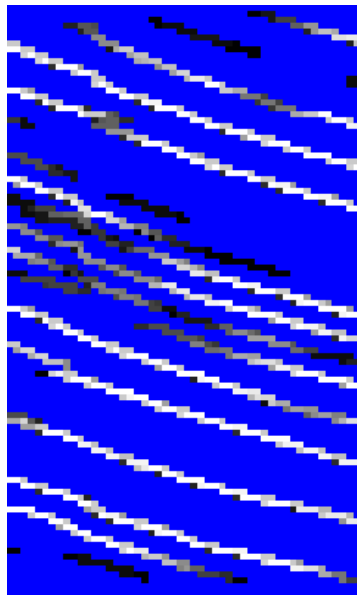
au bord d'une surface sont généralement des points qui délimitent un trou. Or, un trou correspondant à une baisse d'amplitude locale des points de la surface, les points de bord sont la transition entre les points du trou et les points de la surface et ont donc une amplitude moins élevée que les points de la surface. Cela explique la baisse d'amplitude moyenne des points de la surface lorsqu'on prend en compte ces points.

Pour améliorer la rapidité de l'algorithme, nous pourrions nous tourner du côté des algorithmes d'amincissement parallèles ([58], [56], [3]) qui permettent de retirer plusieurs points à la fois sans modifier la topologie de l'objet.

Enfin, il serait également bon de tester les techniques d'amincissement en niveaux de gris ([15]) afin de pouvoir les comparer avec les résultats que nous avons obtenus.

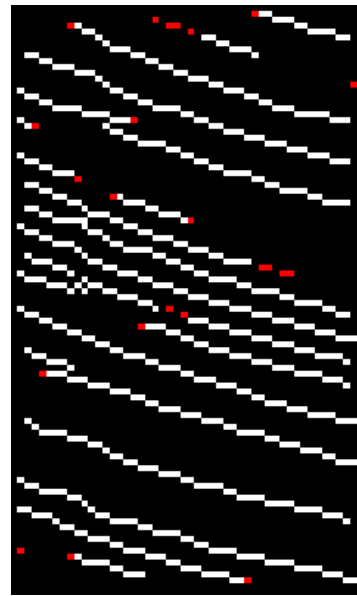
Maintenant que nous avons aminci les surfaces, nous souhaitons les labelliser de manière à pouvoir les distinguer les unes des autres. En effet, comme on peut le voir sur la *figure 4.16*, une simple labellisation de l'image amincie produit seulement deux régions alors qu'on en distingue beaucoup plus.

Séparer les surfaces segmentées a premièrement un sens géologique puisque, comme nous l'avons déjà évoqué dans le *chapitre 2*, les structures que nous cherchons à extraire correspondent à des époques séquentielles de sédimentation. Il apparaît donc anormal que deux couches superposées soient identifiées comme étant de la même époque. De plus, les couches sédimentaires ont des propriétés physiques différentes qui font qu'elles sont décelables par sismique réflexion. Là encore, considérer que deux surfaces superposées peuvent avoir le même label n'a pas de sens, car cela reviendrait à ignorer ces différences.



(a)

Image accumuleur



(b)

Image amincie. Les points rouges sont les points qui ne sont pas ôtés lorsqu'on prend en compte le voisinage vertical des points de bord fin

FIG. 4.15 – Amincissement avec prise en compte des points de bord fin des surfaces

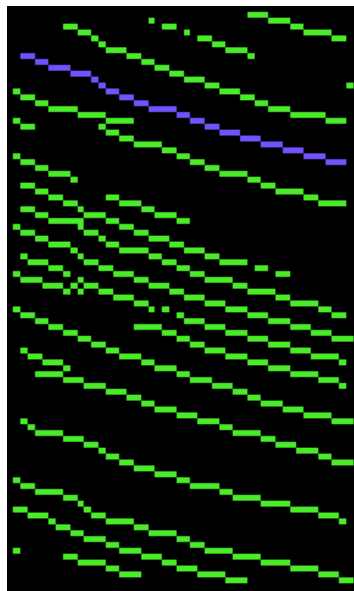


FIG. 4.16 – Résultat d'une labellisation simple des surfaces amincies

Si on se place d'un point de vue utilisateur des résultats de la segmentation, un amas de surfaces n'est pas très utile. En effet, un géophysicien a besoin de pouvoir sélectionner la surface qui l'intéresse pour pouvoir soit réaliser des calculs le long de cette surface soit l'intégrer dans un outils lui permettant d'affiner le traitement des données sismiques comme, par exemple, dans la détermination du modèle de vitesse pour l'étape de migration (*chapitre 2*).

Toutes ces raisons motivent la recherche d'une solution pour séparer les surfaces afin de pouvoir les discriminer.

4.4 Segmentation topologique de surfaces sismiques

Nous souhaitons maintenant séparer les surfaces sismiques que nous avons extraites par segmentation morphologique. Nous avons vu ci-dessus qu'une simple labellisation ne donnait pas le résultat escompté, car de nombreuses surfaces sont en contact. Nous utilisons ici une méthode topologique permettant de détecter les liens entre les surfaces et de les éliminer afin de pouvoir séparer les structures les unes des autres.

4.4.1 De la classification à la segmentation

L'algorithme d'amincissement produit une image binaire comportant des structures fines ainsi qu'une image contenant la classe des points de l'image binaire.

Pour séparer les surfaces qui sont encore connectées, nous sommes partis du principe que les liens entre ces surfaces ne comportent pas de points de surface. Nous avons donc purement et simplement éliminé les points autres que les points de surface. Ainsi tous les points qui n'appartiennent pas à cette dernière catégorie deviennent des points du fond.

Nous obtenons ainsi une image binaire avec un objet composé uniquement des points de surface. Une labellisation simple de cette image permet d'obtenir une segmentation topologique naïve des surfaces sismiques.

Dans la *figure 4.17*, la plupart des surfaces se trouvent séparées les unes des autres sauf quelques exceptions pour lesquelles deux surfaces superposées peuvent avoir le même label sans raison apparente.

Nous avons enlevé tous les points autres que les points de surface donc le lien entre ces surfaces labellisées avec le même label provient d'un autre problème.

4.4.2 Les limites de la classification

En effet, la méthode de classification des voxels a ses limites ce qui peut induire des effets étranges dans les résultats des travaux que l'on peut effectuer à la suite de cette étape. Ainsi, certains points que l'on qualifierait intuitivement de points de jonction de surfaces peuvent être classés en points de surface, comme le montre la *figure 4.18*.

De plus, la *figure 4.19* présente un cas problématique induisant la classification d'un point que l'on classerait assez naïvement en tant que point de jonction de surfaces, mais qui se retrouve au final dans la classe des points intérieurs. En effet, n'oublions pas que les composantes connexes du fond et le point central doivent être 6-connexes.

Ce comportement est gênant pour certaines applications. Par exemple, dans le cas de la segmentation de surfaces, après l'étape de classification des points, on ne retient que les points

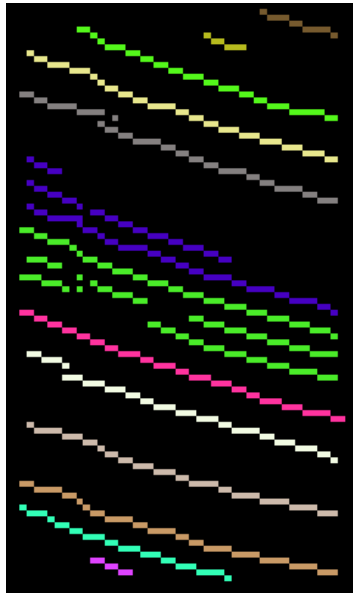
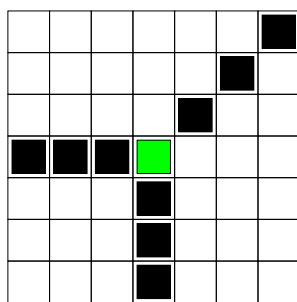
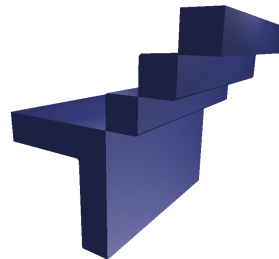


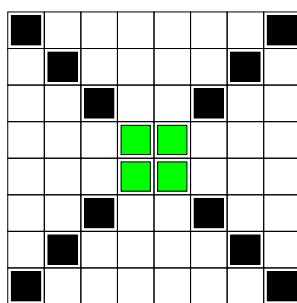
FIG. 4.17 – Résultat d'une segmentation topologique naïve des surfaces amincies



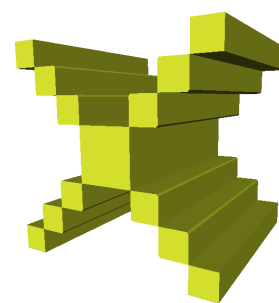
(a)



(b)



(c)



(d)

FIG. 4.18 – (a) et (c) sont respectivement des sections de (b) et (d). Les voxels verts sont classés en points de surface, au lieu de points de jonction de surfaces

de surface pour les labelliser en connexité 26. Une mauvaise classification, comme celles illustrées par les *figures 4.18* et *4.19*, empêche une séparation correcte.

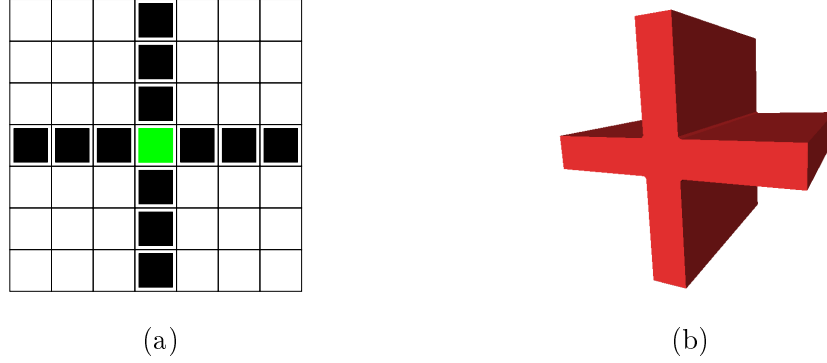


FIG. 4.19 – (a) est une section de (b). Le point vert est classé en point intérieur

Pour résoudre ces problèmes, Malandain et al. ont proposé également dans [44] une solution basée sur une relation d'équivalence. Cette solution prend en compte outre le voisinage local des points de l'objet, le voisinage des points de l'objet voisins du point courant. C'est à dire que la classification n'est plus basée uniquement sur la seule topologie du point étudié, mais prend en compte des informations issues de la topologie des points voisins.

Ainsi, pour valider la bonne classification d'un point de surface, on étudie le nombre de composantes connexes du fond que deux points de surface voisins ont en commun. Si les deux composantes connexes du fond ($\bar{C} = 2$) des deux points de surface considérés ont un point en commun deux à deux, alors ces deux points de surface appartiennent à la même classe d'équivalence. Sinon, il sont de deux classes d'équivalence différentes donc n'appartiennent pas à la même surface. Les classes d'équivalence ainsi obtenues correspondent à la labellisation des surfaces

De manière plus formelle, pour tout point x de l'objet X labellisé comme point de surface (Type F), on appelle B_x et C_x les deux composantes connexes de $\bar{X} \cap N_{26}^*(x)$ 6-adjacentes à x .

Deux points de surface x et y de l'objet X sont dits en relation si il existe un 26-chemin $x_0, x_1, \dots, x_i, \dots, x_n$ de points de surface inclus dans X , avec $x_0 = x$ et $x_n = y$, tel que :

$$\forall i \in [0, \dots, n-1]$$

$$B_{x_i} \cap B_{x_{i+1}} \neq 0 \text{ et } C_{x_i} \cap C_{x_{i+1}} \neq 0$$

$$\text{ou } B_{x_i} \cap C_{x_{i+1}} \neq 0 \text{ et } C_{x_i} \cap B_{x_{i+1}} \neq 0.$$

Cette relation est bien une relation d'équivalence, car elle est réflexive, symétrique et transitive. La *figure 4.20* donne un exemple de labellisation des points de surface problématiques de la *figure 4.18(c)* dans des classes d'équivalence différentes. La *figure 4.21* présente les résultats obtenus après le calcul des classes d'équivalence pour les cas problématiques des *figures 4.18 ((c) et (d))* et *4.19*

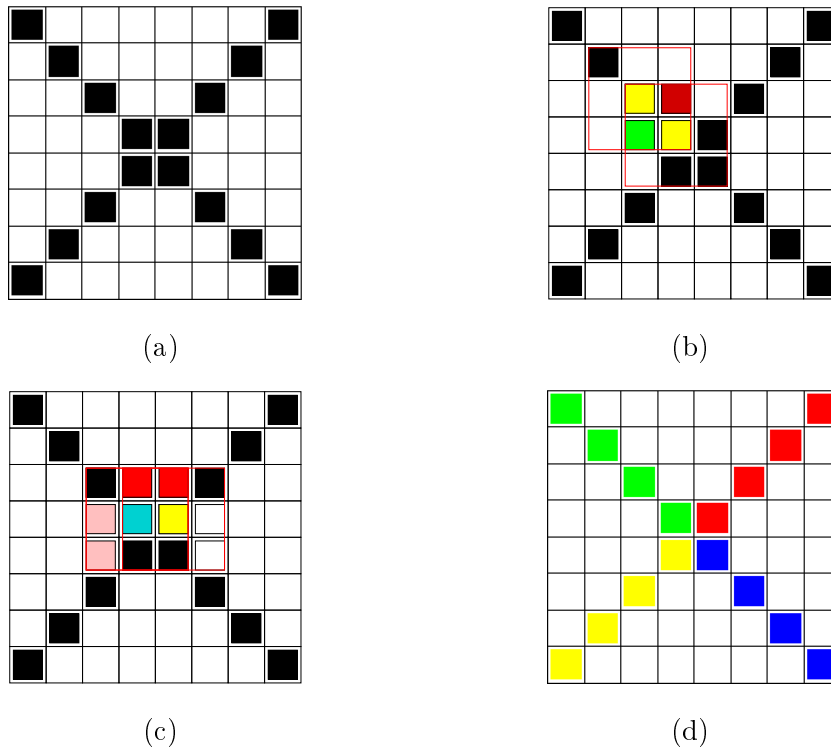


FIG. 4.20 – Illustration du fonctionnement de la relation d'équivalence pour la labellisation des points de surface. La *figure (b)* présente deux points appartenant à une même classe d'équivalence (en jaune) car les intersections de leurs composantes connexes de fond ne sont pas vides deux à deux. La *figure (c)* montre deux points qui n'appartiennent pas à la même classe d'équivalence. Il n'ont en effet qu'une seule composante connexe de fond en commun. La *figure (d)* donne le résultat de la labellisation avec prise en compte de la relation d'équivalence existant entre les points.

Le résultat de la segmentation topologique avec résolution des erreurs de classification des points de surface est illustré par la *figure 4.22*. On remarque qu'un plus grand nombre de surfaces sont séparées mais qu'il reste encore des surfaces en contact. Dans la *section 4.5*, nous expliquons pourquoi et décrivons une solution à ce problème.

4.4.3 Est-il nécessaire de contrôler la 6-adjacence des composantes connexes du fond avec le point central ?

Nous avons vu, dans les paragraphes précédents, que le calcul de \bar{C} nécessite de vérifier que les composantes connexes du fond sont bien adjacentes au sens de la 6-connexité au point central (appartenant à l'objet). Cependant, que se passe-t-il si on ne vérifie pas cette condition ? Nous sommes partis de la constatation empirique que, si nous ne vérifions pas cette condition, les problèmes des *figures 4.18 (a) et (b)* et 4.19 (a) et (b) disparaissent et les points problématiques sont alors bien classés comme points de jonction de surface. Nous nous sommes alors interrogés sur la condition de 6-adjacence dans notre contexte d'étude.

Si on se place dans l'espace euclidien \mathbb{R}^3 , \bar{C} est défini comme étant le nombre de compo-

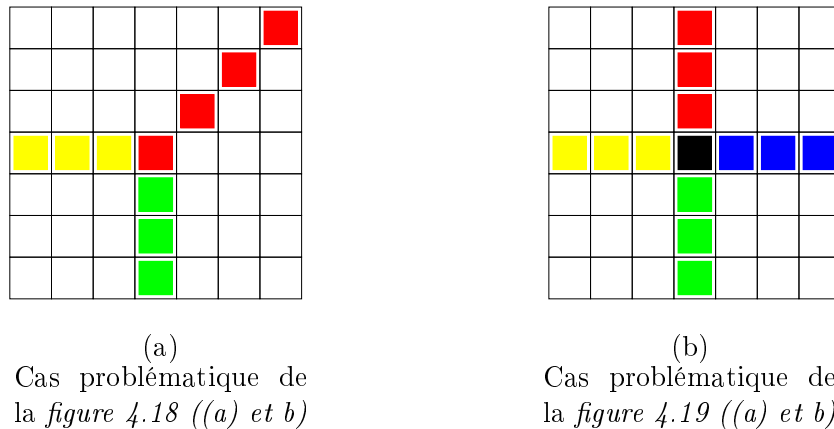


FIG. 4.21 – Résultats du calcul des classes d'équivalence pour les cas problématiques des figures 4.18 ((a) et (b)) et 4.19. Le point central sur la figure (b), en noir, n'appartient à aucune classe d'équivalence puisqu'il n'était pas classifié au départ comme un point de surface

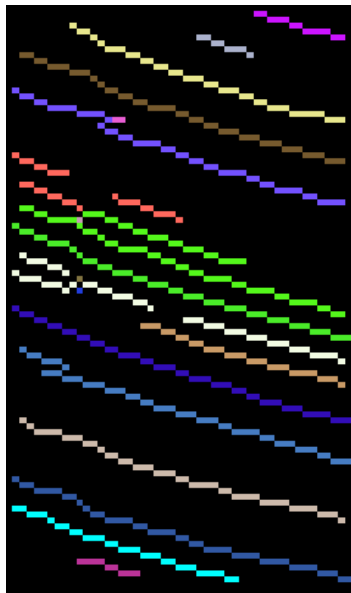
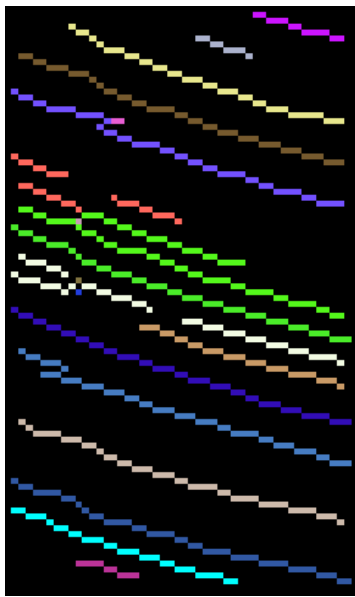


FIG. 4.22 – Résultat d'une segmentation topologique des surfaces amincies avec résolution des erreurs de classification

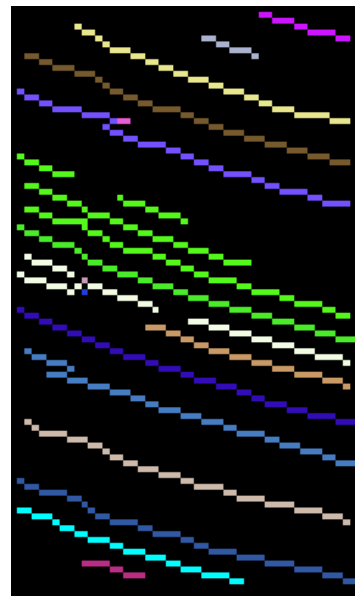
santes connexes du fond dans un voisinage arbitraire du point considéré. Par exemple, si on prend le cas d'un point de bord, on remarque que l'intersection entre un voisinage quelconque du point de l'objet étudié et son complémentaire doit comporter une seule région, quel que soit le voisinage. Il doit en être de même si on se place dans \mathbb{Z}^3 . Si on s'arrête à cette constatation, il n'est alors pas nécessaire de vérifier la 6-adjacence des composantes connexes du fond et du point central. Cependant, il faut considérer que, dans un espace discret, l'adjacence est définie différemment pour l'objet et le fond. Nous cherchons alors à établir une relation entre des points qui appartiennent aux deux classes de l'image (l'objet et le fond). Quelle adjacence

choisir alors ? Si on considère que c'est les composantes connexes du fond qui doivent être adjacentes au point central, il faut considérer la 6-adjacence. Dans le cas où on considère que les composantes connexes du fond doivent se trouver dans le voisinage du point central qui est un point de l'objet, il faut considérer la 26-adjacence qui est déjà vérifiée puisqu'on calcule \tilde{C} dans un voisinage 26.

Sur un plan purement expérimental, nous avons comparé les résultats donnés par les labellisations avec et sans considération de la 6-adjacence des composantes connexes du fond et du point central. La *figure 4.23* montre les différences que nous obtenons. On remarque qu'il y en a très peu, et que celles-ci se trouvent dans des zones assez problématiques. Dans le contexte de nos recherches, il n'apparaît alors pas essentiel de vérifier la condition d'adjacence des composantes connexes du fond.



(a)
Avec vérification de la 6-adjacence des
composantes connexes du fond



(b)
Sans vérification de la 6-adjacence des
composantes connexes du fond

FIG. 4.23 – Comparaison de deux modes de labellisation

Mais si ce n'est qu'une constatation pratique, pourquoi se passer de la validation de cette condition ? Dans un souci d'amélioration de l'algorithme, nous avons cherché le moyen de réduire le temps de calcul. Ne pas valider la condition d'adjacence nous permet de réaliser un gain de temps de l'ordre de 15% ce qui n'est pas négligeable lorsque le nombre de points est important. L'étape de labellisation n'étant pas une étape critique en ce qui concerne le temps de traitement, nous avons conservé la labellisation vérifiant la condition de 6-adjacence.

4.5 Séparation des structures multi-couches restantes

Les structures multi-couches sont composées de plusieurs surfaces superposées qui ont toutes le même label.

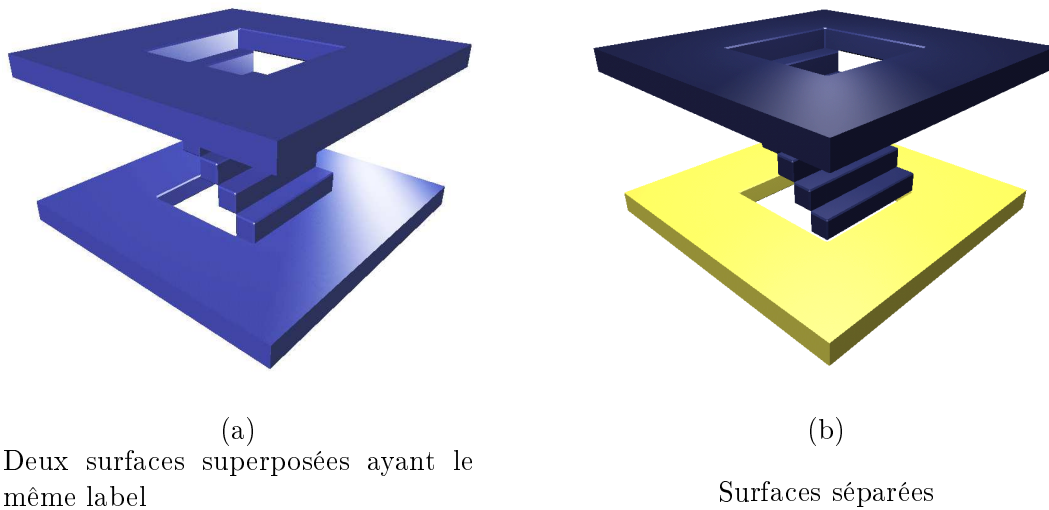


FIG. 4.24 – Exemple de séparation de structures composées de plusieurs surfaces superposées ayant le même label

La *figure 4.24(a)* montre qu'il existe des configurations d'agencement des surfaces qui peuvent engendrer des liens entre deux structures superposées avec uniquement des points de bord et des points de surface. La configuration de l'exemple est induite par la segmentation morphologique par cylindres : un ou plusieurs cylindres ont créé une portion de surface reliant deux surfaces superposées.

Pour que la surface liante soit éliminée lors de la segmentation topologique, il faut qu'elle fasse deux voxels de largeur ou moins. En effet, dans ce cas seulement elle ne comprend alors pas de points de surface. Dans le cas où elle fait trois voxels de largeur ou plus, les points situés au milieu sont des points de surface et ne seront donc pas éliminés lors de l'étape de segmentation topologique. La surface relie alors effectivement deux surfaces superposées. Au final, les deux structures ont le même label. Cependant, comme nous l'avons déjà évoqué, les sédiments qui ont formé les couches géologiques se sont déposés séquentiellement et deux couches successives dans le sens vertical ne proviennent pas de la même époque de déposition. Il serait donc logique qu'elles n'aient pas le même label.

La solution que nous avons alors envisagée pour séparer les dernières surfaces repose sur cette contrainte que deux points d'une même trace ne peuvent pas avoir le même label.

L'algorithme que nous avons utilisé pour séparer les multi-couches restantes est décrit en pseudo-code dans l'*algorithme 2*. Nous traitons une à une chaque surface correspondant à un label de l'image issue de la segmentation topologique. Nous vérifions que deux points de la surface n'ont pas les mêmes coordonnées inline et crossline à l'aide d'une image 2D ayant pour dimensions les dimensions inline et crossline du cube traité. Si deux points ont les mêmes coordonnées, le premier est assimilé à la surface résultante et les autres sont traités par la suite soit par un algorithme de labellisation simple soit par une seconde itération de l'algorithme de séparation des multi-couches couplé à un algorithme de labellisation simple. Nous obtenons ainsi des surfaces ayant un seul point sur une même verticale.

Algorithme 2 : Algorithme de séparation des structures multi-couches

Entrée : ImSeg : image issue de la segmentation topologique comportant des structures multicouches

Entrée : Im2D : image 2D dont les dimensions sont égales aux dimensions inline et crossline de ImSeg

Entrée : FA : file d'attente

Sortie : ImLabel : image de labels

Note : ALabeliser désigne la classe de points qui seront labellisés par une labellisation simple à la fin de l'algorithme de séparation

début

```

pour chaque point P de ImSeg faire
  si ImSeg(P)  $\neq$  0 alors
    si ImPointsTraites(P) = 0 alors
      empiler P dans FA ;
      LabelCourant  $\leftarrow$  ImSeg(P);
      Im2D  $\leftarrow$  0;
      tant que FA n'est pas vide faire
        défiler point R ;
        si ImPointsTraites(R)= 0 alors
          si Im2D(Rx,Ry)= 0 alors
            Im2D(Rx,Ry) $\leftarrow$  1;
            ImLabel(R) $\leftarrow$  LabelCourant ;
            ImPointsTraites(R) $\leftarrow$  1;
            pour chaque point Q du Voisinage(R) faire
              si ImSeg(Q)= LabelCourant alors
                empiler Q dans FA ;
              fin
            fin
          fin
        sinon
          ImLabel(R) $\leftarrow$  ALabeliser ;
          ImPointsTraites(R) $\leftarrow$  1;
        fin
      fin
    fin
  fin
fin

```

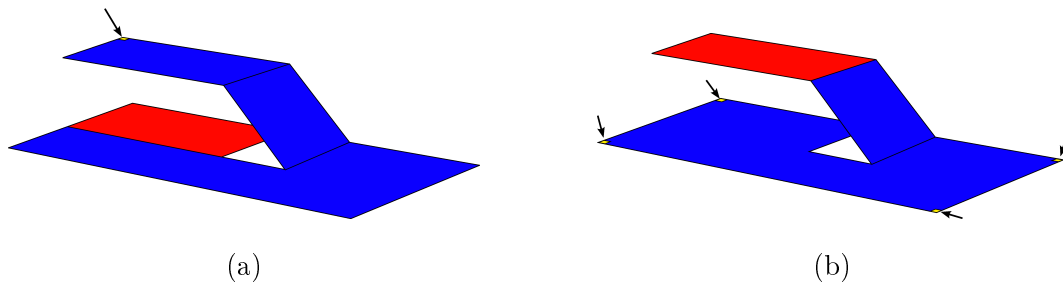


FIG. 4.25 – Exemple de problème engendré par la séparation des structures multi-couches restantes : selon le sens de parcours de l'image et le point d'attaque de la surface (en jaune (flèches)), on peut obtenir deux segmentations différentes

Dans un contexte géologique, cette solution n'est qu'à moitié satisfaisante. Par exemple, la *figure 4.25* présente le cas assez simple de deux structures superposées. Suivant le point d'attaque de la surface, nous obtenons soit le résultat de la *figure (a)* soit celui de la *figure (b)*. Intuitivement, nous aurions tendance à préférer la segmentation de la *figure (b)* alors que, suivant la géologie, le géophysicien interprète peut préférer la segmentation de la *figure (a)* si il juge qu'elle correspond mieux à la réalité. Dans ce cas, il serait sans doute préférable de produire une segmentation comme celle illustrée par la *figure 4.26* afin de laisser le choix au géophysicien interprète de connecter les surfaces qui correspondent le mieux à la géologie.

