

Détection de lignes caractéristiques sur maillages triangulés d'acquisition LIDAR Application à la géologie

Dimitri Kudelski^{1,2}, Sophie Viseur¹ et Jean-Luc Mari²

¹Laboratoire de Géologie des Systèmes et des Réservoirs Carbonatés - Université de Provence - Aix-Marseille I

²LSIS - Université de la Méditerranée - Aix-Marseille II

Résumé

Dans cet article, nous présentons un algorithme pour la détection, depuis des modèles numériques 3D d'affleurements représentés par des maillages triangulés, de lignes correspondant à des limites de corps géologiques. Afin de détecter de tels éléments, l'approche proposée est fondée sur des propriétés géométriques telles que les courbures principales et leurs dérivées. Les passages par zéro de ces dérivées caractérisent des lignes particulières appelées lignes de crêtes pour les zones convexes et lignes de ravins pour les zones concaves. Il est alors possible de construire un ensemble de polygones qui représentent les crêtes et les ravins. Pour terminer, nous appliquons un filtrage directionnel afin de ne conserver que les éléments géologiques orientés dans un sens particulier. L'algorithme que nous proposons vise à définir une base pour la création d'un outil destiné à assister les géologues durant l'analyse et l'interprétation géologiques d'affleurements numériques 3D.

Mots clé : modélisation géométrique, géométrie différentielle, courbures discrètes, lignes de crêtes, lignes de ravins

1. Introduction

Lors de ces dernières années, beaucoup de travaux en matière de détection automatique de lignes caractéristiques, et plus particulièrement de lignes de crêtes et de ravins, ont été réalisés (par exemple [PKS*01, OBS04, YBS05]). Les domaines d'application sont nombreux comme par exemple l'analyse de structures anatomiques [MAM97], la segmentation de surfaces [SF04], la simplification de maillages [YBS05], le rendu non-photo réaliste [JDA07] ou encore la reconstruction de modèles géologiques structuraux [Nam08].

En géologie, la technologie *LIDAR*[†] permet d'acquérir un ensemble de points 3D, ainsi que l'intensité de réflexion des lasers envoyés, d'une falaise ou d'une façade de roche mise à nue, appelée *affleurement*. Cet ensemble de points est ensuite traité par des logiciels de géo-modélisation construisant une surface triangulée sous contraintes représentant la géométrie de l'affleurement. L'utilisation de telles surfaces est alors imposée dans notre chaîne de traitements. Le plaquage de pho-

tos sur cette surface permet d'obtenir une image 3D de cet affleurement. Les modèles numériques 3D ainsi construits sont généralement appelés *DOM*[‡] [BKJ05]. À partir de ces données, nous proposons de détecter, de manière semi-automatique, les limites de corps géologiques ainsi que les fractures. L'extraction de ces lignes, caractérisées par certaines propriétés géométriques expliquées dans la deuxième partie de cet article, peut être perçue comme un problème de détection de lignes de crêtes et de ravins.

Toutefois, l'application de cette méthode aux surfaces d'affleurements doit tenir compte des contraintes particulières qui sont les suivantes :

- *Rugosité des affleurements*

La rugosité des affleurements observés rend les surfaces construites complexes. Les lignes de crêtes et de ravins étant caractérisées par la dérivée de la courbure, cet estimateur est sensible au bruit. Il est alors nécessaire d'utiliser un estimateur de courbures robuste face au bruit et invariable selon la configuration de la triangulation des surfaces.

- *Concordance des résultats avec la géologie observée*

Le but de la méthode que nous présentons est la détection de lignes correspondant à des éléments géologiques. Or, les

†. *Light Detection And Ranging*

‡. *Digital Outcrop Model*

lignes de crêtes et de ravins dans leur ensemble ne représentent pas des lignes ayant un sens géologique. Ainsi, nous proposons d'ajouter de la connaissance *a priori* (i.e., orientation et partie concave) pour effectuer un filtrage et guider l'extraction dans un sens particulier.

- Interactivité

Étant donnée l'application finale de l'approche proposée, une des contraintes supplémentaires est la vitesse d'exécution. La détection des lignes doit se faire en quelques secondes afin de garder une interactivité et une efficacité permettant de construire un outil d'analyse temps réel. De ce fait, nous nous sommes appliqués à mettre en place des méthodes de faible complexité algorithmique.

Afin de bien comprendre la problématique de la détection de lignes de crêtes et de ravins sur données d'affleurements, nous allons décrire dans la deuxième partie, les critères géométriques qui caractérisent les limites de corps géologiques recherchées. Nous dresserons ensuite un bilan sur les techniques de calcul de courbures discrètes et de détection de lignes de crêtes et de ravins sur maillage triangulé. Nous expliquerons, dans la quatrième partie, la méthode utilisée pour la détection ainsi que l'algorithme proposé. Enfin, des applications sur modèles d'affleurements réels seront présentées.

2. Critères et contraintes de détection

En géologie, les fractures se manifestent par des fentes, plus ou moins ouvertes, visibles dans la roche. De même, les limites de corps apparaissent comme des gouttières après l'érosion de minces couches friables. Ces deux ensembles d'éléments géologiques ont en commun un critère géométrique : ils représentent des lignes dont la position est caractérisée par une zone fortement courbée de la surface d'affleurement. Ainsi, les lignes de crêtes et de ravins peuvent être utilisées pour réaliser la détection de tels objets. La figure (1) représente un schéma des différents types de formes rencontrées, sachant qu'elles peuvent changer de style tout au long de la limite de corps ou de la fracture. Au vu du schéma, il peut être toutefois remarqué que les éléments à extraire (points noirs sur la figure (1)) sont situés aux endroits les plus concaves de la surface triangulée (la normale à la surface étant orientée arbitrairement vers l'extérieur de l'affleurement). Ainsi, ces lignes caractéristiques sont définies par des extrema locaux de l'une des fonctions courbure le long de leurs directions principales correspondantes, c'est-à-dire, un passage par zéro de la dérivée de l'une des fonctions courbure.

