

Le problème

Sommaire

1.1	Le problème	2
1.2	L'existant et ses limites	4
1.2.1	Les modèles cinématiques 2D	4
1.2.1.1	Modèle de SUPPE ([15], 1983)	4
1.2.1.2	Modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990)	7
1.2.1.3	Modèle de DIVIES : FOLDIS 2D ([6], 1997)	9
1.2.2	Les modèles cinématiques 3D	10
1.2.2.1	Les méthodes de test de compatibilité surfacique	10
1.2.2.2	Modèles cinématiques 3D actuels	12
1.2.3	Le glissement sur les failles	16
1.3	Les hypothèses du cadre de la thèse	18
1.3.1	Pour le glissement sur les failles	19
1.3.2	Pour la déformation des écaïlles	19

La modélisation de bassin a pour but de simuler l'ensemble des processus physiques qui vont de la génération des hydrocarbures à partir des roches mères, à la migration, et à l'accumulation dans les zones réservoirs. Cette modélisation est utilisée par les plus grandes compagnies pétrolières en exploration.

L'expérience acquise tout au long des nombreuses études menées montre que la compréhension du système pétrolier est très souvent un phénomène 3D. Un modèle en 3D est nécessaire pour représenter la géométrie à l'âge actuel et sa reconstruction dans le passé, puis pour prédire les chemins de migration, et en dernier point, pour estimer les volumes en place.

Des outils logiciels de modélisation de bassin existent déjà en 3D mais pour des structures complexes où les failles sont représentées simplement. Des outils existent aussi en 2D avec des structures complexes faillées. Les structures complexes plissées faillées en 3D restent encore un sujet de recherche en modélisation de bassin car de nombreux problèmes restent à résoudre. Concernant le problème de la restauration 3D, il existe des outils surfaciques et volumiques. Le couplage simulation des transferts de fluides et restauration est encore difficile dans le cas de modèles de bassin 3D complexes.

Le problème

Comment modéliser les transferts de fluide dans les bassins sédimentaires ?
Plusieurs facteurs entrent en ligne de compte :

- l'évolution de la géométrie et la cinématique des failles présentes dans le bassin,
- l'évolution des propriétés de transfert le long des failles et entre les couches sédimentaires,
- l'évolution de la déformation des écailles avec différents mécanismes de déformation.

La géométrie des failles est importante pour la caractérisation et les contraintes que l'on applique au cours de la cinématique d'un bassin. Si on arrive à qualifier l'ensemble des failles présentes sur un bassin sédimentaire, une première idée de la cinématique du bassin peut-être envisagée. La surface de faille est définie comme la surface de glissement entre deux blocs. Les failles peuvent être principalement de trois types (Fig. 1.1) :

- les failles normales ont un plan de faille incliné vers le bloc affaissé (le phénomène lié est une extension horizontale, Fig. 1.1 (a)),

- les failles inverses ont un plan de faille qui surplombe le bloc affaissé (le phénomène lié est la compression horizontale ce qui correspond à une faille chevauchante, Fig. 1.1 (b)),
- les failles décrochantes correspondent à un plan de faille vertical sur lequel se produit un glissement horizontal (Fig. 1.1 (c)).

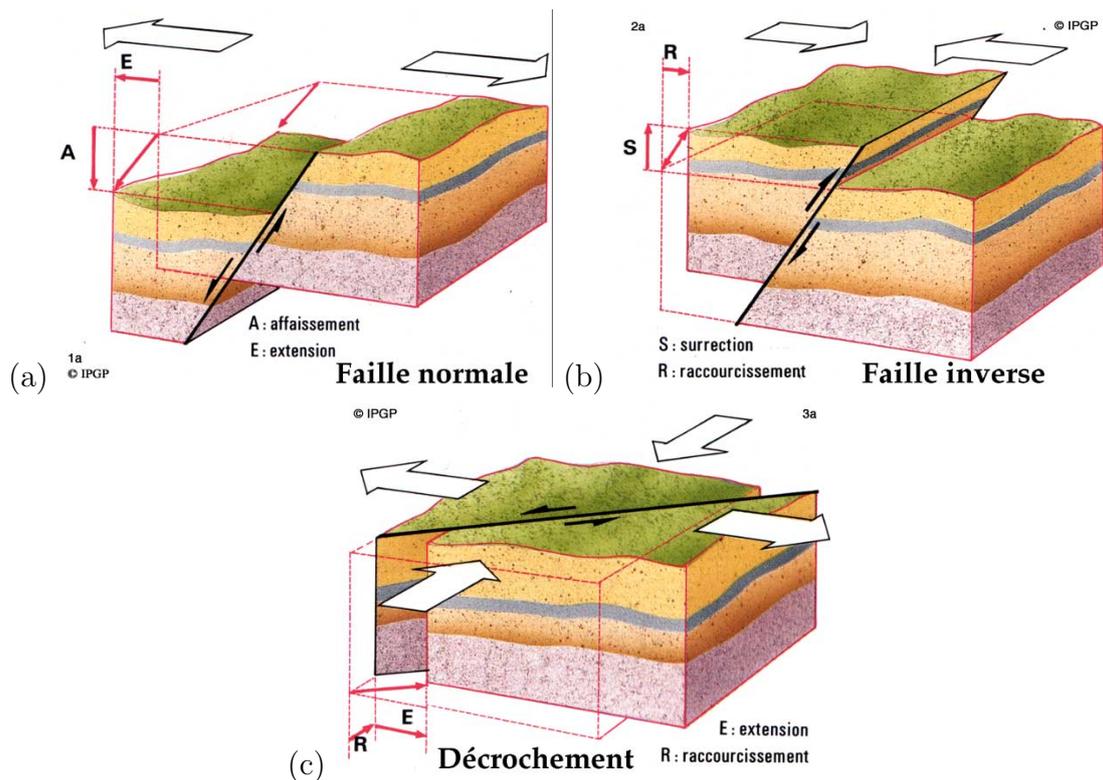


Fig. 1.1 – Représentation des différents types de faille (normale (a), inverse (b), décrochante (c)).

Les failles peuvent avoir des histoires complexes suivant les événements qui surviennent sur un même bassin sédimentaire au cours des temps géologiques. Le comportement rhéologique des roches peut induire différents comportements cassant ou ductile. Ainsi, les séismes peuvent induire des circulations de fluides par fracturation. Mais ils peuvent également induire des processus de compaction qui vont cicatriser ces fractures et réduire les circulations.

