



HAL
open science

Modélisation cinématique réversible 3D de structures géologiques plissées et faillées

Natacha Gibergues

► **To cite this version:**

Natacha Gibergues. Modélisation cinématique réversible 3D de structures géologiques plissées et faillées. Sciences de la Terre. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2007. Français. NNT: . tel-00433804

HAL Id: tel-00433804

<https://theses.hal.science/tel-00433804>

Submitted on 20 Nov 2009

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

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

INSTITUT FRANÇAIS
DU PÉTROLE
Direction Géologie-Géochimie-Géophysique

UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
Laboratoire de Géophysique Interne
et Tectonophysique

THÈSE

présentée
pour l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ JOSEPH FOURIER
École Doctorale : Terre, Univers, Environnement
Spécialité : Terre Solide
par

Natacha GIBERGUES

Sujet de la thèse :

**MODÉLISATION CINÉMATIQUE 3D RÉVERSIBLE
DE STRUCTURES GÉOLOGIQUES PLISSÉES ET FAILLÉES**

Soutenue publiquement le 21 Septembre 2007 devant le jury composé de :

Président : Mary FORD, Professeur à l'ENSG-INPL (Nancy)
Rapporteurs : Delphine ROUBY, Chargé de recherche au CNRS (Rennes)
*Dominique FRIZON DE LAMOTTE, Professeur à l'université
de Cergy-Pontoise*
*Directeur : Jean-Pierre GRATIER, Physicien d'Observatoire à l'université
Joseph Fourier (Grenoble)*
Muriel THIBAUT, Ingénieur de Recherche à l'IFP

REMERCIEMENTS

Merci tout d'abord à Bernard COLLETTA pour m'avoir accueillie durant ces trois années dans la direction Géologie-Géochimie-Géophysique de l'IFP.

Merci à Muriel THIBAUT et Jean-Pierre GRATIER pour leur patience et pour la qualité de leur encadrement durant cette thèse. Je tiens à vous exprimer toute ma gratitude et toute mon admiration pour vos compétences scientifiques à tous les deux. Encore merci de m'avoir permis d'apprendre autant de choses durant ces trois années, d'avoir été à mon écoute et de m'avoir épaulée dans les moments difficiles. Merci au professeur Dominique Frizon de Lamotte d'avoir accepté de présider le jury de soutenance.

Merci aux professeurs Delphine Rouby et à Dominique Frizon de Lamotte d'avoir assuré la lourde tâche d'être les correcteurs de cette thèse.

Merci à William SASSI et Jean-Luc RUDKIEWICZ de m'avoir dirigée à travers ce monde complexe qu'est la modélisation cinématique et de m'avoir aidé dans l'apprentissage du C++.

Merci à Olivier LERAT pour m'avoir aidé dans la manipulation de la RML.

Merci à Tristan CORNU pour sa disponibilité et ses explications scientifiques.

Merci à François RENARD pour m'avoir permis de faire un peu de terrain aux alentours de Grenoble.

Merci à Nadia, Yolande, Patrick, Denis, Didier, Khomsi, Bernard, Meriem, pour les discussions passionnées et les midis passés ensemble durant ces trois années.

Merci enfin à tous mes compagnons de thèse, solidaires dans nos soucis informatiques et administratifs, je veux donc dire tous les autres thésards que j'ai pu croiser et apprécier. Carine, Alex, Yannick, Ephi, Marco, le Tof, Cédric, anciens MATMECA tout comme moi. Narjès, Sébastien, Mabrouka, Raymi, Humberto, Carolina, Maria, Benjamin et tant d'autres croisés aux détours des couloirs ou des stages, toujours chaleureux et prêts à aider.

Une petite dédicace toute particulière pour Jean et Monique qui m'ont donné pour l'un le goût de la géologie et pour l'autre le goût de la lecture.

Et surtout un grand merci à mon chéri qui m'a supporté malgré les sauts d'humeur que peu engendrent une fin de thèse.

A Alain,
Christiane,
Nicolas,
Elsa et Sofia

Table des matières

Remerciements	i
Table des matières	vi
Table des figures	xi
1 Contexte général	1
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
2 Le glissement sur les failles	21
2.1 Méthodologie	22
2.2 Situation de la faille de Vuache	23
2.3 Application du filetage	26
2.3.1 Résultat sans filetage	27
2.3.2 Résultat avec un poids faible sur le filetage	28
2.3.3 Résultat avec un poids fort sur le filetage	30
3 La déformation des écaïlles	33
3.1 La méthodologie de la déformation des écaïlles	35
3.1.1 Les hypothèses géologiques de déformation	35
3.1.2 Les définitions mathématiques associées au modèle	38
3.1.2.1 Les définitions communes aux deux modes de « dé- placement déformation »	38
3.1.2.2 Définitions liées à une déformation en flexion	44

3.1.2.3	Définitions liées à une déformation en cisaillement vertical	47
3.2	Validation de la déformation des écailles	48
3.2.1	Test en mode direct sur un cas non cylindrique à deux blocs, avec une direction de pendage variable	48
3.2.1.1	Présentation du modèle à 4 couches avec une rampe à direction de pendage variable	48
3.2.1.2	Validation du déplacement en cisaillement vertical	49
3.2.1.3	Validation du déplacement en flexion	51
3.2.1.4	Étude de la conservation de l'aire de la surface neutre pour un déplacement en flexion	52
3.2.1.5	Test avec un couplage de deux modes de déplacement déformation, la flexion et le cisaillement	53
3.2.2	Problème inverse ainsi que réversibilité de la cinématique sur un cas cylindrique à trois blocs, avec un duplex	55
3.2.2.1	Choix d'un maillage judicieux	55
3.2.2.2	Les différences par rapport au cas précédent	55
3.2.2.3	Construction du modèle initial composé de trois blocs avec un duplex	57
3.2.2.4	Description du modèle initial	57
3.2.2.5	Validation de la réversibilité en cisaillement vertical en partant d'un état déformé	58
3.2.2.6	Validation de la réversibilité en flexion	61
3.2.2.7	Validation du mode direct de déplacement pour un couplage en flexion et en cisaillement vertical	65
3.2.3	Déplacement en mode direct d'un cas non cylindrique à trois blocs avec deux écailles	68
3.2.3.1	Présentation du modèle initial	68
3.2.3.2	Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec bord latéral vertical	72
3.2.3.3	Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec le bord contraint incliné	80
3.3	Discussion générale et Conclusion	81
4	Conclusion et perspectives	83
	Bibliographie	84

Table des figures

1.1	Représentation des différents types de faille (normale (a), inverse (b), décrochante (c)).	3
1.2	Relation angulaire pour le positionnement des kinks (SUPPE[15], 1983).	5
1.3	Schéma de SUPPE, évolution d'un pli de rampe (SUPPE[15], 1983).	6
1.4	Principe géométrique du modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).	8
1.5	Vue du maillage après déformation CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).	8
1.6	Représentation d'un modèle FOLDIS 2D (DIVIES[6], 1997).	9
1.7	Schéma de restauration d'une surface plissée par le modèle de dépliage UNFOLD (GRATIER[8], 1993).	11
1.8	Définition de la direction de déplacement pour un point de la surface neutre.	12
1.9	Déplacement d'un point de la surface neutre (CORNU[2], 2001).	13
1.10	Reconstruction des couches supérieures (CORNU[2], 2001).	14
1.11	Bassin déformé après un déplacement de 3000 m, un mode de déformation pour chacune des couches (CORNU[2], 2001).	15
1.12	Restauration 3D d'un anticlinal faillé dans une zone sub-andine de Bolivie. a) Géométrie initiale. b) Géométrie restaurée (MORETTI[11], 2006).	16
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.	16
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).	17
2.1	Les deux blocs solides glissent l'un par rapport à l'autre pour générer une surface de glissement. M est un point sur la surface filetée. $\vec{T}(M)$ est la valeur du torseur en tout point M de la surface. $\vec{\Omega}$ est le vecteur rotation du champ de vecteur.	22
2.2	Localisation de la faille de Vuache.	24
2.3	Scanner 3D de type RIEGL (a), scanner 3D de type GS100 (b).	24

2.4	Positionnement du scanner pour la prise de mesure.	25
2.5	Panorama de la faille de Vuache, avec la délimitation du miroir scanné et la direction principale des stries. La partie étudiée (Fig. 2.7) est représentée par des pointillées.	25
2.6	Image obtenue avec un scanner GS100 d'une sous surface du miroir de la faille de Vuache, (dimension : $x = 22 m$, $z = 12 m$, nombre de points décrivant la surface = 7 000 000 de points).	26
2.7	La surface interpolée ($dx = 20 mm$) est communiquée par le professeur RENARD de l'université de Grenoble.	27
2.8	Y-isolignes d'une portion du miroir de la faille de Vuache sans filetage en considérant 336 points de données.	28
2.9	Y-isolignes d'une portion du miroir de la faille de Vuache pour la surface paramétrée avec $w_t = 0.1$ poids faible associé au critère de filetage.	29
2.10	Carte des résidus pour la surface paramétrée avec $w_t = 0.1$ poids faible associé au critère de filetage.	30
2.11	Y-isolignes d'une portion du miroir de la faille de Vuache pour la surface paramétrée avec $w_t = 10$ poids associé au critère de filetage.	31
2.12	Carte des résidus pour la surface paramétrée avec $w_t = 10$ poids associé au critère de filetage.	31
3.1	Définition du socle d'un bloc, du support de glissement de la couche de base (a), du support de glissement d'une couche supérieure (couche n+1) (b).	36
3.2	Représentation d'un bloc avec bord contraint et support de glissement.	36
3.3	Représentation du déplacement d'un bloc initial (a) après cisaillement vertical (b), et flexion (c).	37
3.4	Définition de la surface neutre dans le cas de la flexion.	38
3.5	Les différents éléments constitutifs d'une couche.	39
3.6	Définition du déplacement calculé, ν_{bord} , pour le déplacement 3D avec la prise en compte d'un bord latéral contraint.	40
3.7	Déplacement d'un point M de la surface neutre en flexion, avant déplacement et définition des plans bissecteurs (a) et M' après déplacement, définition des points I_s et I_b (b).	42
3.8	Reconstruction des couches supérieures en 3D.	43
3.9	Élément avant déplacement puis après un déplacement en flexion (b) et après un déplacement en cisaillement vertical (a). Définition de la surface neutre dans le cas de la flexion (b), dans le cas du cisaillement vertical (a).	45
3.10	Schéma de reconstruction des éléments après flexion, condition de non croisement des arêtes.	46
3.11	Vue de dessus du modèle 3D avec représentation de l'intersection entre la surface de faille et les horizons.	48

3.12	Présentation du modèle 3D initial avec ces cotes.	49
3.13	Présentation du modèle 3D avant déplacement (a) et après 2000 <i>m</i> en cisaillement vertical (b), puis 4000 <i>m</i> en cisaillement vertical pour toutes les couches de l'écaille déplacée (c).	50
3.14	Présentation du modèle 3D avant déplacement (a) et après 1000 <i>m</i> en flexion glissement (b), puis 2000 <i>m</i> en flexion glissement pour toutes les couches de l'écaille déplacée (c).	52
3.15	Présentation d'un maillage avant (a) et après déplacement en flexion pour deux éléments E_1 et E_2 d'une couche. Le cas (c) est le cas pris en compte par la méthodologie et le cas (b) serait le cas obtenu si le nombre de mailles dans chaque direction était variable.	53
3.16	Présentation du modèle 3D après 2000 <i>m</i> en flexion pour la première et la troisième couche et en cisaillement vertical pour la deuxième et la quatrième couche de l'écaille déplacée (a), ainsi qu'un zoom sur la rampe de l'écaille déplacée (b).	54
3.17	Exemple d'une vue en coupe d'un modèle analogique 3D à l'état déformé (a), puis à l'état restauré (b).	56
3.18	Coupes 2D Thrustpack à un Y fixe.	56
3.19	Arbre de déplacement des blocs les uns sur les autres, le duplex se déplace sur le socle (a), puis l'écaille se déplace sur le socle et le duplex (b).	57
3.20	Modèle à l'état initial déformé avec la définition des différents supports de glissement.	58
3.21	Modèle restauré avec ses cotes.	58
3.22	Présentation du modèle à 3 blocs cylindriques avant déplacement (a) et après 5m en cisaillement vertical (b), puis 5m supplémentaire pour l'écaille et le duplex déplacés (c) puis la réversibilité de cette cinématique (d) et (e).	60
3.23	Définition des surfaces S_1 , S_2 , et de la distance h_1 d'un élément d'une couche.	61
3.24	Histogrammes du volume des éléments pour chaque couche du duplex et variation du volume de chacun de ces éléments pour un déplacement de 10 <i>m</i> en cisaillement vertical. Les erreurs sont négligeables.	62
3.25	Présentation du modèle cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a), après un déplacement de 5m suivant l'axe X en flexion (b), puis 5m supplémentaire pour l'écaille et le duplex déplacés en flexion (c), puis la réversibilité de cette cinématique (d) et (e).	64
3.26	Zoom du duplex dans son état restauré après un déplacement en flexion. 64	
3.27	Histogrammes du volume des éléments pour chaque couche du duplex et variation du volume de chacun de ces éléments en flexion pour un déplacement de 10 <i>m</i> suivant X.	66

3.28	Présentation du modèle cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) et après -3m en flexion et cisaillement vertical (b), puis -7m pour l'écaille et le duplex déplacés en cisaillement vertical (c).	67
3.29	Schéma des blocs montrant un ensemble typique de failles dans un système de sel allochtone (ROWAN[13], 1999).	68
3.30	Ensemble des coupes 2D décrivant le modèle non cylindrique à trois blocs, les coupes sont à $y=$ constante et la courbure des failles suivant l'axe Y est représentée, ces coupes permettent également de se représenter la géométrie de ces failles en profondeur.	69
3.31	Socle du modèle 3D non cylindrique avec définition des surfaces de faille et du bord contraint.	70
3.32	Vue de droite du modèle à trois blocs non cylindrique et cotes de ce bassin et définition des différents blocs.	70
3.33	Vue de dessus du modèle à trois blocs, cotes de ce bassin et définition des différents blocs.	71
3.34	Arbre de déplacement des blocs les uns par rapport aux autres, (a) déplacement de l'écaille 1 sur le socle, (b) déplacement de l'écaille 2 sur l'ensemble socle plus écaille 1.	71
3.35	Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) vue de droite, (b) vue de gauche, après un déplacement de 2000 m suivant l'axe X, déplacement de l'écaille 1 sur le socle vue de droite (c), vue de gauche (d), déplacement des deux écailles sur le socle vue de droite (e), vue de gauche (f).	74
3.36	Condition de reconstruction de l'arête verticale d'un élément à base triangulaire	74
3.37	Zoom du modèle au niveau du pli et de la faille inverse (a) après un déplacement de 2000 m, zoom de la faille au niveau du glissement le long de la faille normale (b).	75
3.38	Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) vue de droite, (b) vue de gauche, après un déplacement de 3000 m suivant l'axe X, déplacement de l'écaille 1 sur le socle vue de droite (c), vue de gauche (d), déplacement des deux écailles sur le socle vue de droite (e), vue de gauche (f).	77
3.39	Zoom du modèle au niveau du pli et de la faille inverse (a) après un déplacement de 3000 m, zoom de la faille au niveau du glissement le long de la faille normale (b).	78
3.40	Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs après un déplacement de 2000 m suivant l'axe X pour l'écaille 1 et 3000 m suivant l'axe X pour l'écaille 2 (a), après un déplacement identique pour l'écaille 1 et un vecteur déplacement de 3800 m suivant l'axe X pour l'écaille 2 (b).	79

3.41 Socle du modèle 3D non cylindrique avec définition des endroits où surviennent les erreurs de déplacement de l'écaïlle 1.	80
---	----

Chapitre 1

Contexte général

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.

1.1 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)).

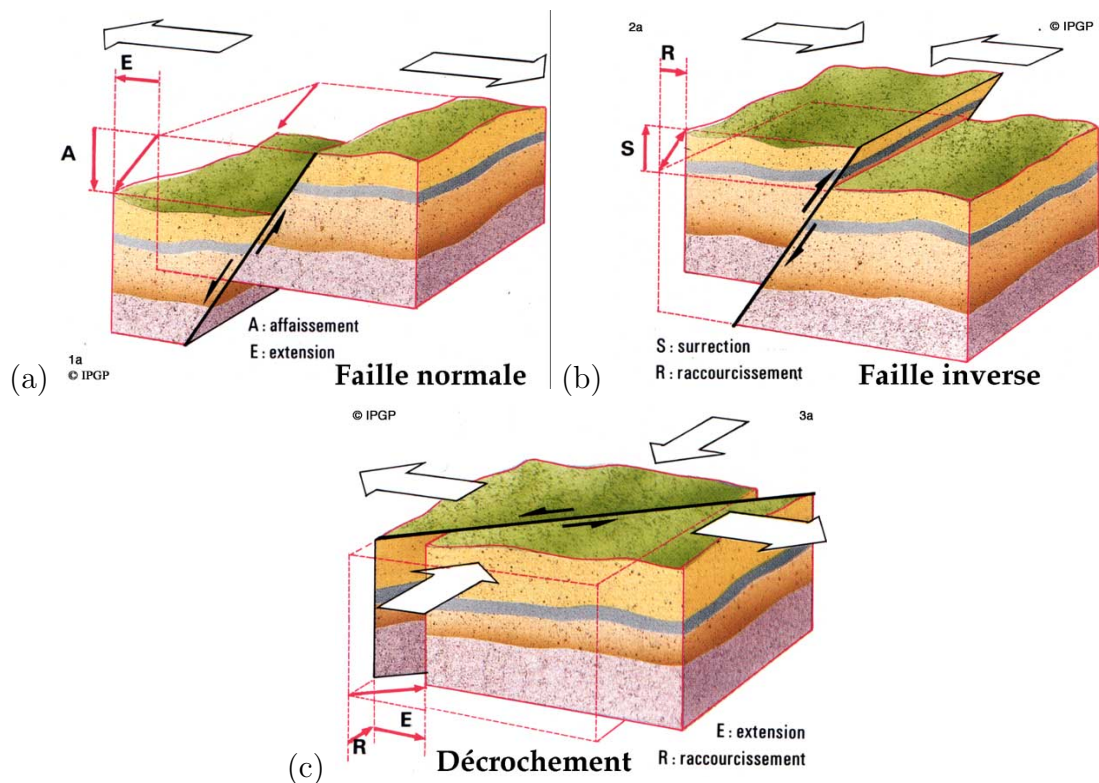


Fig. 1.1 – Représentation des différents types de faille (normale (a), inverse (b), décrochante (c)).

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) :

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

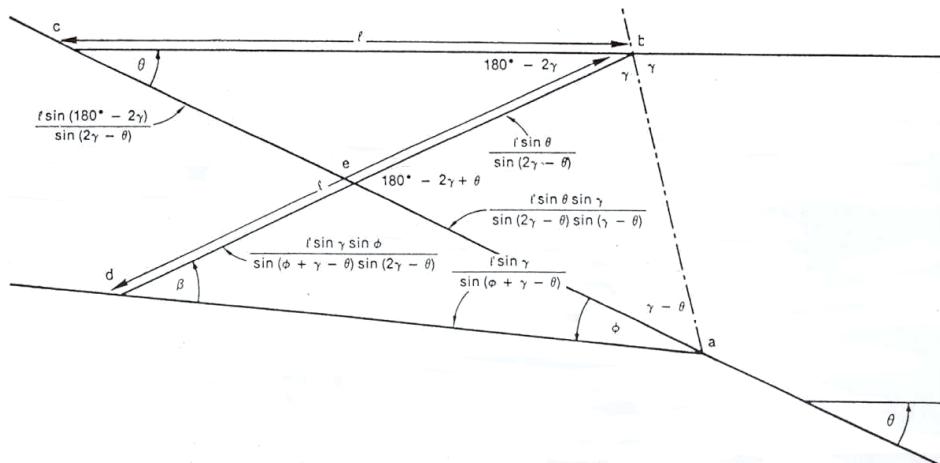


Fig. 1.2 – Relation angulaire pour le positionnement des kinks (SUPPE[15], 1983).

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.

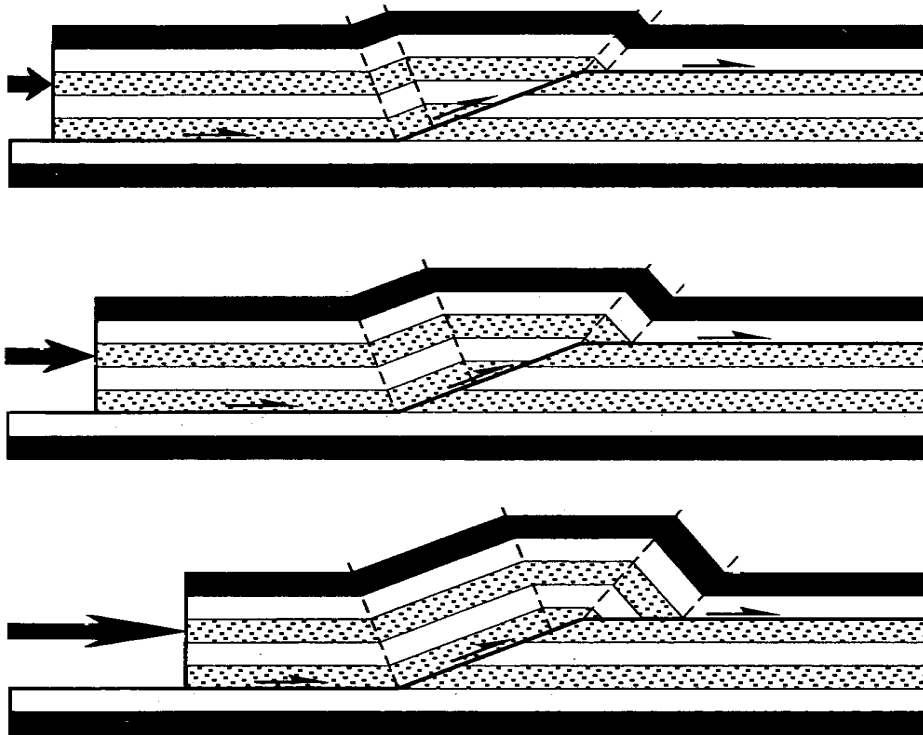


Fig. 1.3 – Schéma de SUPPE, évolution d'un pli de rampe (SUPPE[15], 1983).

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.

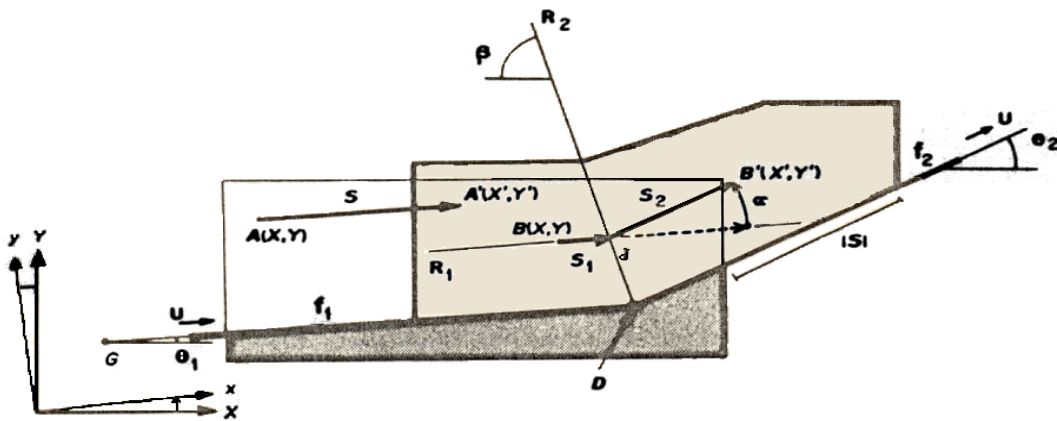


Fig. 1.4 – Principe géométrique du modèle de CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).

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.

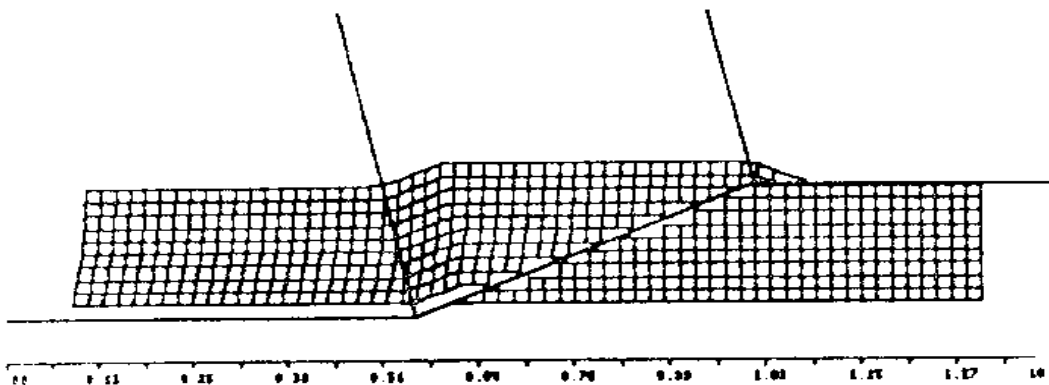


Fig. 1.5 – Vue du maillage après déformation CONTRERAS et SUTER ([1], 1990).

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.

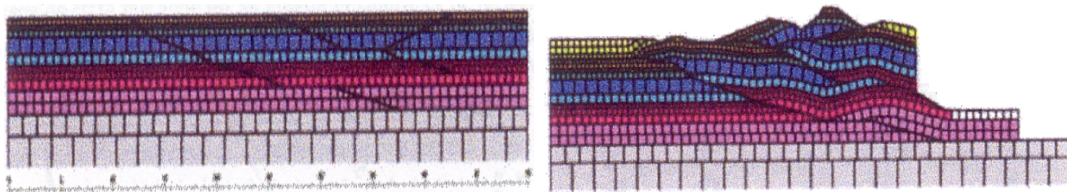


Fig. 1.6 – Représentation d'un modèle FOLDIS 2D (DIVIES[6], 1997).

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.

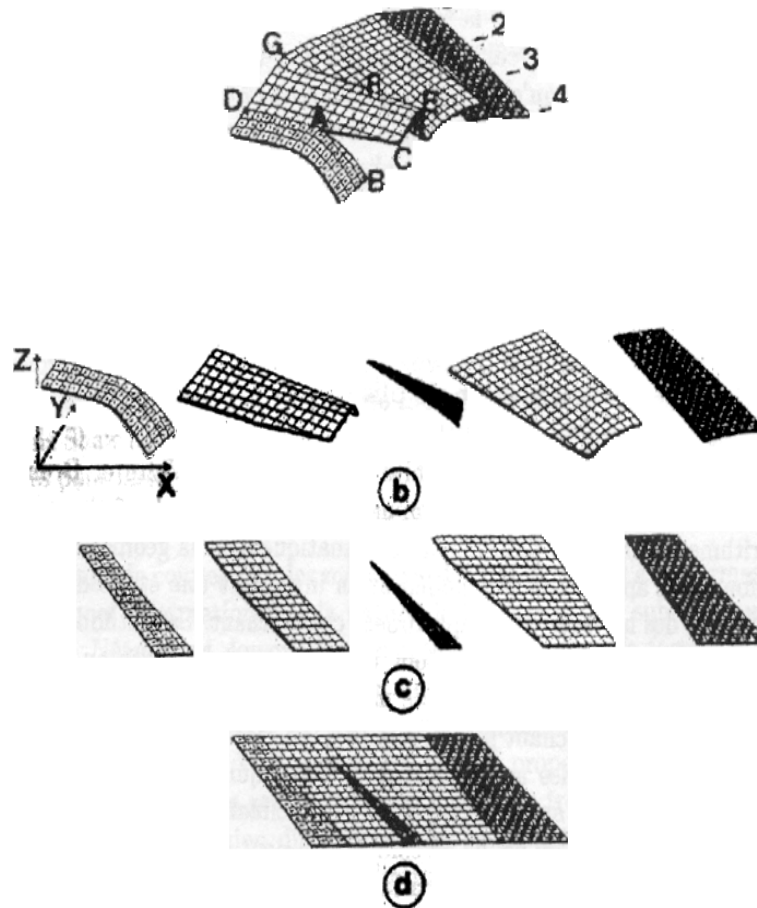


Fig. 1.7 – Schéma de restauration d'une surface plissée par le modèle de dépliage UNFOLD (GRATIER[8], 1993).

