

# Modélisation d'évolution de couches géologiques

P.-F. LÉON – X. SKAPIN – P. MESEURE

Laboratoire SIC - Université de Poitiers  
{leon, skapin, meseure}@sic.univ-poitiers.fr

## Résumé

*Dans cet article, nous proposons de représenter l'évolution de couches géologiques en décrivant en particulier les variations topologiques du sous-sol. Pour cela, nous identifions les principaux phénomènes géologiques, à la base des évolutions du sous-sol, sous forme d'opérations topologiques élémentaires. L'assemblage de ces transformations est ensuite intégré dans un système d'animation.*

**Mots-clés :** modélisation géométrique à base topologique, géologie, animation, carte généralisée.

## 1 Introduction

La modélisation de sous-sol est un domaine de recherche en plein essor, qui nécessite des compétences en modélisation géométrique et en géologie [Per98]. Une collaboration étroite sur ce thème se développe depuis plusieurs années entre le laboratoire SIC (Signal Image et Communications) de Poitiers, l'école des Mines de Paris (EMP) et l'Institut Français du Pétrole (IFP) [GPRB05][BSP<sup>+</sup>04].

Les géologues chargés d'identifier de nouvelles ressources basent leurs hypothèses d'évolution de couches géologiques sur un ensemble de mesures et sur leur expérience. La validation de ces hypothèses peut être effectuée de deux manières, soit en effectuant d'autres mesures, soit en simulant la structure du sous-sol. La première solution est dispendieuse, les géologues ont donc besoin de la simulation pour réduire les coûts.

La vérification des hypothèses du géologue peut passer par l'examen de règles géologiques et la simulation physique des phénomènes. Cette vérification passe obligatoirement par un suivi topologique de l'évolution du sous-sol. Notre travail se situe dans ce contexte. Dans cet article, nous proposons un modèle d'animation 2D adapté à la géologie, permettant au géologue d'élaborer des scénarii d'évolutions à partir de scripts, de les exécuter et d'en visualiser les animations. Nous considérons ici qu'une animation est une combinaison de phénomènes géologiques.

Dans cet article, la section 2 présente les principaux phénomènes géologiques répertoriés (sédimentation, érosion, faille et glissement) et les concepts de bases décrivant une scène géologique. Les travaux actuels portent sur la modélisation statique du sous-sol (section 3) mais l'aspect dynamique (i.e. l'évolution des couches géologiques au cours du temps) n'a pas été abordé à notre connaissance. Pour résoudre ce problème, nous suivons la démarche suivante : chaque phénomène géologique est exprimé en termes d'opérations topologiques (éclatement d'un sommet, éclatement d'un chemin d'arêtes et identification de sommets) et/ou de plongements (section 4). La définition rigoureuse de chaque opération topologique, présentée en section 5, repose sur le modèle des cartes généralisées [Lie89]. Ces opérations peuvent être utilisées dans deux approches classiques pour construire une animation : l'approche par keyframes et l'approche spatio-temporelle. Nous présentons ces deux démarches dans la section 6. Nous avons commencé à travailler avec l'approche spatio-temporelle puis nous nous sommes tournés vers l'approche par keyframes. Cette modélisation nous permet de construire des animations à partir de combinaisons simples de phénomènes géologiques. Nous concluons et nous présentons les prochaines étapes de nos travaux dans la section 7.

## 2 Phénomènes géologiques

Pour que le géologue puisse décrire un scénario d'évolution, il faut s'appuyer sur les phénomènes géologiques responsables de l'évolution du sous-sol. Nous utilisons cinq types de phénomènes : la sédimentation, l'érosion, la création de failles, le glissement et la déformation. Avant de chercher à modéliser ces phénomènes, nous allons les expliciter à travers quelques définitions succinctes et un schéma récapitulatif.

Nous appelons *scène géologique*, un ensemble de *couches* empilées. Une couche est définie comme une zone dont certaines caractéristiques sont similaires (par exemple : composition, âge). Par extension, l'air et la mer apparaissent comme des couches particulières. Un *horizon* est défini comme étant la limite entre deux couches. Une *faille* est une fissure (assimilée à une arête), entraînant souvent la cassure de couches géologiques en *blocs* géologiques, chacun d'eux délimité par un ensemble de failles et/ou d'horizons (Fig. 1).

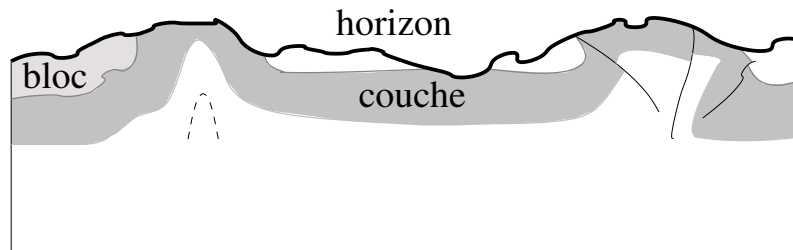


FIG. 1 – Notion de bloc, horizon et couche.

La *sédimentation* correspond à un dépôt de matière pouvant entraîner la création d'une nouvelle couche et sa *déformation*. L'*érosion* est l'action de destruction de sédiments ainsi que leur transport. Elle est le résultat de l'action combinée de l'atmosphère, de l'hydrosphère et de la biosphère sur la topographie de la Terre. Cette action peut entraîner la disparition complète d'un bloc. La création de *failles* correspond, quant à elle, à la formation de fissures au sein d'un bloc géologique. Elle peut mener, dans un cas extrême, à la scission du bloc, suivie éventuellement d'un glissement. Le *glissement* naît du mouvement d'un bloc par rapport à plusieurs blocs. Ces phénomènes aboutissent à des modifications importantes de la structure des couches allant jusqu'à la séparation d'une couche en blocs déconnectés, adjacents ou non. L'action des différents phénomènes géologiques considérés (sédimentation, érosion, faille, glissement et déformation) sont représentés sur la figure 2 entourés par des pointillés.