La géométrie des failles et la cinématique des blocs constituant les bassins impliquent la déformation des écaïles. Des plis peuvent alors apparaître. Les roches constituant les différentes couches géologiques peuvent avoir des comportements rhéologiques différents. Ces comportements impliquent des modes de déformation

différents. Deux modes de déformation sont considérés dans le cas de contact parfait (sans frottement), la flexion et le cisaillement vertical.

D'autres phénomènes physiques interviennent dans la géométrie actuelle de nombreux bassins sédimentaires :

- la sédimentation accumule des dépôts suivant des agents dynamiques externes comme l'eau et le vent ou par des processus physico-chimique,
- l'érosion est responsable de l'évolution des reliefs engendrés par la déformation de l'écorce terrestre,
- la compaction tasse les roches meubles constituant les bassins sédimentaires au cours du temps.

Cette présentation très générale des phénomènes géologiques amène beaucoup de questions. Comment comprendre et modéliser l'ensemble de ces phénomènes physiques? Dans cette thèse, l'accent est mis spécifiquement sur la cinématique des bassins 3D complexes et sur la caractérisation de la surface de faille qui est une surface de glissement. L'essentiel de la thèse se développe autour du processus de déformation du bassin après dépôt et compaction. Les processus d'érosion ne sont pas encore intégrés dans les modèles.

1.2 L'existant et ses limites

1.2.1 Les modèles cinématiques 2D

Les modèles qui vont suivre décrivent la cinématique des plis sur des rampes en deux dimensions (2D). Le prototype développé dans la thèse s'inspire de ces différentes méthodes.

1.2.1.1 Modèle de SUPPE ([15], 1983)

Ce modèle est la première tentative d'approche cinématique 2D et il sert de base à beaucoup d'autres modèles. Le modèle de SUPPE ([15], 1983) traite des plis à déplacement parallèle en coupe et les relations angulaires associées au déplacement de ce pli par rapport à la rampe. Le mécanisme définissant ce déplacement a pour base le plissement par flexion pour des couches infiniment stratifiées. Le déplacement du compartiment chevauchant sur la rampe est supposé parfait, c'est à dire sans frottement et la transformation est supposée isopaque (c'est à dire que les couches de la coupe stratigraphique ne varient pas d'épaisseur au cours du déplacement). Par ailleurs la roche, constituant le modèle, est supposée incompressible ce qui implique

une condition supplémentaire qui est la conservation des aires. Le modèle est basé sur deux principaux éléments :

- le positionnement des « kinks » aux zones charnières du bassin,
- la résolution d'une équation trigonométrique du troisième degré reliant les angles du chevauchement et l'angle de la rampe (Fig. 1.2, équation 1.1) :

$$\tan \theta \tan \gamma (1 - \tan^2 \gamma + 2 \tan \gamma \tan \tau) = (\tan \tau (1 - \tan^2 \gamma) - 2 \tan \gamma) (\tan \gamma - 2 \tan \theta) \quad (1.1)$$

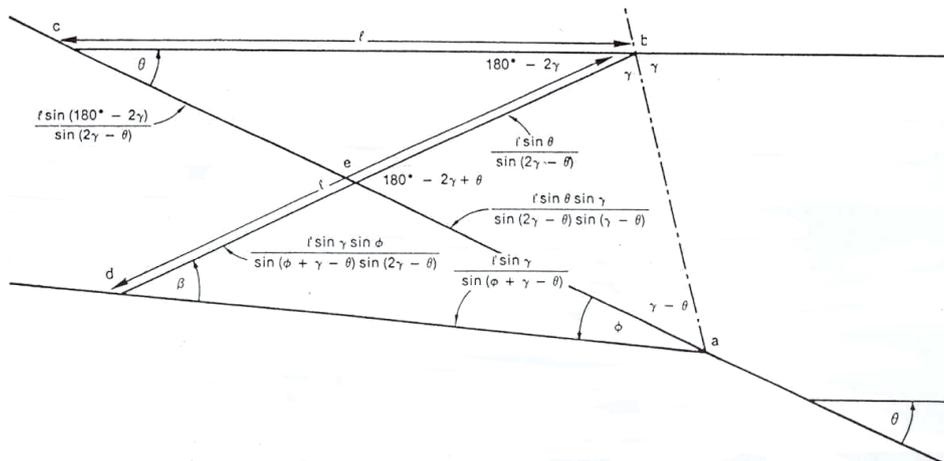


Fig. 1.2 – Relation angulaire pour le positionnement des kinks (SUPPE[15], 1983).

où :

- les données du problème sont :
 - θ est l'angle entre la direction de la stratification dans l'écaille et le support de celle-ci, avant pliage sur le kink,
 - ϕ est l'angle entre les deux directions du support, de part et d'autre du point de rupture de pente (c'est à dire le kink),
- les inconnues sont :
 - β est l'angle entre la stratification dans le second compartiment et le support de celui-ci, après pliage sur le kink,
 - γ est l'angle entre la direction de la stratification et le kink.

D'autre part, on a les relations angulaires suivantes :

$$\beta + \phi = \theta + \delta \quad (1.2)$$

$$2\gamma + \delta = \pi \quad (1.3)$$

$$\tau = \theta - \phi \quad (1.4)$$

$$\beta = \pi - 2\gamma + \tau \quad (1.5)$$

L'équation 1.5 sur l'angle β , inclus le fait que l'on prend en compte l'ensemble des couches, ce qui interdit donc un glissement des couches les unes par rapport aux autres.

L'ensemble des relations angulaires se retrouve à l'aide de la figure 1.2. Pour exemple de ce type de déplacement, il faut regarder la figure 1.3 suivante. Elle permet également de voir le positionnement des axes de kink et celui de l'axe de kink après déplacement. Il s'agit des traits en pointillés.