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.

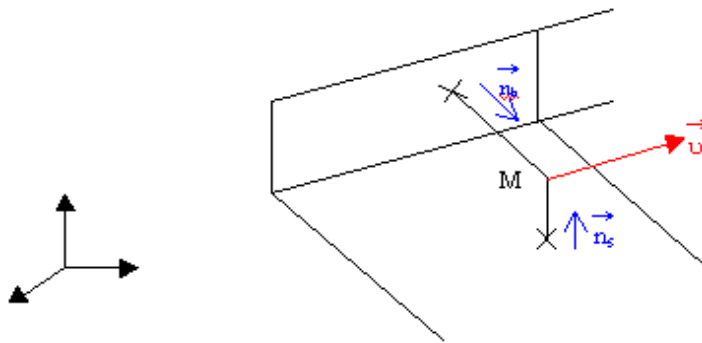


Fig. 1.8 – Définition de la direction de déplacement pour un point de la surface neutre.

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.

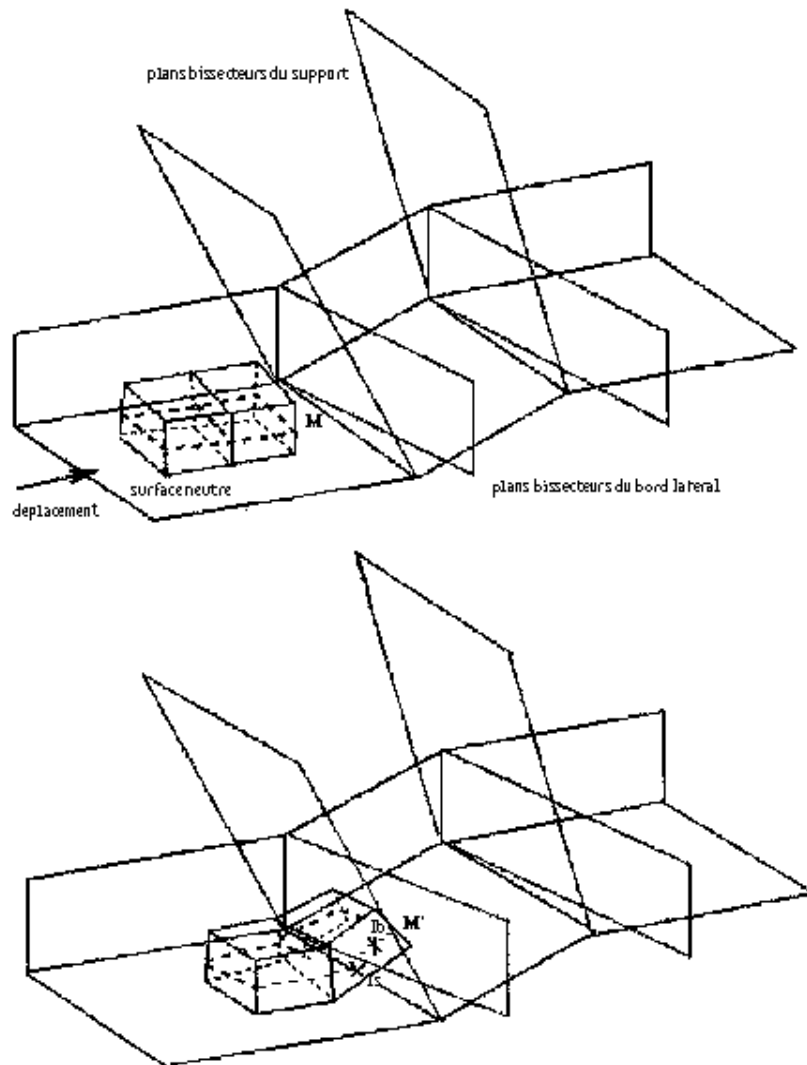


Fig. 1.9 – Déplacement d'un point de la surface neutre (CORNU[2], 2001).

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).

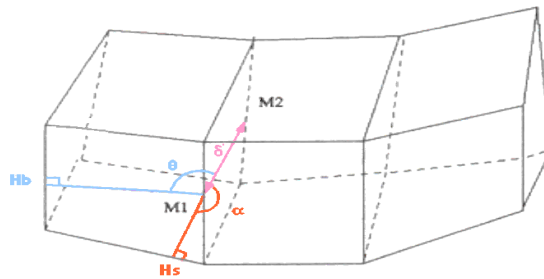


Fig. 1.10 – Reconstruction des couches supérieures (CORNU[2], 2001).

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.

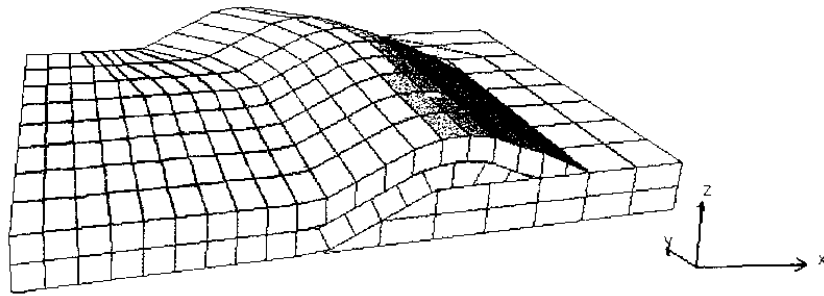
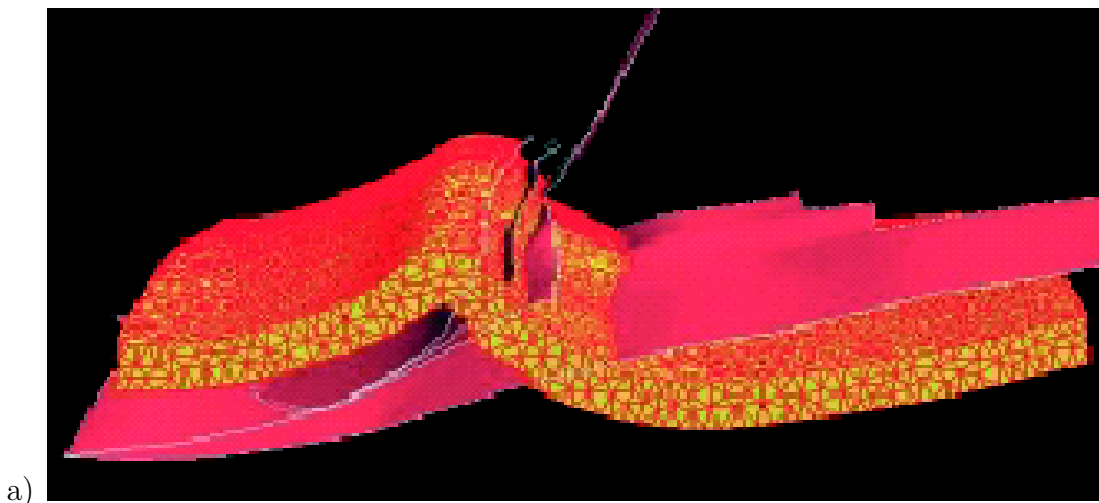


Fig. 1.11 – Bassin déformé après un déplacement de 3000 m, un mode de déformation pour chacune des couches (CORNU[2], 2001).

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)).



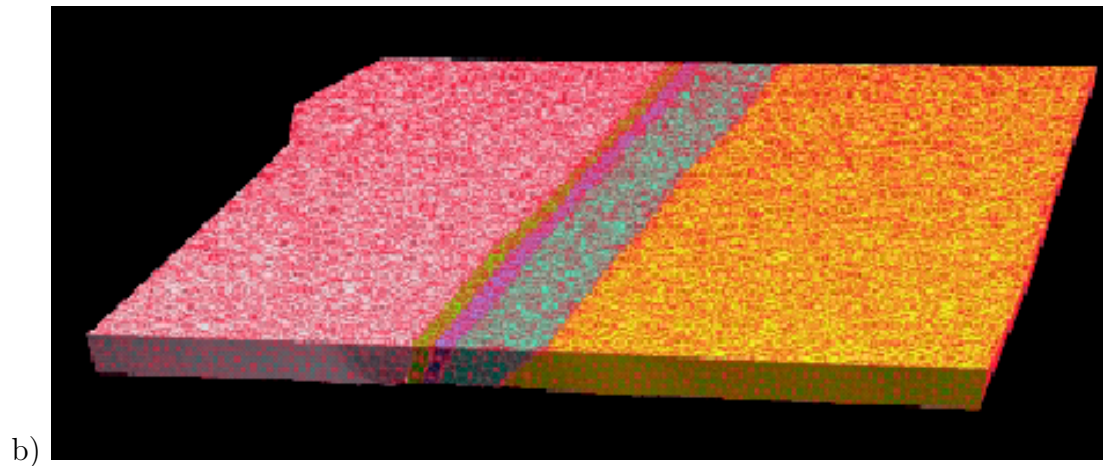


Fig. 1.12 – Restauration 3D d’un anticlinal faillé dans une zone sub-andine de Bolivie. a) Géométrie initiale. b) Géométrie restaurée (MORETTI[11], 2006).

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

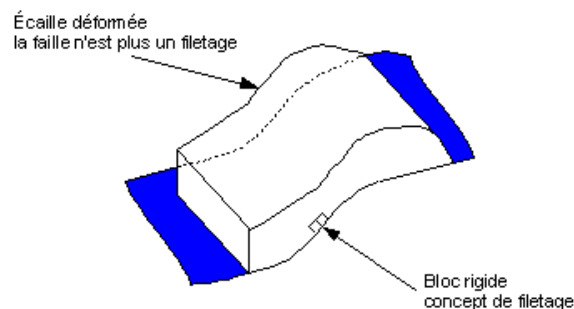


Fig. 1.13 – Domaine de validité du concept de filetage : la faille (limite globale de l’écaille) n’est pas filetée par contre localement l’élément est rigide et il existe un filetage à l’échelle de la maille.

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)).

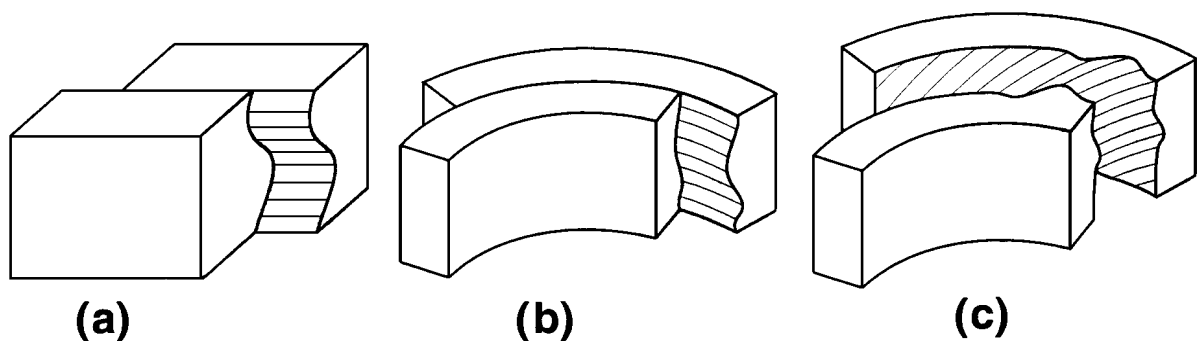


Fig. 1.14 – Représentation des différents filetages possibles. Les surfaces cylindriques sont représentées en (a), les surfaces de révolution en (b), et les hélicoïdes en (c) (THIBAUT[16], 1994).

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)).

Chapitre 2

Le glissement sur les failles

Sommaire

2.1	Méthodologie	22
2.2	Situation de la faille de Vuache	23
2.3	Application du filetage	26
2.3.1	Résultat sans filetage	27
2.3.2	Résultat avec un poids faible sur le filetage	28
2.3.3	Résultat avec un poids fort sur le filetage	30

Le filetage est un élément important dans la construction du modèle géologique comme expliqué dans le paragraphe (1.2.3). Il contraint la forme de la surface de faille à être une surface de glissement à l'échelle de la maille élémentaire.

2.1 Méthodologie

Pour décrire le filetage, le torseur $\vec{T}(M)$ est utilisé, il traduit l'effet du déplacement dû d'une part à la translation d'un des blocs par rapport à l'autre et d'autre part, à l'éventuelle rotation qu'il aurait pu y avoir entre ces deux blocs (Fig. 2.1). Ce torseur est un champ de vecteurs avec des propriétés cinématiques particulières (THIBAUT[16], 1994) :

$$\vec{T}(M) = \vec{T}(O) + \vec{\Omega} \wedge O\vec{M}, \quad (2.1)$$

avec $\vec{T}(M)$: la valeur du torseur en tout point M de la surface fileté,

$O\vec{M}$: le vecteur associé aux points O et M, O étant le repère associé à la surface fileté et M est le point de la surface auquel on associe le torseur recherché,

$\vec{\Omega}$: le vecteur fixe qui génère l'axe du filetage, il représente la composante de **rotation** du torseur,

$\vec{T}(O)$: un vecteur constant qui est fixé au point O, il représente la composante de **translation** du torseur.

Les lignes de champ de la projection du torseur $\vec{T}(M)$ sur la surface de glissement sont définis comme des stries calculées qui peuvent être comparées aux stries naturelles.

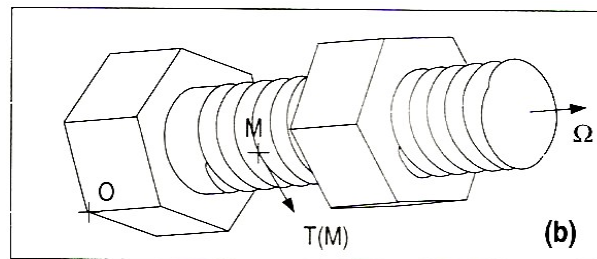


Fig. 2.1 – Les deux blocs solides glissent l'un par rapport à l'autre pour générer une surface de glissement. M est un point sur la surface fileté. $\vec{T}(M)$ est la valeur du torseur en tout point M de la surface. $\vec{\Omega}$ est le vecteur rotation du champ de vecteur.

A chaque propriété géométrique (lissage de la surface, filetage), et à chaque information géologique (localisation des points de la faille), est associée un critère de

moindre carré qui mesure l'écart entre les données calculées (modèle) et les données de terrain (observées). La fonction coût pondérée est minimisée avec un algorithme de GAUSS-NEWTON (THIBAUT[16], 1994).

La fonction coût pondérée s'écrit :

$$Q = w_p Q_p + w_c Q_c + w_t Q_t, \quad (2.2)$$

où Q_p , Q_c , Q_t sont les critères de moindre carré et w_p , w_c , w_t sont les poids associés. Les données de terrain ont pour indice « o », les données calculées ont pour indice « c ».

Le critère de moindre carré Q_p mesure la distance entre chaque donnée de terrain (P_o^i) et les données homologues calculées dans le modèle de surface de faille (P_c^i). Q_p est une somme discrète car le jeu de données est fini.

$$Q_p = \sum_i |P_o^i - P_c^i|^2, \quad (2.3)$$

Le critère de moindre carré Q_c mesure le lissage (ou la régularité) de la surface de faille. Une surface est considérée comme régulière si les principales courbures (C_{c1} et C_{c2}) sont proches de zéro en tout point de cette surface.

$$Q_c = \int_S (C_{c1}^2 + C_{c2}^2) ds, \quad (2.4)$$

avec « ds » l'élément d'intégration de la surface.

Le critère de moindre carré Q_t mesure le critère de filetage, il consiste en la minimisation de l'angle entre le vecteur normal à la surface et le torseur.

$$Q_t = \int_S \langle \vec{T}(M), \vec{N}(M) \rangle ds, \quad (2.5)$$

où $\vec{T}(M)$ et $\vec{N}(M)$ sont normalisés.

La théorie de filetage est appliquée sur un cas réel, la faille de Vuache près d'Annecy, à une échelle pertinente.

2.2 Situation de la faille de Vuache

La faille de Vuache se situe à côté d'Annecy dans les Alpes françaises (Fig. 2.2).

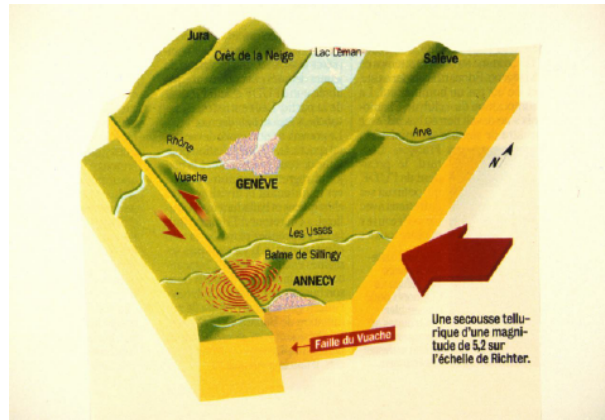


Fig. 2.2 – Localisation de la faille de Vuache.

La mission de terrain pour scanner le miroir de la faille de Vuache s'est faite avec des scanners 3D. Plusieurs campagnes de mesures ont été faites, les scanners 3D utilisés ont été de deux types, un scanner de type RIEGL (Fig. 2.3 (a)) pouvant acquérir 12 000 points par seconde, et un scanner de type GS100 (Fig. 2.3 (b)) pouvant acquérir 5 000 points par seconde (RENARD[12], 2006).

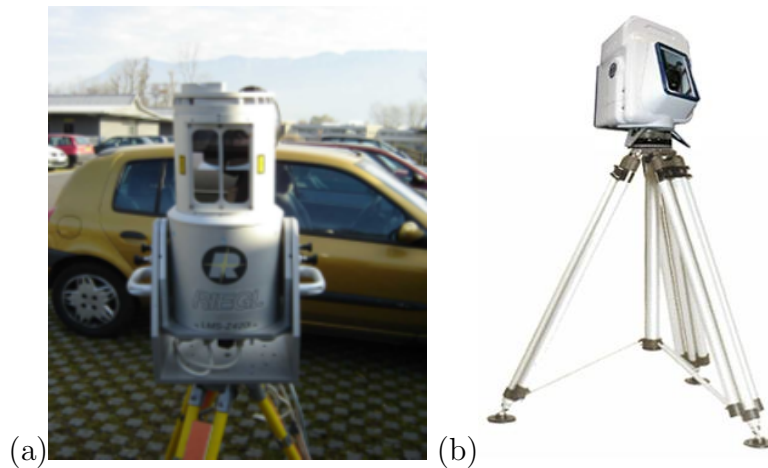


Fig. 2.3 – Scanner 3D de type RIEGL (a), scanner 3D de type GS100 (b).

Pour prendre les mesures, le scanner est positionné face au miroir de la faille de Vuache (Fig. 2.4).

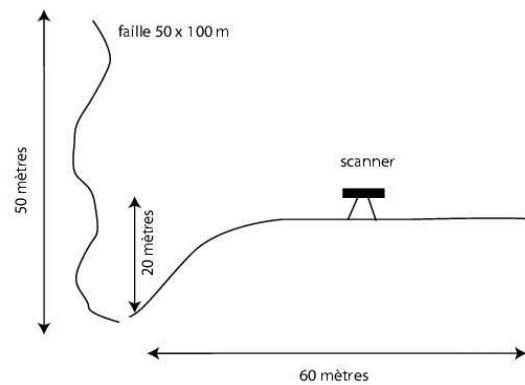


Fig. 2.4 – Positionnement du scanner pour la prise de mesure.

La figure 2.5 représente une vue panoramique de la faille de Vuache. Le miroir mesure approximativement $100\text{ m} \times 50\text{ m}$. En noir, il y a la délimitation du miroir scanner à l'aide du GS100 et du RIEGL. Les flèches rouges représentent la direction principale des stries. Il y a une seule direction de glissement pour cette faille. La direction du miroir de faille est NNW-SSE. Les marques verticales sur la photo sont dues à la pluie.

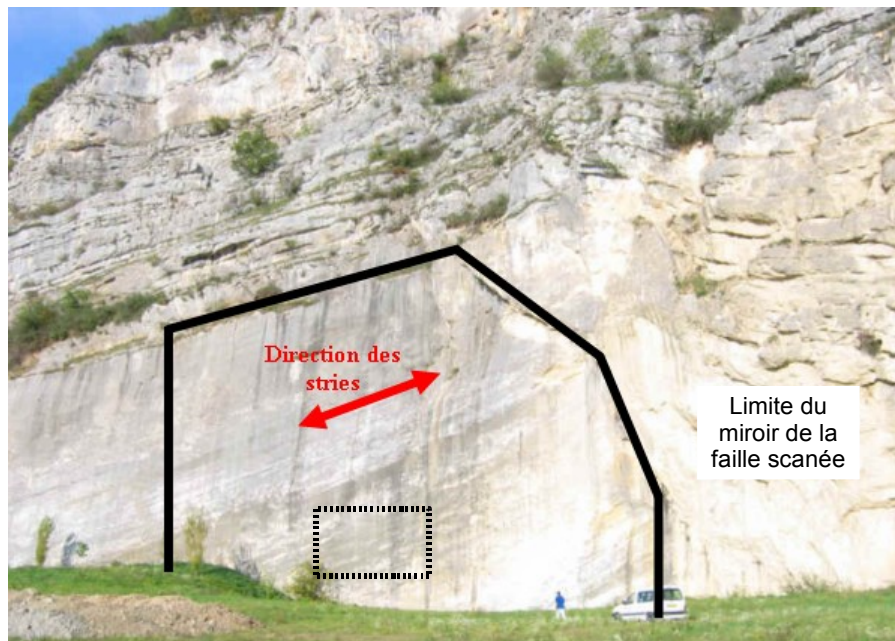


Fig. 2.5 – Panorama de la faille de Vuache, avec la délimitation du miroir scanné et la direction principale des stries. La partie étudiée (Fig. 2.7) est représentée par des pointillées.

2.3 Application du filetage

A titre d'exemple d'application, la portion du miroir de la faille étudiée est limitée à $22\text{ m} \times 12\text{ m}$ (Fig. 2.7), cette surface est constituée de sept millions de points. La distance moyenne séparant les points mesurés par le scanner est d'environ 10 mm pour les données brutes ($dx = \text{incrément spatial}$).

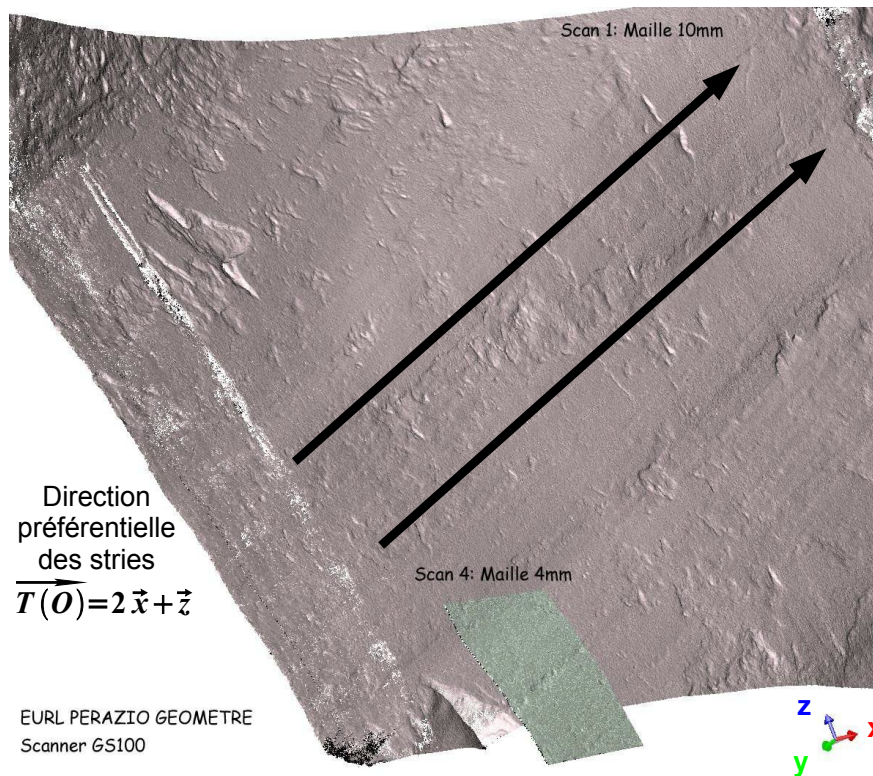


Fig. 2.6 – Image obtenue avec un scanner GS100 d'une sous surface du miroir de la faille de Vuache, (dimension : $x = 22\text{ m}$, $z = 12\text{ m}$, nombre de points décrivant la surface = 7 000 000 de points).

La surface interpolée est créée grâce au semi de points des données observées. Quelque soit le logiciel, une surface constituée de sept millions de points est trop coûteuse à exploiter. Pour créer la nouvelle surface, les coordonnées suivantes sont utilisées :

- X est la coordonnée horizontale,
- Y est la coordonnée verticale,
- Z est l'élévation par rapport au plan moyen de la faille.

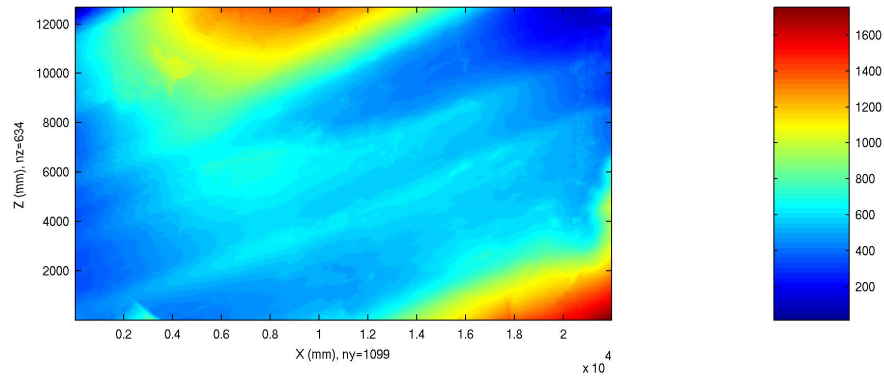


Fig. 2.7 – La surface interpolée ($dx = 20 \text{ mm}$) est communiquée par le professeur RENARD de l’université de Grenoble.

Pour obtenir la figure 2.7, une rotation dans les plans X-Y et Y-Z est effectuée afin d’obtenir une surface quasi verticale ce qui correspond à un changement de repère dans l’espace. Ensuite, le nuage de points est interpolé sur une grille régulière avec un pas d’échantillonnage de 20 mm . Cette surface est une partie du miroir de la faille de Vuache (Fig. 2.6). Cette surface est constituée de $1099 \times 634 = 696766$ points, étant donné le nombre important de points décrivant cette surface, elle est considérée comme étant la surface dite réelle de cette partie du miroir de la faille de Vuache.

