CR 2004-04

Modélisation des paléocontraintes et des paléopressions le long de la faille Porcupine-Destor - implication pour la formation de bassins sédimentaires, d'intrusions et de minéralisations aurifères, projet 2003-03

Documents complémentaires

Additional Files





Licence



License

Cette première page a été ajoutée au document et ne fait pas partie du rapport tel que soumis par les auteurs.

Ressources naturelles et Forêts
Québec

Modélisation des paléocontraintes et des paléopressions le long de la Faille Porcupine-Destor

Implication pour la formation de bassins sédimentaires, d'intrusions et de minéralisations aurifères

PROJET 2003-03

PAR : STÉPHANE FAURE
ET SILVAIN RAFINI

AVRIL 2004

CONSOREM
Consortium de recherche en exploration minérale

AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics pour le bénéfice de l'ensemble de la communauté géologique, ceci après la période de confidentialité prévue aux règlements généraux du CONSOREM.

Bien que ce document ait subi un processus d'évaluation interne, des erreurs ou omissions peuvent s'y retrouver et seul CONSOREM en assume la responsabilité.

Le contenu du document demeure la propriété de son auteur et du CONSOREM et peut être reproduit en totalité ou en partie à des fins non- commerciales en citant la référence suivante :

Faure, S. et Rafini, S. 2004. Modélisation des paléocontraintes et des paléopressions le long de la Faille Porcupine-Destor : Implication pour la formation de bassins sédimentaires, d'intrusions et de minéralisations aurifères. Rapport du projet CONSOREM 2003-03, 47 p.

Toutefois, la reproduction multiple de ce document, en tout ou en partie, pour diffusion à des fins commerciales est interdite, sauf avec la permission écrite de CONSOREM.

CONSOREM

Université du Québec à Chicoutimi
555, boulevard de l'Université
Chicoutimi, QC, G7H 2B1

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

Courriel : consorem@uqac.ca
Site Web: www.consorem.ca

RÉSUMÉ

Les paléopressions tectoniques sur la portion québécoise de la Faille Porcupine – Destor – Manneville (FPDM) ont été reconstituées avec le modeleur géomécanique UDEC. Ce logiciel utilise un code numérique aux éléments distincts qui permet de simuler en 2D la déformation d'un modèle géologique composé de plusieurs polygones, les limites entre ces polygones étant des contacts ou des failles.. .

Quatre modèles théoriques sont présentés dans la première partie. Trois blocs modèles servent à comprendre les effets de courbure d'une faille sur les variations de pressions et de contraintes. Ces modèles comportent deux polygones et une discontinuité courbe (faille). Selon ces trois blocs modèles, le plus grand contraste de pressions est situé au niveau du point d'inflexion de la faille. La distance et le contraste entre les faibles et fortes pressions (gradient) augmentent avec l'obliquité de la faille par rapport à la contrainte principale imposée aux limites du modèle. Ces résultats donnent des guides d'exploration applicables le long de structures courbes.

Le quatrième modèle théorique permet de mieux comprendre le mode de formation de bassins sédimentaires de type Timiskaming (région de Duparquet) et la mise en place d'intrusions et de minéralisations le long de la FPDM et des failles subsidiaires. Ce bloc modèle est construit à partir de la plus simple expression géométrique des principaux éléments géologiques contrôlant la minéralisation aurifère orogénique : bassins, intrusions et failles de 1er et 2e ordre. Dans ce modèle, les variations de pressions et les vitesses et importances relatives des déplacements le long des failles conduisent à proposer un nouveau mécanisme de formation de bassins sédimentaires. Ce modèle prédit également la position actuelle de la syénite de Beattie à Duparquet.

La modélisation à l'échelle régionale est centrée sur la FPDM et couvre le territoire compris entre la frontière Québec-Ontario à l'ouest et le village de Destor à l'est. D'après les résultats obtenus avec UDEC sur cette modélisation, il est possible d'établir une corrélation spatiale entre des zones particulières de pression et les minéralisations aurifères connues. Les mines Beattie et Donchester (totalisant 87 t Au) sont situées au centre d'une vaste zone de basses pressions (100 à 170 Mpa) mesurant environ 10 x 13 km. La mine Yvan Vézina et la majorité des gîtes et des valeurs supérieures à 10 g/t Au sont situées dans des zones équivalentes à la pression lithostatique (130 Mpa) et où le gradient de pression est élevé. La mine Duquesne est située à la pointe d'une zone de pression élevée (200 MPa) de dimension kilométrique et entourée par un croissant de basses pressions s'étendant sur plusieurs kilomètres. La distribution des valeurs aurifères le long de la FPDM est assez erratique. Cependant, la tendance montre que les valeurs supérieures à 1 g/t sont situées dans des zones de plus faibles pressions.

Les valeurs du CO_2 et du H_2O normatifs calculées avec le logiciel Normat sont comparées en plan et en sections longitudinales avec les pressions calculées dans le modèle régional. Le CO_2 normatif calculé, un indicateur de l'intensité d'altération en carbonate, se comporte à l'inverse des pressions. Les valeurs de CO_2 supérieures à 5% montrent une bonne corrélation spatiale avec les zones de basses pressions. Cette relation établit un lien direct entre pressions tectoniques et altération hydrothermale en carbonate. Le H_2O normatif est une indication de la présence de minéraux hydratés et métamorphiques. Le H_2O calculé montre un comportement similaire à celui des pressions. Les zones de fortes pressions ont un contenu en H_2O normatif de ±3%, alors que dans les zones de faibles pressions, les valeurs sont de ±1%. Cette relation s'explique par le fait que les minéraux métamorphiques sont plus abondants et/ou ont été préservés de l'altération en carbonate dans les zones de fortes pressions.

En se basant sur des signatures de paléopressions similaires à celles identifiées autour des mines Beattie et Donchester et de plusieurs gîtes aurifères, les secteurs favorables pour l'exploration le long de la FPDM sont : la zone comprise entre les gîtes Zone 71 et Nemrod, Lac Duparquet (baie NO), secteur de Touriet, la zone comprise entre la Zone Fox et la Mine Duquesne, et la partie sud-est du gîte Double-Strike.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT i
Résumé ii
Table des matières iii
Liste des figures iii
Liste des tableaux v
1 Introduction 1
2 Travaux antérieurs 2
3 Problématique et objectifs 2
4 Géologie régionale 2
4.1 Géologie structurale 3
5 Minéralisations le long de la FPDM 4
5.1 Minéralisations aurifères à contrôles structuraux 4
5.2 Minéralisations aurifères liées aux syénites 4
6 Méthodologie 5
7 Le modeleur géomécanique UDEC 5
7.1 Notions sur le modeleur UDEC 5
7.2 Paramètres de déformation 6
7.3 Rappel géomécanique 6
8 Modélisation de cas théoriques 7
8.1 Éléments de géométrie et de géologie favorables 7
8.2 Construction des modèles théoriques 7
8.3 Champs de contraintes 8
8.4 Implication pour l'exploration 8
8.5 Formation de bassins sédimentaires et mise en place de plutons 8
8.6 Conclusion sur la modélisation théorique 9
9 Application à la portion québécoise de la FPD 10
9.1 Paramétrage des polygones 10
9.2 Paramétrage des contacts 11
9.3 Hiérarchisation des discontinuités 12
9.4 Conditions aux limites du modèle 12
9.5 Conditions *in situ* 12
9.6 Test de validation 13
10 Résultats 13
10.1 Variations de pressions le long de la FPDM 13
10.2 Localisation du bassin de Duparquet et de la syénite de Beattie 14
10.3 Pressions et distribution de l'or 14
10.4 Hydrothermalisme et pressions 15
10.5 Secteurs cibles pour l'exploration de l'or 15
11 Conclusions 16
Remerciements 17
Références 18
ANNEXE 1: Paramètres géomécaniques 21
Cahier de figures 24

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Zonalité régionale $\delta^{18}O_{quartz}$ des filons à quartz-tourmaline-carbonates. 24
Figure 2. Halos d'altération dans la région de Timmins 24
Figure 3. Distribution du CO_2 en surface dans la région de Timmins 25

Figure 4. Variations de pressions de fluides dans deux contextes. 25
Figure 5. Localisation des modélisations réalisées avec UDEC par le Consorem depuis 2001 dans la Sous-province d'Abitibi 26
Figure 6. Carte régionale de l'Abitibi montrant les principaux camps miniers. 26
Figure 7. Géologie le long de la FPDM.. 27
Figure 8. Étapes de la déformation progressive dans les zones volcaniques nord et sud selon 28
Figure 9. Étapes de déformation dans le secteur de Duparquet 29
Figure 10. Relation structurale montrant la schistosité recoupant la trace axiale du synclinal de Lépine 30
Figure 11. A) Basaltes en bordure de la FPDM montrant l'hétérogénéité de la déformation dans le forage POR03-131, secteur Nemrod. B) Roches ultramafiques au cœur de la FPDM dans le forage POR03-131, secteur Nemrod 30
Figure 12. Localisation des mines (carrés) et de quelques indices (triangles) le long de la FPDM 31
Figure 13. Exemples d'indices minéralisés à contrôles structuraux plaqués le long de la FPDM 32
Figure 14. Modèle synthétique résumant l'emplacement de différentes minéralisations aurifères associées à des syénites en Abitibi 33
Figure 15. Relations entre les contraintes principales et les axes de la déformation finie pour des comportements en cisaillement pure et simple 33
Figure 16. Éléments géométriques et géologiques favorables pour les minéralisations le long de la FPDM 34
Figure 17. Paramètres de construction pour les trois modèles théoriques 34
Figure 18. Disposition des trois blocs modèles utilisés 34
Figure 19. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 10°. 35
Figure 20. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 20°. 35
Figure 21. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 30°. 36
Figure 22. Diagrammes montrant l'effet de l'angle α sur le différentiel de pression et la distance entre les zones de faibles et de fortes pressions le long de failles modélisées pour trois blocs modèles 36
Figure 23. Modèles de bassins sédimentaires de type pull-apart 37
Figure 24. Modélisation à 1800 cycles de déformation des régions en tension pour un angle α de A) 10°, B) 20° et C) 30° 37
Figure 25. Graphique montrant l'augmentation de l'aire en tension dans les modèles avec un angle α de 10°, 20° et 30° 37
Figure 26. A) éléments géométriques prédominants de la géologie du bassin de Duparquet, FPDM en trait rouge continu et failles subsidiaires en tirets rouges. B) modèle théorique proposé et inspiré de la géologie en A avec un angle α de 20° pour la faille ductile 38
Figure 27. Modélisation à 1300 cycles de déformation incrémentale montrant les zones de fortes pressions (couleurs chaudes) et faibles pressions (couleurs froides) 38
Figure 28. Modélisation à 1300 cycles de déformation incrémentale montrant 39
Figure 29. Étapes de formation de bassins sédimentaires inspirées de la simulation avec UDEC 39
Figure 30. Modèle conceptuel pour le développement de la Mer morte 40

Figure 31. Carte géologique modélisée dans UDEC avec les différentes unités lithologiques utilisées. 40
Figure 32. Carte des failles montrant la hiérarchie utilisée dans la modélisation avec UDEC 41
Figure 33. Effets d'une contrainte oblique (A) ou orthogonale (B) sur la distribution des pressions le long de la FPDM 41
Figure 34. Test de validation le long de la FPDM 42
Figure 35. Variations des contraintes maximales (σ1) modélisées le long de la FPDM 42
Figure 36. Contraintes minimales (σ2) et position des bassins sédimentaires de Duparquet (contour et pointillé vert), des syénites (rouge) et des porphyres de quartz-feldspath (rose). 43
Figure 37. Carte des pressions moyennes (σ1+σ2)/2 et distribution des minéralisations aurifères. 43
Figure 38. Cartes détaillées de la distribution des pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 par secteurs 44
Figure 39. Distribution des contraintes moyennes (σ1+ σ2)/2 en fonction des valeurs aurifères dans les forages (normalisées en Au en g/t par mètre). 45
Figure 40. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et la position des mines et des gîtes (en italique). 45
Figure 41. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et la position des indices aurifères 46
Figure 42. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et du CO_2 calculé.. 46
Figure 43. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+σ2)/2 et du H_2O calculé. 47
Figure 44. Diagrammes du tonnage d'or (production et réserves) par dépôt ou par groupe de dépôts versus les aires de pressions favorables pour la région de Val-d'Or, Malartic et Duparquet.. 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Paramètres géomécaniques des polygones modélisés 10
Tableau 2: Paramètres géomécaniques des contacts modélisés 11

1 INTRODUCTION

Les altérations, les minéralisations et les systèmes de veines sont des témoins du passage de fluides hydrothermaux dans la croûte. La dimension et l'intensité de l'altération dans les camps miniers aurifères montrent l'ampleur et l'importance des circulations hydrothermales à l'époque de la minéralisation. Les systèmes hydrothermaux associés aux minéralisations aurifères de type orogénique ont généralement une dimension plurikilométrique (Groves et al., 2000). Par exemple, le champ de veines à quartz-tourmaline-carbonate associé à la minéralisation aurifère dans la région de Val-d'Or a une dimension de 40 x 15 km (Robert, 1996). La signature régionale du $\delta^{18}O_{quartz}$ dans ces filons confirme l'étendue de l'événement hydrothermal (**figure 1**; Pitre, 2000). Le halo d'altération en chlorite-calcite de la région de Timmins est centré par rapport aux principales mines d'or de ce camp minier et fait environ 6 x 6 km (**figure 2**). Les plus grosses mines de ce camp, les mines McIntyre et Hollinger (1003 t Au), sont entourées d'un halo riche en CO_2 d'environ 1,5 x 3 km (**figure 3**; Hagemann et Cassidy, 2000).

La nature des systèmes hydrothermaux fossiles dépend de la source, du transport et de la précipitation des fluides. Les fluides minéralisés archéens ont une origine profonde et proviendraient de sources diverses (Ho et al., 1992). Il pourrait s'agir de fluides mantelliques (limite asthénosphère-lithosphère), métamorphiques ou magmatiques ou d'une combinaison des trois (Hodgson et Hamilton, 1989; Groves et al., 2000). Le transport et la précipitation des fluides dépendent des conditions physiques et chimiques du milieu. On ne connaît pas vraiment les distances parcourues par les fluides minéralisés depuis la source jusqu'à leur lieu de précipitation. Les distances de transport sont différentes selon les éléments considérés. Par exemple, le CO_2 d'origine mantellique a voyagé depuis une source profonde alors que certains éléments métalliques, ou une partie de ceux-ci, proviennent de régions plus superficielles comme dans les roches volcaniques encaissantes.

La pression ambiante du milieu lors du transport et de la précipitation des fluides minéralisés est un des éléments géodynamiques rarement invoqués dans les systèmes hydrothermaux. En effet, dans la plupart des modèles de mise en place de minéralisations aurifères, les contraintes tectoniques, particulièrement les pressions, ne sont pas considérées ou jouent un rôle marginal. Pourtant, on imagine facilement et instinctivement que les fluides auront tendance à migrer des zones de fortes pressions (expulsion) vers les zones de plus faibles pressions (succion). Ridley (1993) résume la dynamique entre la pression lithostatique et la pression des fluides à une échelle locale (faille) et régionale (**figure 4**). La baisse de pression, comme la chute de température, provoque communément une précipitation des minéraux.

Les Australiens ont été parmi les premiers à utiliser un modèle numérique aux éléments distincts pour calculer les paléopressions à l'échelle d'un camp minier (Oliver et al., 1990; Holyland, 1990). Ces auteurs ont montré que plusieurs mines d'or d'Australie se situent à l'intérieur de zones de faibles pressions tectoniques. Depuis le début des années 1990, plusieurs modélisations numériques ont montré le lien étroit qui existe entre la reconstruction des zones de faibles paléopressions et la minéralisation aurifère de type orogénique (Holyland et al., 1993; Holyland et Ojala, 1997; Carrier et al., 2000; Groves et al., 2000). C'est sur cette relation entre pressions tectoniques et minéralisations que s'appuie l'essentiel de cette étude.

Le modèle présenté dans ce rapport couvre la portion québécoise de la Faille Porcupine-Destor-Manneville (FPDM). Il vise à documenter les variations de pressions modélisées avec le logiciel UDEC (Universal Distinct Element Code; Lemos et al., 1985) et à établir le lien spatial entre celles-ci et les minéralisations aurifères, les intrusions et les bassins sédimentaires de type Timiskaming. Des guides d'exploration seront présentés à la lumière de modèles théoriques et géométriques simples. Finalement, des secteurs d'intérêt pour l'exploration de l'or de type orogénique seront présentés.

2 TRAVAUX ANTÉRIEURS

Ce projet est le quatrième volet de modélisation 2D des paléopressions effectué au CONSOREM depuis 2001 en Abitibi (**figure 5**). Le premier essai de modélisation avec le logiciel UDEC a été fait en plan sur une géométrie simple de la région de Val-d'Or. L'objectif de cet essai était d'évaluer le potentiel de cette approche et l'efficacité de la version éducationnelle du logiciel UDEC en Abitibi (Faure, 2001). En 2002, deux modèles ont été construits et testés avec la version professionnelle d'UDEC (**figure 5**). Le premier modèle couvrait la région de Malartic et Val-d'Or. Il visait à modéliser une géométrie complexe et à proposer des cibles d'exploration à une échelle régionale (Faure, 2002). Ce modèle a montré que les mines Sigma et Lamaque sont situées au cœur d'une zone de faibles pressions tectoniques, d'une dimension de 5 km x 7 km, et que la majorité des minéralisations aurifères de la région de Val-d'Or sont situées dans des zones de pressions sous-lithostatiques. L'utilité du logiciel a été démontrée à partir d'un autre modèle réalisé en 2002 sur une section à l'échelle de la mine Sigma (Faure et Rafini, 2002). Ce modèle a clairement montré la forte correspondance spatiale entre les zones de faibles pressions modélisées et les valeurs aurifères économiques, le jeu normal de certaines failles lors de la compression nord-sud et le développement de failles de type andersonien (*north* et *south dipper*).

3 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

La production aurifère de la FPDM (2526 t Au) en Abitibi est comparable à celle de la Faille de Cadillac – Larder Lake (FCLL; 2833 t Au). La FPDM est très prolifique avec 85 gisements (**figure 6**). Cependant, l'essentiel des mines et de la production est situé du côté de l'Ontario, principalement dans la région de Timmins. Du côté québécois de la FPDM, seulement quatre mines ont été en production pour un total de 107 t Au, ce qui représente un peu plus de 2% de la production d'or le long de cette faille. Par contre, sur une distance de 50 km de part et d'autre de la frontière provinciale Québec-Ontario, la quantité d'or produite et le nombre de mines sont sensiblement les mêmes.

La cinématique et la géométrie de la FPDM sont généralement bien documentées malgré une évolution structurale complexe de cette structure majeure (travaux de Daigneault et Mueller du côté québécois). Cependant, on ignore la distribution des paléocontraintes et des paléopressions générées au cours de la structuration finale de l'Abitibi. On connaît également peu de choses sur le rôle géométrique de la FPDM dans la formation de bassins sédimentaires et la mise en place de plutons et de minéralisations aurifères.

L'objectif de cette étude est de modéliser de façon numérique les paléopressions le long de la FPDM dans le but de proposer des cibles d'exploration. Cet outil de prédiction de paléopressions permet d'établir des relations spatiales entre les minéralisations aurifères et les zones de pressions favorables. Un autre objectif est de tester des modèles théoriques simples afin de mieux comprendre le mode de formation de bassins sédimentaires et la mise en place de minéralisations aurifères et de plutons syn-tectoniques le long de la FPDM.

4 GÉOLOGIE RÉGIONALE

La région étudiée chevauche les zones volcaniques nord et sud de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi (Chown et al., 1992). La FPDM sépare le Groupe de Stoughton-Roquemaure, au nord, du Groupe de Blake River, au sud. Le Groupe de Stoughton-Roquemaure, dont l'âge varie entre 2717 et 2713 Ma, est caractérisé par des plaines basaltiques d'affinité tholéiitique parsemées d'édifices mafiques, mafiques-felsiques, felsiques et localement de roches ultramafiques (Corfu, 1993; Chown et al., 1992). Le Groupe de Blake River est marqué par des basaltes tholéiitiques à la base (Formation d'Hébécourt) et, vers le sommet, par des séquences volcaniques bimodales (andésite/rhyolite) d'affinité calco-alcaline. Il comporte

plusieurs dépôts de sulfures massifs volcanogènes. L'environnement suggéré pour ce groupe est un arc volcanique dont l'âge varie entre 2703 et 2698 Ma (Dimroth et al., 1982; Mortensen, 1993).

Vers la fin de l'orogénie kénoréenne, deux séquences sédimentaires ont été déposées pendant l'accrétion des zones volcaniques nord et sud. Les sédiments du Groupe de Kewagama et de la Formation de Duparquet sont localisés le long de la FPDM et sont discordants par rapport aux unités volcaniques plissées. Du côté québécois, le Groupe de Kewagama se juxtapose au côté sud de la FPDM sous la forme de bandes allongées et déformées. La séquence sédimentaire, dont l'âge minimum est de 2683 Ma, se caractérise par des flyschs (graywacke et argilites) et se serait déposée dans un prisme d'accrétion (Mueller et Donaldson, 1992). La Formation de Duparquet est caractérisée par des sédiments alluviaux et fluviatiles de type Timiskaming (Mueller et al., 1991, 1996). Les séquences sédimentaires se sont mises en place entre 2689 et 2682 Ma dans des bassins de type *pull-apart* et ont été préservées dans des synclinaux serrés. Le bassin de Duparquet est le bassin principal de cette formation et mesure 15 x 1,5 km (**figure 7**). D'autres bassins de quelques centaines de mètres à 2 km de longueur se répartissent le long de la FPDM ou en bordures de failles subsidiaires à la FPDM. La majorité des dépôts aurifères sont associés dans le temps et l'espace à du magmatisme tardi-tectonique calco-alcalin et shoshonitique (Kerrich et Cassidy, 1994).

4.1 Géologie structurale

La déformation archéenne en Abitibi est caractérisée par une alternance de zones peu déformées et de couloirs de déformation délimitant différents ensembles volcaniques (Daigneault et Allard, 1990). La déformation dans les zones volcaniques nord et sud a évolué de manière diachronique (Mueller et al., 1996; Daigneault et al., 2003). La structuration de la zone volcanique nord a débuté plus tôt, vers 2700 Ma, par un raccourcissement N-S (**figure 8**). Cet épisode de déformation se caractérise par des plis, une schistosité régionale et des failles inverses orientées E-O. Pendant cette période, au sud, l'édification volcanique du Groupe de Blake River se poursuit. La déformation dans la zone volcanique sud commence vers 2695 Ma avec l'accrétion des zones volcaniques nord et sud. Le raccourcissement N-S engendre une collision arc-arc qui se traduit par du chevauchement et le développement d'une schistosité précoce orientée E-O (D1). Des plis isoclinaux se forment en bordure des blocs le long de la FPDM et de la FCLL. Un décrochement dextre prévaut pendant ce temps dans le domaine volcanique nord. De 2690 à 2661 Ma, l'ensemble de l'Abitibi est coincé dans un système de décrochement dextre avec, sporadiquement, des épisodes localisés de chevauchements dans la zone volcanique sud (Daigneault et al., 2003). Une série de bassins sédimentaires clastiques, dont la Formation de Duparquet, et des intrusions alcalines à calco-alcalines (porphyres et syénites) se mettent en place entre 2690 et 2670 Ma le long des grandes failles de décrochement (Mueller et al., 1996; Wilkinson et al., 1999).

La déformation (D2) dans les sédiments de la Formation de Duparquet se fait au cours d'un processus de déformation continue (Mueller et al. 1996 ; **figure 9**). L'amorce du plissement se fait dans les sédiments par subsidence. Par la suite, des plis disposés en échelons se développent en réponse à la composante de décrochement dextre de la FPDM en développant une faible schistosité de plan axial. Une deuxième schistosité (clivage) orientée ENE recoupant les plans axiaux des plis se forme par la suite sous un régime de contraintes orientées N340 (**figure 10**).

La déformation le long de la FPDM est hétérogène et montre une gamme de structures cassantes à ductiles. La FPDM s'observe en surface à quelques endroits du côté québécois, mais son expression est mieux documentée en continue le long de forages d'exploration. La **figure 11** montre le style structural des roches dans le couloir de déformation ductile-cassant. Les épontes de la FPDM sont marquées par une alternance de zones de faible déformation, généralement des unités compétentes (basaltes massifs ou coussinés, intrusions), et de zones de forte déformation caractérisées par des failles ductiles et anastomosées d'épaisseur métrique à décamétrique. Les failles se développent au contact des unités compétentes, dans des volcanoclastites, des sédiments ou des roches ultramafiques. Le cœur de la zone de faille est marqué par une foliation intense et une augmentation de l'activité hydrothermale sous forme d'altération en carbonate-séricite-talc-(albite) et de veines de quartz-carbonate.

5 MINÉRALISATIONS LE LONG DE LA FPDM

Quatre mines du côté québécois ont été en production entre 1933 et 1956 et entre 1983 et 1990. Il s'agit des mines Donchester (38,7 t Au), Beattie (38,8 t Au), Yvan Vézina (4,1 t Au) et Duquesne (1 t Au). À l'exception de la mine Yvan Vézina et de certains indices minéralisés, les minéralisations aurifères du secteur de Duparquet sont contrôlées par trois métallotectes : la FPDM, les intrusions de syénites et les porphyres à Qz-Fp et les basins sédimentaires de la Formation de Duparquet (**figure 12**). La majorité des indices et des gîtes aurifères, dont la mine Duquesne, sont localisés le long de la FPDM. Les deux plus grosses mines de la région (Beattie et Donchester) sont localisées le long d'une faille subsidiaire à la FPDM, la Faille Donchester. La minéralisation est située dans et au pourtour d'un complexe syénitique mesurant 4,3 x 0,6 km. D'autres gîtes situés le long de la FPDM et localisés entre les mines Donchester et Duquesne sont encaissés dans des porphyres à Qz-Fp (Touriet, Fox, Golconda) et des syénites (Central Duparquet). D'autres indices aurifères sont également situés dans et au pourtour du bassin sédimentaire de Duparquet. Globalement, on peut regrouper deux types de minéralisations aurifères : les minéralisations à contrôles structuraux et celles liées dans l'espace et le temps à des syénites.