Cependant, l'extraction *stricto sensu* de l'intégralité des lignes de crêtes et de ravins ne constituent pas l'ensemble de lignes à extraire. Deux facteurs jouent sur ces résultats : (1) les fractures coupent très fréquemment les limites de corps, cela met en continuité dans une ligne caractéristique différents objets qui n'ont pas le même sens géologique ; (2) l'érosion arbitraire de l'affleurement peut mettre en évidence des éléments qui n'ont pas de signification géologique.

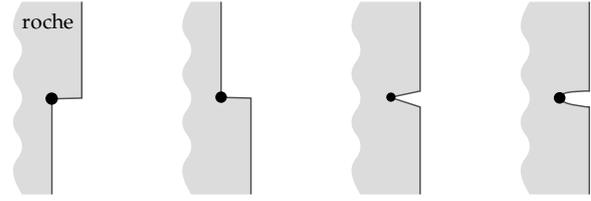


Figure 1: Schéma en vue de « profil » montrant les formes de limites de corps géologiques. Le point noir illustre l'endroit le plus concave de chaque élément, caractérisant ainsi les zones à extraire.

Par conséquent, nous proposons d'utiliser une connaissance *a priori* de direction d'extraction pour filtrer les lignes caractéristiques. La méthode proposée permet d'extraire des structures peu sinueuses, ce qui est toujours le cas des fractures et très fréquemment le cas des limites de corps.

Cette méthode repose sur la détection de crêtes et de ravins qui demande en premier lieu de connaître les informations de courbures en chaque sommet du maillage avant de pouvoir détecter de telles lignes. Avant de décrire la méthode proposée, la partie qui suit va définir quelques notions de mathématiques nécessaires aux calculs de courbure et établir un bilan sur les algorithmes de détection de lignes crêtes et de ravins existants.

3. Définitions et état de l'art

3.1. Notions mathématiques

La *courbure normale* κ d'un arc C dans \mathbb{R}^2 est définie comme étant l'inverse du rayon du cercle osculateur en un point $p \in C$. Cette notion de courbure normale peut être étendue pour une surface S dans \mathbb{R}^3 .

En un point $p \in S$, il est possible de choisir un vecteur \vec{v} tangent à la surface et de définir un plan perpendiculaire à S contenant \vec{v} . L'intersection entre ce plan et la surface est donc une courbe à laquelle est associée la courbure normale. En faisant tourner \vec{v} , la valeur de la courbure atteint alors une valeur minimale et une valeur maximale pour lesquelles sont définies la courbure minimale κ_{min} et la courbure maximale κ_{max} ainsi que leurs directions principales associées, respectivement \vec{t}_{min} et \vec{t}_{max} .

La courbure normale peut également être obtenue en étudiant la variation des normales à S en chaque point. Pour chaque point p , il existe un plan \mathcal{P} , tangent à S et orienté selon \vec{n}_p , la normale en p . Dans ce plan \mathcal{P} , deux vecteurs orthonormés \vec{u}, \vec{v} peuvent être définis et utilisés pour construire un repère 3D orthonormé $\mathcal{R}_{\mathcal{P}} = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{n}_p)$. Il est alors possible d'estimer la courbure ainsi :

$$\kappa = [s \quad t] \begin{bmatrix} e & f \\ f & g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = [s \quad t] \text{III} \begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix}, \quad (1)$$

avec $[s, t]$, un vecteur unitaire quelconque appartenant à \mathcal{P} .

La matrice symétrique \mathbb{I} , correspondant à la *seconde forme fondamentale*, peut-être diagonalisée en appliquant une rotation à \mathcal{R}_p (principe de la *méthode de Jacobi*). On obtient alors la matrice suivante :

$$\kappa = \begin{bmatrix} s' & t' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \kappa_{min} & 0 \\ 0 & \kappa_{max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s' \\ t' \end{bmatrix} \quad (2)$$

Les valeurs minimum et maximum (respectivement κ_{min} et κ_{max}) de courbure sont ainsi obtenues. Par conséquent, les directions principales (\vec{t}_{min} et \vec{t}_{max}) peuvent être déduites grâce à $[s', t']$.

Pour chaque sommet p appartenant à S , les courbures peuvent être obtenues en calculant la variation des normales selon les directions \vec{u} et \vec{v} . Il est alors possible d'écrire la matrice \mathbb{I} sous la forme de dérivées directionnelles de la normale :

$$\mathbb{I} = \begin{bmatrix} D_{\vec{u}}\vec{n} & D_{\vec{v}}\vec{n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \vec{n}}{\partial \vec{u}} \cdot \vec{u} & \frac{\partial \vec{n}}{\partial \vec{v}} \cdot \vec{u} \\ \frac{\partial \vec{n}}{\partial \vec{u}} \cdot \vec{v} & \frac{\partial \vec{n}}{\partial \vec{v}} \cdot \vec{v} \end{bmatrix} \quad (3)$$

De façon plus générale, la matrice \mathbb{I} permet de connaître la dérivée de la normale dans le sens d'un vecteur \vec{x} :

$$\mathbb{I}\vec{x} = D_{\vec{x}}\vec{n} \quad (4)$$

À partir de cet instant, il est donc possible de trouver les courbures en chaque point en construisant le repère $\mathcal{R}_p = (\vec{u}, \vec{v}, \vec{n}_p)$ pour ainsi étudier les variations de la normale dans le sens de \vec{u} et \vec{v} .