Pour l’étude de la surface du miroir de faille, une première étape a consisté à résoudre un problème d’approximation de surface avec minimisation des critères de courbure et de proximité aux points de données. Puis un critère de filetage a été appliqué afin de corriger cette surface. Les résultats sont présentés sous forme de carte en pseudo courbes de niveau (Fig. 2.8). Ce sont des isolignes en Y. Trois essais ont été effectués, le premier sans filetage, le deuxième avec un filetage faible et le dernier avec un filetage important.

2.3.1 Résultat sans filetage

La figure 2.8 représente la portion du miroir de la faille de Vuache sans l’application du critère de filetage en utilisant 336 points de données observées. Ce résultat n’utilise pas la formulation de l’équation 2.2, mais une autre fonction coût.

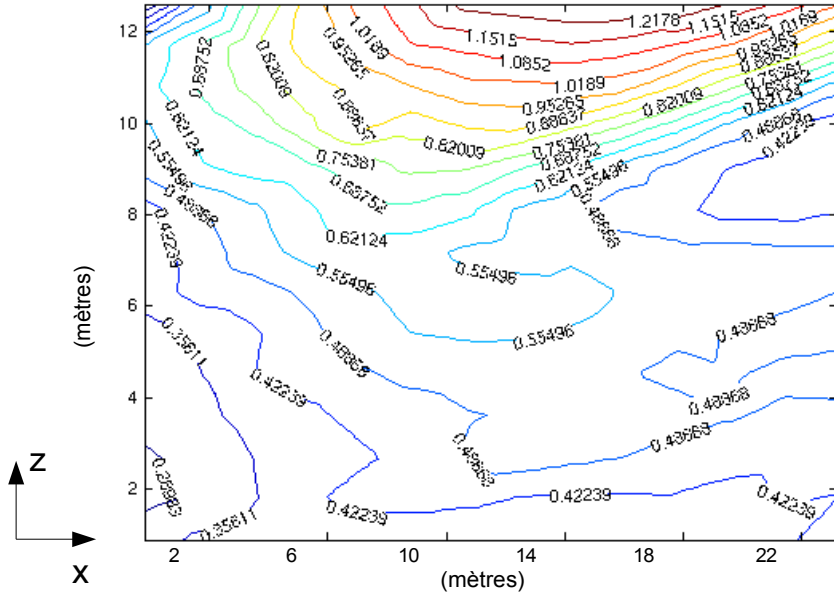


Fig. 2.8 – Y-isolignes d’une portion du miroir de la faille de Vuache sans filetage en considérant 336 points de données.

Les isolignes sont irrégulières et la rugosité de la surface est importante. Cette surface n’est pas une surface de glissement.

Pour obtenir un premier résultat, les paramètres suivants sont fixés pour les deux prochains cas :

- $N_p = 150$ paramètres de splines pour décrire la surface de faille dans l’espace des paramètres,
- $N_{uv} = 130 \times 70 = 9100$ points de discrétisation pour les intégrales pour l’étape d’optimisation avec les 336 points de données qui sont fournis par les scanners.

2.3.2 Résultat avec un poids faible sur le filetage

Les poids prennent les valeurs suivantes :

- le poids $w_l = 0.1$ (proximité aux points de données),
- le poids $w_c = 0.05$ (lissage),
- le poids $w_t = 0.1$ (filetage).

Plus la valeur d’un poids est grande, plus la surface vérifie cette contrainte.

Le torseur imposé a pour coordonnées,

$$T = \begin{bmatrix} T(O) \\ T \end{bmatrix}_o = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}_o.$$

Ce torseur est défini par la direction des stries naturelles (Fig. 2.6). Il n'y a qu'une composante en translation.

La figure 2.9 est le résultat du problème d'approximation avec un poids faible sur le filetage ($w_t = 0.1$). La surface est plus lissée que pour le cas précédent (Fig. 2.8). Cependant la surface n'est pas un filetage. Cette surface n'est toujours pas une surface de glissement si elle est comparée à la surface générée dans l'exemple suivant qui est une surface de glissement.

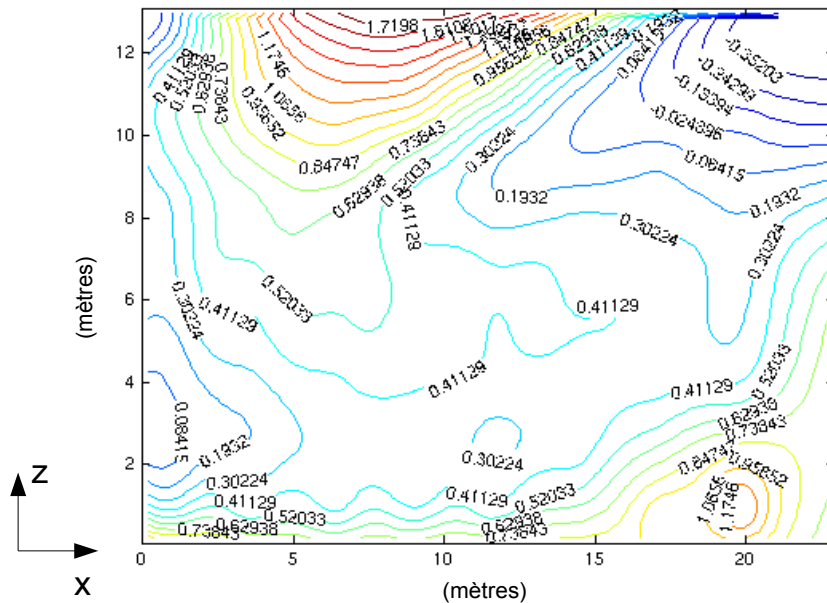


Fig. 2.9 – Y-isolignes d'une portion du miroir de la faille de Vuache pour la surface paramétrée avec $w_t = 0.1$ poids faible associé au critère de filetage.

La figure 2.10 est la carte des résidus entre la surface précédente (Fig. 2.9) et la surface réelle (Fig. 2.7 (b)).

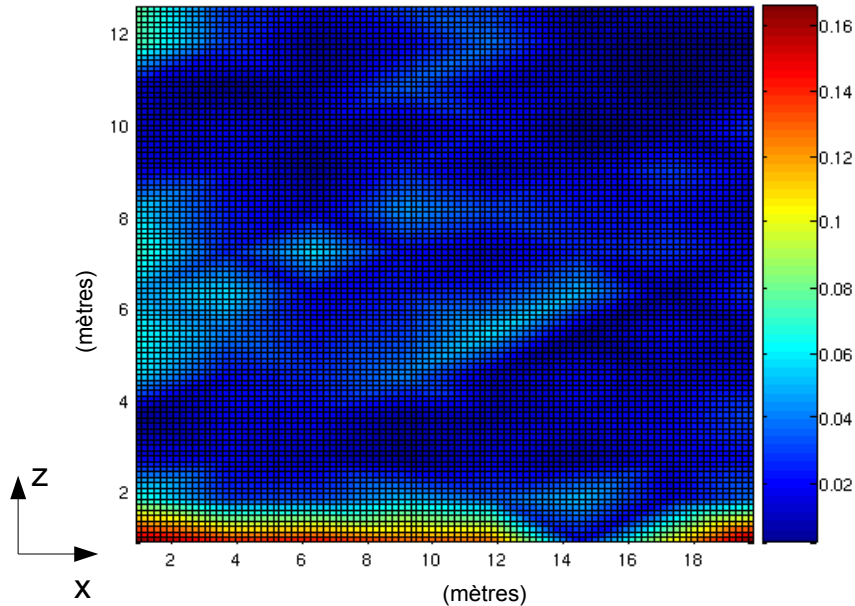


Fig. 2.10 – Carte des résidus pour la surface paramétrée avec $w_t = 0.1$ poids faible associé au critère de filetage.

Les différences entre les points de données observées et calculées sont inférieures à $0.16 m$, cette précision est acceptable pour décrire au plus près la surface avec un nombre réduit de points. Cette surface est une des interpolations possibles pour décrire cette portion du miroir de la faille de Vuache.

2.3.3 Résultat avec un poids fort sur le filetage

Si les poids prennent les valeurs suivantes :

- $w_l = 0.1$ pour le poids associé aux points de données,
- $w_c = 0.1$ pour le poids associé au lissage,
- $w_t = 10$ **pour le poids associé au filetage,**

avec un torseur imposé qui garde la même valeur que précédemment.

La figure 2.11 est le résultat du problème d'approximation avec les poids définis pour ce dernier essai. La surface est plus lissée que pour le cas précédent sans filetage (Fig. 2.9). Le critère de filetage a modifié de manière significative l'aspect de la surface.

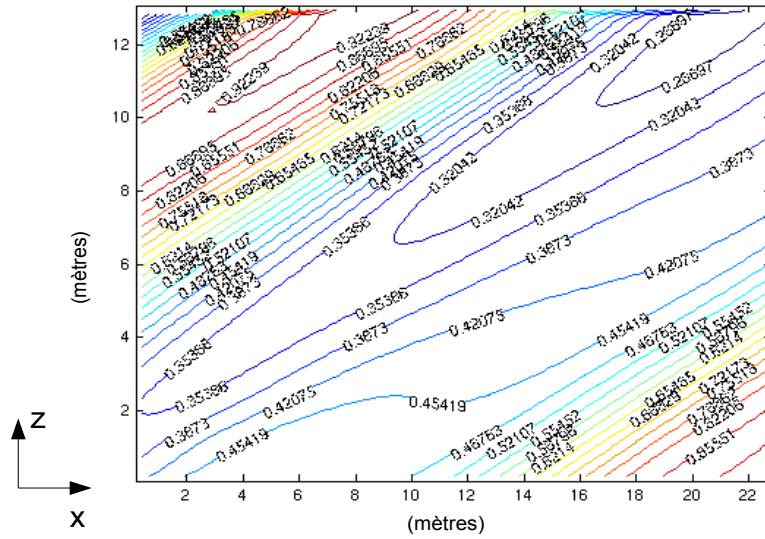


Fig. 2.11 – Y-isolignes d’une portion du miroir de la faille de Vuache pour la surface paramétrée avec $w_t = 10$ poids associé au critère de filetage.

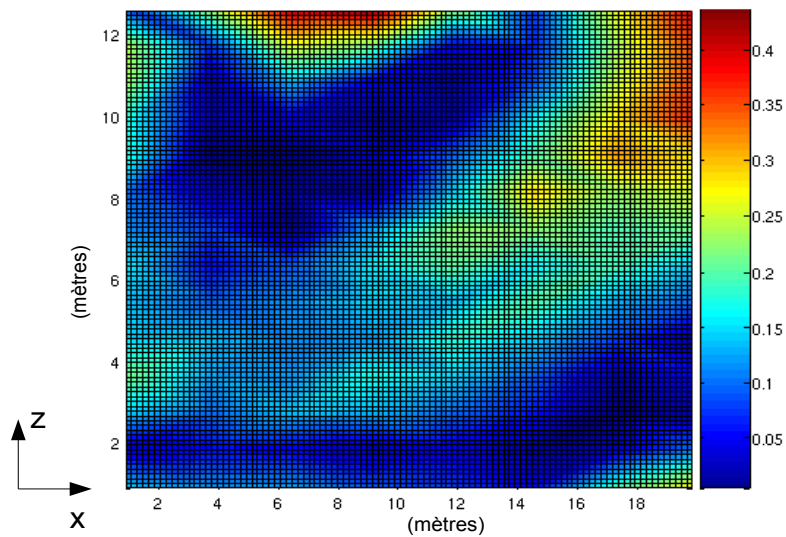


Fig. 2.12 – Carte des résidus pour la surface paramétrée avec $w_t = 10$ poids associé au critère de filetage.

Sur la carte des résidus aux points de données (Fig. 2.12), la surface calculée par ce troisième essai avec un poids de filetage important ($w_t = 10$) est plus éloignée des points de données que le cas précédent. Mais la différence maximale est de $0.4 m$ ce qui reste une valeur acceptable.

Le critère de filetage permet de paramétrer une surface avec un nombre réduit de points de données (passage de 700 000 points à 336 points). Cette paramétrisation est rapide et permet d'accélérer le traitement des surfaces dans les logiciels où elles sont ensuite réutilisées. En conclusion, l'utilisation de la notion de filetage permet de générer des surfaces qui sont désormais des surfaces de glissement.

Cependant certaines précisions doivent être apportées, les failles ne sont pas des filetages à toutes les échelles. En effet, à l'échelle des écailles, les failles ne sont pas des filetages puisque les blocs « écailles » sont déformés. La notion de filetage est une notion valable dans le cadre des blocs rigides à l'échelle de la maille (Fig.1.13). Il est donc recommandé que les failles soient dessinées comme des filetages à l'échelle des mailles. En revanche à l'échelle des écailles, elles ne le sont plus mais leur forme reste assez simple pour que les déformations de ces écailles restent modélisables, c'est l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 3

La déformation des écailles

Sommaire

3.1	La méthodologie de la déformation des écailles	35
3.1.1	Les hypothèses géologiques de déformation	35
3.1.2	Les définitions mathématiques associées au modèle	38
3.1.2.1	Les définitions communes aux deux modes de « déplacement déformation »	38
3.1.2.2	Définitions liées à une déformation en flexion	44
3.1.2.3	Définitions liées à une déformation en cisaillement vertical	47
3.2	Validation de la déformation des écailles	48
3.2.1	Test en mode direct sur un cas non cylindrique à deux blocs, avec une direction de pendage variable	48
3.2.1.1	Présentation du modèle à 4 couches avec une rampe à direction de pendage variable	48
3.2.1.2	Validation du déplacement en cisaillement vertical	49
3.2.1.3	Validation du déplacement en flexion	51
3.2.1.4	Étude de la conservation de l'aire de la surface neutre pour un déplacement en flexion	52
3.2.1.5	Test avec un couplage de deux modes de déplacement déformation, la flexion et le cisaillement	53
3.2.2	Problème inverse ainsi que réversibilité de la cinématique sur un cas cylindrique à trois blocs, avec un duplex	55
3.2.2.1	Choix d'un maillage judicieux	55
3.2.2.2	Les différences par rapport au cas précédent	55
3.2.2.3	Construction du modèle initial composé de trois blocs avec un duplex	57
3.2.2.4	Description du modèle initial	57
3.2.2.5	Validation de la réversibilité en cisaillement vertical en partant d'un état déformé	58

CHAPITRE 3. LA DÉFORMATION DES ÉCAILLES

3.2.2.6	Validation de la réversibilité en flexion	61
3.2.2.7	Validation du mode direct de déplacement pour un couplage en flexion et en cisaillement vertical	65
3.2.3	Déplacement en mode direct d'un cas non cylindrique à trois blocs avec deux écailles	68
3.2.3.1	Présentation du modèle initial	68
3.2.3.2	Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec bord latéral vertical	72
3.2.3.3	Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec le bord contraint incliné	80
3.3	Discussion générale et Conclusion	81

La déformation des écaïlles permet de comprendre et de valider les cinématiques supposées de bassins sédimentaires. Cette cinématique représente l'histoire géologique de déformation du bassin au cours du temps géologique. Dans notre cas, les bassins ont des failles définies *a priori*, qui délimitent les blocs.

Dans ce chapitre, une première partie présente la méthodologie de cette déformation, c'est à dire les hypothèses géologiques de cette déformation et les définitions mathématiques du modèle. Ensuite, la deuxième partie présente les cas tests sur lesquels ce modèle de déformation a été validé.

3.1 La méthodologie de la déformation des écaïlles

3.1.1 Les hypothèses géologiques de déformation

La description générale du modèle de bassin 3D est la suivante :

- le bassin peut être constitué de plusieurs blocs. Ces blocs sont les entités constituant le bassin.
- Chacun de ces blocs est constitué de couches géologiques. Au niveau des couches, des modes de déplacement distincts peuvent être appliqués, soit le cisaillement vertical, soit la flexion.
- L'un des blocs est appelé socle, il s'agit du bloc qui restera immobile tout au long du déplacement (Fig. 3.1 (a)).
- Un modèle à deux blocs est constitué d'une écaïlle et d'un socle. Un modèle à trois blocs est constitué de deux blocs qui se déplacent et d'un socle.
- Ce socle permet de définir le support de glissement. Dans le cas d'un bassin constitué de deux blocs, la couche de base du bloc qui se déplace, c'est à dire la couche la plus profonde de ce bloc, va avoir pour support de glissement le toit du bloc socle, c'est à dire la surface supérieure de la couche la plus élevée du socle (Fig. 3.1 (a)).
Pour les couches supérieures (couche n+1) du bloc déplacé, le support de glissement est constitué, dans le cas présent (Fig. 3.1 (b)), de la réunion :
 - du toit de la couche inférieure (couche n) à la couche déplacée, c'est à dire la surface supérieure de cette couche (Fig. 3.1 (b)) ;
 - et du toit du socle.

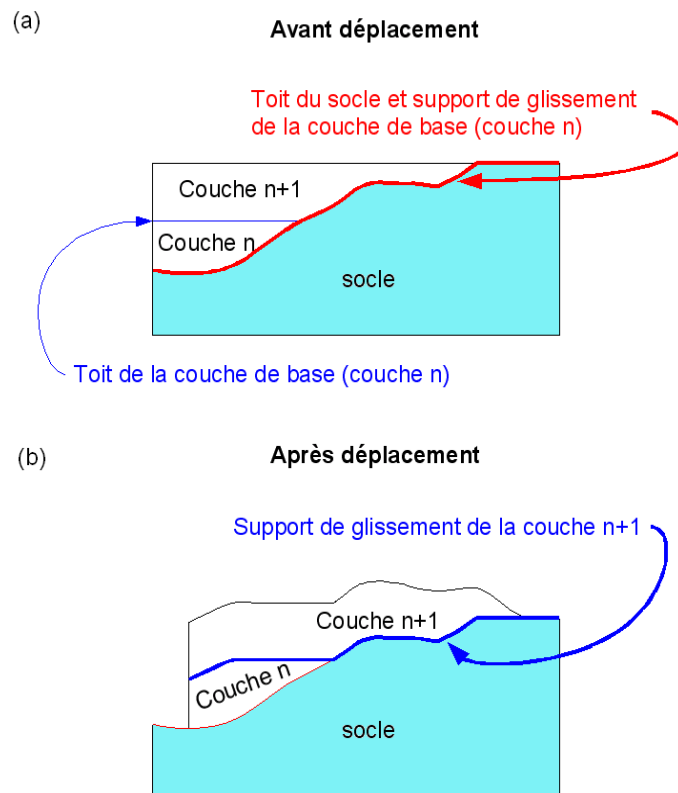


Fig. 3.1 – Définition du socle d'un bloc, du support de glissement de la couche de base (a), du support de glissement d'une couche supérieure (couche n+1) (b).

- Le bassin 3D peut avoir un bord contraint ou pas. Ce bord contraint est une surface plane, il est fixe tout au long du déplacement. Il délimite le bord de glissement latéral du bassin. Le bord latéral du bloc déplacé peut également être libre, c'est à dire que le déplacement du maillage ne prend en compte que le support de glissement pour la définition du vecteur déplacement (Fig. 3.2).

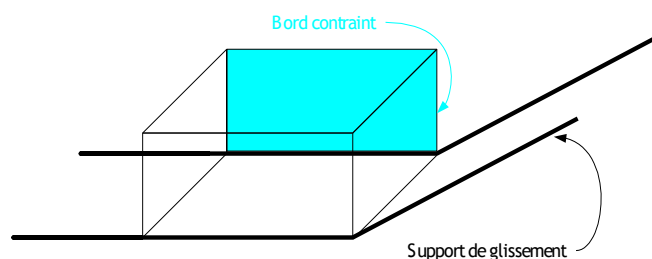


Fig. 3.2 – Représentation d'un bloc avec bord contraint et support de glissement.

- Dans le cadre de cette thèse, deux modes de déplacement sont envisagés :

- le cisaillement vertical,
- la flexion.
- Les couches géologiques peuvent subir un cisaillement vertical dans le cadre de contrainte non coaxiale.

Dans le cadre du déplacement d'un bloc par cisaillement vertical, les hypothèses suivantes sont appliquées :

- les arêtes en pointillé restent verticales au cours du déplacement (Fig. 3.3 (a) et (b)) ;
- l'épaisseur de la couche est conservée, c'est à dire les couches sont isopaques ;
- l'aire de la surface du toit des couches n'est pas conservée, c'est à dire que $S \neq S'$ (Fig. 3.3 (b)).

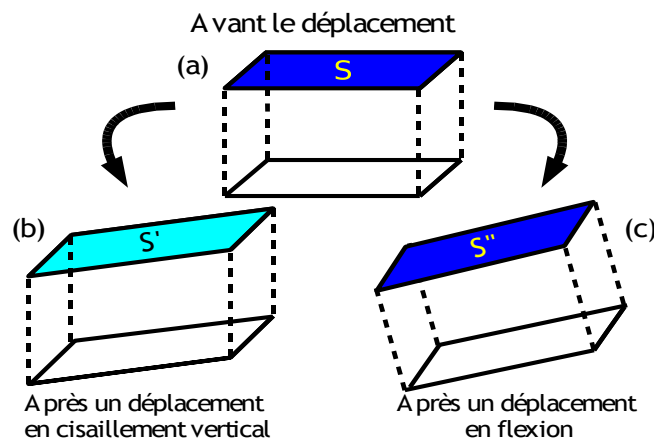


Fig. 3.3 – Représentation du déplacement d'un bloc initial (a) après cisaillement vertical (b), et flexion (c).

- Les couches géologiques peuvent subir une flexion. Ce phénomène mécanique fait subir aux surfaces supérieure et inférieure de la couche soit respectivement une compression et une extension, soit une extension et une compression. Dans ce cas, il existe une surface qui se conserve sans changement d'aire, cette surface est appelée « surface neutre » (Fig. 3.4).

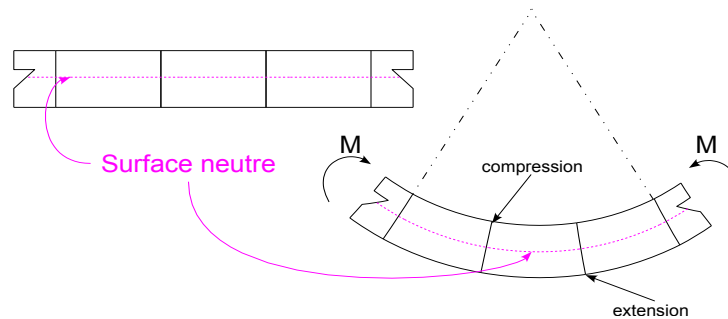


Fig. 3.4 – Définition de la surface neutre dans le cas de la flexion.

Dans le cadre du déplacement d'un bloc par flexion, les hypothèses suivantes sont appliquées :

- le glissement est supposé parfait ce qui implique que les arêtes en pointillé restent perpendiculaires à la surface de glissement (Fig. 3.3 (a) et (c)) ;
- les couches glissent indépendamment les unes par rapport aux autres ;
- l'épaisseur de la couche est conservée, les couches sont isopaques ;
- l'aire du toit des couches est conservée, c'est à dire que $S = S''$ (Fig. 3.3 (c)).

3.1.2 Les définitions mathématiques associées au modèle

3.1.2.1 Les définitions communes aux deux modes de « déplacement déformation »

1. Le maillage

Les couches de chaque bloc sont découpées en éléments hexaédriques. Ces éléments sont composés de huit sommets et six faces. Ces éléments peuvent avoir plusieurs formes (Fig. 3.5) :

- un parallélépipède,
- un hexaèdre à base trapézoïdale,
- un prisme à base triangulaire,
- un élément plat, c'est à dire un parallélépipède d'épaisseur nulle.

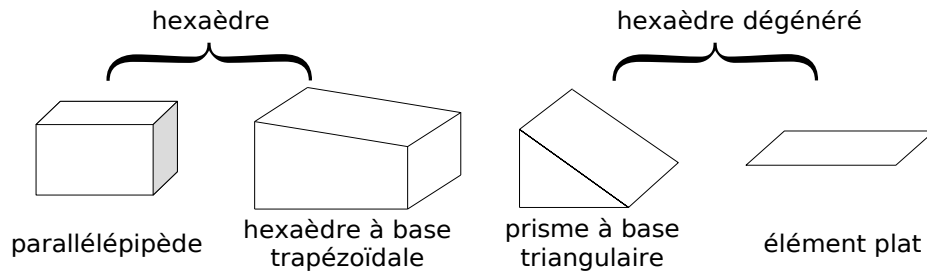


Fig. 3.5 – Les différents éléments constitutifs d’une couche.

2. Le support de glissement

Le support de glissement d’une couche est défini à partir des faces constituant les couches.

En considérant un modèle à deux blocs, sachant que des modèles composés de trois blocs sont aussi traités, le support de glissement pour la couche de base est constitué de faces décrites par quatre points. L’ensemble de ces faces constitue une surface qui est définie par le toit de la couche sous-jacente.

Ces faces sont découpées en deux triangles à trois sommets appelés facettes, ce qui permet de définir les surfaces de glissement comme des surfaces \mathcal{C}^1 par morceaux. L’équation des plans caractérisant ces facettes est :

$$\alpha x + \beta y + \gamma z + h = 0, \quad (3.1)$$

où les coefficients α , β , γ , et h sont déterminés grâce aux trois points connus constituant les extrémités des facettes.

Dans le cas d’un modèle avec bord contraint, le bord contraint est défini par les faces latérales du socle.

3. Les plans bissecteurs

Les plans bissecteurs sont définis entre deux facettes consécutives dans le sens du déplacement. Ces plans deviennent des plans médiateurs quand les deux facettes sont coplanaires. Les plans médiateurs existent pour les surfaces de glissement et pour les surfaces latérales des bords contraints (Fig. 3.7).

4. Le déplacement curvilinéaire

Le déplacement d’un point sur la surface neutre se fait par le biais d’un déplacement curvilinéaire, soit δ la quantité de déplacement, et soit $\vec{\nu}$ le vecteur

déplacement. En 3D, le vecteur déplacement dépend de la direction initiale du déplacement et des supports : le support de glissement et le support du bord contraint.

Le vecteur déplacement calculé se définit comme suit : $\vec{\nu} = \vec{\nu}_{bord}$, avec $\vec{\nu}_{ini}$ qui est le vecteur déplacement imposé.

Le vecteur déplacement calculé est défini à partir du projeté orthogonal de $\vec{\nu}_{ini}$ sur le support de glissement ce qui donne $\vec{\nu}_{gli}$, puis si un support latéral existe, $\vec{\nu}_{gli}$ est projeté orthogonalement sur le support latéral ce qui donne $\vec{\nu}_{bord}$ (Fig. 3.6).

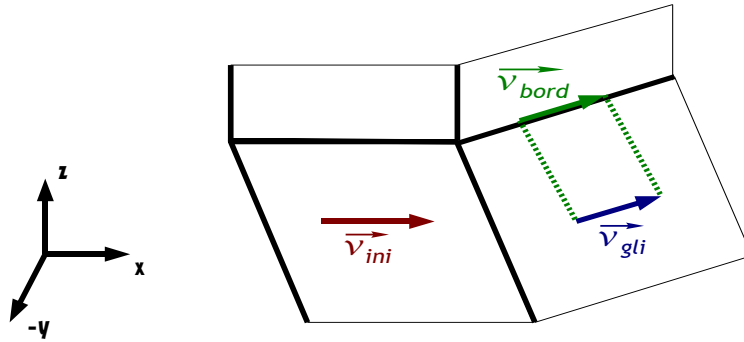


Fig. 3.6 – Définition du déplacement calculé, ν_{bord} , pour le déplacement 3D avec la prise en compte d'un bord latéral contraint.