5.1 Minéralisations aurifères à contrôles structuraux

Les minéralisations aurifères à contrôles structuraux se trouvent principalement dans la FPDM ou en bordure de celle-ci. La minéralisation est syn-tectonique D_1-D_2 et est contrôlée à la fois par des contrastes de compétence entre les différents types de roches et la chimie des encaissants (observations de Faure et Lei, Cambior). Les basaltes et les intrusions porphyriques, fracturés et injectés de veines de quartz-carbonates, sont généralement les hôtes de la minéralisation. Les roches ultramafiques, les unités volcanoclastiques et sédimentaires sont généralement cisaillées et très déformées entre les blocs volcaniques ou intrusifs compétents. Ces zones de déformation anastomosées sont peu minéralisées, dépassant rarement les 100 à 300 ppb Au.

La minéralisation aurifère est principalement observée dans des veines cisaillées de quartz-carbonates ou sous forme de stockwerks. Le contenu en sulfure est généralement inférieur à 5%. La pyrite est le sulfure dominant à l'échelle régionale avec, en second lieu, l'arsénopyrite (mine Beattie). L'altération en quartz – carbonate de fer – séricite – (albite) et un rapport Au/Ag >>1 caractérisent ce type de minéralisation (Legault et Goutier, 2003). Les zones 71, Nemrod, Touriet et Shaft sont des exemples de gîtes à contrôles structuraux (**figure 13**).

La mine Yvan Vézina est la seule mine située loin de la FPDM et présente des caractéristiques de minéralisations à contrôles structuraux. La zone minéralisée qui a été exploitée est un système métrique (1 à 10 m) de veines à quartz-carbonates-tourmaline dont l'enveloppe est globalement orientée NO-SE avec un pendage de ±45°SO (Laflèche et Gilbert, 1987). Les altérations associées sont dominées par une séricitisation et une carbonatation ainsi qu'un lessivage en Na_2O. La structure est limitée par des failles de même attitude et se serait formée durant la première phase de déformation (D1). Le système de veines dans l'enveloppe minéralisée est affecté par la déformation régionale D2 dont la contrainte principale aurait été orientée dans le cadran N-S, la contrainte intermédiaire dans le cadran E-O et la contrainte minimale sub-verticale.

5.2 Minéralisations aurifères liées aux syénites

Une revue de gîtes liés dans l'espace et le temps aux syénites est présentée par Robert (1997 et 2001). Ce type de minéralisation s'est mis en place entre les phases D1 et D2 et est considéré comme étant tardi-orogénique (~ 2680 Ma). Les corps minéralisés sont généralement groupés le long de failles majeures en association spatiale avec des sédiments alluviaux-fluviatiles de type Timiskaming et de petites intrusions polyphasées de monzonite/syénite (**figure 14**). La minéralisation de type remplacement

consiste en de la pyrite ± arsénopyrite fines et disséminées (<10%). Elle est intimement associée à des stockwerks à veinules de quartz – carbonate ± feldspath potassique. Les zones à sulfures disséminés sont larges (quelques mètres à 10 m), ce qui fait des exploitations à faibles teneurs (3-5 g/t Au) et à tonnage modéré.

En général, en Abitibi et dans la majorité des dépôts, la carbonatation et l'albitisation sont les altérations dominantes. L'altération potassique peut être également présente; le feldspath potassique caractérise dans plusieurs cas une altération proximale aux intrusions syénitiques ou située dans ces intrusions. La séricite peut se trouver dans différents endroits par rapport à la minéralisation ou d'autres types d'altération. La silicification est rarement observée à l'exception du camp de Malartic (Robert, 2001).

6 MÉTHODOLOGIE

La modélisation des paléocontraintes et des paléopressions de la région de Duparquet implique une série d'étapes depuis le choix d'une carte géologique jusqu'à la géométrie finale du modèle. La réalité géologique est souvent si complexe qu'il n'est ni pertinent ni numériquement solvable d'en donner une représentation stricte dans la modélisation. Une première approximation s'impose dans la schématisation de la géométrie réelle. Celle-ci nous amène à une réflexion préalable sur l'importance relative des différents objets géologiques dans le phénomène modélisé et par conséquent, à hiérarchiser les failles et fractures. Il faut même ignorer certaines failles qui semblent avoir un rôle secondaire et rassembler des unités géologiques dans la mesure du possible. Plus la géométrie est simple, mieux l'objectif de la modélisation est ciblé et plus le modèle risque de fonctionner et de donner des résultats probants.

Avant de modéliser les paléopressions le long de la FPDM, quatre modèles théoriques ont été bâtis afin de mieux comprendre les relations entre la géométrie d'une faille et l'allure du champ de pressions à proximité de celle-ci. Ces cas théoriques sont directement inspirés de la forme actuelle de la FPDM, mais la trace de la faille a été simplifiée et adoucie dans le but de diminuer les effets parasites des petites modulations le long de la faille.

Pour le modèle régional, la carte géologique choisie est une combinaison de l'interprétation de Cambior Inc. et des données SIGEOM (Legault et Goutier 2003). La carte géologique a été simplifiée afin de fermer certaines unités géologiques et faire abstraction de petits polygones. La géométrie constituée de polygones (unités géologiques) individualisés par des discontinuités (contacts lithologiques, failles, veines…) est générée directement dans MapInfo et exportée sous forme de séries de coordonnées dans un fichier en format texte reconnaissable par UDEC.

7 LE MODELEUR GÉOMÉCANIQUE UDEC

La modélisation numérique est utilisée ici comme un outil d'exploration. Il s'agit par cette approche de comprendre et de prédire les pressions et les contraintes qui ont pu survenir lors de la structuration finale de la FPDM dans le secteur de Duparquet. Le modeleur géomécanique UDEC a été préféré à d'autres programmes parce que ce logiciel utilise la méthode des éléments distincts. L'avantage de la modélisation aux éléments distincts sur les autres types de codes numériques (codes aux différences finies ou aux éléments finis) est de prendre en compte un espace 2D discontinu et constitué de plusieurs polygones séparés par des interfaces (ou discontinuités). À ces contacts sont attribuées des lois de comportement de la même manière qu'aux polygones intrinsèques.

7.1 Notions sur le modeleur UDEC

UDEC (Universal Distinct Elements Code) est un code de modélisation numérique fourni par Itasca Consulting Group Inc. (Minnesota, USA). Initialement conçu pour des études en géotechnique, le logiciel

est préprogrammé pour imiter le comportement des roches et contient, comme base de fonctionnement, des lois de déformation (élasticité, élasto-plasticité, plasticité...).

L'espace numérique 2D est discrétisé en éléments infinitésimaux qui répondent tous à la même loi de comportement. Soumis à une perturbation, chacun de ces éléments réagira et interagira avec ses voisins, ce qui tend à rendre compte du comportement d'un milieu naturel (résultat du comportement d'un grand nombre d'éléments infinitésimaux).

Six modes de comportement de blocs sont préprogrammés dans UDEC dont 3 sont utilisés pour le comportement global des roches. Celui utilisé dans le cadre de cette étude est le comportement élastique-plastique selon le critère de Mohr-Coulomb. Ce mode est réaliste du point de vue géologique, dans le sens où il contient un comportement à deux vitesses : élastique d'abord et plastique ensuite. Une telle rhéologie est proche de celle de la croûte, jusqu'à une certaine profondeur dépassant la limite ductile-cassante. Au sein de la surface modélisée, la contrainte peut, pour chaque élément infinitésimal, être renvoyée et propagée aux éléments voisins ou être accommodée sur place selon que l'élément est en domaine élastique ou plastique, à savoir au-dessous ou au-dessus du seuil de plasticité. Dans le domaine plastique, une partie de la contrainte est accommodée tandis que la partie restante est renvoyée. La déformation avant d'atteindre le seuil de plasticité est contrôlée par les lois de l'élasticité de Hooke (Goodman, 1980). Le seuil de plasticité est le critère classique de Mohr-Coulomb au-delà duquel la déformation est gérée par une loi de fluage.

UDEC a le désavantage de ne pas générer de nouvelles failles : lors du passage dans le domaine plastique où la déformation deviendra irrécupérable, le matériau doit pouvoir casser (rupture) ou se déformer de façon ductile, en fonction de ses propriétés et principalement de la température. UDEC n'offre pas la possibilité d'un comportement cassant si bien que toute déformation plastique sera uniquement ductile, ce qui n'est évidemment pas réaliste dans la croûte sismogénique (<10-12km). Ceci peut potentiellement générer des artefacts ponctuels en raison d'effets locaux liés au flux de matière tels que des bourrages.

7.2 Paramètres de déformation

Pour le mode de déformation élasto-plastique, il est nécessaire de préciser les valeurs de 5 paramètres : le module de compression et le module de cisaillement, le coefficient de friction μ et la cohésion C ainsi que la résistance en tension T. Les trois derniers paramètres montrent de fortes variations en fonction de la présence et de l'inclinaison d'un bâti pré-fracturé et du degré et de la nature des altérations, si bien qu'il est difficile de trouver des valeurs caractéristiques d'un certain type de roche.

En intégrant la déformation des contacts entre les polygones, le logiciel UDEC est pionnier dans la modélisation numérique de failles. En effet, la formulation numérique d'une discontinuité requiert au préalable une bonne compréhension du comportement naturel des failles, stade qui n'est pas exactement atteint à ce jour en géologie. Peu d'études expérimentales ont été menées depuis les travaux de Kulhawy (1975), Barton (1976) et Byerlee (1978). À partir de travaux en laboratoire, ceux-ci reconnaissent le rôle majeur des aspérités dans le comportement des failles (Barton, 1976; Bandis et al., 1983). Ils mettent en évidence des notions de base telles que la friction (succession des seuils de friction statique et dynamique ; Byerlee,1978) et les rigidités normales et tangentielles (Kulhawy, 1975). Ils établissent des lois empiriques encore utilisées aujourd'hui qui, bien souvent, n'ont pas ou peu été modifiées (lois reliant les rigidités normales et tangentielles établies par Khulawy ou loi de friction établie par Byerlee).

7.3 Rappel géomécanique

Les contraintes ou forces exprimées en MPa engendrent une déformation temporaire (élastique) ou permanente (plastique) selon que le seuil de plasticité est atteint ou non. Le mode de déformation

coaxiale se caractérise par le fait que l'orientation des axes des contraintes maximum (σ1) et minimum (σ3) et celle des axes de déformations X et Y demeure constante tout au long de la déformation continue (figure 15). Dans le mode de déformation non-coaxiale, les axes de la déformation subissent une composante de rotation par rapport aux contraintes principales.

8 MODÉLISATION DE CAS THÉORIQUES

Le but de la modélisation avec UDEC est entre autres de mieux comprendre les facteurs géométriques qui affectent les variations de pressions. Trois modèles théoriques simples (2 polygones et une discontinuité) sont présentés afin de montrer les effets de courbure d'une faille sur la répartition des contraintes et des pressions. Un autre modèle théorique étudié montre le rôle et l'influence de failles subsidiaires dans la distribution des pressions. Ce modèle contribue à la compréhension de la formation particulière du bassin sédimentaire de Duparquet et la localisation de la syénite de Beattie. L'objectif de cet exercice de modélisation est de permettre de mieux focaliser l'exploration le long d'une structure courbe en localisant les zones de faibles pressions. Les éléments géologiques fondamentaux seront présentés dans la section suivante et serviront, par la suite, à la construction des quatre modèles théoriques.

8.1 Éléments de géométrie et de géologie favorables

Les principaux éléments de géométrie et de géologie favorables qui semblent avoir influencé l'emplacement des minéralisations aurifères sont soulignés ici (figure 16). Tel que mentionné dans la section 5, les minéralisations aurifères le long de la FPDM du côté québécois sont principalement contrôlées par la FPDM elle-même et certaines failles subsidiaires de deuxième ordre. Les minéralisations dans le secteur de Beattie-Donchester sont également contemporaines de la syénite et du bassin sédimentaire de Duparquet (Robert, 1997). Il est possible de modéliser l'essentiel de ces observations dans des modèles théoriques simples.

8.2 Construction des modèles théoriques

Les trois premiers blocs modèles théoriques étudient les effets du changement de direction d'une faille majeure sur le champ de pressions locales. Ils ont été construits de la manière suivante (figure 17) : la faille est symétrique et l'orientation des extrémités est constante, seul l'angle d'inflexion de la partie centrale varie et la longueur de la zone infléchie demeure également constante. La disposition des trois failles modélisées est présentée à la figure 18. Il est à noter que les points d'inflexion sont tous disposés sur un même cercle. Chacun des trois modèles compte 2 polygones de rhéologie identique et une faille au comportement ductile.

8.3 Champs de contraintes

Les directions des contraintes sigma1 (σ1) et sigma2 (σ2) imposées aux trois blocs modèles sont perpendiculaires aux bordures du modèle (**figure 19**, **figure 20** et **figure 21**). La contrainte sigma1 fait un angle de 20° par rapport aux extrémités de la faille modélisée, soit un angle similaire à celui estimé pour la contrainte régionale (N340) par rapport à la FPDM orientée E-O. Les figures 19, 20 et 21 montrent les résultats des pressions minimales (σ2) et maximales (σ1) après 1800 cycles de déformation incrémentale pour les modèles avec un angle α de 10°, 20° et 30° respectivement. Le point commun aux trois modèles réside dans le fait que les plus fortes et les plus faibles pressions sont disposées de part et d'autre des points d'inflexion de la faille. Le contraste, ou gradient de pressions, est le plus élevé de toute la région dans ces deux secteurs. Pour les modèles possédant des angles α de 10° et 30°, il y a une correspondance entre ces zones de faibles valeurs de σ1 et σ2, alors que les zones de fortes pressions montrent un léger décalage. Avec le modèle à 20°, il y a correspondance des zones de faibles pressions et de fortes pressions.

8.4 Implications pour l'exploration

Ces trois modèles simples ont des implications pratiques sur l'exploration minérale. D'après les résultats obtenus et présentés graphiquement (**figure 22**), il est possible d'estimer les zones de faibles pressions par rapport à un point d'inflexion et à l'angle d'une faille par rapport à la contrainte régionale. Ainsi, les contrastes de pressions (différentiels de pressions) et la distance entre les zones de faibles et fortes pressions le long de la faille tendent à augmenter de façon non linéaire avec l'angle α.

Une application de cette approche concerne la distribution des gisements d'or orogénique (ce qui exclut La Ronde) le long de la FCLL. Les gros gisements de Malartic sont situés entre 15 et 25 km d'un point majeur d'inflexion de la FCLL, point qui est situé entre Cadillac et Malartic au niveau de la Mine Pandora.

8.5 Formation de bassins sédimentaires et mise en place de plutons

Les modèles classiques de mise en place de bassins en régime de transtension, transpression ou d'extension ne semblent pas expliquer la géométrie actuelle du bassin sédimentaire de Duparquet. Que ce soit en contexte cassant ou ductile, la géométrie classique des bassins de type *pull-apart* diffère de celle observée. La forme rhomboédrique classique formée par le relais entre deux failles décrochantes en régime cassant (Rahe et al., 1998; **figure 23a**) n'est pas analogue aux bassins documentés dans la région étudiée. La géométrie actuelle allongée du bassin sédimentaire de Duparquet rappelle plutôt celle formée dans une zone d'extension le long d'une faille de décrochement en régime ductile (**figure 23b**). Cependant, la forme sigmoïde de ce modèle n'est pas observée et la partie sud-est du bassin de Duparquet se dissocie de la faille principale (**figure 16**) ce qui n'est pas le cas du *pull-apart* classique. En fait, la géométrie des failles subsidiaires qui bordent le bassin de Duparquet est similaire à une terminaison de faille en queue de cheval.

Dans les trois modèles précédemment décrits (section 8.3), les zones en extension se forment symétriquement dans les zones de faibles pressions (**figure 24**). L'aire en extension est petite pour un angle α de 10° mais croît rapidement et de façon linéaire avec l'augmentation de l'angle α (**figure 25**). Ces régions sont donc propices à la mise en place de bassins sédimentaires, de plutons et de minéralisations.

Le quatrième bloc modèle explique bien la formation de bassins sédimentaires en contexte de compression régionale (**figure 26**). Ce modèle est inspiré de la géologie actuelle et interprétée pour la région de Duparquet (**figure 26a**). Il fait intervenir à la fois l'angle α d'une faille ductile (c.-à-d. FPDM) et des failles subsidiaires de rhéologie plus cassante comme, par exemple, la faille de Donchester (**figure**

26b). La simulation montre une zone de très faibles pressions localisées à l'intersection de la faille principale et de la faille subsidiaire la plus au nord (figure 27). La position de cette zone de basses pressions est très similaire à la position actuelle des mines Beattie et Donchester et de la syénite de Beattie par rapport à la FPDM et de ses subsidiaires. Un domaine élargi de pressions sous-lithostatiques, allongé parallèlement aux failles subsidiaires, couvre l'ensemble des intersections de failles. Ce domaine de faibles pressions est favorable à la permutation des contraintes entre sigma 2 et sigma 1. Ces conditions mécaniques favorisent dans cette région de faibles pressions et de l'extension plutôt que des chevauchements.

La vélocité calculée dans les polygones indique des déplacements plus importants du bloc nord par rapport au bloc sud (figure 28). L'élément le plus significatif dans ce modèle et qui explique probablement la formation de bassins sédimentaires, est le déplacement différentiel des blocs entre les failles subsidiaires (figure 28b). La quantité de déplacements modélisée le long des failles subsidiaires décroît depuis la faille subsidiaire la plus au nord vers la faille subsidiaire la plus au sud. Ces blocs s'éloignent par rapport à la faille principale, ce qui simule une extension. Le bloc situé entre la faille subsidiaire la plus au sud et la faille principale demeure fixe par rapport à l'ensemble des autres blocs.

Les étapes de formation de bassins sédimentaires et de mise en place d'intrusions sont résumées dans un modèle schématique (figure 29). La rupture initiale se fait le long de la faille principale par une extension locale orientée E-O et, d'abord, avec le bloc situé sous la faille subsidiaire la plus au nord (figure 29a). Par la suite, l'extension s'amorce dans le bloc voisin situé plus au sud et le contexte régional est toujours en compression. Les bassins sédimentaires se forment dans l'enceinte formée par la faille principale et les failles subsidiaires (figure 29b). Une section schématique orientée E-O montre des failles normales se développant à cause de l'extension et de la subsidence des sédiments. Cette géométrie en failles normales et la subsidence du bassin près de la faille principale (figure 29c) se comparent à ce qui est interprété pour la région de la Mer Morte (figure 30). Vers la fin du processus d'extension, la croûte est plus mince et le gradient géothermique est plus élevé, ce qui favorise la montée de magma et l'activité hydrothermale à l'intersection et le long des failles (figure 29d).

8.6 Conclusions sur la modélisation théorique

L'étude de blocs modèles simples permet au géologue de mieux localiser les zones de faibles pressions selon la courbure d'une faille. Pour l'exploration, cela signifie qu'il faut prévoir les secteurs d'activité hydrothermale près du point d'inflexion d'une faille si celle-ci montre une légère courbure. Plus la courbure d'une faille est grande, plus les secteurs d'activité hydrothermale devraient s'éloigner du point d'inflexion et plus l'aire de cette activité devrait être grande (la taille des régions en tension augmente).

Le dernier modèle numérique permet également de mieux comprendre les différents processus qui mènent à la formation de bassins sédimentaires et la mise en place d'intrusions en régime compressif. Il pourrait s'agir d'un nouveau modèle pour les bassins en transtension. Il explique à la fois la forme allongée du bassin de Duparquet et la position de ce dernier par rapport à la FPDM et la faille subsidiaire de Donchester. Ce modèle montre que la zone de faibles pressions est située à l'intersection de la faille principale et de la faille subsidiaire la plus au nord, exactement comme les positions actuelles des mines Beattie et Donschester et de la syénite de Beattie. Les intersections entre la faille principale et les autres failles subsidiaires sont probablement aussi intéressantes du point de vue de l'exploration puisqu'elles sont également dans des zones de faibles pressions sous-lithostatiques.

9 APPLICATIONS À LA PORTION QUÉBÉCOISE DE LA FPD

Le modèle régional couvre la portion de la FPDM située entre la frontière Québec-Ontario à l'ouest et le village de Destor à l'est (figures 5 et 7). L'étude de modèles géomécaniques simples permettra de mieux interpréter les résultats de la modélisation de cette région établie à partir d'une simplification de la carte géologique (**figure 31**). Cette section montre comment ont été paramétrés les polygones et les contacts géologiques du modèle régional. Elle explique également les conditions des contraintes choisies en bordures et dans le modèle.

9.1 Paramétrage des polygones

Les valeurs des paramètres rhéologiques pour différentes natures de roches sont relativement abondantes dans la littérature. La cohésion, le coefficient de friction et la résistance en tension interviennent dans la déformation en mode élasto-plastique mais sont toutefois plus rares que les paramètres élastiques K et G dits *coefficients de Lamé*. Ceci s'explique par le fait que K et G ont de larges champs de validité et sont peu influencés par les variations de température (si l'on reste dans des domaines peu métamorphisés). Par opposition, les paramètres de déformation élasto-plastique étant très dépendants des conditions propres à chaque milieu, il est plus difficile d'en établir des chartes de valeur. Une autre source d'information, lorsqu'elle est disponible, est la déformation distribuée au sein d'une unité observable sur le terrain. Une schistosité bien marquée et généralisée à l'ensemble d'une formation et, par opposition, un ensemble massif peu cisaillé traduit des contrastes de compétence qui doivent transparaître dans la modélisation. Ces observations de relations de déformations entre différents blocs d'un système sont particulièrement pertinentes pour le calibrage du modèle.

Il faut donc faire ressortir ces caractéristiques rhéologiques en faisant varier les paramètres, tout en restant dans les champs de valeurs fournies par la littérature. Parallèlement, il est important de garder en mémoire les conditions thermiques dans lesquelles s'est produite la déformation et, si nécessaire, de tenir compte de l'inversion rhéologique qui se produit à partir de températures avoisinant le seuil de plasticité du quartz (c.-à-d. inversion des contrastes de compétence entre les roches felsiques et mafiques par exemple).

Les valeurs des paramètres pour les différentes unités géologiques du secteur étudié sont présentées dans le tableau I. Une liste plus exhaustive de paramètres est présentée en annexe 1 pour différents types de roches.

Tableau 1: Paramètres géomécaniques des polygones modélisés

	Densité (kg/m^3)	Module de compression (Pa)	Module de cisaillement (Pa)	Angle de friction (°)	Cohésion (Pa)	Résistance en tension (Pa)
Porphyre	2660	25e9	20e9	35	55e6	4.1e6
Gabbro	2900	32e9	19e9	33	66e6	5e6
Schistes	2400	16e9	9e9	30	31e6	5e5
Wacke	2300	14e9	11e9	30	30e6	2e6
Conglomérats	2450	20e9	8e9	30	27e6	1e6
Rhyolite	2300	20e9	14e9	33	60e6	1e6
Andésite	2500	24e9	16e9	31	65e6	1e6
Basalte	2700	32e9	21e9	31	66e6	1e6
Ultramafite	2850	45e9	35e9	30	60e6	1e6

9.2 Paramétrage des contacts

Le paramétrage des contacts est une des difficultés majeures des modélisations utilisant UDEC, la littérature étant très pauvre sur ce sujet. Si la nature des paramètres décrivant le comportement des failles a été étudiée (Kulhawy, 1975; Barton, 1976; Rosso, 1976; Byerlee, 1978; Bandis *et al*, 1983), il est très difficile de trouver les valeurs de ces paramètres. De plus, les expériences en laboratoire ont été faites sur des fractures infra-millimétriques à centimétriques, échelle largement inférieure à celle de nos modèles courants (kilométrique à plurikilométrique). Or, l'expérience montre que le comportement des fractures et des failles dépend étroitement de l'échelle d'observation.

Le paramétrage s'effectue par essais et erreurs en utilisant comme critère le rendu réaliste des caractéristiques tectoniques par ordre décroissant :

(i) un rapport quantitatif réaliste entre la déformation distribuée au sein des polygones et celle encaissée sur les failles et les contacts ;

(ii) le respect de l'ordre de grandeur du glissement total estimé pour chaque type de failles, conservant la hiérarchie préalablement déterminée;

(iii) un rapport glissement sur écrasement réaliste (c.-à-d. jeu tangentiel sur jeu normal au plan, superposition ou interpénétration, chevauchement des polygones). Ce rapport est particulièrement dépendant de la taille de la structure visée. Une interpénétration des polygones peut être tolérée dans le cas où un important jeu existe dans la 3e dimension qui ne peut pas être représentée;

(iv) une rotation non exagérée du tenseur de contraintes à proximité des failles, dans une bande plus ou moins étroite selon la rhéologie ;

(v) une transmission ou un blocage des contraintes de part et d'autre des failles qui soit réaliste selon l'importance de celles-ci et leur contribution à la tectonique régionale.

Pour le modèle de la FPDM, un comportement des failles uniquement contrôlé par les rigidités normale et tangentielle a été choisi. La cohésion, la friction et la résistance en tension n'interviennent pas dans le modèle. En effet, UDEC intègre ces paramètres dans le but original d'effectuer des études géotechniques sur des échantillons de taille millimétrique à métrique et à des échelles de temps largement inférieures à celles des phénomènes géologiques modélisés. Pour des études à grandes échelles de temps et d'espace, il semble ainsi plus pertinent et plus maniable d'utiliser des lois contraintes-déformation uniquement contrôlées par les rigidités normales et tangentielles. Pour arriver à cette fin, les paramètres élasto-plastiques (cohésion, friction et résistance) ont été fixés suffisamment haut pour avoir la certitude de ne jamais atteindre le seuil, ce qui signifie que ces paramètres n'interviennent à aucun moment dans le comportement des failles. Le tableau II résume les valeurs utilisées dans le modèle pour chaque type de faille. D'autres paramètres géomécaniques sont présentés dans l'annexe I.

