
Paléopressions, perméabilité crustale et hydrothermalisme : Implications pour les minéralisations aurifères orogéniques en Abitibi

PROJET 2008-01

PAR : STÉPHANE FAURE, GÉO. PH. D.
SYLVAIN RAFINI, GÉO. PH. D.
& SYLVAIN TRÉPANIER, GÉO. INFO. M. SC.

MAI 2009



AVERTISSEMENT

Ce document présente certains résultats des travaux de recherche du CONSOREM (Consortium de Recherche en Exploration minérale) rendus publics au 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., Rafini, S. & Trépanier, S., 2009. Paléopressions, perméabilité crustale et hydrothermalisme : implications pour les minéralisations aurifères orogéniques en Abitibi. Rapport du Consorem 2008-01, 26 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

Ce projet multidisciplinaire vise à déterminer l'influence de paramètres rhéologiques et structuraux de la croûte moyenne sur l'organisation spatiale des minéralisations d'or de type orogénique, notamment en produisant des cartes de paléopressions tectoniques. Deux modèles géomécaniques et dynamiques ont été conçus, inspirés de la géométrie actuelle des failles connues au sein de la ceinture de roches vertes de l'Abitibi, et du contexte tectonique au moment supposé de la mise en place des minéralisations aurifères archéennes.

Une des principales conclusions de ce travail est que l'organisation géographique 2-D des gisements d'or est dans une forte mesure contrôlée par deux facteurs : la géométrie des failles et les redistributions locales et régionales des paléopressions tectoniques transmises depuis les limites de blocs lithotectoniques. Les pressions moyennes, généralement utilisées par les Australiens comme une indication favorable à la minéralisation, ne sont pas l'unique paramètre déterminant. Les pressions minimales et maximales, et le gradient de pressions sont à considérer, ainsi que le déplacement tangentiel le long des failles et le coefficient de rupture dans l'encaissant. Ces relations sont basées de manière robuste et quantitative d'après le lien spatial entre les minéralisations aurifères et les différents paramètres de la modélisation.

Plusieurs cibles d'exploration sont proposées le long des couloirs de déformation. Ces cibles sont basées sur le résultat d'un réseau de neurones et de l'association positive avec des altérations géochimiques favorables. Le modèle de réseau de neurones tient compte des valeurs de plusieurs paramètres générées par les deux modèles géomécaniques ainsi que de paramètres géométriques des failles. Au total, 10 cibles sur 114 sont jugées très favorables pour l'exploration de l'or.

TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENT.....	i
Résumé.....	ii
Table des matières.....	iii
Liste des figures.....	iii
Liste des tableaux.....	iv
1 Introduction.....	1
2 Problématique et objectifs.....	2
3 Méthode et principe de la modélisation des paléopressions tectoniques.....	2
4 Modélisation des paléopressions à l'échelle de l'Abitibi.....	3
4.1 Géométrie des modèles.....	3
4.2 Paramètres rhéologiques.....	3
4.3 Conditions aux limites des modèles.....	4
4.4 Conditions <i>in situ</i>	6
5 Prémisses et limitations de la méthode.....	6
6 Résultats de la modélisation géomécanique avec UDEC.....	7
6.1 Déformations.....	7
6.2 Cartes des paléopressions et pièges potentiels pour les minéralisations.....	7
6.3 Paléopressions et intrusions syntectoniques.....	8
6.4 Autres paramètres géomécaniques.....	8
7 Relations et statistiques spatiales entre pressions et minéralisations aurifères.....	9
8 Cibles d'exploration le long des couloirs de déformation par réseau de neurones.....	11
8.1 Conception du réseau de neurones.....	11
8.2 Choix des meilleures cibles.....	13
9 Conclusion et recommandations.....	14
10 Références.....	15
Cahier des figures.....	18

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Failles modélisées pour les deux modèles géomécaniques avec leur cadre respectif et les contraintes maximales régionales (σ_1) orientées N330° et N345°. Les failles de chevauchement (en noir) à l'ouest et à l'est sont celles du Kapuskasing et du Front de Grenville respectivement. Retour au texte.....	18
Figure 2. Failles modélisées (en rouge sur la Figure 1) et failles de compilations géologiques de Daigneault et Archambault (1990), en bleu et du SIGEOM (2008), en noir. Contour de l'Abitibi en vert foncé. Retour au texte.....	18
Figure 3. Exemples de configurations possibles des tenseurs de contraintes <i>in situ</i> et aux limites de modèles. Le cas c) correspond aux modèles N330° et N345°. Retour au texte.....	19
Figure 4. Évolution de l'état d'équilibre du modèle N330° dans le temps, matérialisée par son énergie libre (unbalance force). Retour au texte.....	19
Figure 5. Contraintes moyennes prédites par le modèle N345°. Ligne pointillée : frontière entre les provinces de l'Ontario à l'ouest et de Québec à l'est. Information sur les gîtes selon les données de Gosselin et Dubé (2005). Retour au texte.....	20
Figure 6. Contraintes moyennes prédites par le modèle N330°. Mêmes légendes que sur la figure 5. Retour au texte.....	20
Figure 7. Différence entre les résultats des deux modèles. Les zones en rouges indiquent de fortes différences de pressions moyennes (positives ou négatives), alors que les régions en gris clair et blanc représentent des régions où les deux modèles ont réagi sensiblement de la même manière. Mêmes légendes que sur la figure 5. Retour au texte.....	21