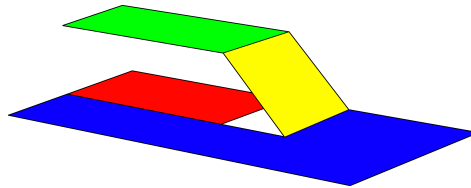


FIG. 4.26 – Exemple de segmentation qu'il faudrait fournir au géophysicien interprète afin qu'il associe les portions de surface qui lui semblent se correspondre le mieux

Le calcul d'attributs présenté dans le *chapitre 5* devrait permettre de résoudre ce problème. La solution que nous avons présentée dans cette section apporte cependant une réponse au problème de la séparation des surfaces encore connectées après la segmentation topologique. Des illustrations sont données dans la section suivante.

4.6 Résultats

Jusqu'ici, nous n'avons présenté que des sections de cubes sismiques afin d'illustrer le plus clairement possible les concepts présentés. Nous travaillons cependant en trois dimensions et les illustrations suivantes donnent un aperçu des résultats que nous obtenons.

L'image qui nous sert à illustrer les résultats 3D des techniques présentées dans ce chapitre est la même que celle que nous avons utilisée pour illustrer les résultats sur la segmentation hiérarchique par bandes du *chapitre 3* (*figure 4.27*).

La qualité des amincissements n'est pas visible sur la représentation 3D, c'est pourquoi nous avons préféré ne pas illustrer cette étape de calcul dans cette section. Deux vues du résultat de

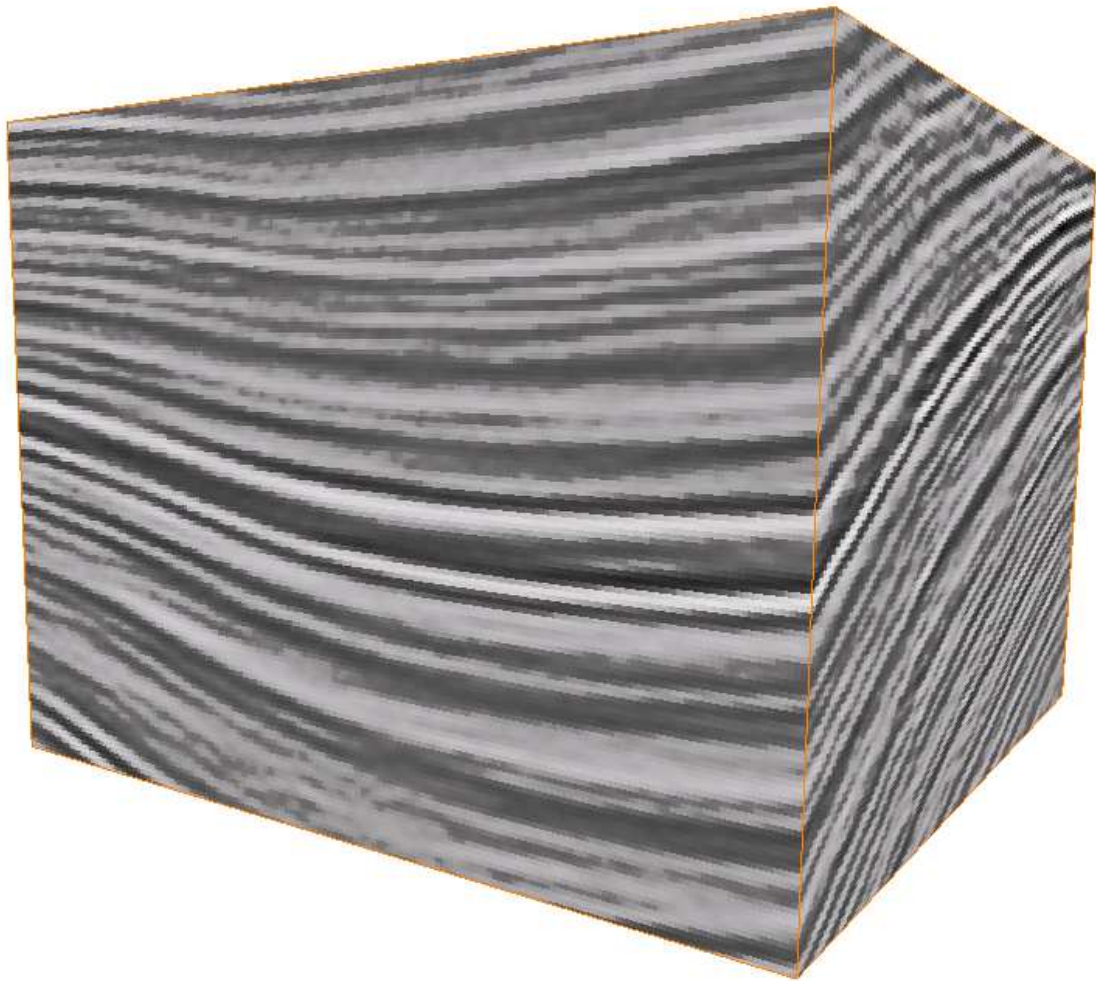


FIG. 4.27 – Image d'amplitude originale

la chaîne complète de traitement, jusqu'à la segmentation topologique sont données dans les *figures 4.28* et *4.29*. A la vue de ces figures, on remarque que les horizons sont bien extraits et que les surfaces que nous obtenons sont assez régulières. Quelques petites portions de surfaces et quelques trous sont présents pour rappeler le caractère bruité des images sismiques. On peut ajouter que notre approche est robuste car elle fonctionne même lorsqu'on s'écarte de l'hypothèse d'horizontalité des couches géologiques que nous avons faite au départ. Il faut cependant noter que, sur la *figure 4.29*, il y a deux surfaces successives qui ont le même label (surfaces grises n°1). Ces surfaces correspondent à une structure multi-couches. Remarquons que les surfaces vertes (n°2) n'ont pas le même label. Les couleurs sont proches mais ne sont pas les mêmes.

Le problème de la *figure 4.29* est résolu par le dernier traitement qui nous permet d'obtenir le résultat final illustré par la *figure 4.30*. Nous voyons que les surfaces qu'il restait encore à séparer le sont.

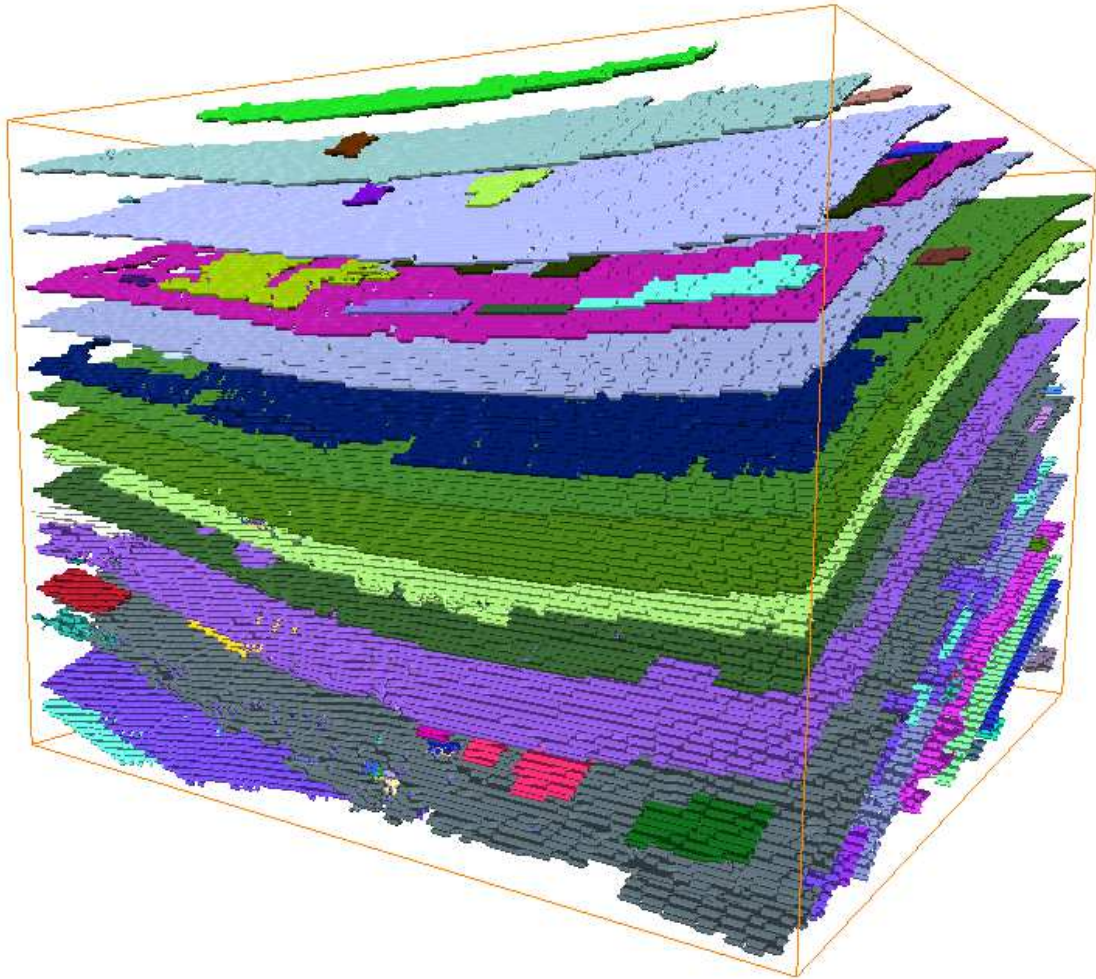


FIG. 4.28 – Segmentation topologique de l'amincissement de l'image compteur seuillée extraite de l'image de la *figure 4.27* par segmentation morphologique

Temps de calcul

A titre d'exemple, nous donnons ici les temps d'amincissement et de segmentation topologique du cube qui a servi pour les illustrations. L'algorithme d'amincissement requiert environ 12 heures de calcul pour amincir les surfaces extraites par segmentation morphologique. Cette durée n'est pas bloquante dans un contexte de traitement sismique mais, comme nous avons déjà commencé à le faire, il est possible d'améliorer ces performances. Cela constitue un axe de recherche privilégié pour accélérer la chaîne de traitement. La segmentation topologique des structures amincies prend un peu moins de cinq minutes. Cette durée est, comparativement aux étapes de segmentation morphologique (50 minutes) et surtout d'amincissement topologique, assez rapide ce qui la rend très concurrentielle. Ces temps de traitement, parce qu'ils sont en deçà de la durée de traitement d'une image sismique, qui est de trois à quatre jours, sont satisfaisants pour nos partenaires industriels. Cependant, si le nombre de points

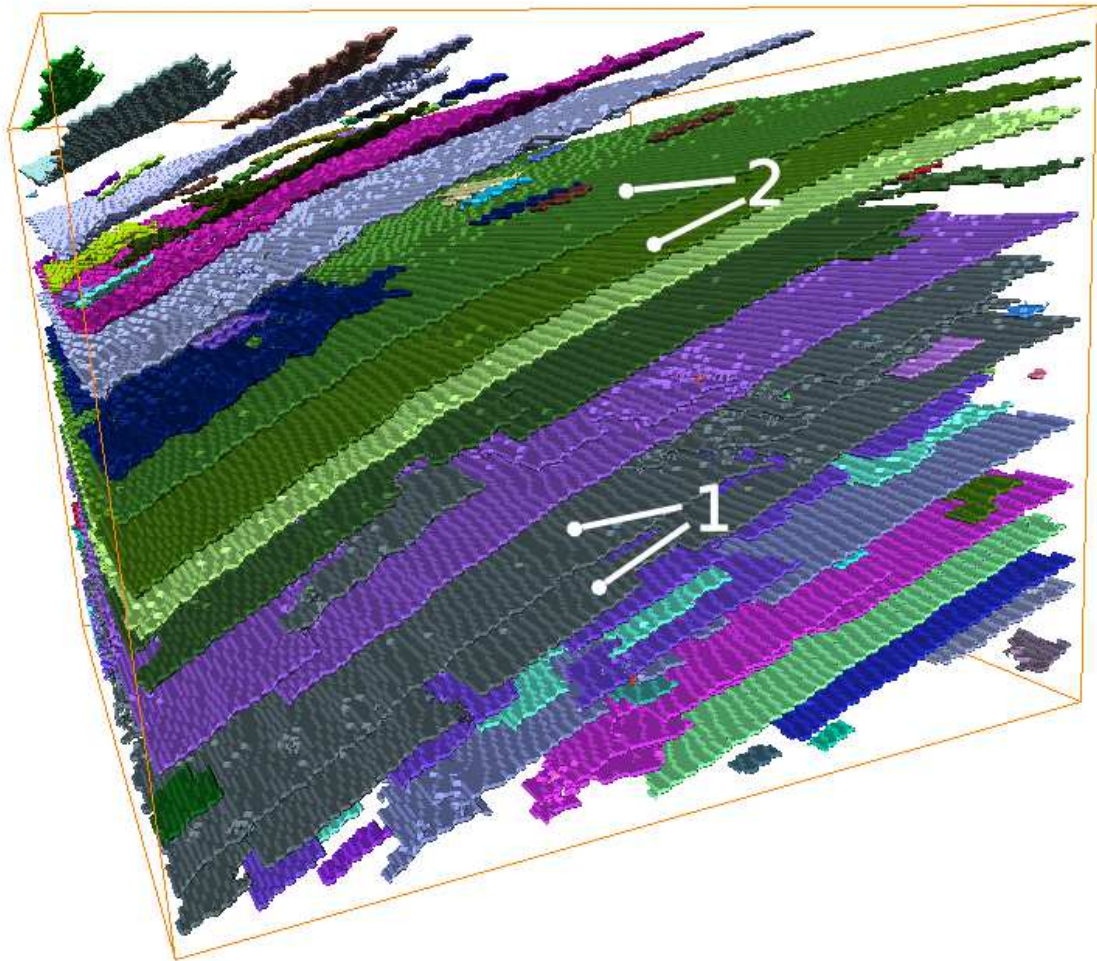


FIG. 4.29 – Segmentation topologique de l'amincissement de l'image compteur seuillée extraite de l'image de la *figure 4.27* par segmentation morphologique (second angle de vue). Deux horizons gris (marqués 1) portent le même label

de l'objet issu de la segmentation morphologique est très important, l'étape d'amincissement peut devenir blocante.

4.7 Conclusion

La segmentation morphologique par cylindres ayant produit des surfaces épaisses, il nous fallait les amincir. Les outils topologiques se sont remarquablement adaptés aux contraintes que nous avons alors. Ils ont également apporté une réponse au problème de séparation de surfaces superposées ayant le même label. Les résultats que nous avons obtenus sont de bonne qualité. Ils permettent d'entrevoir de nombreuses applications possibles basées sur les horizons ainsi segmentés et indépendamment labellisés.

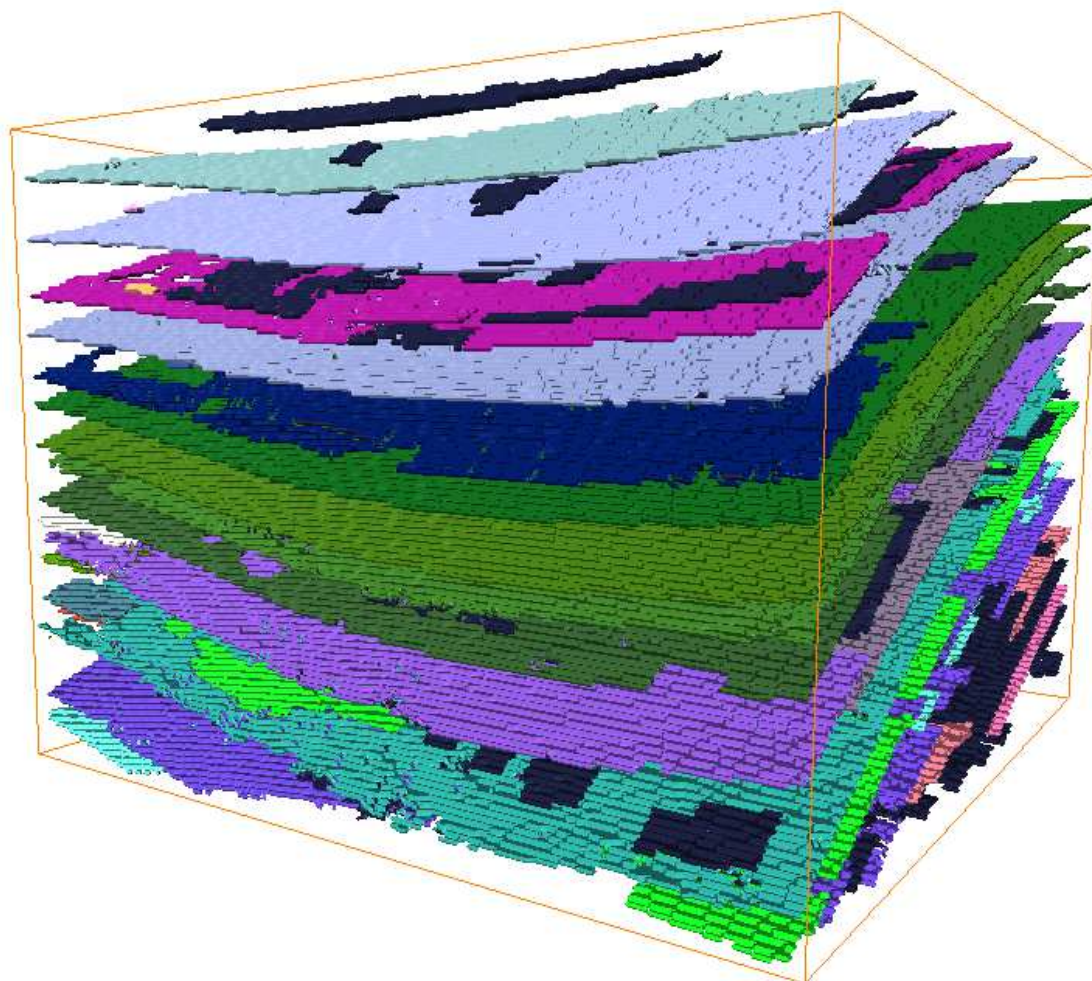


FIG. 4.30 – Élimination des problèmes dus aux surfaces successives labellisées de la même manière

Nous avons travaillé sur une dizaine de cubes différents et les résultats se sont avérés bons assez rapidement. Le choix des différents paramètres de la segmentation hiérarchique s'est révélé assez aisé car, dans la plupart des cas, nous connaissions le nombre approximatif de structures que nous cherchions, le choix de la taille du cylindre et du pas de déplacement étant fortement influencé par la taille du cube. Il reste cependant plusieurs améliorations à apporter aux différents algorithmes présentés ici. Tout d'abord, le temps d'amincissement des surfaces fines semble, non pas illogique à la vue du temps de segmentation, mais assez long. Il est sans doute possible de raccourcir ce temps.

De plus dans la dernière étape de séparation des structures multi-couches, il est encore possible de mieux prendre en compte la géologie et de séparer les surfaces autrement.

L'enjeu était de répondre à une problématique industrielle qui consistait à extraire des horizons géologiques d'un cube d'amplitude et de les rendre compatibles avec la chaîne de traitement géophysique. Nous avons ainsi répondu à cette problématique puisqu'au final,

nous obtenons un jeu de structures géologiques distinctes qui vont nous permettre de réaliser quelques applications que nous présentons dans les chapitres suivants.

Chapitre 5

Calcul d'attributs sismiques

5.1 Les attributs sismiques

5.1.1 Définition

Un attribut sismique est, selon M.T. Taner ([65]), toute donnée qui peut être calculée à partir des données sismiques. Il peut être calculé à l'aide des mesures originales ou bien à partir de tout produit d'un calcul ou d'un raisonnement logique basé sur les données et l'expérience.

Derrière cette définition assez large, se cachent donc un nombre conséquent d'attributs. Ce nombre ne cesse de croître avec l'apparition de nouvelles techniques et des nouveaux moyens matériels relatifs à l'acquisition ou au traitement de données sismiques.

La notion d'attribut est apparue au début des années 1970. Elle a été introduite pour faciliter la compréhension des données sismiques en permettant d'observer les données acquises sous un nouvel angle.

Les attributs donnent des informations qualitatives sur la géométrie et les paramètres physiques du sous-sol. On peut calculer des attributs différents à de nombreuses étapes du traitement et de l'interprétation sismiques.

Le principal intérêt des attributs est de fournir des informations sur les paramètres structuraux, stratigraphiques et lithologiques de la sismique.

5.1.2 Quelques exemples d'attributs

Nommer tous les attributs serait à la fois fastidieux et ne se révélerait pas d'un grand intérêt. En effet, les attributs sont légion et certains sont plus utilisés que d'autres. Nous allons donc seulement en présenter quelques uns dans la suite de ce chapitre. L'azimut et le pendage sont des attributs déjà connus, aussi en présentons-nous une manière de les calculer à partir des horizons que nous avons extraits. Nous décrivons également de nouveaux attributs sismiques qui découlent de nos travaux : un attribut relatif au contrôle qualité du pointer d'horizon et un attribut de hiérarchisation des surfaces extraites par segmentation.

5.2 L'azimut et le pendage

5.2.1 Définitions

L'azimut et le pendage en un point d'une surface peuvent être définis de la façon suivante :

1. **Le pendage**

Le pendage est l'inclinaison (exprimée en degrés) de la ligne de plus grande pente d'une couche de terrain par rapport au plan horizontal.

2. **L'azimut**

En géologie, l'azimut correspond à l'angle dans le plan horizontal entre une direction de référence, comme le nord géographique ou la direction inline, par exemple, et le projeté orthogonal de la direction de plus grande pente sur le plan horizontal.

L'azimut et le pendage servent à caractériser les déformations subies par les couches géologiques depuis leur dépôt. Ils peuvent également servir à améliorer la qualité des traitements de données sismiques, comme des filtrages. On trouve, par exemple, leur utilisation dans les

travaux de Magneron et al. ([43]) dans lesquels ils servent à orienter le calcul du krigeage suivant la pente des structures géologiques afin d'améliorer le filtrage des données.

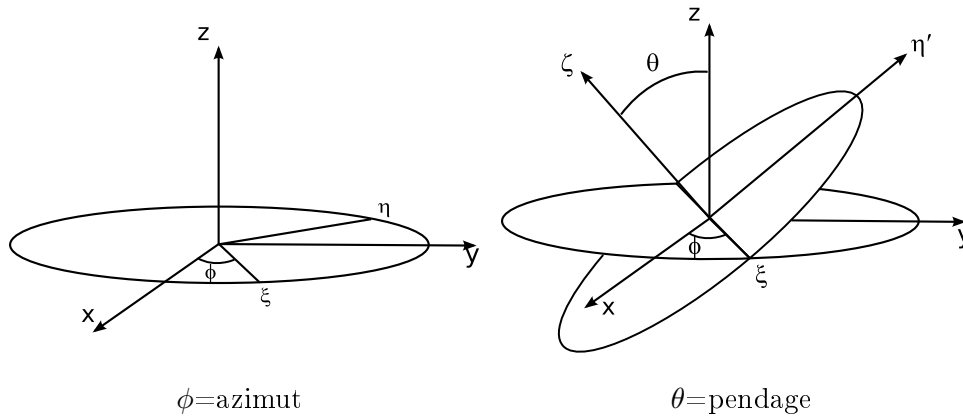


FIG. 5.1 – Angles d'Euler

Dans la convention des angles d'Euler ([72]), illustrée en partie par la *figure 5.1*, l'azimut – calculé par rapport à la direction principale x – et le pendage correspondent respectivement aux angles ϕ et θ , aussi appelés angle de précession et angle de nutation. ϕ est l'angle de rotation autour de l'axe z et transforme le repère (x, y, z) en (ξ, η, z) . θ est l'angle de rotation autour de ξ qui transforme (ξ, η, z) en (ξ, η', ζ) . La convention d'Euler utilise un dernier angle de rotation autour de ζ qui ne nous est pas utile, ici.

5.2.2 Calcul de l'azimut et du pendage

Nous cherchons à calculer le triplet de vecteurs $(\vec{T}, \vec{P}, \vec{N})$, base du repère (ξ, η', ζ) de la *figure 5.1*, \vec{P} étant le vecteur indiquant la direction de plus grande pente dans le sens croissant et \vec{N} le vecteur normal au plan tangent à la surface. \vec{P} est colinéaire au vecteur gradient. \vec{T} est le vecteur tangent à la surface tel que $(\vec{T}, \vec{P}, \vec{N})$ est direct. Nous commençons par calculer le vecteur \vec{N} .

Calcul du vecteur normal et du pendage

La surface d'un horizon n'est pas toujours plane. Cependant, comme ses variations sont continues – à l'exception des lieux de faille – et de faible amplitude, on peut localement assimiler cette surface à son plan tangent. Nous pouvons alors calculer les caractéristiques de ce plan et trouver les éléments nous permettant de calculer à la fois l'azimut et le pendage.

Nous avons supposé que, localement, le plan tangent à la surface en un point $X = (x_0, y_0, z_0)$ et la surface étaient confondus, nous pouvons, par conséquent, utiliser les points du voisinage de X pour trouver le plan tangent.

Nous avons alors un nuage de points qu'on suppose appartenir à un plan quasi-horizontale. On en cherche alors le vecteur normal \vec{N} de coordonnées $(\alpha, \beta, 1)^T$ (on peut prendre 1 à cause de l'horizontalité).