Tableau 2: Paramètres géomécaniques des contacts modélisés

	Rigidité normale (MPa/m)	Rigidité tangentielle (MPa/m)	Cohésion (MPa)	Angle de friction (°)
Faille Porcupine	12e6	0.05e6	5000	45
Faille 2^{ième} ordre	10e6	1e6	5000	45
Faille 3^{ième} ordre	45e6	4e6	5000	45
Contact géologique	100e6	10e6	5000	45

Il est à noter que le chevauchement des polygones en 2D est simulé dans UDEC par l'interpénétration des polygones. Ces chevauchements peuvent atteindre des amplitudes de quelques centaines de mètres pour une échelle régionale. Ceci vise à matérialiser autant que possible les déplacements inverses dans la dimension *out of plane* (la 3e dimension) et à diminuer la source d'erreur liée à cette approximation 2D.

9.3 Hiérarchisation des discontinuités

Il est capital de rendre compte de la hiérarchie des différents réseaux de failles relativement à l'estimation de leur rejet, depuis les contacts lithologiques plus ou moins cisaillés jusqu'aux systèmes majeurs de FPDM. La carte des failles utilisée dans UDEC est présentée sur la **figure 32**.

La FPDM est considérée dans le modèle comme une faille de 1er ordre accommodant une grande partie de la contrainte en décrochement dextre, en réponse à la compression N340 imposée. Elle agit comme un écran partiel à la propagation de la contrainte cisaillante et sépare des zones dont la tectonique s'exprime différemment.

De part et d'autre de la FPDM, les décrochements sont plus faibles et d'amplitude hectométrique (failles de 2ème ordre) à métrique (failles de 3^{ième} ordre). Ceci est cohérent avec le fait que la plupart des contacts sont systématiquement cisaillés dans la région et traduisent des mouvements légers, mais généralisés à l'ensemble de la zone. Le tableau 2 résume les valeurs utilisées dans le modèle pour les contacts géologiques.

9.4 Conditions aux limites du modèle

L'amplitude des contraintes appliquées aux bordures du modèle doit être estimée en fonction de la profondeur et de la situation géodynamique du milieu. Dans le cas de la région modélisée, la profondeur estimée lors de la compression régionale est de l'ordre de 7 à 10 kilomètres. Cette profondeur est établie sur le critère du faciès des schistes verts des roches et des conditions ductiles-cassantes du milieu. Les amplitudes des contraintes appliquées aux limites du système ont été établies à partir de séries de mesures en forage récemment effectuées dans différents contextes de la croûte continentale profonde, principalement en domaine intraplaque (Townend et Zoback, 2000). La contrainte horizontale majeure (N340) est ainsi fixée à 230 MPa tandis que la contrainte horizontale mineure est estimée équivalente à la pression lithostatique (130 MPa). Une telle valeur de $\sigma 1$ peut correspondre à un minimum pour les conditions géodynamiques modélisées. Bien qu'offrant un rendu qualitativement réaliste des champs de pressions, cette simulation peut potentiellement engendrer une sous-estimation des amplitudes.

Les contraintes doivent être, de préférence, appliquées perpendiculairement aux bordures. Ceci évite les effets de distorsion ou de cisaillement causés par l'angle de sigma 1 sur les épontes supérieures et inférieures du modèle. Un test utilisant seulement la trace de la FPDM montre les effets causés par une contrainte principale oblique par rapport à une contrainte perpendiculaire (**figure 33**). Toutes les simulations à l'échelle régionale ont été faites avec des contraintes perpendiculaires aux limites du modèle (c.-à-d. modèle orienté N340).

9.5 Conditions *in situ*

Il peut être réaliste d'instaurer un état de contraintes initial au sein du modèle, lequel sera ensuite modifié par la propagation des contraintes imposées aux limites.

Deux approches sont possibles :

(i) les contraintes initiales sont égales dans les directions horizontale et verticale (contrainte différentielle nulle et considérée comme tectoniquement neutre; cet état est très rare, voire inexistant, dans la croûte terrestre). La compression appliquée aux bordures entraîne une modification progressive du tenseur ;

(ii) les contraintes initiales sont compressives, semblables aux conditions des limites. La déformation est existante, car des réajustements ont tout de même lieu, mais elle est restreinte dans l'ensemble, et les jeux sur les failles beaucoup plus faibles. En revanche, le modèle est très stable.

Dans les deux cas, le fait de considérer un état de contraintes *in situ* apporte beaucoup de stabilité au modèle et facilite la convergence vers une solution stable. En contrepartie, la perturbation apportée par la compression étant amoindrie, les déformations induites sont quantitativement inférieures, bien que qualitativement similaires. La contrainte *in situ* proposée pour le modèle de Porcupine est de 130 MPa, soit équivalente à la pression lithostatique.

9.6 Test de validation

Un test de validation a été fait sur le modèle numérique afin de vérifier les paramètres rhéologiques utilisés et la direction de la contrainte principale (N340) présumée. Un modèle simple a été construit en utilisant seulement la trace de la FPDM et deux polygones de rhéologie identique (**figure 34a**). Le test présenté a pour but de comparer la trajectoire de la schistosité observée (**figure 34b**) avec celle de la schistosité modélisée (**figure 34a**). La schistosité se développe perpendiculairement à l'axe de la déformation principale X et parallèle à l'axe Y. Il est donc possible d'interpréter une schistosité théorique en utilisant la trajectoire des axes Y calculés avec UDEC. La **figure 34** montre que la correspondance est bonne entre la schistosité S_2 associée au décrochement régional dextre et la schistosité modélisée. Le test montre par conséquent que les paramètres de la modélisation sont satisfaisants et mécaniquement réalistes.

10 RÉSULTATS

Le modèle à l'échelle régionale corrèle bien avec les résultats obtenus lors des quatre modélisations théoriques. L'effet de courbure le long de la FPDM sur les pressions est observé à plusieurs échelles (section 10.1). L'emplacement actuel du bassin de Duparquet et de la syénite de Beattie par rapport aux pressions minimales est d'abord étudié (section 10.2), puis suivi d'une discussion sur les positions des mines, gîtes et indices minéralisés le long de la FPDM en plan ainsi qu'avec une vision longitudinale (section 10.3). Les variations de pressions et le contenu en CO_2 et H_2O calculés à partir du logiciel Normat sont également mis en relation en plan et graphiquement (section 10.4). Finalement, des secteurs d'intérêt pour l'exploration aurifère le long de la FPDM sont présentés (section 10.5).

10.1 Variations de pressions le long de la FPDM

La variation des contraintes maximales (σ1) modélisées rend compte des effets de courbures le long du tracé de la FPDM (**figure 35**). Comme les trois modèles théoriques le prédisent, les zones de fortes pressions sont situées avant le point d'inflexion d'un tronçon de faille (zone en transpression), alors que les zones de faibles pressions sont localisées après ce point (zone en transtension). Ce phénomène est

observé à différentes échelles le long de la FPDM et répond probablement à une loi fractale. À une échelle régionale de l'ordre de la dizaine de kilomètres, on observe une zone de faibles pressions ovale et orientée N-S (figure 35), située au centre du modèle, au niveau du Lac Duparquet. Celle-ci peut être attribuée à l'inflexion globale de la FPDM dans le tiers central du système, passant d'une direction approximative NO15° à N110°. L'alternance de fortes et de faibles pressions au sein de cette zone, de part et d'autre de points d'inflexions secondaires ainsi qu'à des contrastes locaux de compétences, s'observe à deux autres échelles : kilométrique et infra-kilométrique.

10.2 Localisation du bassin de Duparquet et de la syénite de Beattie

Comme le prédit la modélisation du quatrième cas théorique (section 8.5), le modèle régional montre que les zones de faibles pressions (contraintes minimales σ2) sont localisées aux intersections de la FPDM et des failles subsidiaires E-O et ENE-OSO (Figure 36). Le bassin principal de Duparquet, de même que des bassins sédimentaires de plus petite dimension sont localisés dans les zones de faibles pressions. Il est à noter que l'extrémité SE du bassin principal finit abruptement au contact d'une zone de fortes pressions orientée NNO. Il pourrait s'agir d'une structure normale non cartographiée, mais mécaniquement compatible avec le modèle proposé dans la section 8.5 (figure 29). Les intrusions sont majoritairement situées dans des secteurs de faibles pressions. Les syénites dans la partie centrale et occidentale sont associées dans l'espace à des zones dépressurisées et à des intersections de failles. Une série d'intrusions, dans la continuité est du Bassin de Duparquet, s'alignent parallèlement à un fort gradient de pression orienté ENE (figure 36).

10.3 Pressions et distribution de l'or

La modélisation des pressions moyennes [(σ1+ σ2)/2)] en plan montre que les deux principales mines de la région, soit les mines Beattie et Donchester qui totalisent près de 90% de la production d'or de la portion québécoise de la FPDM (87 t Au), sont situées au centre d'une vaste dépression ovale orientée NO-SE et mesurant 13 km de longueur par 10 km de largeur (figure 37 et figure 38). La pression moyenne au niveau de ces deux mines est d'environ 115 MPa, ce qui correspond à un domaine de pressions sous-lithostatiques. Dans le secteur de la mine Yvan Vézina, la majorité des gîtes et des valeurs supérieures à 10 g/t Au sont situés dans des zones de pressions faibles, mais près de zones de fortes pressions où le gradient de pression est élevé (figure 38). La mine Duquesne fait exception. Elle est située à la pointe d'une zone de forte pression, mais est entourée par un croissant de faible pression de plusieurs kilomètres (figure 38c).

La majorité des indices minéralisés sont localisés dans des domaines de pression intermédiaire et au-dessus de la pression lithostatique (figure 38 et figure 39). Les valeurs inférieures à 10 g/t Au couvrent un large spectre de pressions et sont moins concentrées le long de la FPDM que les valeurs supérieures à 10 g/t Au (figure 37 et figure 38).

La FPDM est clairement le principal métallotecte à l'échelle régionale. Une section longitudinale d'ouest en est le long de la FPDM permet d'apprécier la position des mines, des gîtes et des indices par rapport aux variations de pression (figure 40 et figure 41). La position des mines et des principaux gîtes (avec tonnage évalué) projetée sur la courbe des pressions intermédiaires confirme que les minéralisations aurifères se sont concentrées dans des dépressions avoisinant l'équilibre lithostatique (figure 40). Une périodicité des pressions sous-lithostatiques est également observée à tous les 10 km environ. Cette rythmicité rappelle celle observée par exemple dans le camp minier aurifère de Doyon – Bousquet et possiblement le long de la Faille Casa-Bérardi.

Pour ce qui est du profil des indices minéralisés le long de la FPDM, la relation entre pressions et minéralisations est plus erratique (figure 41). Comme en plan, les plus fortes valeurs en or projetées sur

la courbe de pression sont localisées là où le gradient de pression est plus fort et non pas dans les creux ou les crêtes.

10.4 Hydrothermalisme et pressions

Le CO_2 et le H_2O ont été calculés avec le logiciel Normat (données traitées et fournies par le MRNQ) à partir de plus de 3700 échantillons de forages et de terrain. Les contours du CO_2 et du H_2O sont présentés en plans et les valeurs le long de la FPDM sont présentées en sections longitudinales (**figure 42** et **figure 43**).

L'hypothèse que les fluides migrent vers les zones de basses pressions est soutenue par le modèle régional. Le CO_2 est une indication directe de la présence ou non de carbonate dans la roche. Sa quantité absolue témoigne du degré d'altération hydrothermale enregistré sous forme minérale dans la roche. Le H_2O indique le degré d'hydratation de la roche. Au faciès métamorphique des schistes verts, la présence d'eau dans la roche est principalement matérialisée par de la séricite, de la chlorite et du talc.

En plan, les plus fortes valeurs du CO_2 (>5%) sont localisées : 1) le long d'une mince bande tout le long de la FPDM et 2) d'une façon plus étendue dans les zones de faibles pressions, notamment dans la grande dépression entourant les mines Beattie et Donchester et à l'ouest et à l'est de la Mine Duquesne (**figure 42**). En section longitudinale, le comportement du CO_2 varie à l'inverse des pressions ; les valeurs les plus élevées en CO_2 sont localisées dans les zones de basse pression. Cette relation indique une cause commune. Les plus fortes altérations en carbonate apparaissent au cœur des zones de basse pression. Ceci est une indication que le volume de fluides riches en CO_2 piégés autour des mines et des gîtes est plus significatif.

La courbe du H_2O qui épouse bien celle des pressions (**figure 43**) indique que des quantités plus importantes de H_2O sont présentes dans les zones de fortes pressions le long de la FPDM. Ce résultat peut sembler contraire aux prévisions à savoir que l'eau migre vers les zones de basse pression. Cette situation pourrait être expliquée par le fait que les secteurs de fortes pressions tectoniques auraient été épargnés de l'altération hydrothermale carbonatée. Ces secteurs contiennent donc des minéraux hydratés résultant du métamorphisme régional qui précède l'altération hydrothermale orogénique.

10.5 Secteurs cibles pour l'exploration de l'or

La relation spatiale entre les zones de basse pression et la position des principaux dépôts et gîtes de la région est un guide direct pour l'exploration de nouveaux secteurs aurifères. La figure 40 est particulièrement invocatrice en ce sens. Le critère recherché est la présence de zones de basse pression plus ou moins équivalentes à la pression lithostatique. Les trois secteurs ciblés sont particulièrement intéressants du fait qu'ils apparaissent dans des domaines de pressions sous-lithostatiques (**figure 40**). Les secteurs compris entre les gîtes de la Structure 71 et Nemrod (à l'ouest) et entre la Zone Shaft et la Mine Duquesne (à l'est) sont favorables pour l'exploration (**figure 38**). Les deux tronçons de 5 km de part et d'autre de la Mine Beattie et la zone au sud-est du gîte Double-Strike, à l'est, présentent des signatures de pressions comparables à celles identifiées autour des dépôts connus (**figure 38** et **figure 40**).

En utilisant le modèle régional du secteur de Duparquet et celui fait pour la région de Malartic-Val-d'Or (Faure et Rafini, 2002), UDEC devient un outil prévisionnel pour évaluer le tonnage potentiel des dépôts. La relation entre le tonnage en or des dépôts de la région de Val-d'Or, Malartic et Duparquet en fonction des aires de basses pressions autour des mines (définis comme étant une dépression homogène entourée par un fort gradient de pression) montrent deux tendances positives (**figure 44**). La tendance 1 montre, à tonnage égal en or, des aires de pressions favorables quatre fois supérieures à la tendance 2. En raisonnant en terme de pressions et de fluides, cela pourrait dire que le volume de fluide qui a circulé autour des dépôts de la tendance 1 a été beaucoup plus important pour précipiter la même quantité de métaux que la tendance 2. Une autre hypothèse pour expliquer les différences entre les deux tendances

est que les pressions autour des mines de la tendance 1 ont été générées par une tectonique décrochante avec les axes sigma 1 et sigma 2 horizontaux et un écoulement des fluides plutôt horizontal (forme d'une galette). À concentration égale de métaux dans la roche encaissante, les dépôts de la tendance 2 se seraient développés dans une tectonique verticale, avec sigma 1 et sigma 3 horizontaux et un écoulement de fluides plutôt vertical (forme d'un cigare).

Le diagramme des pressions favorables en fonction du tonnage d'or devient un outil prévisionnel pour l'exploration. En effet, il est possible de prédire la quantité probable d'or dans un système en rapportant la valeur de l'aire de faibles pressions d'un secteur où il n'y a pas de mines sur les deux courbes de tendances établies (**figure 44**). Pour le secteur du gîte Nemrod par exemple, l'aire de basses pressions est d'environ 10 km^2. Une ressource potentielle de 15 tonnes d'or est prédite en utilisant la courbe de la première tendance ou de 125 tonnes en utilisant la courbe de la deuxième tendance.

11 CONCLUSIONS

Cette étude propose une méthodologie et donne des résultats pour l'exploration le long de la FPDM. L'utilité d'UDEC est d'abord démontrée avec des modèles géomécaniques simples. Les effets de courbure d'une faille sur les pressions sont documentés pour trois orientations de failles. Le gradient de pression et la distance entre les zones de plus faibles et de plus fortes pressions de part et d'autre du point d'inflexion de la faille, de même que les aires en tension, sont proportionnels à l'angle que fait la faille par rapport à la contrainte principale. La formation du bassin sédimentaire de Duparquet et la mise en place de la syénite de Beattie s'expliquent dans le cadre d'une déformation continue et en compression. Les principaux facteurs permettant l'emplacement des sédiments et de l'intrusion sont la distance par rapport au point d'inflexion de la faille, les basses pressions localisées à l'intersection des failles secondaires avec la faille principale et le déplacement différentiel des failles secondaires les unes par rapport aux autres.

À l'échelle de la région de Duparquet-Destor, la modélisation avec UDEC sur une géométrie simplifiée de la carte géologique permet d'établir des relations claires entre pressions et bassins sédimentaires, intrusions, minéralisations aurifères et altérations. Le bassin sédimentaire de Duparquet ainsi que la majorité des intrusions de syénite et de porphyres quartzofeldspathiques sont situés dans les secteurs de plus faible pression. Les deux principales mines de la région modélisée, Beattie et Donchester, sont situées au centre d'une région de basse pression faisant 55 km2. Les mines de Duquesne et de Yvan Vézina sont situées plutôt en bordure de forts gradients de pression.. Plusieurs zones favorables de basse pression sont mises en évidence par cette étude. Elles correspondent généralement à des secteurs connus où il y a déjà des ressources d'évaluées.

Les données sur l'hydrothermalisme (Au et contenus normatifs en CO_2 et H_2O) sont comparées aux variations de pressions le long de la FPDM. Une relation positive est démontrée entre la pression et la quantité de H_2O normatif. Aussi, une relation inverse est documentée entre la pression et les valeurs élevées en or et la quantité de CO_2normatif.

Les données de pressions calculées avec UDEC pour les camps miniers de Malartic et de Val-d'Or sont combinées à celles de la région de Duparquet. La relation entre les aires de basses pressions favorables autour des mines de ces trois camps miniers et les tonnes d'or produites et en réserves, montre qu'il y a deux tendances cohérentes de gisements. La première tendance montre que les dépôts comme Beattie, Perron-Courvan, Beavcon, Ferderber-Dumont et Golconda, ont, pour un tonnage d'or égal, des aires de basse pression environ quatre fois plus importantes que la deuxième tendance (Sigma-Lamaque, Canadian Malartic, Siscoe et Kiena). Les gisements de la deuxième tendance ont des aires beaucoup plus petites par rapport à la quantité d'or. Cette relation permet de prédire le tonnage probable en or pour des secteurs de basses pressions ciblés avec UDEC. Cet outil prévisionnel devrait être validé dans d'autres secteurs en Abitibi ou en Australie.

REMERCIEMENTS

Des remerciements sont adressés aux lecteurs critiques, Michel Jébrak et Réal Daigneault. Merci également à Yueshi Lei (Cambior Inc.) pour les discussions et pour avoir permis d'utiliser des banques de données sur l'or et la géologie, des sections de forages et des photos. De plus, nous remercions Francine Fallara, Marc Legault et Robert Marquis du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, pour nous avoir permis d'utiliser les banques de données sur l'or, la géologie régionale et certaines données géochimiques.

RÉFÉRENCES

Al-Zoubi, A. et Brink, U. T. 2002. Lower crustal flow and the role of shear in basin subsidence: an example from the Dead Sea basin. Earth and Planetary Science Letters 199: 67-79

Bandis, S.C., Lumsden, A.C., Barton, N.R., 1983, Fundamentals of rock joint deformation: International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, v. 20, p. 249-268.

Barton, N., 1976, Rock Mechanics Review – The Shear Strengh of Rocks and Rock Joints, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., v. 13, p. 255 – 279.

Beaudry, D. 1992. Analyse structurale des assemblages volcanosédimentaires au voisinage de la faille Porcupine-Destor, Abitibi, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi, .Québec, Canada, 127 p.

Brisbin, D.I.,1997. Geological Setting of Gold Deposits in the Porcupine Gold Camp, Timmins, Ontario: Ph.D. thesis, Queen's University, Kingston, Ontario, 523 p.

Byerlee, J.D. 1978. Friction of rocks. Pure Applied Geophysics, 116: 615-626.

Carrier, A., Jébrak, M., Angelier, J., et Holyland, P. 2000. The Silidor Deposit, Rouyn-Noranda District, Abitibi Belt: Geology, Structural Evolution, and Paleostress Modeling of an Au Quartz Vein-Type Deposit in an Archean Trondhjemite. Economic Geology, 3075: 1049-1065.

Chown, E.H., Daigneault, R., Mueller, W. et Mortensen, J., 1992. Tectonic Evolution of the Northern Volcanic Zone of the Abitibi Belt. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 29: 2211-2225.

Corfu, F. 1993. The evolution of the southern Abitibi greenstone belt in light to precises U-Pb geochronology. Economic Geology, 88: 1323-1340.

Daigneault, R. et Allard, G.O. 1990. Les cisaillements E-W et leur importance stratigraphique et métallogénique, région de Chibougamau. Dans La Ceinture polymétallique du Nord-Ouest québécois 1990. Éditeurs; M. Rive, P. Verpaelst, Y.

Daigneault, R. Mueller, W.U. et Chown, E.H. 2003. Abitibi greenstone belt plate tectonics:the diachrononous history of arc development, accretion and collision. *Dans* Developments in Precambrian Geology / Tempos of events in Precambrian time. P. Eriksson, W. Altermann, D. Nelson, W. Mueller, O. Catuneanu, and K. Strand (Éditeurs). P.

Dimroth, E., Imreh, L., Rocheleau, M. et Goulet, N., 1982. Evolution of the south-central part of the Archean Abitibi Belt, Quebec. Part I: Stratigraphy and paleogeographic model. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 19: 1729-1758.

Faure, S. 2001. Interprétation et prévision des paléocontraintes dans le sud de l'Abitibi (Rouyn-Malartic-Val-d'Or: cartes 32c et 32d). Rapport interne Consorem.

Faure, S. 2002. Prédiction des paléopressions avec le modeleur géomécanique UDEC - Implications pour l'or orogénique dans la zone volcanique sud de l'Abitibi. Séminaire d'information sur la recherche géologique, programme et résumés 2002, MRN, DV 2002-10, p. 22.

Faure, S. et Rafini, S. 2002. Modélisation des paléopressions en section à la mine Sigma avec le logiciel UDEC. Rapport interne Consorem.

Goodman R. E. 1980. Introduction to Rock Mechanics, eds. John Wiley and Sons, New York.

Goodman R.E., 1989, Rock Mechanics, second edition: New York, J. Wiley & Sons, 562 p.

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Knox-Robinson, C.M., Ojala, J., Gardoll, S., Yun, G.Y., Holyland, P. 2000. Late-Kinematic timing of orogenic gold deposits and significance for computer-based exploration techniques with emphasis on the Yilgarn Block, Western Australia. Ore Geology Reviews, 17: 1-38.

Hagemann, S.G. et Cassidy, K.F. 2000. Archean Orogenic Lode Gold Deposits. Economic Geology, 13:9-68

Ho, S.E., Groves, D.I., McNaughton, N.J., Mikucki, E.J. 1992. The source of ore fluids and solutes in Archaean lode-gold deposits of Western Australia. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 50: 173-196.

Hodgson, C.J., Hamilton, V. 1989. Gold Mineralization in the Abitibi Greenstone Belt: End-Stage Result of Archean Collisional Tectonics ? Economic Geology, 7: 86-100

Holyland, P.W. 1990. Targeting of epithermal ore deposits using stress mapping techniques. Pacific Rim 90 Congress. 337-341.

Holyland, P.W., Ojala, V.J. 1997. Computer-aided structural targeting in mineral exploration: two- and three-dimensional stress mapping. Australian Journal of Earth Sciences, 44: 421-432.

Holyland, P.W., Ridley, J.R. et Vearncombe, J.R. 1993. Stress mapping technology (STMTM). Geofluids '93 : Contribution to an International Conference on Fluid Evolution, Migration and Interaction in rocks, Torquay, 272-275.

Kulhawy, F.H., 1975, Stress deformation properties of rock and rock discontinuities: Engineering Geology, v. 9, p. 327-350.

Kerrich, R. et Cassidy, K.F. 1994. Temporal relationships of lode gold mineralization to accretion, magmatism, metamorphism and deformation – Archean to present: A review. Ore Geology Reviews, 9: 263-310.

Laflèche, M. et Gilbert, M. 1987. Étude structurale, lithogéochimique et pétrochimique de la mine Yvan Vézina. Rapport interne Cambior.

Legault, M. et Goutier, J. 2003. La Faille de Porcupine-Destor ; un potentiel aurifère important. Québec Mines, Bulletin d'information minière du ministère des Ressources naturelles, de la Faune et des Parcs, Février 2003, p. 10-11.

Lemos, J.V., Hart, R.D., Cundall, P.A. 1985. A generalized program for modelling jointed rock mass. Fundamentals of Rock Joints, 335-344.

Mortensen, J. K., 1993. U-Pb Geochronology of the Eastern Abitibi Subprovince: Part II: Noranda-Kirkland Lake area. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 30: 29-41.

Mueller, W. et Donaldson, J.A. 1992. Development of sedimentary basins in the Archean Abitibi belt, Canada: an overview. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 29: 2249-2265.

Mueller, W., Donaldson, J. A., Dufresne, D. et Rocheleau, M. 1991. The Duparquet Formation, sedimentation in a late Archean successor basin, Abitibi Greenstone belt. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 28: 1394-1406.

Mueller, W., Daigneault, R. et Chown, E. 1995. Archean terrane docking : Destor-Porcupine-Manneville zone, Abitibi greenstone belt, Québec, Canada. Commission Géologique du Canada. Open File 3145.