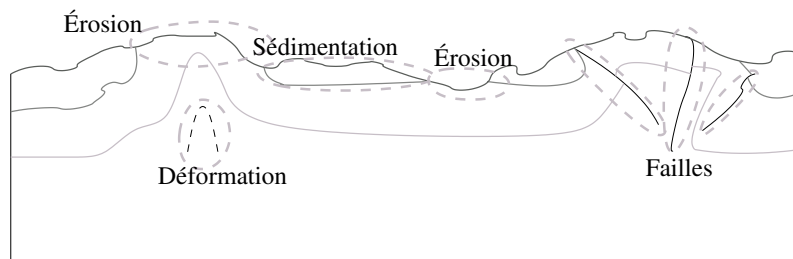


FIG. 2 – Planche représentant un profil des plis d'une partie des montagnes du Jura.

Ce schéma permet d'appréhender la complexité de modélisation nécessaire à la représentation de telles structures. Sa construction requiert un ensemble de mesures ponctuelles (relevés topographiques, relevés sismiques, carottages) et repose sur l'expertise du géologue.

### 3 Travaux antérieurs sur la modélisation géologique

Un modèle du sous-sol est généralement construit à partir de mesures brutes. Ces données bruitées doivent cependant être traitées et améliorées [BNDP05]. Il existe des logiciels qui exploitent les mesures effectuées, notamment GOCAD<sup>1</sup>[Mal02] et RML<sup>2</sup>[FHHR98].

Schneider [Sch02] représente le sous-sol par un ensemble de surfaces qui s'intersectent. Ces surfaces correspondent aux horizons et aux failles et délimitent les blocs géologiques. Ce calcul d'intersections s'effectue en utilisant la bibliothèque CAS.CADE sur un plongement en surfaces paramétriques. Dans cette approche, les horizons et les failles traversent la scène de part en part. Une autre approche pour l'intersection est proposée par Guiard [BSP<sup>+</sup>04] à l'EMP. Elle consiste à utiliser un plongement linéaire ; les surfaces sont alors modélisées par subdivisions de surfaces composées de faces planes aux arêtes rectilignes. Les failles et les horizons peuvent s'intersecter sans forcément couper un bloc, ce qui permet par exemple de représenter des failles pendantes. Ce modèle repose sur le modèle topologique de n-G-Cartes étendu [Sch02]. Ces modèles sont statiques et ne prennent pas en compte la formation des couches.

La description des causes et effets d'après Perrin[Per98] est définie par une syntaxe géologique qui permet de formaliser des phénomènes géologiques et leur succession au cours du temps. Ses règles assurent la consistance géologique d'un modèle 3D. Elles sont intégrées dans un *schéma d'évolution géologique* (SEG), décrivant une interprétation géologique du modèle à construire. Il se présente sous la forme d'un graphe acyclique orienté. Les nœuds représentent des surfaces ou des sous-SEG correspondant à un plus grand niveau de détails. Les arcs représentent soit une relation chronologique (par exemple, une faille est "antérieure à" une autre faille) ; soit une relation topologique basée sur les propriétés géologiques des surfaces qui s'intersectent (par exemple, une faille "coupe" un horizon). Les règles de syntaxe géologique permettent de préciser de quelle manière les nœuds du graphe interagissent. Les informations transportées par le SEG permettent donc de définir une chronologie des événements mais elles sont insuffisantes pour représenter une animation d'évolution de couches géologiques. En effet, les données temporelles précises ne sont pas présentes, et la chronologie fournie par le SEG ne contient pas de durée. De plus, les liens de cause à effet sont inexistant, nous ne savons pas par exemple comment une couche a été créée ou comment sa forme a évolué.

### 4 Expression des phénomènes géologiques en termes d'opérations topologiques

Nous analysons les différents cas possibles pour les phénomènes de sédimentation, d'érosion, de glissement et de création de faille. Ensuite, nous identifions les opérations géométriques sous-jacentes, et en particulier les opérations topologiques.

#### 4.1 Sédimentation

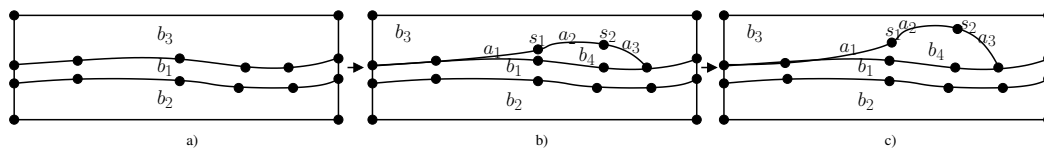


FIG. 3 – Sédimentation : création d'une nouvelle couche  $b_4$  entre  $b_1$  et  $b_3$ , puis déformation de la couche  $b_4$ .

La sédimentation se compose de deux étapes : la création d'une nouvelle couche et sa déformation. La création d'une nouvelle couche est illustrée sur la figure 3. L'apparition d'une couche (Fig. 3(b))

<sup>1</sup><http://www.gocad.com/>

<sup>2</sup><http://www.beicip.com/>

engendre la création de nouveaux sommets ( $s_1, s_2$ ), de nouvelles arêtes ( $a_1, a_2, a_3$ ) et d'une nouvelle face  $b_4$ . La nouvelle face est insérée sur un chemin constitué d'arêtes ( $a_1, a_2, a_3$ ) : cette opération topologique est appelée *éclatement d'un chemin d'arêtes en face*.