3.2. Travaux antérieurs

Estimation de courbures

Les courbures des surfaces sont des descripteurs géométriques puissants qui sont étudiés depuis plusieurs années. On pourra se référer à l'étude menée par [MD02] sur les courbures et leurs applications. Les données en entrée étant sous la forme de maillages, les calculs de courbures se font alors dans le domaine dit discret. Plusieurs méthodes d'estimation de courbures dans un domaine discret ont été proposées. Les plus employées en modélisation géométrique sont présentées dans ce qui suit.

- Approximation locale

Cette méthode consiste à approximer en chaque point la surface par une surface paramétrique. Ainsi, il est possible de calculer les courbures de façon analytique [GI04].

- Normales aux faces

Ici, les courbures sont estimées grâce aux normales des faces du maillage [PKS*01]. Un voisinage géodésique autour de chaque sommet est pris en compte afin de déduire les courbures et les directions principales associées.

- Moyenne du tenseur de courbures

Cette méthode est basée sur l'estimation du tenseur de courbures pour chaque arête du maillage. Les courbures de chaque sommet sont alors déduites comme étant les tenseurs

moyens des arêtes du voisinage. Par exemple, [CSM03] utilisent les angles dièdres des arêtes (*i.e.*, angle entre les normales de deux faces adjacentes) pour estimer ces courbures. [Rus04] propose d'utiliser une pondération des courbures aux faces pour trouver celles aux sommets. À noter que cette méthode a été généralisée par [BW07] afin d'être appliquée aux maillages quelconques.

Comme il a été signalé précédemment, les lignes de crêtes et de ravins sont caractérisées par des passages par zéro de la dérivée de l'une des fonctions courbure. Ainsi, en plus de ses performances en matière de qualité des résultats (comme montré par l'étude comparative de [Rus04]) et de vitesse d'exécution (meilleure que les approches reposant sur des approximations). De plus, l'algorithme proposé par Rusinkiewicz permet non seulement d'estimer les courbures mais aussi leurs dérivées. Au vu de ces différents avantages, nous avons alors choisi d'utiliser ces travaux comme base pour l'estimation de courbures.

Détection de lignes de crêtes et de ravins

Les lignes de crêtes et de ravins sont, depuis plusieurs années, le centre de nombreux travaux de recherche. Ces propriétés sont très largement utilisées en modélisation géométrique pour leur efficacité en tant que descripteurs de formes. Il existe différentes façons d'obtenir ces lignes. Par exemple, il est possible d'utiliser l'orientation des normales à la surface pour détecter les arêtes saillantes [PKS*01].

Il est également possible d'obtenir ces lignes caractéristiques grâce à des opérateurs différentiels permettant de discrétiser le calcul de courbures et leurs dérivées et ainsi faciliter la détection [HPW05].

Enfin, d'autres méthodes reposent sur l'approximation locale du modèle par surface implicite [OBS04] ou surface polynomiale bicubique [YBS05] pour estimer le tenseur de courbures puis leurs dérivées de courbure et ainsi détecter les lignes. Pour notre part, nous avons choisi d'utiliser les critères énoncés par [OBS04] pour mettre en place la détection de lignes de crêtes et de ravins sur maillages triangulés. En effet, ces derniers, s'appuyant sur les courbures et leurs dérivées, ne sont en aucun cas dépendants de l'échelle. Cela permet alors de procéder à une extraction des lignes de différentes tailles.

4. Détection de lignes caractéristiques

Les calculs à effectuer pour obtenir les courbures ainsi que leurs dérivées, selon la méthode proposée par [Rus04], sont décrits successivement dans cette section. Les principes de détection de lignes de crêtes et de ravins selon [OBS04] seront ensuite détaillés. Finalement, nous présenterons l'apport de notre approche qu'est le filtrage directionnel pour l'extraction de lignes correspondant à des éléments géologiques.

4.1. Estimation du tenseur de courbures

Pour un point p , appartenant à S et ses voisins directs q_i , il est possible construire $\mathcal{R}_{p_i} = (\vec{u}_i, \vec{v}_i, \vec{n}_p)$ ainsi :

$$\begin{cases} \vec{u}_i = \vec{E}_i \times \vec{n}_p \\ \vec{v}_i = \vec{n}_p \times \vec{u}_i \end{cases}, \quad (5)$$

avec $\vec{E}_i = \overrightarrow{pq_i}$ et l'opérateur \times représentant le produit vectoriel. Les trois vecteurs \vec{u}_i , \vec{v}_i et \vec{n}_p sont ensuite normalisés pour finalement former une base orthonormée.

Le repère \mathcal{R}_{p_i} étant ainsi construit, les dérivées directionnelles de \vec{n}_p sont calculées selon les directions \vec{u}_i et \vec{v}_i . L'équation (3) permet alors d'écrire :

$$\mathbb{III} \begin{bmatrix} \vec{E}_i \cdot \vec{u}_i \\ \vec{E}_i \cdot \vec{v}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{n}_{q_i} - \vec{n}_p) \cdot \vec{u}_i \\ (\vec{n}_{q_i} - \vec{n}_p) \cdot \vec{v}_i \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ceci correspond au calcul de la variation de la normale dans le sens de \vec{u}_i et \vec{v}_i . Cette dernière peut également être exprimée ainsi :

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_i \cdot \vec{u}_i & \vec{E}_i \cdot \vec{v}_i & 0 \\ 0 & \vec{E}_i \cdot \vec{u}_i & \vec{E}_i \cdot \vec{v}_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ f \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\vec{n}_{q_i} - \vec{n}_p) \cdot \vec{u}_i \\ (\vec{n}_{q_i} - \vec{n}_p) \cdot \vec{v}_i \end{bmatrix} \quad (7)$$

La méthode de *Cholesky* permet de résoudre l'équation (7) et donc d'obtenir les coefficients e , f et g , constituant la matrice \mathbb{III} . En diagonalisant celle-ci, les courbures minimale et maximale au point p sont trouvées et les directions principales de courbure sont alors déduites.