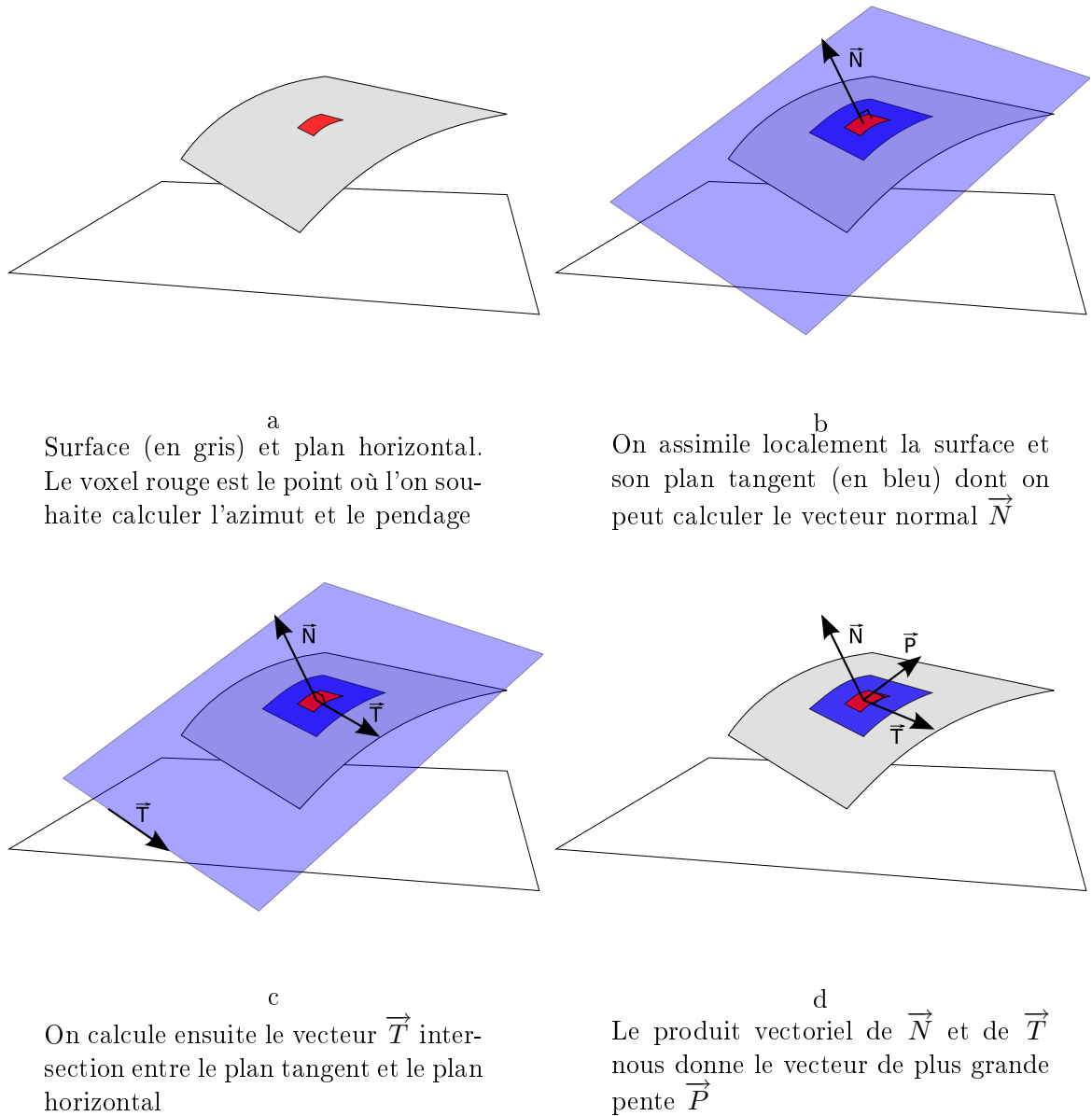


FIG. 5.2 – Méthode de calcul de l'azimut et du pendage

Pour y parvenir, nous avons opté pour une solution classique : la régression linéaire ([30]). Soient $E = \{M_0, M_1, \dots, M_{k-1}\}$ les k points du voisinage du point considéré tels que $\forall i \in [0, k-1], M_i = (x_i, y_i, z_i)^T$. Les estimées des coefficients α et β au sens des moindres carrés s'écrivent alors :

$$\alpha = -\frac{\sum_{i=0}^{k-1} x_i z_i}{\sum_{i=1}^k x_i^2} \quad (5.1)$$

$$\beta = -\frac{\sum_{i=0}^{k-1} y_i z_i}{\sum_{i=1}^k y_i^2}. \quad (5.2)$$

A partir du vecteur normal, nous pouvons calculer le pendage. Si \vec{k} est le vecteur directeur

unitaire de l'axe z , alors le pendage est donné par :

$$\theta = \arccos \left(\frac{\vec{N} \cdot \vec{k}}{\|\vec{N}\|} \right). \quad (5.3)$$

L'azimut est donné par :

$$\phi = \begin{cases} \arccos \left(\frac{\vec{T} \cdot \vec{i}}{\|\vec{T}\|} \right) & \text{si } y_t \geq 0 \\ 2\pi - \arccos \left(\frac{\vec{T} \cdot \vec{i}}{\|\vec{T}\|} \right) & \text{si } y_t < 0 \end{cases} \quad (5.4)$$

où y_t est l'ordonnée du vecteur \vec{T} dans le repère (x, y, z) .

Choix du voisinage

Le choix du voisinage est important car, de sa taille, dépend le résultat que nous obtenons pour le calcul de l'azimut et du pendage. Un plan est défini par trois points non alignés, c'est donc le nombre de points minimum requis pour pouvoir faire une approximation du plan passant par le point d'intérêt X . Si nous considérons plus de points, l'approximation que le plan interpolé fera de la surface sera meilleure (toujours à la condition qu'ils ne soient pas alignés). Cependant, si le nombre de points est trop grand, le plan interpolé risque de ne plus être parallèle au plan tangent en X .

En fait, le choix du nombre de points utilisés pour l'approximation dépend de ce que l'on cherche à obtenir. Si on cherche l'azimut et le pendage de la tendance de la surface dans une région donnée, tous les points de la région (donc un grand nombre) peuvent être utilisés. Si on cherche l'azimut et le pendage en chaque point, il est déconseillé de prendre un voisinage trop grand. Le choix du voisinage est cependant facilité par la bonne régularité des horizons extraits (peu de rupture de pente).

En pratique, pour calculer l'azimut et le pendage en chaque point, nous prenons un voisinage 8-connexe de manière à avoir suffisamment de points, tout en ayant une connaissance assez locale de la surface. Le voisinage 4-connexe pourrait également convenir, mais le nombre de points étant trop proche du nombre minimal critique, il apparaît assez dangereux de l'utiliser pour estimer le plan tangent.

5.2.3 Applications

Avec les valeurs de l'azimut et du pendage pour chaque point des horizons, nous pouvons calculer de nombreux autres attributs comme la pente moyenne d'une surface par exemple.

Nous pouvons en outre estimer le pendage et l'azimut dans tout le cube, ou dans une zone d'intérêt choisie, en réalisant une interpolation entre les valeurs connues calculées le long des horizons.

Il apparaît également possible d'améliorer la séparation des structures multi-couches que nous avons observées dans le chapitre précédent en imposant une condition sur la continuité de la pente. Cette condition serait donnée par les angles de pendage et d'azimut calculés en chaque point des surfaces.

Parmi les applications du calcul des angles d'azimut et de pendage, on peut citer, par exemple, leur application à la simulation d'écoulement qui consiste à coupler des informations pétrophysiques (comme la porosité) à des informations structurales (azimut, pendage) de manière à simuler l'écoulement des fluides dans le sous-sol.

Une autre application concerne le traitement des données sismiques avant sommation comme dans la phase de tomographie temps de trajet [9] par exemple. Cette opération consiste à déterminer le modèle de vitesse des ondes dans le sous-sol à partir des données sismiques. À l'aide de l'azimut et du pendage, on peut, en plus, connaître le point où l'onde s'est réfléchi sur une interface donnée et ainsi améliorer la qualité du modèle de vitesse [8].

À l'aide de l'azimut et du pendage, on peut aussi, comme l'ont fait Magneron et al. dans [43], améliorer les techniques de filtrage à base de krigeage factoriel en effectuant une rotation du système de calcul des poids de krigeage dans les directions données par l'azimut et le pendage.

Tout ceci est possible grâce à la bonne qualité et la bonne régularité des horizons. Ces dernières sont tellement bonnes que nos partenaires nous ont demandé d'évaluer la qualité d'autres pointers à l'aide de la LPE.

5.3 Le contrôle qualité du pointer d'horizon

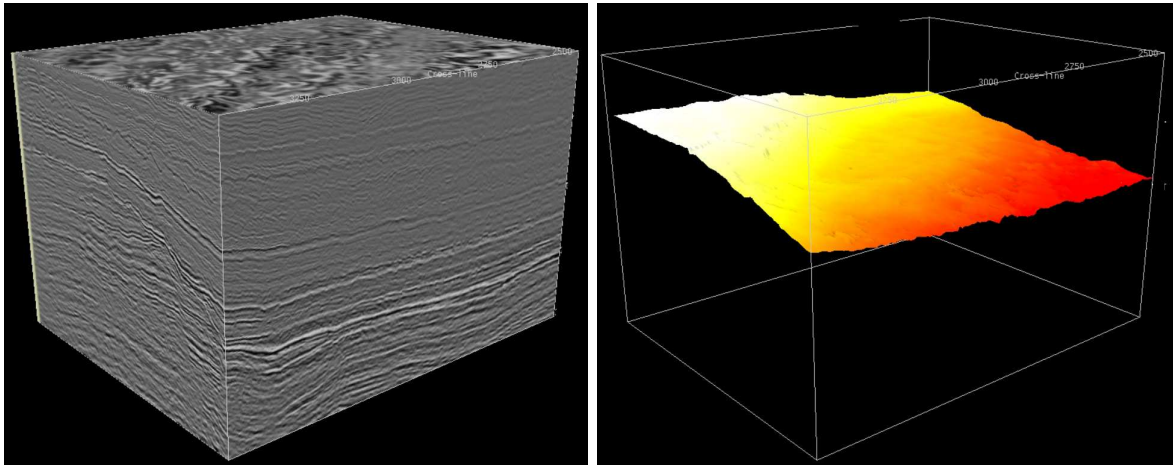
Construire un modèle du sous sol nécessite de ne pas perdre ou de ne pas trop fausser l'information à chaque étape de la construction. En effet, une petite erreur commise lors d'une phase de construction du modèle peut entraîner de grands biais dans le résultat final, car elle se transmet et s'amplifie d'étape en étape.

Il est donc nécessaire de valider chaque étape avant de passer à la suivante afin de minimiser les effets d'une erreur potentielle. Dans ce contexte, le contrôle qualité du pointer d'horizon prend tout son sens, puisqu'il permet de valider un pointer réalisé par un logiciel automatique ou semi-automatique. Pour mener à bien le contrôle de pointer d'horizons, nous utilisons l'image d'amplitude originale ainsi que l'horizon dont nous devons contrôler le pointer. Ces données sont illustrées par la *figure 5.3*. Cette méthode est également décrite dans [21].

Nous cherchons ici à vérifier que le pointer de référence pointe bien les points correspondant au réflecteur qu'il est sensé suivre. En d'autres termes, que l'horizon de référence est bien constitué des points les plus hauts en amplitude dans la zone considérée.

À l'aide de la ligne de partage des eaux contrainte, nous calculons un nouvel horizon à partir de l'horizon initial. On entend par LPE contrainte une LPE dont on a choisi et placé les marqueurs sources de l'inondation. Dans notre cas, nous utilisons l'horizon pointé pour calculer la source d'inondation. Nous commençons par déterminer la zone de recherche dans laquelle on va calculer le nouvel horizon. Il faut que cette zone soit à la fois suffisamment large pour permettre à l'algorithme d'aller « chercher » une erreur importante, et suffisamment étroite pour éviter que l'algorithme ne pointe une interface plus haute en amplitude dans le voisinage de celle que nous cherchons. En pratique, nous prenons une largeur de zone de recherche de l'ordre de deux à trois fois l'épaisseur d'une couche géologique (phase blanche ou phase noire). Cependant, rien n'est figé et il est possible de fixer la taille de la zone de recherche à la valeur voulue.

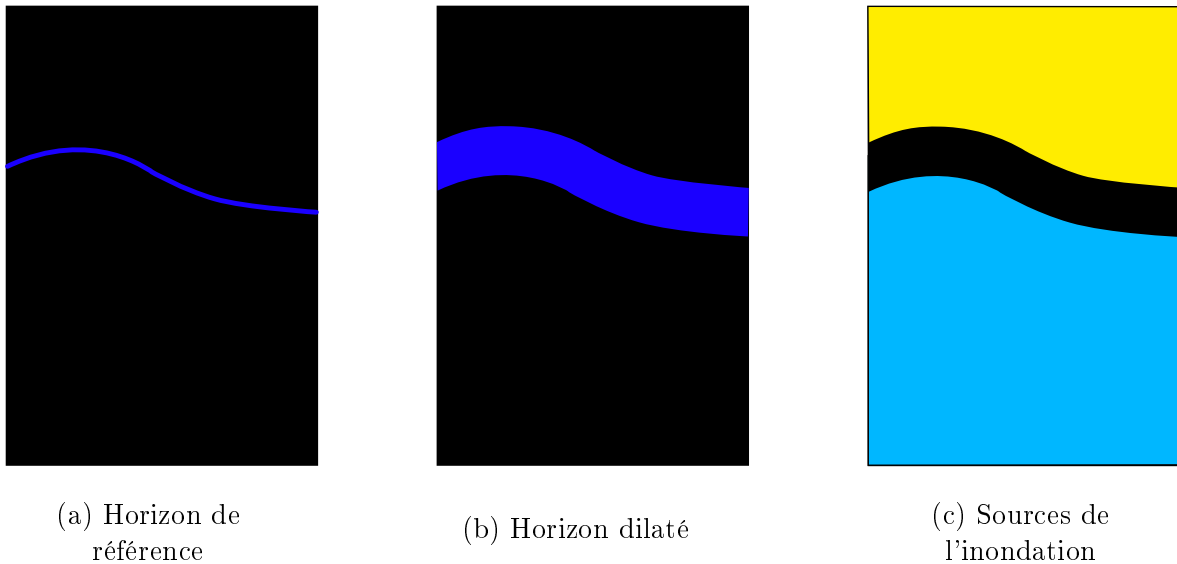
Nous considérons l'ensemble des voxels qui se trouvent à une distance inférieure à une distance choisie. Ceci est fait grâce à une dilatation de l'horizon de référence (*figure 5.4 (a)*)



(a) Image originale

(b) Horizon à contrôler

FIG. 5.3 – Images d'entrée du contrôle de qualité du pointer d'horizon



(a) Horizon de référence

(b) Horizon dilaté

(c) Sources de l'inondation

FIG. 5.4 – Méthode de calcul des sources de la LPE contrainte pour le contrôle qualité du pointer d'horizons

jusqu'à ce que son épaisseur soit égale à la taille de la zone de recherche souhaitée (*figure 5.4 (b)*). Nous inversons ensuite l'image puis nous labellisons les deux composantes connexes (en jaune et bleu dans la *figure 5.4 (c)*). Ces dernières sont les sources de l'inondation. L'inondation s'effectue dans la zone de recherche repérée en noir dans la *figure 5.4 (c)*.

La ligne de partage des eaux que l'on obtient à la fin suit au mieux la ligne de crête constituée par l'horizon d'intérêt. Les différences qui existent entre l'horizon de référence et l'horizon pointé à l'aide de la LPE donnent des indications sur les endroits problématiques dans le pointer original.

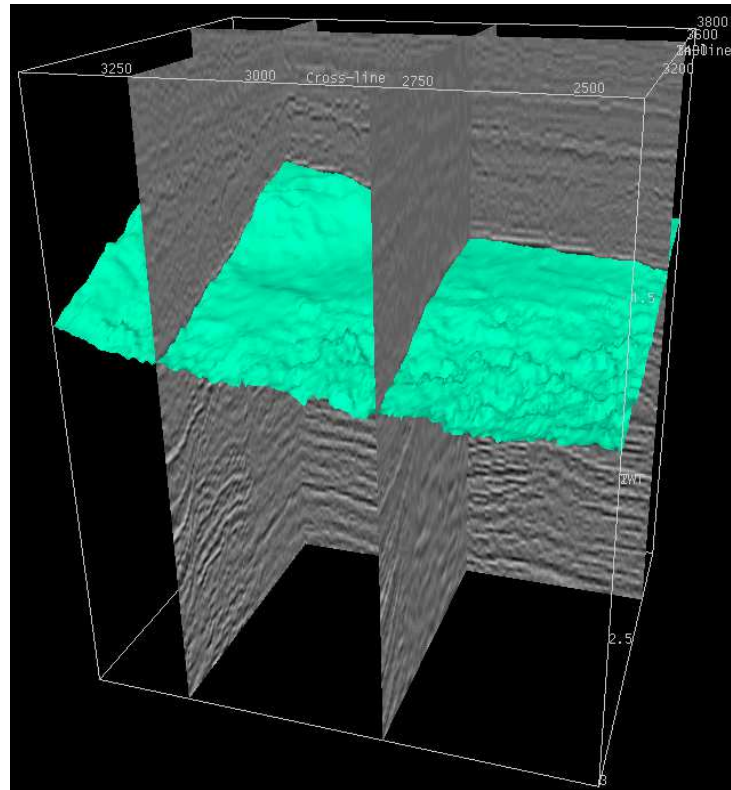
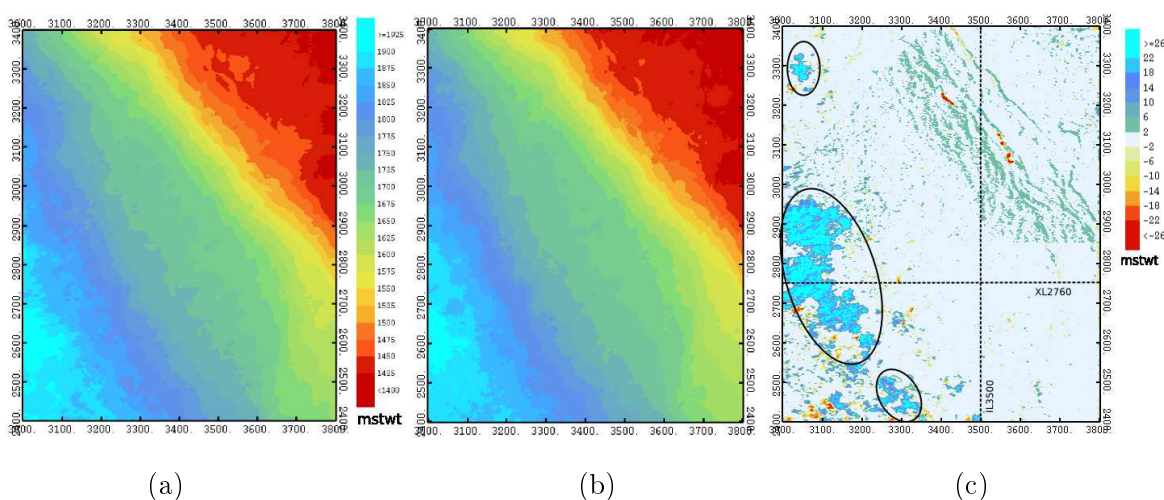


FIG. 5.5 – Horizon de référence sur lequel nous avons réalisé le contrôle qualité de pointer à partir duquel les observations des *figures 5.7* et *5.8* ont été faites

Ainsi, à partir de l'horizon de la *figure 5.5*, nous pouvons observer les différences entre l'horizon de référence et l'horizon pointé par la ligne de partage des eaux (que nous nommerons « horizon watershed » par la suite).

Les *figures 5.6 (a)* et *(b)* montrent les cartes des temps extraits le long de l'horizon de référence et de l'horizon watershed. Le terme « mstwt » signifie millisecond two way time. Il correspond au temps en millisecondes qu'a mis l'onde sonore pour faire le trajet émetteur – réflecteur – récepteur. Plus il est important, et plus le point du réflecteur est profond. La carte des différences met en évidence des zones (ellipses noires) montrant des écarts entre les deux horizons supérieurs à 20 ms. Cette différence est importante. Il semble donc intéressant de regarder plus avant ce qui se passe dans ces zones.

Pour cela, nous observons deux sections du cube d'amplitude repérées pas des pointillés dans la *figure 5.6 (c)* La première est la section inline IL3500 illustrée par la *figure 5.7*. Les tracés en rouge et en bleu réfèrent respectivement à l'horizon de référence et à l'horizon watershed. Deux agrandissements ont été réalisés qui correspondent aux *figures 5.7 (a)* et *(b)*. La *figure 5.7 (a)* nous permet de voir que lorsque la structure géologique est bien continue, il n'y a pas de problème ; l'horizon watershed et l'horizon de référence sont superposés. D'un



(a)
Carte des temps extraits le long de l'horizon de référence

(b) Carte des temps extraits le long de l'horizon watershed
(c) Carte des différences entre les cartes des figures (a) et (b)

FIG. 5.6 – Cartes des temps de l'horizon de référence, de l'horizon watershed et carte des différences

autre côté, dans le cas de la figure 5.7 (b), on voit que, bien que la couche géologique soit assez continue, l'horizon de référence passe légèrement trop haut et ne passe pas par les points qui ont l'amplitude la plus forte. L'horizon watershed suit, quant à lui, bien ces points. Il corrige donc d'une certaine manière le tracé de l'horizon de référence.

La figure 5.8 illustre la section crossline XL2760 repérée sur la figure 5.6 (c). L'agrandissement qui en est fait montre clairement que l'horizon de référence saute d'une phase à une autre. En d'autres termes, il pointe deux horizons différents à deux endroits différents. Ce passage d'une couche géologique à une autre explique les zones d'écarts importants entre la carte de référence et la carte watershed que l'on observe sur la carte de différences de la figure 5.6 (c).

La différence de profondeur que l'on observe entre l'horizon de référence et l'horizon watershed se manifeste également par une différence entre les amplitudes extraites le long de ces deux horizons. Les cartes des figures 5.9 (a) et (b), donnent les amplitudes extraites le long des horizons de référence et watershed. On remarque que les amplitudes sont bien plus élevées dans les images qui ont illustré cet ouvrage jusqu'à maintenant (6400 contre 255). C'est dû au fait que les données sont extraites des images originales avant que nous ne réduisions la profondeur à 8 bits.

Il est délicat de voir une différence entre les deux cartes d'amplitude, pourtant, la carte des différences de la figure 5.9 (c) montre qu'il peut y avoir des différences relatives considérables entre les deux. Cela montre l'importance d'un pointer précis, qui passe bien par les points de plus forte amplitude.

Ce contrôle qualité de pointer d'horizon offre un moyen de qualifier le pointer original, c'est à dire de déterminer s'il est correct. Il permet de mettre en avant des zones problématiques de l'image, ou des incohérences du pointer de référence. L'extraction d'horizons sismiques a pour but de construire un modèle géologique du sous-sol. La technique présentée ici permet

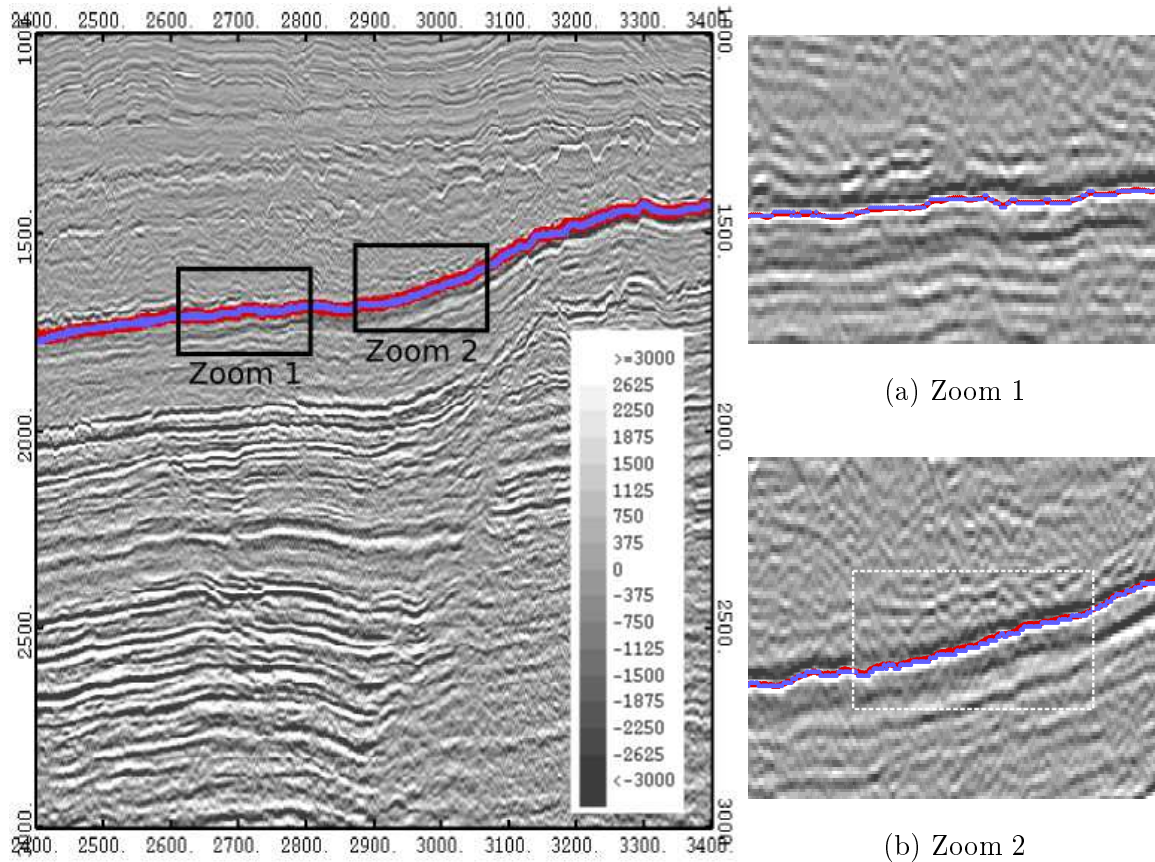


FIG. 5.7 – Comparaison entre l'horizon de référence, en rouge, et l'horizon pointé par LPE, en bleu

de rendre ce modèle plus fiable.

Elle peut également être utile dans notre chaîne de traitement en venant s'insérer dans une phase supplémentaire de validation des horizons retenus. Chaque horizon serait alors vérifié individuellement. Cela nécessiterait cependant d'avoir des horizons complets ou dont les trous auraient un diamètre inférieur à la largeur de la zone d'intérêt afin qu'ils soient bouchés lors du calcul des marqueurs. Plus généralement, un algorithme permettant de boucher les trous des surfaces [1] résoudrait définitivement le problème.

5.4 Hiérarchisation *a posteriori* des horizons extraits

Dans cette section, nous présentons un outil permettant de classer les surfaces extraites par segmentation morphologique et topologique selon des critères variables. Un tel outil permet au d'accéder directement aux structures les plus significatives selon le critère choisi.

Durant l'étape de segmentation morphologique, pour résoudre le problème des fuites, nous avons opté pour une approche par segmentation hiérarchique à base de cylindres. La segmentation hiérarchique permet d'obtenir une hiérarchie de partitions de l'image et de naviguer dans cette hiérarchie comme on le souhaite. On peut ainsi choisir le nombre de régions que l'on veut, en sachant que nous obtiendrons toujours les régions les plus grandes au sens d'un

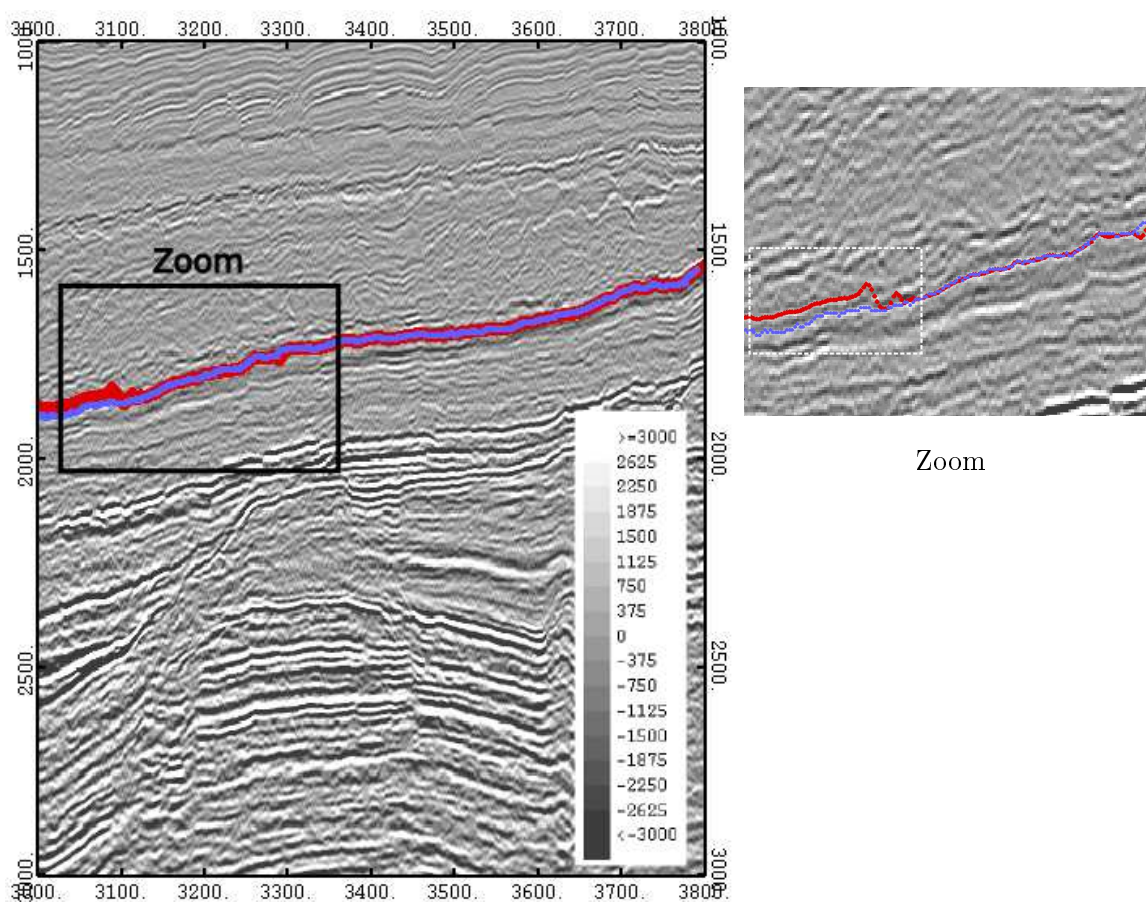


FIG. 5.8 – Comparaison entre l’horizon de référence en rouge et l’horizon pointé par LPE en bleu

critère choisi. Avec l’approche par cylindres, nous avons perdu cette information de hiérarchie entre les régions. Il n’est donc plus possible d’ordonner « à la volée » les surfaces que nous obtenons suite à la segmentation.