Une fois la couche créée, le dépôt grossit et ceci entraîne l'augmentation du volume de la couche (Fig. 3(c)). Ce volume peut être obtenu sans création de nouveaux éléments par une translation des sommets de l'interface ( $b_3, b_4$ )<sup>3</sup>. Dans ce cas, il n'y a pas de changement de topologie. Nous pouvons ajouter des points pour affiner la déformation. Cette opération est définie comme l'opération de déformation.

Enfin, la sédimentation peut également aboutir à l'agrégation de plusieurs blocs, comme le montre la figure 4. Dans ce cas, il y a une modification topologique se traduisant par la contraction d'une arête  $a$  (Fig. 4(a)), la fusion de deux sommets  $s_1$  et  $s_2$  (Fig. 4(b)) et l'éclatement du sommet résultant en deux sommets  $s_3$  et  $s_4$  (Fig. 4(c)).

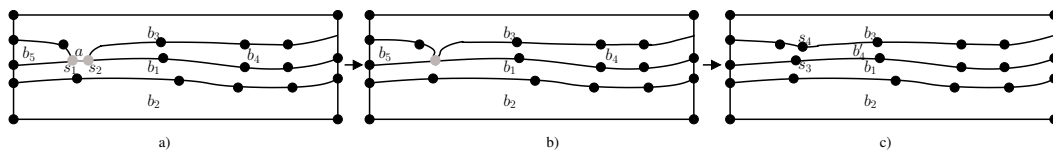


FIG. 4 – Sédimentation avec fusion des blocs  $b_4$  et  $b_5$  en  $b'_4$ .

## 4.2 Érosion

L'érosion peut être considérée comme l'inverse de la sédimentation. L'érosion débute par une disparition de matière, correspondant à la diminution du volume de la couche.

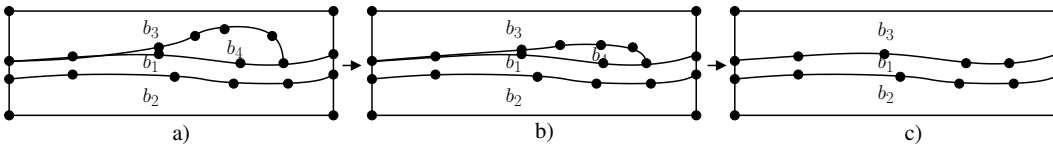


FIG. 5 – Érosion du bloc  $b_4$ .

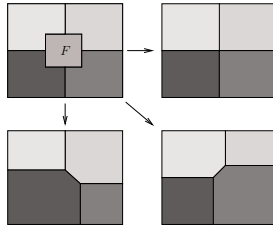
La figure 5 montre un exemple d'érosion. La diminution du volume du bloc  $b_4$  est réalisée par simple translation des sommets de l'interface ( $b_3, b_4$ ) (Fig. 5(a) et 5(b)). Il n'y a pas de création ou de destruction d'éléments, la topologie reste inchangée. Nous utilisons donc simplement une opération de déformation.

L'érosion peut aboutir à la disparition totale d'un bloc. Cela se traduit par le fait que la face représentant le bloc  $b_4$  disparaît (Fig. 5c). Les interfaces ( $b_3, b_4$ ) et ( $b_4, b_1$ ) se confondent. Ici, la modification de la topologie se traduit par la suppression d'une face, d'arêtes et de sommets. Cette opération n'est définie que pour des faces de degré 2 (ie. dont le bord est constitué de deux arêtes) [DL03]. En effet, comme le montre la figure 6, il existe plusieurs façons de réaliser cette opération. Pour résoudre ce problème, il suffit de supprimer l'interface ( $b_3, b_4$ ).

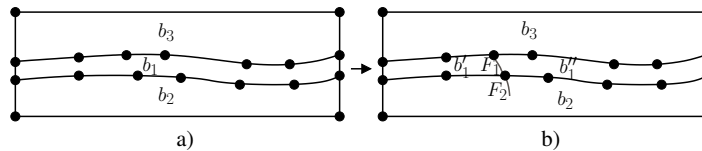
## 4.3 Faille

Nous considérons seulement les failles débutant sur le bord d'un bloc. Dans ce cas, une fissure apparaît et s'étend au travers du bloc, le coupant, le cas échéant, en deux comme le montre la figure 7. Elle montre les deux types de failles traitées ici. Les *failles pendantes* débutent en un sommet du bord d'un bloc et se terminent "à l'intérieur" du bloc (faille  $F_2$  sur la figure 7(b)). La faille pendante est alors représentée par une arête que nous identifions au bord du bloc. Les *failles complètes* coupent de part

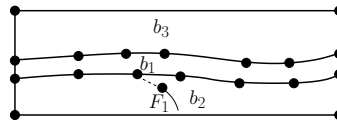
<sup>3</sup>L'interface entre deux blocs  $b_i$  et  $b_j$  est notée  $(b_i, b_j)$ .

FIG. 6 – Différentes solutions de contraction de la face  $F$ .

et d'autre un bloc (faille  $F_1$  sur la figure). Dans ce cas, il suffit d'*identifier* le sommet libre de l'arête représentant la faille à un autre sommet de la face. Dans la figure 7(b), le bloc  $b_1$  est ainsi divisé en deux blocs :  $b'_1$  et  $b''_1$ .

FIG. 7 – Création d'une faille complète  $F_1$  et d'une faille pendante  $F_2$ .

Pour représenter les failles qui débutent "à l'intérieur" d'un bloc, il faut utiliser une arête fictive pour lier l'arête au bord de la face. Cette arête est dite fictive dans le sens où elle sert seulement pour la topologie et reste invisible pour le géologue.

FIG. 8 – Création d'une faille  $F_1$  au milieu du bloc  $b_2$ . L'arête fictive est en pointillés.