5. Les étapes du déplacement d'un point sur la surface neutre

Soit un point $M(x_0, y_0, z_0)$ appartenant à la surface neutre (p.44, p.47), il se déplace suivant une droite $\mathcal{D}(M, \vec{\nu})$, où $\vec{\nu}$ est le vecteur déplacement (Fig. 3.7 (a)) :

$$\mathcal{D} : \begin{cases} x_0 + \nu_x t \\ y_0 + \nu_y t \\ z_0 + \nu_z t \end{cases} \quad (3.2)$$

Le point M se déplace sur cette droite (\mathcal{D}) jusqu'à ce que la droite intersecte un des plans bissecteurs qui sépare les facettes voisines. Soit (\mathcal{P}_{Bs}) un plan

bissecteur du support de glissement et (\mathcal{P}_{Bb}) un plan bissecteur du support latéral, les équations de ces plans sont respectivement :

$$\begin{aligned}\alpha_{bs} x + \beta_{bs} y + \gamma_{bs} z + h_{bs} &= 0 \\ \alpha_{bb} x + \beta_{bb} y + \gamma_{bb} z + h_{bb} &= 0\end{aligned}\quad (3.3)$$

Soit I_i (Fig. 3.7 (b)), le point d'intersection entre (\mathcal{D}) et le plan bissecteur (\mathcal{P}_{Bi}) , c'est à dire $I_i = (\mathcal{D}) \cap (\mathcal{P}_{Bi}, i = b \text{ ou } s)$:

$$I_i = \begin{cases} x_0 + \nu_x t_{I_i} \\ y_0 + \nu_y t_{I_i} \\ z_0 + \nu_z t_{I_i} \end{cases}\quad (3.4)$$

En 3D, dans le cas particulier d'un modèle avec bord contraint, il y a deux points d'intersection, l'un avec le plan bissecteur lié au support, l'autre avec celui lié au bord latéral. Pour chacun de ces points la valeur de t_{I_i} associée au plan (\mathcal{P}_{Bi}) est :

$$t_{I_i} = \frac{-(\alpha_{bi} x_0 + \beta_{bi} y_0 + \gamma_{bi} z_0 + h_{bi})}{\alpha_{bi} \nu_x + \beta_{bi} \nu_y + \gamma_{bi} \nu_z}\quad (3.5)$$

Dans le cas d'un déplacement total d'une distance δ , soit $d_i = \|MI_i\|$ la distance euclidienne entre les points M et I_i , avant de déplacer le point M , il convient de déterminer quel est le plan bissecteur que la droite (\mathcal{D}) intersecte en premier. Pour déterminer quel est le point I_i pris en compte entre I_s ou I_b (Fig. 3.7 (b)), il faut considérer la distance d_i la plus petite. Une fois cette opération effectuée, il reste trois possibilités :

- $d_i > \delta$: les coordonnées du point image $M' = \overrightarrow{t_{\delta\vec{v}}(M)}$ sont fournies par :

$$M' = \begin{cases} x_0 + \nu_x \delta \\ y_0 + \nu_y \delta \\ z_0 + \nu_z \delta \end{cases}\quad (3.6)$$

- $d_i = \delta$: M' est confondu avec I_i ,

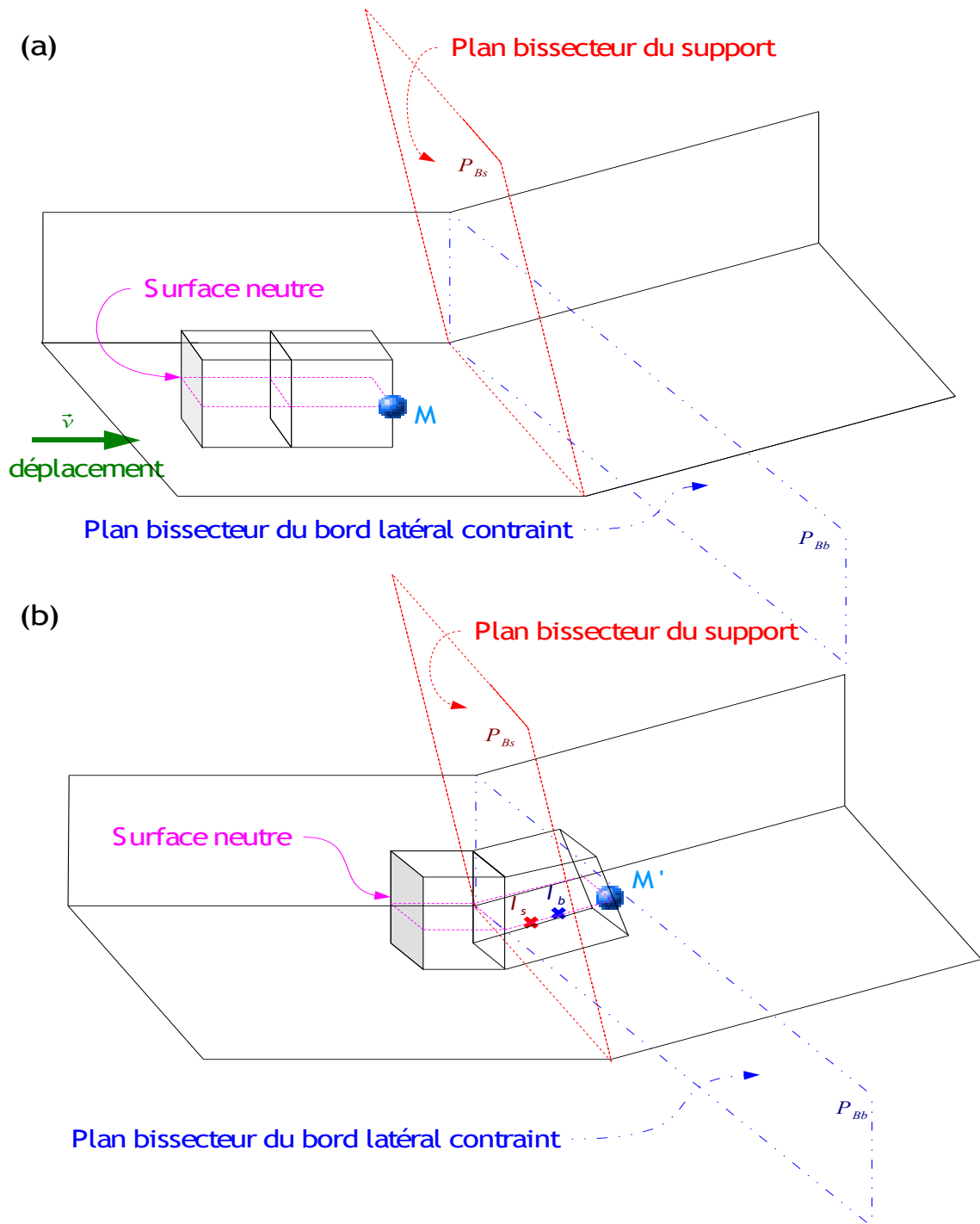


Fig. 3.7 – Déplacement d'un point M de la surface neutre en flexion, avant déplacement et définition des plans bissecteurs (a) et M' après déplacement, définition des points I_s et I_b (b).

- $d_i < \delta$: M se déplace en I_i , puis d'une distance $\delta - d_i$. On recommence l'opération précédemment explicitée avec cette fois-ci pour point d'origine I_i et une nouvelle définition de \vec{v} en fonction des facettes du support et du bord associées à ce nouveau point.

6. La conservation de l'aire de la surface neutre

Au cours du déplacement, cette surface est paramétrée par des éléments triangulaires. L'aire de la surface neutre n'est pas exactement conservée au cours du déplacement. Cette non conservation est due aux erreurs machine sur le calcul des projections. Néanmoins, la variation que l'on obtient entre l'état final et l'état initial reste faible et n'entrave en rien le processus de restauration volumique. L'aire de la surface neutre n'est pas parfaitement conservée, mais l'algorithme tend vers une déformation conservative.

7. La reconstruction des couches supérieures

Pour effectuer la reconstruction des couches supérieures, il est nécessaire d'avoir trois données pour chaque élément constituant la couche (Fig. 3.8) :

- δ' : la distance qui sépare deux points consécutifs M_1 et M_2 de la surface neutre,
- α : l'angle défini par $\widehat{H_s M_1 M_2}$ où H_s est la projection normale de M_1 sur le support,
- θ : l'angle défini par $\widehat{H_b M_1 M_2}$ où H_b est la projection normale de M_1 sur le bord latéral.

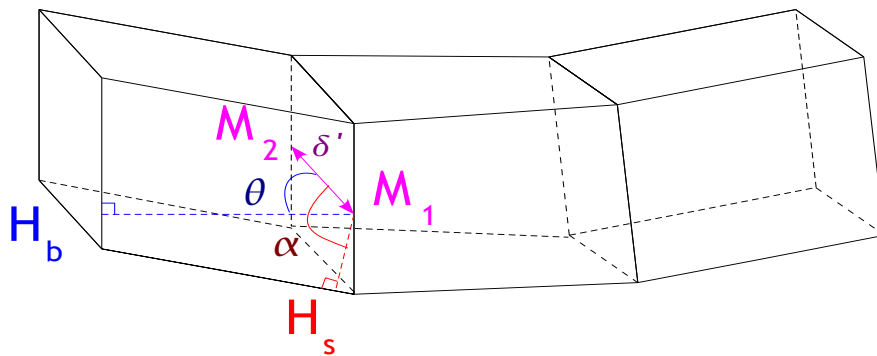


Fig. 3.8 – Reconstruction des couches supérieures en 3D.

On a donc, d'après le paragraphe précédent :

$$\delta' = \|\overrightarrow{M_1 M_2}\| \quad (3.7)$$

$$\cos\alpha = \frac{\overrightarrow{M_1M_2} \cdot \overrightarrow{M_1H_s}}{\|\overrightarrow{M_1M_2}\| \cdot \|\overrightarrow{M_1H_s}\|} \quad (3.8)$$

$$\cos\theta = \frac{\overrightarrow{M_1M_2} \cdot \overrightarrow{M_1H_b}}{\|\overrightarrow{M_1M_2}\| \cdot \|\overrightarrow{M_1H_b}\|} \quad (3.9)$$

La direction du déplacement $\vec{\nu}$ est alors redéfinie pour chaque point M . Pour cela on se place dans un repère normé $\mathcal{R}(M, \vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3)$, où :

$$\vec{e}_1 = \frac{\overrightarrow{MH_s}}{\|\overrightarrow{MH_s}\|} \quad (3.10)$$

$$\vec{e}_2 = \frac{\overrightarrow{MH_b}}{\|\overrightarrow{MH_b}\|} \quad (3.11)$$

$$\vec{e}_3 = \frac{\overrightarrow{MH_s} \wedge \overrightarrow{MH_b}}{\|\overrightarrow{MH_s} \wedge \overrightarrow{MH_b}\|} \quad (3.12)$$

Dès lors, on peut écrire $\vec{\nu}$ dans le repère \mathcal{R} sous la forme :

$$\vec{\nu} = a\vec{e}_1 + b\vec{e}_2 + c\vec{e}_3 \quad (3.13)$$

avec :

$$\begin{aligned} \vec{\nu} \cdot \vec{e}_1 &= \cos\alpha \\ \vec{\nu} \cdot \vec{e}_2 &= \cos\theta \\ \|\vec{\nu}\| = 1 &= \sqrt{a^2 + b^2 + c^2} \end{aligned} \quad (3.14)$$

3.1.2.2 Définitions liées à une déformation en flexion

1. La surface neutre

Dans le cadre, d'un déplacement par flexion, la surface neutre d'un élément est décrite par les points milieux des arêtes perpendiculaires au support de glissement de ce même élément (Fig. 3.9 (b)).

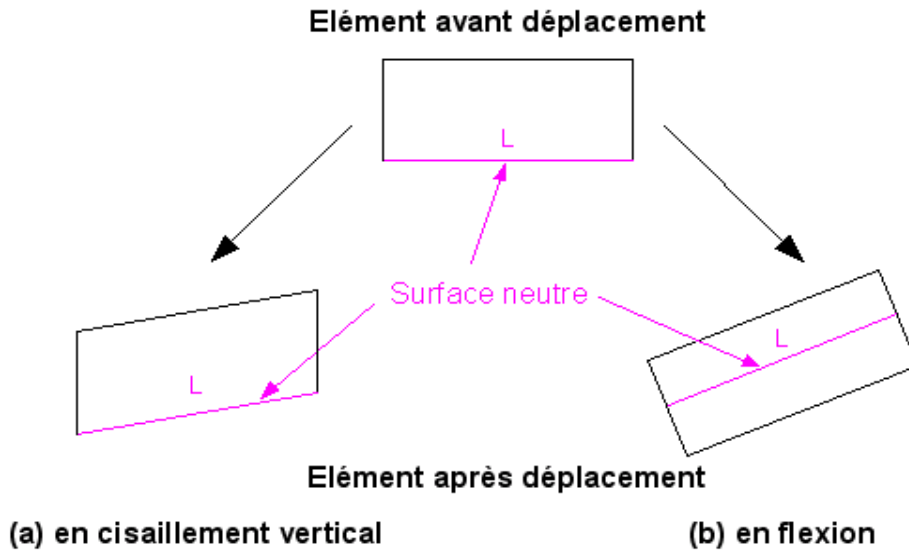


Fig. 3.9 – Elément avant déplacement puis après un déplacement en flexion (b) et après un déplacement en cisaillement vertical (a). Définition de la surface neutre dans le cas de la flexion (b), dans le cas du cisaillement vertical (a).

2. La condition de non croisement des arêtes

Le modèle repose sur des principes géométriques qui dépendent fortement du maillage hexaédrique associé à la géométrie du système modélisé. Une des relations les plus importantes lie la longueur d'un élément et le pendage de la rampe à franchir. Cette relation a pour but d'éviter que les arêtes ne se croisent au cours du déplacement.

Soit α l'angle formé par la rampe avec l'horizontale, $\alpha \in [0, \frac{\pi}{2}[$ (Fig. 3.10), soit l'élément de référence (E) de sommets A_1, A_2, B_2, B_1 , d'épaisseur $2h$, et de longueur L , tel que les points A_i, B_i, M_i , où $(i=1, 2)$ soient définis par les coordonnées cartésiennes suivantes, avant le passage sur la rampe :

$$\begin{array}{lll} A_1(x_0; 0) & B_1(x_0; 2h) & M_1(x_0; h) \\ A_2(x_0 + L; 0) & B_2(x_0 + L; 2h) & M_2(x_0 + L; h) \end{array} \quad (3.15)$$

Après déplacement des points de la surface neutre (Fig. 3.10, surface définie par des tirets fins) et la reconstruction des arêtes, les nouvelles coordonnées

des points sont définies comme suit :

$$\begin{aligned}
 & A'_1(x'_0; 0) \quad B'_1(x'_0; 2h) \quad M'_1(x'_0; h) \quad I(x'_0 + l_1; h) \\
 & A'_2(x'_0 + l_1 + l_2 \cos \alpha + h \sin \alpha; l_2 \sin \alpha + h * (1 - \cos \alpha)) \\
 & B'_2(x'_0 + l_1 + l_2 \cos \alpha - h \sin \alpha; l_2 \sin \alpha + h * (1 + \cos \alpha)) \\
 & M'_2(x'_0 + l_1 + l_2 \cos \alpha; h + l_2 \sin \alpha),
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

où I est le point d'intersection avec la bissectrice du support de glissement,

$$\text{et } l_1 + l_2 = L \tag{3.17}$$

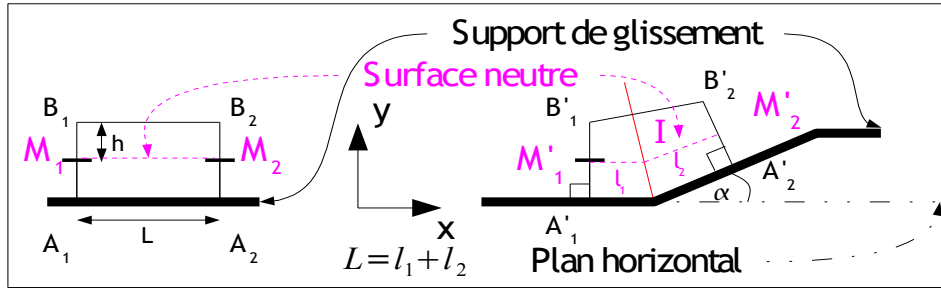


Fig. 3.10 – Schéma de reconstruction des éléments après flexion, condition de non croisement des arêtes.

La condition de non croisement des arêtes se traduit par l'inéquation suivante qui découle du fait que la coordonnée de B'_1 selon x doit être inférieure ou égale à celle de B'_2 selon x :

$$l_1 + l_2 \cos \alpha - h \sin \alpha \geq 0 \quad \forall \alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \tag{3.18}$$

Pour résoudre l'inéquation précédente (3.18) on pose :

$$l_1 = \frac{1}{q}L \quad \text{et} \quad l_2 = \frac{q-1}{q}L \quad \forall q \in [1; +\infty [\tag{3.19}$$

L'inéquation (3.18) devient alors :

$$L \left(\frac{1}{q} + \frac{q-1}{q} \cos \alpha \right) - h \sin \alpha \geq 0 \quad \forall \alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \quad \forall q \in [1; +\infty [\tag{3.20}$$

La solution à l'inéquation précédente (3.20) s'obtient par l'étude de la fonction $f(q) = \frac{1}{q} + \frac{q-1}{q} \cos \alpha$, qui est une fonction décroissante convergeant vers $\cos \alpha$, avec $\cos \alpha > 0$ d'après nos conditions. La relation reliant l'épaisseur de la maille à sa longueur est donc :

$$L \geq h \tan \alpha, \forall \alpha \in \left[0; \frac{\pi}{2} \right] \quad (3.21)$$

Cette relation sur la taille des éléments permet d'éviter des problèmes numériques dus au mauvais dimensionnement des éléments. L'inéquation (3.21) met aussi en avant l'impossibilité de traiter des rampes avec un angle supérieur à $\frac{\pi}{2}$.

3. La reconstruction volumique

Le volume est reconstitué à partir de la surface neutre. En flexion, l'une des hypothèses fortes est la conservation de l'épaisseur au cours du déplacement.

Le déplacement en flexion est supposé parfait c'est à dire sans frottement. La surface neutre est délimitée par les points milieux des arêtes perpendiculaires à la surface de glissement. Les points milieux sont déplacés suivant les étapes décrites dans le paragraphe 5 « Les étapes du déplacement d'un point sur la surface neutre ». Une fois le point milieu déplacé, le point bas de l'arête est construit en effectuant une projection normale du point milieu sur le support de glissement. Le point haut de l'arête est reconstruit perpendiculairement au support de glissement et à une distance égale à l'épaisseur initiale de l'arête.

3.1.2.3 Définitions liées à une déformation en cisaillement vertical

1. La surface neutre

Dans le cadre d'un déplacement par cisaillement vertical, la surface neutre d'un élément est décrite par les points bas des arêtes verticales (Fig. 3.9 (a)). La distance entre les points bas de deux arêtes consécutives est conservée.

2. La condition de non croisement des arêtes

La définition même du cisaillement verticale implique que les arêtes ne se croiseront jamais si elles ne se croisent pas dès le départ. Toutes les arêtes sont parallèles entre elles.

3. La reconstruction volumique

Pour le cisaillement vertical, la reconstruction des arêtes se fait de la façon suivante, le point bas de l'arête verticale est déplacé suivant le déplacement initial, puis le point haut est calculé grâce à l'épaisseur de l'arête qui est conservée et la verticalité de l'arête qui caractérise le cisaillement vertical.

3.2 Validation de la déformation des écailles

La première partie de ce chapitre a été la présentation de la méthodologie des deux modes de déplacement qui peuvent être appliqués sur un modèle de bassin. Dans la suite, il s'agit d'appliquer cette méthodologie à plusieurs cas tests de difficulté croissante afin de vérifier le mode direct de la cinématique des bassins sédimentaires, le mode inverse et la réversibilité de la méthode.

Le premier cas considéré est un bassin non cylindrique composé de deux blocs. Le deuxième cas est un bassin cylindrique à trois blocs, la difficulté de ce modèle est dans le nombre de blocs. Enfin le troisième cas est un bassin non cylindrique à trois blocs plus proche d'un cas réel de bassin sédimentaire.

3.2.1 Test en mode direct sur un cas non cylindrique à deux blocs, avec une direction de pendage variable

3.2.1.1 Présentation du modèle à 4 couches avec une rampe à direction de pendage variable

La première validation se fait sur un cas 3D non cylindrique avec deux blocs. La rampe a une direction de pendage variable (Fig. 3.11).

La figure 3.11 est une représentation en vue de dessus du modèle. La faille coupe les horizons inférieurs et supérieurs de manière à faire apparaître un rayon de courbure.

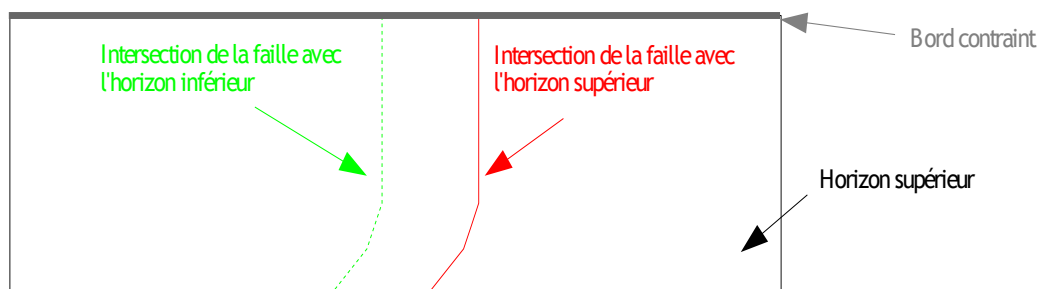


Fig. 3.11 – Vue de dessus du modèle 3D avec représentation de l'intersection entre la surface de faille et les horizons.

Le modèle initial est constitué d'un socle qui reste fixe tout au long de la cinématique et d'une écaille qui se déplace (Fig. 3.12). Le socle est constitué de 20 éléments suivant l'axe X, 9 éléments suivant l'axe Y et 4 couches suivant l'axe Z, ce qui donne en tout 720 éléments pour le socle. L'écaille possède 21 éléments suivant l'axe X, 9 éléments suivant l'axe Y et 4 couches suivant l'axe Z, ce qui donne en tout 756 éléments pour l'écaille.

La rampe est plane par tronçon. Elle forme un angle α de 26.56° avec le plan horizontal (Fig. 3.12). Le bord contraint se trouve à l'opposé de la courbure de la rampe. C'est un plan vertical.

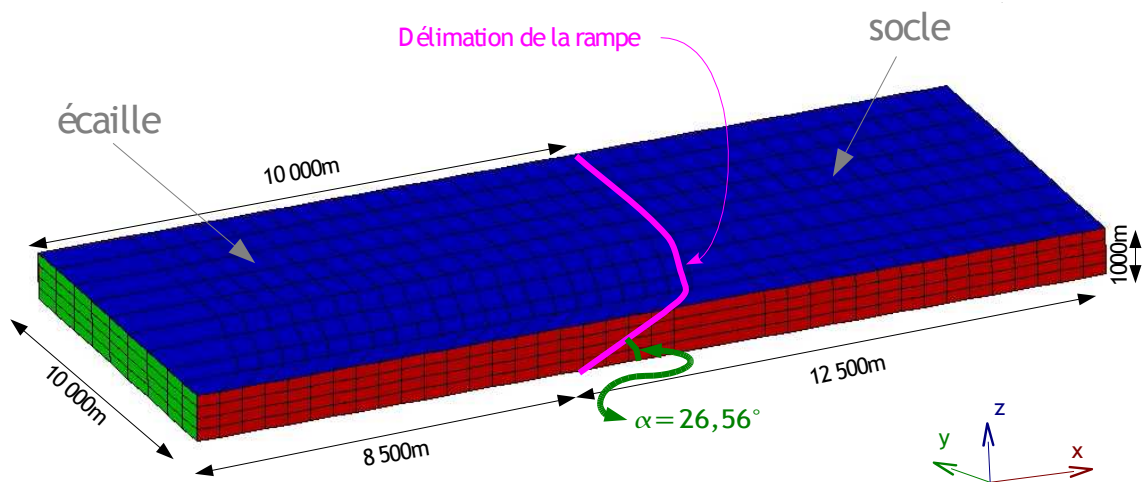


Fig. 3.12 – Présentation du modèle 3D initial avec ces cotes.

3.2.1.2 Validation du déplacement en cisaillement vertical

La figure 3.13 (a) représente le modèle initial avant déplacement. La figure 3.13 (b) est le résultat obtenu après un déplacement de 2000 m suivant l'axe X en cisaillement vertical pour les 4 couches de l'écaille chevauchante, et la figure 3.13 (c) après un déplacement de 4000 m .