Nous proposons ici une manière de pouvoir comparer les surfaces que nous avons extraites. En effet, si nous ne pouvons pas conserver l’information de hiérarchie durant le processus d’extraction des horizons, nous pouvons, en revanche fabriquer une hiérarchie *a posteriori*. Nous utilisons pour cela les attributs que nous pouvons calculer le long des horizons que nous avons extraits. Ensuite, nous pouvons ordonner les surfaces selon le critère de notre choix. Nous obtenons ainsi un classement des surfaces.

Le choix du critère pour ordonner les surfaces est libre et permet de faire ressortir les plus significatives suivant la caractéristique que l’on recherche. Par exemple, il est possible de classer les horizons selon leur aire, leur niveau de gris moyen, leur altitude moyenne... On peut même établir des combinaisons de plusieurs critères, afin d’affiner la sélection des horizons. On peut également réaliser plusieurs classements avec, entre chaque étape de classement, une sélection des horizons les plus importants au sens du critère et ce, afin de ne conserver à

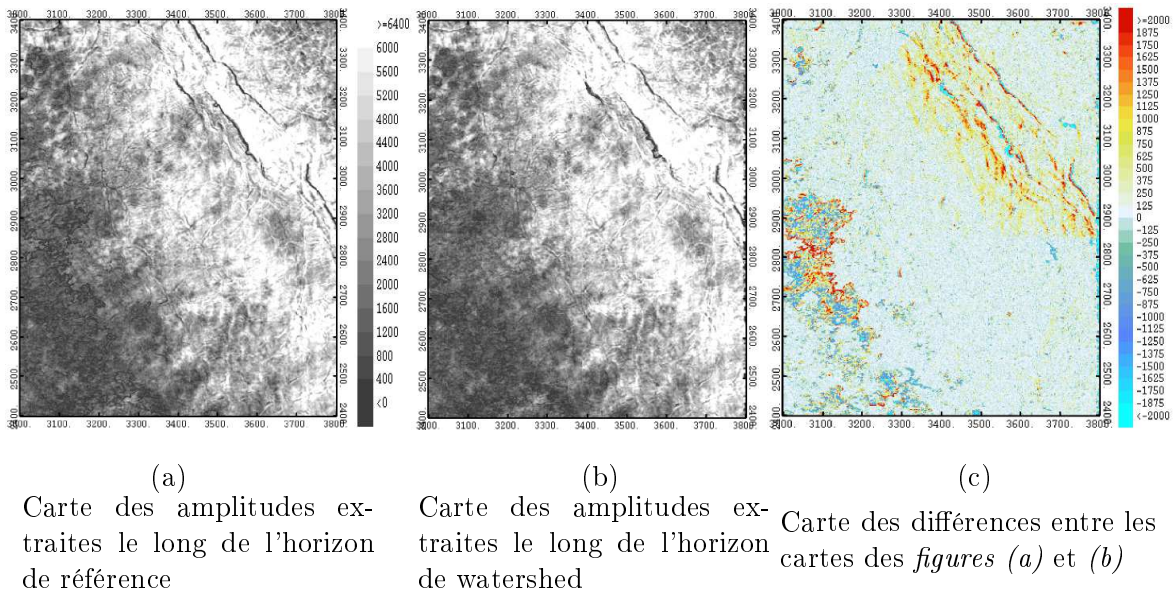


FIG. 5.9 – Cartes des amplitudes extraites de l'horizon de référence, de l'horizon watershed et carte des différences

la fin que les horizons les plus importants suivant la hiérarchie sur le critère que l'on aura choisi.

Nous obtenons ainsi une méthode pour calculer de nouveaux attributs pour tous les points appartenant aux horizons que nous avons extraits.

5.4.1 Expérimentation

Nous avons réalisé une hiérarchisation des horizons extraits par segmentation morphologique et segmentation topologique du cube d'amplitude de la figure 5.10 (a) dont les dimensions sont , nous le rappelons, $201 \times 201 \times 150$. Nous avons opté pour une extraction de 25 régions. Le résultat de la segmentation est donné dans la figure 5.10 (b). Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, par la méthode des cylindres, nous obtenons plus de surfaces que le nombre demandé. Cela n'est pas gênant pour ordonner les horizons.

Nous voulons à présent extraire de cet ensemble un nombre donné d'horizons qui répondent au mieux à un critère fixé. Ce critère nous l'avons, dans le cadre de cette expérimentation, établi de la manière suivante : nous souhaitons obtenir les horizons par ordre décroissant d'amplitude parmi ceux qui ont une aire supérieure à une valeur limite donnée. Nous réalisons donc un premier filtrage des horizons en leur imposant d'avoir une surface supérieure à un seuil donné, puis nous ordonnons les horizons sélectionnés par ordre décroissant d'amplitude. Nous pouvons ensuite sélectionner les horizons qui nous semblent répondre au mieux à nos critères de recherche, ou établir un nouveau seuil afin d'affiner un peu la recherche.

Nous avons extrait dix horizons de l'ensemble présenté dans la figure 5.10 (b). Nous avons pour cela utilisé trois seuils de surface afin de pouvoir comparer les résultats que nous obtenons. Le premier seuil est fixé à une surface de 4000 points, ce qui représente environ le dixième de la surface au sol de l'image. Le second seuil correspond environ à la moitié, soit 20 000 points,

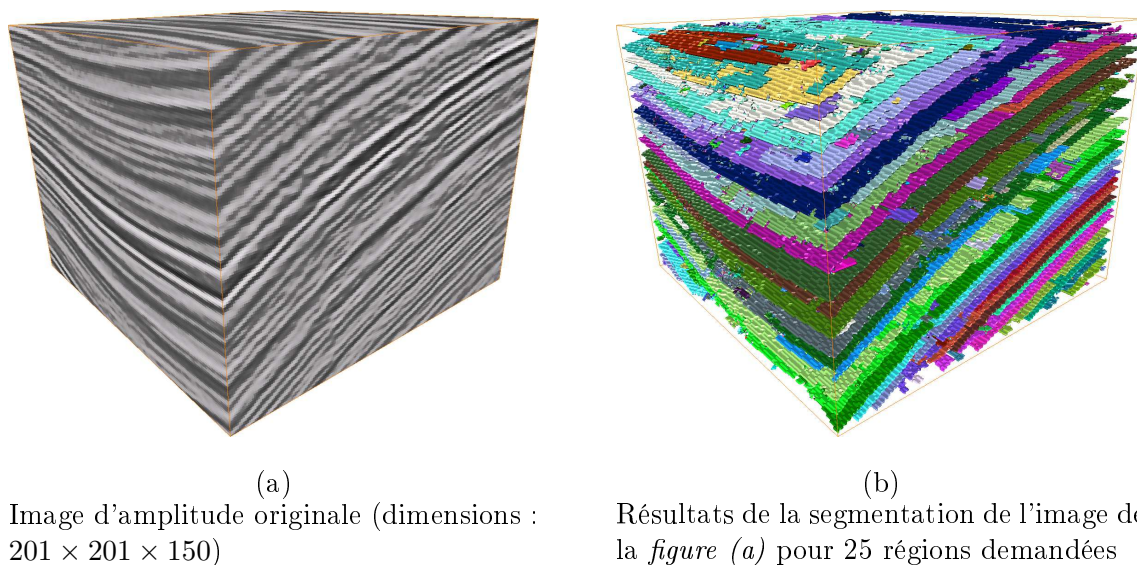


FIG. 5.10 – Image originale et image segmentée utilisées pour illustrer la hiérarchisation *a posteriori* des horizons

et le troisième est à 30 000 points.

5.4.2 Résultats

Ordre	Label	Amplitude moyenne	Aire	z_{min}	z_{max}	z_{moy}
1	4902	219	5727	8	36	21
2	18	212	39295	4	80	35
3	19	203	38811	13	92	45
4	20	197	39076	18	98	50
5	34	193	29481	75	148	110
6	44	186	18164	46	127	82
7	15	184	33904	1	59	23
8	12	184	20731	1	36	13
9	24	182	38111	35	122	70
10	64	180	15500	110	148	131

TAB. 5.1 – Classement des dix horizons les plus hauts en amplitude parmi les horizons dont la surface est supérieure à 4000 voxels

Les résultats que nous obtenons sont illustrés dans les *tableaux 5.1, 5.2 et 5.3*, respectivement pour les seuils 4000, 20 000 et 30 000. On remarque, dans les trois tableaux, de nombreux horizons communs : les horizons labellisés 18, 19, 20, 15 et 24. Ces horizons ont naturellement une surface supérieure aux seuils, mais possèdent également une amplitude moyenne parmi les plus grandes. Il apparaît donc normal de les retrouver dans les trois expérimentations.

Ordre	Label	Amplitude moyenne	Aire	z_{min}	z_{max}	z_{moy}
1	18	212	39295	4	80	35
2	19	203	38811	13	92	45
3	20	197	39076	18	98	50
4	34	193	29481	75	148	110
5	12	184	20731	1	36	13
6	15	184	33904	1	59	23
7	24	182	38111	35	122	70
8	30	179	34833	66	148	106
9	14	177	24831	1	50	22
10	55	177	24200	92	148	125

TAB. 5.2 – Classement des dix horizons les plus hauts en amplitude parmi les horizons dont la surface est supérieure à 20000 voxels

Ordre	Label	Amplitude moyenne	Aire	z_{min}	z_{max}	z_{moy}
1	18	212	39295	4	80	35
2	19	203	38811	13	92	45
3	20	197	39076	18	98	50
4	15	184	33904	1	59	23
5	24	182	38111	35	122	70
6	30	179	34833	66	148	106
7	29	177	36864	61	148	102
8	27	176	35847	45	144	90
9	28	175	34968	54	148	98
10	38	174	30306	79	148	116

TAB. 5.3 – Classement des dix horizons les plus hauts en amplitude parmi les horizons dont la surface est supérieure à 30 000 voxels

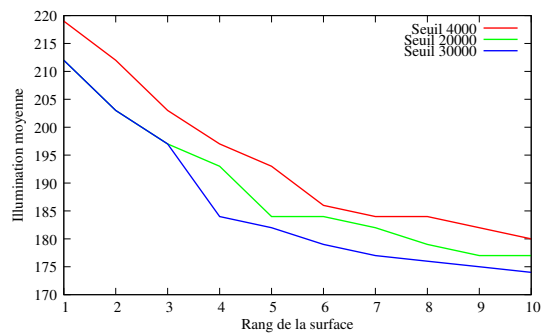


FIG. 5.11 – Amplitude moyenne de chacune des surfaces pour les trois seuils (4000, 20 000 et 30 000)

Dans le tableau *tableau 5.1*, l'horizon 4902 a une forte amplitude. Il se trouve donc naturellement en première position dans l'ordre du tableau. Son aire est cependant juste supérieure au seuil surfacique (4000) du test. Sa position est donc à relativiser si on recherche des surfaces ayant une grande aire.

Seuil	Profondeur moyenne
4000	58
20 000	59,9
30 000	73,5

TAB. 5.4 – Moyenne des profondeurs moyennes des surfaces

On remarque aussi que lorsqu'on augmente le seuil surfacique, on a une légère diminution de la moyenne des valeurs moyennes d'amplitudes pour les surfaces sélectionnées. Les surfaces les plus grandes semblent donc être spatialement plus régulières mais un peu moins énergétiques que les horizons de plus petite surface (*figure 5.11*). On peut en partie expliquer ce phénomène en observant la moyenne des profondeurs moyennes des dix premiers horizons pour chaque test. On obtient le *tableau 5.4*. De nombreuses surfaces ayant une aire importante se trouvent dans le bas de l'image, où l'amplitude des données est plus atténuée. Les surfaces peuvent alors être bien régulières et néanmoins faire partie des plus énergétiques sans pour autant atteindre les niveaux d'amplitude des surfaces moins profondes.

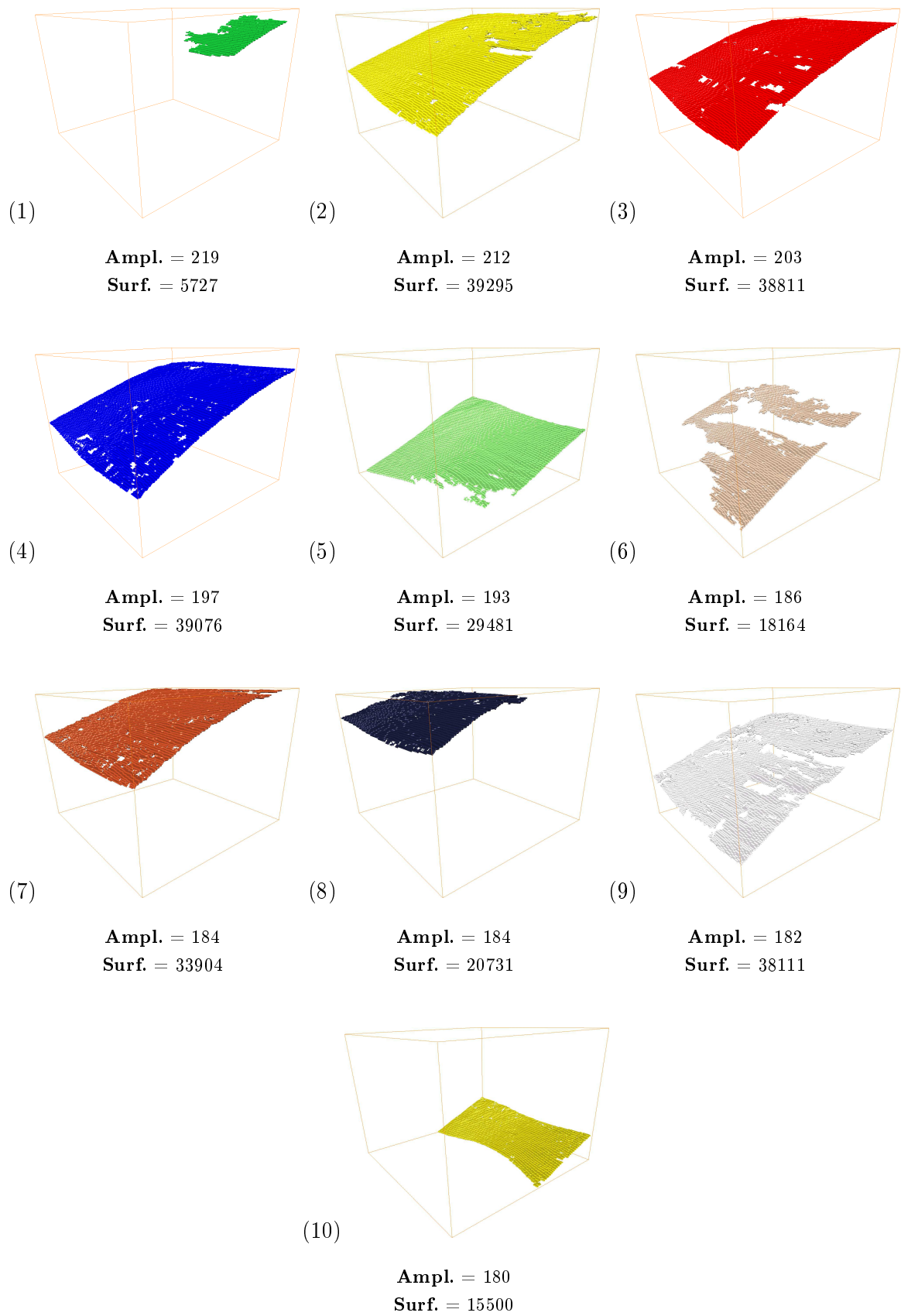


FIG. 5.12 – Horizons les plus hauts en amplitude ¹³⁶ parmi ceux qui ont une aire supérieure à 4000 points (par ordre décroissant d'amplitude)

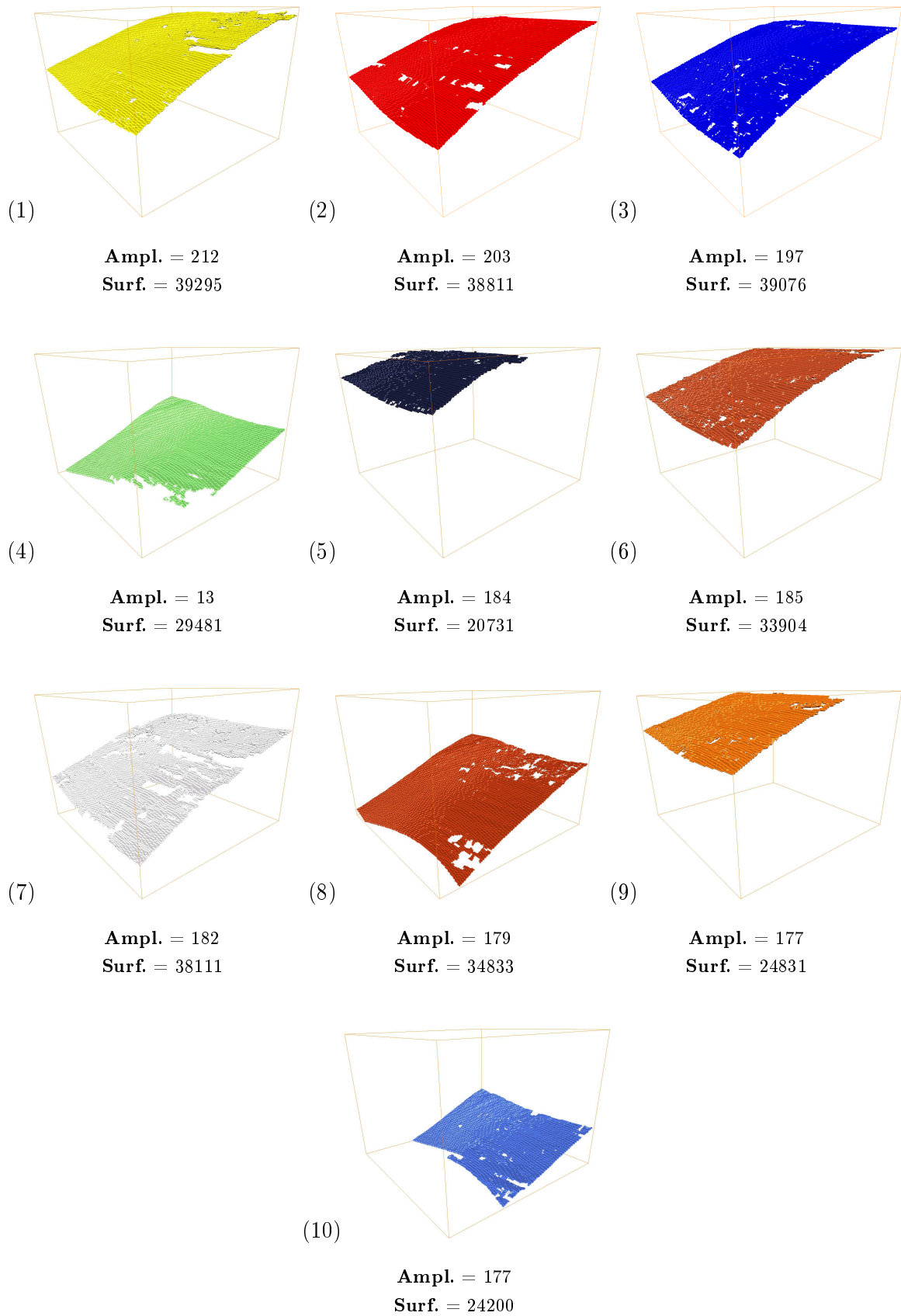


FIG. 5.13 – Horizons les plus hauts en amplitude ¹³⁷ parmi ceux qui ont une aire supérieure à 20 000 points (par ordre décroissant d'amplitude)

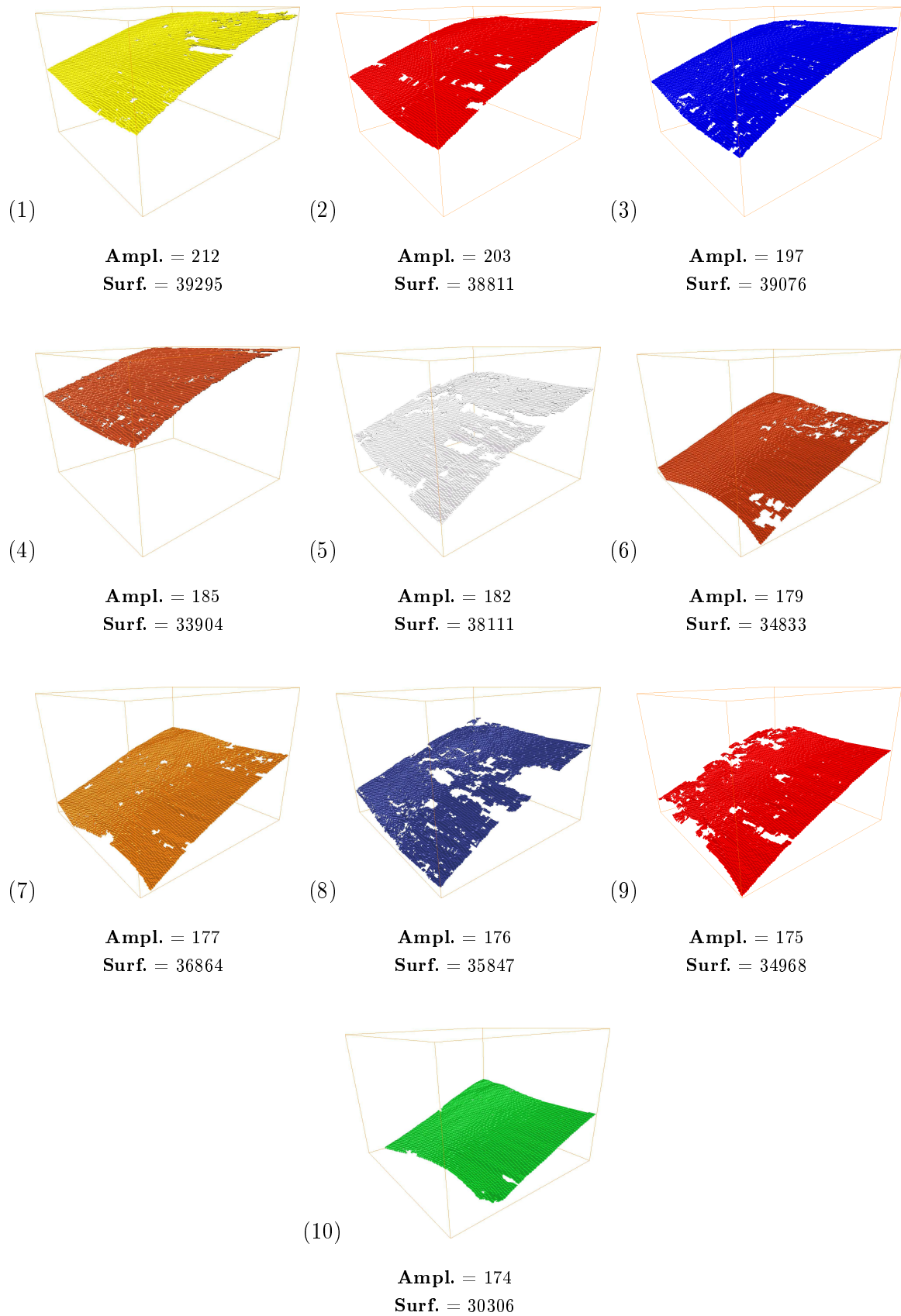


FIG. 5.14 – Horizons les plus hauts en amplitude ¹³⁸ parmi ceux qui ont une aire supérieure à 30 000 points (par ordre décroissant d'amplitude)

Les images des *figures 5.12, 5.13 et 5.14* montrent les horizons que nous avons extraits pour les différents tests. On remarque que, naturellement, plus le seuil est élevé et plus l'aire des horizons extraits est importante. On remarque aussi que les surfaces de plus grande aire présentent des défauts (trous, discontinuités, . . .) plus nombreux que les surfaces plus petites.

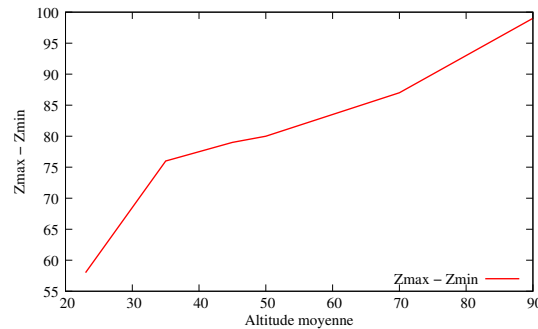


FIG. 5.15 – Différence d'altitude entre le point le plus haut et le point le plus bas de l'horizon

Le test utilisant un seuil de 30 000 voxels permet de voir que la différence entre l'altitude maximum et l'altitude minimum des surfaces augmente avec la profondeur. En effet, en utilisant de horizons presque complets (dont l'aire est proche de l'aire théorique maximale), il est assez rapide de tracer la courbe de la *figure 5.15*. Cette dernière a été tracée avec les seuls horizons qui touchent les quatre faces verticales de l'image, afin de ne pas biaiser les différences avec des horizons incomplets dans la zone de l'image. La différence entre l'altitude minimale et l'altitude maximale de chacune des surfaces considérées augmente avec la profondeur du réflecteur. Ceci donne une indication sur l'évolution de la pente dans cette image.

5.4.3 Discussion

Le classement que nous avons présenté ici montre qu'il est possible de bâtir une hiérarchie *a posteriori* des structures extraites assez rapidement et facilement. Ainsi, on peut imaginer pouvoir évoluer dans la hiérarchie d'horizons pour y trouver les horizons que l'on cherche selon certains critères modifiables à loisir de façon à faciliter et accélérer les temps d'interprétation du cube sismique étudié.

Cette hiérarchisation produit également un moyen de trouver de nouvelles informations sur l'image et de calculer de nouveaux attributs.

5.5 Conclusion

Nous avons présenté ici le calcul de quelques attributs qualifiés de classiques. Nous en avons également présenté de nouveaux : le contrôle qualité de pointer d'horizons et la hiérarchisation des horizons. Ces attributs remplissent leur fonction : ils apportent des informations supplémentaires sur les caractéristiques structurales des données. Le premier permet ainsi d'obtenir un critère de confiance du pointer, dont on contrôle la qualité, et le second donne le degré d'importance d'une structure par rapport à une autre. Comme on peut changer le critère de classement de ce dernier, il constitue un outil interactif qui peut être fort utile dans le choix

des structures à extraire après la segmentation. A partir d'un ensemble d'horizons dissociables les uns des autres, il est possible de réaliser des opérations sur les données issues d'une ou de plusieurs surfaces. On peut ainsi les étudier un par un ou les manipuler par groupe. Dans un contexte industriel, les attributs de contrôle qualité de pointer d'horizon et de hiérarchisation *a posteriori* peuvent contribuer à améliorer la construction du modèle géologique.

Chapitre 6

Variogramme géologiquement guidé

Dans ce chapitre, nous présentons une méthode permettant de calculer des variogrammes expérimentaux « géologiquement » guidés dans des cubes sismiques. Le terme « géologiquement » guidé ne fait pas référence à des variogrammes calculés en fonction de l'orientation des dépôts de sédiments en tout point du cube. Il désigne un mode de calcul basé sur une approximation de la géologie à l'aide d'une interpolation géométrique de surfaces entre deux horizons extraits par méthode morphologique et topologique.

Les techniques géostatistiques sont souvent utilisées dans le traitement de données sismiques. Elles permettent une analyse spatiale des données, ce qui en fait de bons outils d'interpolation, de simulation et de filtrage. Parmi les techniques de filtrage géostatistique, on peut citer le krigeage factoriel, mis au point par Matheron ([46]), et qui consiste en un filtrage des données à partir de la modélisation d'un outil géostatistique : le variogramme. Ce filtrage consiste, comme nous l'avons vu dans le *chapitre 3*, à modéliser le variogramme à l'aide de fonctions analytiques connues puis à retirer la composante correspondant au bruit.

Lorsque le milieu est tabulaire (dépôt horizontal des sédiments), le variogramme, calculé selon les directions inline et crossline du cube, donne des renseignements fiables sur les données. Cependant, lorsque les couches géologiques ont subi des modifications *a posteriori* et qu'elles ne sont plus horizontales, le calcul du variogramme selon les axes principaux de l'image présente des oscillations qui sont dues au fait que le plan horizontal traverse plusieurs couches géologiques. C'est l'effet de pendage. Le variogramme est alors plus difficile à modéliser.