#### 4.4 Glissement

Le glissement concerne le mouvement d'un bloc par rapport à d'autres blocs. La figure 9 en montre un exemple. Nous observons un changement au niveau de l'interface ( $b_1$ ,  $b_4$ ). Il y a création de deux sommets et de deux arêtes (Fig. 9(b)). Enfin, la suppression de l'arête de contact entre  $b_1$  et  $b_4$  entraîne la disparition de l'interface ( $b_1$ ,  $b_4$ ).

La figure 10 décrit les étapes du glissement en termes géométriques :

- les arêtes  $a_1$  et  $a_2$  ne sont plus incidentes au même sommet. Une arête est créée, ceci se traduit par l'éclatement d'un sommet en arête ;
- le bloc descend, ce qui n'influe pas sur la topologie. Le sommet gris est seulement translaté ;
- les arêtes  $a_2$  et  $a_3$  se rencontrent au niveau d'un même sommet. Un sommet et une arête sont détruits. Cette étape est l'inverse de la première, et correspond à la contraction d'arête.

Avec le phénomène de glissement, nous pouvons définir une autre sorte de sédimentation qui correspond de manière intuitive au remplissage d'un trou. La figure 11 montre une telle sédimentation. Il y a succession de contractions d'arêtes et d'éclatements de sommets, ce qui correspond bien au glissement de sommets le long des interfaces.

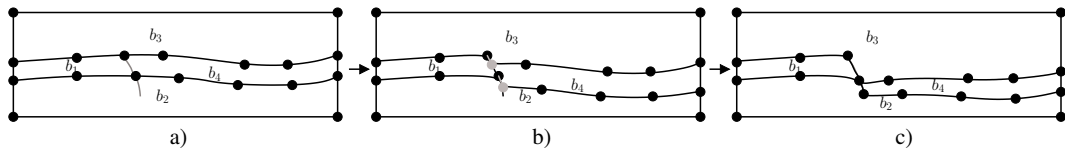
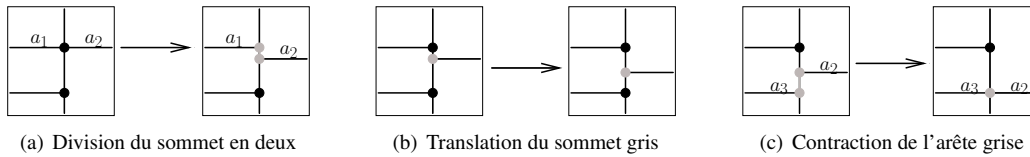
FIG. 9 – Glissement de  $b_4$  par rapport à  $b_1$ .

FIG. 10 – Étapes du glissement.

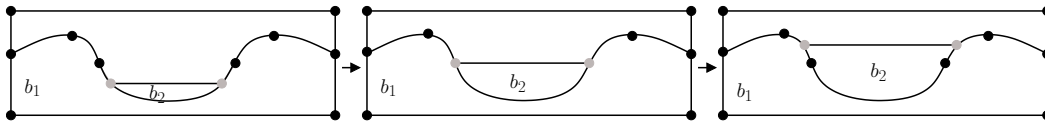


FIG. 11 – Sédimentation à l'aide du glissement.

## 5 Définition des opérations topologiques

Nous avons défini des phénomènes géologiques à partir d'opérations topologiques et géométriques. Les opérations topologiques que nous avons précédemment utilisées sont : l'éclatement de sommet en arête (pour le glissement), l'éclatement de chemin d'arêtes en face (pour la sédimentation) et l'identification de sommets (pour la création de failles); la contraction d'arêtes et la suppression sont définies dans [DL03].

Nous travaillons avec le modèle topologique des cartes généralisées, une extension des cartes combinatoires [Edm60]. Elles permettent de représenter des quasi-variétés de dimension  $n$ , orientables ou non, avec ou sans bord. Pour rappel, une  $n$ -G-Carte est définie à l'aide d'un  $(n+2)$ -uplet  $G = (B, \alpha_0, \dots, \alpha_n)$  tel que  $B$  est un ensemble d'éléments de base appelé brins, et  $\alpha_i$  et  $\alpha_i\alpha_j$  sont des involutions pour  $0 \leq i < i+2 \leq j \leq n$ . La figure 12 présente le dessin d'un carré collé avec un triangle, ainsi que sa représentation par une 2-G-Carte. Le plongement est indépendant du modèle topologique. Nous utilisons un plongement linéaire pour représenter les objets géométriques.

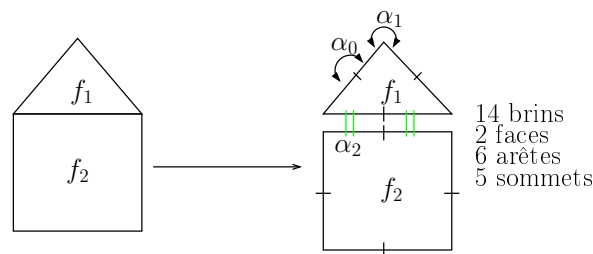


FIG. 12 – À gauche une figure géométrique, à droite sa représentation sous forme de 2-G-Carte.

### 5.1 Éclatement d'un sommet en arête

Intuitivement, éclater un sommet en une arête revient à séparer l'ensemble des arêtes incidentes au sommet considéré en deux sous-ensembles d'arêtes distinctes (Fig. 13(a)). Un de ces sous-ensembles est délimité par les deux arêtes  $a_1$  et  $a_2$ , et contient les arêtes situées "entre"  $a_1$  et  $a_2$  (en noir sur la

figure). L'autre sous-ensemble contient les arêtes restantes (en gris). L'éclatement de sommet en arête aboutit à deux sommets incidents respectivement à chacun de ces deux sous-ensembles (Fig. 13(b)).