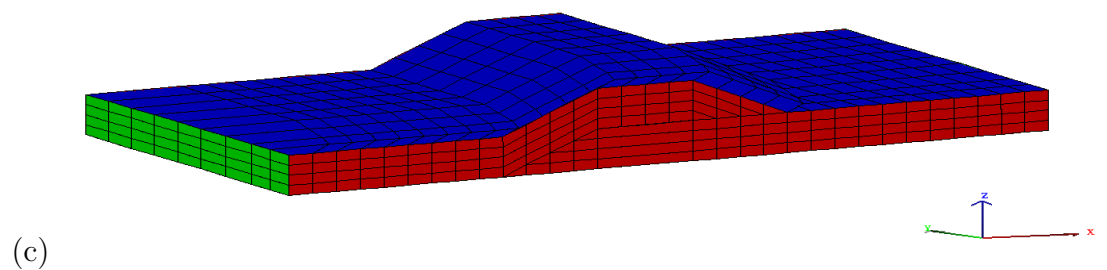
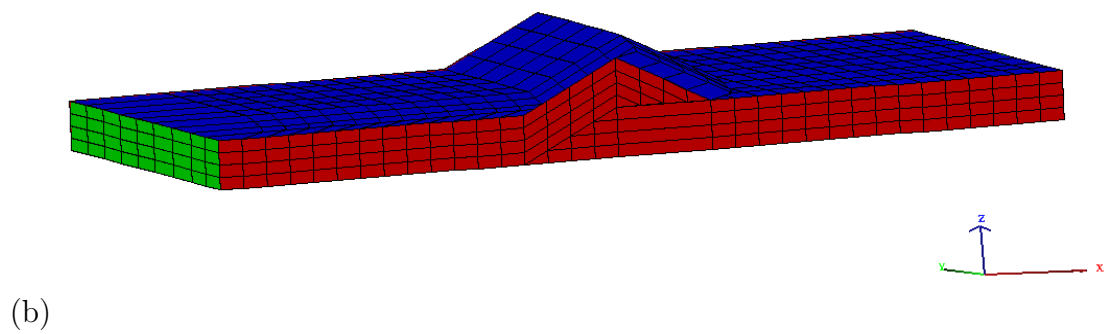
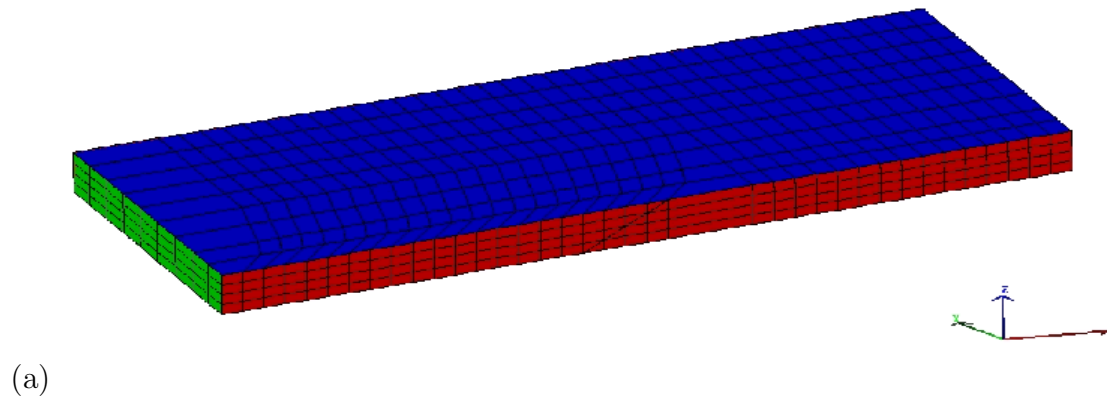


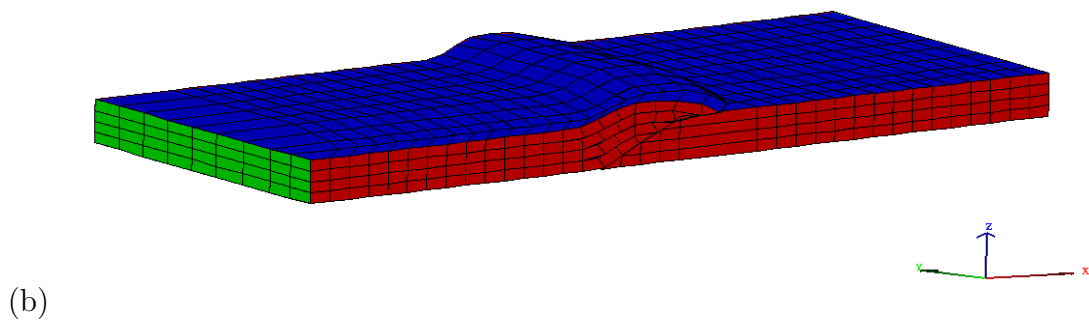
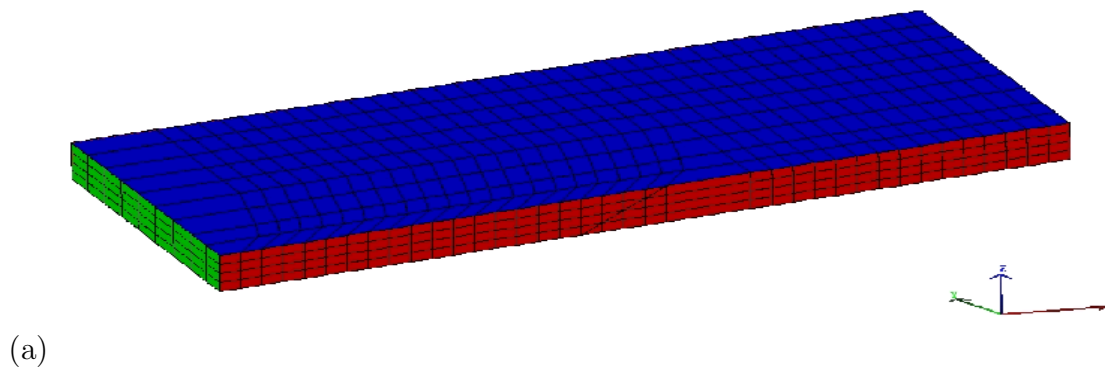
Fig. 3.13 – Présentation du modèle 3D avant déplacement (a) et après 2000 *m* en cisaillement vertical (b), puis 4000 *m* en cisaillement vertical pour toutes les couches de l'écaille déplacée (c).

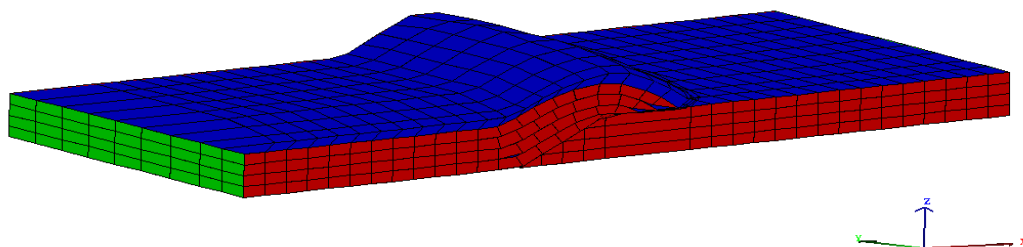
Les éléments de l'écaïlle se sont déplacés comme définis par la méthode, c'est à dire que les arêtes restent verticales tout au long du déplacement.

3.2.1.3 Validation du déplacement en flexion

Nous simulons à présent un déplacement en flexion glissement avec un vecteur déplacement initial suivant l'axe X de $1000\ m$ pour le premier pas de temps puis de $2000\ m$ pour le second pas de temps. Ces hypothèses donnent les résultats suivants (Fig. 3.14 (b) et (c)).

L'ensemble des arêtes restent bien perpendiculaires au support de glissement au cours du déplacement, ce qui est vérifié par le calcul des produits scalaires entre une arête verticale et un vecteur appartenant au support de glissement.





(c)

Fig. 3.14 – Présentation du modèle 3D avant déplacement (a) et après 1000 m en flexion glissement (b), puis 2000 m en flexion glissement pour toutes les couches de l'écaille déplacée (c).

3.2.1.4 Étude de la conservation de l'aire de la surface neutre pour un déplacement en flexion

Dans le cas général, l'aire de la surface neutre d'un élément est conservée avant et après déplacement lorsqu'un élément (E_1) de la couche n n'intersecte pas un plan bissecteur (Fig. 3.15 (a), (b) et (c)). C'est le cas lorsque $d_i > \delta$ (paragraphe 5).

Dans le cas des éléments qui passent la rampe et qui sont donc à cheval sur le plat et la rampe, l'aire de la surface neutre des éléments (E_2) n'est pas conservée à cet incrément de déplacement. Ceci est dû à la méthodologie choisie car une couche ne peut être décrite qu'avec un nombre fixe d'éléments.

En flexion, pour avoir conservation de l'aire de la surface neutre après déplacement, c'est à dire $S = S'$ (Fig. 3.15 (b)), il faudrait décrire les éléments de la surface non pas par des hexaèdres, mais par des éléments plus complexes à 12 points ou plus (multiple de 4 points supplémentaires par plan bissecteur intersecté) ou modifier le nombre de mailles dans chaque direction à chaque fois qu'un plan bissecteur intersecte une maille.

Dans la méthodologie choisie, le nombre d'éléments par couche dans chaque direction est fixe avant et après déplacement. Cela a pour effet de créer une non conservation de l'aire de la surface neutre au passage des rampes car les éléments restent des hexaèdres : $S \neq S''$ (Fig. 3.15 (c)). Cette non conservation est plus ou moins accentuée en fonction de la taille des éléments et de la pente de la rampe. Si une couche est décrite par un nombre important d'éléments, les erreurs seront minimisées. Par contre si une couche est décrite par des éléments très larges ou longs par rapport à leur hauteur, cela génère des erreurs plus importantes sur la non

conservation de l'aire de la surface neutre.

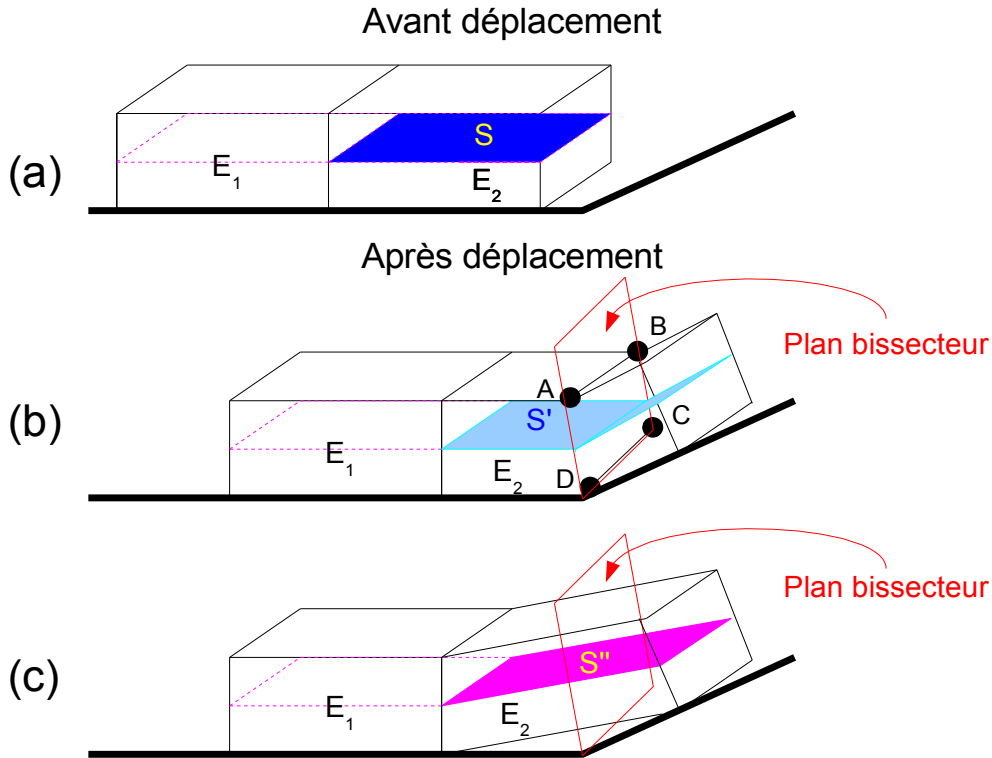


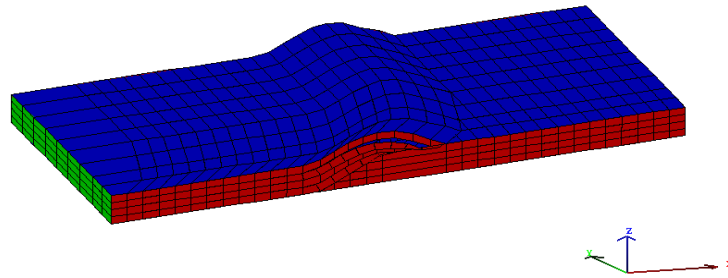
Fig. 3.15 – Présentation d'un maillage avant (a) et après déplacement en flexion pour deux éléments E_1 et E_2 d'une couche. Le cas (c) est le cas pris en compte par la méthodologie et le cas (b) serait le cas obtenu si le nombre de mailles dans chaque direction était variable.

Encore une fois, il y a un compromis à atteindre entre le nombre de mailles pour décrire le modèle et la longueur de chaque élément décrivant le modèle, pour obtenir la précision numérique souhaitée.

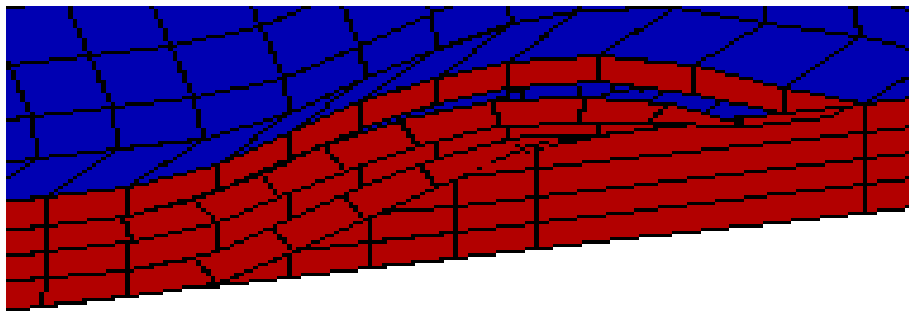
3.2.1.5 Test avec un couplage de deux modes de déplacement déformation, la flexion et le cisaillement

Il est également possible d'appliquer des modes de déplacement distincts sur chacune des couches du bloc déplacé. Dans le cas étudié sur la figure 3.16 (a) un vecteur déplacement de 2000 m suivant l'axe X est appliqué en flexion sur la première

et la troisième couche du bloc déplacé et en cisaillement vertical sur la deuxième et quatrième couche.



(a)



(b)

Fig. 3.16 – Présentation du modèle 3D après 2000 m en flexion pour la première et la troisième couche et en cisaillement vertical pour la deuxième et la quatrième couche de l'écaille déplacée (a), ainsi qu'un zoom sur la rampe de l'écaille déplacée (b).

Le zoom (Fig. 3.16 (b)) permet de voir plus précisément l'orientation des arêtes suivant les différentes couches. La première et la troisième couche ont des arêtes perpendiculaires à la surface de glissement, cette affirmation est vérifiée comme précédemment par calcul de produits scalaires. La deuxième et la quatrième couche ont des arêtes verticales, cette affirmation est vérifiée en calculant le vecteur directeur de chacune de ces arêtes, ils sont tous parallèle à l'axe Y. Sur le zoom ainsi que sur la vue d'ensemble de la figure 3.16 (a), la deuxième couche s'amincit. L'épaisseur de la deuxième couche est conservée après vérification. Il s'agit uniquement d'une illusion d'optique due à l'angle de vue de l'image et au recouvrement de la deuxième couche par la troisième couche.

3.2.2 Problème inverse ainsi que réversibilité de la cinématique sur un cas cylindrique à trois blocs, avec un duplex

Tout au long de cet exemple de bassin cylindrique composé de trois blocs, on part de l'état déformé pour arriver à l'état restauré. Dans une seconde étape, on résout le problème direct du modèle initial vers le modèle déformé.

3.2.2.1 Choix d'un maillage judicieux

Pour assurer la réversibilité de la méthode, les maillages des modèles sont réversibles ; c'est à dire qu'au cours de la cinématique, la condition de non croisement des arêtes est respectée. Cette condition de non croisement des arêtes implique une relation entre la longueur de la maille et la hauteur de cette même maille ainsi qu'entre la largeur de la maille et la hauteur de cette même maille. Si la longueur d'une maille est réduite, la hauteur l'est également. Les maillages sont décrits avec un nombre fixe de mailles suivant les trois directions de l'espace X, Y, Z ; le nombre de mailles dépend donc de la largeur des mailles. Le nombre de mailles a un impact sur la précision des calculs numériques tel que le déplacement des mailles, mais aussi la conservation volumique de chaque élément. Ces erreurs d'imprécision sur la conservation volumique peuvent entraîner ensuite des erreurs sur la définition des porosités si on avait une équation de compaction à appliquer au modèle. Un compromis est à faire entre la précision de ces calculs et le temps de calcul pour chaque itération cinématique.

3.2.2.2 Les différences par rapport au cas précédent

La principale différence est le changement dans le nombre de blocs déplacés. Il y a toujours un bloc socle qui reste fixe au cours de la cinématique, mais deux blocs se déplacent.

Pour déplacer ces deux blocs, il faut définir une chronologie du déplacement des blocs. Par exemple, un bloc se déplace puis le second bloc se déplace sur les deux autres qui sont alors considérés comme fixes. Les deux blocs ne peuvent pas se déplacer simultanément.

Plusieurs modes de construction des exemples à trois blocs ont été envisagés. La première méthode consiste en l'utilisation d'un modèle analogique de type bac à sable. Les exemples analogiques sont intéressants car ils permettent de suivre la cinématique du bassin suivant des pas de temps établis au préalable. Par contre, le pointage des horizons sur les images des coupes de ce bassin 3D se fait à la main et

n'est donc pas très précis (Fig. 3.17 (a) et (b)). Il est parfois difficile de déterminer les limites de différentes couches (les lignes noires Fig. 3.17 (a) et (b)). C'est pour cette raison que cette méthode n'a pas été retenue pour la construction du modèle à trois blocs.

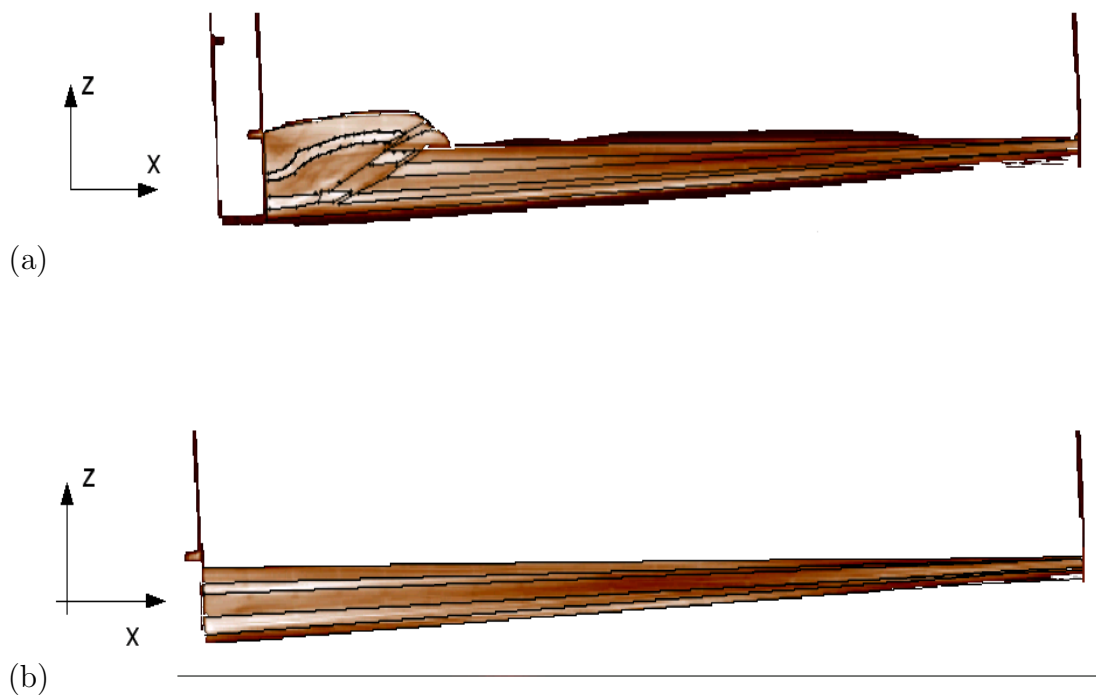


Fig. 3.17 – Exemple d'une vue en coupe d'un modèle analogique 3D à l'état déformé (a), puis à l'état restauré (b).

Une autre méthode de construction d'un modèle 3D consiste en une interpolation latérale entre plusieurs coupes 2D. Pour construire ces coupes 2D, le logiciel Thrustpack qui est un logiciel IFP de modélisation de bassin en 2D est utilisé. La figure 3.18 illustre la coupe 2D qui a inspiré la construction du maillage à trois blocs.

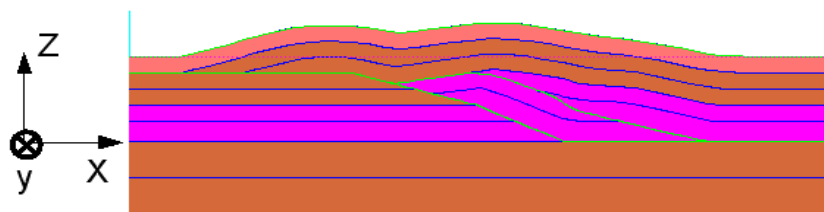


Fig. 3.18 – Coupes 2D Thrustpack à un Y fixe.

3.2.2.3 Construction du modèle initial composé de trois blocs avec un duplex

Pour construire le modèle 3D cylindrique, la première étape est la construction des sections 2D maillées, puis l'interpolation latérale entre les coupes.

Une autre caractéristique du passage aux trois blocs est la chronologie appliquée aux blocs du modèle, c'est à dire les blocs se déplacent dans un ordre chronologique connu (Fig. 3.19).

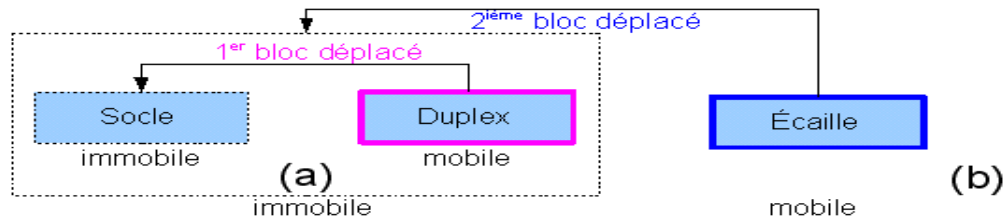


Fig. 3.19 – Arbre de déplacement des blocs les uns sur les autres, le duplex se déplace sur le socle (a), puis l'écaïlle se déplace sur le socle et le duplex (b).

3.2.2.4 Description du modèle initial

En passant à un modèle à trois blocs, il faut compléter la définition du support de glissement.

Dans le cas d'un bassin constitué d'un duplex, d'une écaïlle et d'un socle, le support de glissement de la couche de base du duplex est défini par le toit du socle. Pour la couche de base de l'écaïlle, c'est la concaténation du toit du socle et du duplex (Fig. 3.20, Fig. 3.21).

Chacun des blocs est constitué de 6 éléments suivant l'axe Y. Le duplex est composé de 20 éléments suivant l'axe X et de 4 couches, ce qui donne 480 éléments. L'écaïlle est composée de 39 éléments suivant X et de 8 couches, ce qui donne 1872 éléments. Le socle est composé de 52 éléments suivant X, et de 6 couches, ce qui donne 1872 éléments.

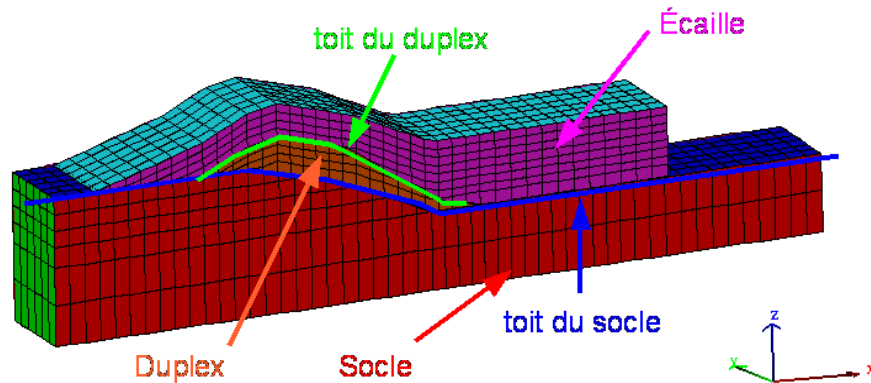


Fig. 3.20 – Modèle à l'état initial déformé avec la définition des différents supports de glissement.

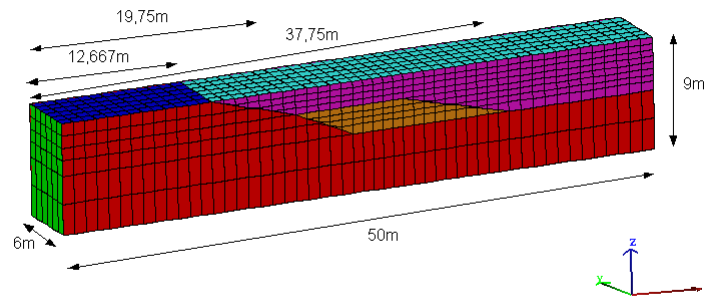


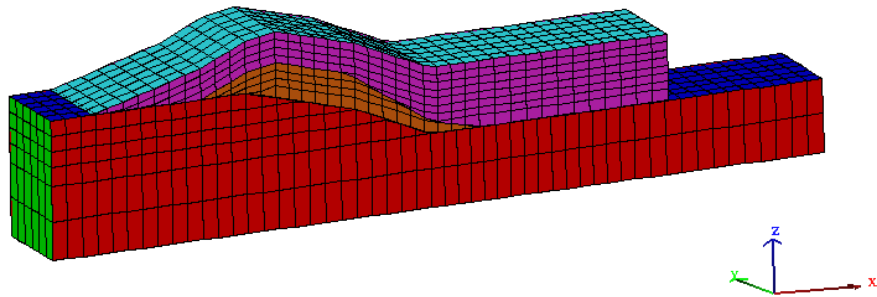
Fig. 3.21 – Modèle restauré avec ses cotes.

Il est plus simple d'utiliser le modèle restauré pour définir les cotes des différents blocs (Fig. 3.21). Ces cotes permettent d'avoir un meilleur dimensionnement des déplacements appliqués au modèle.

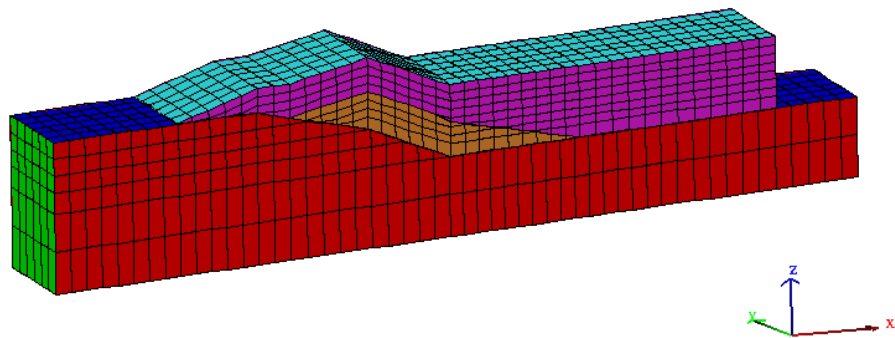
3.2.2.5 Validation de la réversibilité en cisaillement vertical en partant d'un état déformé

L'état de départ est le modèle déformé qui est représenté en figure 3.22 (a). Pour le cas d'un déplacement en cisaillement vertical effectué sur l'ensemble des couches des deux blocs déplacés, c'est à dire l'écaille et le duplex, les résultats suivants sont obtenus pour un vecteur déplacement de 5m (Fig. 3.22 (b)), puis 10 m suivant l'axe

X (Fig. 3.22 (c)) par rapport à la position initial des blocs. Cette première étape est également appelée restauration. Dans un second temps, les blocs sont déplacés en mode direct, avec un vecteur déplacement de $-5m$ (Fig. 3.22 (d)), puis $-10m$ suivant l'axe X (Fig. 3.22 (e)) par rapport à la position initiale des blocs. Ces déplacements sont appliqués chronologiquement dans un premier temps au duplex puis à l'écaille.