Dans ce chapitre, nous proposons une approche visant à limiter l'influence de cet effet de manière à faciliter la modélisation du variogramme. Pour ce faire, nous nous appuyons sur les résultats que nous avons obtenus dans les chapitres précédents : l'extraction des horizons et la hiérarchisation de ces derniers.

6.1 Le variogramme

Un variogramme expérimental est un outil géostatistique puissant qui sert à caractériser la continuité spatiale d'un ensemble de points de données échantillonnés dans l'espace. Il repose sur l'idée de quantification des corrélations qui peuvent exister entre deux valeurs mesurées sur des points voisins. L'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental ouvrent les portes de techniques d'estimation spatiale appelées krigeage [39]. Ces techniques sont appliquées avec succès dans le cadre de problématiques d'interpolation et de filtrage.

6.1.1 Généralités

Nous décrivons ici brièvement ce qu'est un variogramme. Pour plus de précisions, on peut trouver des informations complémentaires dans les ouvrages de J.P. Chilès et P. Delfiner [14] ou de X. Emery [19] où sont, entre autres, décrits les outils de base de la géostatistique.

Concepts de base et définitions

En statistique classique, on étudie la plupart du temps plusieurs réalisations indépendantes d'une même variable aléatoire. On essaye de trouver la loi que suit cette variable aléatoire en cherchant les éléments qui la caractérisent.

La géostatistique consiste à étudier une variable spatiale que l'on appelle variable régionalisée. Elle correspond à une réalisation de plusieurs variables aléatoires réparties spatialement.

L'ensemble de ces variables aléatoires forme une fonction aléatoire dont on essaye de trouver la loi spatiale à partir des échantillons dont on dispose. Ces derniers étant en nombre limité, il est nécessaire de faire des simplifications pour obtenir une description approchée de la loi spatiale.

En géostatistique, pour des raisons pratiques, ne sont utilisés que les deux premiers moments de la fonction aléatoire qui sont des éléments de cette dernière assez faciles à calculer et qui permettent de décrire assez simplement la loi spatiale. Ces moments peuvent ne pas être suffisants. D'autres modèles sont alors mis en œuvre.

Le moment du premier ordre correspond à l'espérance mathématique de la fonction aléatoire. Parmi les moments du second ordre utilisés en géostatistique, on peut citer la variance, la covariance et le variogramme, par exemple. Dans le cadre de ce chapitre, c'est ce dernier qui nous intéresse. Soit x le vecteur position d'un point d'un jeu de données (échantillon), $Z(x)$ la fonction aléatoire au point x , h le vecteur différence entre les positions x et $x + h$ et $E[\]$ l'espérance. Le semi-variogramme théorique se définit comme la demie variance de la différence $Z(x) - Z(x + h)$:

$$\gamma(x, x + h) = \frac{1}{2} \text{Var} \{Z(x) - Z(x + h)\}. \quad (6.1)$$

Le préfixe « semi » est, en général, omis.

Pendant, pour calculer ces moments à partir des échantillons dont nous disposons, il est nécessaire de faire plusieurs hypothèses. En effet, nous ne disposons que d'une seule représentation de la fonction aléatoire : la variable régionalisée ; il est alors nécessaire de faire l'hypothèse que la variable régionalisée est spatialement homogène ce qui permet de « remplacer » la répétition des réalisations de la fonction aléatoire par une répétition spatiale. Ainsi, on considère que les valeurs de la variable régionalisée ont des caractéristiques très proches et qu'elles constituent plusieurs réalisations d'un même processus aléatoire. On suppose alors que la loi spatiale de la fonction aléatoire (ou une partie de cette dernière) est invariante par translation. C'est l'hypothèse de stationnarité.

L'indépendance de ces réalisations n'est cependant pas vérifiée car la variable régionalisée est spatialement corrélée. Il est donc nécessaire de faire une hypothèse supplémentaire : l'hypothèse d'ergodicité. Cette dernière, en supposant que le champ d'étude de la variable régionalisée est suffisamment grand, consiste à considérer que la moyenne spatiale de la variable régionalisée est égale à l'espérance mathématique de la fonction aléatoire.

On peut définir plusieurs niveaux de stationnarité suivant si elle s'applique sur la variable ou sur ses accroissements (différence de la variable aléatoire entre deux points d'appui). Nous présentons dans la suite deux illustrations de l'hypothèse de stationnarité.

Hypothèse stationnaire d'ordre deux

Une fonction aléatoire Z est stationnaire du second ordre lorsque ses deux premiers moments existent et sont invariants par translation :

- L'espérance mathématique est indépendante de x :

$$E \{Z(x)\} = m, \forall x. \quad (6.2)$$

- La fonction de covariance ne dépend pas de la position de l'échantillon (x) mais uniquement de la distance h (modulaire ou vectorielle) :

$$\text{Cov} [Z(x + h), Z(x)] = C(h). \quad (6.3)$$

Sous cette hypothèse, il est équivalent de travailler avec la fonction de covariance ou le variogramme $\gamma(h)$. La relation qui lie l'un à l'autre est la suivante :

$$\gamma(h) = C(0) - C(h). \quad (6.4)$$

Il est cependant possible que cette hypothèse de stationnarité soit trop forte. En effet, de nombreux phénomènes physiques ne présentent pas une variance finie c'est à dire que cette dernière croît avec la surface ou le volume du support. Pour pouvoir calculer les moments d'ordre deux et ainsi pouvoir caractériser la loi spatiale de la fonction aléatoire, il apparaît alors nécessaire de faire une hypothèse de stationnarité plus faible : l'hypothèse intrinsèque.

Hypothèse intrinsèque

Si $Z(x)$ est une fonction aléatoire, la différence entre $Z(x)$ et $Z(x+h)$ est également une fonction aléatoire. Une fonction aléatoire est intrinsèque lorsque ses accroissements sont stationnaires d'ordre deux, c'est à dire que les moments de la différence $Z(x+h) - Z(x)$ existent et sont invariants par translation (ils ne dépendent que de h) :

$$E \{Z(x+h) - Z(x)\} = m(h), \quad (6.5)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var \{Z(x+h) - Z(x)\}. \quad (6.6)$$

Si on considère une fonction aléatoire intrinsèque sans dérive, $m(h) = 0$, la variance des accroissements peut alors être confondue avec l'espérance de leur carré, d'où l'hypothèse intrinsèque simplifiée :

$$E \{Z(x+h) - Z(x)\} = 0, \quad (6.7)$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} Var \{Z(x+h) - Z(x)\} = \frac{1}{2} E \{Z(x+h) - Z(x)\}^2. \quad (6.8)$$

On remarque que l'hypothèse stationnaire d'ordre deux implique l'hypothèse intrinsèque. Cependant, la réciproque n'est vraie que si le variogramme est borné. On a alors la relation $\gamma(h) = C(0) - C(h)$. Une fonction aléatoire intrinsèque mais non stationnaire d'ordre deux est qualifiée de strictement intrinsèque.

Le variogramme est un indicateur de l'hypothèse de stationnarité qui pourra être retenue. Nous en faisons une brève présentation dans la section suivante.

6.1.2 Caractéristiques du variogramme

Comme nous l'avons vu dans la section précédente, si on se place dans le cas d'une fonction aléatoire stationnaire d'ordre deux ou intrinsèque sans dérive, la fonction de covariance et le variogramme sont liés. La *figure 6.1* illustre cette relation.

En général, on préfère travailler avec le variogramme qui peut être défini même dans le cas d'une fonction aléatoire strictement intrinsèque.

Afin de mieux cerner le variogramme, nous donnons ici quelques unes de ses caractéristiques. Un variogramme est une fonction paire ($\gamma(-h) = \gamma(h)$), il s'annule à l'origine ($\gamma(0) = 0$) et il est positif ou nul $\gamma(h) \geq 0$.

On dit qu'un variogramme est isotrope s'il est identique, quelle que soit la direction dans laquelle il est calculé, c'est à dire quelle que soit l'orientation du vecteur h . La valeur du

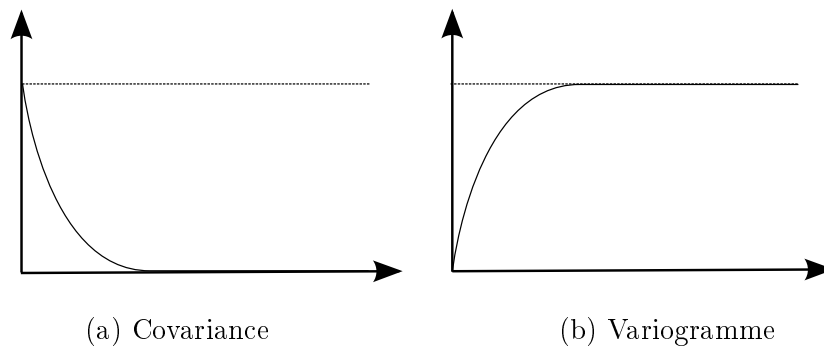


FIG. 6.1 – Fonction de covariance et variogramme

variogramme ne dépend alors que du module de h . Un variogramme non isotrope est dit anisotrope.

Un variogramme possède deux caractéristiques structurales importantes qui permettent de décrire sa forme dans le cas d'un variogramme borné : le comportement à l'origine et le comportement « aux grandes distance ». On leur associe deux paramètres de la la courbe de variogramme : la portée et le palier (*figure 6.2*).

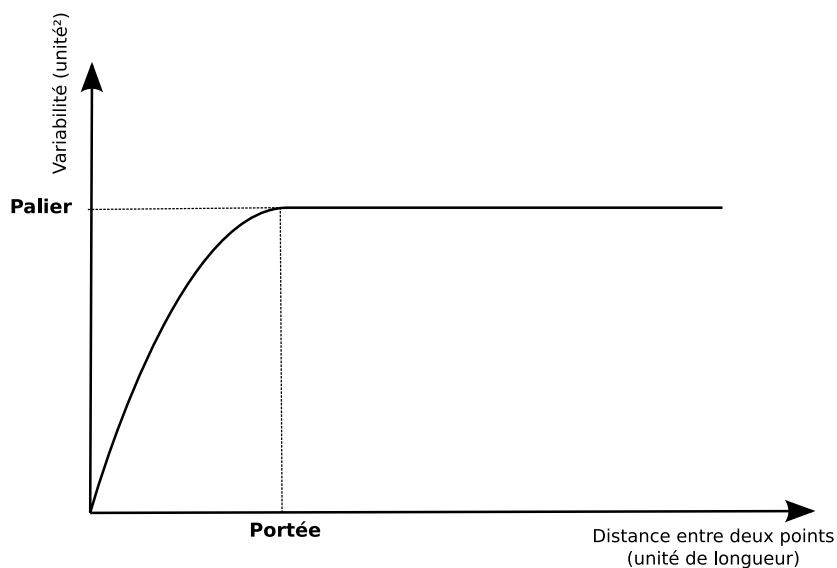


FIG. 6.2 – Un exemple de variogramme et de deux de ses éléments caractéristiques : la portée et le palier

Le variogramme mesure une variabilité entre deux échantillons séparés de h .

- **Le palier** : lorsque γ atteint une valeur limite – le palier –, la fonction aléatoire correspondante est stationnaire d'ordre deux et sa variance est égale au palier.
- **La portée** correspond alors à la distance à partir de laquelle deux observations ne se ressemblent plus en moyenne : elles ne sont plus corrélées. A partir de cette distance, la valeur du variogramme correspond à la variance statistique.

Dans la section suivante, nous voyons comment calculer un variogramme expérimental à partir des données d'amplitude.

6.1.3 Variogramme expérimental

À présent, nous dédoublons la variable h en une information de distance (h) et une information de direction (θ).

L'expression du variogramme expérimental omnidirectionnel est :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{N(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2. \quad (6.9)$$

Ce variogramme omnidirectionnel ne donne pas d'information quant à la présence d'anisotropies (s'il y en a). Il n'est quasiment jamais utilisé sauf dans de très rares cas où les données sont tellement clairsemées dans le champ d'intérêt qu'il n'est alors pas possible de calculer un variogramme directionnel.

Pour obtenir des informations supplémentaires sur la structure des données, il semble donc plus judicieux, lorsque c'est possible, de calculer un variogramme directionnel selon une direction θ donnée, afin de vérifier si les variations dépendent ou non de cette direction. Le variogramme peut alors s'écrire de la manière suivante :

$$\gamma(h, \theta) = \frac{1}{2N(h, \theta)} \sum_{N(h, \theta)} [Z(x) - Z(x+h)]^2. \quad (6.10)$$

De cette façon, s'il existe des anisotropies, les variogrammes obtenus pour plusieurs valeurs de θ nous permettront de les caractériser, comme le montre la *figure 6.3*. Dans cette figure, les variogrammes expérimentaux (en traits fins rouge et vert) sont calculés pour les directions N0 (en vert) et N90 (en rouge) qui correspondent, respectivement, aux axes nord-sud et est-ouest. Ils sont modélisés par les courbes en traits épais. La portée du variogramme N90 est plus grande que celle du N0, cela s'explique par les anisotropies que l'on peut voir sur la carte (ellipses en pointillés). Les structures ont une orientation plutôt est-ouest ce qui allonge la portée du variogramme correspondant par rapport au variogramme N0.

6.1.4 Modélisation du variogramme

Le variogramme expérimental représente une estimation du variogramme théorique pour des écarts h discrets. Cependant, pour la plupart des calculs postérieurs à celui du variogramme, parmi lesquels on trouve le krigeage, il faut connaître la valeur du variogramme pour toutes les valeurs de h et de θ . Il devient alors nécessaire de modéliser le variogramme pour avoir un estimateur du variogramme quelle que soit la distance séparant deux points dans une direction donnée.

Pour modéliser le variogramme, on utilise des combinaisons linéaires d'expressions analytiques que l'on essaye d'ajuster au mieux aux variogrammes expérimentaux. Quelques exemples de modèles de variogrammes sont illustrés par la *figure 6.4*. Cette dernière montre les variogrammes pépitique, sphérique et cubique ainsi que des images correspondant à ces modèles. Le variogramme pépitique correspond à un bruit blanc.

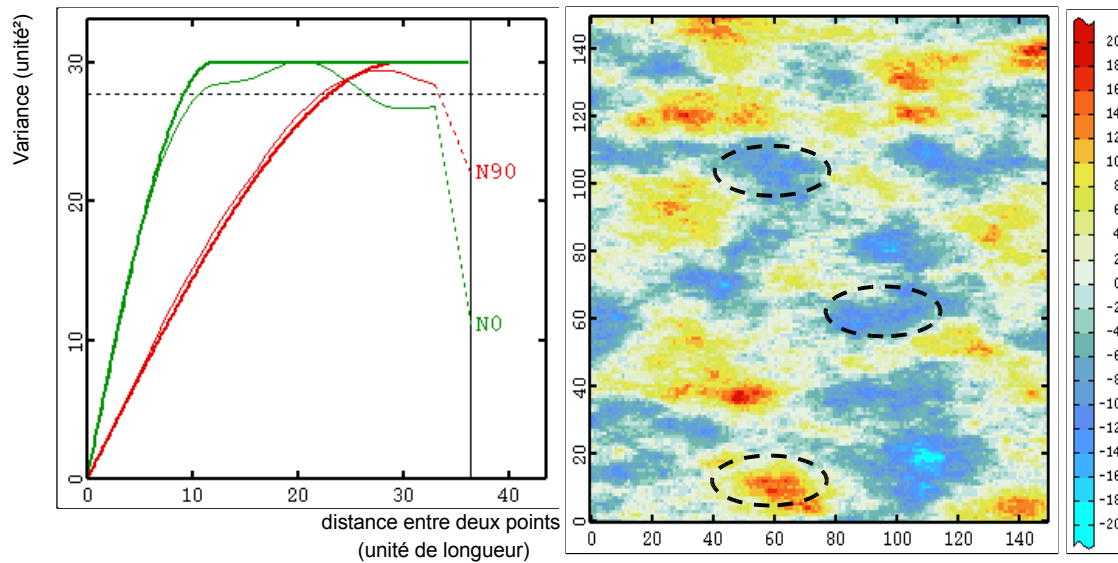


FIG. 6.3 – Illustration de l’anisotropie géométrique. La figure de gauche montre deux variogrammes en traits fins rouge et vert modélisés par les courbes en traits épais. Le variogramme rouge correspond à la direction N90 qui est la direction gauche-droite sur la carte 2D de la figure de droite. Le variogramme vert a été calculé dans la direction perpendiculaire N0 (haut bas sur la carte 2D). Les variogrammes ont une portée différente suivant la direction de calcul. Cela provient de structures plus allongées dans la direction N90 par rapport à la N0

Toutes les fonctions ne sont pas éligibles à la modélisation d’un variogramme. En effet, ces fonctions doivent répondre à un critère de positivité car, quelle que soit la combinaison linéaire de variables aléatoires, sa variance est nécessairement positive (par définition de la variance). Comme cette variance peut s’exprimer en fonction du variogramme dans le cas de modèles avec ou sans palier, il est nécessaire que le variogramme soit positif pour toutes les valeurs de h (dans le cas intrinsèque, il faut en plus que la somme des poids de la combinaison linéaire soit nulle).

En pratique, pour modéliser un variogramme, on utilise des modèles dont on sait qu’ils sont éligibles, ainsi que tous les modèles construits à partir de combinaisons linéaires de ces modèles, avec comme contrainte de n’avoir que des coefficients positifs. Lorsqu’on effectue le calcul de variogrammes directionnels, il est important de tous les modéliser de façon globale afin d’obtenir de bons résultats. La *figure 6.5* montre le résultat du calcul de variogrammes selon quatre directions, ainsi que la modélisation de ces variogrammes. Comme ils sont quasiment superposables, on peut les modéliser par un modèle isotrope (en noir).

6.2 Calcul de variogrammes expérimentaux sur une image sismique

Dans cette partie, nous présentons les résultats de quelques calculs de variogrammes expérimentaux d’images sismiques d’amplitudes. Dans ce cas, les données représentées par la

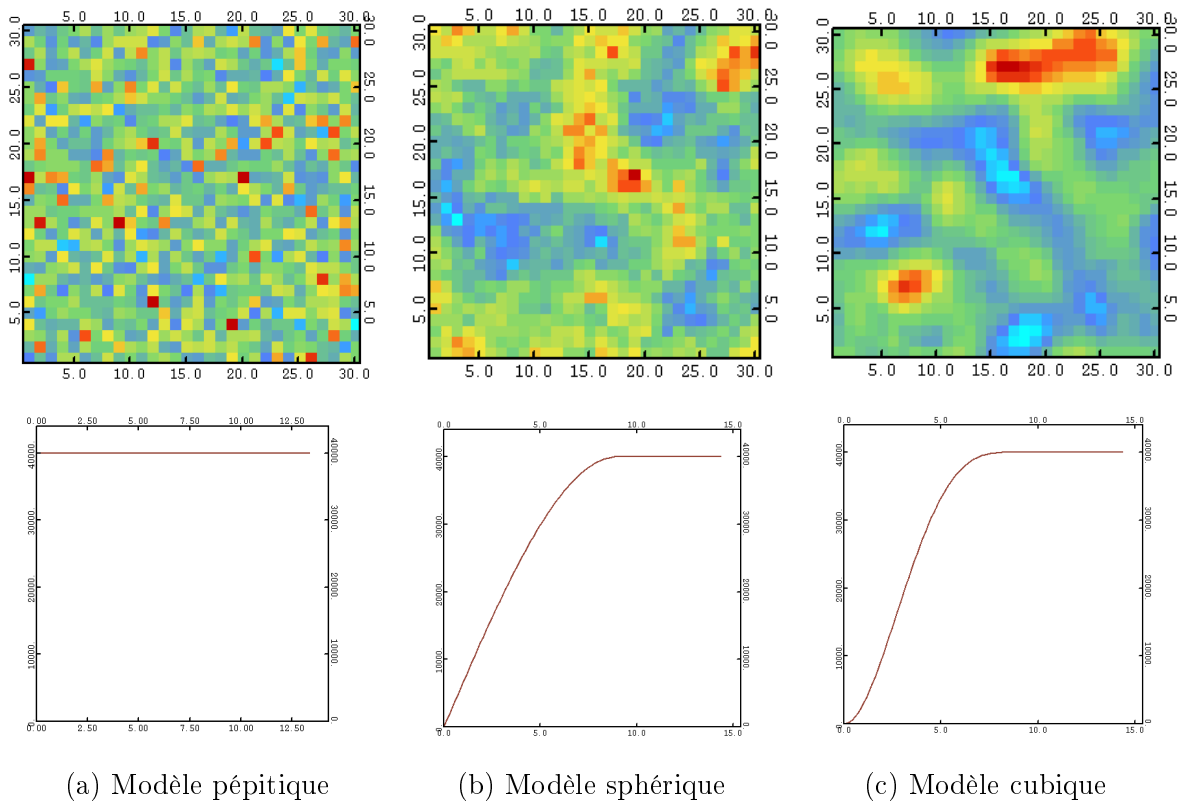


FIG. 6.4 – Différents exemples de fonctions de modélisation de variogramme

fonction aléatoire $Z(x)$ sont des données d'amplitude à la position x .

Afin de bien repérer les directions en 3D, nous avons choisi les angles d'Euler ([72]) comme référence d'orientation. En imagerie sismique, compte tenu de la structure quasiment horizontale des empilements géologiques, on peut, dans la plupart des cas, séparer la direction perpendiculaire au plan horizontal (direction temps ou profondeur) et les directions qui se trouvent dans le plan horizontal (dont les directions inline et crossline) ce qui rend les calculs un peu plus simples.

Les illustrations qui suivent proviennent de calculs réalisés à partir de l'image de la *figure 6.6*. Cette image est un sous-cube de l'une des images que nous avons utilisées dans les chapitres précédents, car nous avons ôté les deux premières et les deux dernières sections dans les dimensions inline et crossline afin de s'affranchir des érosions latérales des surfaces, dues aux étapes d'amincissement et de segmentation topologique. Nous avons procédé de même pour les images d'horizons obtenues à partir de cette image originale. Les dimensions du cube représenté sont donc $197 \times 197 \times 150$.

Un variogramme est dit fiable jusqu'à environ la moitié de la taille du champ d'étude dans la direction considérée. Pour les calculs des variogrammes en inline et en crossline, il ne faut donc considérer les courbes que pour des distance inférieures ou égales à cent voxels et pour les variogrammes dans la direction du temps, on ne considère que les distances inférieures à soixante quinze voxels.

Dans l'exemple donné dans la *figure 6.7*, les variogrammes sont calculés suivant les direc-

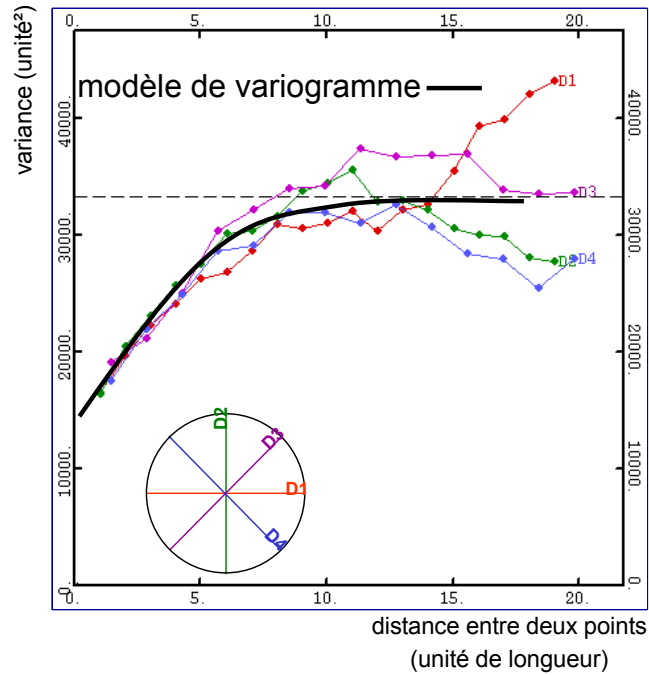


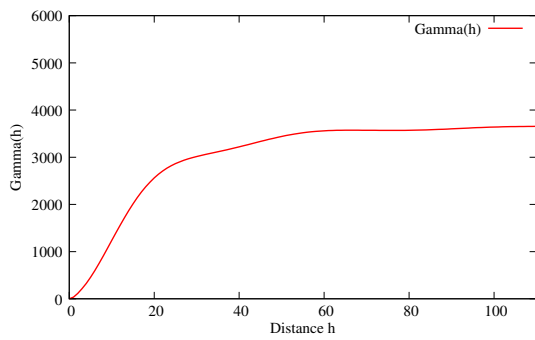
FIG. 6.5 – Calcul d'un variogramme selon les quatre directions principales de l'espace. La courbe noire représente un modèle de variogramme isotrope.



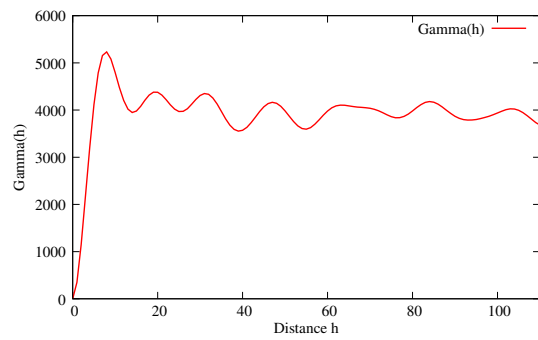
FIG. 6.6 – Deux vues de l'image originale sur laquelle ont été réalisés les calculs des variogrammes

tions principales de l'image (inline, crossline et temps).

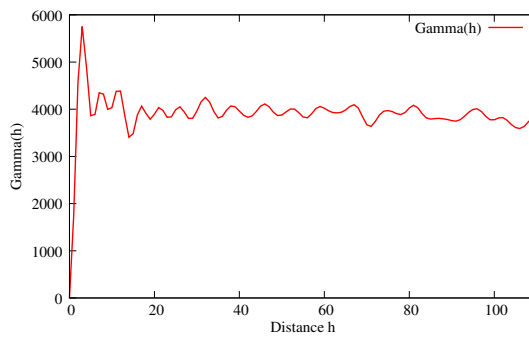
Pour analyser ces variogrammes, il est important d'observer simultanément les courbes et la figure 6.8. La direction inline (figure 6.7 (a)), correspondant à la direction inline sur la figure 6.8, montre en effet une stabilisation de la courbe pour une distance d'environ 40 voxels ce qui correspond approximativement à la distance à partir de laquelle on passe d'une phase sombre à



(a) Direction inline



(b) Direction crossline



(c) Direction temps

FIG. 6.7 – Variogrammes expérimentaux selon les directions inline, crossline et temps calculés sur le cube sismique de la *figure 6.6*

une phase claire et inversement. Suivant la direction crossline (*figure 6.7 (b)*), le variogramme montre des oscillations car cette direction est perpendiculaire aux stries que l'on peut voir sur la *figure 6.8*. Dans la direction temps (*figure 6.7 (c)*), le phénomène est encore plus marqué car la fréquence des oscillations des phases claires et des phases sombres est encore plus grande. Les variations observées sur les variogrammes illustrés par les *figures 6.7 (b) et (c)* les rendent difficiles à analyser. Dans la suite, nous proposons une solution pour limiter l'influence des oscillations dues au pendage sur les variogrammes dans la direction crossline.