**Définition 1** Soit  $G = (B, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$  une 2-G-Carte. Soient  $b_1^1, b_1^2, b_1^3$  et  $b_1^4$  des brins de  $B$  tel que :

- $\exists p > 0, b_1^1 = b_1^2(\alpha_2\alpha_1)^p\alpha_2$ ; (a)
- $b_1^3 = b_1^2\alpha_1$ ;
- $b_1^4 = b_1^1\alpha_1$ .

En dimension 2, l'éclatement d'un sommet en arête engendre une 2-G-Carte  $G' = (B', \alpha'_0, \alpha'_1, \alpha'_2)$  telle que :

- $B' = B \cup \{b_2^1, b_2^2, b_2^3, b_2^4\}$ ; (b)
- $\forall b \in B, b\alpha'_0 = b\alpha_0$ ;
- $\forall b \in B - \{b_1^1, b_1^2, b_1^3, b_1^4\}, b\alpha'_1 = b\alpha_1$ ;
- $\forall b \in B, b\alpha'_2 = b\alpha_2$ ;
- $b_2^1\alpha'_0 = b_2^4, b_2^2\alpha'_0 = b_2^3$ ;
- $\forall i \in 1, \dots, 4, b_2^i\alpha'_1 = b_1^i$ ;
- $b_2^1\alpha'_2 = b_2^2, b_2^3\alpha'_2 = b_2^4$ .

Dans la définition 1, dans l'équation (a)  $b_1^1$  et  $b_1^2$  représentent les brins frontières des arêtes à séparer. Dans l'équation (b),  $b_2^1, b_2^2, b_2^3$  et  $b_2^4$  représentent les brins créés par l'opération d'éclatement.

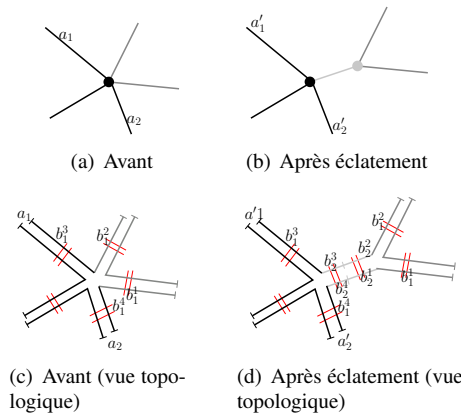


FIG. 13 – Éclatement d'un sommet en arête (2D).

## 5.2 Éclatement d'un chemin d'arêtes en face

Intuitivement, un chemin d'arêtes désigne une ligne polygonale. L'éclatement du chemin d'arêtes en face, de manière imagée, est une opération qui fait une entaille le long du chemin, et coud le bord ainsi créé avec une face adaptée.

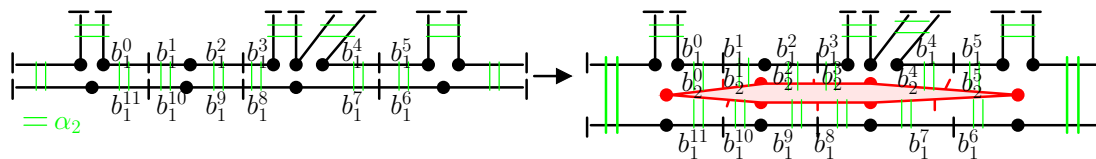


FIG. 14 – Éclatement du chemin d'arêtes compris entre les brins  $b_1^0$  et  $b_1^5$  en face.

**Définition 2** En dimension 2, un chemin d'arêtes  $C$  est une suite  $(b^0, b^1, \dots, b^{2k+1})$  de brins tels que :

- $b^{2p+1} = b^{2p}\alpha_0$ ;
- $b^{2q} = b^{2q-1}(\alpha_1\alpha_2)^m\alpha_1$  avec  $1 \leq q \leq k$  et  $m \geq 0$ .

**Définition 3** Soit  $G = (B, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$  une 2-G-Carte. Soient  $C = \{b_1^0, \dots, b_1^{2k+1}\}$  un chemin d'arêtes et  $C' = \{b_1^{2k+2}, \dots, b_1^{4k+3}\}$  son image par  $\alpha_2$  telle que :

- $C \subset B$ ,  $C' \subset B$  et  $C \cap C' = \emptyset$ ;
- $\forall i \in [2k+2 \dots 4k+3]$ ,  $b_1^i = b_1^{i-(2k+2)} \alpha_2$ .

En dimension 2, l'éclatement d'un chemin d'arêtes en face engendre une 2-G-Carte  $G' = (B', \alpha'_0, \alpha'_1, \alpha'_2)$  tel que :

- $B' = B \cup \{b_2^0, \dots, b_2^{4k+3}\}$ ; (a)
- $\forall b \in B$ ,  $b\alpha'_0 = b\alpha_0$  et  $b\alpha'_1 = b\alpha_1$ ;
- $\forall b \in B - (C \cup C')$ ,  $b\alpha'_2 = b\alpha_2$ ;
- $b_2^{2a}\alpha'_0 = b_2^{2a+1}$  avec  $0 \leq a < 2k+1$ ;
- $b_2^{2a+1}\alpha'_1 = b_2^{(2a+2) \bmod (4k+4)}$  avec  $0 \leq a \leq 2k+1$ ;
- $b_2^i\alpha'_2 = b_1^i$  avec  $0 \leq i \leq 4k+3$ .

Dans la définition 3, dans l'équation (a) les brins  $b_2^0, \dots, b_2^{4k+3}$  représentent les brins, correspondant à la face, créés par l'opération d'éclatement de chemin d'arêtes en face.