(a)



(b)

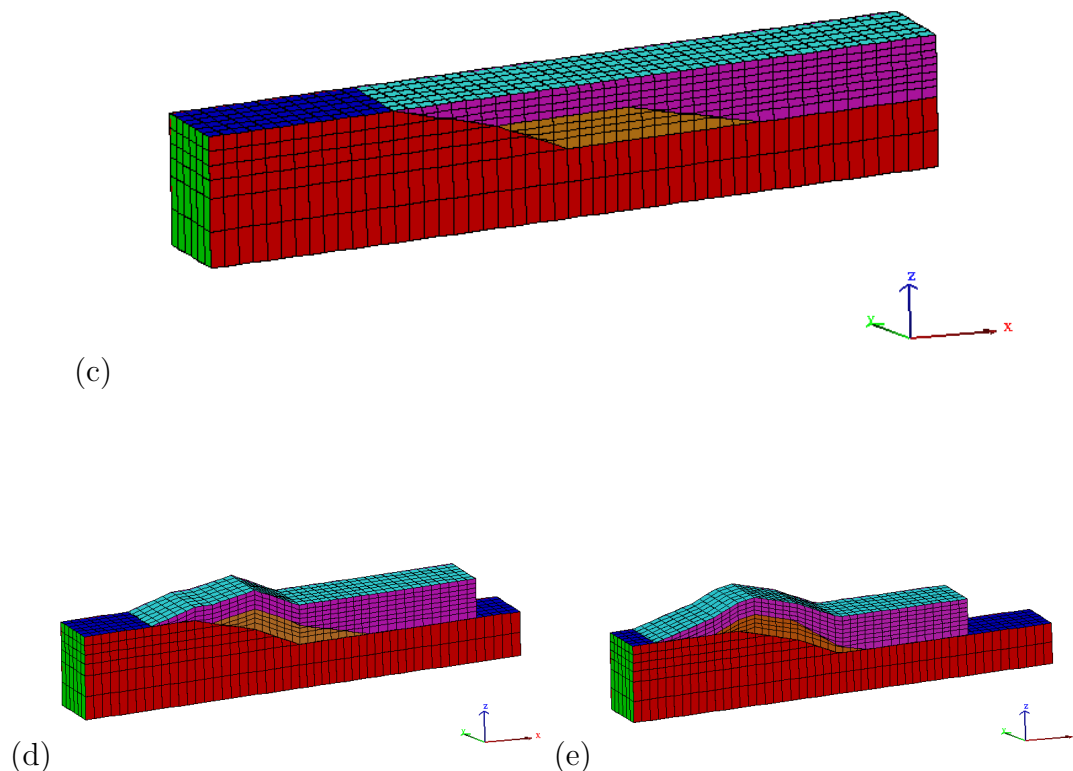


Fig. 3.22 – Présentation du modèle à 3 blocs cylindriques avant déplacement (a) et après 5m en cisaillement vertical (b), puis 5m supplémentaire pour l'écaille et le duplex déplacés (c) puis la réversibilité de cette cinématique (d) et (e).

Les arêtes restent verticales au cours des différents déplacements. Après comparaison par différence des maillages, la réversibilité de la cinématique est donc assurée pour le cisaillement vertical.

De plus, une étude sur la variation du volume de chaque élément de chaque couche est effectuée pour vérifier la conservation volumique des éléments. Cette étude est réalisée sur cet exemple de manière plus simple car on se trouve dans un cas cylindrique. Pour calculer le volume d'un élément, on utilise la formule suivante,

$$(S_1 + S_2) * h_1,$$

où S_1 est la surface définie par les points 0, 4, et 5 (Fig. 3.23),
 S_2 est la surface définie par les points 0, 1, et 5 (Fig. 3.23),
 h_1 est la distance entre les points 5 et 6 (Fig. 3.23).

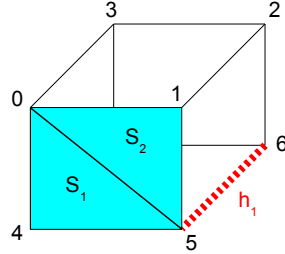


Fig. 3.23 – Définition des surfaces S_1 , S_2 , et de la distance h_1 d'un élément d'une couche.

La variation de volume d'un élément est calculée entre l'état avant et après déplacement. Cette variation $v_{ini/fin}^i$ est définie par l'équation suivante :

$$v_{ini/fin}^i = \frac{|V_{ini}^i - V_{fin}^i|}{V_{ini}^i}$$

avec V_{ini}^i volume de l'élément avant déplacement et V_{fin}^i volume de l'élément après déplacement.

Pour un déplacement en cisaillement vertical du duplex de 10 m suivant X, la variation volumique élémentaire est comprise entre 0% valeur minimale de cette variation et 0,0014% pour la valeur maximale de cette variation (Fig. 3.24).

La variation volumique élémentaire pour l'écaille est comprise entre 0% (valeur minimale) et 0,0007% (valeur maximale). Ces résultats montrent que l'on peut considérer que la variation volumique des éléments est négligeable.

3.2.2.6 Validation de la réversibilité en flexion

L'état de départ est le modèle déformé qui est représenté en figure 3.25 (a). Pour un déplacement en flexion de l'ensemble des couches des deux blocs déplacés, c'est à dire de l'écaille et du duplex, le résultat suivant (Fig. 3.25 (b)) est obtenu pour un vecteur déplacement de 5 m suivant l'axe X. Ensuite pour continuer le processus de restauration un déplacement de 10 m suivant l'axe X (Fig. 3.25 (c)) par rapport à la position initial des blocs est appliqué en flexion. Les légères ondulations (les horizons ne sont pas parfaitement horizontaux après restauration Fig. 3.26) sont dues aux erreurs machines et aux arêtes qui sont perpendiculaires au support de glissement. Puis le mode direct de déformation est appliqué, c'est à dire un vecteur déplacement de -5 m (Fig. 3.25 (d)), puis -10 m suivant l'axe X (Fig. 3.25 (e)) par rapport à la position initiale des blocs en flexion. Ces déplacements sont appliqués

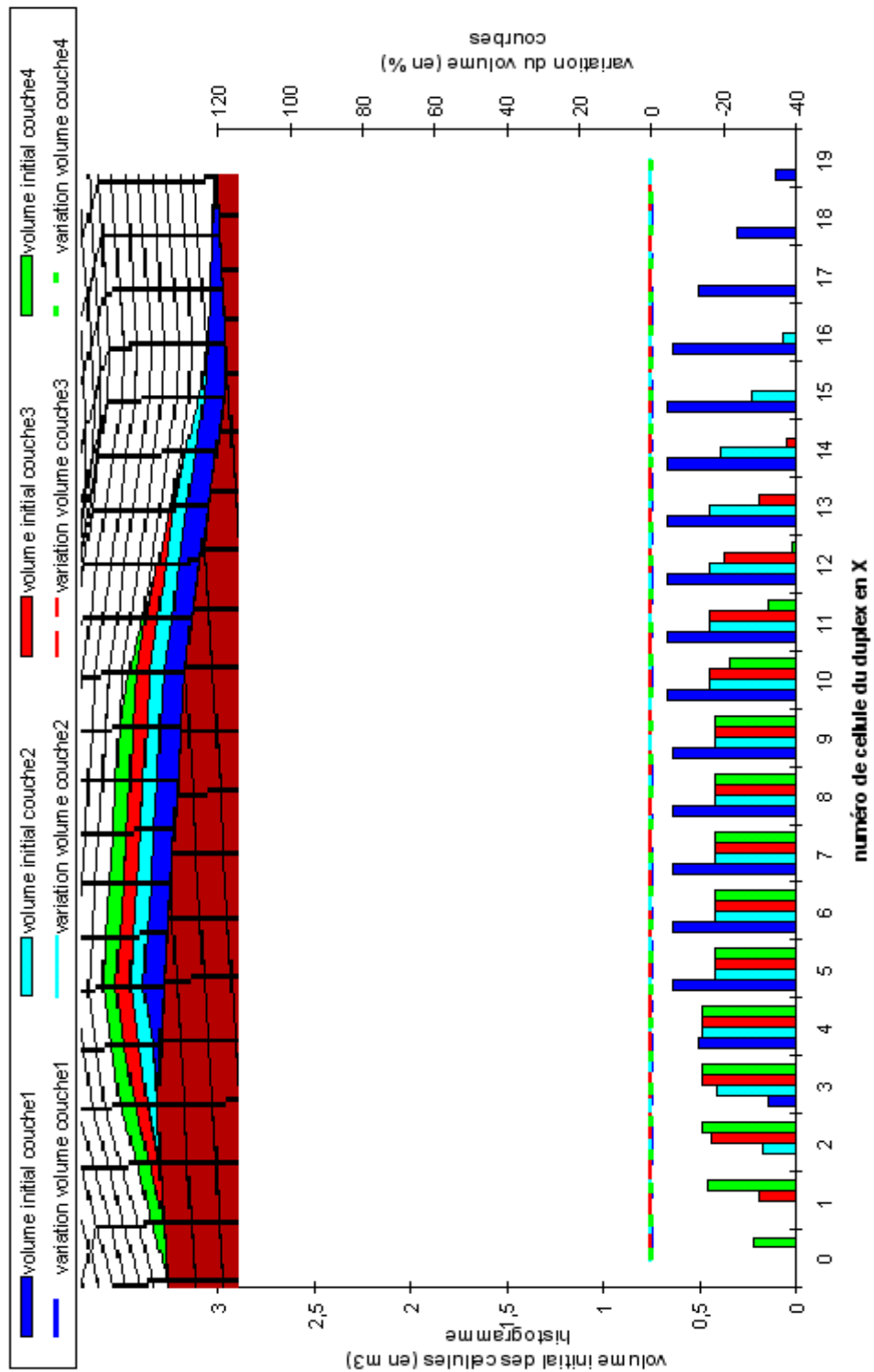
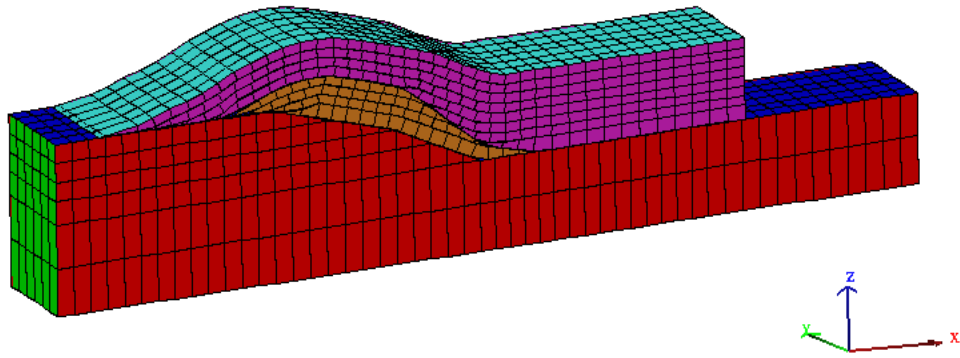
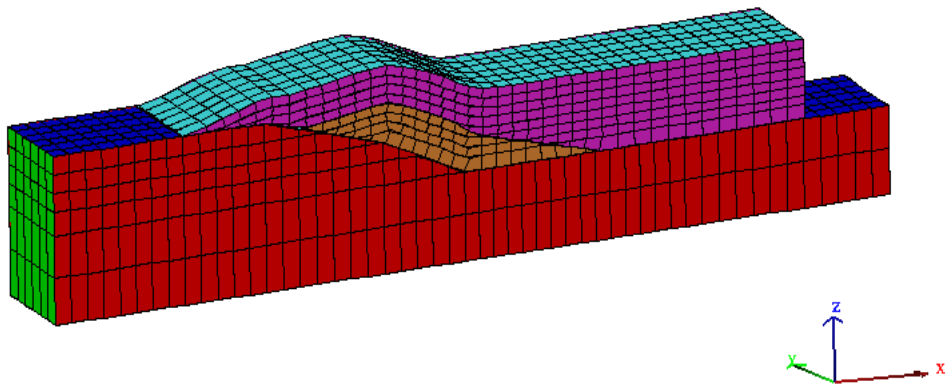


Fig. 3.24 – Histogrammes du volume des éléments pour chaque couche du duplex et variation du volume de chacun de ces éléments pour un déplacement de 10 m en cisaillement vertical. Les erreurs sont négligeables.

chronologiquement dans un premier temps au duplex puis à l'écaille.



(a)



(b)

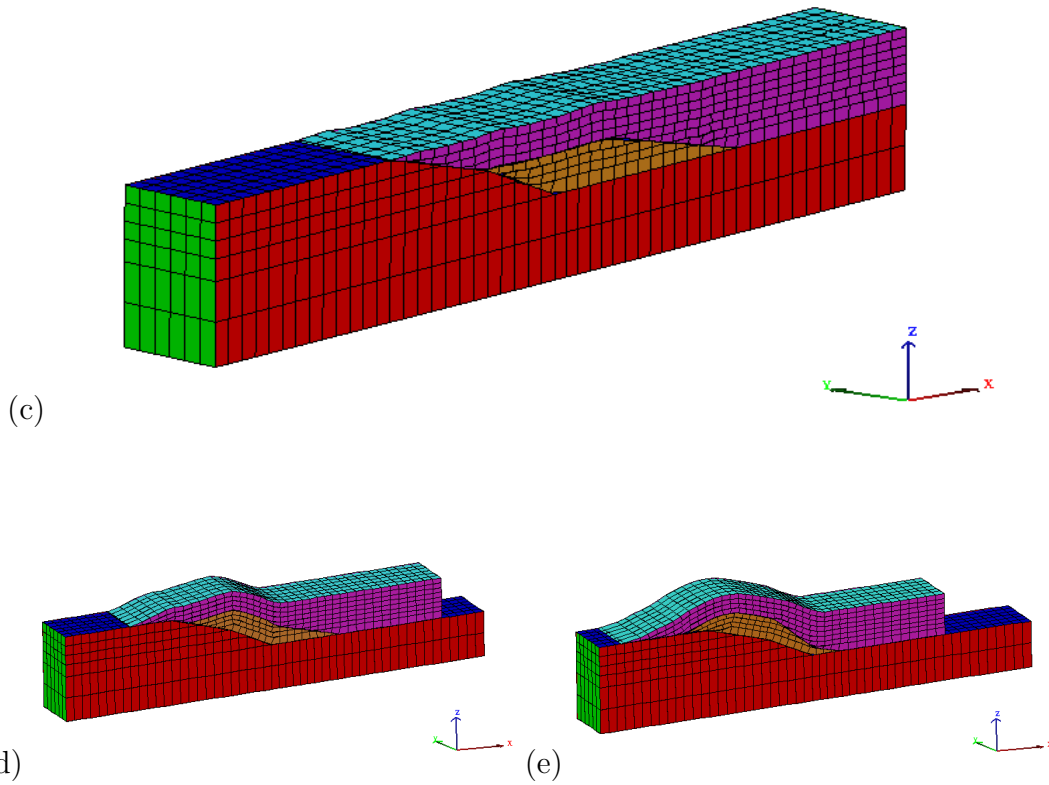


Fig. 3.25 – Présentation du modèle cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a), après un déplacement de 5m suivant l'axe X en flexion (b), puis 5m supplémentaire pour l'écaille et le duplex déplacés en flexion (c), puis la réversibilité de cette cinématique (d) et (e).

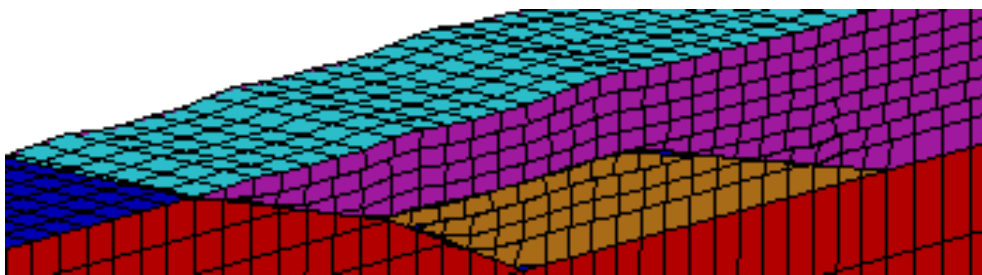


Fig. 3.26 – Zoom du duplex dans son état restauré après un déplacement en flexion.

Après calcul des produits scalaires entre les arêtes verticales et un vecteur appartenant au support de glissement, les arêtes restent perpendiculaires au cours des différents déplacements. La réversibilité de la cinématique est assurée pour la flexion,

après comparaison par différence (Fig. 3.25 (e) et (a)).

Après calcul des volumes avant et après un déplacement de 10 *m* en flexion suivant l'axe X pour l'ensemble des éléments des couches des deux blocs déplacés, la variation volumique élémentaire est comprise entre 0% et 14% pour le duplex (Fig. 3.27). Une valeur anormale de 99% correspond au premier élément de chaque couche. Cette erreur dans le déplacement de la dernière arête verticale non nulle de chaque couche est corrigée dans le paragraphe suivant (3.2.3.2). La variation volumique globale du duplex est de 1.9%, ce qui est une variation volumique faible. La variation volumique élémentaire est comprise entre 0% et 14% pour l'écaille. Une valeur anormale de 123% correspond au premier élément de chaque couche. Pour l'écaille, la variation volumique globale est de 0.25%, la variation de volume est encore plus faible dans ce cas ci.

Si on analyse ces résultats dans le détail, nous constatons que cette variation entre le volume initial et le volume final des éléments existe lorsqu'il y a un changement de pente au niveau du support de glissement et pour la dernière maille déplacée de chaque couche.

Le volume des éléments n'est pas conservé lors des changements de pente du support de glissement, ceci est dû au nombre fixe d'éléments définissant le maillage (3.2.1.4). De plus, les petites erreurs numériques lors du déplacement se cumulent dans le volume de la dernière maille déplacée qui est alors différent de son volume initial. Par contre la variation volumique globale de chaque bloc reste faible, inférieure à 1.9%

3.2.2.7 Validation du mode direct de déplacement pour un couplage en flexion et en cisaillement vertical

L'état de départ est le modèle déformé qui est représenté en figure 3.28 (a). Un vecteur déplacement de -3m suivant l'axe X est appliqué sur notre modèle (Fig. 3.28 (b)), les couches géologiques ont par alternance soit un comportement équivalent à la flexion, soit un comportement équivalent au cisaillement vertical. Ensuite pour arriver à l'état restauré un vecteur déplacement de 7m suivant l'axe X (Fig. 3.28 (c)) est appliqué en cisaillement vertical pour l'ensemble des couches. Puis dans un troisième temps, le mode direct est appliqué avec un vecteur déplacement de -3m suivant l'axe X (Fig. 3.28 (d)), puis -7m suivant l'axe X (Fig. 3.28 (e)) par rapport à l'état restauré. Ces déplacements sont appliqués chronologiquement dans un premier temps au duplex puis à l'écaille.

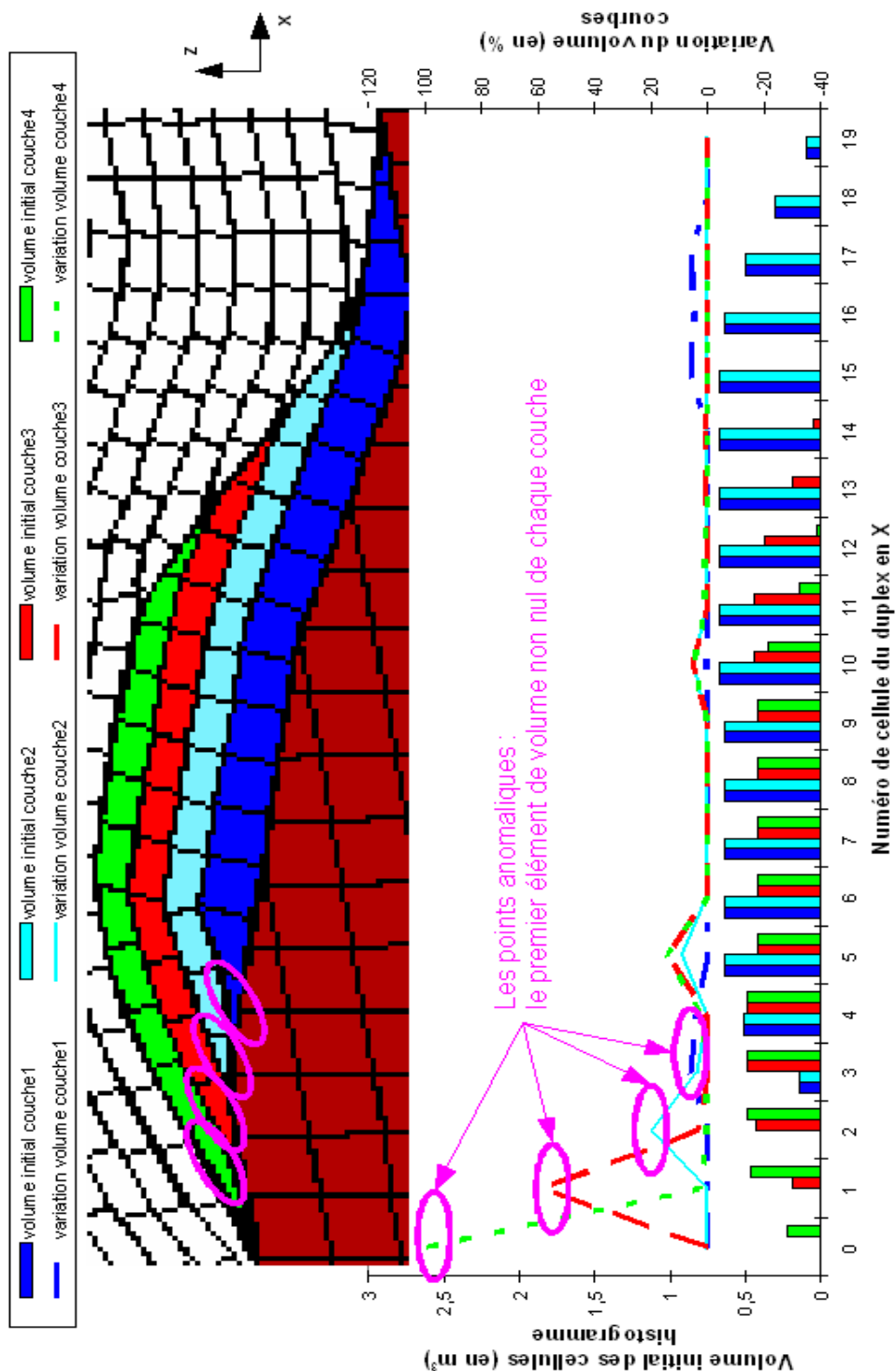


Fig. 3.27 – Histogrammes du volume des éléments pour chaque couche du duplex et variation du volume de chacun de ces éléments en flexion pour un déplacement de 10 m suivant X.

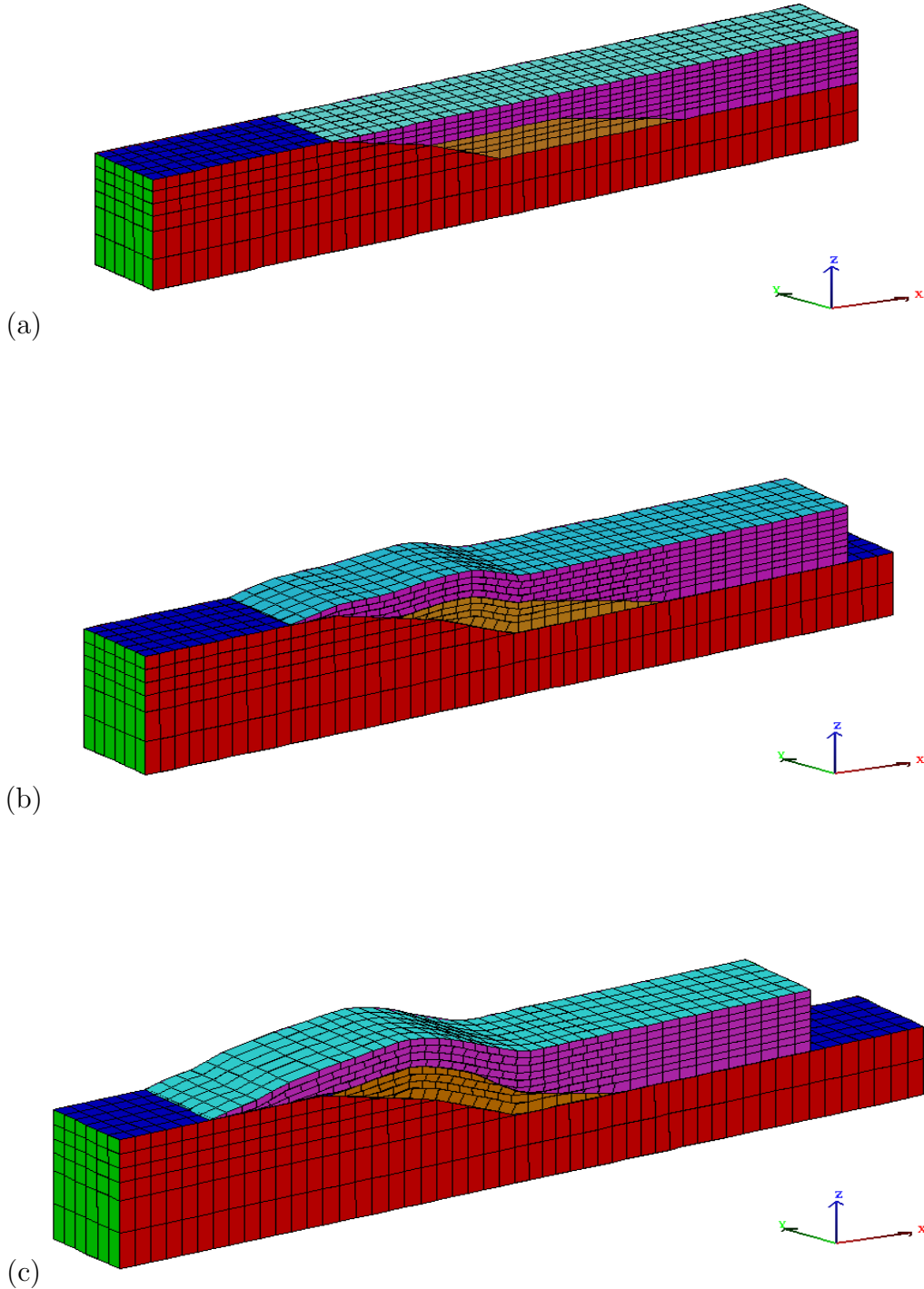


Fig. 3.28 – Présentation du modèle cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) et après -3m en flexion et cisaillement vertical (b), puis -7m pour l'écaille et le duplex déplacés en cisaillement vertical (c).

Si les résultats obtenus avec le couplage sont comparés avec ceux obtenus dans les paragraphes précédents (3.2.2.5 et 3.2.2.6), les conclusions des paragraphes précédents restent vérifiées. Pour les couches se déplaçant en cisaillement vertical la conservation volumique est vraie et pour les couches se déplaçant en flexion on retrouve les erreurs de déplacement au passage de la rampe et sur la dernière maille de cette même couche.

3.2.3 Déplacement en mode direct d'un cas non cylindrique à trois blocs avec deux écailles

3.2.3.1 Présentation du modèle initial

Le cas qui suit s'inspire de structures géologiques comme celles que l'on peut rencontrer dans le golfe du Mexique (Fig. 3.29, (ROWAN[13], 1999)). De telles structures présentent l'avantage de réunir plusieurs aspects théoriques intéressants qui sont le lien entre une faille normale et une faille inverse.

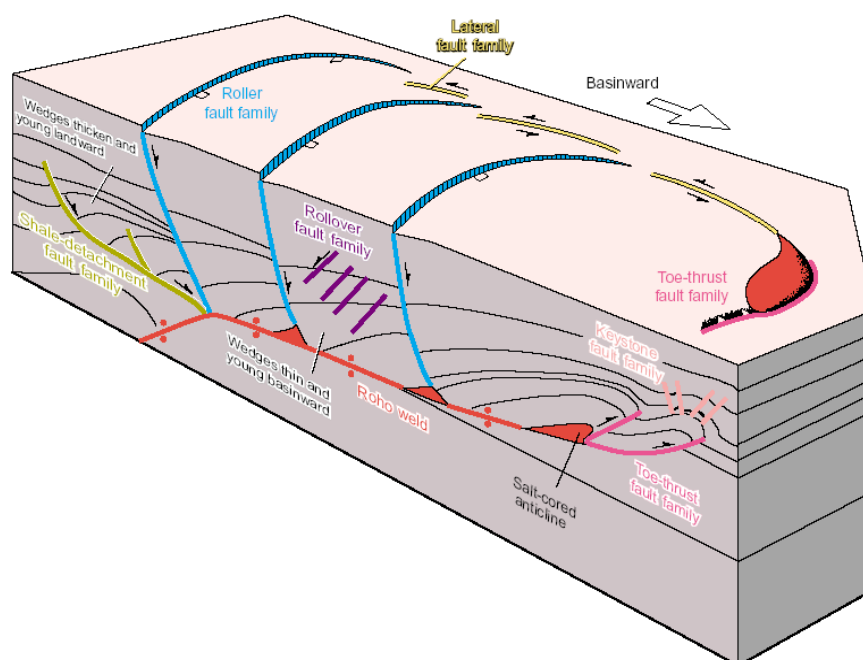


Fig. 3.29 – Schéma des blocs montrant un ensemble typique de failles dans un système de sel allochtone (ROWAN[13], 1999).