Mueller, W., Daigneault, R., Mortensen, J. et Chown, E.H. 1996. Archean terrane docking: Upper Crust Collision Tectonics, Abitibi Greenstone Belt, Quebec, Canada. Tectonophysics, 265: 127-150.

Oliver, N.H.S., Valenta, R.K., Wall, V.J. 1990. The effect of heterogeneous stress and strain on metamorphic fluid flow, Mary Kathleen, Australia, and a model for large-scale fluid circulation. J. metamorphic Geology, 8: 311-331.

Pitre, D. 2000. Zonation isotopique à l'échelle d'un champ filonien aurifère : le camp minier de Val-d'Or, Abitibi, Québec. Mémoire de maîtrise, Université Laval. 150 p.

Pusch, R., 1995, Rock mechanics on a geological base: Amsterdam, Elsevier, Developments in Geotechnical Engineering 77, 498 p.

Rahe, B., Ferrill, D.A., et Morris, A.P. 1998. Physical analog modeling of pull-apart basin evolution. Tectonophysics 285: 21-40.

Ridley, J.R. 1993.The relations between mean rock stress and fluid flow in the crust : with reference to vein- and lode-gold deposits. Ore Gelogy Reviews, 8: 23-37.

Robert, F. 1996. Filons de quartz-carbonates aurifères. Géologie des types de gîtes minéraux du Canada. Commission Géologique du Canada, vol. 8, p.387-405.

Robert, F. 1997. A preliminary geological model for syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi belt, Ontario and Québec. Geological Survey of Canada. Current Research, 1997-C, 201-210.

Robert, F. 2001. Syenite-associated disseminated gold deposits in the Abitibi greenstone belt, Canada. Mineralium Deposita, 36: 503-516.

Rosso R. S., 1976, A comparison of joint stiffness measurements in direct shear, triaxial compression and in situ, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 13, p. 167 – 172.

Townend, J. et Zoback, M.D. 2000. How faulting keeps the crust strong. Geology, 28: 399-402

Wilkinson, L., Cruden, A.R. et Krogh, T.E. 1999. Timing and kinematics of post-Timiskaming deformation within the Larder Lake – Cadillac deformation zone, southwest Abitibi greenstone belt, Ontario, Canada. Journal Canadien des Sciences de la Terre, 36: 627-647.

ANNEXE 1 : PARAMÈTRES GÉOMÉCANIQUES

Matériaux	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson v	Cohésion Co (Mpa)	Angle friction (°)	Résistance en traction T (Mpa)	Angle de dilatation (°)	Shear Modulus G (Mpa)	Bulk Modulus K (Mpa)
R. MAGMATIQUES								
Granite et gneiss (2)	10 000 à 50 000	0,1 - 0,2					20 000 à 30 000	20 000 à 45 000
Granite (1)	73 800	0,220	55,10	51,00			30 246	43 929
Granite (7)	46 100	0,190	55,10	51,00			19 370	24 785
Granite biotite, N-Ecosse (10)	57 100	0,211					23 576	32 930
Granite biotite, N-Brunswick (10)	56 300	0,198					23 498	31 071
Granite monzonitique (10)	50 900	0,220					20 861	30 298
Granodiorite (10)	60 000	0,187					25 274	31 949
Syénite néphéline, Montréal (10)	62 900	0,256					25 040	42 965
Diabase (Gabbro) et basaltes (2)	50 000 à 500 000	0,200					20 800 à 208 000	27 780 à 278 780
Anorthosite, Québec (10)	82 500	0,262					32 686	57 773
Andesite altérée (10)	54 000	0,180					22 881	28 125
Gabbro, New Glasgow, Qc (10)	108 000	0,219					44 299	64 057
Basalte 1, USA (10)	85 000	0,083					39 231	34 000
Basalte 2, USA (10)	70 000	0,111					31 500	30 000
Basalte altéré (10)	63 000	0,250					25 200	42 000
Basalte altéré, confinement 1000 b (10)	82 500	0,250					33 000	55 000
Basalte (1)			66,20	31,00	13,10			
Basalte (7)	51 900	0,230	66,20	31,00			21 098	32 037
Dike (3)	64 285	0,286	4,00	35,00	4,00		25 000	50 000
R. MÉTAMORPHIQUES								
Quartzite (1)			70,60	48,00				
Quartzite 1, USA (10)	97 500	0,150					42 391	46 429
Quartzite 2, USA (10)	63 600	0,115					28 520	27 533
Gneiss (7)	50 000	0,270					19 685	36 232
Marbre (7)	56 500	0,260					22 421	39 236
Marbre (1)	55 800	0,250					22 320	37 200
Marbre (3)	2 500	0,250	10,00	15,00		10,00	1 000	1 670
Marbre de Carrara, Italie (10)	55 400	0,274					21 743	40 856
Amphibolite (3)	10 000	0,250	50,00	20,00		5,00	4 000	6 670
Skarn (3)	37 240	0,250	500,00	30,00		25,00	14 900	24 800
Métasédiments (4)	56 495	0,125	4,11	30,00	3,11	0,00	25 109	25 109
Métadiorite (4)	95 217	0,283	6,11	35,00	4,11	0,00	37 109	73 109
R. SÉDIMENTAIRES								
Shale (3)	51 429	0,286	4,00	31,00	3,00		20 000	40 000
Shale (1)	11 100	0,290	38,40	14,40			4 302	8 810
Mica shale (2)	10 000 à 100 000	0 - 0,2						
Calcaire et grès (2)	5 000 à 50 000	0,1 - 0,3						
Calcaire (1)	56 000	0,250	6,72	42,00	1,58		22 400	37 333
Grès (1)	19 300	0,380	27,20	27,80	1,17		6 993	26 806
Grès (7)	25 900	0,200	27,20	27,80			10 792	14 389
Grès feldspathique (10)	15 800	0,290					6 124	12 540
Silt (7)	36 300	0,170	34,70	32,10			15 513	18 333

Matériaux	Module de Young E (MPa)	Coefficient de Poisson v	Cohésion Co (Mpa)	Angle friction (°)	Résistance en traction T (Mpa)	Angle de dilatation (°)	Shear Modulus G (Mpa)	Bulk Modulus K (Mpa)
Calcaire (7)	47 600	0,240	6,72	14,40			19 194	30 513
Calcaire, Montréal (10)	63 500	0,252					25 359	42 675
Calcaire, USA (10)	62 100	0,251					24 820	41 566
Calcaire, Bavaria (10)	57 700	0,250					23 080	38 467
Shale (7)	24 100	0,160	38,40	48,00			10 388	11 814
Silt (1)	26 300	0,220	34,70	32,10			10 779	15 655
AUTRES								
Magnétite massive (10)	103 800	0,160					44 741	50 882
Magnétite, USA (10)	109 000	0,087					50 132	44 000
Pyrite massive (10)	164 900	0,175					70 170	84 564
Lead-Zinc Sulfide (3)	38 571	0,286	2,00	25,50	1,50	3,00	15 000	30 000
Roche non altérée (2)	50 000 à 500 000							
Roche fracturée (2)	5 000 à 50 000							

CONTACTS*	Module de Young E (MPa)	Coefficient Poisson v	Cohesion Co (Mpa)	Angle friction (°)	Résistance Traction T (Mpa)	Angle dilatation (°)	Rigidité tangentielle Ks (Mpa/m)	Rigidité Normale Kn (Mpa/m)
Contacts (4)			0,00	22	0,00	0,00	1,1	5,11
Couloirs de déformation (8)			N'interviennent pas dans la déformation				0.05	2,2
Failles majeures (8)			N'interviennent pas dans la déformation				1	10,0
Failles secondaires (8)			N'interviennent pas dans la déformation				4	45,00
Contact lithologique (8)			N'interviennent pas dans la déformation				10	100,00
Contact lithologique faille de 3ième ordre (9)			N'interviennent pas dans la déformation				10	50,00
Couloirs de déformation (9)			N'interviennent pas dans la déformation				0,08	2,20
Failles intermédiaires (9)			N'interviennent pas dans la déformation				0,1	4,00
Failles Majeures (3)			0,00	22	0,00		0,00	2500,00
Failles Mineures (3)			0,00	28	0,00		0,00	3500,00

Essais sur échantillons monocristallins	Module de Young E (MPa)	Coefficient Poisson v	dK/dT (Mpa/K)	dG/dT (Mpa/K)	dK/dP	dG/dP	Shear Modulus G (Mpa)	Bulk Modulus K (Mpa)
Quartz (6)	95 567	0,079	-8,50	-0,80	6,40	0,46	44 300	37 800
Orthose ($Or_{79}Ab_{19}$) (6)	69 813	0,283					27 200	53 700
Plagioclases (6)								
Ple albite	73 488	0,285					28 600	56 900
An_{56}	89 228	0,293					34 500	71 900
Ple anorthite	103 372	0,295					39 900	84 200
Muscovite (6)	88 090	0,248					35 300	58 200
Sulfures (6)	17 996	0,343					6 700	19 100
Pyroxènes (6)								
Enstatite	184 024	0,215	-26,80	-11,90	10,80	2,06	75 700	107 800
Ferrosilite	133 149	0,280					52 000	101 000
Diopside	163 646	0,261					64 900	114 000
Augite	146 642	0,243					59 000	95 000
Hornblende (6)	110 753	0,288					43 000	87 000
Olivine (6)								
Forstérite	201 282	0,241	-17,60	-13,60	4,97	1,82	81 100	129 500
Fayalite	135 066	0,332	-24,00	-13,00			50 700	134 000
Calcite (6)	83 805	0,309			4,83		32 000	73 300
Dolomite (6)	118 137	0,293					45 700	94 900

Notes : $K = E / (3 (1 - 2v))$; $G = E / (2 (1+ v))$.

* L'attribution de propriétés mécaniques aux discontinuités est l'un des points les plus difficiles du calibrage d'un modèle UDEC (c'est un sujet encore mal connu, sur lequel la littérature fournit très peu de données). Les modèles cités ici ont été calibrés par des séries d'essais erreur utilisant comme critère la restitution exacte du style tectonique (proportion [déformation interne des blocs/déformation sur les discontinuités] et rejets obtenus respectant l'importance relative des différentes failles). De plus, les propriétés des discontinuités sont très dépendantes de la taille de l'objet considéré et, par conséquent, de la dimension du modèle, ce qui expliquent les grands écarts entre les valeurs.

Références :

(1) Goodman R. E. (1980). Introduction to Rock Mechanics, eds. John Wiley and Sons, New York. (Cité dans le manuel UDEC : UG, 3-91 et 3-92.) Voir aussi Goodman R. E. (1989). Rock Mechanics, second edition, eds John Wiley and Sons, New York, 562 p.

(2) Pusch R. (1995). Rock mechanics on a geological base ; Developments in Geotechnical Engineering 77, Elsevier, Amsterdam, pp. 327-350.

(3) Oliver N. S., Ord A., Valenta R. K., and Upton P. (2001). Deformation, fluid flow, and ore genesis in heterogneous rocks, with examples and numerical models from the Mount Isa district, Australia; Society of Economic Geologists, reviews, v. 14, 2001, pp. 51-74. NOTE : failles décrites comme de larges mylonites avec cataclases, largeur du modèle env, 200m.

(4) Clark S. P. (ed.) (1966). Handbook of Physical Constants ; revised eds., GSA Memoir 97.

(6) Bass J. D. (1995). Elasticity of Minerals, Glasses, and Melts ; A Handbook of Physical Constants (Vol. 2), ed. by Thomas J. Ahrens, AGU, pp. 45-63.

(7) Moreau X. (1997). Petit Guide Pratique de la Cartographie des Paléopressions, UQAM, non publié.

(8) Paramètres du modèle régional Porcupine (2003) : dimension du modèle env. 70 x 30 km (voir feuille Porcupine, 2003).

(9) Paramètres du modèle régional Val d'Or (2002) : dimension du modèle env. 70 x 70 km (voir feuille Val d'Or, 2002). Voir Rafini S. (2002), La Modélisation Géologique aux Éléments Distincts, UQAM, non publié.

(10) Birch F. (1966). Compressibility ; Elastic Constants, inHandbook of Physical constants, revised edition by Clark S. P. , GSA Memoir 97.

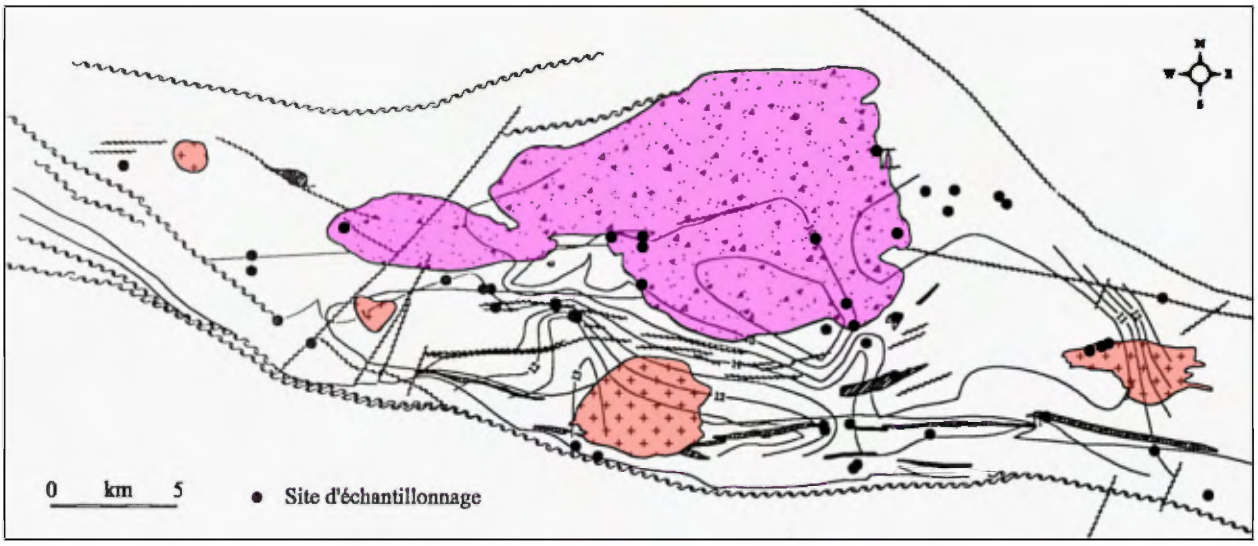


Figure 1. Zonalité régionale $\delta^{18}O_{quartz}$ des filons à quartz-tourmaline-carbonates. Isocontours en ‰. Modifié de Pitre (2000). Retour au texte.

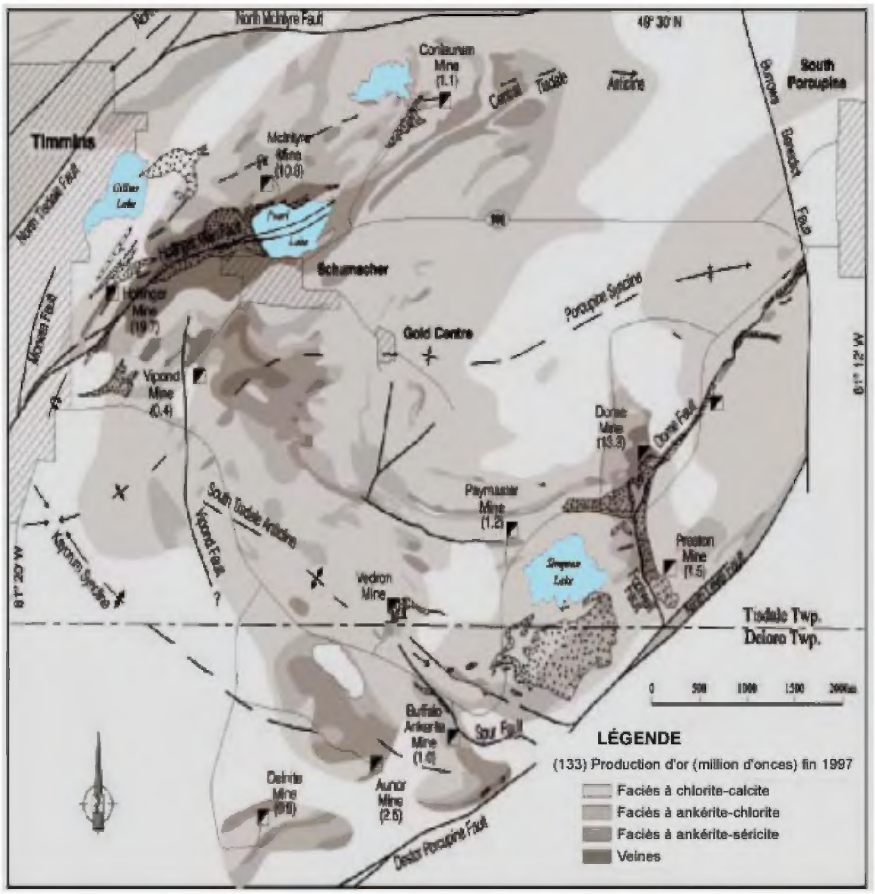


Figure 2. Halos d'altération dans la région de Timmins. Modifié de Brisbin (1997). Retour au texte.

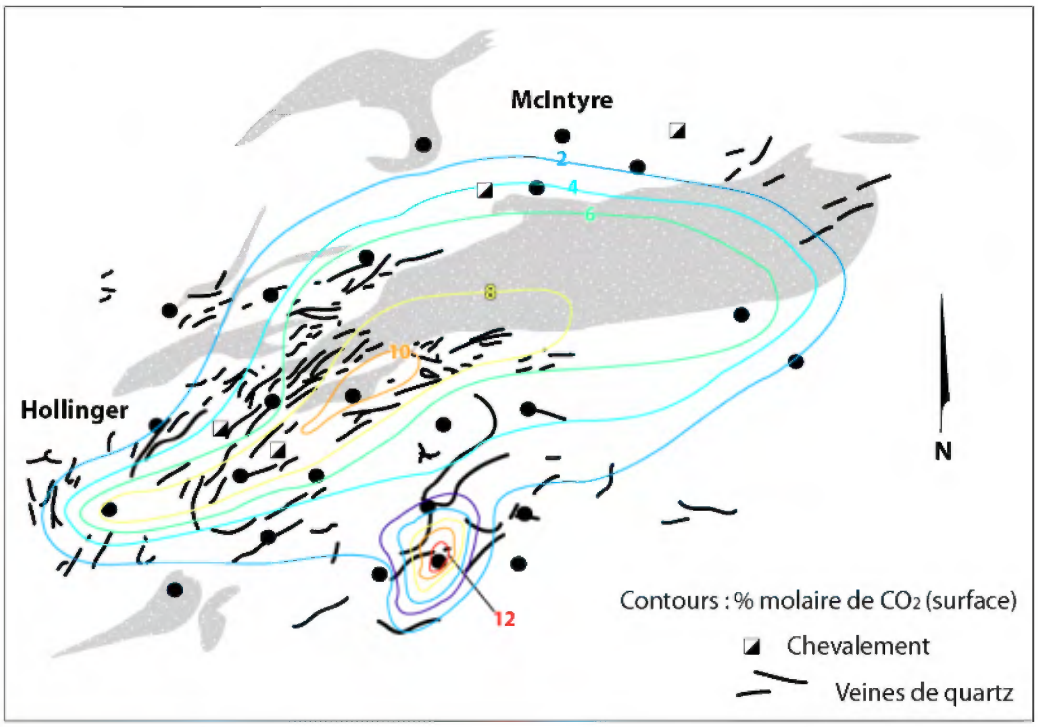


Figure 3. Distribution du CO_2 en surface dans la région de Timmins. Modifié de Hagemann et Cassidy (2000). Retour au texte.

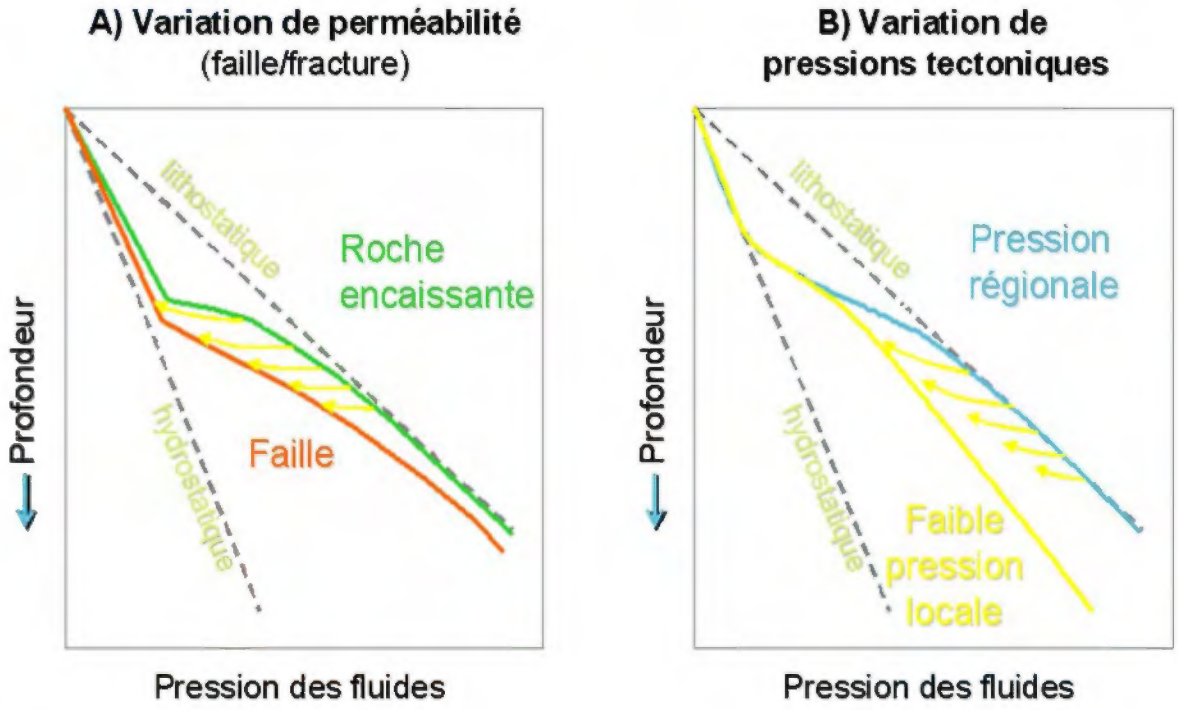


Figure 4. Variations de la pression des fluides dans deux contextes : A) le cas d'une faille où la pression des fluides est inférieure à celle de l'encaissant à cause de la forte perméabilité, ce qui a pour effet de drainer les fluides vers la faille ; B) à une échelle régionale, les variations de pressions tectoniques engendrent des transferts de fluides depuis les zones de fortes pressions vers les zones de faibles pressions. Modifié de Ridley (1993). Retour au texte.

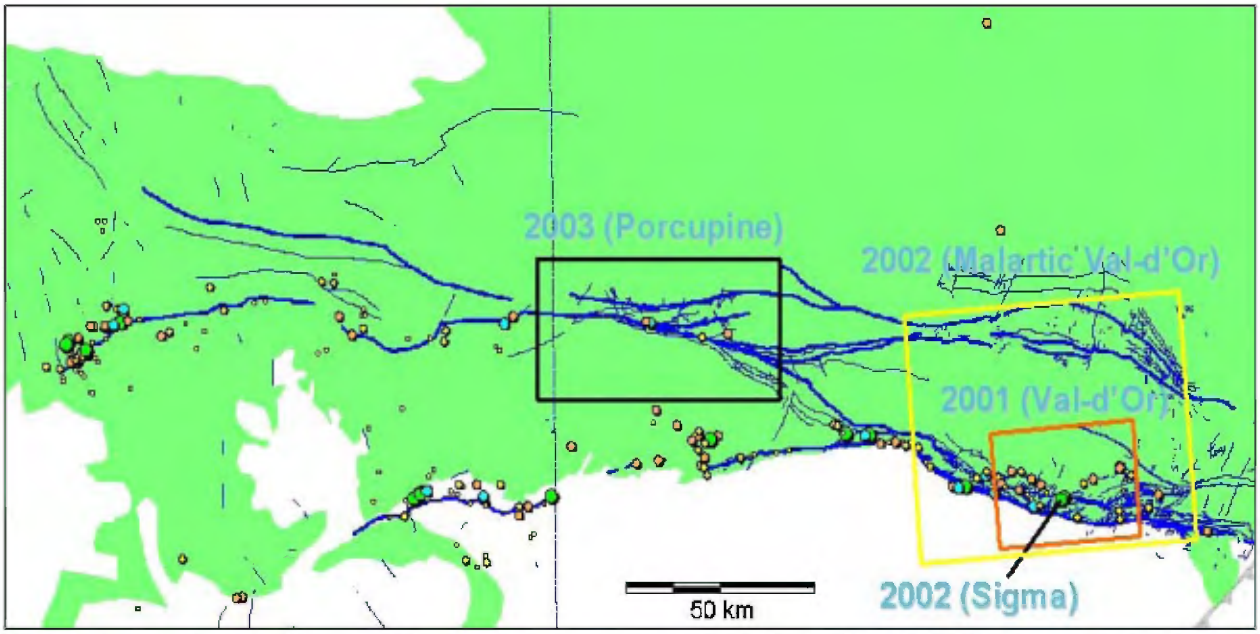


Figure 5. Localisation des modélisations réalisées avec UDEC au CONSOREM depuis 2001 dans la Sous-province d'Abitibi (en vert). Retour au texte.