### 5.3 Identification de deux sommets

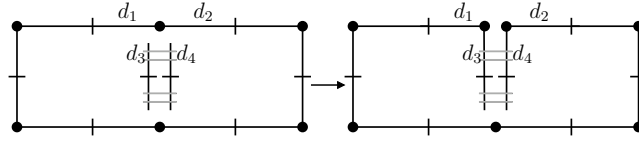


FIG. 15 – Identification de deux sommets.

**Définition 4** Soient  $G = (B, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2)$  une 2-G-Carte et  $D \subset B$  un ensemble de brins représentant une ligne polygonale, soient  $d_3, d_4 \in D$  et  $d_1, d_2 \in B - D$  tels que :

- $\forall d \in D, d\alpha_2 \neq d \wedge d\alpha_0 \neq d \wedge (d(\alpha_1\alpha_2))^2 = d \vee d\alpha_1\alpha_2 = d \vee d\alpha_1 = d$ ; (a)
- $d_1\alpha_1 = d_2 \wedge d_3\alpha_2 = d_4 \wedge (d_3\alpha_1 = d_3 \vee d_3\alpha_1\alpha_2 = d_3)$ . (b)

En dimension 2, l'identification de  $d_1$  et  $d_3$  engendre une 2-G-Carte  $G' = (B, \alpha_0, \alpha'_1, \alpha_2)$  telle que :

- $\forall d \in B - \{d_1, d_2, d_3, d_4\}$ ,  $d\alpha'_1 = d\alpha_1$ ;
- $d_1\alpha'_1 = d_3, d_2\alpha'_1 = d_4$ .

Dans la définition 4, l'équation (a) définit la ligne polygonale. Dans l'équation (b),  $d_3$  et  $d_4$  représentent une des extrémités de la ligne polygonale. La figure 16 montre que l'opération d'identification peut aboutir à un objet non-orienté lors de l'identification de la dernière extrémité de la ligne polygonale. Pour avoir un objet orienté, il suffit que  $d_3 \in \langle \beta_1 \rangle (d_1\alpha_0)$  avec  $\beta_1 = \alpha_0\alpha_1$ .

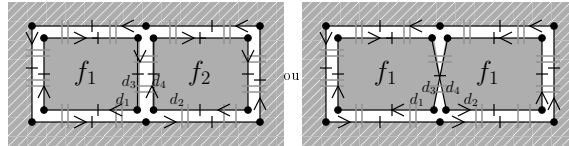


FIG. 16 – Identification et orientabilité.

## 6 Représentation de l'animation

Dans notre cadre de travail, nous supposons que les phénomènes sont définis entre deux instants précis sur une certaine durée. À partir de cette hypothèse, nous pouvons naturellement penser à réaliser l'animation par moments-clefs (*keyframes*). Nous pouvons également utiliser une approche *spatio-temporelle* en incorporant la dimension du temps dans les objets traités, ce qui nécessite de définir les opérations en  $2D+1$ . Nous présentons ci-dessous ces deux approches.



## 6.1 Approche par keyframes

Une approche pour modéliser l’animation est d’utiliser un ensemble d’images-clefs et de créer par interpolation les images intermédiaires. Dans notre cas, nous choisissons de créer une image-clef pour un ensemble de modifications topologiques effectuées à un même instant  $i_k$ . Entre deux instants, la topologie est constante, seul le plongement varie et produit l’animation.

De manière plus détaillée, une image-clef est une 2-G-Carte représentant l’animation à un instant  $i_k$ . Nous représentons l’instant initial  $i_0$  par une 2-G-Carte. Pour chaque ensemble de modifications topologiques à effectuer à l’instant  $i_{k+1}$ , nous recopions la carte correspondant au dernier instant connu ( $i_k$ ) et nous lui appliquons les opérations topologiques. Cette approche nécessite au préalable un tri selon le temps des opérations topologiques à effectuer. En d’autres termes, il n’y a pas de modifications topologiques entre deux instants  $i_k$  et  $i_{k+1}$ .

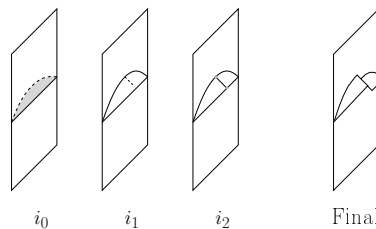


FIG. 17 – Représentation par instants-clefs d’une sédimentation suivie d’un glissement le long d’une faille. Les parties non visibles sont affichées en gris et en pointillés.

Prenons l’exemple de la sédimentation d’une couche qui est coupée en deux par une faille, dont le résultat est suivi d’un glissement (figure 17). Tout d’abord, nous utilisons l’image de départ ( $i_0$ ), représentant une couche plate qui sert de support pour la sédimentation représentée par un dédoublement de l’arête support. En modifiant le plongement, nous faisons apparaître la sédimentation jusqu’en  $i_1$ . À l’instant  $i_1$ , nous insérons un sommet sur l’interface supérieure de la couche, créons une arête et l’identifions à ce dernier sommet. Progressivement, la faille s’agrandit jusqu’à  $i_2$ . À l’instant  $i_2$ , la faille coupe complètement la couche en deux. Pour réaliser cette opération, nous insérons un sommet sur l’interface inférieure de la couche et identifions l’extrémité de l’arête libre de la faille. Cette faille permet un glissement (peu importe la cause physique). Pour ce faire, toujours à l’instant  $i_2$ , nous éclatons les sommets extrémités de la faille.

## 6.2 Approche spatio-temporelle

Nous avons également considéré l’approche spatio-temporelle, consistant à ajouter une dimension représentant le temps aux objets représentés. L’animation s’obtient par intersections successives d’un hyperplan perpendiculaire à l’axe du temps avec la scène. Contrairement à la première approche décrivant une succession d’événements déconnectés, l’utilisation d’objets spatio-temporels permet d’avoir un unique modèle géométrique représentant toute l’évolution.