Figure 8. Détails des pressions moyennes pour le modèle N330° dans le Nord de la ceinture de l'Abitibi, le long de la Faille Casa-Berardi (FCB). Mêmes légendes que sur la figure 5. Retour au texte.	21
Figure 9. Contraintes moyennes pour le modèle N330° et plutons syntectoniques. Mêmes légendes que sur la figure 5. DY : syénite de Douay; LP : monzonite du Lac de la Perdrix. Retour au texte.	22
Figure 10. Quantité de déplacement tangentiel (en mètre) et sens des décrochements le long des failles du modèle N330°. Retour au texte.	22
Figure 11. Réorientation des contraintes maximales locales sigma1 (traits noirs) dans la région de Val-d'Or – Malartic (sud de l'Abitibi) en bordure de la faille décrochante de Norbénite, la faille inverse de Manitou, et le couloir de déformation de la Faille Cadillac. Direction de la contrainte régionale N330° indiquée par les deux flèches vertes. Retour au texte.....	23
Figure 12. Test de statistique spatiale montrant la sensibilité des pressions moyennes par rapport aux minéralisations aurifères en Abitibi pour les modèles N330° (ligne bleue) et N345° (ligne jaune). Explications supplémentaires dans le texte. Retour au texte.....	23
Figure 13. Test de statistique spatiale montrant la sensibilité des déplacements tangentiels (a) et du coefficient de rupture (b) par rapport aux minéralisations aurifères en Abitibi du modèle N330°. Retour au texte.	24
Figure 14. Exemple de discrétisation de la surface autour des failles (zone tampon de 5 km) en cellules de 1 km ² pour le modèle de réseau de neurones. Retour au texte.	24
Figure 15. Vue d'ensemble de la discrétisation de la surface autour des failles et des 45 315 cellules de 1 km ² pour le réseau de neurones. Légendes sur la figure 5. Retour au texte.....	25
Figure 16. Carte du potentiel indiquant les localisations susceptibles de retrouver des minéralisations aurifères le long des couloirs de déformation selon le réseau de neurones (RN). 1 signifie un fort potentiel. Explications supplémentaires dans le texte. Légendes sur la figure 5. Retour au texte.	25
Figure 17. Détails de la carte de potentiel de la Figure 15 au sud de l'Abitibi. FPD : Faille Porcupine - Destor; FCLL : Faille Cadillac - Larder Lake; FP : Faille Parfouru; FM : Faille Manneville. Légendes sur les figures 5 et 16. Retour au texte.....	26
Figure 18. Les 114 cibles d'exploration (en rouge) correspondant aux valeurs supérieures au 95 percentile (0,9) du réseau de neurones (Figures 16 et 17). Les croix grises correspondent aux gîtes d'or. Retour au texte.	26

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Sensibilité de la minéralisation par rapport aux paramètres géomécaniques	10
Tableau 2 : Couches d'information utilisées pour le réseau de neurones.....	11
Tableau 3 : Matrice de confusion pour les différents groupes du réseau de neurones	12
Tableau 4 : Indices d'altération normatifs et valeurs seuils utilisés pour la construction de critères d'altération binaires	13

1 INTRODUCTION

Les circulations de fluides ont un rôle prépondérant dans le transport et la concentration de métaux donnant lieu à la formation des gisements de type orogénique (Ridley, 1993). En Abitibi, ces gisements apparaissent typiquement le long des couloirs de déformation. Ils se sont vraisemblablement formés à des profondeurs avoisinant 5 à 7 km dans un contexte ductile-cassant caractérisé sur le plan hydraulique par une très forte domination des conductivités de failles sur les conductivités matricielles (Caine et al., 1996 ; Sibson, 1996).