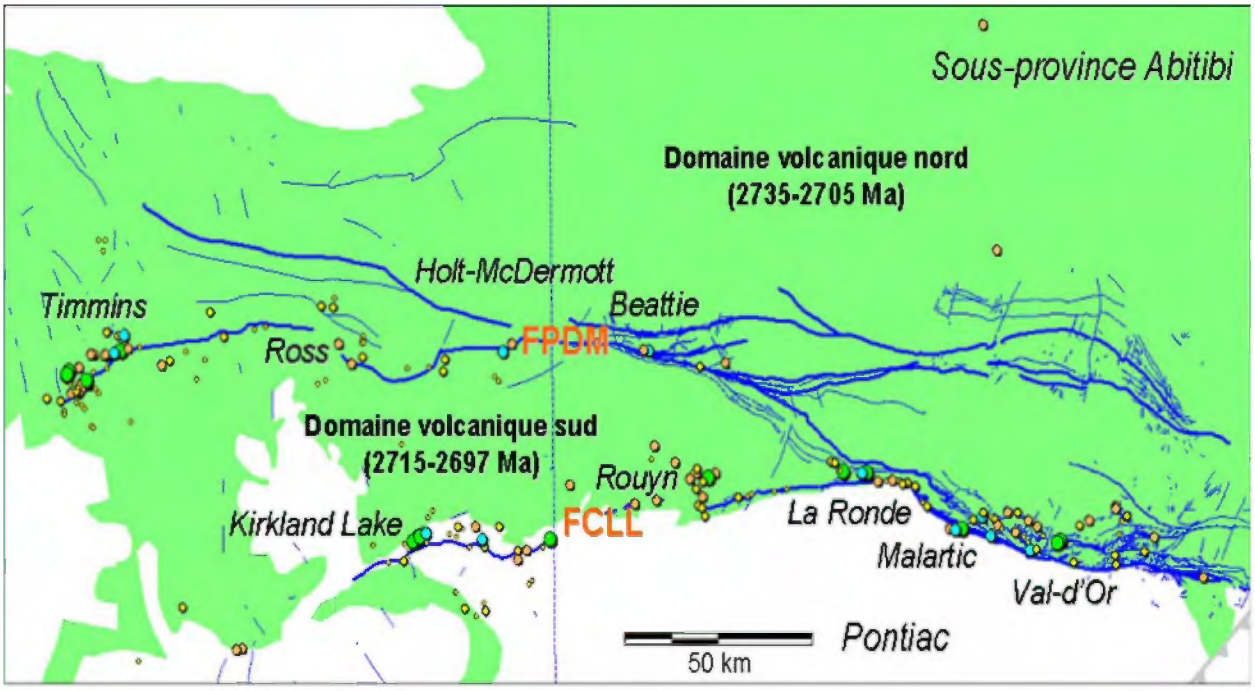


Figure 6. Carte régionale de l'Abitibi montrant les principaux camps miniers. Faille Porcupine-Destor-Manneville (FPDM) et Faille Cadillac Larder Lake (FCLL). Retour au texte.

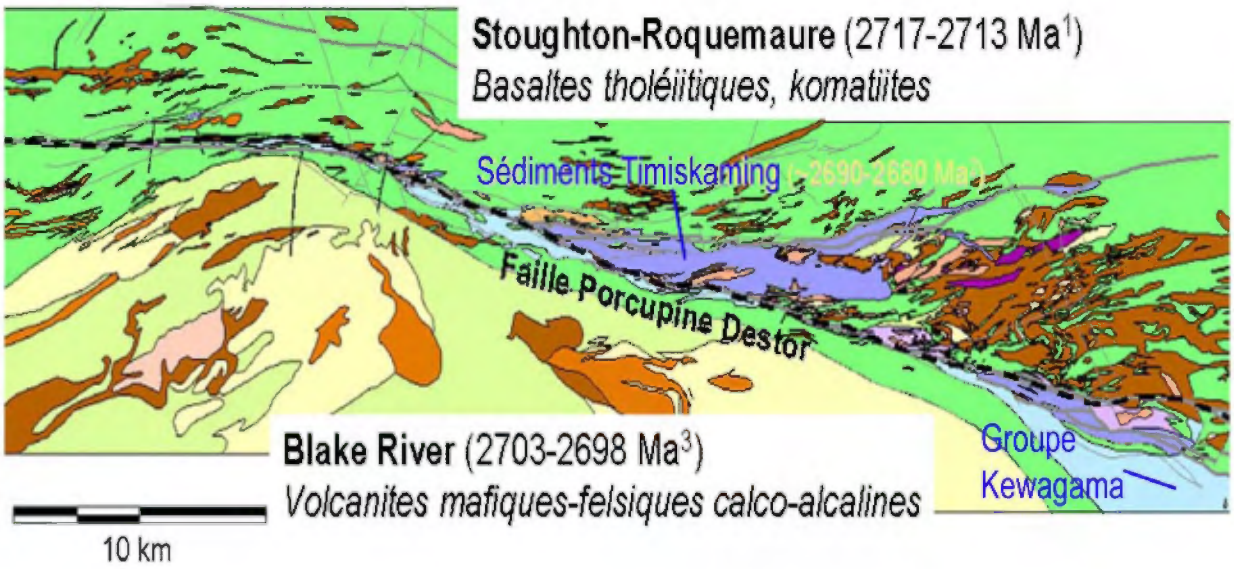


Figure 7. Géologie le long de la FPDM. Géologie d'après une compilation de Cambior. [1]Corfu, 1993; [2]Mueller et al., 1996; [3]Mortensen, 1993. Formation de Duparquet = sédiments Timiskaming. Retour au texte.

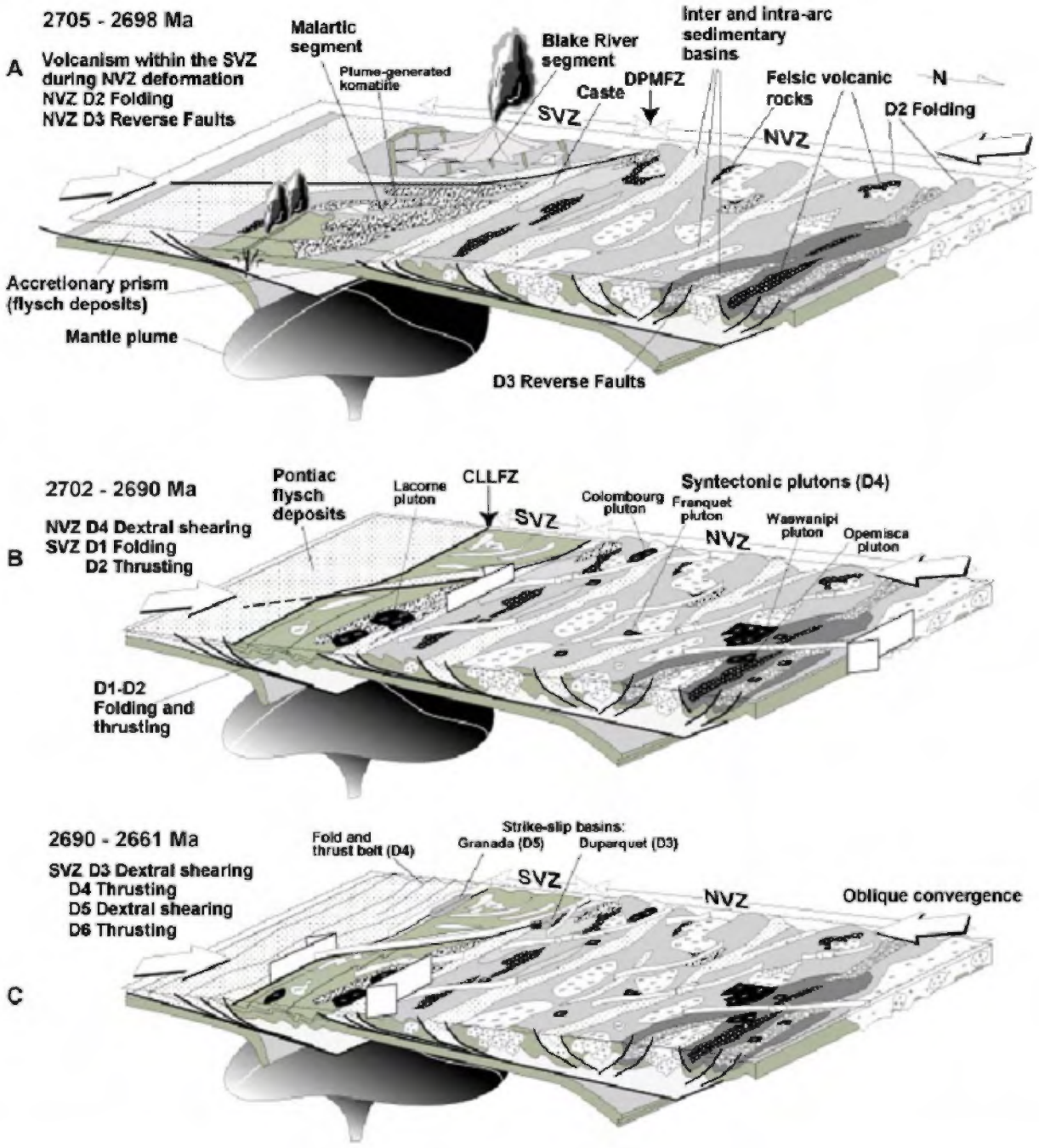


Figure 8. Étapes de la déformation progressive dans les zones volcaniques nord et sud selon Daigneault et al. (2003). Retour au texte.

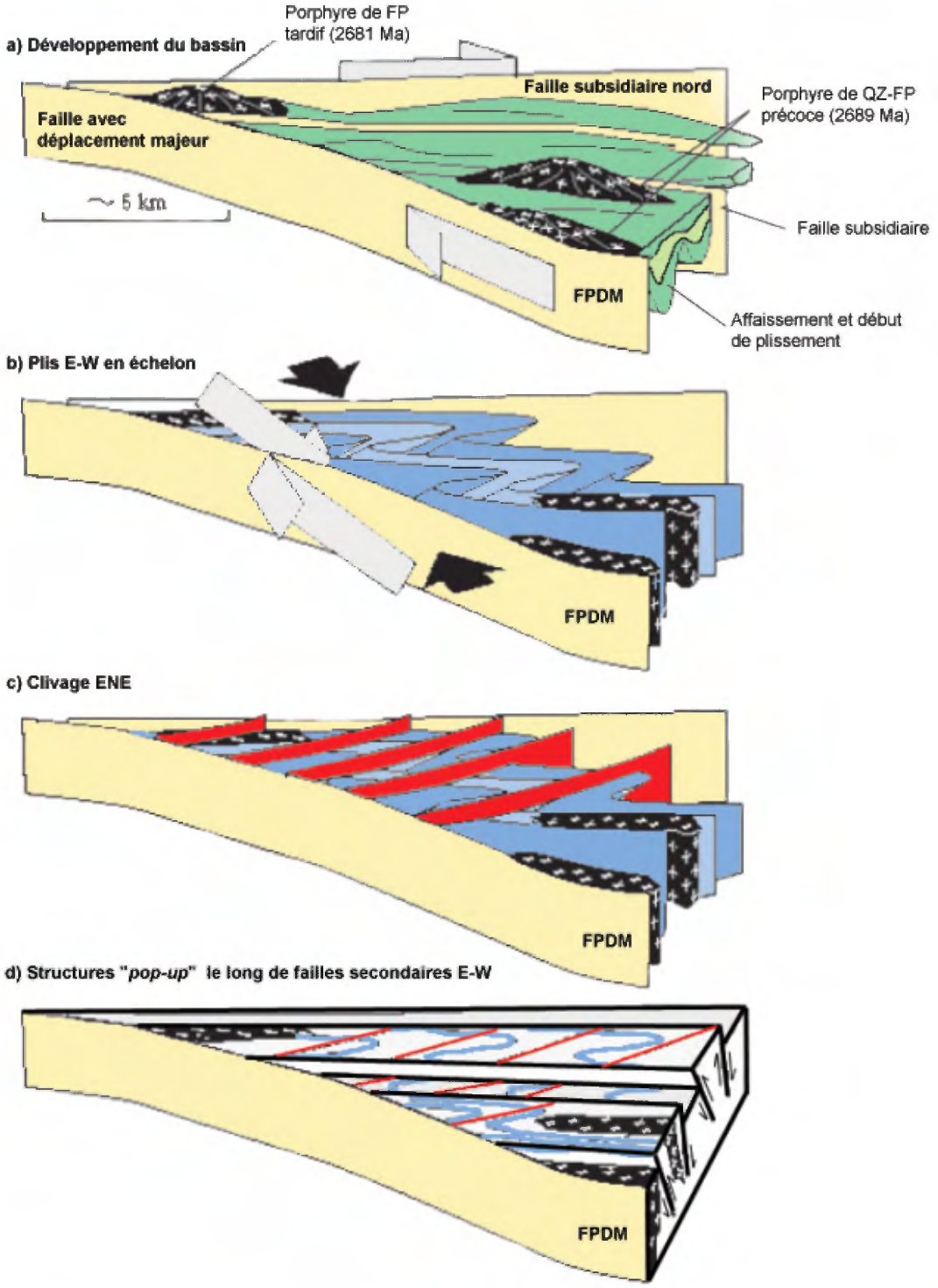


Figure 9. Étapes de déformation dans le secteur de Duparquet. Modifié de Mueller et al. (1996). Retour au texte.

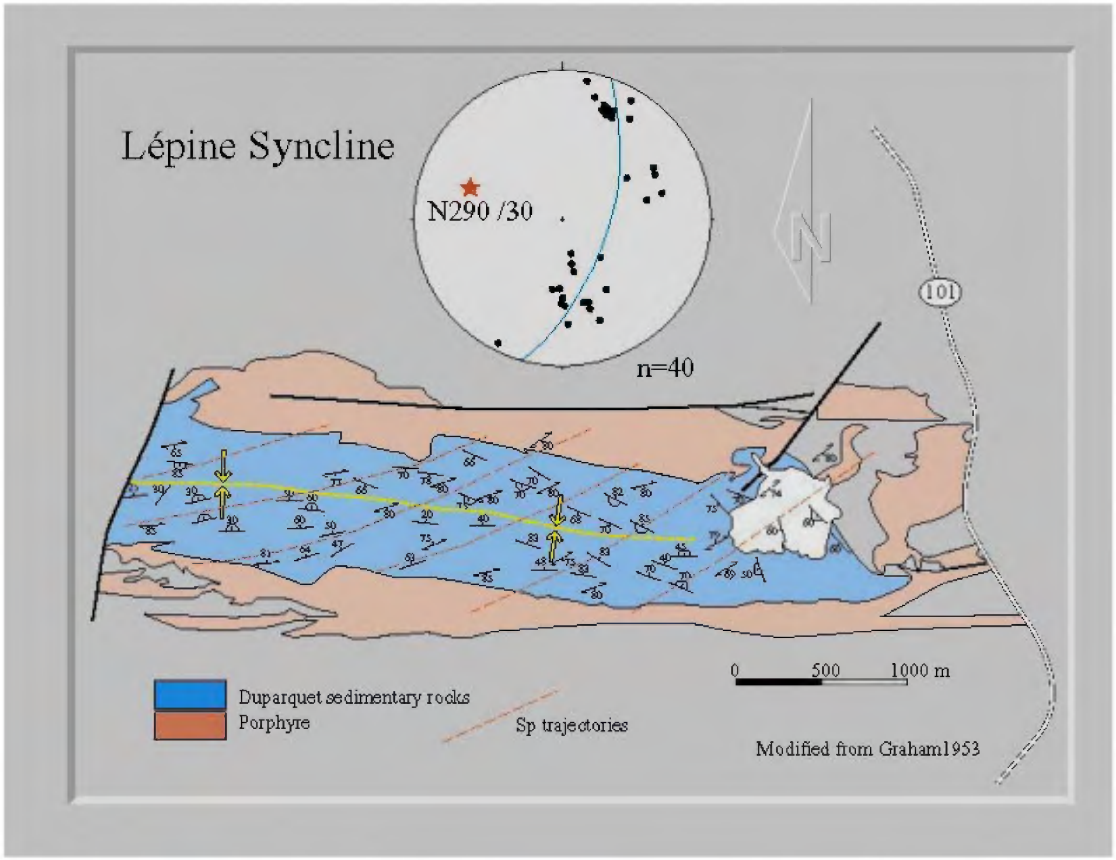
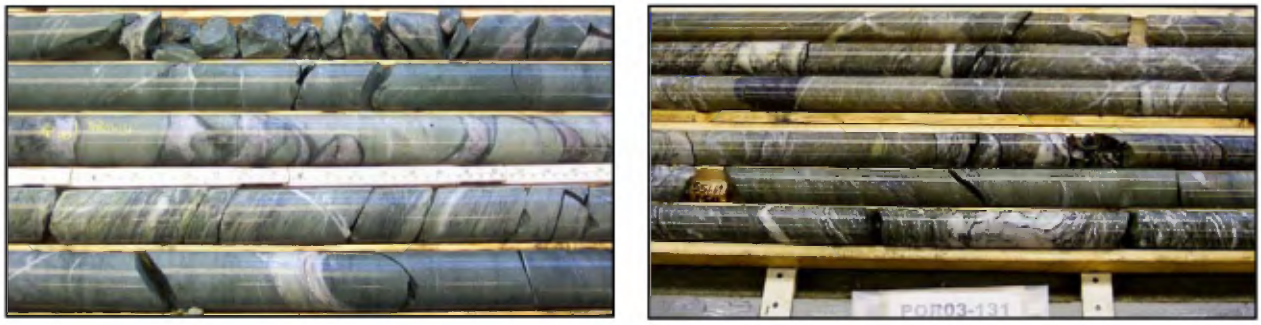
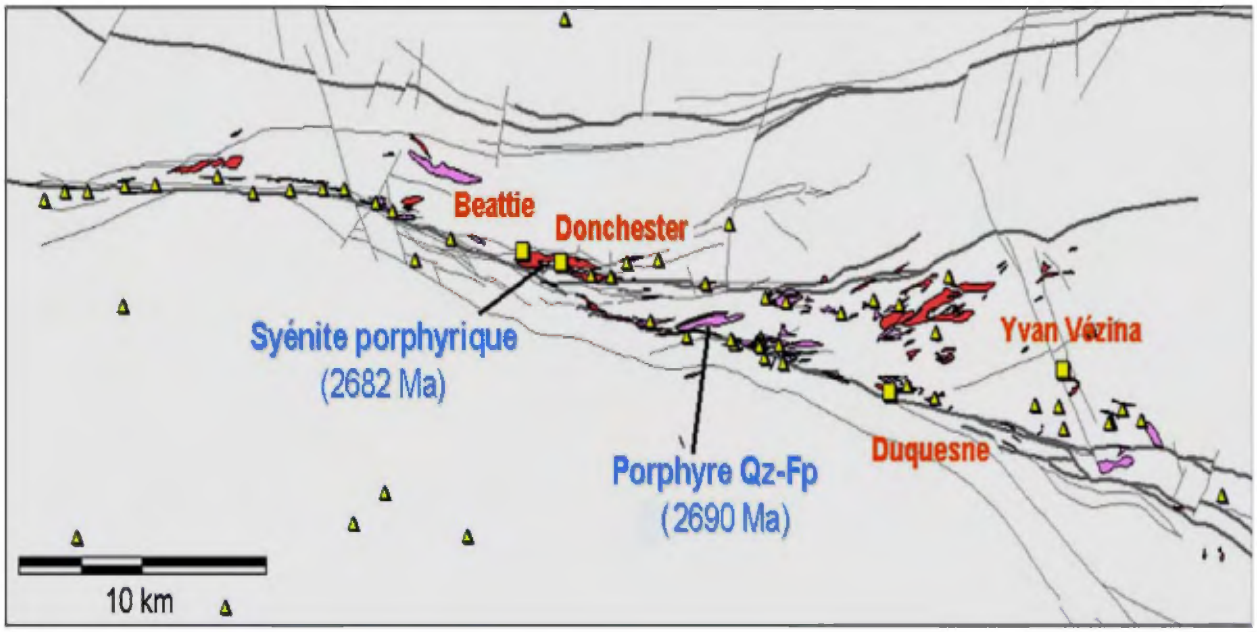


Figure 10. Relation structurale montrant la schistosité recoupant la trace axiale du synclinal de Lépine (d'après Daigneault, données non publiées). Retour au texte.

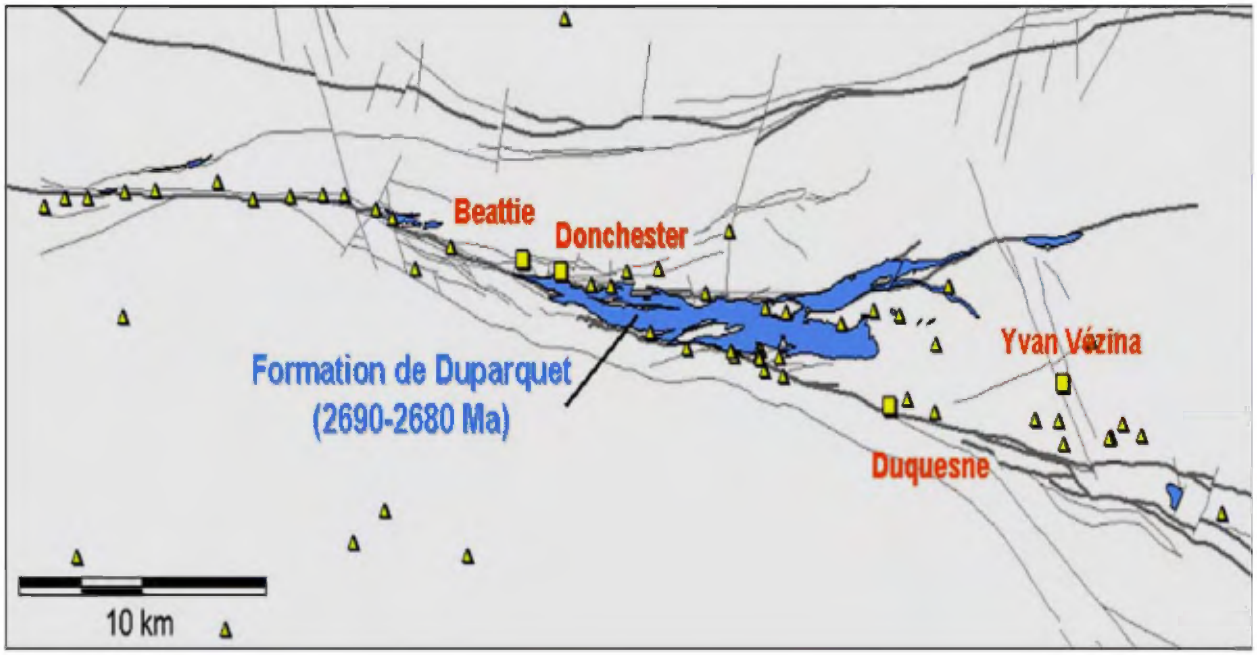


A **B**

Figure 11. A) Basaltes en bordure de la FPDM montrant l'hétérogénéité de la déformation dans le forage POR03-131, secteur Nemrod. B) Roches ultramafiques au cœur de la FPDM dans le forage POR03-131, secteur Nemrod. Gracieuseté de Cambior. Retour au texte.



A)



B)

Figure 12. Localisation des mines (carrés) et de quelques indices (triangles) le long de la FPDM avec A) la position des intrusions et dates (Mueller et al., 1995) et B) les sédiments de la Formation de Duparquet. Retour au texte.

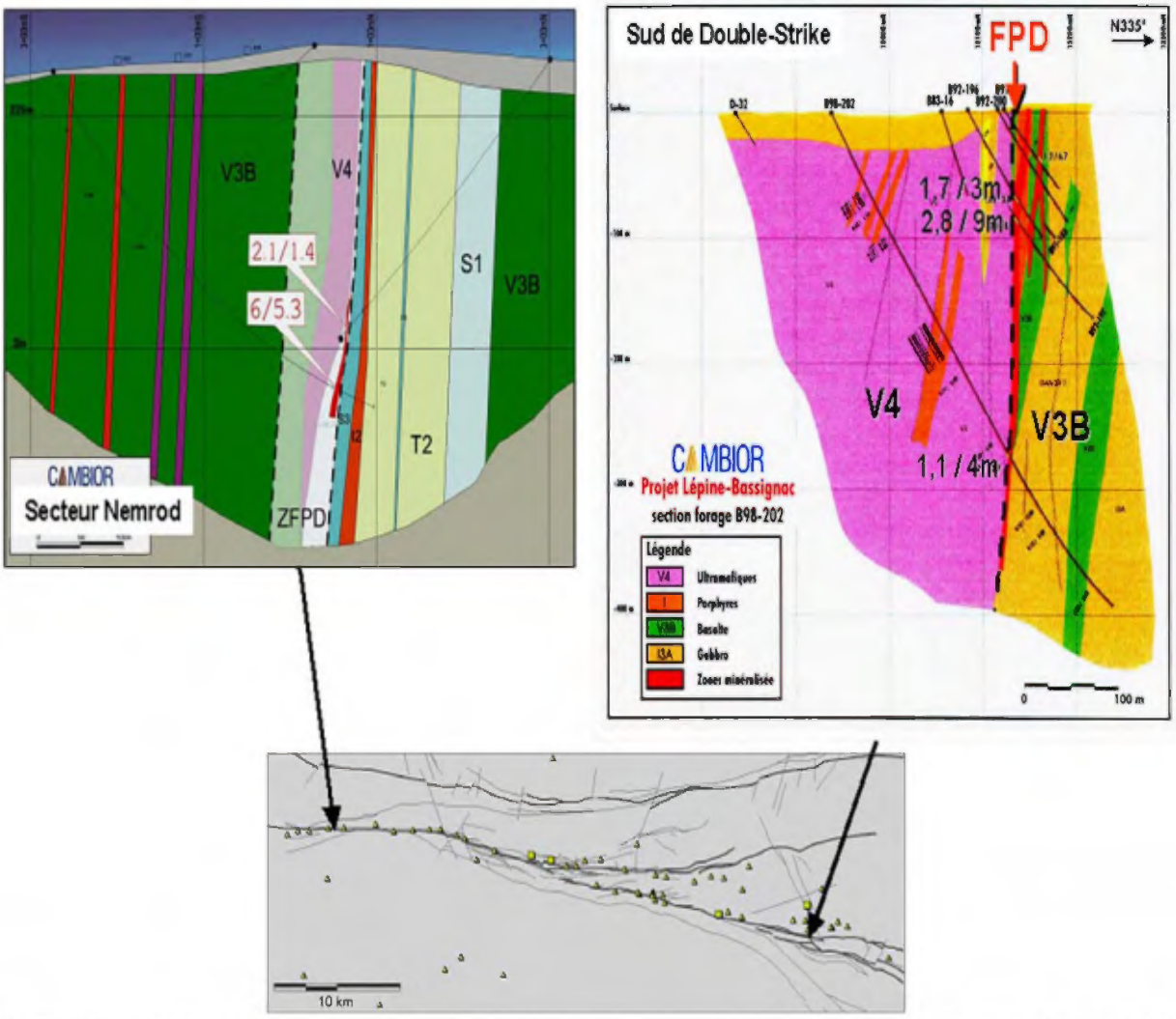


Figure 13. Exemples d'indices minéralisés à contrôles structuraux plaqués le long de la FPDM. Gracieuseté de Cambior. Retour au texte.