4.2. Estimation des dérivées de courbure

Comme énoncé plus haut, les courbures nous renseignent sur la variation des vecteurs normaux le long de la surface. De la même façon, les dérivées de courbure correspondent à la variation de la courbure le long des directions principales de courbure. Ces dérivées de courbure sont en fait les dérivées directionnelles qui s'écrivent de la façon suivante :

$$\mathbb{III}' = [D_{\vec{u}} \mathbb{III} \quad D_{\vec{v}} \mathbb{III}] = \begin{bmatrix} a & b \\ b & c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b & c \\ c & d \end{bmatrix} \quad (8)$$

Tout comme dans l'équation (6), pour un point p appartenant à S et ses voisins directs q_i , l'équation précédente peut s'exprimer en fonction des variations de courbure comme suit :

$$\mathbb{III}' \begin{bmatrix} \vec{E}_i \cdot \vec{t}_{min} \\ \vec{E}_i \cdot \vec{t}_{max} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\kappa_{min_i} & \Delta\kappa_{min_i} \\ \Delta\kappa_{max_i} & \Delta\kappa_{max_i} \end{bmatrix}, \quad (9)$$

où $\Delta\kappa_{min_i}$ et $\Delta\kappa_{max_i}$ correspondent à la différence de courbure entre les voisins q_i et le sommet p :

$$\Delta\kappa_{min_i} = \kappa_{min_p} - \kappa_{min_{q_i}}, \quad \Delta\kappa_{max_i} = \kappa_{max_p} - \kappa_{max_{q_i}} \quad (10)$$

Tout comme pour l'équation (7), le système peut être développé pour finalement s'écrire en fonction des coefficients a ,

b , c et d correspondant à :

$$a = \frac{\partial\kappa_{min}}{\partial\vec{t}_{min}}, \quad b = \frac{\partial\kappa_{min}}{\partial\vec{t}_{max}}, \quad c = \frac{\partial\kappa_{max}}{\partial\vec{t}_{min}}, \quad d = \frac{\partial\kappa_{max}}{\partial\vec{t}_{max}}, \quad (11)$$

avec

$$e_{min} = a, \quad e_{max} = d, \quad (12)$$

coefficients d'extrémalité, définis par [Thi96], au point p .

L'équation (9) peut être exprimée en fonction de ces coefficients. On obtient donc :

$$\begin{bmatrix} \vec{E}_i \cdot \vec{t}_{min} & \vec{E}_i \cdot \vec{t}_{max} & 0 & 0 \\ 0 & E_i \cdot \vec{t}_{min} & E_i \cdot \vec{t}_{max} & 0 \\ 0 & E_i \cdot \vec{t}_{min} & E_i \cdot \vec{t}_{max} & 0 \\ 0 & 0 & E_i \cdot \vec{t}_{min} & E_i \cdot \vec{t}_{max} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta\kappa_{min_i} \\ \Delta\kappa_{min_i} \\ \Delta\kappa_{max_i} \\ \Delta\kappa_{max_i} \end{bmatrix} \quad (13)$$

De la même façon que pour l'estimation des courbures, le système (13) est résolu par la méthode de *Cholesky* pour retrouver la matrice \mathbb{III}' .

Au final, pour chaque sommet de S , les coefficients d'extrémalité e_{min} et e_{max} , valeurs de la dérivée des courbures κ_{min} et κ_{max} dans les directions \vec{t}_{min} et \vec{t}_{max} sont connus.

4.3. Lignes de crêtes et de ravins

Les coefficients d'extrémalité précédemment calculés caractérisent les variations de courbures. Cela permet alors de détecter efficacement les lignes de crêtes et de ravins. Les lignes de crêtes (zones convexes) sont caractérisées par :

$$e_{max} = 0, \quad \frac{\partial e_{max}}{\partial\vec{t}_{max}} < 0, \quad \kappa_{max} > |\kappa_{min}|, \quad (14)$$

et les lignes de ravins (zones concaves) par :

$$e_{min} = 0, \quad \frac{\partial e_{min}}{\partial\vec{t}_{min}} > 0, \quad \kappa_{min} < -|\kappa_{max}| \quad (15)$$

En effet, les lignes de crêtes et de ravins sont définies lorsque des extrema de l'une des fonctions courbure sont atteints. Le signe des courbures renseigne alors sur l'orientation de la surface (localement convexe ou concave).

Les notions de crêtes et ravins sont duales par rapport à l'orientation de la surface : une inversion de l'orientation engendre alors un échange entre convexité et concavité et par conséquent entre les lignes de crêtes et de ravins.

La détection de telles lignes se fait alors en recherchant les sommets de crêtes et de ravins, en d'autres termes, les passages par zéro des dérivées directionnelles de courbure. Pour détecter ce passage par zéro, il suffit de vérifier, pour une arête $[p_1, p_2]$, plusieurs conditions décrites dans [OBS04].