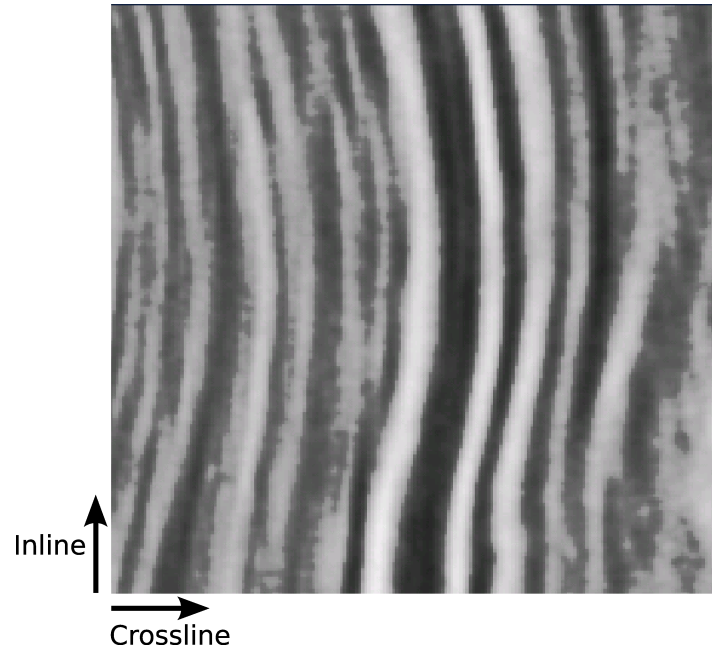


FIG. 6.8 – Plan horizontal à temps fixé (« Time slice ») extrait de l'image originale. Dimensions : 197×197

6.2.1 Le calcul de variogrammes expérimentaux en pratique

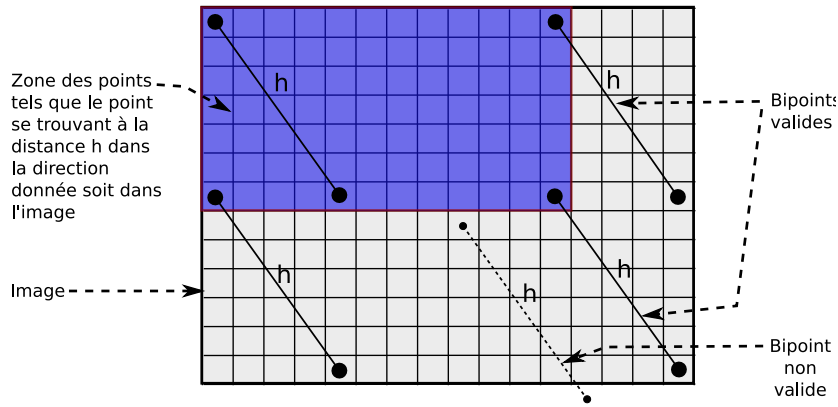
Pour réaliser les illustrations de ce chapitre, nous nous sommes munis d'outils de calcul de variogrammes classiques permettant de calculer des variogrammes sur des jeux de données irrégulièrement réparties dans l'espace.

Une illustration du fonctionnement de ces outils est présentée dans la *figure 6.9*

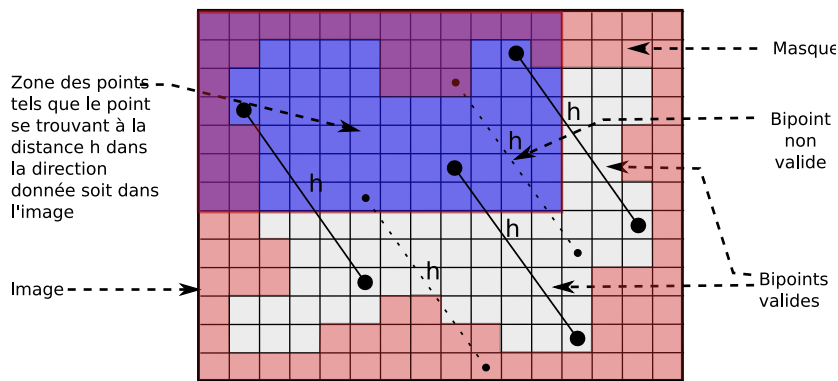
Nous avons également mis au point un outil permettant de calculer un variogramme sur un volume 3D section par section qui est fort utile pour le calcul des variogrammes géologiquement guidés présentés dans la section suivante. Cette méthode de calcul est présentée un peu plus en détail dans la *section 6.3.2*.

6.3 Variogramme géologiquement guidé

Cette partie traite d'une méthode de calcul de variogrammes suivant la géologie de la zone étudiée ce qui permet de réduire des problèmes dus au pendage, c'est à dire les oscillations autour du palier du variogramme. Elle est très proche des récents travaux réalisés par H.J.



(a) Données régulièrement échantillonnées



(b) Échantillonnage irrégulier : on munit l'espace d'un masque

FIG. 6.9 – Fonctionnement de l'opérateur de calcul de variogramme sur une image. Dans le cas d'un échantillonnage régulier et pour une distance h , on considère tous les bi-points distants de h et contenus dans le jeu de données. Dans le cas de données irrégulières, on ne considère que les bi-points distants de h et contenant effectivement un échantillon (information donnée par un masque)

Ligtenberg et al. dans [40]. La technique qu'ils ont développée consiste en une sorte d'aplatissement de la géologie du cube d'amplitude à partir des horizons extraits par un extracteur semi-automatique. De cette manière, ils obtiennent un jeu de données comportant un grand nombre de trous dus au redressement de la géologie. Pour redresser la géologie, ils utilisent la transformée de Wheeler [16]. Comme il est nécessaire d'interpoler les données entre les horizons extraits, ils utilisent deux méthodes selon que les données ont une structure complexe ou non entre les horizons considérés. Si la structure est peu complexe, ils utilisent des modèles prédéfinis d'interpolation. Si la structure est complexe, ils se basent sur les azimuts et les pendages calculés en chaque point.

Le calcul de telles données produit donc une étape supplémentaire dans la chaîne de traitement ce qui en allonge le temps. Il ajoute également des interprétations donc des incertitudes supplémentaires sur le résultat final. Afin de ne pas avoir à calculer ce cube pendage / azimut,

nous proposons ici une alternative. En effet, nous réalisons une horizontalisation des données d'amplitude que nous avons en interpolant géométriquement le pendage que nous avons calculé sur les horizons extraits par segmentation morphologique et topologique.

6.3.1 Définition du volume de travail

Notre méthode s'appuie sur les horizons extraits par les méthodes décrites aux *chapitres 3 et 4*. L'utilisateur commence par définir le volume de travail en choisissant deux horizons qui le délimitent parmi l'ensemble des structures segmentées et labellisées. Nous appelons ces horizons les horizons guides.

Comme ils ne sont pas nécessairement complets, nous interpolons la profondeur de ces horizons guides de manière à les compléter et à obtenir les surfaces de référence. Pour le moment, l'interpolation réalisée sur les profondeurs des horizons est une interpolation linéaire qui consiste à trouver, par régression linéaire, le plan qui interpole au mieux les points de la surface qui se trouvent au bord du trou. Cette interpolation n'est pas forcément la mieux adaptée pour boucher les trous d'une surface 3D. Des travaux sur la fermeture de trous en trois dimensions ont déjà été menés, comme, par exemple, ceux d'Aktouf et al. ([1]), qui permettraient de combler plus précisément les trous. Nous avons cependant choisi l'interpolation linéaire car, en première approximation, si on considère que les surfaces sont assez régulières, elle fournit une interpolation suffisante des trous de la surface et elle est facile à mettre en oeuvre. D'autres méthodes, comme le krigeage, sont envisageables pour obtenir une meilleure approximation de l'altitude des points de la surface dans les zones manquantes.

L'étape d'interpolation est illustrée par la *figure 6.10* qui présente quatre horizons guides. Les niveaux de gris représentent les altitudes : plus l'horizon est clair et plus l'horizon se trouve bas dans l'image. L'horizon guide 1 est l'horizon de référence qui sert de base pour les trois tests que nous faisons par la suite, à savoir le calcul de variogrammes dans les zones situées entre :

- les horizons guides 1 et 2 pour le test 1,
- les horizons guides 1 et 3 pour le test 2,
- les horizons guides 1 et 4 pour le test 3.

Pour chaque test, la zone qui se situe entre les deux horizons guides, illustrés dans la *figure 6.11 (a), (b) et (c)*, est notre volume de travail. Les volumes de travail que nous avons obtenus pour chacun des tests sont illustrés par les *figures 6.11 (d), (e) et (f)*.

6.3.2 Calcul du variogramme géologiquement guidé

Dans cette partie, nous décrivons notre méthode de calcul des variogrammes à l'aide des données extraites d'horizons interpolés à partir des horizons que nous avons segmentés.

Mode d'interpolation

Entre les deux horizons qui délimitent la zone d'étude, nous n'utilisons aucune information d'amplitude de l'image originale. Nous n'utilisons que l'information structurale apportée par les horizons guides. Par une interpolation géométrique, il est possible de créer une succession de surfaces artificielles d'épaisseur unitaire. Nous avons utilisé trois modes d'interpolation des horizons guides. Le premier consiste à créer des horizons parallèles à l'horizon guide supérieur (*figure 6.12 (a)*), le second, des horizons parallèles à l'horizon guide inférieur (*figure 6.12*

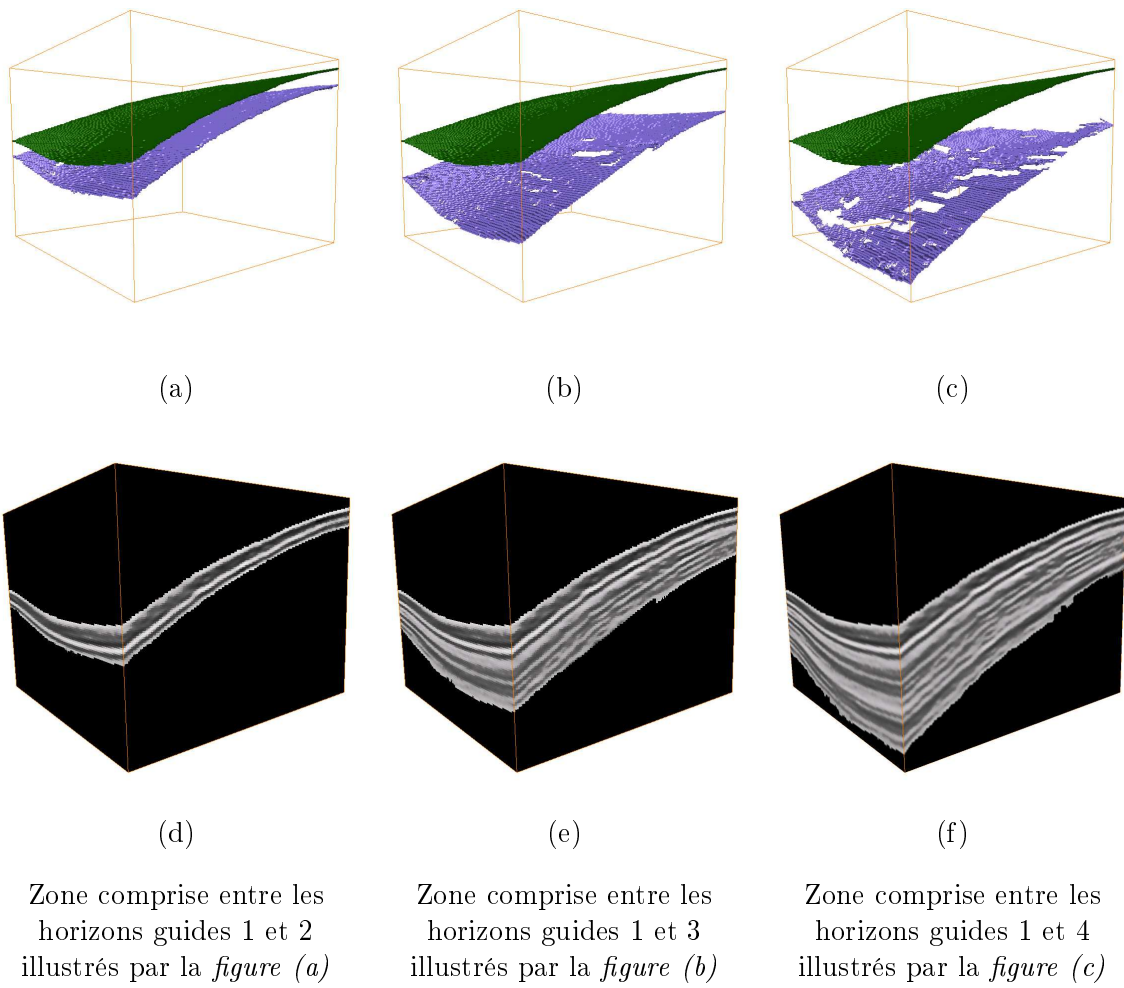


FIG. 6.11 – Zones d'intérêt pour chacun des trois tests. Ces zones correspondent aux points compris entre deux horizons guides

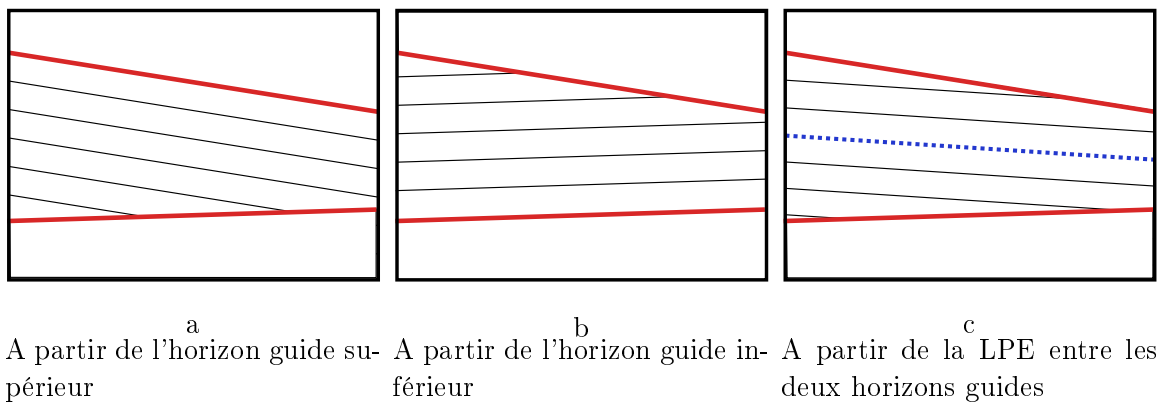


FIG. 6.12 – Modes d'interpolation

terpolation à partir de la couche supérieure peut simuler une déposition sur une base érodée, l'interpolation depuis l'horizon inférieur peut représenter un dépôt de sédiments suivi d'une érosion et l'interpolation à partir de la ligne de partage des eaux peut modéliser un empilement parallèle qui a subi une compaction plus forte à un endroit donné par rapport au reste de la zone étudiée.

Nous n'exploitons à aucun moment l'information des niveaux de gris de la région pour calculer les surfaces interpolées. Dans chaque cas, nous obtenons l'interpolation en calculant une distance à l'aide d'un élément structurant vertical, ce qui nous assure une épaisseur unitaire pour toutes les couches extraites. Dans la suite, nous appellerons ces modes d'interpolation, respectivement, « *top* », « *bottom* » et « *watershed* ».

Nous utilisons plusieurs modèles d'interpolation car nous ne connaissons pas *a priori* la séquence de dépôt des sédiments dans la zone d'intérêt. Plusieurs modes d'interpolation augmentent les chances de trouver celui qui fera la meilleure approximation de la géologie de la zone étudiée.

On peut remarquer que ces trois modes d'interpolation sont une simplification de la structure sédimentaire de la zone étudiée, et que chacun possède ses avantages et ses inconvénients, que nous illustrons par la suite.

Le résultat de cette interpolation est illustré par la *figure 6.13*, qui présente les interpolations obtenues pour les trois modes à partir des horizons guides 1 et 4 (test 3).

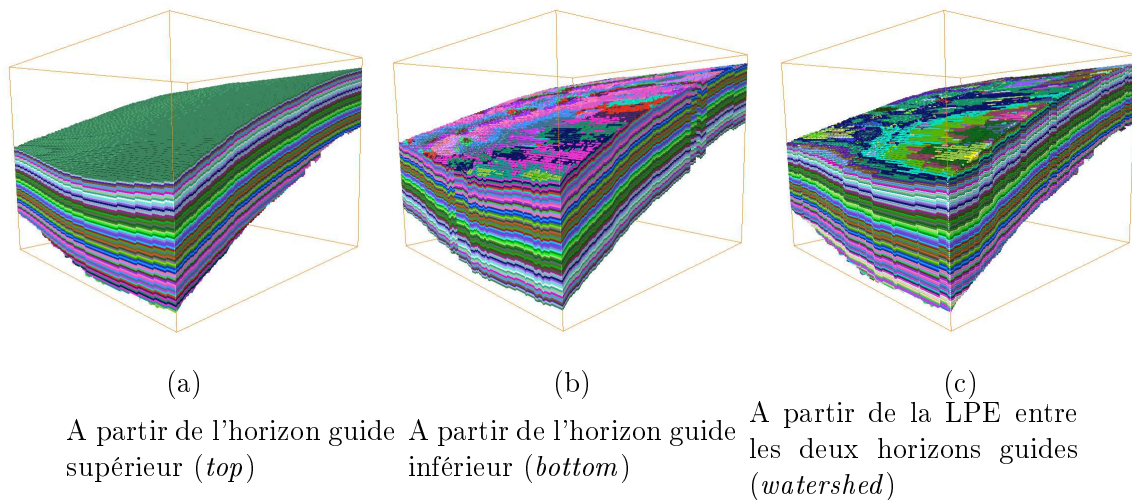


FIG. 6.13 – Résultats d'interpolation entre les horizons guide 1 et 4

Calcul du variogramme

Pour chaque surface ainsi interpolée, nous extrayons les valeurs d'amplitudes correspondantes de l'image d'amplitude originale. Nous obtenons ainsi une carte 2D des amplitudes sur laquelle nous calculons les deux valeurs suivantes pour chaque distance h :

- $N_c(h)$ = nombre de paires de points distants de h dans la couche c ,
- $\sum_{N_c(h)} [Z(x) - Z(x + h)]^2$.

Pour obtenir le variogramme sur l'ensemble de la zones d'intérêt, nous réalisons alors le calcul suivant :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \sum_{c=1}^{N_c} N_c(h)} \sum_{c=1}^{N_c} \sum_{N_c(h)} [Z(x) - Z(x+h)]^2. \quad (6.11)$$

Ceci équivaut à un calcul de variogramme sur un bloc de données dont la géologie a été redressée ou horizontalisée.

6.3.3 Résultats

Nous pouvons donc à présent établir une comparaison entre les variogrammes géologiquement guidés, calculés pour les différents types d'interpolation (*figure 6.12*) et les variogrammes calculés de manière classique sur les volumes de données des tests 1, 2 et 3. Les résultats sont donnés pour chaque test.

Commentaires généraux

Tout d'abord, il est intéressant de constater que les variogrammes en repère temps constant des *figures 6.14 ((a), (b))*, *figures 6.15 ((a), (b))* et *figures 6.16 ((a), (b))* changent peu en fonction de l'épaisseur de la zone d'étude.

Dans les variogrammes géologiquement guidés suivant la direction crossline (*figures 6.14 (d)*, *6.15 (d)* et *6.16 (d)*), on ne retrouve plus, d'une manière générale, les oscillations qu'on a pu observer sur les *figures 6.14 (b)*, *6.15 (b)* et *6.16 (b)*.

Il reste cependant des oscillations de forte fréquence à courte échelle (voir par exemple le départ du variogramme des *figures 6.14 (d)*, *figures 6.15 (d)* ou *figures 6.16 (d)*). On peut également noter que cet effet a tendance à diminuer avec l'épaisseur de la zone d'intérêt (Test1 \rightarrow Test3). Il est sans doute dû à une pente important, mal discrétisée, des horizons dans cette direction.

Test 1 : horizons guides 1 et 2 (*figure 6.14*)

Dans le cas où la zone d'intérêt a une petite épaisseur, on remarque que les variogrammes géologiquement guidés sont quasiment identiques en inline, quelle que soit l'interpolation (*figure 6.14 (c)*). En crossline, ils le sont à courte distance puis le variogramme *top* voit sa variabilité augmenter plus rapidement que les deux autres à partir de la distance 20 voxels (*figure 6.14 (d)*). Cette différence à grande distance peut indiquer que la géologie amorce une modification de l'orientation de sa structure à grande échelle. Le fait que le variogramme inline *watershed* (*figure 6.14 (c)*) présente une moins grande variabilité à grande échelle peut éventuellement accréditer cette hypothèse.

En général, la forme du variogramme (croissant dans la plupart des cas) permet de déduire qu'il y a une dérive des amplitudes le long de la couche extraite. On peut supposer que cette dérive provient d'un biais de l'horizontalisation (interpolation) : les couches ne seraient pas homogènes et l'horizontalisation n'étant pas parfaite, les données que nous extrayons sur chacune présenteraient une dérive qui se retrouverait ici. Cette dérive peut aussi, plus simplement, être due à une dérive « vraie » des données.

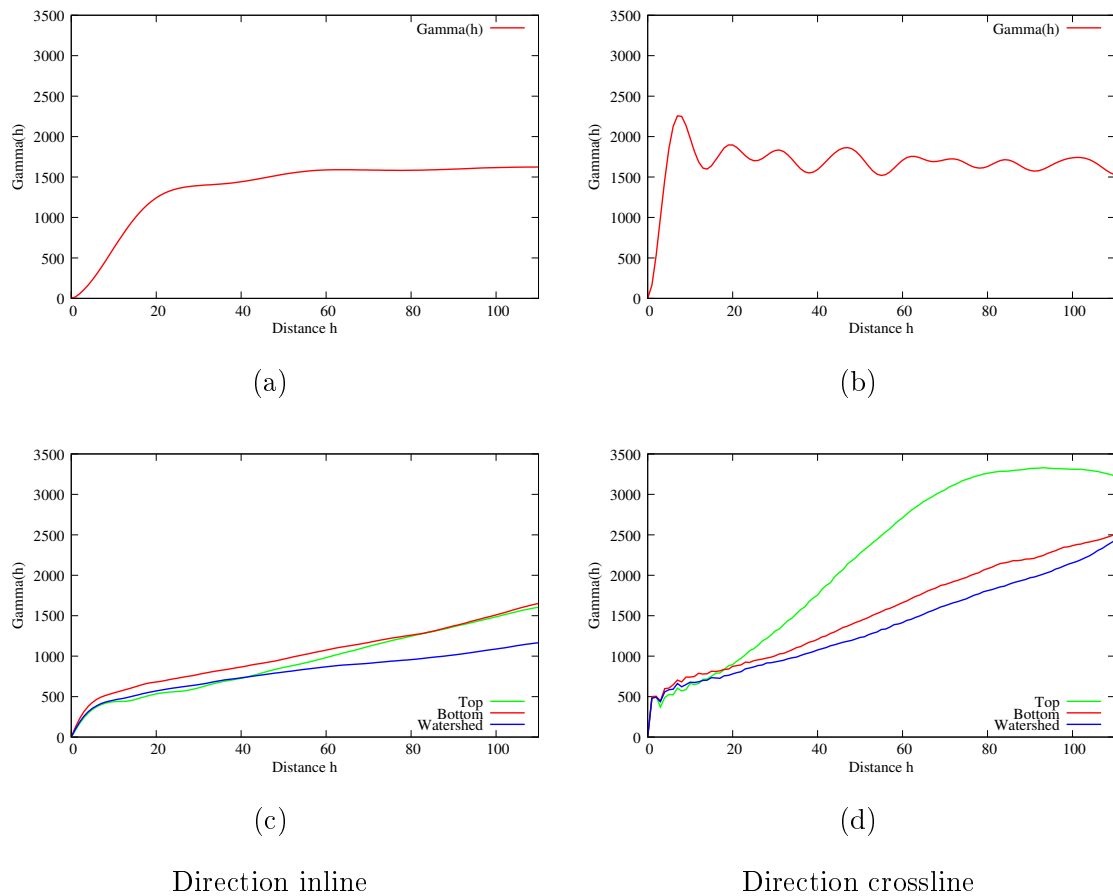


FIG. 6.14 – Région Test 1 : variogrammes calculés de manière classique selon les directions inline et crossline sur la zone d'intérêt ((a) et (b)) et variogrammes géologiquement guidés pour les trois modes d'interpolation ((c) et (d))

Test 2 : horizons guides 1 et 3 (figure 6.15)

Par rapport aux variogrammes du Test 1, on remarque que la variabilité globale augmente ce qui semble normal, car comme l'épaisseur de la zone d'intérêt est plus importante, les interpolations sont nécessairement moins bonnes. En effet, plus l'épaisseur est importante et plus on a de chance d'observer des différences de structure, d'orientation ou d'autres paramètres de la géologie qui au final feront que l'interpolation de type *bottom* sera de moins en moins adaptée pour les données du haut de la couche et vice versa. L'interpolation *watershed* étant une interpolation à partir d'une moyenne des surfaces supérieures et inférieures de la couche, le variogramme correspondant semble être un mélange des deux autres (au moins à courte échelle pour le variogramme crossline).

Le variogramme inline pour l'interpolation *top* de la figure 6.15 (c) nous permet de penser que, pour ce test, c'est ce variogramme qui est le meilleur en moyenne pour interpoler les données, car il présente une plus faible variabilité, ce qui signifie qu'on a une meilleure minimisation de l'effet de pendage. Quelques oscillations semblent réapparaître sur le variogramme crossline *bottom* (figure 6.15 (d)) ce qui peut signifier que l'horizontalisation à partir de l'horizon inférieur ne correspond pas vraiment à la géologie de la zone étudiée.

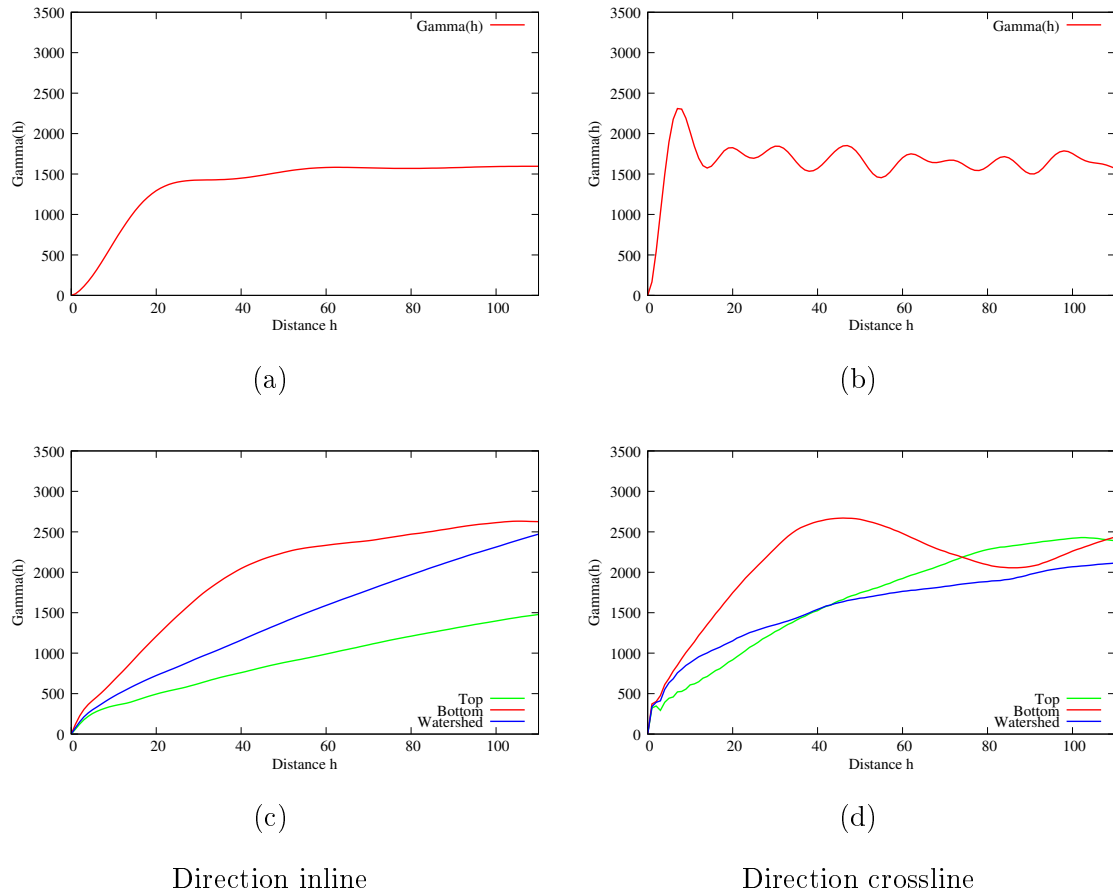


FIG. 6.15 – Région Test 2 : variogrammes calculés de manière classique selon les directions inline et crossline sur la zone d'intérêt ((a) et (b)) et variogrammes géologiquement guidés pour les trois modes d'interpolation ((c) et (d))

Test 3 : horizons guides 1 et 4 (figure 6.16)

La variabilité des données est plus forte à courte échelle que pour les deux autres tests : on atteint plus vite le palier ce qui peut nous amener à penser que les particularités de chaque interpolation sont noyées dans la masse des données. Nous n'observons alors plus que des variogrammes moyens qui nous cachent d'éventuelles particularités. Il devient difficile de choisir un mode d'interpolation parmi les trois. La figure 6.16 (c) pourrait nous laisser penser que l'interpolation *top* serait encore préférable mais compte tenu de la figure 6.16 (d), il apparaît délicat de se prononcer avec certitude.