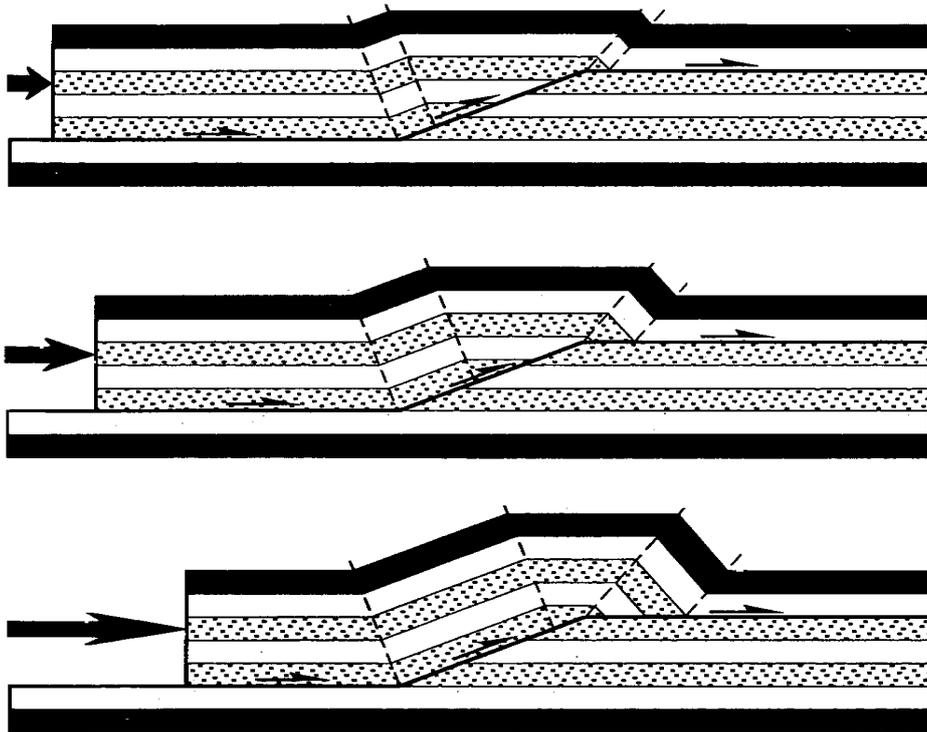


Fig. 1.3 – Schéma de SUPPE, évolution d'un pli de rampe (SUPPE[15], 1983).

Les géométries créées par ce mécanisme peuvent paraître simples, mais elles peuvent très rapidement se compliquer surtout dans leurs interprétations. Cette complexité est induite par la combinaison de la genèse de nouvelles surfaces accompagnant le déplacement du bloc chevauchant et de la fragmentation des surfaces

axiales par interférences mutuelles. Ce modèle possède également des limites d'un point de vue angulaire. Il ne faut pas que la rampe dépasse un angle de 30° si $\phi = \theta$, sinon il n'y a plus de solution à l'équation 1.1. Un autre critère de SUPPE qui est très intéressant, est le rapport de glissement :

$$R = \frac{\sin(\gamma - \theta)}{\sin(\phi + \gamma - \theta)} = \frac{\text{glissement après le pli}}{\text{glissement avant le pli}} \quad (1.6)$$

Il permet de déterminer si on se trouve dans une situation de pli en anticlinal ($R < 1$) ou en synclinal ($R > 1$).

1.2.1.2 Modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990)

Le modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990), est un précurseur dans l'application d'une méthodologie discrète de déformation d'un pli d'une rampe. Il présente un algorithme cinématique basé sur une description Lagrangienne pour un modèle direct. L'ensemble du domaine est subdivisé en domaine de pendage constant et de vecteur déplacement associé également constant (même direction de déplacement). Les différents domaines de pendage sont subdivisés au niveau des changements de pendage à l'aide des bissectrices, exemple la droite (DR2) (Fig. 1.4). Les différents vecteurs déplacement restent parallèles au support de glissement, ce qui se traduit par les relations suivantes si on reste dans un même domaine de déplacement :

$$\begin{cases} x' = x + |s| \\ y' = y \end{cases} \quad (1.7)$$

où :

- (x, y) sont les coordonnées d'un point dans le repère (x, y) : rotation du repère (X, Y) d'un angle θ_1 ,
- (x', y') sont les coordonnées de ce point après déformation,
- $|s|$ est la distance du déplacement,

ce qui se traduit par les relations suivantes si on change de domaine de déplacement :

$$\begin{cases} x' = (x + |s|) \cos \alpha - (y + m'_2 d_x - d_y) \frac{(\cos \alpha - 1)}{m'_2} \\ y' = (x + |s|) \sin \alpha - (y + m'_2 d_x - d_y) \frac{\sin \alpha}{m'_2} + y \end{cases} \quad (1.8)$$

où :

- d est le point d'intersection entre l'inflexion de la faille et le plan axial correspondant dans le nouveau repère, (d_x, d_y) sont les coordonnées de ce point dans (x, y) ,

- α est l'angle entre l'axe x et la droite (dB') (Fig. 1.4),
 - m'_2 est égal à $\tan(\beta - \theta_1)$, où β est l'angle entre la bissectrice et l'horizontale.
- Le modèle est basé sur des éléments finis quadrilatères.

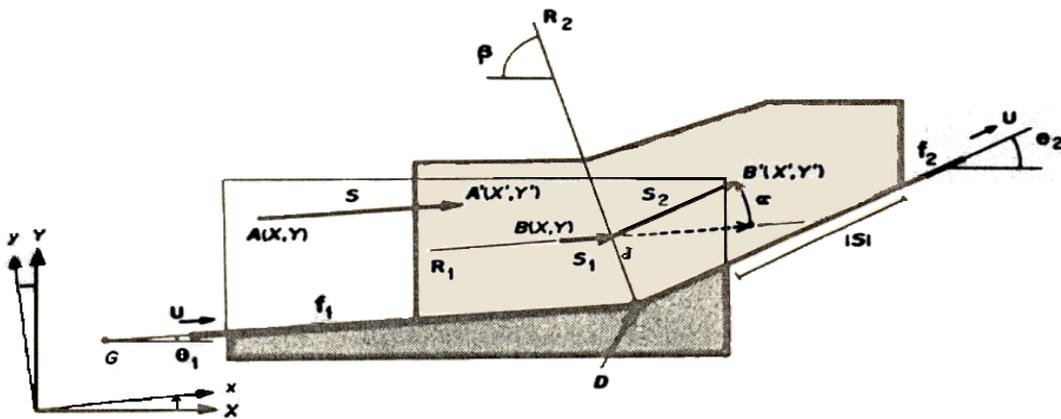


Fig. 1.4 – Principe géométrique du modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).