Tout d'abord si l'angle entre les vecteurs $\vec{t}_{max}(p_1)$ et $\vec{t}_{max}(p_2)$ est obtus, il faut inverser le sens de $\vec{t}_{max}(p_2)$ et le signe de $e_{max}(p_2)$. De cette manière, on s'assure que les vecteurs de courbures restent dans le même sens.

Il a été dit plus haut que les sommets de crêtes et de ravins étaient caractérisés par des extrema de l'une des fonctions courbure. Lorsque un extrema est atteint, l'un des coefficients d'extrémalité est égal à zéro sur l'arête $[p_1, p_2]$. Et, pour détecter et extraire ces sommets, il faut en plus vérifier que les deux coefficients soient de signes opposés :

$$e_{max}(p_1) \cdot e_{max}(p_2) < 0 \quad (16)$$

Enfin, e_{max} doit atteindre un maximum sur l'arête $[p_1, p_2]$, c'est-à-dire :

$$e_{max}(p_1) [\overrightarrow{p_1 p_2} \cdot \vec{t}_{max}(p_1)] > 0 \quad (17)$$

Lorsque ces deux conditions sont remplies, il suffit alors de faire une interpolation linéaire entre p_1 et p_2 pour trouver le sommet de crête recherché :

$$p_{crête} = \frac{|e_{max}(p_2)|p_1 + |e_{max}(p_1)|p_2}{|e_{max}(p_1)| + |e_{max}(p_2)|} \quad (18)$$

Les notions de lignes de crêtes et de ravins étant duales par rapport à l'orientation de la surface, l'inversion du sens de \vec{t}_{max} permet de détecter les lignes de ravins. De cette manière, on échange l'orientation de la surface et le procédé de détection de lignes de crêtes devient une méthode de détection de lignes de ravins.

Pour obtenir toutes les lignes de crêtes et de ravins comme illustré dans la figure (2), ce procédé est appliqué sur chaque arête du maillage. Les lignes obtenues sont définies par un ensemble de polygones, c'est-à-dire des lignes brisées dont les sommets sont situés sur les arêtes du maillage.

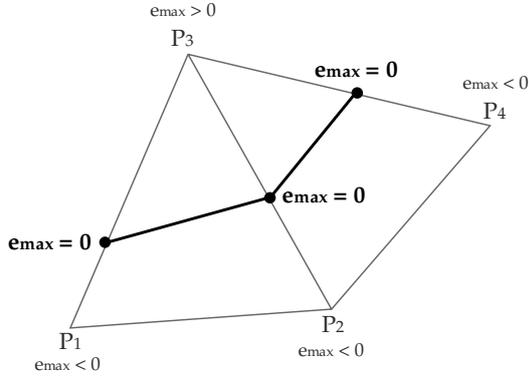


Figure 2: Illustration du procédé d'extraction des sommets de crêtes.

4.4. Filtrage directionnel

Dans le double but de ne conserver que les lignes ayant un sens géologique et étant orientées uniquement dans une direction \vec{D} donnée par l'utilisateur, une méthode de filtrage a été ajoutée à l'algorithme de détection décrit dans la section précédente.

Premièrement, comme il a été souligné dans la section 2, seules les zones concaves correspondent à des fractures ou des limites de corps géologiques si l'on pose arbitrairement que la normale à la surface est orientée vers l'extérieur de l'affleurement. En d'autres termes, cela revient à ne garder que les lignes de ravins.

Deuxièmement, pour un point p appartenant à une surface S , les directions principales de courbures sont contenues dans le plan \mathcal{P} orienté selon la normale. Ainsi, \vec{t}_{min} et \vec{t}_{max} indiquent respectivement le sens de la plus faible et de la plus forte variation. Si l'on considère une surface parabolique, lorsque l'on s'approche d'une ligne de crête ou de ravin, c'est-à-dire une zone fortement courbée, le vecteur de courbure \vec{t}_{min} a tendance à suivre la forme parabolique de la surface, comme le montre la figure (3).

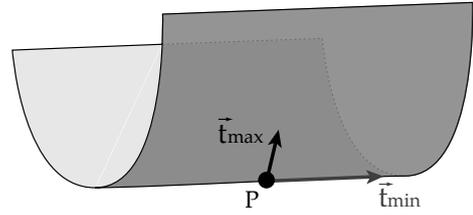


Figure 3: Directions principales d'une surface parabolique.

De cette manière, il est alors possible de s'appuyer sur le vecteur \vec{t}_{min} pour ne retenir que les lignes orientées selon \vec{D} . La méthode que nous proposons peut se résumer ainsi : lorsque les vecteurs \vec{t}_{min} des deux sommets d'une arête sont colinéaires à \vec{D} , la ligne est conservée ; dans le cas contraire, elle est supprimée. Cette opération peut s'effectuer avec un test sur la valeur absolue du produit scalaire entre le vecteur \vec{D} et le vecteur de courbure \vec{t}_{min} .

Cependant, la direction \vec{D} étant spécifiée par l'utilisateur de façon globale sur l'affleurement et ce dernier n'étant pas plan et pouvant varier localement de direction, il n'est pas assuré que le vecteur \vec{D} soit contenu dans le plan \mathcal{P} . Dans ce cas, le produit scalaire n'est plus discriminant pour sélectionner les lignes. Ainsi, nous proposons d'effectuer une rotation du vecteur \vec{D} en un vecteur \vec{D}' pour le placer dans le plan \mathcal{P} . Cette rotation a pour caractéristiques :

$$\begin{aligned} \vec{axè} &= \vec{D} \times \vec{n}_p \\ \text{angle} &= \vec{D} \cdot \vec{n}_p \end{aligned} \quad (19)$$

De cette manière, \vec{D}' est toujours contenu dans le plan \mathcal{P} . Il est à noter qu'une projection du vecteur \vec{D} sur le plan \mathcal{P} aurait pu être envisagée. Cependant, cette approche peut engendrer un vecteur \vec{D}' nul lorsque le plan \mathcal{P} est perpendiculaire à \vec{D} .