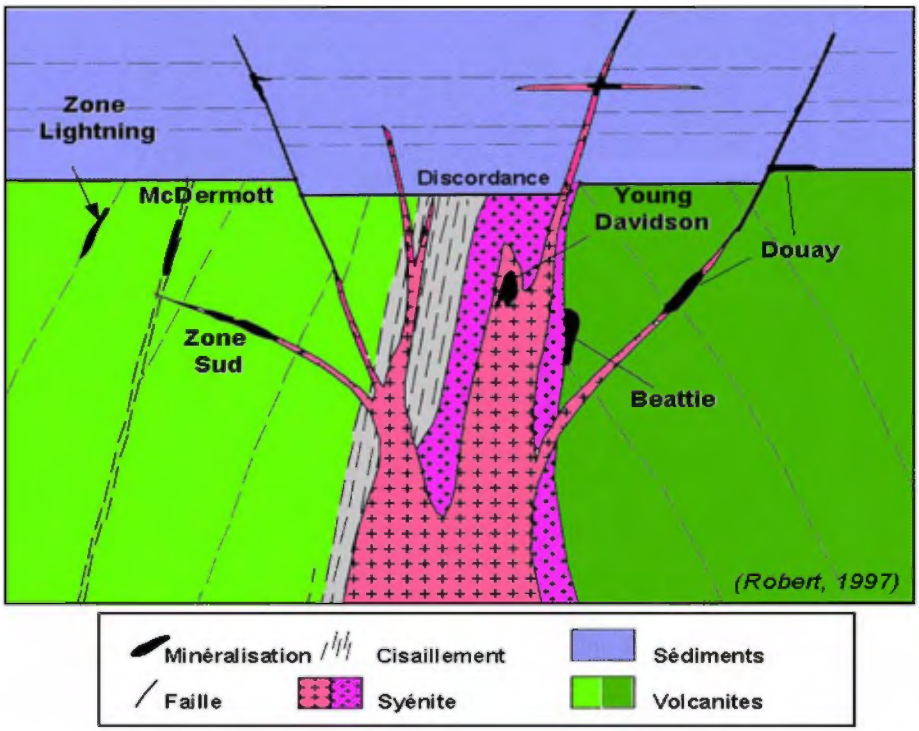


Figure 14. Modèle synthétique résumant l'emplacement de différentes minéralisations aurifères associées à des syénites en Abitibi (d'après Robert, 1997). Retour au texte.

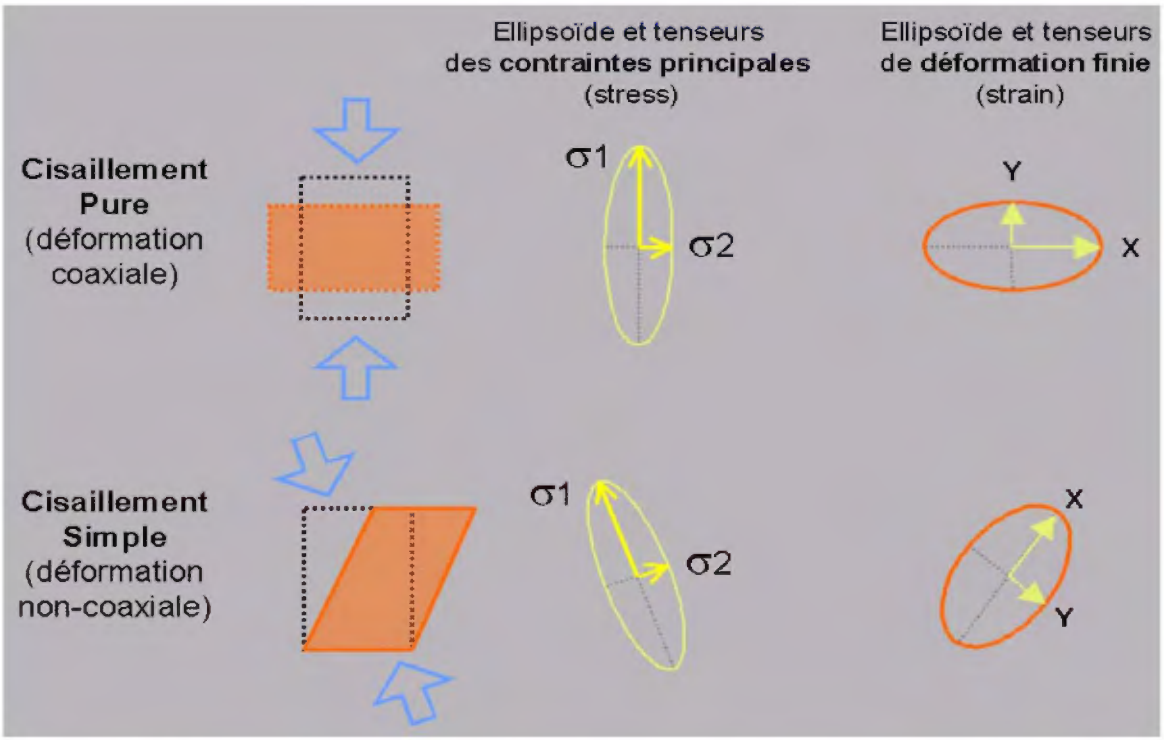


Figure 15. Relations entre les contraintes principales et les axes de la déformation finie pour des comportements en cisaillement pure et simple. Retour au texte.

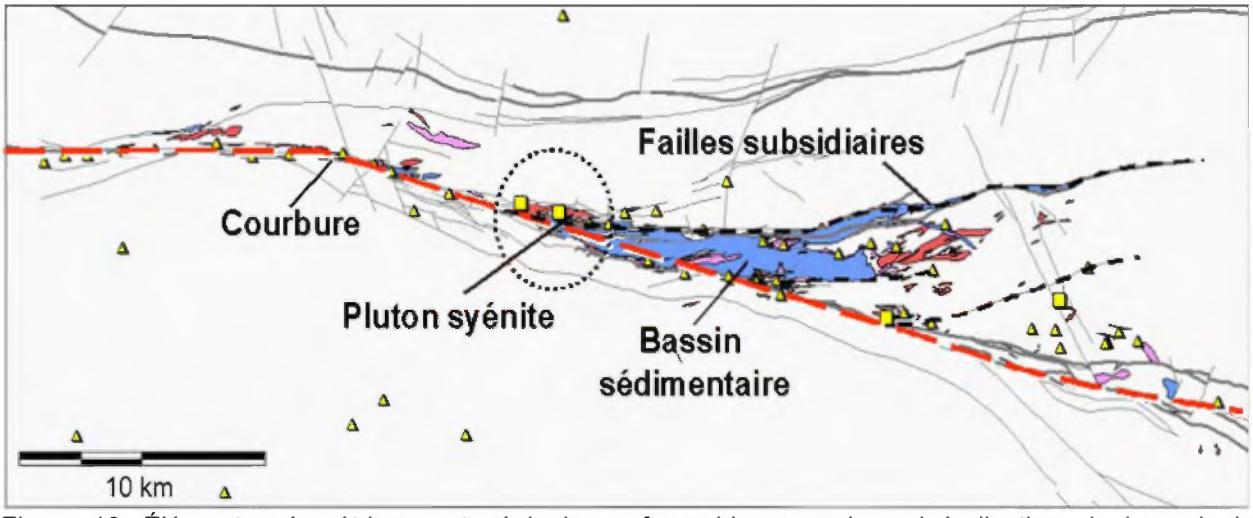


Figure 16. Éléments géométriques et géologiques favorables pour les minéralisations le long de la FPDM : zone de failles de la FPDM (rouge), changement de direction à un point d'inflexion, présence de la syénite à la jonction de la faille subsidiaire de Donchester et la FPDM et bassin sédimentaire de Duparquet. **Retour au texte 1** ; **Retour au texte2**

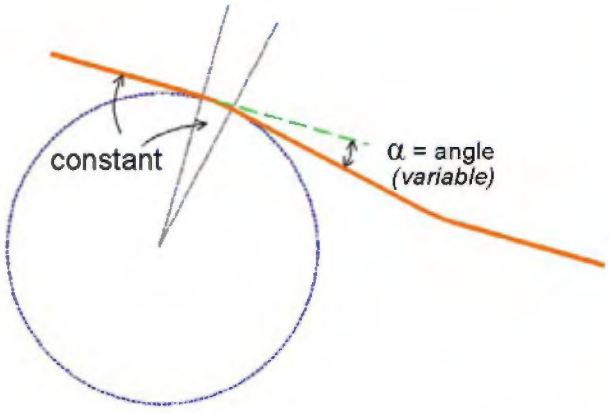


Figure 17. Paramètres de construction pour les trois modèles théoriques. La faille (en trait rouge) mime la géométrie de la FPDM. Retour au texte.

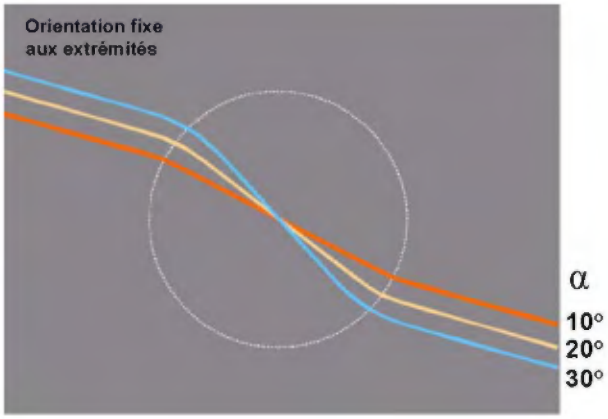


Figure 18. Disposition des trois blocs modèles utilisés. Pour les trois modèles, le rayon de courbure est le même et les points d'inflexion sont tous disposés sur un même cercle. Retour au texte.

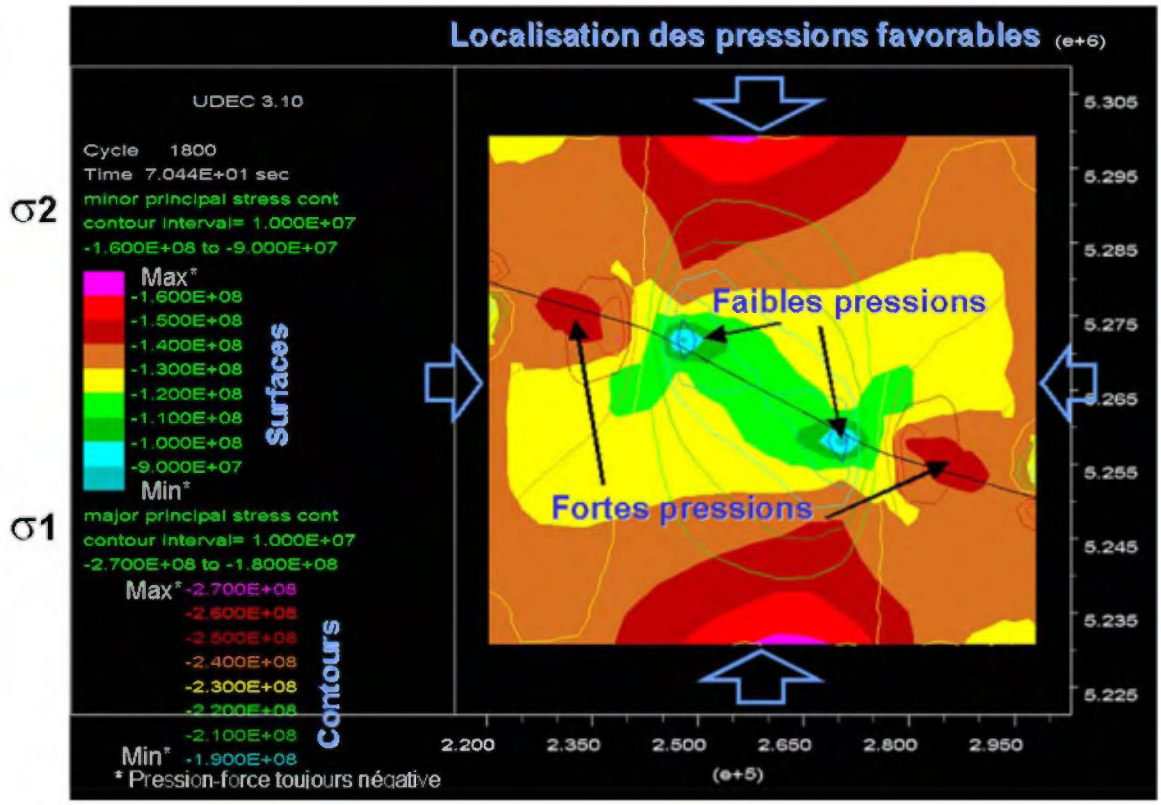


Figure 19. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 10°. Retour au texte.

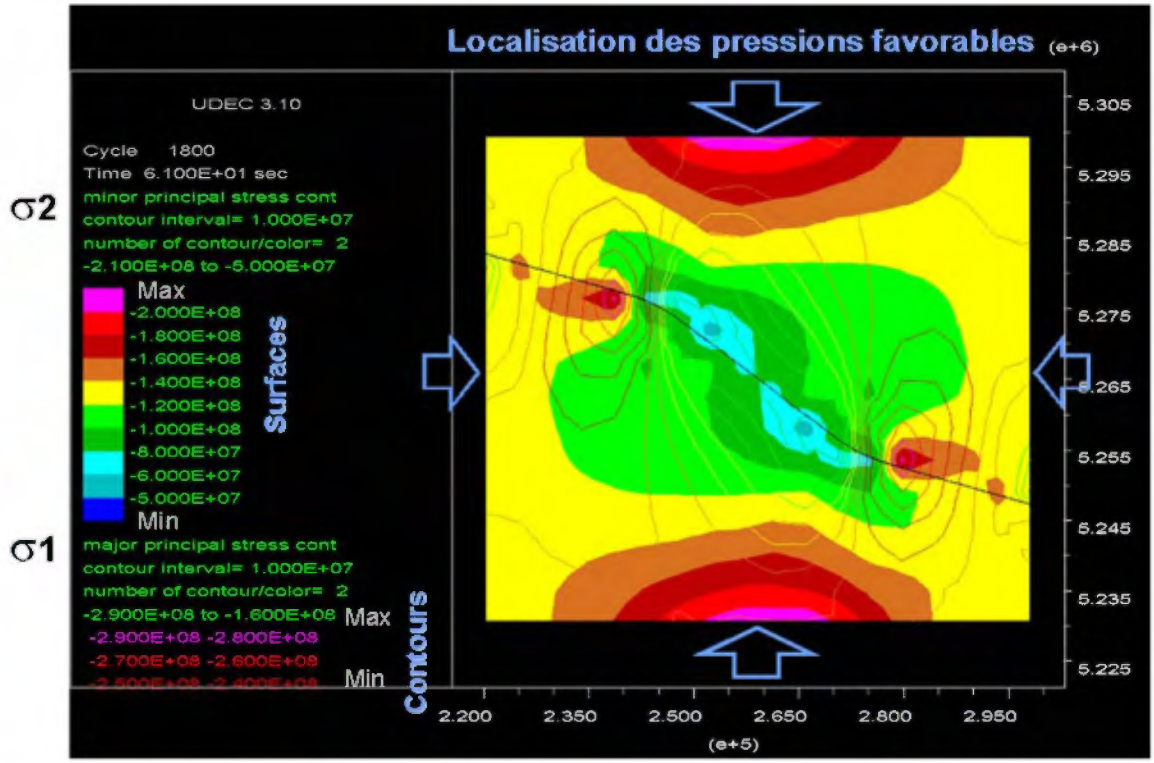


Figure 20. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 20°. Retour au texte.

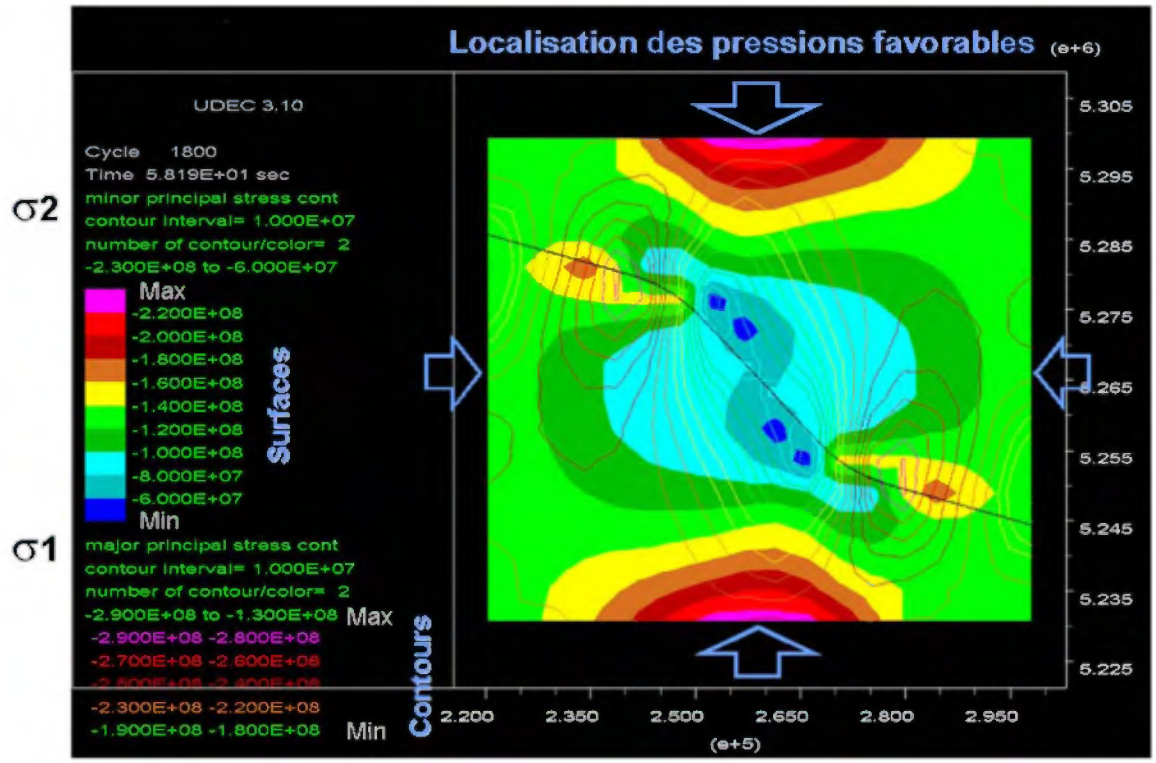


Figure 21. Distribution des pressions minimales σ2 (surfaces de couleurs) et maximales σ1 (lignes de contours) pour une faille avec un angle α de 30°. Retour au texte.

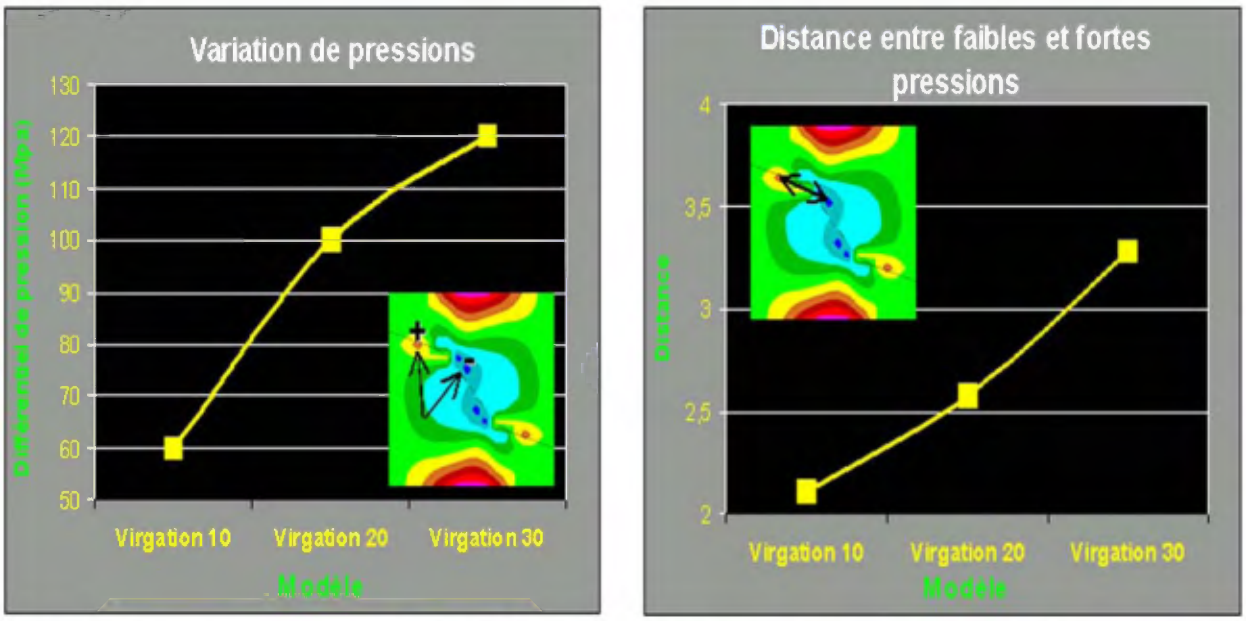


Figure 22. Diagrammes montrant l'effet de l'angle α sur le différentiel de pression et la distance entre les zones de faibles et de fortes pressions le long de failles modélisées pour trois blocs modèles. Retour au texte.

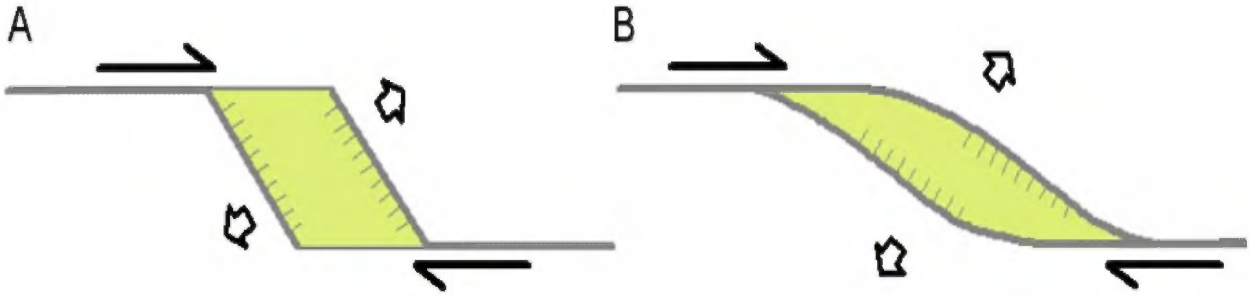


Figure 23. Modèles de bassins sédimentaires de type pull-apart : A) bassin formé par le relais entre deux failles de décrochement disposées en échelons, régime cassant et B) bassin formé dans une zone de tension le long d'une faille de décrochement en régime ductile (d'après Rahe et al., 1998). Retour au texte.

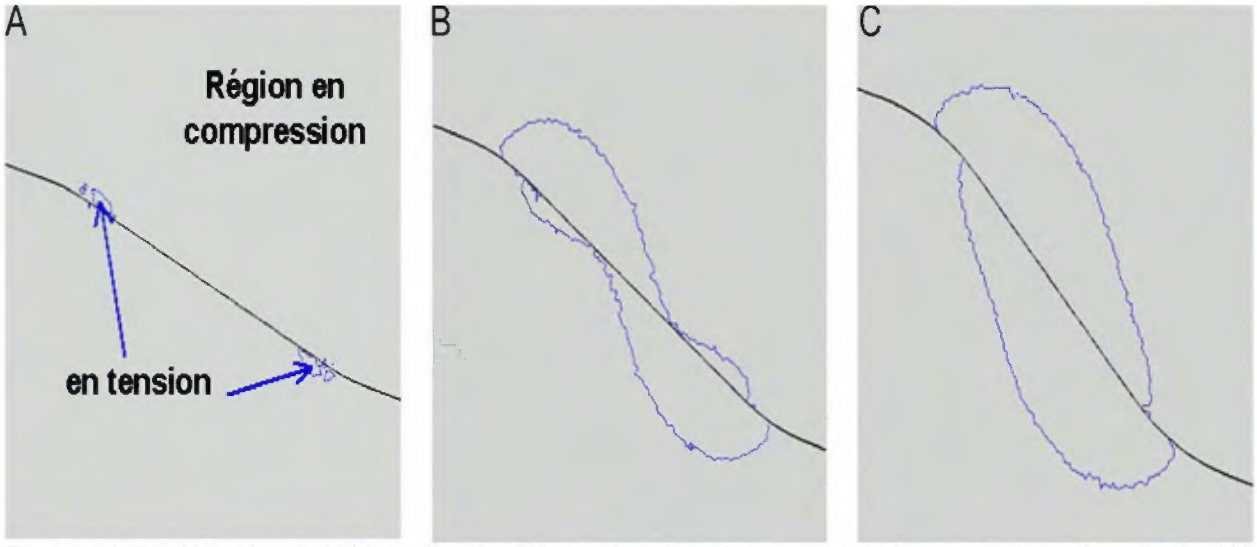


Figure 24. Modélisation à 1800 cycles de déformation des régions en tension pour un angle α de A) 10°, B) 20° et C) 30°. Retour au texte.