Il est communément acquis que les minéralisations aurifères empruntent et se concentrent autour et le long des failles majeures et secondaires (Groves et al, 2003 ; Goldfarb et al, 2005 100th). Les couloirs de déformation agissent en véritables drains pour les fluides hydrothermaux du fait de leur perméabilité structurale de plusieurs ordres de grandeur supérieure à celle des lithologies encaissantes (Ingebritsen et Sanford, 1998 ; Mizoguchi et al., 2008). La perméabilité de ces couloirs est généralement zonée avec : 1) une zone centrale, souvent plus imperméable que l'encaissant (forte composante argileuse, broyage, comminution), 2) une zone de fracturation périphérique ou zone de dommage, plus perméable que l'encaissant, et 3) l'encaissant peu à non déformé, dont les perméabilités sont dépendantes des lithologies et de la profondeur.

En Abitibi (la plus grande ceinture archéenne au monde), comme dans les autres ceintures de roches vertes, les grands couloirs de déformation sont des métalotectes de première importance pour les minéralisations d'or orogénique. La genèse des gisements aurifères orogéniques résulte de transferts de fluides au sein du réseau régional de failles sur des distances typiquement plurikilométriques, activés par les contraintes consécutives aux mouvements orogéniques compressifs et transpressifs (Daigneault et al., 2002).

Ce projet multidisciplinaire vise à déterminer l'influence de paramètres rhéologiques et structuraux de la croûte moyenne sur l'organisation spatiale des minéralisations d'or de type orogénique, notamment en produisant des cartes de paléopressions tectoniques. Deux modèles géomécaniques et dynamiques ont été conçus, inspirés de la géométrie des failles connues au sein de la ceinture, et du contexte tectonique au moment supposé de la mise en place des minéralisations aurifères.

Une des principales conclusions de ce travail est que l'organisation géographique 2-D des gisements d'or est dans une forte mesure contrôlée par deux facteurs : la géométrie des failles et les redistributions locales et régionales des paléopressions tectoniques transmises depuis les limites de blocs lithotectoniques. Les pressions moyennes, généralement utilisées par les Australiens comme une indication favorable à la minéralisation, ne sont pas l'unique paramètre déterminant. Les pressions minimales et maximales, et le gradient de pressions sont à considérer, ainsi que le déplacement tangentiel le long des failles et le coefficient de rupture dans l'encaissant.

2 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Deux questions sont posées dans le cadre du projet : 1) quels facteurs rhéologiques (pressions tectoniques, déplacement des failles, etc) et géométriques (orientation des failles) influencent la mise en place de l'or orogénique le long des accidents majeurs en Abitibi ? ; Et 2) si les couloirs de déformation en Abitibi sont bien connus pour leur haut potentiel, notamment le long des failles transcrustales de Cadillac – Larder Lake (CLL) et de Porcupine-Destor-Manneville (PDM), ou orienter l'exploration le long de celles-ci et à l'extérieur des camps connus, ainsi qu'ailleurs le long des autres failles majeures, particulièrement dans la partie centrale et nordique de la ceinture ?

Pour tenter de répondre à ces deux questions, plusieurs approches sont combinées. D'abord, une méthode numérique est utilisée afin de reconstituer les paléopressions tectoniques sur l'ensemble de l'Abitibi. Le modèleur géomécanique UDEC (Universal Distinct Element Code) développé par (Cundall, 1971, 1980) sert à déterminer la « perméabilité structurale », en particulier les variations et les contrastes de pressions tectoniques le long des couloirs de déformation. Jusqu'à présent, toutes les études utilisant cette approche étaient basées sur une relation spatiale empirique entre la position des gisements et les pressions modélisées (Holyland, 1990 ; Ojala et al., 1993 ; Groves et al., 2000). Il s'agissait d'une approche arbitraire et qualitative où les auteurs établissaient la correspondance visuelle entre certains intervalles de pressions et la position des minéralisations. La présente étude vient contrer cet héritage. La performance de certains facteurs rhéologiques de la modélisation par rapport aux minéralisations est évaluée avec une méthode de statistique spatiale. Il s'agit d'une approche novatrice et plus rigoureuse.

Finalement, un modèle de potentiel minéral par réseau de neurones est utilisé pour cibler des secteurs d'intérêt à travers une combinaison de facteurs rhéologiques et géométriques, en tenant compte de la position des minéralisations aurifères connues.

L'objectif est de générer de nouvelles cibles d'exploration le long des couloirs de déformation, qui sont majoritairement recouverts en Abitibi par d'épais dépôts quaternaires. Cette étude permet également de mieux déterminer et comprendre les facteurs régissant la mise en place de l'or orogénique dans les ceintures de roches vertes.