Ainsi, le calcul de la valeur absolue du produit scalaire s' est effectué entre \vec{D}' et \vec{t}_{min} sur les arêtes contenant un coefficient d'extrémalité nul. s' correspond alors à la valeur

absolue du cosinus de l'angle α . Ce procédé de filtrage est illustré par la figure (4).

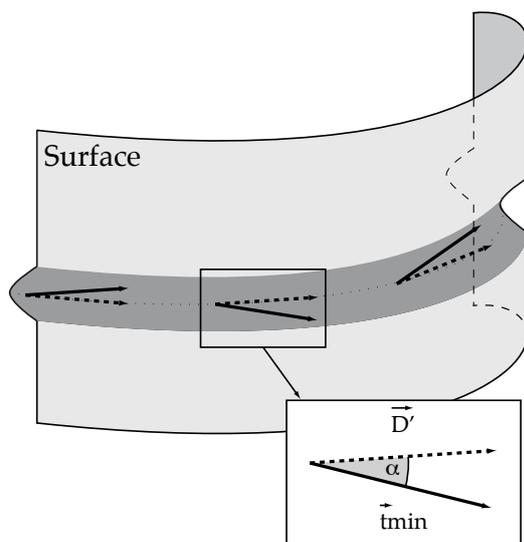


Figure 4: Filtrage directionnel en fonction de \vec{t}_{min} .

La direction \vec{D} est donnée de façon globale par l'utilisateur et correspond à la direction générale des structures à extraire qui peuvent avoir toutefois des variations locales de direction. Nous avons donc trouvé préférable de prendre en compte une tolérance réglée par un seuil compris entre 0 et 1 et appliqué sur s' . Lorsque ce seuil est égal à 1, les vecteurs \vec{t}_{min} et \vec{D}' doivent être strictement colinéaires pour que la ligne soit conservée. Inversement, quand ce seuil est égal à 0, toutes les lignes de ravins sont retenues.

5. Résultats et validation

La méthode de détection de lignes de crêtes et de ravins que nous avons proposée se résume en 4 étapes :

- estimation du tenseur de courbures ;
- estimation des dérivées de courbure ;
- détection des coefficients d'extrémalité nuls ;
- filtrage directionnel.

Son but premier est d'être appliquée à des modèles numériques 3D d'affleurements, représentés par des maillages triangulés, pour extraire un certain type d'éléments géologiques (fractures et limites de corps). La série d'images (5) présente les résultats obtenus sur différents modèles d'affleurements. Afin d'illustrer les influences du seuil de tolérance et de la direction \vec{D} , les séries d'images (6) et (7) sont présentées plus bas.

Les valeurs des différents paramètres sont à fixer manuellement et servent de connaissance *a priori*. La direction de recherche est connue des géologues selon les affleurements étudiés et leurs caractéristiques. Il serait possible d'utiliser

une heuristique (une analyse en composantes principales, par exemple) pour déduire cette direction automatiquement. Cependant, le but est d'assister les géologues et donc nous ne nous sommes pas intéressés à l'automatisation entière de l'algorithme et ainsi laisser le choix aux géologues pour la direction de recherche. Le seuil de tolérance sert quant à lui à contraindre plus ou moins la détection dans le sens spécifique. Il est réglé en fonction de l'aspect des limites observées (rectilignes ou sinueuses).

Les résultats obtenus grâce à l'approche présentée dans cet article concordent avec les éléments modélisés manuellement par les géologues. Toutefois, on remarque que certaines lignes sont incomplètes et que d'autres sont non significatives. Ceci s'explique d'une part par le fait qu'il existe des points ombilics, c'est-à-dire localement sphérique et donc sans direction principale. D'autre part, la forte rugosité ainsi que le bruit entraînent des artefacts durant la détection et une faible connectivité de certaines lignes. Des méthodes permettant l'amélioration des résultats peuvent alors être mises en place (pré-traitements ou connexion de lignes reposant sur des heuristiques par exemple).