Pour mieux comprendre le phénomène de moyenne des variogrammes, qui intervient lorsqu'on augmente l'épaisseur de la zone d'intérêt, il faut observer un peu plus en détail ce qui se passe à divers endroits de cette zone.

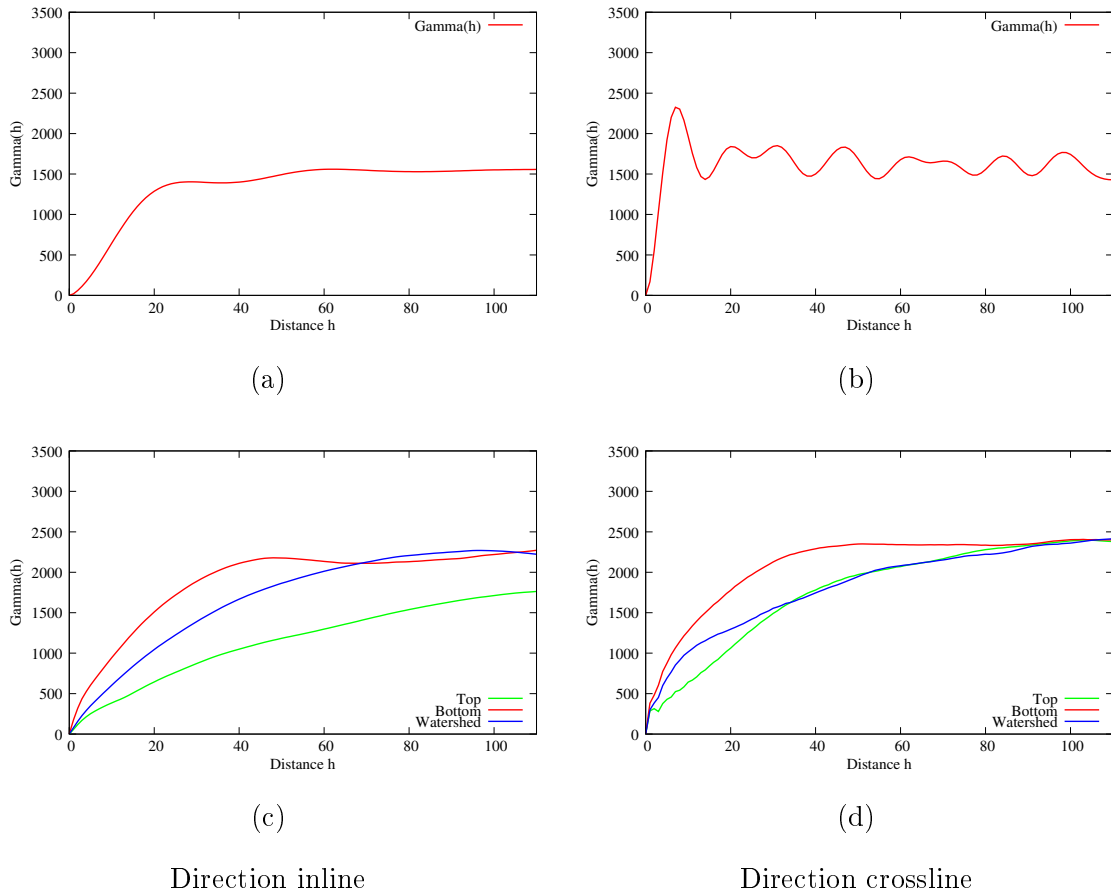


FIG. 6.16 – Région Test 3 : variogrammes calculés de manière classique selon les directions inline et crossline sur la zone d'intérêt ((a) et (b)) et variogrammes géologiquement guidés pour les trois modes d'interpolation ((c) et (d))

Étude des variogrammes calculés de manière classique sur des surfaces interpolées

Pour faire ces observations, nous avons calculé des variogrammes le long de surfaces extraites dans trois endroits différents de la zone d'intérêt pour les trois types d'interpolation. De ces variogrammes, nous espérons pouvoir extraire des informations supplémentaires, cachées dans les variogrammes globaux des figures 6.14 ((c), (d)), 6.15 ((c), (d)) et 6.16 ((c), (d)).

Nous avons donc extrait certaines cartes d'amplitude à différents niveaux de la zone d'intérêt du test 3 afin d'apporter un complément d'information sur les variations à l'intérieur même de la couche. Nous avons choisi le test 3 car il concerne la zone la plus épaisse. Les différences entre les variogrammes seront alors plus visibles.

Pour pouvoir comparer les résultats pour les trois types d'interpolation, nous avons sélectionné, pour chacun, trois horizons. Dans chacun des trois modes d'interpolation, le bleu est un horizon extrait dans le haut de la couche, le vert dans la partie centrale et l'horizon rouge est extrait du bas. Ces horizons sont illustrés dans la figure 6.17. Les décrochements que l'on observe dans l'horizon guide inférieur ne sont pas dus à l'interpolation des trous mais à la segmentation.

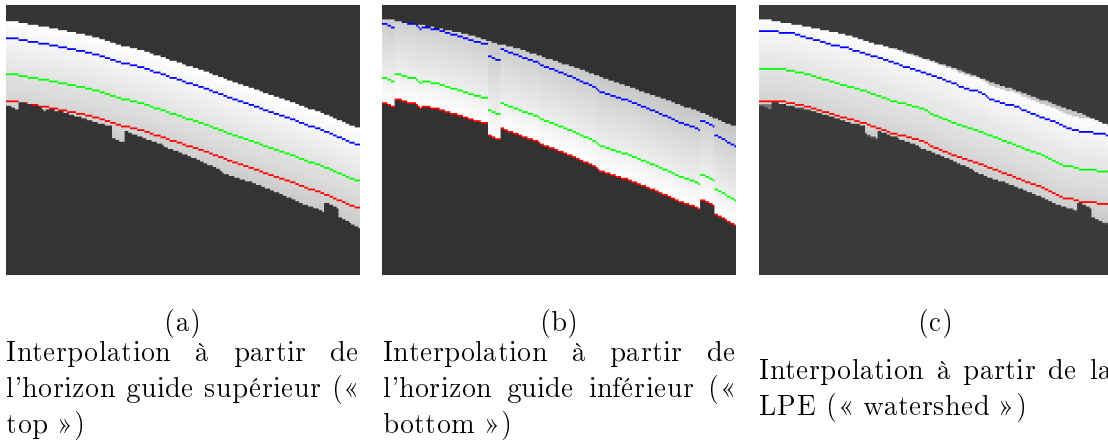


FIG. 6.17 – Couches extraites pour calculer et comparer les variogrammes à différentes profondeurs pour les trois modes d'interpolation

Les horizons de la même couleur ne sont pas vraiment positionnés au même endroit et n'ont pas, par construction, la même forme. Les comparaisons que l'on peut faire à partir des variogrammes calculés sur les cartes d'amplitudes extraites à partir de ces horizons sont quelque peu hasardeuses car les données extraites ne réfèrent pas nécessairement aux mêmes événements sismiques. Ces variogrammes ont pour but d'analyser un peu plus finement ce qui se passe à différents niveaux de la zone d'intérêt.

Les cartes 2D correspondant aux amplitudes extraites le long de chacun des horizons en couleur de la *figure 6.17*, pour chaque mode d'interpolation, sont compilées dans la *figure 6.18*. Horizontalement, on trouve les surfaces extraites à un niveau équivalent (même couleur) pour les 3 modes d'interpolation. Verticalement, on a suivant le mode d'interpolation, le niveau d'extraction : en haut (bleu), au milieu (vert) et en bas (rouge) de la zone d'intérêt (verticalement dans la *figure 6.18*).

On remarque que les cartes d'amplitudes extraites ne sont pas très homogènes. Cependant, pour chacune des cartes, nous donnons les valeurs de niveaux de gris minimum et maximum, la moyenne ainsi que la variance. Une faible dynamique (max-min) doublée d'une variance faible doit être un bon signe, car cela indique que les données extraites sont plutôt homogènes et donc que l'horizontalisation est assez réussie pour cet horizon. On remarque alors que plus on s'écarte de l'horizon de référence et plus la variance et la dynamique augmentent. Cela indique ainsi que l'interpolation fonctionne bien de manière assez locale mais que plus on s'éloigne et moins l'horizontalisation est cohérente avec la géologie. La moyenne indique si la carte extraite se trouve plutôt sur un horizon haut en amplitude ou non.

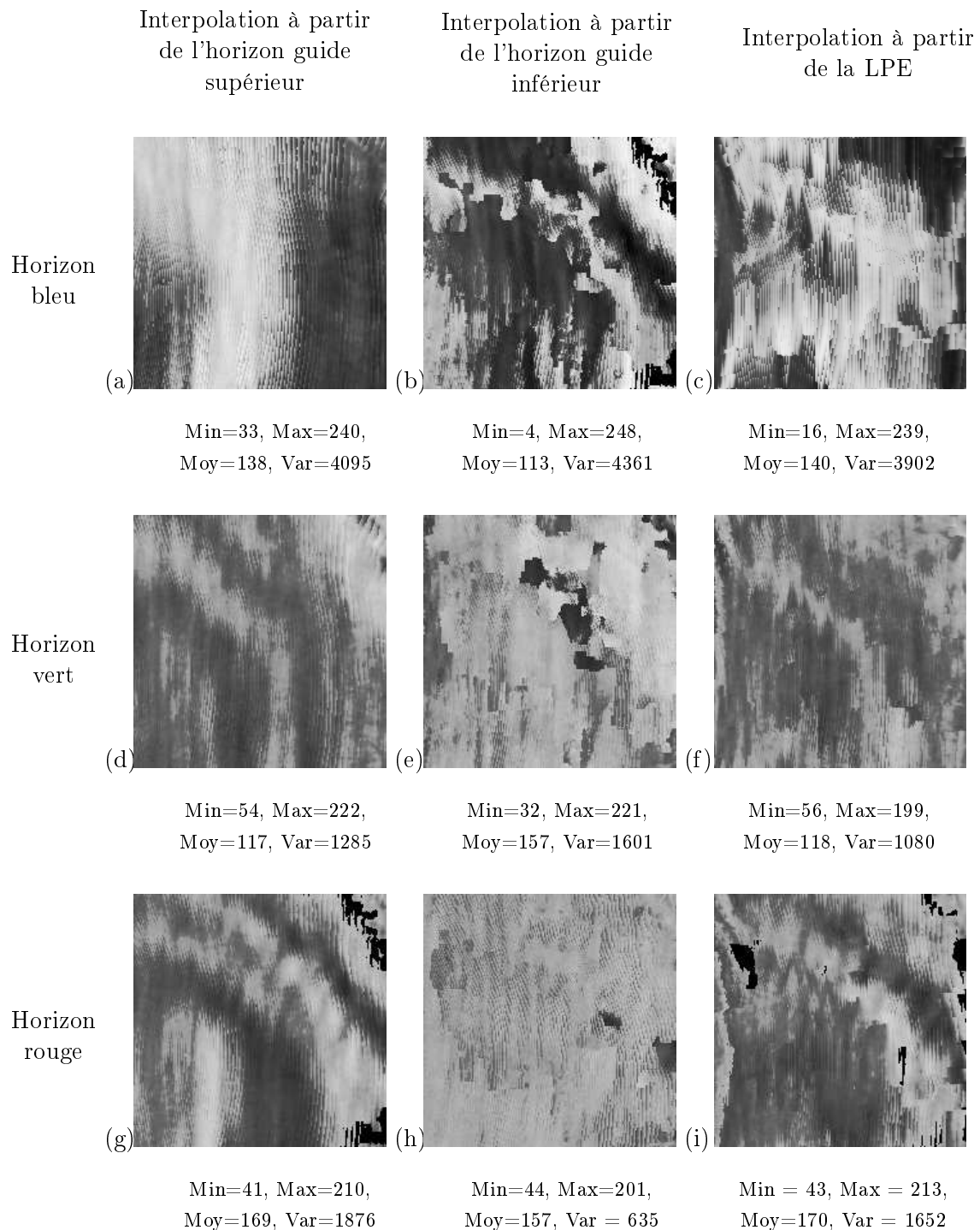


FIG. 6.18 – Images des amplitudes extraites pour chaque type d'interpolation et pour chacune des profondeurs des horizons extraits. Horizontalement : crossline. Verticalement : inline. Les dimensions de ces cartes sont : 197×197 . Le maximum, le minimum et la variance des niveaux de gris sont donnés pour chaque image

Les variogrammes associés à ces cartes d'amplitudes sont représentés sur les *figures 6.19* et *6.20*. La *figure 6.19* présente les variogrammes inline et crossline des trois modes d'interpolation pour chacune des positions de référence (bleu, vert et rouge) dans la zone d'intérêt. Par exemple, la *figure 6.19 (a)* présente le variogramme inline, selon chaque mode d'interpolation, de la partie haute de la zone d'intérêt.

La *figure 6.20*, quant à elle, représente, pour un mode d'interpolation donné, les variogrammes inline et crossline associés à chaque position des horizons (haut, milieu, bas) dans la zone d'intérêt. Par exemple, la *figure 6.20 (d)* donne les variogrammes crossline des trois niveaux (bleu, vert et rouge (*figure 6.17*)) de la zone d'intérêt pour le mode d'interpolation depuis l'horizon inférieur.

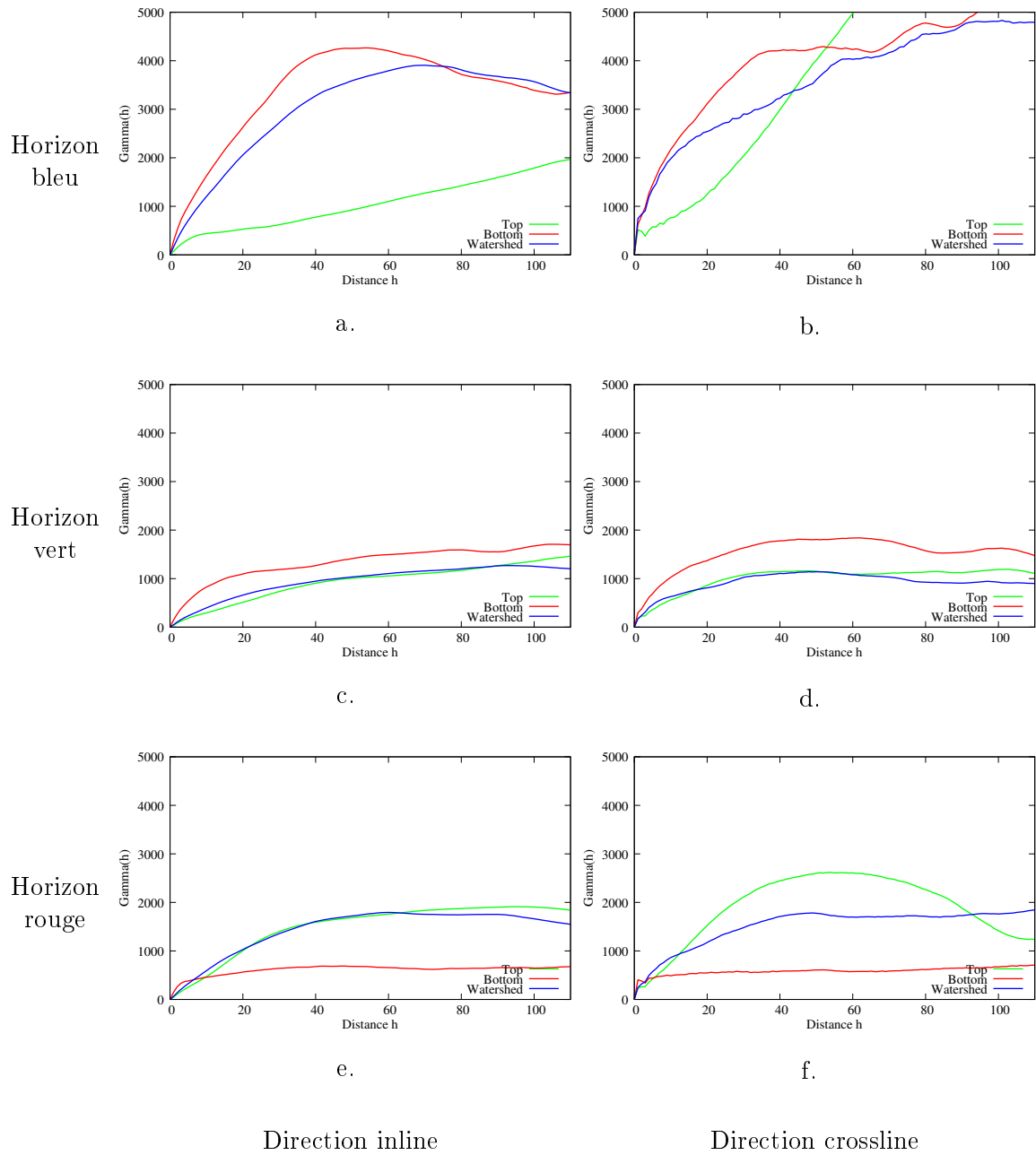


FIG. 6.19 – Variogrammes des couches correspondant aux horizons de chaque couleur pour les 3 types d'interpolation

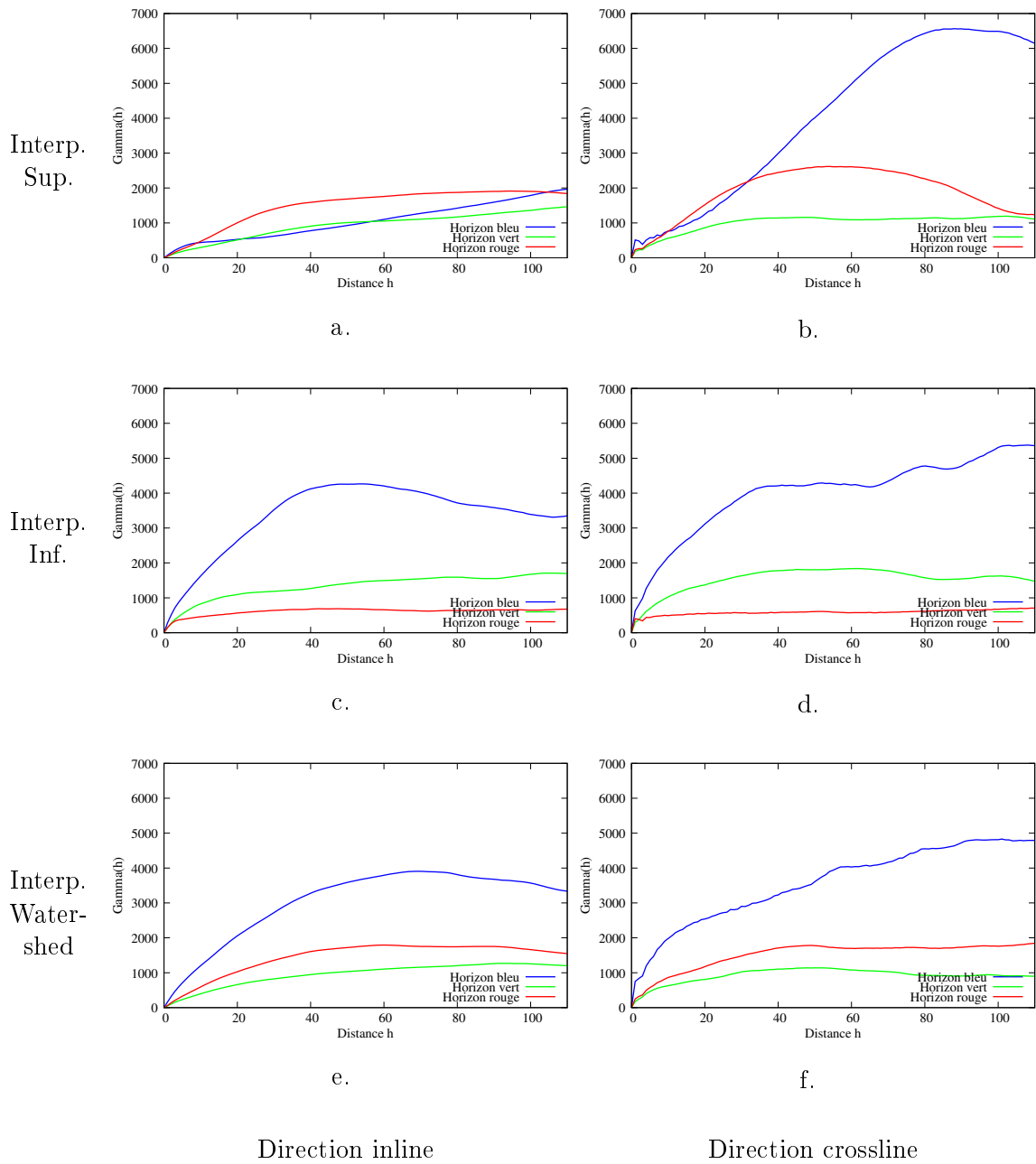


FIG. 6.20 – Variogrammes des trois horizons (rouge, vert et bleu) pour chaque type d'interpolation

En observant les variogrammes de la *figure 6.19*, on peut voir que les interpolations *top* et *bottom* font une meilleure approximation respectivement de l'horizon haut et de l'horizon bas. Cela peut sembler logique mais il faut remarquer que le variogramme de la *figure 6.19 (b)* montre une belle continuité à faible distance et une forte croissance à grande échelle de l'interpolation *top*. Bien que ceci puisse sembler étrange, on peut l'expliquer en regardant la *figure 6.18 (a)* : il y a effectivement une variation à grande échelle dans la direction crossline. L'approximation de l'empilement sédimentaire à partir de l'horizon supérieur pourrait avoir atteint ses limites avant l'horizon bleu.

Cependant, lorsqu'on regarde la *figure 6.19 (d)*, on observe que l'interpolation *top* est parmi les moins mauvaises pour l'horizon extrait au milieu, si on considère le critère de variabilité minimale. Comme dans les courbes de la *figure 6.16 (c)* et *(d)*, on observe un palier à la distance de 20 voxels. On peut penser que la longueur des structures est de cet ordre de grandeur (*figure 6.18 (d), (e), (f)*)

Dans la *figure 6.20*, on devrait avoir dans chaque direction de calcul du variogramme une courbe plus lisse et une variabilité moins forte pour l'horizon le plus proche de l'horizon de référence (par exemple l'horizon rouge pour l'interpolation *bottom*) car on peut supposer que l'approximation faite par l'interpolation géométrique se dégrade au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la référence. C'est le cas partout à l'exception des variogrammes crossline pour l'interpolation *top* (*figure 6.20 (b)*) et dans une moindre mesure pour la direction crossline (*figure 6.20 (a)*). En effet, dans le premier cas, c'est l'horizon vert qui présente la plus faible variabilité et la meilleure régularité puis l'horizon rouge et enfin l'horizon bleu. on attendait l'ordre bleu – vert – rouge. Ceci peut s'expliquer par les structures à longue portée (environ 80 voxels) que l'on peut observer dans la dimensions crossline sur la carte d'amplitude de la *figure 6.18 (a)*. Cette carte possède une variance importante ce qui explique la forte variabilité du variogramme étudié.

L'observation des variogrammes de la *figure 6.20* corrobore cependant l'idée que les interpolations que nous avons réalisées pour horizontaliser la géologie de chacune des zones d'intérêt ne sont pas parfaites et que leur qualité s'amenuise au fur et à mesure que l'épaisseur de cette zone d'intérêt augmente. Outre le fait que cela semble normal, il faut également mettre en avant qu'une interpolation à grande distance est risquée puisqu'une grande quantité d'événements peuvent survenir entre l'horizon guide servant de repère pour l'interpolation et le niveau des données que l'on extrait. Il y a donc des corrections à apporter à notre modèle d'interpolation.

Étude des variogrammes calculés sur les horizons guides

Les cartes d'amplitudes de la *figure 6.21* sont extraites des quatre horizons guides qui nous ont servi pour délimiter les zones de calcul des variogrammes géologiquement guidés. Nous avons également indiqué, pour chaque carte, les valeurs minimum et maximum des niveaux de gris ainsi que la variance des amplitudes. On remarque que la dynamique de ces cartes est du même ordre de grandeur que celle des cartes de la *figure 6.18* à l'exception de la carte d'amplitude de la *figure 6.21 (a)*. La variance, quant à elle, est dans chaque cas bien moindre que les variances des cartes de la *figure 6.18*. Les horizons le long desquels nous avons extrait ces données ont été extraits par segmentation et sont donc sensés être parmi les plus hauts en amplitude – ce qui semble vérifié par les fortes moyennes d'amplitude – et une certaine régularité (variabilité faible). Il apparaît donc normal que ces cartes donnent l'impression

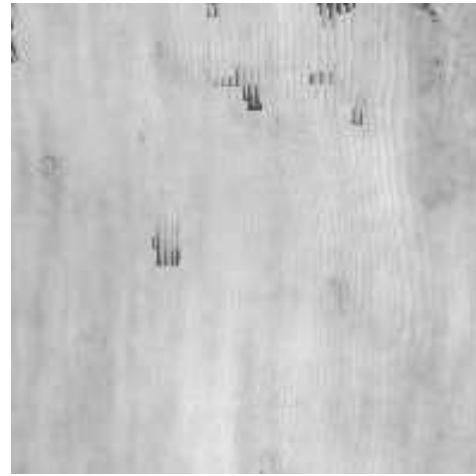
d'une bonne horizontalisation de la géologie.



(a)

Horizon guide n°1

Min=182, Max=255,
Moy=217, Var=142



(b)

Horizon guide n°2

Min=68, Max=232,
Moy=197, Var=181



(c)

Horizon guide n°3

Min=76, Max=221,
Moy=188, Var=322



(d)

Horizon guide n°4

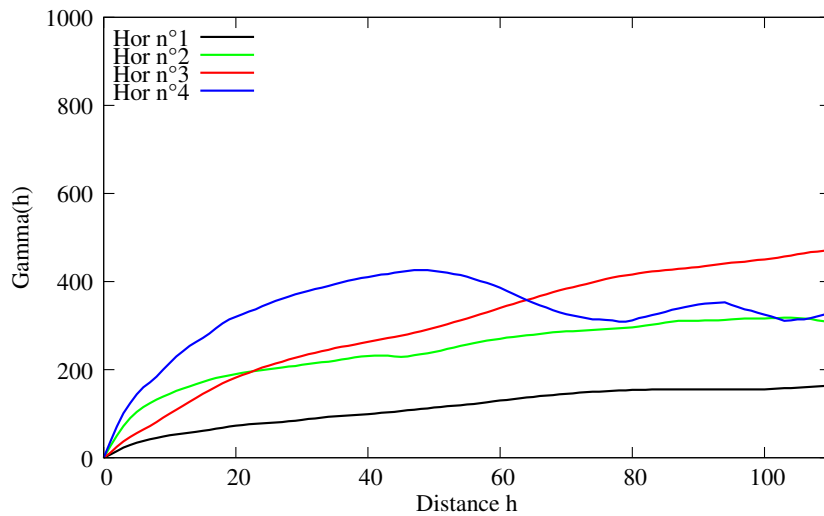
Min=48, Max=214,
Moy=179, Var=181

FIG. 6.21 – Amplitudes extraites le long des horizons guides

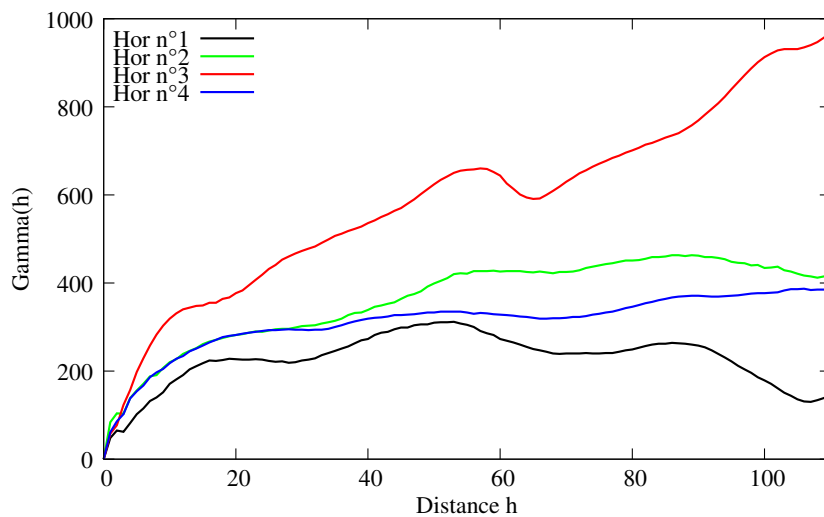
Si on observe les variogrammes correspondant aux cartes d'amplitudes de la *figure 6.21*, on voit que dans la direction inline, ils présentent tous une faible variabilité et que l'horizon

n°4 semble atteindre son palier un peu plus tôt que les autres. Cela est dû aux structures à courte échelle que l'on peut observer sur la carte d'amplitudes de la *figure 6.21 (d)*.