3 MÉTHODE ET PRINCIPE DE LA MODÉLISATION DES PALÉOPRESSIONS TECTONIQUES

L'approche initialement développée par les Australiens (Holyland, 1990 ; Holyland et al., 1993) consiste à reproduire numériquement les paléopressions tectoniques synchrones d'un épisode minéralisateur afin d'établir une cartographie régionale des hauts potentiels métallifères. Les redistributions locales et régionales des contraintes tectoniques sont générées par le jeu différentiel des failles et les mouvements relatifs des blocs individualisés par ces failles. Les zones de faible pression constituent des pièges à fluides – hauts potentiels métallifères – tandis que les zones de fortes pressions sont hydrauliquement et mécaniquement plus instables. Cette approche a été appliquée auparavant en Abitibi par Carrier et al., (2000). Depuis 2002, le CONSOREM a réalisé trois projets d'envergure dans le sud de l'Abitibi : région de Val-d'Or, le long de la faille transcrustale de Porcupine-Destor, et au sommet du gisement de classe mondiale Sigma (Faure et Rafini, 2004a, 2004b ; Faure, 2002, 2005, 2006).

Le logiciel géomécanique utilisé (UDEC) est un code de modélisation numérique développé et commercialisé 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...). Il s'agit d'un code aux éléments finis 2D offrant la possibilité de discrétiser l'espace en polygones infinitésimaux et d'attribuer distinctement des propriétés rhéologiques 1D au contacts et 2D aux blocs. Le logiciel offre une

gamme de comportements (équations constitutives) tant pour les contacts (élasto-plastique) que pour les blocs (élastique ou élasto-plastique). 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. Pour de plus amples renseignements sur les principes et l'utilisation du logiciel, se référer aux guides d'utilisation de Itasca (2004a, b, c).

4 MODÉLISATION DES PALÉOPRESSIONS À L'ÉCHELLE DE L'ABITIBI

4.1 Géométrie des modèles

Temporellement, l'épisode tectonique ciblé est corrélé à une succession de phases compressives et transpressives dextres datées entre 2 690 et 2 660 Ma, à l'intérieur de laquelle s'est déposée la majorité du tonnage aurifère en Abitibi (Couture et al., 1994; Daigneault et al., 2002; Robert et al., 2005). Cependant, on ne connaît pas exactement l'orientation de la contrainte régionale dans le cadran NO compatible avec ces mouvements décrochants. Il est par ailleurs fort probable que celle-ci a varié dans le temps en intensité et en orientation. C'est pour cette raison que deux modèles couvrant toute la surface de l'Abitibi ont été conçus ([Figure 1](#)) : le premier pour simuler une contrainte régionale orientée N345° et le deuxième une contrainte orientée N330°. Le cadre pour chaque modèle mesure 590 x 340 km. Seule son orientation varie pour accommoder perpendiculairement les deux contraintes régionales modélisées (N345° et N330°).

Le réseau de failles intégré est le même pour les deux modèles. Il dérive d'une sélection des principales structures régionales connues (Daigneault et Archambault, 1990) et des failles de la banque de données numériques SIGEOM en date de 2008 ([Figure 2](#)). On évalue que la géométrie des failles (même si certaines positions sont approximatives) correspond sensiblement à celle lors de la mise en place de l'or orogénique. Les failles à l'extérieur des limites actuelles de l'Abitibi, particulièrement à l'ouest et à l'est respectivement des failles de Kapuskasing et du Front de Grenville, sont fictives ([Figure 2](#)). Cette extrapolation des failles est nécessaire pour la modélisation avec UDEC afin d'éviter des trous ou des blocs non fermés dans les modèles.

4.2 Paramètres rhéologiques

En raison de la structuration régionale complexe de l'Abitibi, les blocs individualisés par les failles modélisées sont très rarement constitués d'une lithologie unique. Les failles principales, incorporées au modèle, ne rendent pas compte des contours de formations géologiques aux formes souvent très perturbées et guidées par des failles de plus faible ampleur. Ces dernières ne peuvent pas être considérées dans le modèle compte tenu de la grande dimension des modèles et des restrictions numériques sur le nombre de contacts et la taille des blocs. Ce constat impose le parti-pris d'une rhéologie unique des blocs sur l'ensemble du modèle, ce qui revient à postuler que la géométrie et les jeux différentiels des failles exercent un contrôle dominant sur la rhéologie du système global, tandis que les contrastes de compétences sont négligeables. Ce postulat est d'autant plus plausible que les blocs modélisés sont très souvent constitués d'une grande variété d'unités lithologiques (volcanites felsiques, mafiques et ultramafiques, plutons et sédiments), ce qui tend à unifier les rhéologies des blocs de grande dimension, diminuant ainsi les contrastes à l'échelle du modèle.