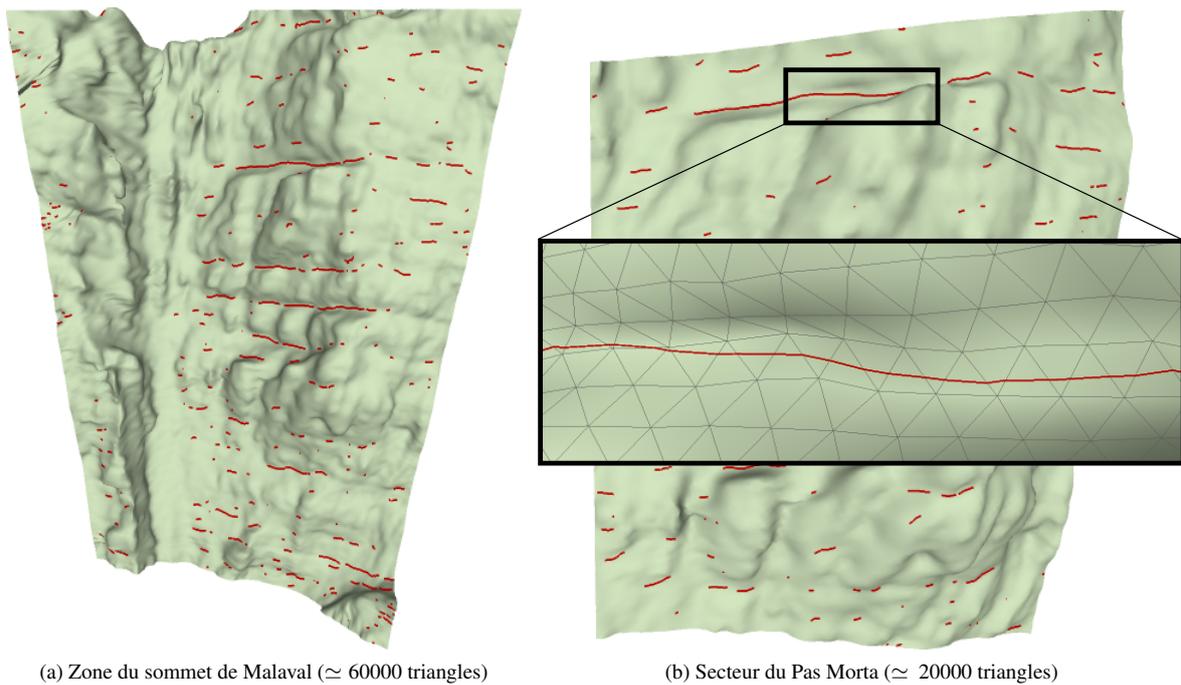
En ce qui concerne le temps d'exécution de l'algorithme, celui-ci est très court. Il faut moins de 3 secondes pour traiter un maillage d'environ 60 000 sommets (sur une machine équipée d'un processeur Core 2 Duo cadencé à 2.4 Ghz avec 4 Go de RAM). Les opérations comptabilisées sont celles répertoriées plus haut (estimation des courbures et dérivées, détection et filtrage). Il est alors tout à fait envisageable de concevoir des applications d'analyses géologiques automatiques en temps réel. De ce fait, cela permettrait d'assister les géologues durant les manipulations et traitements de modèles numériques d'affleurements.

6. Conclusion

Nombreuses sont les méthodes de détection de lignes de crêtes et de ravins proposées dans la littérature. Cependant, aucune n'était directement applicable au contexte de l'extraction de limites géologiques sur affleurements numériques 3D. Par conséquent, en nous appuyant sur certaines méthodes déjà existantes, nous proposons dans cet article un algorithme de détection de lignes caractéristiques appliqué à des données acquises par LIDAR, satisfaisant de nouvelles contraintes.

L'approche que nous avons présentée repose sur l'estimation des courbures et leurs dérivées. Les coefficients d'extrémalité sont alors calculés à partir des dérivées de courbures, ce qui permet ensuite d'extraire les lignes de crêtes et de ravins. Enfin, un filtrage directionnel est effectué pour ne garder que les lignes caractéristiques et orientées dans une direction spécifique.

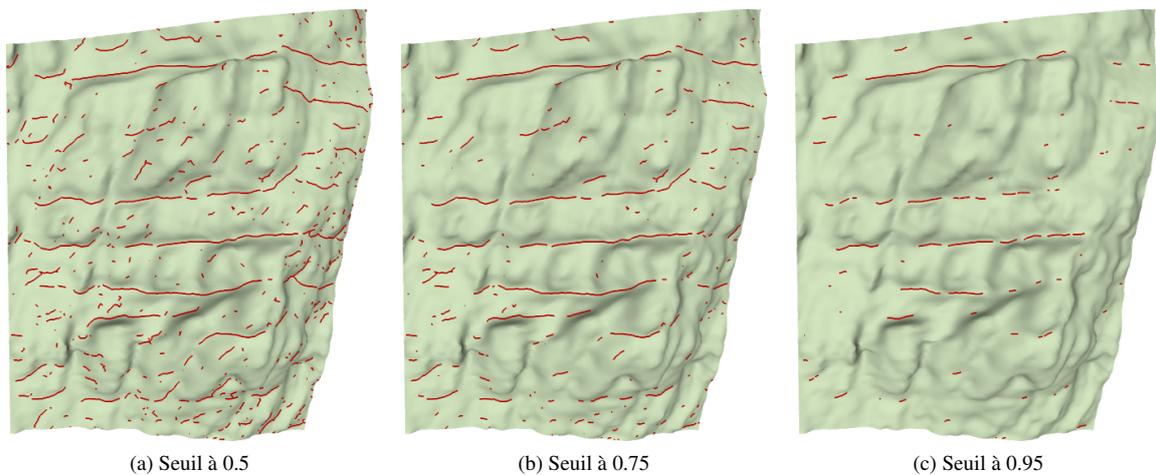
L'application de cette méthode sur des affleurements numériques 3D nous permet d'extraire de façon semi-automatique les lignes correspondant aux fractures et aux limites de corps



(a) Zone du sommet de Malaval ($\simeq 60000$ triangles)

(b) Secteur du Pas Morta ($\simeq 20000$ triangles)

Figure 5: Limites de corps détectées sur données réelles d'affleurements.



(a) Seuil à 0.5

(b) Seuil à 0.75

(c) Seuil à 0.95

Figure 6: Illustration de l'influence du seuil de tolérance. Secteur du Pas Morta.

géologiques, assistant ainsi les géologues durant leur phase d'interprétation. Comme énoncé dans la partie précédente, les résultats obtenus concordent avec les éléments modélisés manuellement par les géologues.

Cette approche nous paraît de ce fait prometteuse mais peut être améliorée. Nous envisageons par exemple d'ajouter des post-traitements pour parfaire la qualité des résultats : jon-

tion de lignes, suppression de lignes parasites, etc. De plus, les lignes extraites pour l'instant sont peu sinueuses, ce qui est généralement le cas des objets géologiques à extraire. Cependant, des limites beaucoup plus courbes peuvent être observées à l'affleurement. Ceci demande d'assouplir de manière pertinente le filtrage directionnel proposé.