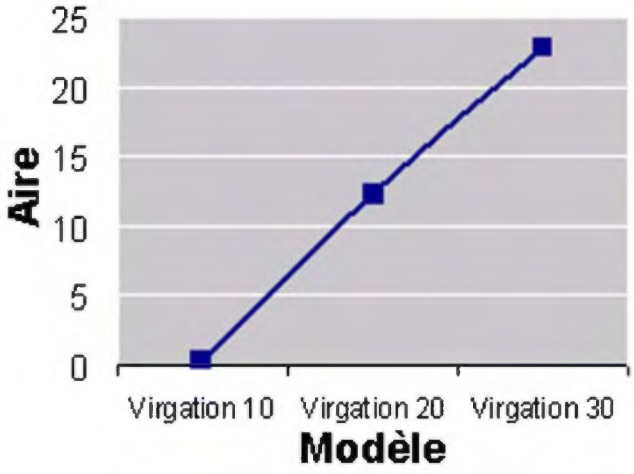


Figure 25. Graphique montrant l'augmentation de l'aire en tension dans les modèles avec un angle α de 10°, 20° et 30°. Référence à la figure 24. Retour au texte.

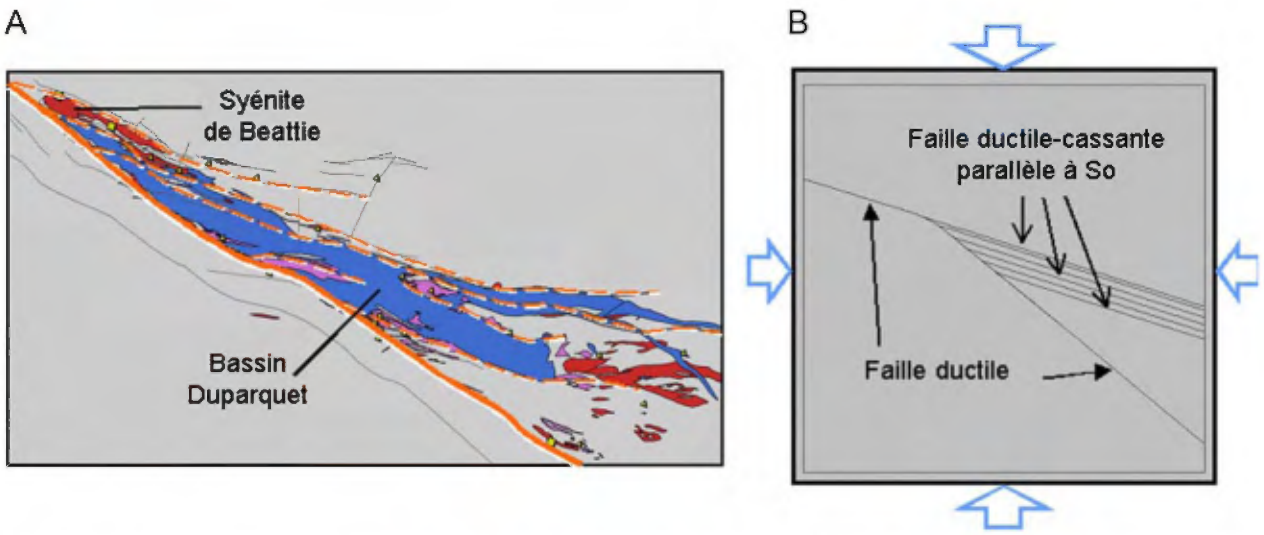


Figure 26. A) éléments géométriques prédominants de la géologie du bassin de Duparquet, FPDM en trait rouge continu et failles subsidiaires en tirets rouges. B) modèle théorique proposé et inspiré de la géologie en A avec un angle α de 20° pour la faille ductile. Retour au texte.

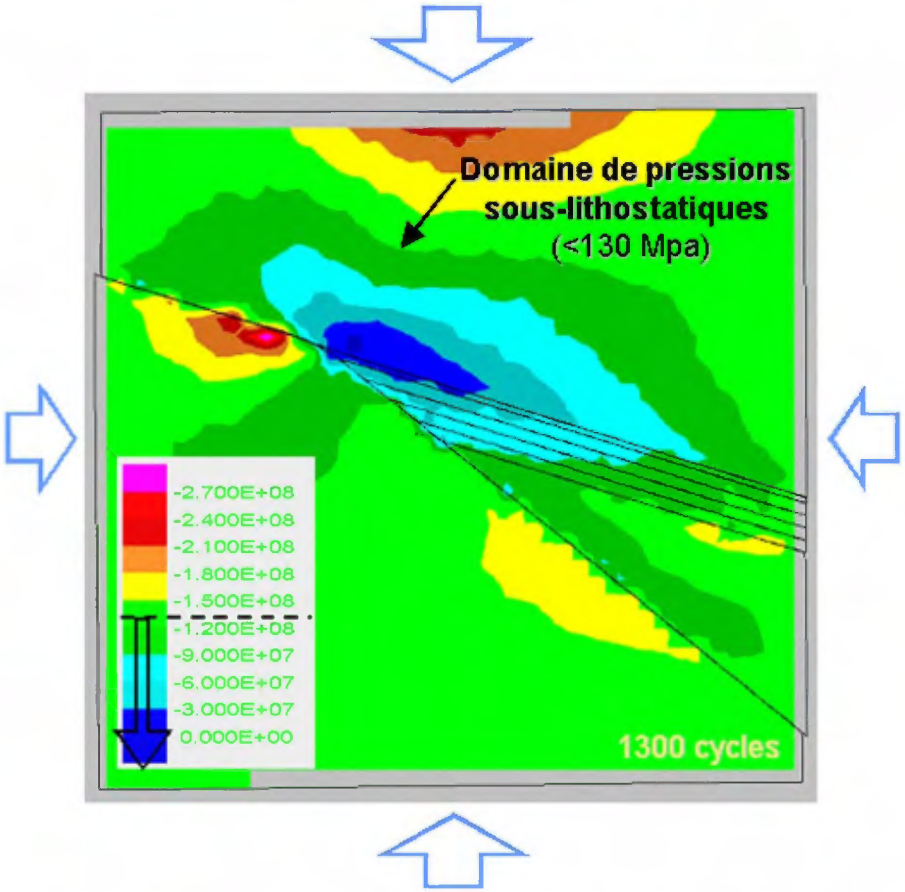


Figure 27. Modélisation à 1300 cycles de déformation incrémentale montrant les zones de fortes pressions (couleurs chaudes) et faibles pressions (couleurs froides). Il est à noter que le domaine de pressions sous-lithostatiques (< 130 Mpa), en vert foncé, est indiqué par la flèche dans la charte de couleurs. Retour au texte.

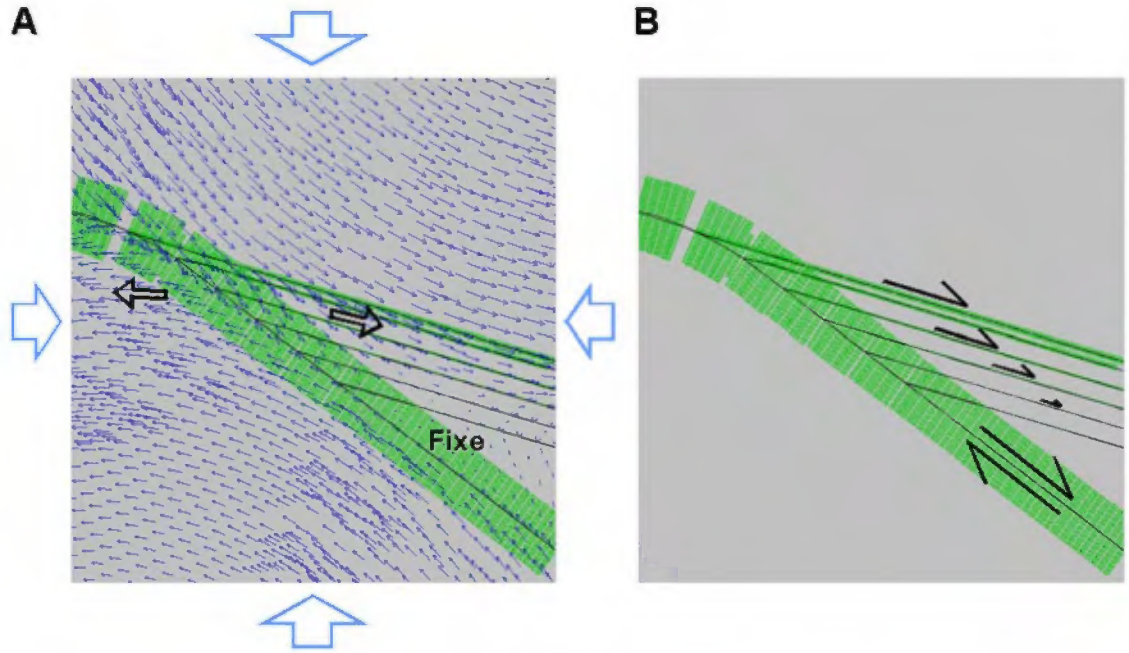


Figure 28. Modélisation à 1300 cycles de déformation incrémentale montrant : A) les vecteurs de vélocité dans les polygones (flèches bleues) et B) le déplacement différentiel (flèches noires) et la quantité de déplacement (en vert) le long de la faille principale. Retour au texte.

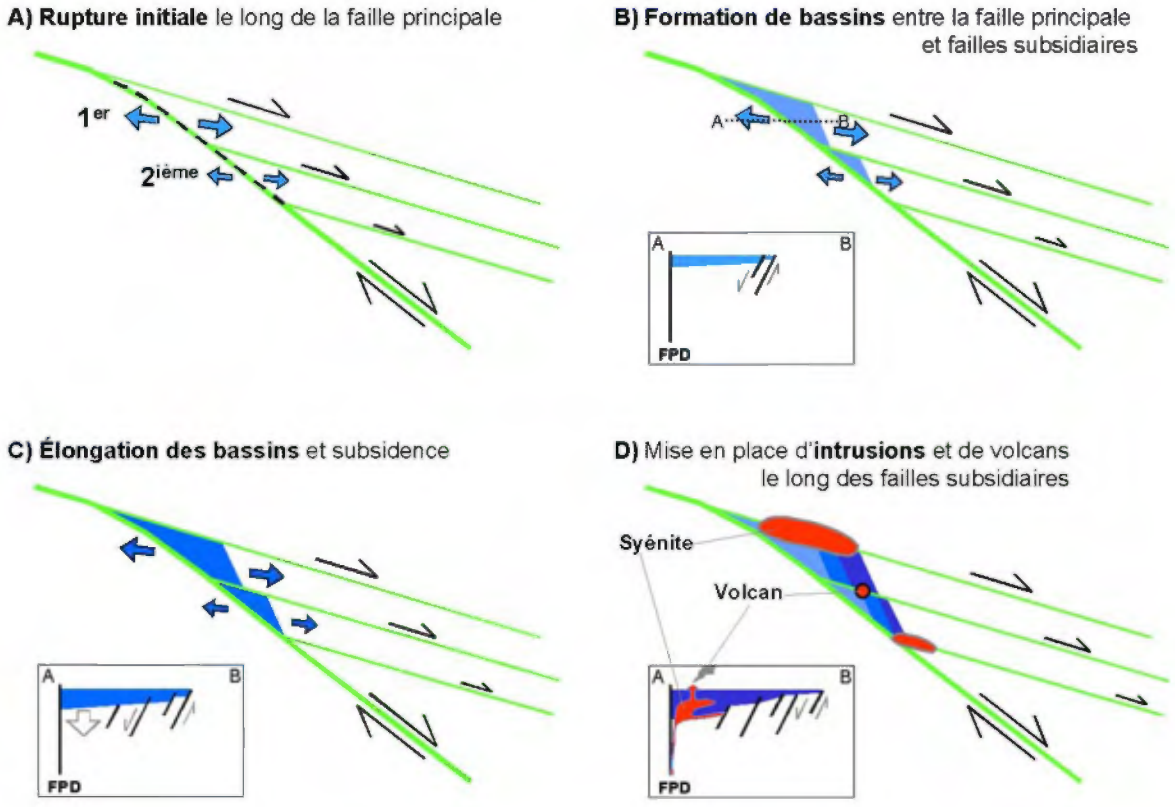


Figure 29. Étapes de formation de bassins sédimentaires inspirées de la simulation avec UDEC. Retour au texte.

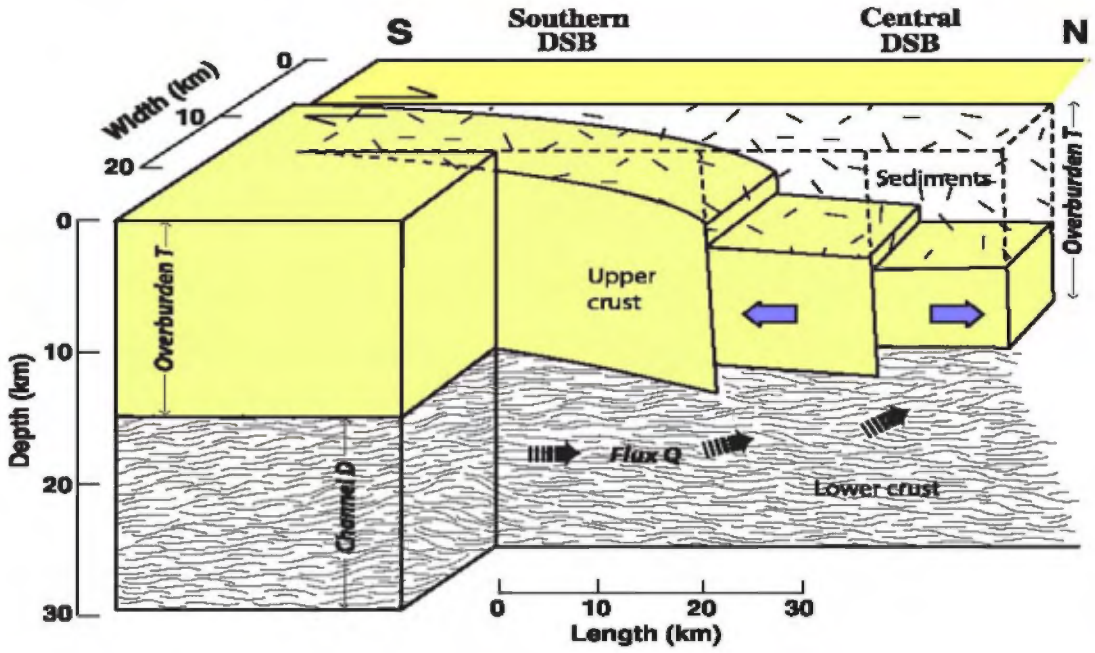


Figure 30. Modèle conceptuel pour le développement de la Mer Morte. Ce modèle s'apparente à celui proposé pour la région de Duparquet (d'après Al-Zoubi, 2002). Retour au texte.



Figure 31. Carte géologique modélisée dans UDEC avec les différentes unités lithologiques utilisées. Retour au texte.

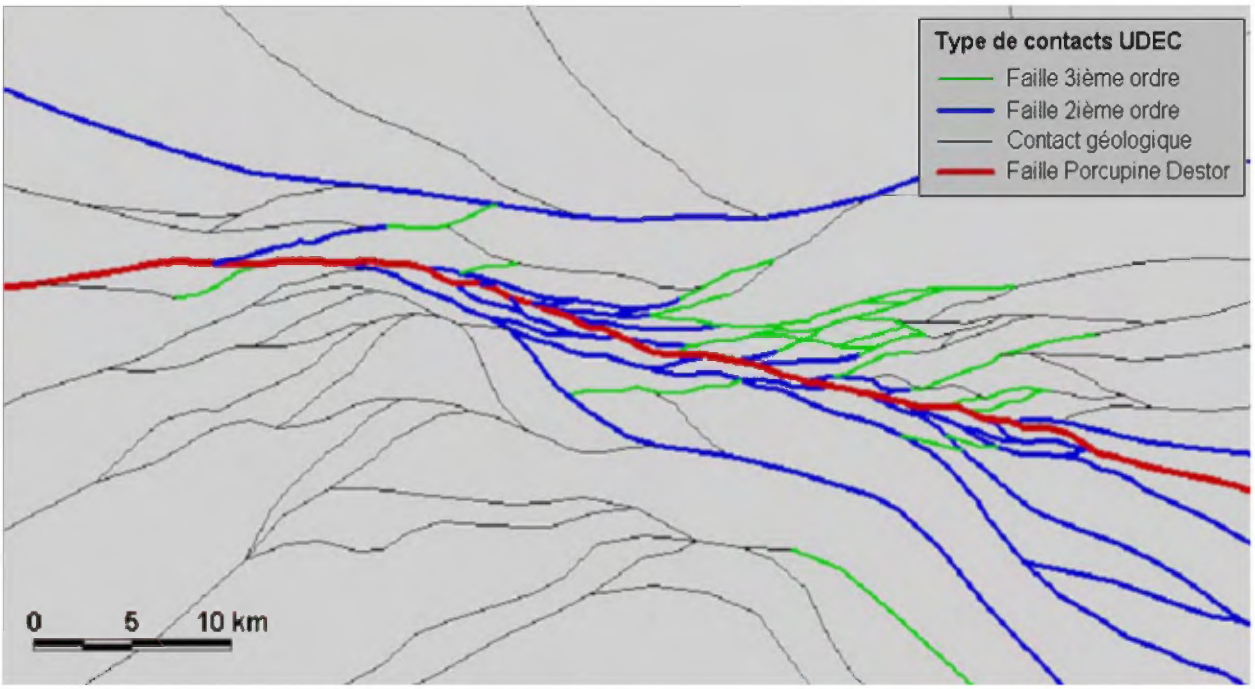


Figure 32. Carte des failles montrant la hiérarchie utilisée dans la modélisation avec UDEC. Retour au texte.

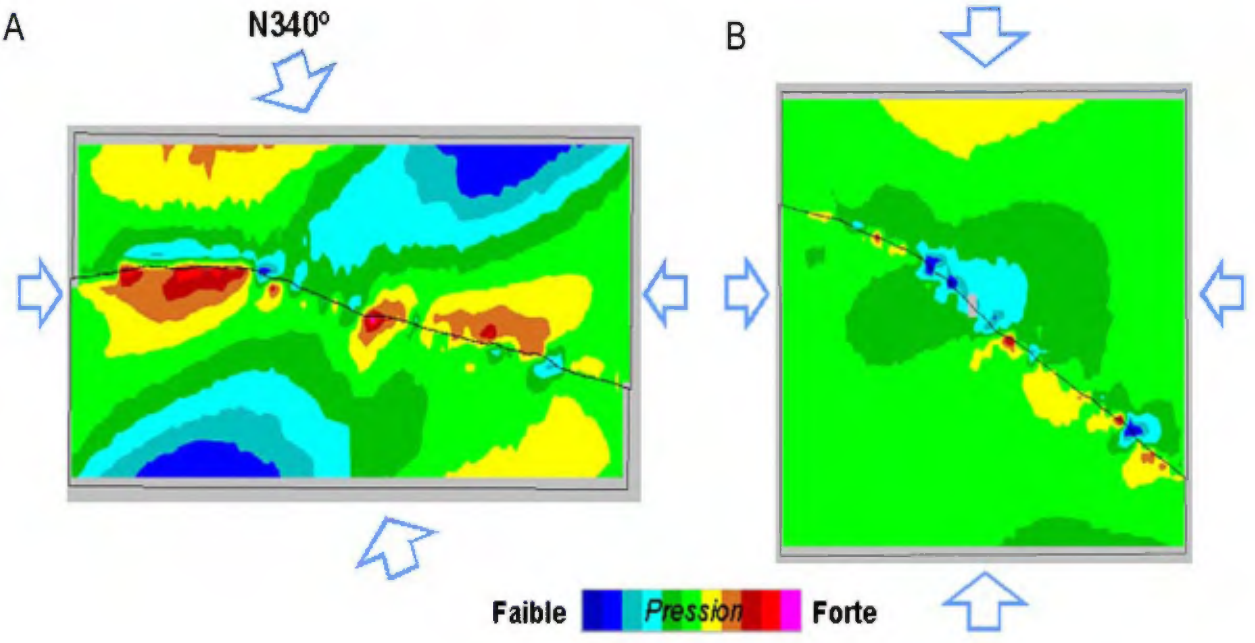


Figure 33. Effets d'une contrainte oblique (A) ou orthogonale (B) sur la distribution des pressions le long de la FPDM. On remarque en (A) les artefacts majeurs engendrés le long des bordures horizontales; ces artefacts sont largement arrondies dans le cas (B). Retour au texte.

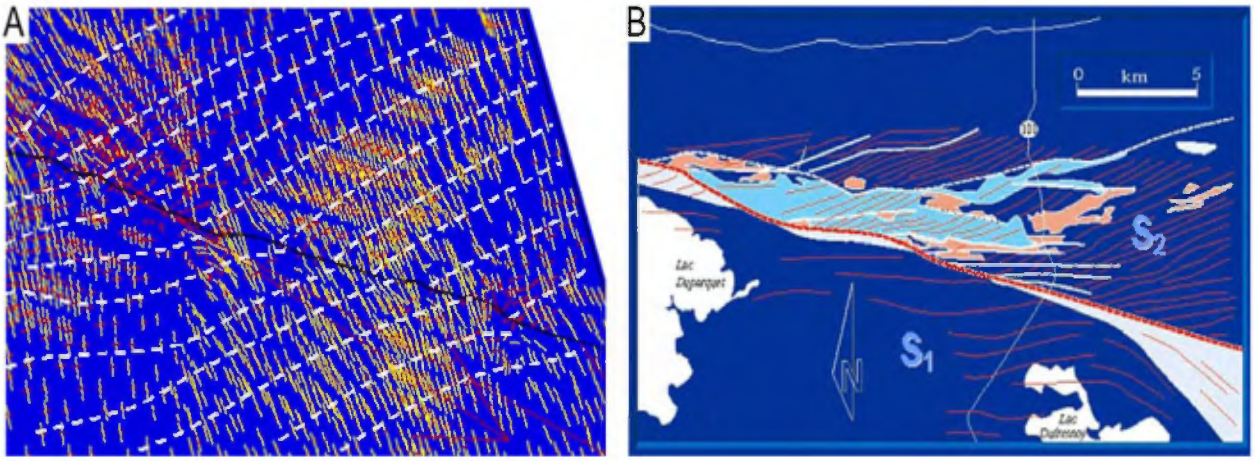


Figure 34. Test de validation le long de la FPDM. A) Carte de la déformation après 3300 cycles avec les axes de la déformation principale X (en vert) et minimale Y (en rouge). La trace de la schistosité théorique (tirets blancs) est interprétée parallèlement aux axes Y. B) Carte des schistosités régionales S_1 (ancienne) et S2 (contemporaine au décrochement dextre) en rouge. Modifié de Beaudry (1990). Retour au texte.

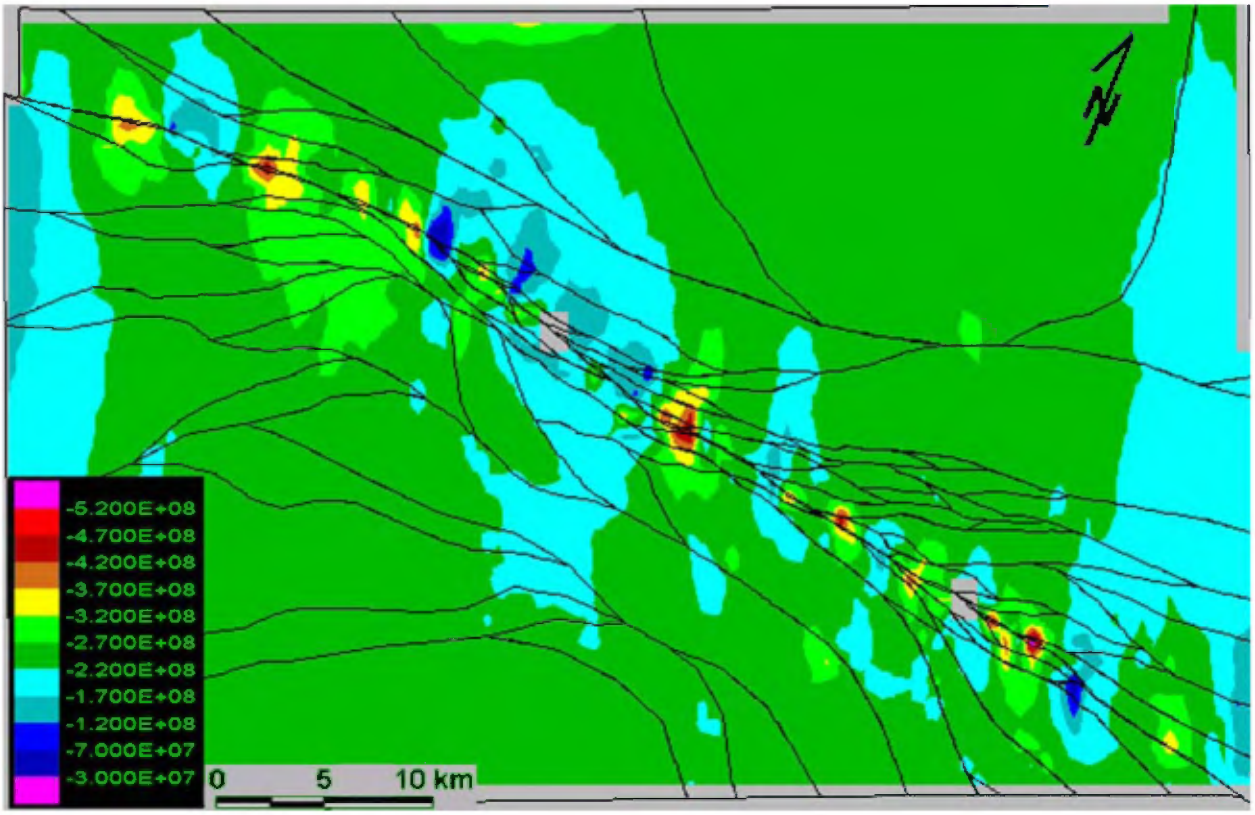


Figure 35. Variations des contraintes maximales (σ1) modélisées le long de la FPDM. Échelle de couleurs en Mpa; les couleurs chaudes représentent les pressions fortes et les couleurs froides représentent les pressions faibles. Retour au texte.