Les blocs ont un mode de déformation élastique. Bien que ce mode constitue une approximation des comportements naturels dans le domaine ductile-cassant, il est très généralement préféré au mode élasto-plastique en modélisation géomécanique. Ceci en raison de sa simplicité (comportement à une vitesse) et du nombre limité de paramètres rhéologiques requis (deux paramètres : les modules de

compressibilité B et de cisaillement S , en MPa), impliquant une incertitude inférieure à celle associée au comportement élasto-plastique qui nécessite l'estimation de trois paramètres supplémentaires reliés au seuil de plasticité (cohésion, angle de friction, résistance en tension). Par ailleurs, les paramètres élasto-plastiques étant très sensibles aux conditions P - T , à la différence des paramètres élastiques, leur dérivation en profondeur à partir des données expérimentales représente une forte source d'incertitude. Enfin, il est raisonnable d'affirmer que la déformation interne des blocs est très faible devant le glissement des failles dont la géométrie et le plissement, s'il y a lieu, sont acquis aux stades antérieurs à l'épisode tardi-tectonique modélisé. Ce postulat favorise l'approximation du comportement élastique, typiquement caractérisé par des quantités infinitésimales de déformation.

Les valeurs des modules élastiques attribuées aux blocs sont incluses dans l'intersection des fenêtres de valeurs communément obtenues pour une variété de roches felsiques à ultramafiques (Birch, 1966 ; Clark, 1966 ; Goodman, 1989 ; Bass, 1995 ; Pusch, 1995). Les valeurs choisies dans les deux modèles pour le module de compressibilité (B) et celui de cisaillement (S) sont de 40 000 MPa et 20 MPa respectivement. La masse volumique rocheuse est prise égale à 2 650 kg/m³.

Les failles ont un mode de déformation à deux vitesses (critère de Coulomb), caractéristique du comportement élasto-plastique. Dans les faibles contraintes, la réponse élastique est contrôlée par les rigidités élastiques jKn et jKs en MPa/m. Le seuil de plasticité, marquant l'apparition d'une déformation plastique en plus de la première, est régi par le critère de Coulomb :

$$\sigma_s = jC + j\mu\sigma_N$$

Où la cohésion jC des failles, la contrainte tangentielle σ_s et la contrainte normale σ_N sont exprimées en MPa. Le coefficient de friction $j\mu$ sur les failles est donné par la tangente de leur angle de friction interne.

Si la rhéologie des blocs rocheux est très bien comprise et documentée, le comportement des failles naturelles est pour sa part encore méconnu sur le plan qualitatif, et à plus forte raison sur le plan quantitatif. La littérature fournit très peu de valeurs expérimentales des paramètres élastiques et élasto-plastiques pour des discontinuités centimétriques à métriques et aucune pour des failles de plus grande dimension. Il a toutefois été démontré que la friction joue un rôle prépondérant dans le comportement élasto-plastique pris en compte par UDEC (Stephanson, 1999). Ce comportement est attribué aux failles par extension du comportement des volumes rocheux, avec des paramètres élasto-plastiques jC , $j\mu$, et jT (résistance en tension) typiquement très inférieurs, voire nuls, pour la cohésion et la résistance en tension. Quant aux paramètres élastiques (rigidités jKn et jKs), ils montrent une forte corrélation avec la taille des discontinuités, et varient par conséquent de plusieurs ordres de grandeur avec la dimension du modèle.

Dans les deux modèles, la cohésion (jC) et la résistance en tension (jT) sont fixées nulles pour les failles tandis que leurs rigidités et coefficients de friction sont calibrés grâce à une démarche d'essais erreurs prenant comme critères de validation les quantités et la proportion entre les déformations finies normales et tangentielles. Les rigidités normale (jKn) et tangentielle (jKs) ont été établies à 60 et 0,05 MPa/m respectivement. Le coefficient de friction ($j\mu$, sans dimension) est égal à 0,087.

4.3 Conditions aux limites des modèles

L'épisode tarditectonique ciblé est caractérisé par une compression NNO-SSE avec réactivation inverse-dextre des systèmes décrochants lithosphériques majeurs de l'Abitibi orientés E-O à ONO-ESE (failles Destor-Porcupine, Cadillac-Larder Lake, Casa Berardi, etc.). Toutefois, l'importance des réactivations sur ces failles sera très fortement conditionnée par l'angle formé avec la contrainte régionale maximale (σ_1). Dépendamment de l'azimut précis de ce dernier (N330° ou N345°), l'orientation de ces failles sera peu optimale à fortement orthogonale, et leur réactivation devra être marquée par une forte proportion inverse,

peu favorisée en réalité par leurs attitudes très inclinées. Les failles secondaires orientées NO-SE, accommoderont préférentiellement le transfert entre les systèmes majeurs E-O.

Plusieurs partis pris sont possibles en ce qui concerne la représentation des conditions aux limites du modèle numérique ([Figure 3](#)) : vitesses constantes, forces ou contraintes uniaxiales ([Figure 3, a et b](#)) à l'instar de l'approche analogique, ou enfin tenseurs de contraintes biaxiales ([Figure 3, c et d](#)). Cette liste n'est évidemment pas exhaustive et ne comprend que des configurations symétriques. La géométrie adéquate des conditions aux limites doit être déterminée en fonction des caractéristiques du modèle (dimension, géométrie des contacts, mécanismes simulés).