La géométrie du bassin étudié a été simplifiée par rapport à la réalité géologique du golfe du Mexique. Le bassin est constitué de trois blocs.

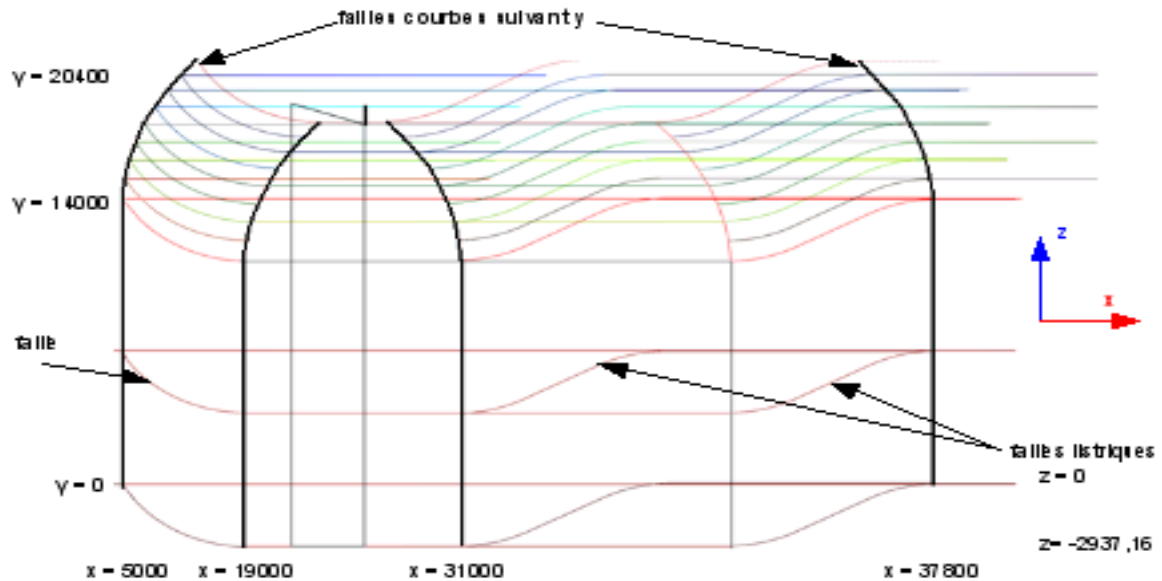


Fig. 3.30 – Ensemble des coupes 2D décrivant le modèle non cylindrique à trois blocs, les coupes sont à $y=\text{constante}$ et la courbure des failles suivant l'axe Y est représentée, ces coupes permettent également de se représenter la géométrie de ces failles en profondeur.

Le dernier modèle étudié est un modèle trois blocs non cylindrique. La complexité apportée par l'aspect non cylindrique permet de considérer cet exemple plus proche d'un modèle réel que les précédents.

Les failles qui délimitent les trois blocs sont courbes suivant l'axe Y (Fig. 3.30). Pour réaliser cet exemple, il a d'abord fallu définir un ensemble de coupes 2D qui décrivent le maillage. Ces différentes coupes sériées sont présentées dans le schéma suivant (Fig. 3.30). Ce schéma permet de définir par des coupes 2D successives un bassin 3D complexe.

Les coupes 2D successives permettent de construire les différentes surfaces constituant les surfaces des failles séparant les différents blocs. Le socle qui est représenté en 3D dans la figure 3.31 possède deux surfaces courbes de pentages moyens différents : l'une avec le plus faible pendance correspond à une faille inverse (chevauchement) et l'autre avec le plus fort pendance correspond à une faille normale (extension). On modélise ainsi les grandes déformations des bassins sédimentaires (golfe du Mexique, (CORNU[2],2001)) avec un bord latéral qui peut-être considéré comme une faille décrochante.

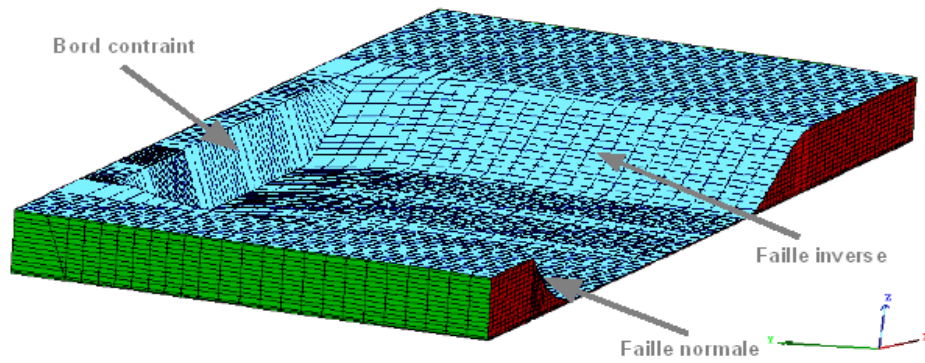


Fig. 3.31 – Socle du modèle 3D non cylindrique avec définition des surfaces de faille et du bord contraint.

Pour mieux définir le modèle 3D, les deux coupes suivantes peuvent aider à la compréhension de la géométrie de ce bassin (Fig. 3.32 et Fig. 3.33). La figure 3.32 est une vue de droite du modèle, cette vue permet de voir la surface de faille inverse entre les écaïlles 1 et 2, ainsi qu'entre l'écaïlle et le socle. La vue de dessus précise (Fig. 3.33) la géométrie de ces failles suivant l'axe Y.

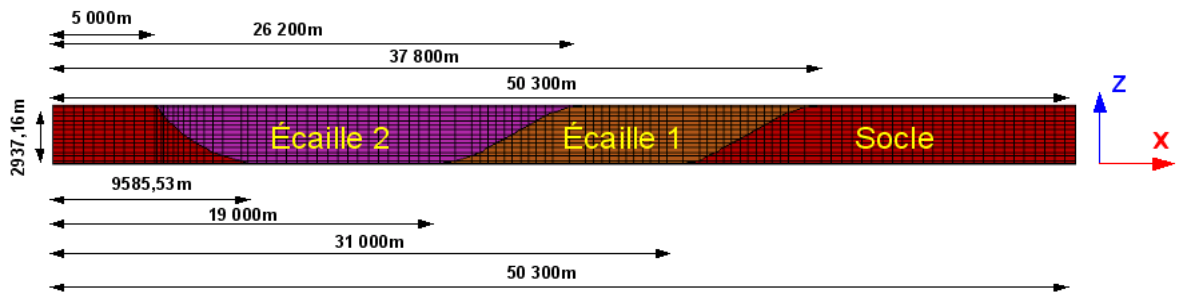


Fig. 3.32 – Vue de droite du modèle à trois blocs non cylindrique et cotes de ce bassin et définition des différents blocs.

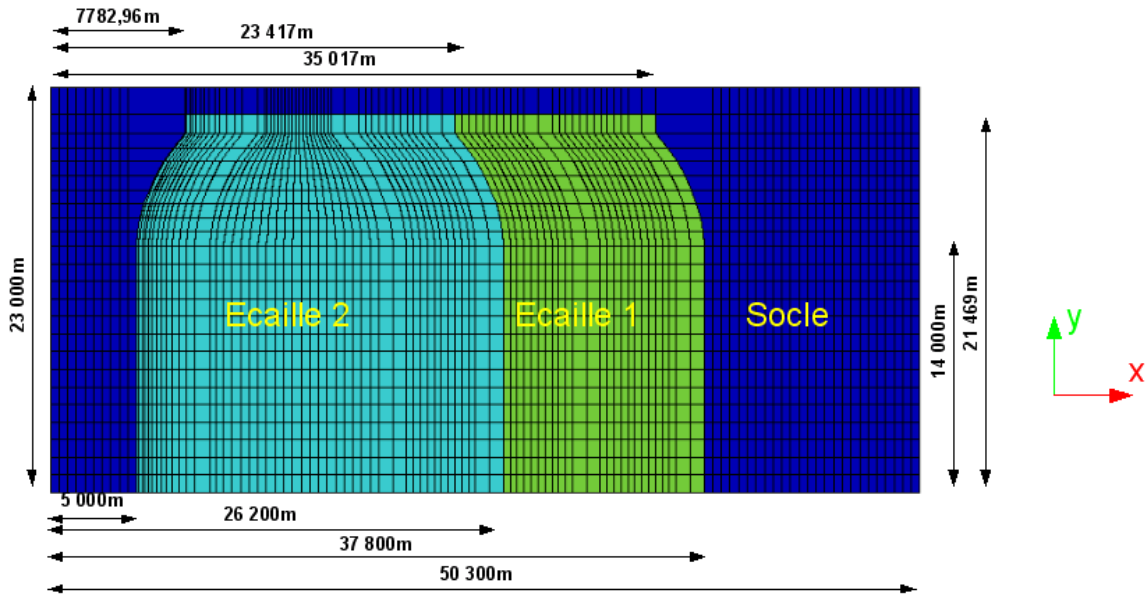


Fig. 3.33 – Vue de dessus du modèle à trois blocs, cotes de ce bassin et définition des différents blocs.

L'arbre de déplacement pour ce modèle se fait de la façon suivante. C'est d'abord l'écaïlle 1 qui se déplace sur le socle, puis l'écaïlle 2 sur le socle et l'écaïlle 1 (Fig. 3.34).

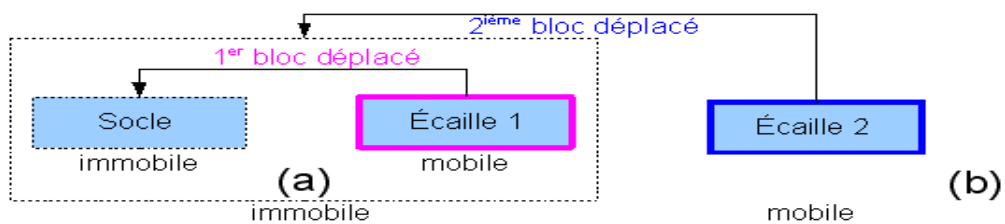
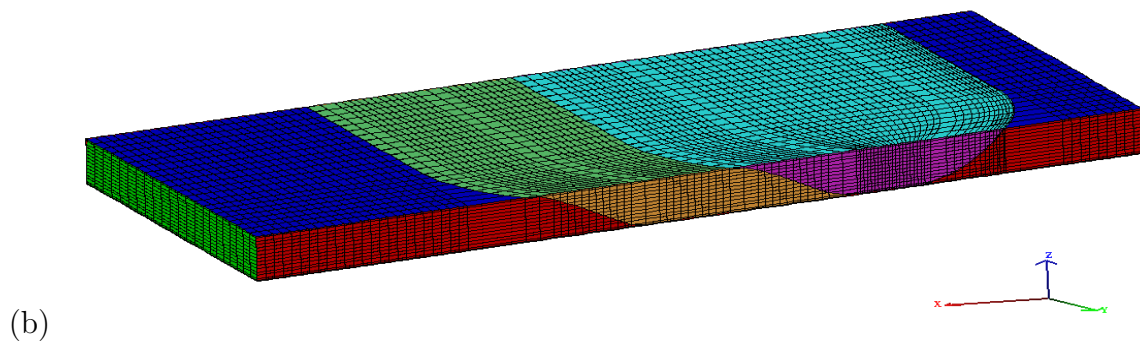
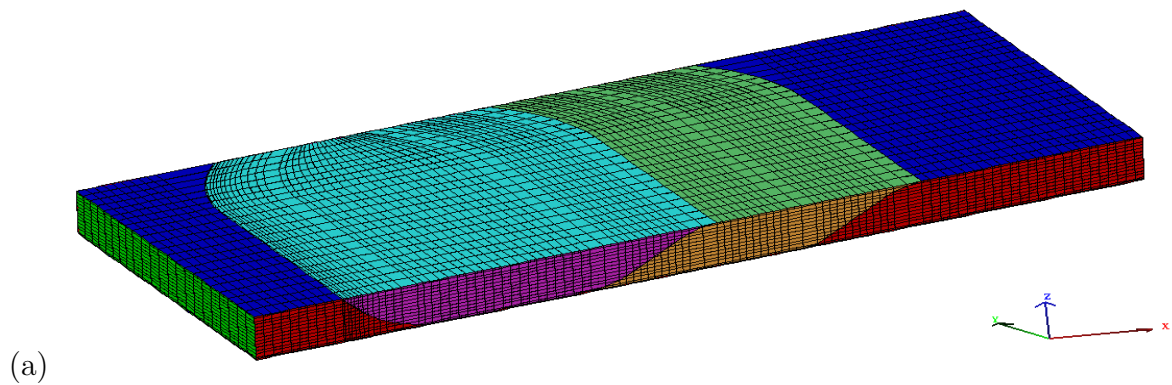


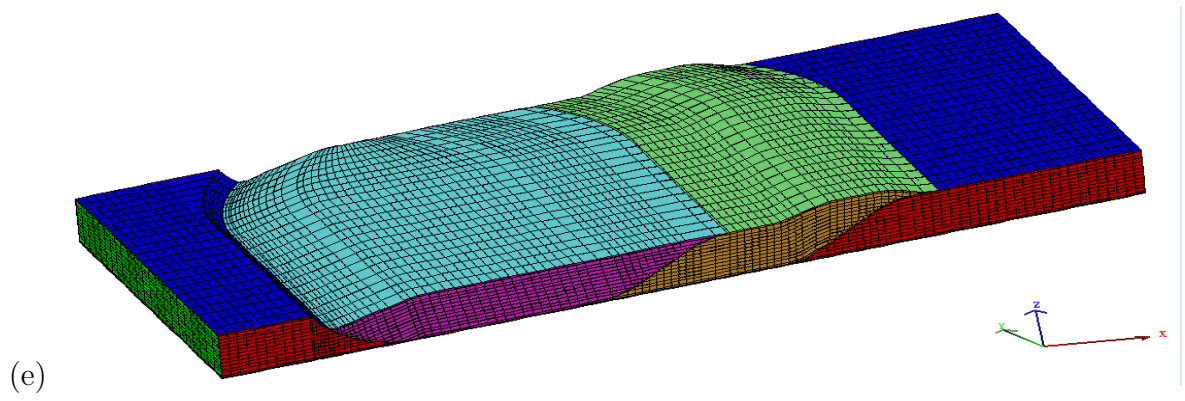
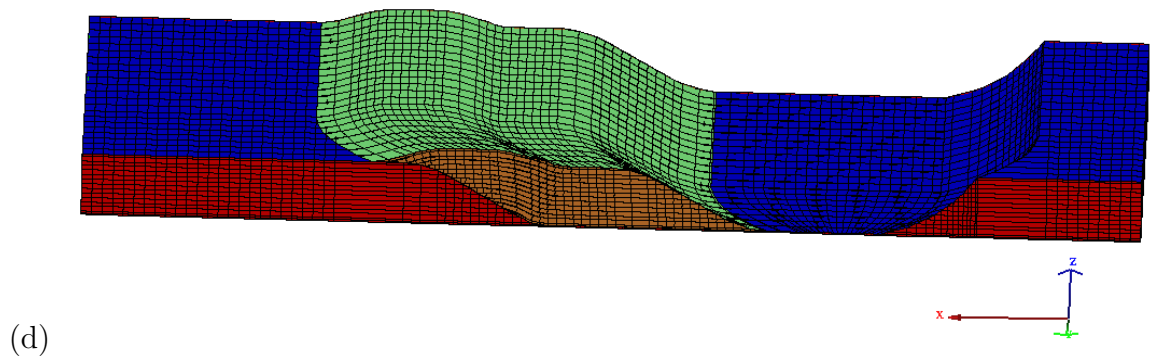
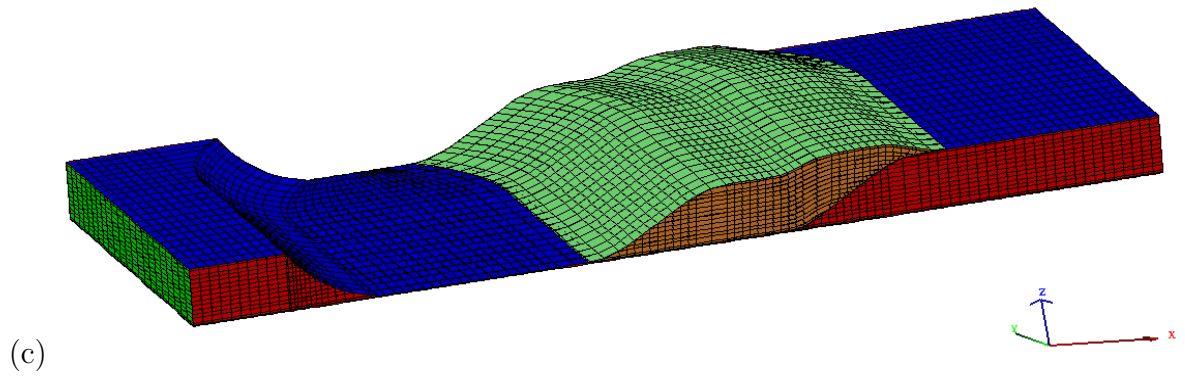
Fig. 3.34 – Arbre de déplacement des blocs les uns par rapport aux autres, (a) déplacement de l'écaïlle 1 sur le socle, (b) déplacement de l'écaïlle 2 sur l'ensemble socle plus écaïlle 1.

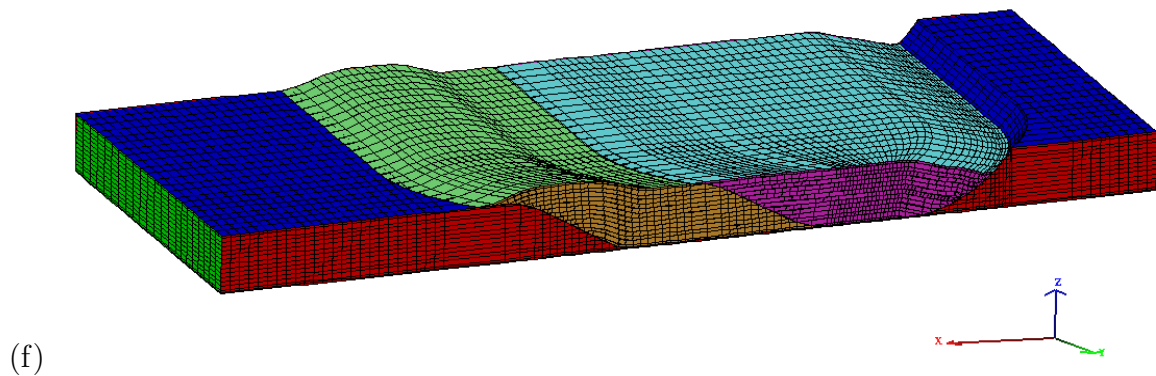
Dans un premier temps on considère un modèle à bord contraint latéral vertical, à la cote $y = 20400\text{ m}$, et un déplacement suivant l'axe X, on obtient les résultats qui sont présentés dans le paragraphe suivant (3.2.3.2).

3.2.3.2 Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec bord latéral vertical

Si un déplacement de 2000 m suivant l'axe X sur l'écaille 1, puis sur l'écaille 2 est appliqué en flexion, les résultats suivants sont observés (Fig. 3.35 (c), (d), (e) et (f)). La figure 3.35 (a) représente le bassin à l'état initial en vue de droite, la figure 3.35 (b) représente le bassin en vue de gauche. La figure 3.35 (c) représente le déplacement de l'écaille 1 sur le socle en vue de droite, la figure 3.35 (d) représente l'écaille 1 se déplaçant sur le socle mais en vue de gauche. Le déplacement des deux écailles est représenté sur les figures 3.35 (e) vue de droite du bassin et 3.35 (f) vue de gauche du bassin.







(f)
 Fig. 3.35 – Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) vue de droite, (b) vue de gauche, après un déplacement de 2000 m suivant l'axe X, déplacement de l'écaille 1 sur le socle vue de droite (c), vue de gauche (d), déplacement des deux écailles sur le socle vue de droite (e), vue de gauche (f).

La dernière maille de chacune des écailles a une meilleure conservation volumique que celle calculée dans le paragraphe précédent (3.2.2.6). Les erreurs qui étaient des anomalies dans ce paragraphe ont été résolues. Pour reconstruire l'arête de cette dernière maille à base triangulaire, la condition est que la dernière arête verticale non nulle de la couche soit reconstruite avec pour point bas la première arête d'épaisseur nulle de la couche inférieure (Fig. 3.36). Cette condition améliore la conservation volumique de la dernière maille de chaque couche de chaque bloc.

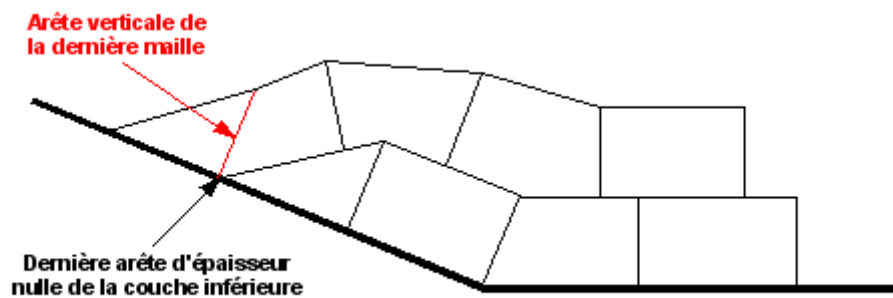
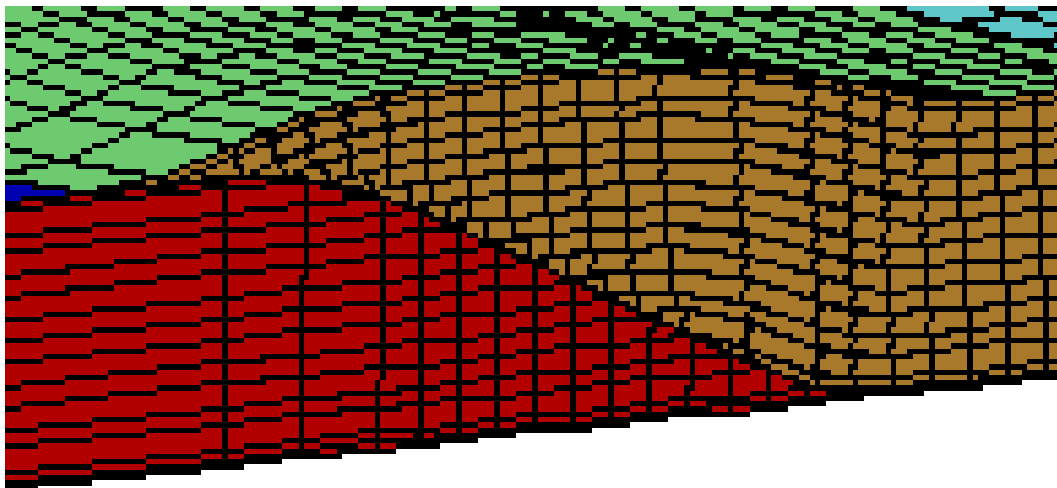


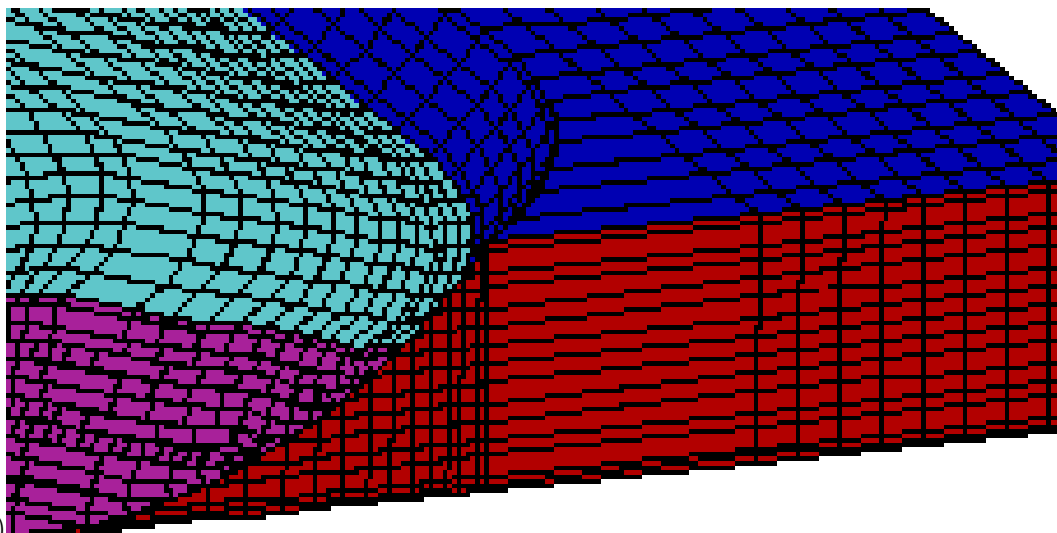
Fig. 3.36 – Condition de reconstruction de l'arête verticale d'un élément à base triangulaire

Dans le cas d'un champ de déplacement unidirectionnel selon l'axe X et avec un bord contraint vertical parallèle au déplacement, il n'y a pas d'expulsion latérale, ce que l'on peut observer sur les zooms suivants (Fig. 3.37 (a) et (b)). La figure 3.37

(a) est un zoom de la formation des plis de chevauchement sur la faille inverse. La figure 3.37 (b) montre plus précisément le glissement parfait sur la faille normale.