Ce modèle est très intéressant dans sa simplicité, mais il a un défaut principal qui est la discontinuité du vecteur déplacement aux zones charnières qui sont les changements de pente du support. Ces discontinuités introduisent un cisaillement longitudinal, ces cisaillements ajoutés aux cisaillements externes appliqués sur le toit de la couche rendent la métrique de la transformation non conforme. Par ailleurs les deux auteurs ont repoussé les limites du modèle initial en décrivant parfaitement les zones de duplexes. La figure 1.5 représente un exemple de ce type de déplacement, les traits dépassant du modèle sont les bissectrices associées au changement de vecteur déplacement.

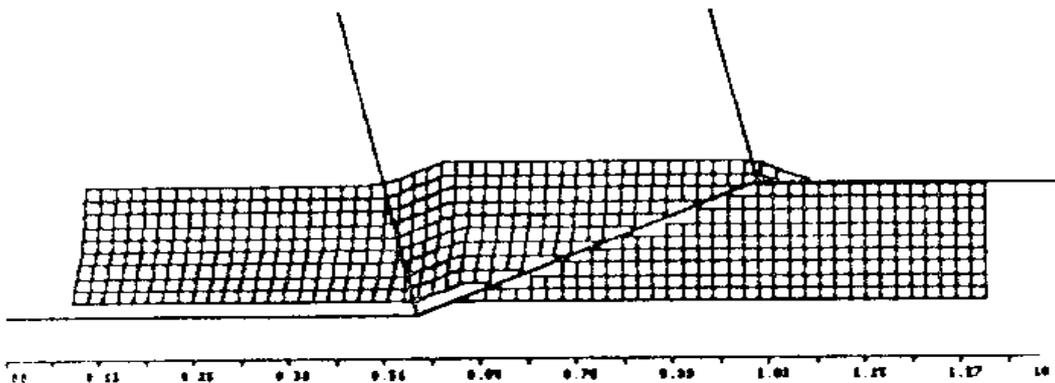


Fig. 1.5 – Vue du maillage après déformation CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).

1.2.1.3 Modèle de DIVIES : FOLDIS 2D ([6], 1997)

Le modèle FOLDIS de DIVIES ([6], 1997), s'inscrit dans la continuité des travaux de SUPPE, dans la mesure où il s'appuie sur la résolution d'hypothèses purement géométriques. L'apport fondamental provient de son approche totalement discrète du problème de la déformation, ainsi que de la prise en compte des phénomènes de sédimentation, d'érosion et de compaction.

Le modèle FOLDIS calcule les géométries successives d'un bassin sédimentaire, simulant la déformation tectonique et la compaction due à l'enfouissement. La déformation tectonique est déterminée par des principes géométriques portant sur les éléments discrets du bassin. Le bassin est découpé en sous domaines partagés par des failles. Ces sous domaines sont alors partagés en unités cinématiques, qui caractérisent les couches lithologiques du bassin. Enfin chaque couche est discrétisée en éléments polygonaux. Le plissement est ensuite supposé isopaque, et la déformation est localisée aux interfaces entre les couches. La déformation est modélisée à partir de la minimisation de quatre critères :

- le glissement entre les couches est supposé parfait (pas de frottement),
- l'aire de chaque élément est conservée au cours de la déformation (pas de compaction),
- l'épaisseur de chaque élément est conservée,
- le rapport des angles aux sommets des arêtes verticales est conservé. Cette conservation permet de garder des géométries cohérentes.

La figure 1.6 représente un exemple de modélisation à l'aide de FOLDIS 2D, on remarque que les structures traitées se sont énormément complexifiées depuis les premiers modèles de SUPPE.

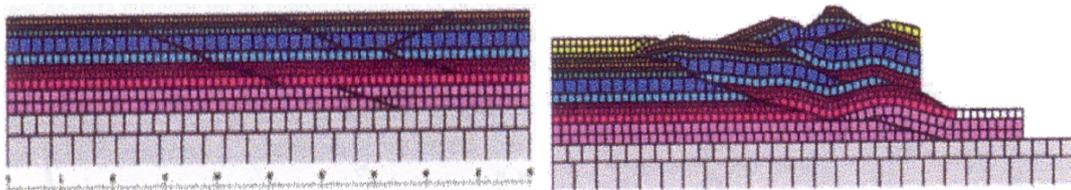


Fig. 1.6 – Représentation d'un modèle FOLDIS 2D (DIVIES[6], 1997).

1.2.2 Les modèles cinématiques 3D

En 3D il est nécessaire de s'assurer de la compatibilité géométrique et cinématique des structures. La modélisation 3D implique donc l'utilisation en amont de méthode de test de compatibilité. Les données naturelles ne permettent pas en général de dessiner sans approximation les structures géologiques. Néanmoins, en identifiant le mécanisme de déformation de certaines couches, une contrainte supplémentaire est apportée au dessin des structures. Cette identification du mécanisme se fait par l'observation des structures déformées. Par exemple, l'identification des couches pliées par flexion et développables est possible. Des logiciels ont été développés pour imposer cette contrainte et mieux dessiner les structures. Ces logiciels testent la compatibilité surfacique des structures plissées et faillées développables.

1.2.2.1 Les méthodes de test de compatibilité surfacique

Ces méthodes intègrent la notion de développabilité des surfaces. Elles en testent la validité et elles permettent d'améliorer le dessin d'une structure dans le cadre de l'hypothèse de développabilité. L'amélioration de la qualité du dessin d'une surface est possible si cette surface est considérée comme développable ou quasi-développable.

Modèle UNFOLD de GRATIER ET GUILIER ([8], 1993)

Le modèle UNFOLD (GRATIER[8], 1993) propose une méthode pour l'équilibrage de surfaces, et permet de tester la validité de l'interprétation d'une géométrie structurale de strates plissées et faillées. Il permet d'estimer correctement le champ de déplacements associé au plissement.

La méthode décrit une couche sédimentaire compétente, plissée et faillée, à partir d'une grille triangulaire. Les éléments de la grille sont supposés parfaitement rigides (ils ne subissent pas d'autre déformation que des rotations et des translations), et leur taille dépend de la courbure de la surface choisie. Une fois la grille initiale définie, la remise à plat peut commencer. Les éléments sont rassemblés sur une surface plane horizontale ; un algorithme des moindres carrés, minimisant les distances entre les éléments et réduisant les vides à leur minimum, est utilisé. Le degré de compatibilité fourni par différents indicateurs (comme la développabilité des surfaces) teste la validité de l'accord géométrique de la couche restaurée.