Dans la direction crossline, le variogramme de l'horizon n°1 présente une oscillation régulière qui correspond à l'ondulation que l'on peut observer horizontalement dans la *figure 6.21 (a)*. Cela n'affecte cependant pas la variabilité qui reste assez faible à grande distance. Le variogramme de l'horizon n°3 semble croître indéfiniment. Dans la direction horizontale sur la *figure 6.21 (c)*, on peut observer que le niveau de gris moyen de l'image augmente de la gauche vers la droite. Cette dérive explique la tendance croissante de ce variogramme et donc la forte variabilité qu'il atteint.



(a) Direction inline



(b) Direction crossline

FIG. 6.22 – Variogrammes calculés sur les quatre horizons guides dans les directions inline et crossline

L'observation de ces variogrammes apporte une grande quantité d'informations et ouvre des perspectives dans la recherche d'une interpolation plus réaliste de la géologie comprise entre deux horizons guides.

6.3.4 Amélioration des résultats

La méthode de calcul de variogrammes en tenant compte de l'orientation des couches géologiques que nous avons présentée dans ce chapitre semble perfectible. En effet, les modes d'interpolation de la géométrie du sous-sol ne sont pas nécessairement adaptés à toutes les situations que l'on peut rencontrer dans le volume d'intérêt considéré. Nous avons observé que ce genre d'approximation fonctionne dans un petit voisinage autour de l'horizon de référence mais qu'à grande distance, l'horizontalisation n'est pas fiable. Il est cependant possible d'améliorer notre modèle. Nous proposons ici quelques axes de progression :

- On peut tout d'abord mettre au point un nouveau mode d'interpolation qui essaierait de coller un peu mieux à la géologie de la zone d'intérêt. Nous avons pensé à un watershed itératif. Ce dernier consisterait à calculer le watershed entre les horizons guides puis entre ce watershed et les horizons guides et ainsi de suite jusqu'à ce que la zone soit entièrement couverte par les surfaces interpolées. Ce mode d'interpolation se rapproche du modèle linéaire qui existe déjà. Il n'y a cependant pas de modification de la taille d'un voxel, comme dans ce dernier cas.
- On peut également créer des subdivisions du cube, ou utiliser les subdivisions que nous avons déjà créées de manière à réduire l'épaisseur des zones d'intérêt. Les données extraites ont alors plus de chance d'être proches de la géologie comme nous l'avons vu au travers de nos exemples.
- On peut également créer un mode d'interpolation qui prendrait en compte les niveaux de gris afin de tenir compte de la structure de la géologie dans la zone d'étude. Cela pourrait se faire, par exemple, à l'aide d'une segmentation plus fine de la zone d'étude car, comme l'ont montré les variogrammes calculés sur les horizons extraits par segmentation, les résultats, dans ce cas, sont bien meilleurs. L'horizontalisation suivrait alors la géologie au plus près.

Ces idées d'amélioration semblent constituer de bonnes pistes pour permettre de calculer au mieux des variogrammes géologiquement guidés dans des zones où nous ne connaissons pas le pendage des structures géologiques.

6.4 Conclusion

Le variogramme est l'un des outils de base en géostatistique, et plus particulièrement en filtrage géostatistique. Dans ce chapitre, nous avons proposé une façon de le calculer à partir des surfaces que nous avons extraites des données par segmentation morphologique et topologique. Cette méthode, inspirée des grilles stratigraphiques, permet de s'affranchir de l'effet de pendage qui, en rendant difficile la modélisation du variogramme expérimental, détériore la qualité des filtres géostatistiques. Enfin, cet outil peut également participer à

l'élaboration du modèle géologique en ôtant le bruit qui gêne l'interprétation visuelle des données.

Chapitre 7

Conclusion

7.1 Apports de ces travaux

Ces travaux de recherche se sont déroulés dans un cadre industriel. Ils ont été en permanence guidés et contraints par des contextes opérationnels émanant directement d'acteurs du monde pétrolier.

Les outils que nous avons développés durant nos recherches ont, dans l'ensemble, bien répondu aux attentes qu'en avaient les industriels. Par leurs critiques constructives, ces derniers nous ont d'ailleurs permis d'améliorer nos algorithmes de manière itérative, jusqu'à l'obtention d'algorithmes fiables.

La segmentation morphologique

L'un des apports majeurs de nos travaux est la méthode de segmentation par bandes basée sur la ligne de partage des eaux hiérarchique. Elle permet d'extraire des surfaces sismiques de données d'amplitude en s'affranchissant des problèmes engendrés par les discontinuités des structures. Nous obtenons en sortie un ensemble de structures correspondant aux principales structures du cube sismique traité. Cette technique s'est avérée robuste et fonctionne même sur des images sismiques présentant des dépôts sédimentaires non horizontaux.

La segmentation topologique

Les outils topologiques de traitement d'images peuvent être appliqués dans de nombreux domaines et sont particulièrement bien adaptés au traitement d'images binaires. Leur application aux images sismiques est, à notre connaissance, une première.

Bien qu'inspiré de multiples travaux réalisés sur le sujet, l'algorithme d'amincissement que nous avons proposé est inédit et permet d'amincir les surfaces segmentées sous la contrainte de conservation des points les plus significatifs. Sa lenteur reste son inconvénient majeur.

La segmentation topologique de surfaces n'est pas une technique très récente, mais son application à la segmentation d'horizons sismiques, telle que nous l'avons introduite dans nos travaux, constitue une manière originale de séparer les surfaces connectées. Couplée à cette technique, la méthode que nous proposons pour segmenter les cas particuliers de connections entre surfaces constitue également une nouveauté.

Les résultats que nous obtenons par combinaison de la segmentation morphologique et de la segmentation topologique sont appréciés par les industriels intéressés par nos travaux pour leur qualité, mais également pour leur temps de calcul qui, selon eux, est très concurrentiel. Les performances de l'algorithme sont en grande partie dues à l'implémentation de l'algorithme de segmentation hiérarchique à base de files d'attente hiérarchiques développé au Centre de Morphologie Mathématique.

Les applications

L'extraction de surfaces que nous avons réalisée a ouvert la voie à de nombreuses applications, à portée industrielle, ayant trait à l'amélioration de la connaissance et du traitement des images sismiques d'amplitude.

Ainsi, le contrôle qualité du pointer d'horizons sismiques, permettant de vérifier qu'une surface extraite suit bien la structure géologique qu'elle est censée pointer, constitue une avancée technique intéressante pour qui veut valider la qualité du pointer d'une structure avant de poursuivre son traitement. Cette technique permet d'obtenir le pointer corrigé. Une simple

différence des profondeurs de chacune des deux structures permet de visualiser rapidement les zones problématiques.

Dans un autre contexte applicatif, la technique de hiérarchisation *a posteriori* des horizons sismiques que nous avons proposée est innovante. Elle offre, en effet, la possibilité d'ordonner les surfaces extraites suivant un critère défini selon les besoins, qui peut utiliser aussi bien les caractéristiques des surfaces elles-mêmes que les valeurs des données initiales correspondantes. Il est cependant assez facile d'imaginer intégrer d'autres critères pour rendre cette hiérarchisation encore plus utile et performante.

Nous avons introduit une façon nouvelle de calculer un variogramme. Le variogramme géologiquement guidé est une application de la segmentation de structures sismiques. Elle revêt une grande importance dans l'amélioration de la qualité du filtrage géologiquement guidé, en permettant de diminuer l'effet du pendage des couches géologiques.

7.2 Retombées académiques et industrielles

Communication

Sur le plan industriel, l'une des retombées majeures est le dépôt d'une demande de brevet [6] concernant l'extractions hiérarchique d'événements cohérents dans une image sismique.

Dans une volonté de communication de nos travaux, plus axée sur le monde de la recherche, nous avons également participé à deux congrès majeurs dans les disciplines abordées dans ce mémoire. Le premier est l'« *International Symposium on Mathematical Morphology* », congrès international de morphologie mathématique qui s'est déroulé à Paris en 2005. Nous y avons réalisé la présentation orale de nos travaux concernant l'application d'outils morphologiques aux images sismiques 3D. Un article [21] est paru dans les actes de la conférence.

Le second concerne la géométrie discrète et ses applications (« *Discrete Geometry for Computer Imagery* ») tenu à Szeged (Hongrie) en 2006. Il a donné lieu à une présentation de nos travaux sur la segmentation topologique de surfaces sismiques sous la forme d'un poster et a également donné lieu à une publication [22] dans les actes du congrès.

Un troisième article [23], présentant une partie de nos travaux, a été soumis au journal « *Computers and geosciences* ».

Industrialisation

Dans le cadre de ces travaux, la société ERM.S a engagé une phase d'industrialisation du procédé de segmentation par méthodes morphologique et topologique. Cette industrialisation, réalisée en partenariat avec une société pétrolière, se présente sous la forme d'un « plugin » dans un logiciel « open source » de visualisation et de traitement des données sismiques appelé OpendTect. La librairie de morphologie mathématique utilisée est la librairie Aphélon (ADCIS) bien connue dans le domaine industriel. Le développement en est au stade de prototype, mais la phase d'industrialisation devrait aboutir rapidement à une solution opérationnelle pouvant être proposée à d'autres industriels du domaine pétrolier.

7.3 Perspectives

Les travaux que nous avons réalisés peuvent être perçus de deux manières. La première est une vision réservée de ce que nous avons fait : « *oui, c'est vrai, ça fonctionne, mais il y*

a beaucoup d'améliorations possibles », l'autre est une vision plus ouverte, plus curieuse : « *Effectivement, ça fonctionne, mais que peut-on faire d'autre avec ?* ». Dans cette partie, nous avons décidé d'explorer les deux visions séquentiellement.

Améliorations possibles

Bien que nos algorithmes fonctionnent bien sur toutes les images sismiques de qualité raisonnable que nous avons eues en test, de nombreuses améliorations restent possibles.

Comme nous l'avons déjà évoqué dans le *chapitre 3*, le temps de traitement, déjà performant, peut être réduit en utilisant le fait que l'algorithme de segmentation par cylindres est parallélisable. L'algorithme de segmentation morphologique étant déjà rapide cette amélioration ne semble cependant pas vitale.

L'algorithme d'amincissement de surfaces sismiques que nous avons proposé donne de bons résultats. Il mérite cependant d'être optimisé car, dans l'état actuel, il est inconcevable de l'appliquer à des structures ayant un trop grand nombre de points.

De plus, il serait bon, comme nous en avons déjà parlé dans le *chapitre 4*, de tester des algorithmes d'amincissement en niveaux de gris afin de pouvoir positionner et évaluer notre algorithme par rapport à d'autres algorithmes existant. Nous pourrions également voir si ces derniers produisent le même résultat que le nôtre dans un contexte d'amincissement de structures sismiques.

Le calcul des variogrammes géologiquement guidés est inspiré des grilles stratigraphiques et comme nous l'avons montré, il possède des limites. Nous avons déjà exprimé quelques façons de l'améliorer en trouvant des modes d'interpolation plus adaptés, comme par exemple une ligne de partage des eaux itérative pour calculer l'empilement de surfaces, ou en utilisant un plus grand nombre de surfaces pour restreindre encore plus la zone d'intérêt dans laquelle on calcule le variogramme. Il est également envisageable d'obtenir plus d'horizons guides et / ou des horizons guides intermédiaires pour cette zone. Pour ce faire, on peut resegmenter de manière plus fine cette dernière en tenant compte de l'information apportée par les amplitudes.

Toutes ces améliorations possibles ne doivent pas faire perdre de vue que nous avons déjà un ensemble d'algorithmes qui fonctionne de façon tout à fait satisfaisante. L'une des questions primordiales qu'il faut alors se poser est : « *Que peut-on faire avec ?* ».

Autres applications opérationnelles

Le traitement des données sismiques est, comme nous l'avons déjà dit dans le *chapitre 2*, long et complexe. Il comporte de multiples phases, depuis l'acquisition des données jusqu'à l'interprétation finale, qui déboucheront ou non sur l'exploitation du gisement. Distinguons trois grandes phases dans le traitement d'images sismiques. Dans chacune de ces phases, on peut identifier des contextes opérationnels utilisant nos travaux.

Tout d'abord, dans le contexte du **traitement des données**, celui dans lequel nous avons en partie déjà travaillé, il est possible de trouver des applications de notre segmentation de surfaces géologiques. Les surfaces extraites peuvent, en effet, servir pour produire un modèle de lancer de rayons permettant d'améliorer une étape de traitement appelée migration dont nous avons déjà parlé dans le *chapitre 2* et qui consiste à replacer les points des données à leur véritable place à l'aide de méthodes mathématiques. Dans ce même contexte de traitement, il semble possible de trouver une utilisation de nos méthodes de segmentation pour réaliser un pointer de vitesses sur les données pré-stack permettant d'horizontaliser plus finement les

traces correspondant à une même verticale avant sommation (voir *chapitre 2*). L'amélioration du filtrage rentre dans ce contexte.

La seconde grande phase, dans le traitement de données sismiques, est l'étape d'**inversion**. Elle consiste à passer des données d'amplitude de l'onde sismique aux valeurs d'impédance (grandeur géologique) pour chaque point de l'image. L'application consisterait alors à segmenter ces cubes d'impédance.

Dans la troisième phase, appelée **interprétation**, qui consiste à rassembler toutes les données disponibles afin de prendre la décision d'exploiter ou non le réservoir, il y a plusieurs opérations auxquelles nous pourrions contribuer. Tout d'abord, dans l'interprétation structurale, qui consiste à construire un modèle géométrique du sous-sol de manière à localiser le réservoir pétrolier, nous avons déjà extrait les structures à tendance horizontale. Il reste cependant d'autres éléments à extraire comme par exemple, les failles. En segmentant un cube de semblance (attribut sismique mettant en valeur les failles), par nos méthodes il serait sans doute possible de les pointer automatiquement. Une autre opération, à laquelle nos méthodes de segmentation pourraient apporter une aide précieuse, est l'interprétation stratigraphique. Cette opération consiste, une fois que l'on a localisé le réservoir, à se concentrer dessus pour en extraire le maximum d'informations, afin de prendre les meilleures décisions pour la mise en exploitation. Cette opération pourrait nécessiter une resegmentation des données de manière à obtenir un modèle structural plus fin de la zone du réservoir. La méthode de segmentation morphologique et topologique semble particulièrement indiquée dans ce contexte.

Il existe d'autres contextes opérationnels dans lesquels les méthodes mises en place lors de nos travaux peuvent trouver une application. Le domaine de l'imagerie sismique est vaste et s'étend désormais à la sismique 4D. Comme nous l'avons brièvement vu dans le *chapitre 3*, ce domaine, que nous avons un peu exploré, se développe rapidement et tend à ouvrir de nouvelles perspectives de recherches et d'applications.

Bibliographie

- [1] Z. Aktouf, G. Bertrand, and L. Perroton. A three-dimensional holes closing algorithm. *Pattern Recognition Letters*, 23 :523–531, 2002.
- [2] P. Bakker. *Image structure analysis for seismic interpretation*. PhD thesis, Technische Universiteit Delft, 2002.
- [3] G. Bertrand and C. Lohou. Three dimensional parallel thinning algorithms based on P-simple points. In *Denis Richard's birthday conference*, Clermont-Ferrand, 2002.
- [4] G. Bertrand and G. Malandain. A new characterization of three-dimensional simple points. *Pattern Recognition Letters*, 15 :169–175, Février 1994.
- [5] S. Beucher. *Segmentation d'images et morphologie mathématique*. PhD thesis, Juin 1990.
- [6] S. Beucher, E. Decencière, L. Sandjivy, C. Magneron, and T. Faucon. Brevet français no fr2884636 : Procédé de détermination hiérarchique d'événements cohérents dans une image.
- [7] S. Beucher and C. Lantuéjoul. Use of watersheds in contour detection. In *International workshop on image processing, real-time edge and motion detection*, Septembre 1979.
- [8] F. Billette, S. Le Begat, P. Podvin, and G. Lambare. Practical aspects and applications of 2D stereotomography. *Geophysics*, 68(3) :1008–1021, 2003.
- [9] T.N. Bishop, K.P. Bube, R.T. Cutler, R.T. Langan, P.L. Love, J.R. Resnick, R.T. Shuey, D.A. Spindler, and H.W. Wyld. Tomographic determination of velocity and depth in laterally varying media. *Geophysics*, 50(06) :903–923, 1985. Slide set available from SEG Publications Department.
- [10] A. Blinov and M. Petrou. Reconstruction of 3D horizons from 3D seismic datasets. *IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing*, 43(6), 2005.
- [11] G. Bourdarot. *Essais de puits : méthodes d'interprétation*. Technip, 1996.
- [12] E. Bournay Bouchereau. *Analyse d'images par transformée en ondelettes ; application aux images sismiques*. PhD thesis, Université Joseph Fourier Grenoble, 1997.
- [13] X. Boy de la Tour. *Le pétrole. Au delà du mythe*. Technip, 2004.
- [14] J.P. Chilès and P. Delfiner. *Geostatistics : modeling spatial uncertainty*. Wiley, 1999.
- [15] M. Couprie and G. Bertrand. Topological grayscale watershed transformation. volume 3168, pages 136–146, 1997.
- [16] P. de Groot, de Bruin, G., and N Hemstra. How to create and use 3d wheeler transformed seismic volumes. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, pages 1038–1042, 2006.
- [17] E. Decencière and S. Beucher. Rapport final de collaboration entre ERM.S et le Centre de Morphologie Mathématique. Novembre 2003.

- [18] P. Dokládal. *Grey-scale image segmentation : a topological approach*. PhD thesis, Université de Marne la Vallée, France et University of Technology of Brno, Czech Republic, 2000.
- [19] X. Emery. *Géostatistique linéaire. Cours C-166*. Ecole des mines de Paris, CG, 2001.
- [20] M. Faraklioti and M. Petrou. Horizon picking in 3D seismic data volumes. *Machine Vision and Applications*, 15 :216–219, 2004.
- [21] T. Faucon, E. Decencière, and C. Magneron. Morphological segmentation applied to 3D seismic data. In Ch. Ronse, L. Najman, and E. Decencière, editors, *Mathematical Morphology : 40 Years On*, Computational Imaging and Vision, pages 475–484, Avril 2005.
- [22] T. Faucon, E. Decencière, and C. Magneron. Application of surface topological segmentation to seismic imaging. In *Proceedings of the 13th International Conference on Discrete Geometry for Computer Imagery (DGCI 2006)*, Lecture Notes in Computer Science, pages 506–517, Octobre 2006.
- [23] T. Faucon, E. Decencière, and C. Magneron. Morphological segmentation and labeling of horizons in 3D seismic images. Technical Report N-33/06/MM, École Nationale Supérieure des Mines de Paris / Centre de Morphologie Mathématique, 2006.
- [24] M. Fernández, A. Mavilio, and M. Tejera. Texture segmentation of a 3D seismic section with wavelet transform and gabor filters. In *15th International Conference on Pattern Recognition, 2000. Proceedings*, volume 3, pages 354–357, Septembre 2000.
- [25] H.J. Grubb and A.T. Walden. Characterising seismic time series using the discrete wavelet transform. In *56th International Meeting of EAGE*, Vienna, 1994.
- [26] D. Hale. Atomic meshes : from seismic imaging to reservoir simulation. In *8th European Conference on the Mathematics of Oil Recovery, 2002. Proceedings*, Freiberg, Germany, Septembre 2002.
- [27] D. Hale and J. Emmanuel. Seismic interpretation using global image segmentation. *73th Annual International Meeting, Society of Exploration Geophysicists*, 2003.
- [28] R.W. Hall and C.Y. Hu. Time-efficient computations of 3D topological functions. *Pattern Recognition Letters*, 17 :1017–1033, 1996.
- [29] E. Harrigan, J.R. Kroh, W.A. Sandham, and T.S. Durrani. Seismic horizon picking using an artificial neural network. In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. ICASSP-92.*, volume 3, pages 105–108, 1992.
- [30] T. Hastie, R. Tibshirani, and J. Friedman. *The elements of statistical learning*, chapter Linear methods for regression, pages 50–54. Springer series in statistics. Springer, 2001.
- [31] L. Hatton, M. Worthington, and J. Makin. *Seismic data processing : theory and practice*. Blackwell Publishing, Incorporated, 1986.
- [32] G. Henry. *Sismique réflexion : principes et développements*. Technip, 1997.
- [33] C.J. Hilditch. Linear skeletons from square cupboards. In B. Meltzer and D. Michie, editors, *Machine Intelligence, Vol. 4*, pages 403–420. Edinburgh Univ. Press, 1969.
- [34] M.K. Hubbert. Energy from fossile fuels. *Science*, 109(2823) :103–109, 1949.
- [35] M.K. Hubbert. Nuclear energy and the fossile fuels. Technical Report 95, Shell Development Company, Exploration and Production Reserach Division, June 1956.

-
- [36] N. Keskes, A. Boulanouar, and O. Faugeras. Application of image analysis techniques to seismic data. In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, ICASSP'82*, volume 7, pages 855–858, 1982.
- [37] N. Keskes, S. Guillon, M. Donias, P. Baylou, and F. Pauget. Brevet français no fr2808336 : Méthode d'interprétation chrono-stratigraphique d'une section d'un bloc sismique.
- [38] T.Y. Kong and A. Rosenfeld. Digital topology : introduction and survey. *Computer Vision, Graphics, And Image Processing*, 48(1) :357–393, Avril 1989.
- [39] D.G. Krige. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand. *Journal of the Chemistry, Metal and Mining Society of South Africa*, 52(6) :119–139, 1951.
- [40] H.J. Ligtenberg, G. de Bruin, N. Hemstra, and C. Geel. Sequence stratigraphic interpretation in the wheeler transformed (flattened) seismic domain. *EAGE 68th Conference and Exhibition, Vienna, Austria*, Juin 2006.
- [41] J. Lomask, B. Biondi, and J. Shragge. Image segmentation for tracking salt boundaries. *SEG Technical Program Expanded Abstracts*, 23 :2443–2446, 2004.
- [42] P.L. Love and M. Simaan. Segmentation of a seismic section using image processing and artificial intelligence techniques. *Pattern Recognition*, 18(6) :409–419, Mars 1985.
- [43] C. Magneron, L. Sandjivy, and M. Vasseur. 3D seismic amplitude filtering using dip steered geostatistics. *EAGE 68th Conference and Exhibition, Vienna, Austria*, Juin 2006.
- [44] G. Malandain, G. Bertrand, and N. Ayache. Topological segmentation of discrete surfaces. *International Journal of Computer Vision*, 10(2) :183–197, Septembre 1993.
- [45] J.L. Mari, F. Glangeaud, and F. Coppens. *Traitement du signal pour géologues et géophysiciens*. Technip, 2001.
- [46] G. Matheron. Pour une analyse krigeante des données régionalisées. *Report N-732, Centre de Géostatistiques, ENSMP Fontainebleau, France*, 1982.
- [47] F. Meyer. Un algorithme optimal pour la ligne de partage des eaux. In *8ème congrès de reconnaissance des formes et intelligence artificielle*, volume 2, pages 847–857, Lyon, France, Novembre 1991. Première référence que je connais pour la LPE par FAH.
- [48] F. Meyer. Hierarchies of partitions and morphological segmentation. In *IEEE Workshop on Scale-Space and Morphology in Computer Vision and ICCV 2001*, Vancouver, Canada, 2001.
- [49] F. Meyer and S. Beucher. Morphological segmentation. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 1(1) :21–46, Septembre 1990.
- [50] E. Monsen, T. Randen, L. Sønneland, and J.E. Odegard. *Mathematical methods and modelling in hydrocarbon exploration and production*, volume 7 of *Mathematics in Industry*, chapter Geological model building : a hierarchical segmentation approach, pages 213–245. Springer / Schlumberger, 2005.
- [51] D.G. Morgenthaler. Three-dimensional simple points : serial erosion, parallel thinning, and skeletonization. Technical Report 1009, Computer Vision Laboratory, Computer Science Center, University of Maryland, College Park, MD, Février 1981.
- [52] K. Moueddene. *Analyse d'images en sismique : pretraitement et extraction d'informations par la morphologie mathématique*. PhD thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1987.

- [53] L. Najman and M. Schmitt. A dynamic hierarchical segmentation algorithm. In J. Serra and P. Soille, editors, *Mathematical Morphology and its applications to signal processing (Proceedings ISMM'94)*, Fontainebleau, France, Septembre 1994. Kluwer Academic Publishers.
- [54] M.Q. N'Guyen. *Analyse multi-dimensionnelle et analyse par les ondelettes des signaux sismiques*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.
- [55] S.M. O'Maley and I.A. Kakadiaris. Towards robust structure-based enhancement and horizon picking in 3D seismic data. In *Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR'04)*, 2004.
- [56] K. Palágyi. A 3-subiteration 3D thinning algorithm for extracting medial surfaces. *Pattern Recognition Letters*, 23 :663–675, 2002.
- [57] K. Palágyi and A. Kuba. Directional 3D thinning using 8 subiterations. In G. Bertrand, M. Couprie, and L. Perroton, editors, *Proc. 8th Internat. Conf. on Discrete Geometry for Computer Imagery*, Lecture Notes in Computer Science, pages 325–336, 1999.
- [58] K. Palágyi and A. Kuba. A parallel 3D 12-subiteration thinning algorithm. 61 :199–221, 1999.
- [59] C.J. Pike. *Wavelets in geophysics*, volume 4 of *wavelet analysis and its applications*, chapter Analysis of high resolution marine seismic data using the wavelet transform. Academic Press, London, 1994.
- [60] I. Pitas and C. Kotropoulos. Texture analysis and segmentation of seismic images. In *International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. ICASSP-89.*, volume 3, pages 1437–1440, 1989.
- [61] I. Pitas and C. Kotropoulos. A texture-based approach to the segmentation of seismic images. *Pattern Recognition*, 25 :929–945, Janvier 1992.
- [62] E. Robein. *Vitesses et techniques d'imagerie en sismique réflexion : principes et méthodes*. Lavoisier, 1999.
- [63] D. Rutovitz. Pattern recognition. *J. Royal Statist. Soc.*, 129 :504–530, 1966.
- [64] S. Svensson, I. Nyström, and G. Sanniti di Baja. Curve skeletonization of surface-like objects in 3D images guided by voxel classification. *Pattern Recognition Letters*, 23 :1419–1426, 2002.
- [65] M.T. Taner. Attributes revisited. *Rock Solid Image Houston Texas*, 1992.
- [66] W.M. Telford, L.P. Geldart, and R.E. Sheriff. *Applied geophysics*. Cambridge University Press, 2e edition, 1990.
- [67] N. Thirion, J. Mars, P. Volant, and J.L. Mari. Wavelet transform : application to acoustic logging. *Revue de l'Institut Français du Pétrole*, 49(2), Mars, Avril 1994.
- [68] Y.F. Tsao and K.S. Fu. A 3D parallel skeletonwise thinning algorithm. In *Proceedings IEEE Pattern Recognition Image Processing Conference*, pages 678–683, 1982.
- [69] C. Vachier. *Extraction de caractéristiques, segmentation d'images et morphologie mathématique*. PhD thesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1995.
- [70] C. Vachier and F. Meyer. Extinction values : a new measurement of persistence. *IEEE Workshop on Non Linear Signal/Image Processing*, pages 254–257, Juin 1995.

- [71] L. Valet, G. Mauris, P. Bolon, and N. Keskes. Seismic image segmentation by fuzzy fusion of attributes. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50 :1014–1018, Août 2001.
- [72] Wikipédia. Angles d'Euler — Wikipédia, l'encyclopédie libre, 2006.
- [73] Wikipédia. Pic pétrolier — Wikipédia, l'encyclopédie libre, 2006.
- [74] Wikipédia. Théorème de Jordan — Wikipédia, l'encyclopédie libre, 2006. [En ligne ; Page disponible le 13-novembre-2006].
- [75] O. Yilmaz. *Investigation in geophysics*. Society of Exploration Geophysicist, 1994.
- [76] S. Yokoi, J. Toriwaki, and T. Fukumura. Topological properties in digital binary pictures. *Systems Comput. Controls*, 4 :32–40, 1973.