(a)



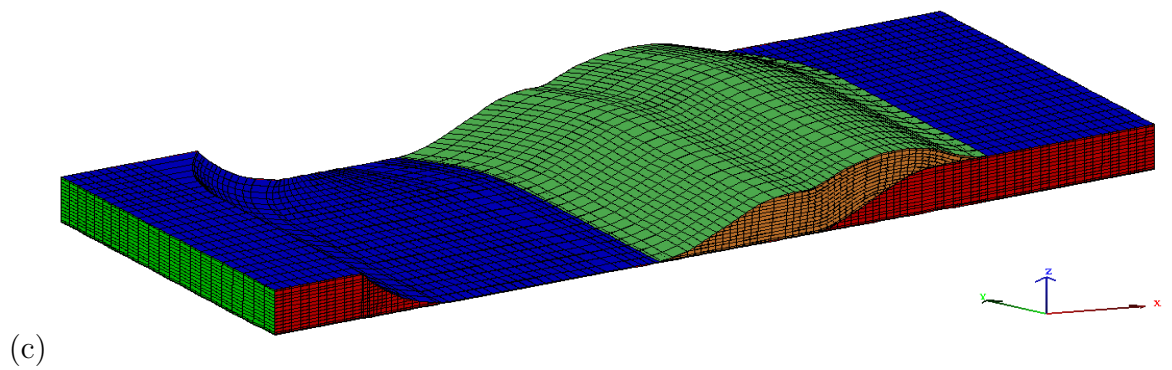
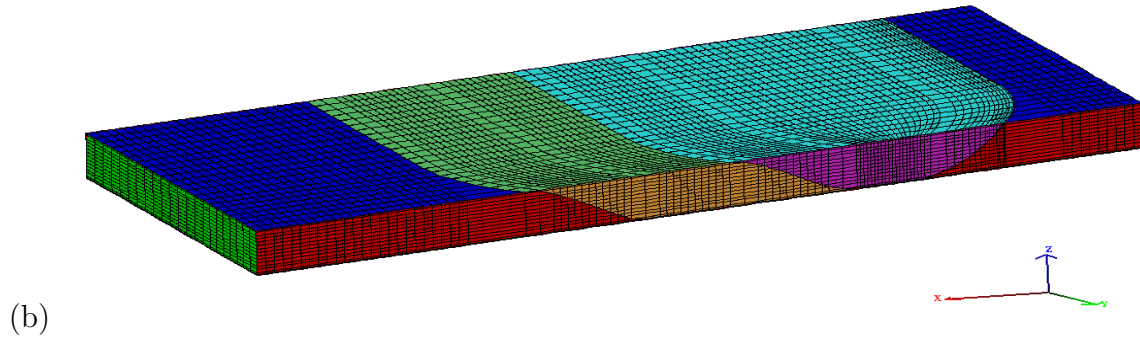
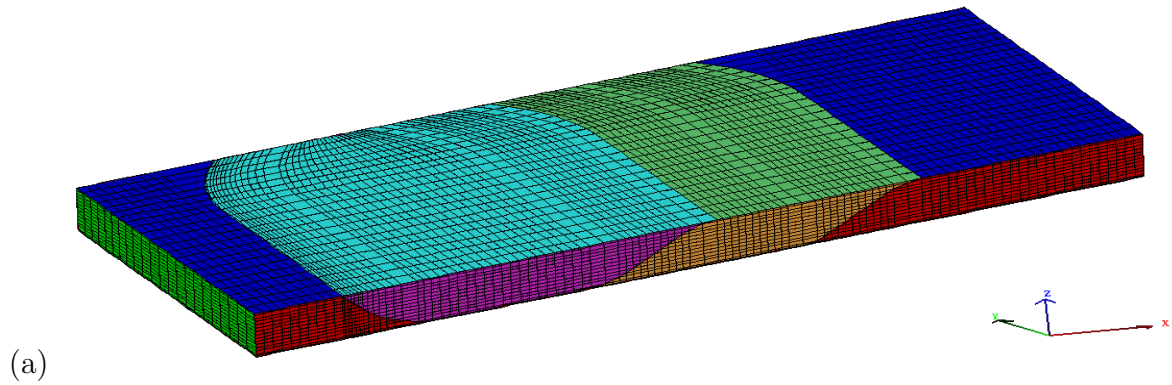
(b)

Fig. 3.37 – Zoom du modèle au niveau du pli et de la faille inverse (a) après un déplacement de 2000 m , zoom de la faille au niveau du glissement le long de la faille normale (b).

Si un déplacement de 3000 m suivant l'axe X est appliqué au modèle, les résultats suivants sont obtenus (Fig. 3.38 (c), (d), (e) et (f)). La figure 3.38 (a) représente le

CHAPITRE 3. LA DÉFORMATION DES ÉCAILLES

bassin à l'état initial en vue de droite, la figure 3.38 (b) représente le bassin en vue de gauche. La figure 3.38 (c) représente le déplacement de l'écaille 1 sur le socle en vue de droite, la figure 3.38 (d) représente l'écaille 1 se déplaçant sur le socle mais en vue de gauche. Le déplacement des deux écailles est représenté sur les figures 3.38 (e) vue de droite du bassin et 3.38 (f) vue de gauche du bassin.



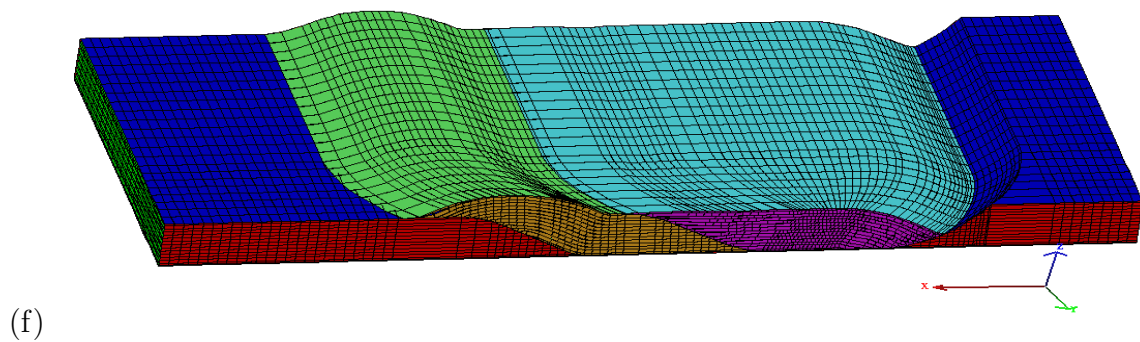
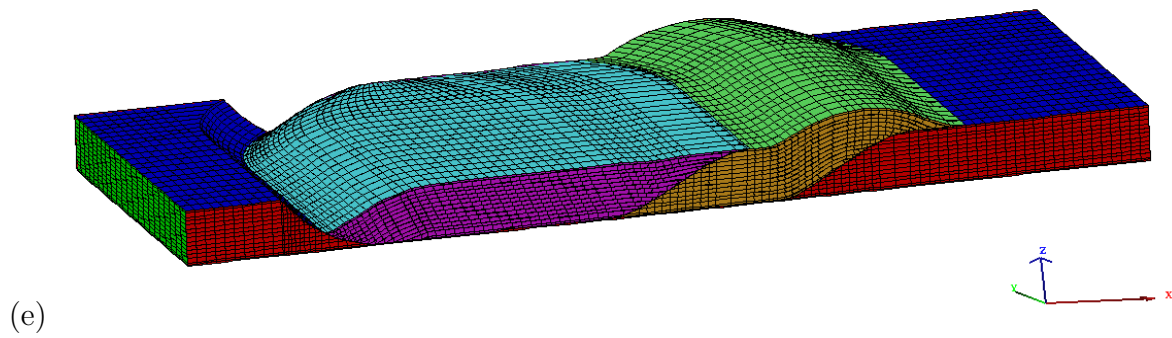
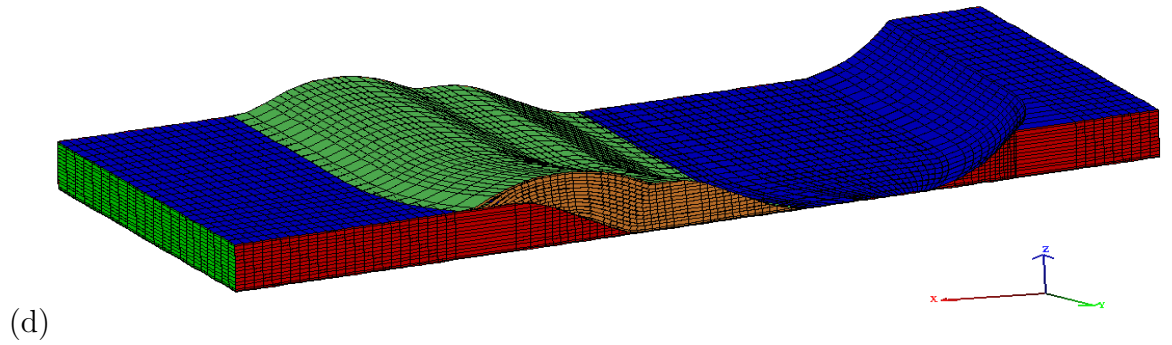


Fig. 3.38 – Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs avant déplacement (a) vue de droite, (b) vue de gauche, après un déplacement de 3000 *m* suivant l'axe X, déplacement de l'écaïlle 1 sur le socle vue de droite (c), vue de gauche (d), déplacement des deux écailles sur le socle vue de droite (e), vue de gauche (f).

Dans le cas d'un champ de déplacement unidirectionnel selon l'axe X et avec un bord contraint vertical parallèle au déplacement, il n'y a pas d'expulsion latérale. Les zooms suivants montrent la formation du pli sur la faille inverse (Fig. 3.39 (a)) et le glissement parfait le long de la faille normale (Fig. 3.39 (b)) dans le cadre d'un modèle non cylindrique.

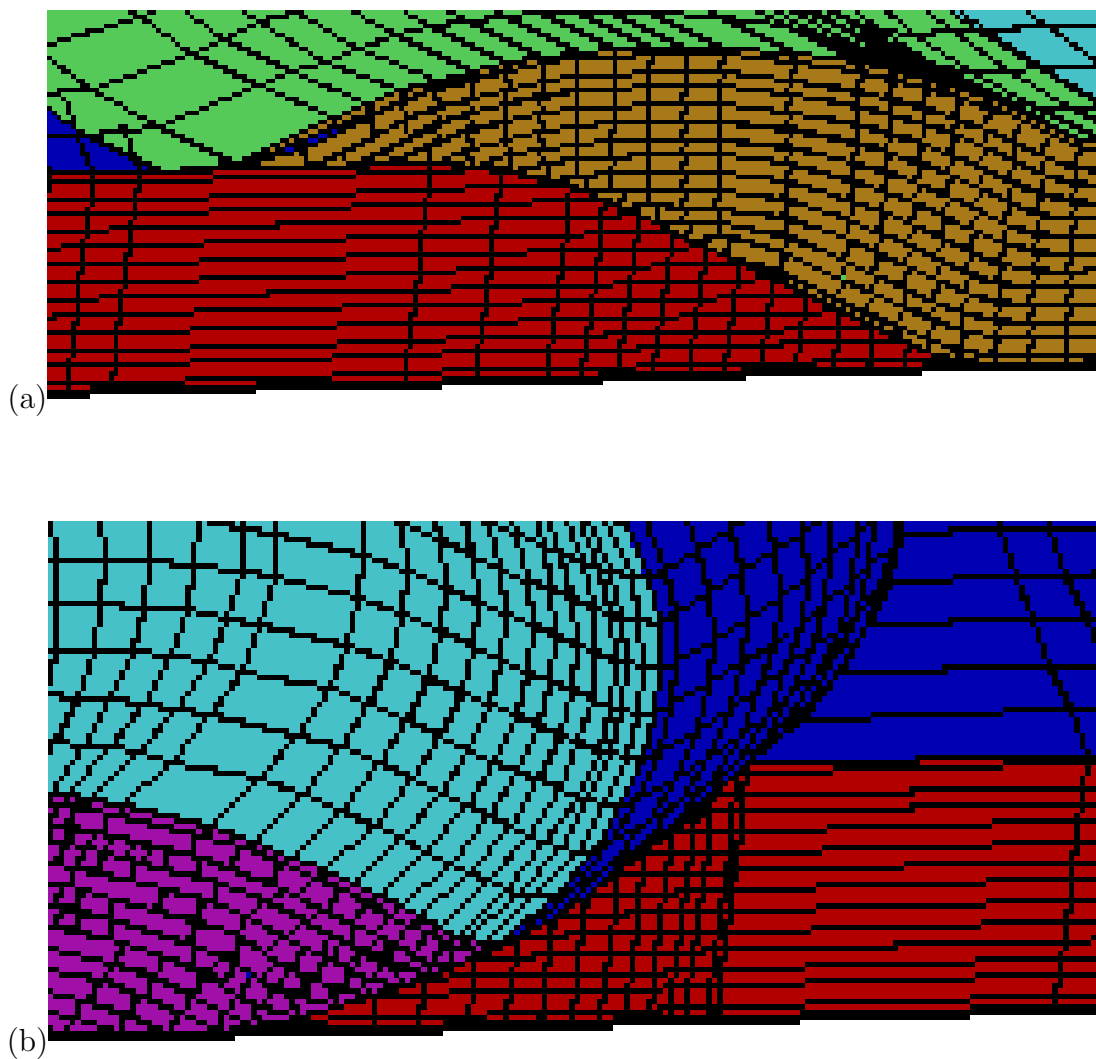


Fig. 3.39 – Zoom du modèle au niveau du pli et de la faille inverse (a) après un déplacement de 3000 m , zoom de la faille au niveau du glissement le long de la faille normale (b).

Si un déplacement de 2000 m suivant l'axe X est appliqué à l'écaille 1 et un déplacement de 3000 m suivant l'axe X les résultats suivants sont obtenus (Fig. 3.40 (a)) puis avec un déplacement de 3800 m suivant l'axe X (Fig. 3.40 (b)). Il est possible d'appliquer une valeur de déplacement différente à chacun des blocs déplacés.

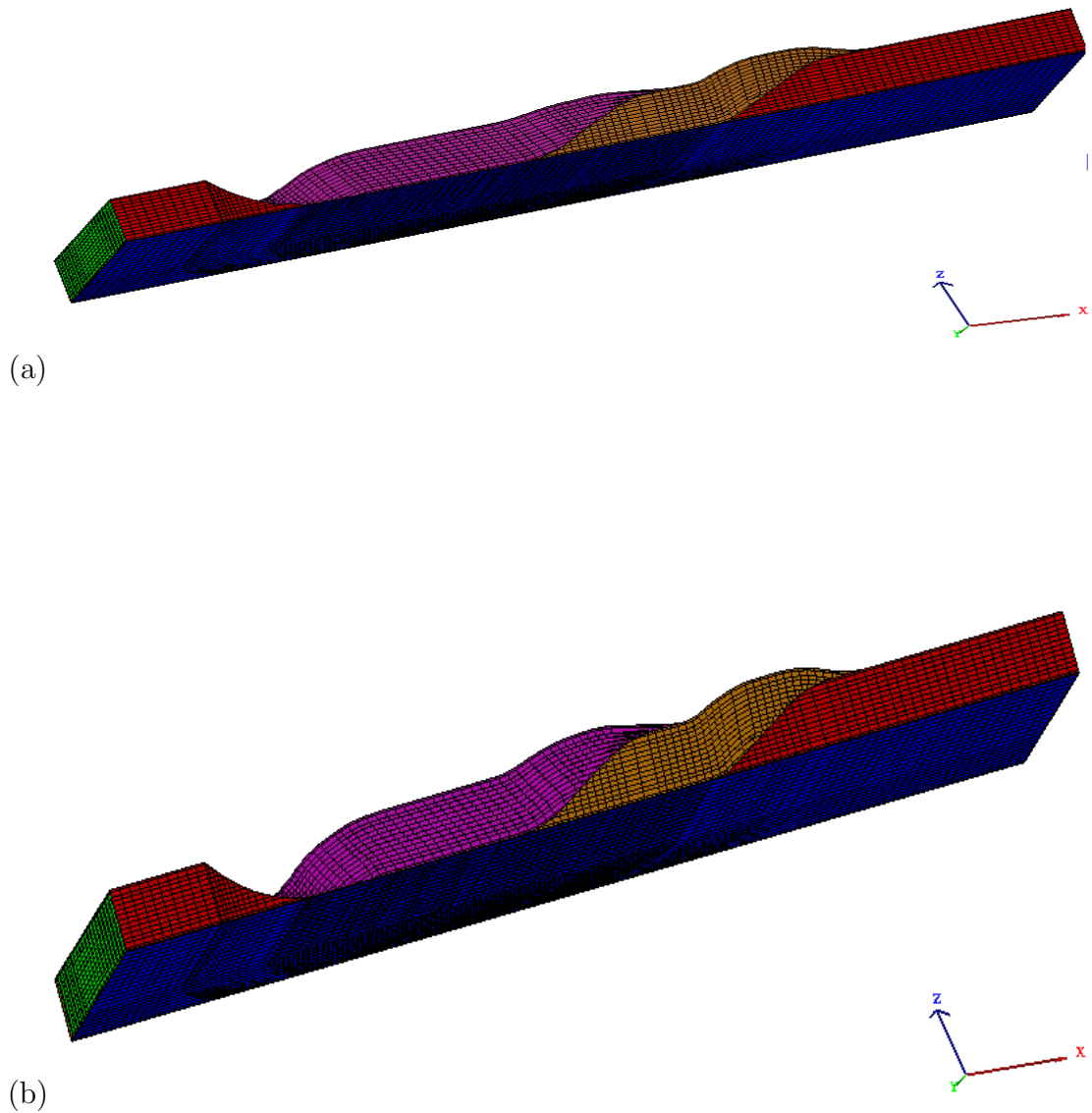


Fig. 3.40 – Présentation du modèle non cylindrique à 3 blocs après un déplacement de 2000 m suivant l'axe X pour l'écaille 1 et 3000 m suivant l'axe X pour l'écaille 2 (a), après un déplacement identique pour l'écaille 1 et un vecteur déplacement de 3800 m suivant l'axe X pour l'écaille 2 (b).

Les résultats obtenus en mode direct de déplacement en flexion sont satisfaisants, il y a une variation volumique élémentaire inférieure à 14% sur les deux blocs déplacés. Les erreurs de variation de volumique élémentaire pour la dernière maille de chaque couche sont maintenant résolues, grâce à la condition supplémentaire appliquée à la dernière arête verticale de chaque couche.

3.2.3.3 Validation du déplacement en flexion sur le modèle avec le bord contraint incliné

Il y a eu des essais de modélisation pour le déplacement des deux écailles le long d'une faille décrochante inclinée ; mais l'implémentation du déplacement le long du bord contraint quelconque avec un déplacement en flexion est à revoir (Fig. 3.41).

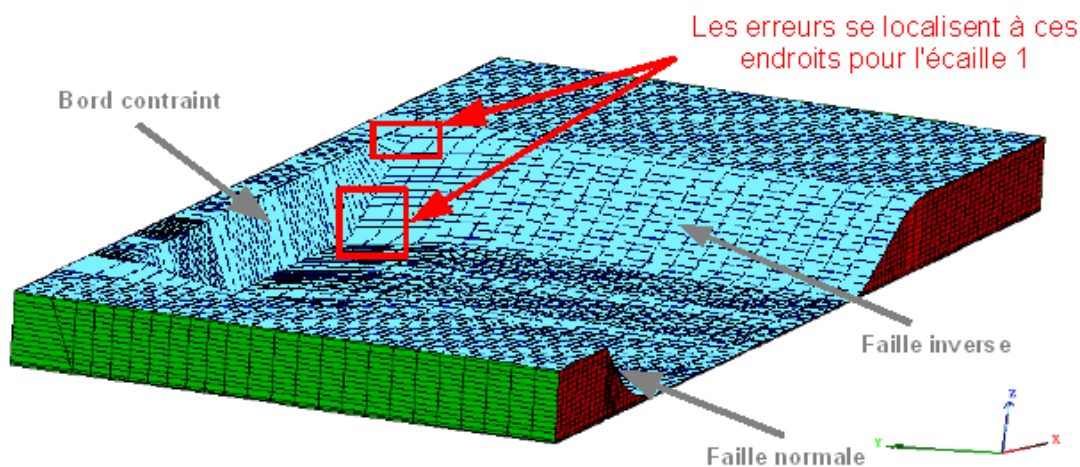


Fig. 3.41 – Socle du modèle 3D non cylindrique avec définition des endroits où surviennent les erreurs de déplacement de l'écaille 1.

Lorsque le bord contraint est incliné, il n'est pas possible dans l'implémentation actuelle de vérifier à la fois la perpendicularité au support de glissement et le fait d'avoir des éléments de la couche qui restent collés au bord contraint latéral.

Une idée est de ne pas implémenter la perpendicularité des arêtes mais la conservation des épaisseurs des couches et reconstruire sur cette hypothèse les hexaèdres. Les hexaèdres reconstruits vérifient dans ce cas les contraintes suivantes :

- les facettes des hexaèdres le long du support de glissement restent « collées » le long du support de glissement.
- Les facettes des hexaèdres le long du bord contraint restent « collées » le long de ce bord.
- A partir de ces deux contraintes sur les facettes, la conservation des épaisseurs et la conservation volumique imposent la construction des autres facettes des hexaèdres pour les éléments de la couche.

3.3 Discussion générale et Conclusion

En conclusion, le principal objectif de cette thèse a été atteint : il s'agit de l'obtention d'un modèle 3D multiblocs pour la déformation réversible des bassins sédimentaires.

La modélisation de la déformation que nous avons proposée dans ce mémoire de thèse représente une avancée significative dans la modélisation cinématique de bassin. Cette avancée consiste en la prise en compte de plusieurs blocs lors de la cinématique. Plusieurs cas multiblocs ont été implémentés, le premier cylindrique avec un duplex, et le second avec des failles listriques et courbes.

Dans cette thèse, un des points forts a été de démontrer que l'on pouvait déformé en 3D un bassin sédimentaire décrit par plusieurs blocs faillés, dans différents types de contexte, aussi bien compressif qu'extensif.

Par ailleurs deux modes de déformation sont utilisés pour décrire le comportement des roches, le cisaillement vertical et la flexion, ce qui permet de diversifier les études.

La méthodologie permet de choisir une représentation maillée des bassins à l'échelle voulue.

Un autre aspect essentiel de ce modèle est la réversibilité de l'algorithme de déformation qui fait de lui un outil parfaitement adapté à la modélisation de bassin car il permet de couvrir potentiellement aussi bien l'étape de restauration que l'étape de déformation.

Une difficulté dans la représentation des maillages de bassin est la prise en compte du non croisement des arêtes dans le cas d'un déplacement en flexion.

- En conclusion, il y a aussi des voies d'amélioration pour le prototype qui sont :
- la validation sur un nombre plus important de blocs (plus de trois blocs),
 - la prise en compte de bords latéraux non verticaux (section 3.2.3.3).

Chapitre 4

Conclusion et perspectives

Les résultats des chapitres précédents ont montré le nombre d'avancées acquises pour la déformation cinématique des bassins en 3D.

Des voies d'amélioration pour le développement du prototype sont possibles, on peut envisager :

- la prise en compte de bords contraints latéraux non verticaux,
- la validation de la méthodologie sur des modèles de complexité croissante,
- la prise en compte d'une direction de déplacement quelconque,
- la prise en compte de mécanisme géologique de sédimentation tel que la compaction,
- la prise en compte de critère géométrique supplémentaire comme la développabilité pour les couches (THIBERT[19],2003) pour assurer une meilleure cohérence géométrique du modèle de bassin.

Par ailleurs, les approches géomécaniques qui se développent en modélisation de bassin ((MORETTI[11], 2006) et (MAERTEN[10], 2004)) viennent en complément des approches géométriques. Ces approches basées sur des maillages représentés par des tétraèdres semblent bien adaptées pour résoudre le problème de la restauration, alors que l'approche géométrique basée sur des hexaèdres est bien adaptée au problème direct de la modélisation de bassin. Le couplage des deux approches semble être le bon compromis pour résoudre à la fois le problème inverse sur la cohérence géométrique dans le temps avec le problème direct qui cherche à résoudre le problème de la circulation des fluides.

Dans les perspectives à court terme, l'IFP est en train de développer la nouvelle génération d'outil logiciel en modélisation de bassin 3D en tectonique complexe.

CHAPITRE 4. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Dans ce cadre, l'IFP développe un nouveau simulateur ArcTem. Les différents résultats de cette thèse sont utilisés comme cas d'applications de ce nouveau simulateur, notamment le dernier modèle avec la faille normale et inverse. Ceci est une bonne illustration des possibilités de ce type d'approche cinématique en 3D pour la modélisation des transferts dans les bassins plissés et faillés.

Bibliographie

- [1] CONTRERAS J. et SUTER M., *Kinematic modelling of cross sectional deformation sequences by computer simulation. In Journal of Geophysics Research*, Vol. 95, n°13, p 21913-21929, (1990).
- [2] CORNU T., *Modélisation cinématique discrète de la déformation 3D des bassins sédimentaires*. thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, (2001).
- [3] CORNU T., SCHNEIDER F., GRATIER J.P., *3D kinematic modeling of sedimentary basin deformation. In : New insight into structural interpretation and modeling*, D. Newland. editor, J. Geol. Soc. Lond. spec. publ. Vol.212, p. 275-283, (2003).
- [4] CORNU T., SCHNEIDER F., GRATIER J.P., *3D discrete kinematic modeling applied to extensional and compressional tectonics. In : New insight into structural interpretation and modeling*, D. Newland. editor, J. Geol. Soc. Lond. spec. publ. Vol.212, p. 285-294 (2003).
- [5] DARBOUX G., *Principes de géométrie analytique*, Paris, Gautier-Villars, (1917).
- [6] DIVIES R., *Un modèle cinématique de bassins sédimentaires par éléments discrets associant plis, failles, érosion/ sédimentation et compaction*. thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, (1997).
- [7] GALERA C., BENNIS C., MORETTI I., et MALLET J.L., *Construction of coherent 3D geological blocks. In : Computer & Geosciences*, Vol. 29, p. 971-984, (2003).
- [8] GRATIER J.P., GUILLIER A., et al., *Restoration and balance of folded and faulted surface by test-fitting of finite elements : principles and applications. In : Journal of Structural Geology* Vol. 13, n°1, p. 111-115, (1993).
- [9] MAERTEN L., POLLARD D., MAERTEN F., *Digital mapping of three-dimensional structures of Chimney Rock fault system, central Utah. In : Journal of Structural Geology*, Vol. 23, p. 585-592, (2001).
- [10] MAERTEN F. et MAERTEN L., *3-D Geomechanical Techniques to Better Characterizing Complex Structural Models : (i) Slip Inversion and (ii) Restoration. In : American Association of Petroleum Geologists Annual Convention*, Vol. 13, p. A90, (2004).

BIBLIOGRAPHIE

- [11] MORETTI I., LEPAGE F., et GUITON M., *KINE3D : a new 3D restoration method based on a mixed approach linking geometry and geomechanics*. In : *Oil & Gas Science and Technology-Rev.IFP* Vol. 61, p. 277-289, (2006).
- [12] RENARD F., VOISIN C., MARSAN D., SCHMITTBUHL J., *High resolution 3D laser scanner measurements of a strike-slip fault quantify its morphological anisotropy at all scales* Vol. 33, (2006).
- [13] ROWAN M. G., JACKSON M. P. A., et TRUDGILL B. D., *Salt-related fault families and fault welds in the northern gulf of mexico*. In : *Am. Ass. Petr. Geol. Bull.*, Vol 83, p. 1454-1484, (1999).
- [14] SAMSON P., *Équilibrage de structures géologiques 3D dans le cadre du projet GOCAD*, thèse de doctorat, INPL, Université de Nancy (1996).
- [15] SUPPE J., *Geometry and kinematics of fault-bend folding*. In : *American Journal of Sciences*, Vol. 283,n°7, p. 684-721, (1983).
- [16] THIBAUT M., *Géométrie des surfaces de faille et dépliage 3D (méthodes et applications)*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble, (1994).
- [17] THIBAUT M., GRATIER J.-P., LEGER M. et MORVAN J.M., *An inversion method for determining three-dimensional fault geometry with thread criterion : application to strike-slip and thrust faults (Western Alps and California)*. In : *Journal of Structural Geology*, Vol. 18,n°9, p. 1127-1138, (1996).
- [18] THIBAUT M., GRATIER J-P, LEGER M. et MORVAN J.M., *Least-squares optimization of fault surfaces using the rigid block approximation*. In : *Journal of Structural Geology*, Vol. 19, p. 735-743, (1997).
- [19] THIBERT B., *Sur l'approximation géométrique d'une surface lisse. Applications en géologie structurale*, thèse de doctorat, Université C. Bernard Lyon, (2003).