Par ailleurs, si le plissement et la formation des failles sont supposés sans élongation ou raccourcissement, ces variations peuvent être intégrées dans la modélisation dès lors qu'elles sont quantifiables. La connaissance du champ de déplacements finis de chaque triangle révèle la compatibilité entre la déformation des plis et failles, ainsi que les glissements et rotations associés à cette déformation. Enfin, le programme traite indépendamment les surfaces plissées et superposées.

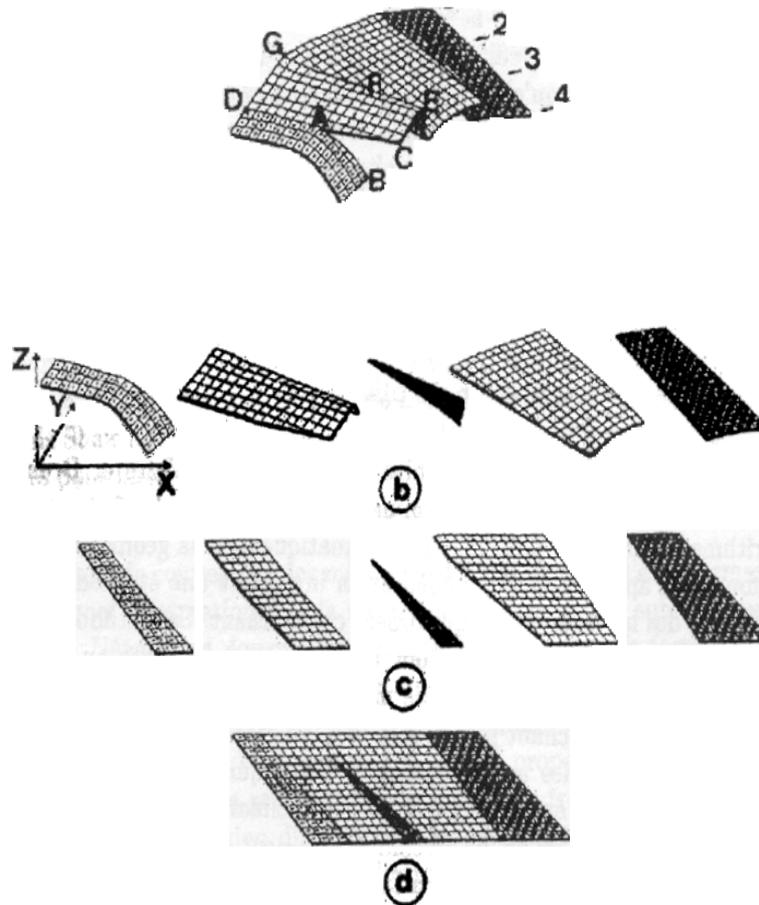


Fig. 1.7 – Schéma de restauration d'une surface plissée par le modèle de dépliage UNFOLD (GRATIER[8], 1993).

Modèle de SAMSON (SAMSON[14], 1996)

SAMSON ([14], 1996) a repris ce concept d'ajustage par moindres carrés mais en l'appliquant globalement à l'ensemble de la surface en recherchant un minimum global.

Modèle de GALERA ([7], 2003)

En complément, les méthodes d'analyse de courbure des surfaces peuvent contribuer à évaluer parmi d'autres facteurs, la développabilité (GALERA[7], 2003).

1.2.2.2 Modèles cinématiques 3D actuels

Modèle de CORNU ([2], 2001)

L'approche de FOLDIS 2D même si elle est intéressante semble difficilement généralisable au 3D, le problème serait trop lourd à gérer de par la non linéarité des équations et la non unicité de la solution.

Le modèle CORNU ([2], 2001) porte sur une modélisation 3D cinématique de bassin sédimentaire. Ces modèles représentent le chevauchement d'un bloc sur une rampe et la formation des plis qui sont occasionnés.

C'est un modèle cinématique 3D qui repose sur une série d'hypothèses. Dans un premier temps les couches sont supposées isopaques. Ensuite le glissement entre les couches est parfait (pas de frottement) et les couches glissent indépendamment les unes des autres. Il peut y avoir des comportements différents d'une couche à l'autre dans un même bloc. L'aire de la surface neutre de chaque couche est conservée. La surface neutre d'une couche partage celle-ci en deux compartiments : un domaine en extension vers l'extrados et un domaine en compression vers l'intrados, cette surface est supposée indéformable et reste parallèle au support de la couche.

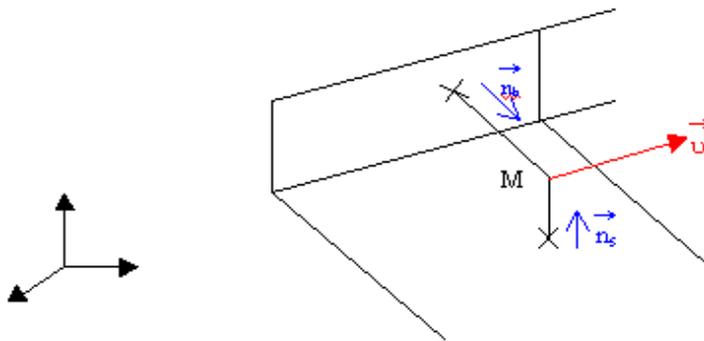


Fig. 1.8 – Définition de la direction de déplacement pour un point de la surface neutre.

L'épaisseur d'une couche est par définition la distance normale au support de glissement d'un point de la surface neutre, ramenée pour des raisons de discrétisation à la plus petite distance au support. La direction de déplacement d'un point sur la surface neutre est définie par le vecteur \vec{v} (Fig. 1.8) :

$$\vec{v} = \vec{n}_s \wedge \vec{n}_b \quad (1.9)$$

où :

- \vec{n}_s est le vecteur normal au support,
- \vec{n}_b est le vecteur normal à la surface latérale imposée.