La figure 18 montre un exemple d’un objet spatio-temporel  $1D + 1$ . Cet objet est un triangle. En extrayant chacune des coupes temporelles, nous obtenons une dilatation d’une arête au cours du temps.

Une manière de construire des objets spatio-temporels est d’extruder les objets spaciaux  $nD$  le long d’une arête temporelle. L’objet  $nD + 1$  ainsi obtenu représente une invariance sur la durée. En utilisant un plongement linéaire, la géométrie est contrôlée par les sommets. Les changements topologiques s’effectuent de manière locale avec les cartes généralisées. Les opérations décrites à la section 5 sont donc ré-exprimées pour tenir compte de la dimension temporelle.

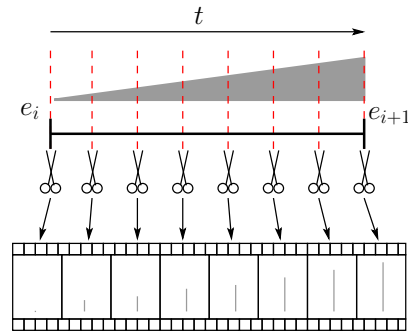


FIG. 18 – Objet spatio-temporel, représentant la dilatation d'une arête au cours du temps.

### 6.3 Discussion

Avec l'approche spatio-temporelle, nous avons un objet continu qui peut se voir comme un historique de l'évolution de l'objet à travers le temps. Ce fonctionnement implique de penser les opérations différemment car il faut prendre en compte la continuité temporelle. Les opérations topologiques se traduisent par deux types de modifications : spatiales et temporelles. L'information de continuité portée par le modèle  $2D + 1$  avec les 3-G-Cartes est redondante et coûteuse en terme de mémoire (une arête est un ensemble de  $n$  brins avec  $n > 4$ ). Le modèle étant continu, chaque opération se décrit à la fois dans le plan "spatial", mais également en termes de liens "historiques" le long de l'axe temporel. Cette gestion des voisinages spatiaux et historiques alourdit considérablement la définition des opérations et laisse imaginer les conséquences pour un passage en  $3D + 1$ .

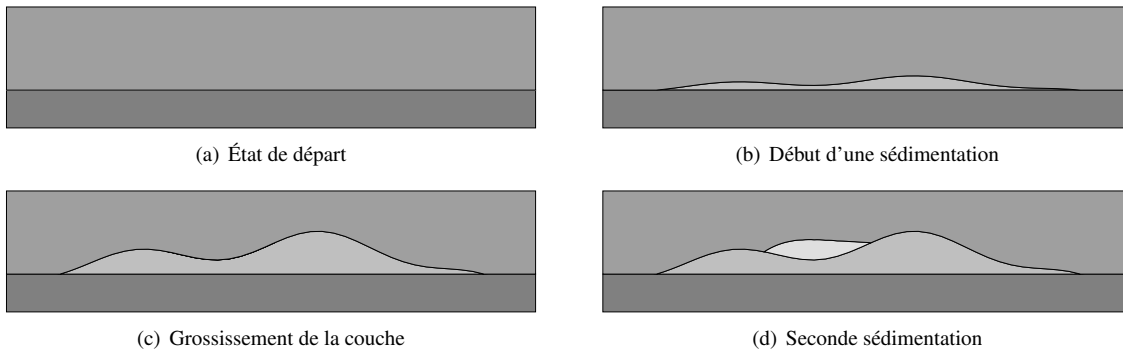


FIG. 19 – Exemple de scénario représentant l'animation de deux sédimentations successives.

La figure 19 montre le résultat de deux sédimentations successives qui vont aboutir à la création de deux nouvelles couches. Cet exemple est totalement synthétique. L'objet spatio-temporel correspondant à cette animation est montré en figure 20.

L'approche par keyframes produit une succession d'images ayant subi des modifications topologiques. Chaque image comprend l'évolution de ces objets et permet d'obtenir géométriquement l'image suivante. Cependant, par rapport aux objets spatio-temporels, aucun liens topologique n'existe entre deux instants-clefs, ce qui peut nuire à l'interprétation de l'animation (pas de liens "historiques"). Pour pallier à ce manque, il est possible de lier les cartes entre elles par des liaisons indépendantes du modèle topologique.

La première approche est donc plus complète, mais plus redondante et plus difficile à appréhender, alors qu'au contraire, la seconde approche est plus légère mais ne contient pas l'historique de l'objet.

Après avoir expérimenté l'approche par objets spatio-temporels, nous avons définitivement opté pour l'approche par keyframes. En effet, l'approche spatio-temporelle nous a montré ses limites, tant en termes de souplesse que de contrôle.