L'extraction de lignes correspondant à des éléments géolo-

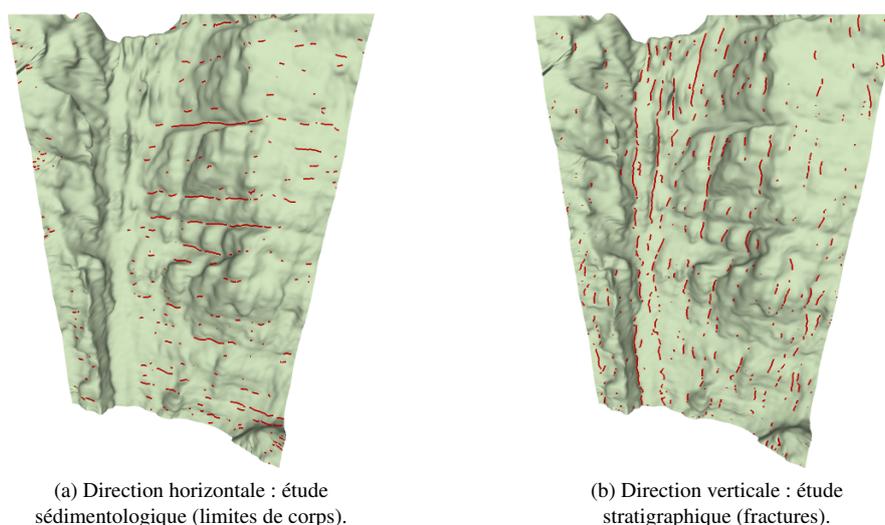


Figure 7: Illustration de l'influence de la direction \vec{D} . Sommet de Malaval.

giques est une première étape dans l'interprétation des affleurements. L'étape suivante serait de construire un graphe des éléments interprétés afin de reproduire l'agencement des structures géologiques observées à l'affleurement.

Références

- [BKJ05] BELLIAN J. A., KERANS C., JENNETTE D. C. : Digital outcrop models ; applications of terrestrial scanning lidar technology in stratigraphic modeling. *Journal of Sedimentary Research*. Vol. 75, Num. 2 (2005), 166–176.
- [BW07] BATAGELO H. C., WU S.-T. : Estimating curvatures and their derivatives on meshes of arbitrary topology from sampling directions. *Vis. Comput.* Vol. 23, Num. 9 (2007), 803–812.
- [CSM03] COHEN-STEINER D., MORVAN J.-M. : Restricted delaunay triangulations and normal cycle. In *SCG '03 : Proceedings of the nineteenth annual symposium on Computational geometry* (New York, NY, USA, 2003), ACM, pp. 312–321.
- [GI04] GOLDFEATHER J., INTERRANTE V. : A novel cubic-order algorithm for approximating principal direction vectors. *ACM Trans. Graph.* Vol. 23, Num. 1 (2004), 45–63.
- [HPW05] HILDEBRANDT K., POLTHIER K., WARETZKY M. : Smooth feature lines on surface meshes. In *SGP '05 : Proceedings of the third Eurographics symposium on Geometry processing* (Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2005), Eurographics Association, p. 85.
- [JDA07] JUDD T., DURAND F., ADELSON E. H. : Apparent ridges for line drawing. *ACM Trans. Graph.* Vol. 26, Num. 3 (2007), 19.
- [MAM97] MONGA O., ARMANDE N., MONTESINOS P. : Thin nets and crest lines : application to satellite data and medical images. *Comput. Vis. Image Underst.* Vol. 67, Num. 3 (1997), 285–295.
- [MD02] MALTRET J.-L., DANIEL M. : *Discrete curvatures and applications : a survey*. Rapport de recherche LSIS.RR.2002.002, Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes, 2002.
- [Nam08] NAM V. T. : *Traitement de surfaces triangulées pour la construction de modèles géologiques structuraux*. PhD thesis, Université de la Méditerranée, 2008.
- [OBS04] OHTAKE Y., BELYAEV A., SEIDEL H.-P. : Ridge-valley lines on meshes via implicit surface fitting. In *SIGGRAPH '04 : ACM SIGGRAPH 2004 Papers* (New York, NY, USA, 2004), ACM, pp. 609–612.
- [PKS*01] PAGE D. L., KOSCHAN A., SUN Y., PAIK J., ABIDI M. A. : Robust crease detection and curvature estimation of piecewise smooth surfaces from triangle mesh approximations using normal voting. In *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition* (Los Alamitos, CA, USA, 2001), vol. 1, IEEE Computer Society, p. 162.
- [Rus04] RUSINKIEWICZ S. : Estimating curvatures and their derivatives on triangle meshes. In *Symposium on 3D Data Processing, Visualization, and Transmission* (Sept 2004).
- [SF04] STYLIANOU G., FARIN G. : Crest lines for surface segmentation and flattening. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*. Vol. 10, Num. 5 (2004), 536–544.

- [Thi96] THIRION J.-P. : The extremal mesh and the understanding of 3d surfaces. *Int. J. Comput. Vision. Vol. 19*, Num. 2 (1996), 115–128.
- [YBS05] YOSHIKAWA S., BELYAEV A., SEIDEL H.-P. : Fast and robust detection of crest lines on meshes. In *SPM '05 : Proceedings of the 2005 ACM symposium on Solid and physical modeling* (New York, NY, USA, 2005), ACM, pp. 227–232.