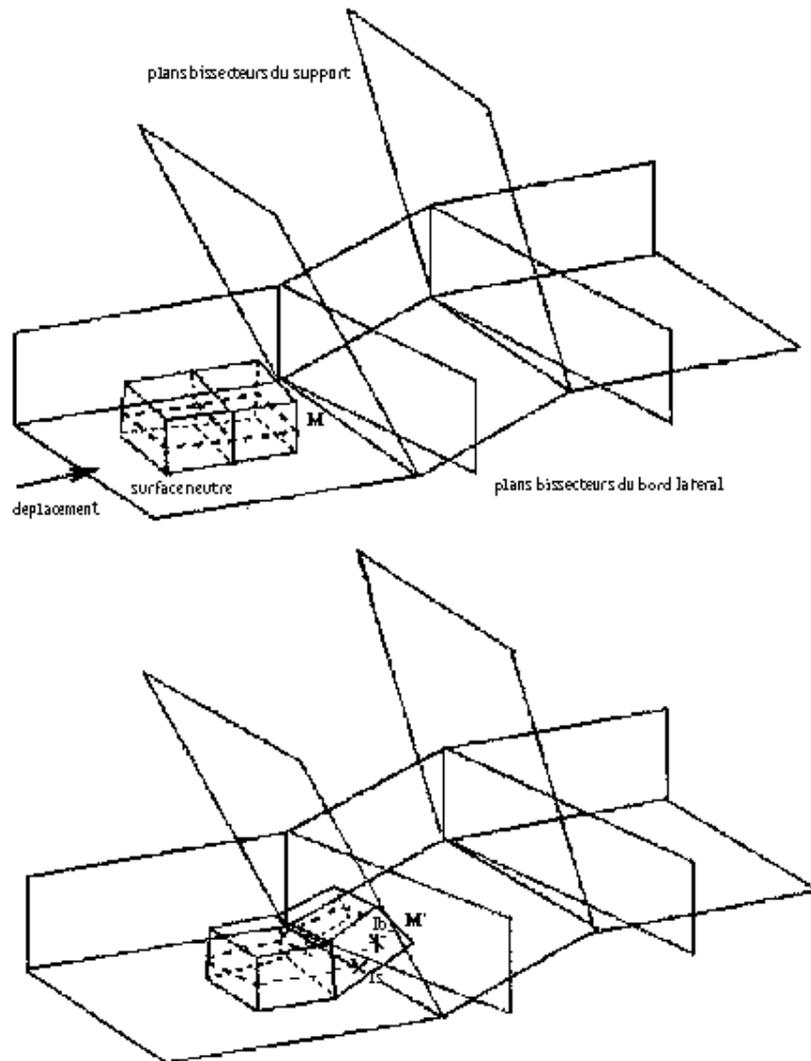


Fig. 1.9 – Déplacement d'un point de la surface neutre (CORNU[2], 2001).

Un point M de la surface neutre se déplace suivant une droite D (M, \vec{v}) et a pour déplacement total la distance δ (Fig. 1.9). Il se déplace sur (D) jusqu'à ce que la surface neutre et l'un des plans bissecteurs du domaine (le plan bissecteur lié au bord latéral ou le plan bissecteur lié au support) se coupent. Soit I_i le point d'intersection entre (D) et l'un des plans bissecteurs, la distance euclidienne d_i , dans ce cas trois possibilités apparaissent :

- $d_i > \delta$: les coordonnées du point image M' a pour coordonnées :

$$M' = \begin{cases} x_0 + \nu_x \delta \\ y_0 + \nu_y \delta \\ z_0 + \nu_z \delta \end{cases} \quad (1.10)$$

- $d_i = \delta$: M' est confondu avec I_i
- $d_i < \delta$: M se déplace en I_i , mais il doit encore se déplacer d'une distance $\delta - d_i$.

On recommence les opérations précédentes avec pour point d'origine I_i et une nouvelle définition de $\vec{\nu}$ en fonction du support et du bord.

Ce type de déplacement se fait pour la surface de base du bloc.

La reconstruction des couches supérieures utilise une autre méthode. Elle s'évertue plutôt à conserver les relations angulaires, l'angle α relatif au support et l'angle θ relatif au support et une longueur $\delta' = \|M_1 M_2\|$ qui est la distance entre deux points consécutifs de la surface neutre (Fig. 1.10).

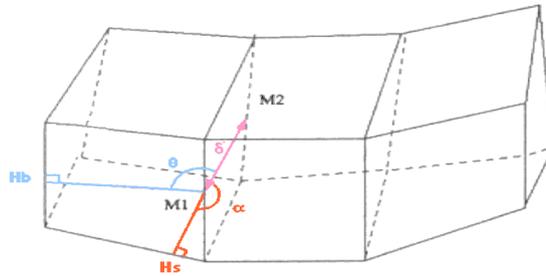


Fig. 1.10 – Reconstruction des couches supérieures (CORNU[2], 2001).

H_s et H_b sont les projections normales de M_1 sur le support et le bord.

Des modes différents de déformation peuvent être appliqués à chaque couche d'un bloc. La figure 1.11 représente l'évolution d'un bassin avec un bloc déformé sur un bloc de base après un déplacement de 3000 m, avec un mode de déplacement distinct pour chaque couche du bloc déformé. La couche de base est déformée avec un déplacement de type flexion et la couche supérieure avec un cisaillement vertical.

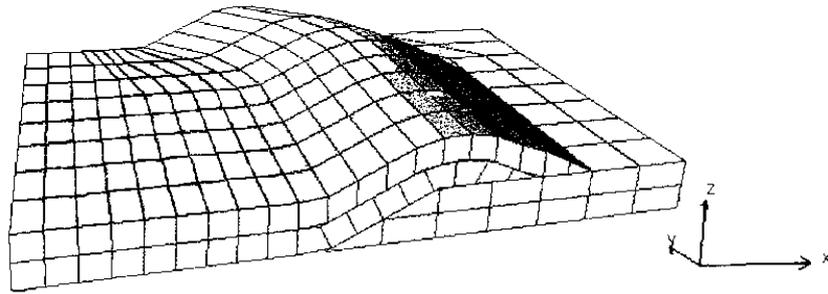
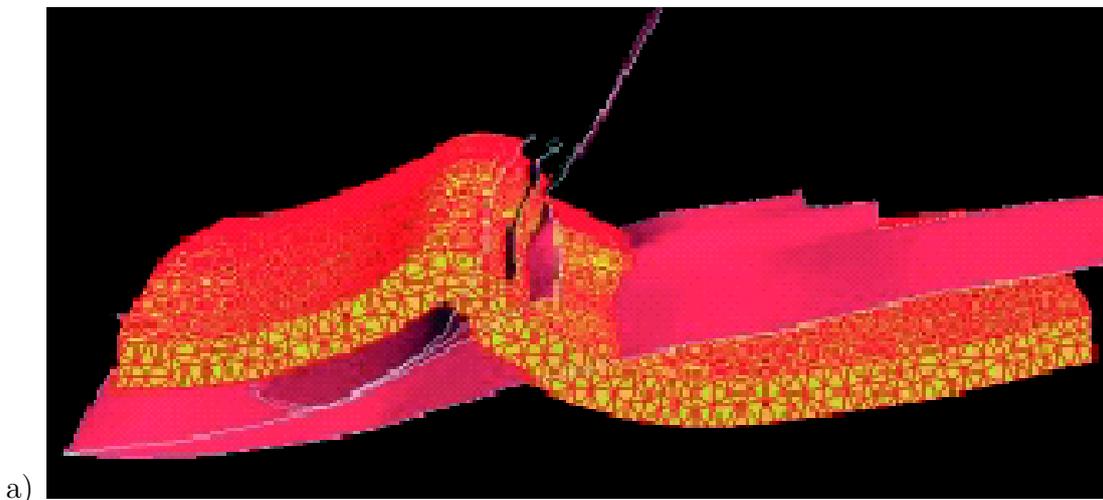