Des tests de sensibilité dans la modélisation montrent que le choix de contraintes uniaxiales ou biaxiales aux limites a un impact négligeable sur le résultat final obtenu. L'application d'un tenseur biaxial permet toutefois une meilleure circulation de la perturbation mécanique depuis les limites vers le centre du modèle ainsi qu'une diminution de l'impact de la phase précoce de grand déséquilibre mécanique (marquée typiquement par une forte zonation des magnitudes de contraintes). Ces caractéristiques permettent de produire des modèles globalement plus équilibrés et qui arrivent plus facilement à maturité (*i.e.*, lorsque la réorganisation des contraintes est exclusivement le fait des déformations au sein du modèle, non des conditions aux limites et *in situ*). Le choix a donc été porté sur l'application de tenseurs biaxiaux aux limites du modèle ([Figure 3c](#)).

La magnitude des contraintes appliquées aux limites du modèle est dérivée : 1) de la profondeur ; et 2) de l'enveloppe rhéologique connue à la transition ductile-cassant. Le comportement crustal retenu satisfait les observations compilées par Townend et Zoback (2000) en forage profonds, stipulant que la croûte est maintenue à l'état critique suivant le critère de Coulomb. Exprimé en contraintes principales, et en tenant compte de la pression de fluide P_f , celui-ci s'écrit :

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_{moy} - P_f} = \frac{2\mu}{\sqrt{\mu^2 + 1}}$$

Avec l'introduction d'un terme de cohésion C , cette relation se développe sous la forme (Sibson et Scott, 1998) :

$$P_f = \sigma_1 + \frac{2C(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu) - (\sigma_1 - \sigma_3)}{(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu)^2 - 1}$$

En prenant un coefficient de friction réaliste à 8 km égal à 0,6 (Townend et Zoback, 2000), on obtient :

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= \sigma_3 \left(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right)^2 - P_f \left[\left(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right)^2 - 1 \right] + 2C \left(\sqrt{\mu^2 + 1} + \mu \right) \\ &= 3\sigma_3 - 2P_f + 3,46C \end{aligned}$$

Dans la modélisation présentée ici, σ_3 est assimilable à la pression lithostatique, tandis que la pression de fluide est approximée hydrostatique (colonne d'eau à l'équilibre avec la surface à l'échelle régionale) :

$$\sigma_3 = \rho gh$$

$$P_f = \rho_e gh$$

où ρ et ρ_e sont respectivement les masses volumiques de la roche ($\rho = 2\,650$) et de l'eau ($\rho_e = 1\,000$), en kg/m^3 .

Par ailleurs, les données en forage profond démontrent que la cohésion devient rapidement négligeable en profondeur (Townend et Zoback, 2000), si bien que l'état de contrainte est uniquement régi par le coefficient de friction, suivant la loi de Byerlee déclinée du critère de Coulomb.

Le gradient de contraintes obtenu dans ces conditions est :

$$\sigma_1 = 5950gz$$

$$\sigma_1 \approx 2,25\sigma_3$$

Les valeurs retenues pour les contraintes principales appliquées aux limites sont donc :

$$\sigma_3 = 250000000$$

$$\sigma_1 = 568000000$$

4.4 Conditions *in situ*

Il est préférable d'intégrer des conditions *in situ* au modèle afin de diminuer l'importance des écarts entre les états de contraintes aux limites et à l'intérieur du modèle, et de faciliter ainsi sa convergence vers une solution mécaniquement stable. Deux possibilités sont offertes : 1) appliquer un tenseur *in situ* compressif semblable à celui imposé aux limites ([Figure 3a et c](#)) ; 2) appliquer un tenseur *in situ* neutre ([Figure 3b et d](#)).

Dans le premier cas, la perturbation mécanique appliquée au modèle est faible, donc celui-ci convergera plus facilement vers un état stable ; la phase précoce de fort déséquilibre est moins marquée et ne fait pas apparaître la zonalité caractéristique des contraintes. Les réajustements sur les contacts suffiront à provoquer des déformations générant une forte réorganisation des contraintes.

Dans le deuxième cas, la perturbation mécanique est plus forte et l'état de stabilité sera atteint plus tardivement. σ_1 va transiter des bordures vers le centre du modèle, donnant lieu à une phase précoce zonée. Cette circulation précoce des bordures vers le centre constitue l'intérêt principal de cette configuration. En effet, dans certains cas il peut être pertinent de représenter le fait que les forces sont transmises depuis les limites de plaques, soit de l'extérieur vers l'intérieur quelle que soit l'échelle d'investigation.