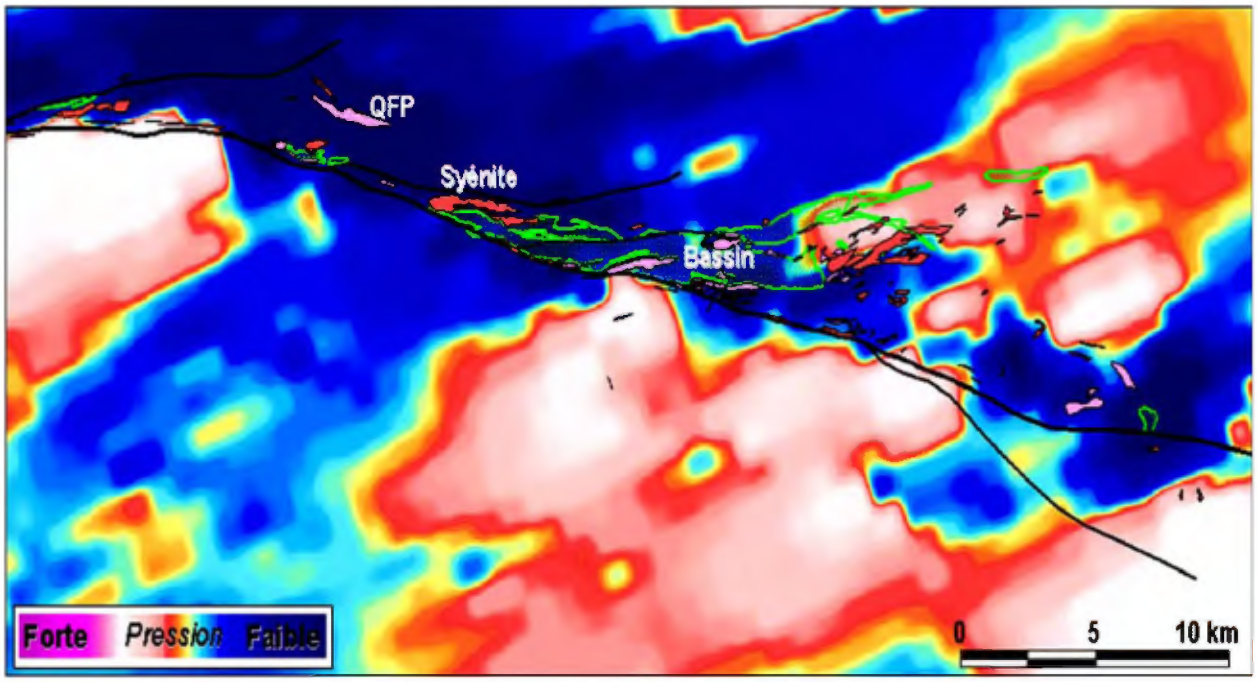


Figure 36. Contraintes minimales (σ2) et position des bassins sédimentaires de Duparquet (contour et pointillé vert), des syénites (rouge) et des porphyres de quartz-feldspath (rose). Retour au texte.

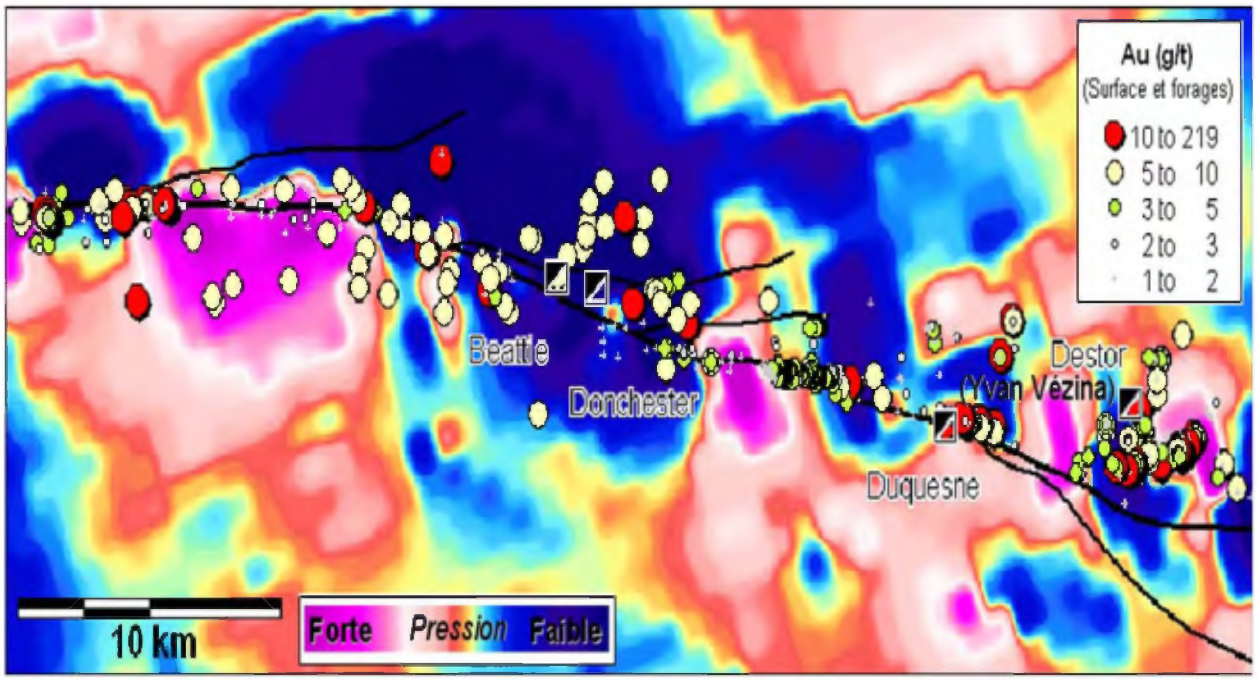


Figure 37. Carte des pressions moyennes (σ1+σ2)/2 et distribution des minéralisations aurifères. Échantillons analysés pour l'or en surface et en forages (données de Cambior et MRNQ). Retour au texte.

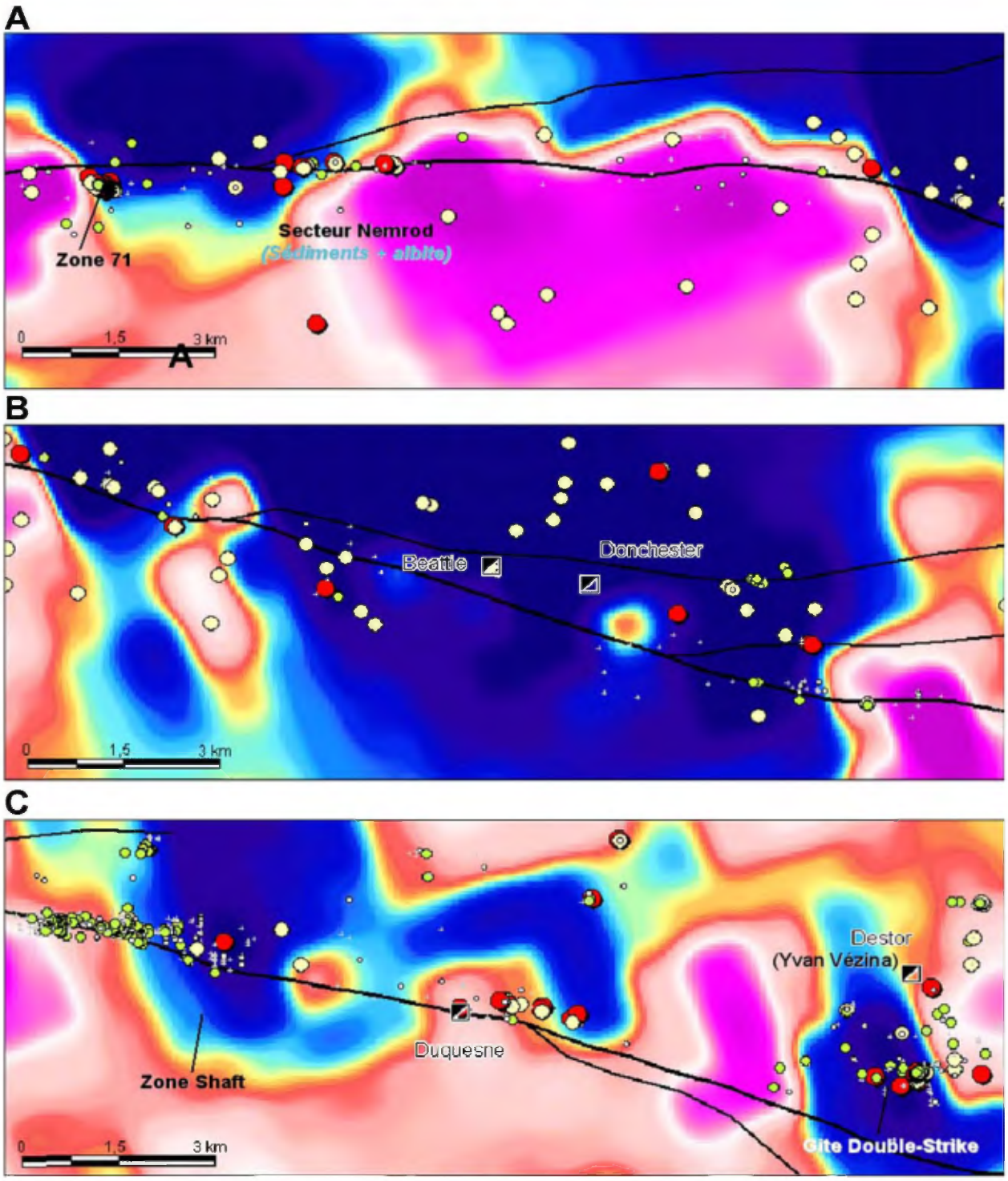


Figure 38. Cartes détaillées de la distribution des pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 par secteurs : A) ouest, B) central et C) est. Échantillons de forages et de terrain analysés pour l'or en g/t (données de Cambior et MNRQ). Même légende que pour la figure 37. Retour au texte 1 ; Retour au texte 2

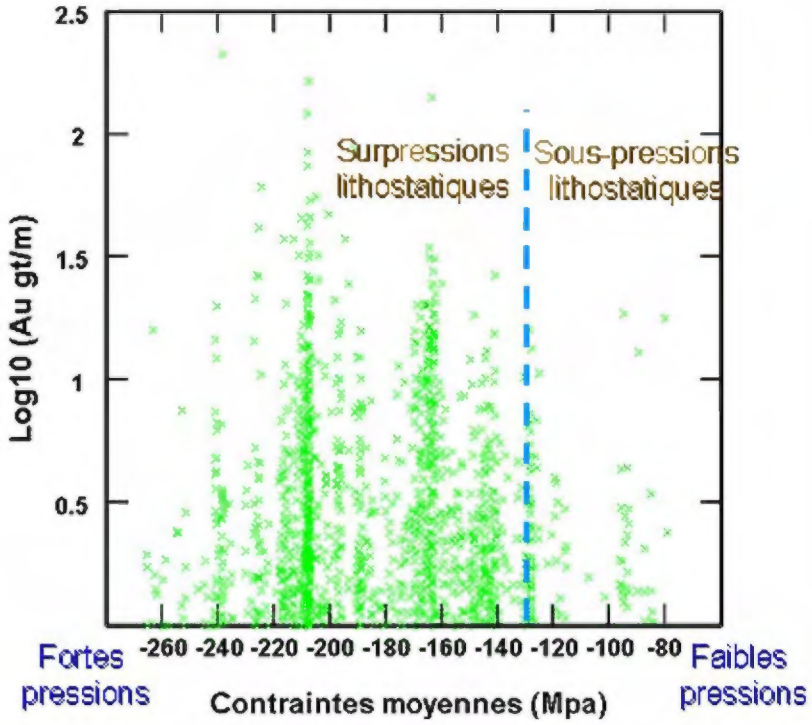


Figure 39. Distribution des contraintes moyennes (σ1+ σ2)/2 en fonction des valeurs aurifères dans les forages (normalisées en Au en g/t par mètre). Données de Cambior. Retour au texte.

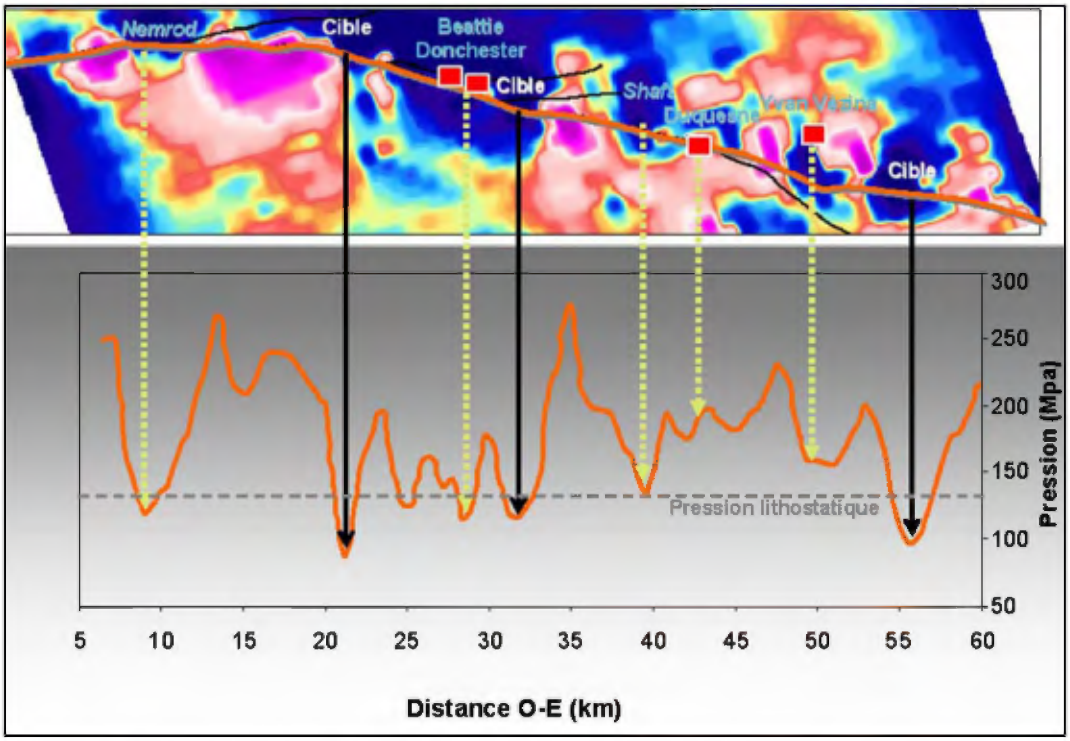


Figure 40. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et la position des mines et des gîtes (en italique). Des cibles d'exploration sont proposées. **Retour au texte 1** ; **Retour au texte 2**

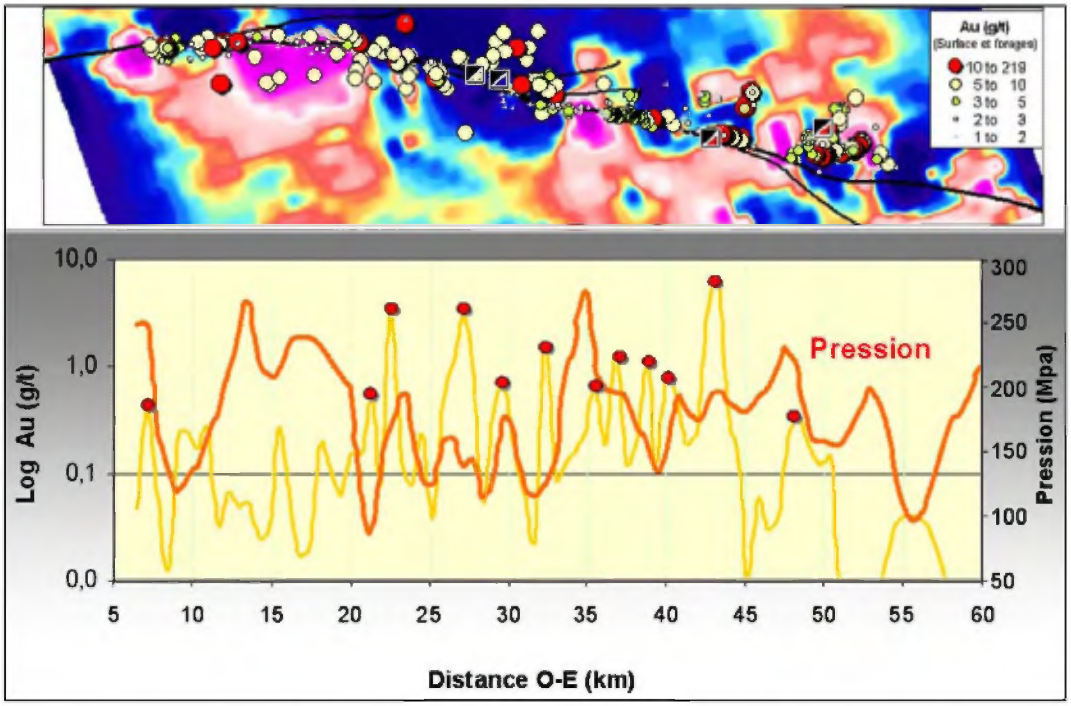


Figure 41. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et la position des indices aurifères. Les points en rouge représentent les plus hautes valeurs en Au. Les valeurs élevées projetées sur la courbe de pressions tombent généralement sur les plus forts gradients de pressions, entre les fortes et faibles pressions. Retour au texte.

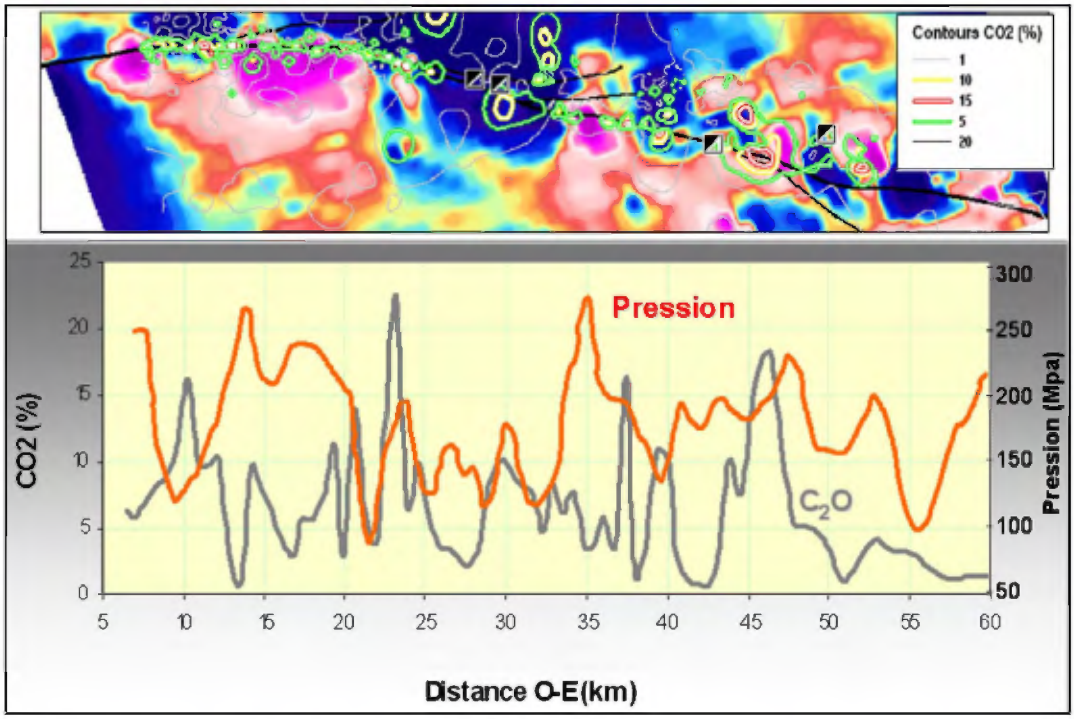


Figure 42. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pressions moyennes (σ1+ σ2)/2 et du CO_2 calculé. Données calculées avec Normat et fournies par le MRNQ. Retour au texte.

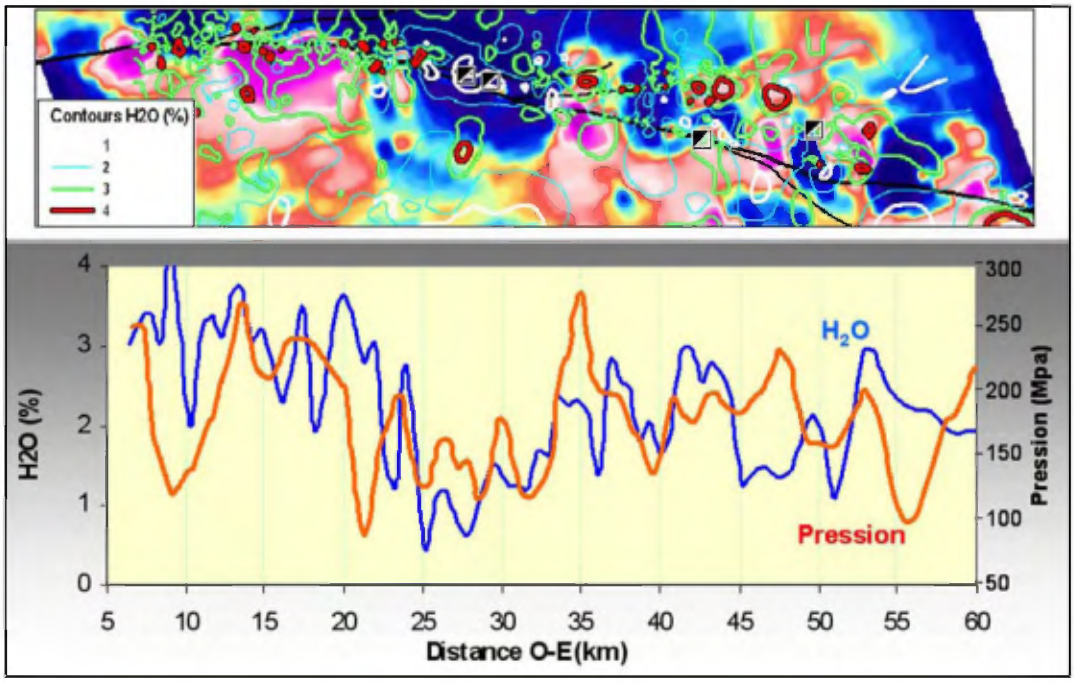


Figure 43. Longitudinale le long de la FPDM montrant les variations de pression moyennes (σ1+σ2)/2 et du H_2O calculé. Données calculées avec Normat et fournies par le MRNQ. Retour au texte.

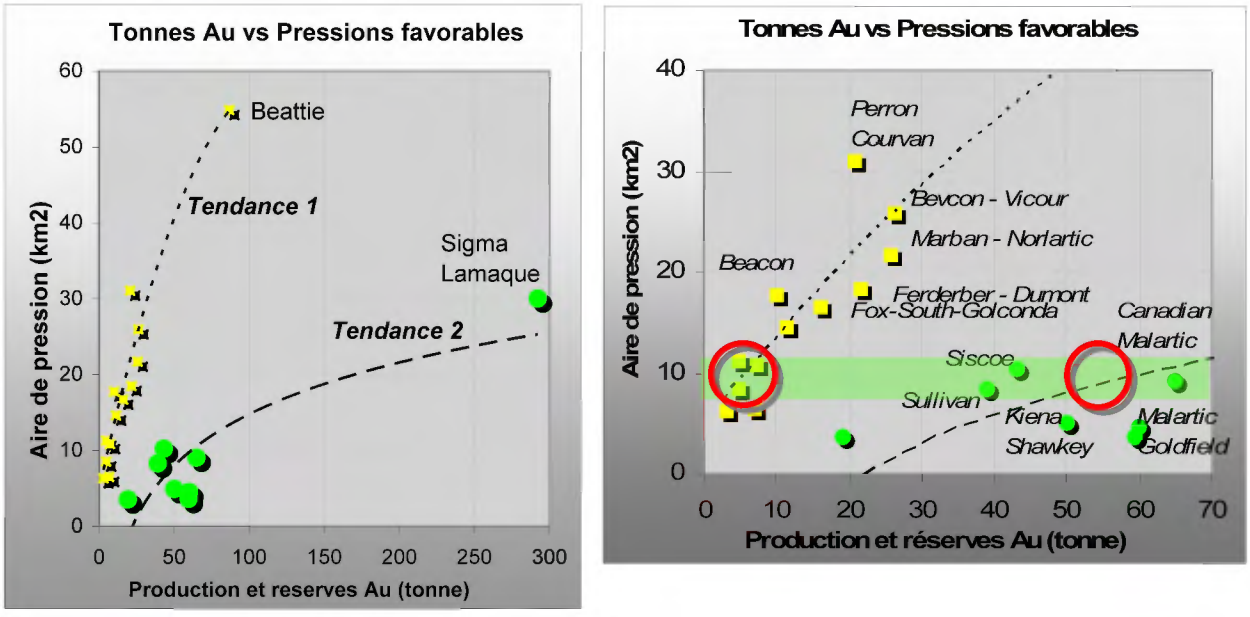


Figure 44. Diagrammes du tonnage d'or (production et réserves) par dépôt ou par groupe de dépôts versus les aires de pressions favorables pour la région de Val-d'Or, Malartic et Duparquet. Carrés jaunes : groupe de type Beattie-Donchester; cercles verts : groupe de type Sigma-Lamaque. A) ensemble des données avec courbes de tendance. B) Détails du diagramme A avec les noms des dépôts ou groupe de dépôts. La bande verte indique l'intervalle de pressions pour les cibles d'exploration de la région de Duparquet et les cercles rouges indiquent le tonnage Au probable recherché sur ces cibles. Retour au texte.