Fig. 1.11 – Bassin déformé après un déplacement de 3000 m, un mode de déformation pour chacune des couches (CORNU[2], 2001).

Modèle KINE3D (MORETTI[11], 2006)

Une autre approche est l'utilisation de logiciel géomécanique en éléments finis. Cette approche est volumique. Elle considère un volume déformé élastiquement qui peut-être coupé par des failles. Avec cette approche, le mouvement relatif des blocs le long des failles est bien contraint, ainsi que la forme globale du pli. Mais ce type d'approche nécessite de s'appuyer sur des structures dont la cohérence géologique a été testée préalablement (GALERA[7], 2003).

Cette méthode de déformation 3D a été appliquée à l'exemple suivant, un anticlinal faillé d'une zone sub-andine de Bolivie (Fig. 1.12 (a) et (b)).



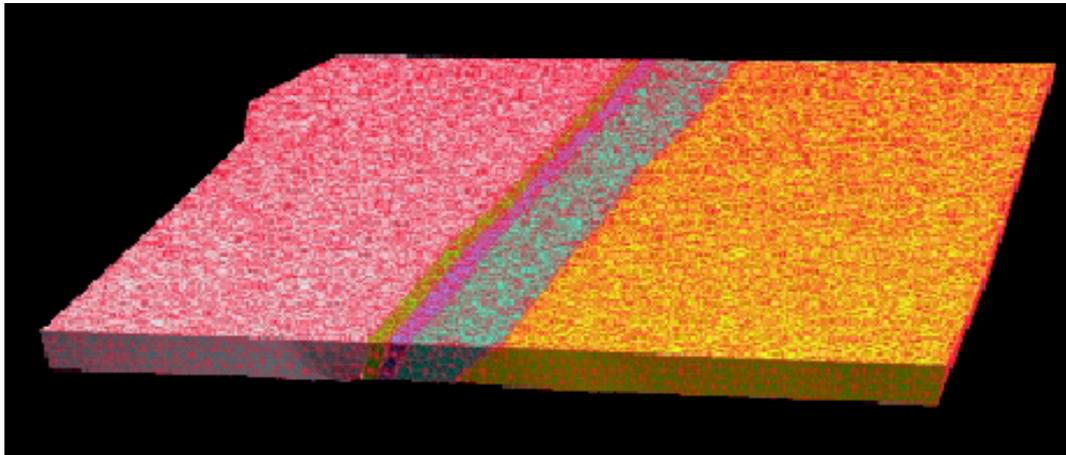


Fig. 1.12 – Restauration 3D d’un anticlinal faillé dans une zone sub-andine de Bolivie. a) Géométrie initiale. b) Géométrie restaurée (MORETTI[11], 2006).

Un autre modèle DYNEL3D (MAERTEN[10], 2004)

Un autre exemple d’une telle approche est celle de MAERTEN & MAERTEN ([10], 2004) qui cherche à mieux caractériser la fracturation à l’échelle du réservoir (MAERTEN[9], 2001).

1.2.3 Le glissement sur les failles

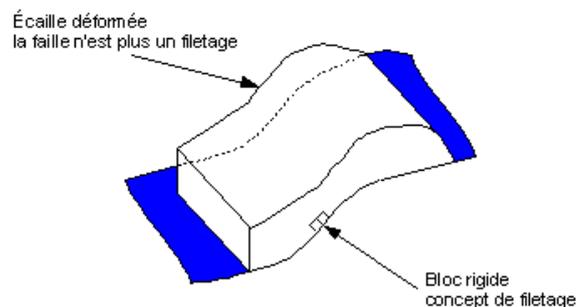


Fig. 1.13 – Domaine de validité du concept de filetage : la faille (limite globale de l’écaille) n’est pas filetée par contre localement l’élément est rigide et il existe un filetage à l’échelle de la maille.

Les failles sont des éléments cruciaux de la modélisation cinématique. Elles délimitent les écailles déformables à certaines échelles, notamment les écailles plissées mentionnées ci-dessus (Fig. 1.11). Sur cette même figure (1.11) les écailles sont discrétisées par des éléments rigides qui peuvent localement s'interpénétrer. L'hypothèse de déplacement est que ces éléments glissent sans frottement. Donc la surface de faille est une surface de glissement à l'échelle élémentaire de la maille. Pour caractériser une surface de glissement, la notion de filetage est utilisée (THIBAUT[17], 1996 et THIBAUT[16], 1994). Il est important de souligner que cette notion de filetage s'applique à une échelle donnée (celle de la maille) mais qu'elle ne s'étend pas à l'échelle de l'écaille puisque celle-ci est déformée (Fig. 1.13).

Les filetages sont des surfaces qui peuvent glisser sur elles-mêmes en restant inchangées. Un filetage peut-être caractérisé par un champ de vecteurs particulier appelé torseur (THIBAUT[16], 1994). Les lignes de champs de ce torseur sont des hélices qui peuvent être interprétées sur la surface comme des stries calculées. Elles peuvent être comparées aux stries naturelles lorsqu'elles sont connues.

Plusieurs filetages peuvent être cités :

- les surfaces cylindriques dont les stries sont des droites, qui peuvent être vues comme des hélices de pas infini (Fig. 1.14 (a)),
- les surfaces de révolution dont les stries sont des cercles (hélices à pas non nul) centrés sur l'axe de révolution (Fig. 1.14(b)),
- les filetages quelconques appelés hélicoïdes (DARBOUX[5], 1917) dont les stries sont des hélices de même axe, de même pas (Fig. 1.14 (c)).