Dans le cas présent, des tests de sensibilité ont montré que le choix entre l'une de ces deux configurations n'a pas d'impact significatif sur les résultats obtenus, bien que l'évolution et la maturation du modèle soit plus rapide dans le premier cas. Le choix a été porté sur le tenseur *in situ* compressif ([Figure 3c](#)).

5 PRÉMISSSES ET LIMITATIONS DE LA MÉTHODE

Seul l'aspect mécanique (structural) du processus de minéralisation est considéré. Même si le processus est dynamique et que les modèles subissent une déformation incrémentale simulant une évolution dans le temps, cet intervalle de temps est instantané à l'échelle géologique et la quantité de déformation accumulée est négligeable (1-2%). Il s'agit donc d'une image de la déformation figée dans le temps alors

que les minéralisations sont d'âges différents et réparties sur un intervalle de temps d'environ 20 Ma (Robert et al., 2005).

Une autre limitation de la modélisation 2D est la composante verticale (« out of plane ») qui est négligée au profit des composantes horizontales. Le chevauchement aux contacts des blocs est toléré mais limité par un paramètre nommé « overlap ». De plus, les contraintes sont fixes et ne varient pas en intensité. Enfin, les failles ont le comportement rhéologique unique, c'est-à-dire qu'il n'y a pas de hiérarchie ou de différence selon leur orientation ou leur longueur. Tout comme les failles, les paramètres géomécaniques pour les blocs sont uniques, ce qui revient à dire que la réaction du modèle dépend presque entièrement de la géométrie et de la rhéologie des failles.

6 RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION GÉOMÉCANIQUE AVEC UDEC

6.1 Déformations

Le modèle géomécanique est arrêté manuellement au stade mature c'est-à-dire lorsque la perturbation mécanique imposée a suffisamment circulé à travers l'ensemble du domaine pour que la distribution des contraintes soit principalement le fait de l'activation des failles et de la déformation interne des blocs. Dans le cas du modèle N330°, ce stade correspond au cycle de déformation incrémentale 1 400 (209,5 secondes sur la [Figure 3](#)). Il ne correspond pas nécessairement à un point d'équilibre du modèle (faible niveau d'énergie instable, ou *unbalanced force*) puisque, passée la première dépression d'énergie instable, celle-ci forme des pics essentiellement dus à l'apparition d'excroissances caractéristiques en zones de bordures, qui représentent des artefacts locaux. Par conséquent, ces pics ne traduisent pas une instabilité croissante globale du modèle mais des effets ponctuels peu significatifs. En revanche, l'augmentation graduelle du niveau moyen, visible sur la [Figure 4](#) (à partir de 250 secondes) exprime la dégénérescence croissante du modèle.

6.2 Cartes des paléopressions et pièges potentiels pour les minéralisations

Les [Figures 5 et 6](#) illustrent la distribution des pressions moyennes ($\sigma_{\text{moy}} = (\sigma_1 + \sigma_3)/2$) pour les modèles N345° et N330° respectivement. Les pressions sont surtout guidées par la géométrie des failles (courbures et intersections) et, dans une moindre mesure, de la déformation interne des blocs en bordures des failles. La [Figure 7](#) montre la différence relative entre les résultats des deux modèles. Dans la moitié nord de la région modélisée, les résultats entre les deux modèles sont assez similaires (régions en gris clair et blanc). Les régions de basses et hautes pressions se retrouvent sensiblement aux mêmes endroits et avec les mêmes intensités. Les plus grandes différences entre les deux modèles en termes de pressions moyennes (en rouge sur la [Figure 7](#)), se situent dans la moitié sud de la région modélisée, en particulier dans le SO de l'Abitibi, en Ontario, où des différences existent à l'intérieur même des zones de basses pressions.

Les zones de plus faibles pressions sont principalement localisées le long des failles orientées ONO-ESE à NO-SE et aux intersections de failles. Visuellement, les mines et les gîtes d'or en Abitibi sont localisés soit dans des zones de faibles pressions (300 à 400 Ma), soit en marge de zones ponctuelles de fortes pressions (500 à 600 Ma) dans des intervalles de pressions faibles à intermédiaires ([Figures 5 et 6](#)). Les contrastes de pressions se concentrent principalement le long des failles, à l'intérieur de corridors qui varient entre quelques kilomètres et 10 km de part et d'autres des structures. Cette largeur est dans l'ordre de grandeur des zones de dommage le long des failles transcrustales actuelles, comme celle de San Andreas (Li et al., 2007 ; Hauksson, 2008). A l'intérieur des zones de fortes perturbations (zones de