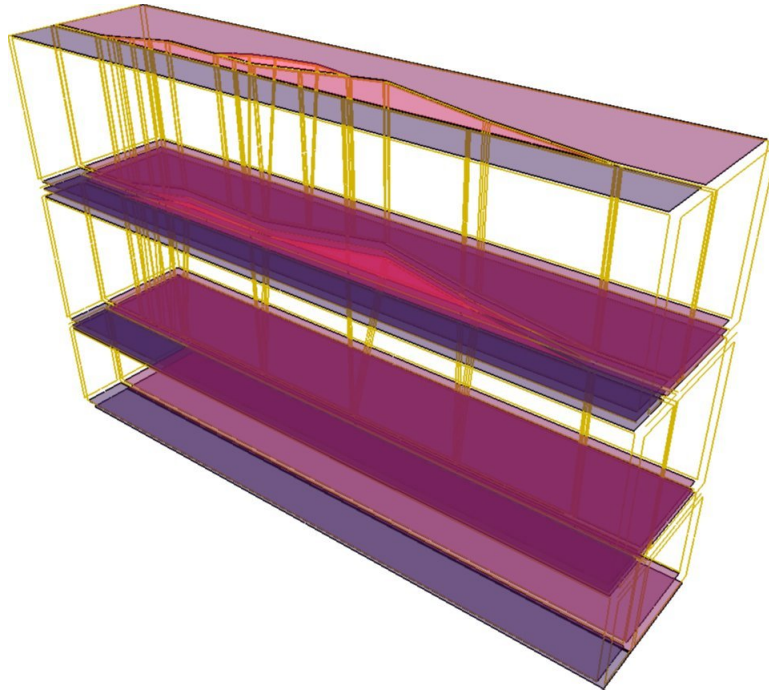


FIG. 20 – Objet spatio-temporel correspondant à l’animation de la figure 19. L’axe temporel est vertical.

Listing 1 – Script décrivant deux sédimentation dont la géométrie est représentée par deux fonctions de hauteurs

```

— Fonctions utilitaires
— normalize(xd,xa,xc) =  $\frac{xc-xd}{xa-xd}$ 
function normalize(xd, xa, xc) return (xc - xd) / (xa - xd) end
— lisse(y) =  $4y - 4y^2$ 
function lisse(pos) return 4 * pos - 4 * (pos * pos) end

— Fonctions hauteurs pour les couches a et b
function fct_hauteur_couche_a(xd, xa, xc)
  local pos = normalize(xd, xa, xc)
  — fonction_hauteur_couche_a(x) =  $2 * lisse(x) * (\sin(x * 720) + 2)$ 
  return (math.sin(math.rad(pos * 720)) + 2) * 2 * lisse(pos)
end
function fct_hauteur_couche_b(xd, xa, xc)
  local pos = normalize(xd, xa, xc)
  — fonction_hauteur_couche_b(x) =  $lisse(x) * (\cos(x * 100) + 2)$ 
  return (math.cos(math.rad(pos * 100)) + 2) * lisse(pos)
end

— Scénario
simpleCombiCreateNewScenario(70)
  — Découpage de l’interface bottom en 4
  splitInterface(0, "bottom", {10.1, 20.2, 90.3});
  — Sédimentation sur bottom1 et bottom2. Plongement calculé en utilisant la
  — fonction de hauteur "fonction_hauteur_couche_a". Remarque : nous
  — pourrions bien entendu lire les informations, dans un fichier.
  namedCombiSedimentation(0, 15, "interface_a", "fct_hauteur_couche_a",
    50, {"bottom1", "bottom2"})
  — Découpage de l’interface a en 3
  splitInterface(15, "interface_a", {25.4, 50.5})
  — Sédimentation sur interface_a1
  namedCombiSedimentation(15, 15, "interface_b", "fct_hauteur_couche_b",
    50, {"interface_a1"})

```

## 7 Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous nous sommes attachés à décrire les principaux phénomènes géologiques en termes d'opérations topologiques, afin de construire des animations basées sur ces phénomènes. Il est bien entendu possible d'ajouter de nouveaux phénomènes en se basant sur la même méthodologie. Les animations peuvent être construites suivant deux approches : spatio-temporelle et par keyframes. Nous avons retenu cette dernière approche pour des raisons de contrôle de l'animation. L'étape suivante de nos travaux consistera à construire, à l'aide de scripts, des animations plus élaborées, en composant les phénomènes, tout en préservant leur contrôle. Nous étendrons cette étude à la 3D. Enfin, nous aborderons le problème de la validation des animations par des géologues, en leur fournissant des outils permettant de simuler l'évolution des couches géologiques.

## Références

- [BNDP05] A. Bac, V. Tran Nam, M. Daniel, and M. Perrin. Traitement de surfaces géologiques pour la construction de modèles 3d. In *GTMG 2005*, 2005.
- [BSP<sup>+</sup>04] Sylvain Brandel, Sébastien Schneider, Michel Perrin, Nicolas Guiard, Jean-François Rainaud, Pascal Lienhardt, and Yves Bertrand. Automatic building of structured geological models. *JCISEV*, 2004.
- [DL03] G. Damiand and P. Lienhardt. Removal and contraction for n-dimensional generalized maps. In *Discrete Geometry for Computer Imagery*, number 2886 in Lecture Notes in Computer Science, pages 408–419, Naples, Italy, november 2003.
- [Edm60] Jack Edmonds. A combinatorial representation for polyhedral surfaces. In *Notices*, volume 7. Amer. Math. Soc., 1960.
- [FHHR98] M. Floater, Y. Hallbwachs, O. Hjelle, and M. Reimers. A cad-based approach to geological modelling. Nancy, France, Juin 1998.
- [GPRB05] N. Guiard, M. Perrin, J.F. Rainaud, and Y. Bertrand. Outils pour la modélisation de scènes géologiques 3d. mars 2005.
- [Lie89] P. Lienhardt. Subdivision of n-dimensional spaces and n-dimensional generalized maps. In *Annual Symposium on Computational Geometry SCG'89*, pages 228–236, Saarbruchen, Germany, June 1989. ACM Press.
- [Mal02] J.-L. Mallet. Geomodeling. *Oxford University Press*, 2002.
- [Per98] Michel Perrin. Geological consistency : an opportunity for safe surface assembly and quick model exploration. *3D Modeling of Natural Objects, A Challenge for the 2000's*, Juin 1998.
- [Sch02] Sébastien Schneider. *Pilotage automatique de la construction de modèles géologiques surfaciques*, *École des Mines de Saint-Étienne*. PhD thesis, 2002.