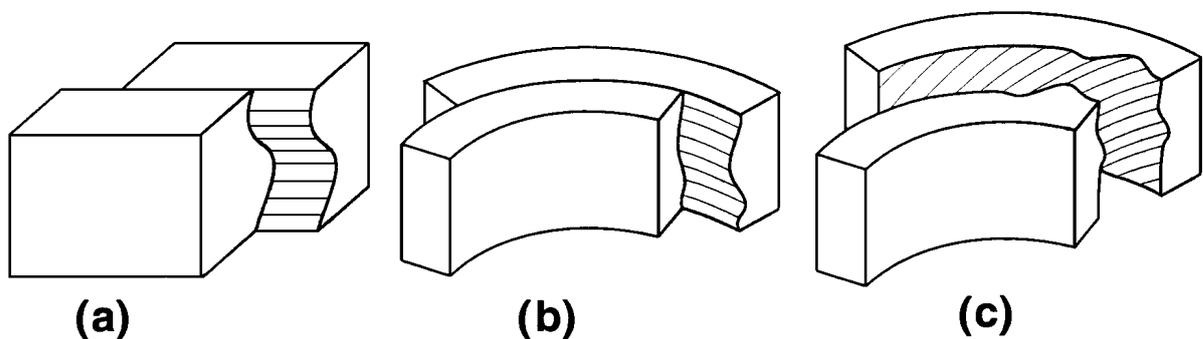


Fig. 1.14 – Représentation des différents filetages possibles. Les surfaces cylindriques sont représentées en (a), les surfaces de révolution en (b), et les hélicoïdes en (c) (THIBAUT[16], 1994).

Par conséquent la description exacte de cette surface de faille permet de connaître le vecteur déplacement ainsi qu'éventuellement le vecteur rotation lié au déplacement entre les deux blocs. Un champ de vecteurs peut alors décrire la surface et permettre de la paramétrer.

Actuellement, aucune méthode en 3D ne permet à la fois de restaurer, puis de déformer les structures d'un bassin en s'assurant de la compatibilité de ces déformations avec les données de terrain. L'objectif de cette thèse est d'implémenter cette méthode.

1.3 Les hypothèses du cadre de la thèse

Les points de difficultés du passage à la 3D pour le problème cinématique en géométrie complexe sont les suivants :

- le premier point est celui des données, qui sont le plus souvent trop limitées pour documenter précisément le modèle à son état actuel, notamment à l'échelle d'un bassin sédimentaire. Mais ce point va s'améliorer à l'avenir avec les nouvelles techniques de l'imagerie sismique dans les structures complexes, et il faut être prêt à intégrer cette évolution méthodologique.
- Le deuxième point est celui de la réversibilité cinématique. On doit résoudre un problème inverse pour comprendre la géométrie actuelle et son évolution au cours des temps géologiques. Mais on doit aussi résoudre un problème direct pour simuler le comportement de génération et de migration des hydrocarbures de l'état initial de formation du bassin jusqu'à l'état actuel. On a donc besoin de développer des méthodes intégrant la réversibilité du chemin de déformation.
- Le troisième point se situe au niveau des interfaces entre les blocs. Les surfaces de faille et surtout le glissement existant ou non au niveau de ces interfaces doit permettre de mieux contraindre la cinématique du bassin dans son ensemble.

Le plan de la thèse est le suivant :

- (a) dans un premier temps, l'aspect « surface de contact » pour les failles et la caractérisation du glissement.
- (b) Puis, l'aspect « déformation des écailles », avec tous les problèmes pouvant découler de la cinématique 3D utilisée pour modéliser un bassin sédimentaire.

1.3.1 Pour le glissement sur les failles

Pour traiter le point **(a)**, on a étudié le miroir de la faille de Vuache (Annecy, Alpes Françaises), ce miroir est hectométrique. La faille de Vuache est une faille décrochante. Les données d’affleurement ont été collectées grâce à deux appareils, des scanners 3D. L’objectif de ces missions de terrain était l’étude de la rugosité du miroir de la faille de Vuache à différentes échelles (RENARD[12], 2006). Les scanners permettent d’acquérir énormément de points (environ sept millions de points pour une fenêtre de 22 mètres sur 12 mètres). Parmi cette quantité importante de données, la première étape a été pour notre objectif de sélectionner un nombre réduit de points pour assurer une représentation satisfaisante de la géométrie de la surface de faille. La deuxième étape a été de générer à partir de cette surface interpolée une surface de glissement.

1.3.2 Pour la déformation des écailles

Dans le premier paragraphe (1.1), l’ensemble des phénomènes physiques pris en compte dans un bassin sont décrits, ainsi que les différents blocs géologiques décrivant un bassin. Dans le cadre de la thèse, les hypothèses simplifiées suivantes ont été prises en compte :

- (a) les failles sont *a priori* connues, et délimitent les blocs constituant le bassin,
- (b) les phénomènes de compaction et d’érosion ne sont pas pris en compte,
- (c) les couches géologiques sont isopaques,
- (d) la géométrie complète du bassin avant modélisation est *a priori* connue.

D’un point de vue numérique, le bassin est décrit par un **maillage hexaédrique** car celui-ci est nécessaire pour le simulateur de fluides, pour calculer précisément les transferts de fluides ou de flux au travers des faces.

D’un point de vue descriptif, le nombre de mailles dans chacune des directions de l’espace est constant entre le modèle initial et le modèle final. Cela a pour conséquence qu’il est impossible de générer des failles ou fractures en dehors de celles prises en compte dans le modèle initial.

Dans le cadre de la thèse, les hypothèses décrites en **(a)**, **(b)**, **(c)**, **(d)** sont prises en compte pour résoudre le problème cinématique 3D, multiblocs et réversible.

La réversibilité : la simulation directe nécessite de déterminer un chemin géologique entre l’état initial et final qui soit cinématiquement cohérent. Pour aider à

définir ce chemin, on résout un problème de restauration entre l'état final et initial. Le chemin est ainsi réversible.

Le multiblocs 3D : L'approche multiblocs 3D est indispensable pour traiter les exemples naturels qui prennent en compte plus d'une faille (Golfe de Mexico (ROWAN[13], 1999)).