dommage) en Abitibi, les régions de faibles pressions alternent variablement en intensité et en dimension avec des secteurs de plus fortes pressions. Ce phénomène est en grande partie causé par le changement d'orientation et de courbure le long des failles. Il s'agit d'un type de piège qui pourrait expliquer la position de plusieurs minéralisations aurifères, en particulier dans la Zone Volcanique Nord, comme les mines Casa Berardi et Detour Lake, et les gîtes de Douay et Discovery ([Figure 8](#)). Avec le modèle N345°, les domaines de fortes et faibles pressions sont globalement moins nombreux et ont des superficies plus grandes par rapport au modèle N330°. Pour le modèle N330°, la distance entre les creux et les crêtes de pressions est plus faible et le contraste de pressions plus fort le long des failles que dans l'autre modèle. Ces différences s'expliquent par le fait que l'orientation de la majorité des failles est plus optimale par rapport à la contrainte régionale. En d'autres termes, la composante de décrochement est plus importante le long des failles du modèle N330° et les variations de pressions deviennent alors plus sensibles aux irrégularités.

Dans le SO de l'Abitibi (Ontario), de grandes plages de basses pressions sont en contacts francs avec des zones de fortes pressions ([Figures 5 et 6](#)). Les camps aurifères de classe mondiale de Timmins et de Kirkland Lake sont localisés au niveau de forts contrastes. Il s'agit d'un deuxième type de piège pour les minéralisations aurifères. Ces forts gradients de pressions sont observés dans les deux modèles, mais sont plus prononcés pour le modèle N330°. Le phénomène pourrait s'expliquer par le fait que les deux failles majeures porteuses de la minéralisation sont arquées et que la contrainte régionale est quasi orthogonale à l'orientation des failles. Leur forme arquée aurait pour effet de concentrer les contraintes en un point focal (fortes pressions) du côté concave de la structure alors que l'autre côté de la faille agirait à titre de bouclier protecteur, favorisant le développement des zones de basses pressions.

Le troisième type de piège est les intersections de failles. Les intersections de failles dans les modèles sont des points triples. Ces rencontres de structures sont également le lieu de forts contrastes de pressions ([Figures 5 et 6](#)). Le gîte Discovery est l'archétype de ce piège ([Figure 8](#)). Par contre, certains points triples sont uniquement caractérisés par des fortes pressions qui représenteraient des nœuds structuraux non favorables pour les minéralisations aurifères.

6.3 Paléopressions et intrusions syntectoniques

Les intrusions syntectoniques montrent sensiblement les mêmes relations que les minéralisations vis-à-vis les cartes de paléopressions ([Figure 9](#)). La majorité de celles-ci sont soit localisées dans les zones de faibles pressions moyennes, en particulier dans le NE de l'Abitibi (région de Chibougamau), soit autour des zones de fortes pressions comme par exemples à la frontière Québec-Ontario ou dans le SO de l'Abitibi, en Ontario. Les syénites (comme celle de Douay) et les monzonites (comme le Pluton du Lac de la Perdreux) sont, pour leur part, presque exclusivement localisées dans des zones de basses pressions ([Figure 9](#)).

6.4 Autres paramètres géomécaniques

D'autres paramètres géomécaniques sont considérés dans l'étude. Il s'agit entre autres des déplacements normaux et tangentiels le long des failles et du coefficient de rupture dans les blocs. Le jeu décrochant des failles est largement dominant sur leur jeu normal (chevauchement ou overlap), résultat plausible et attendu dans le contexte transpressif modélisé. La [Figure 10](#) montre le jeu tangentiel des failles sur l'ensemble de l'Abitibi. Les principaux systèmes dextres sont composés des tronçons successifs de plusieurs failles interconnectées ; les réseaux secondaires NO-SE assurent le relais entre des tronçons de failles majeures E-O. Il en résulte que certains segments de failles majeures E-O très métallifères sont faiblement actives à inactives (très faibles déplacements) tandis que d'autres moins minéralisés montrent d'importants rejets. Ce comportement fait écho avec la distribution irrégulière des minéralisations observées le long de ces couloirs, dont des portions très métallifères sont subitement prolongées par des zones moins fertiles.

Les rotations de blocs, combinées à leurs géométries très irrégulières, induit des réorientations considérables des tenseurs locaux de contraintes et de déformations. Un des résultats notables du modèle réside dans l'absence de coaxialité entre les tenseurs de déformation locaux et le tenseur des contraintes régionales imposé aux limites (N330° et N345°). Ce phénomène implique une déformation rotationnelle qui corrobore le style tectonique régional marqué par un cisaillement dextre généralisé.

Dans la région de Val-d'Or, la modélisation rend compte du style tectonique enregistré le long des failles et dans les corps minéralisés ([Figure 11](#)). Par exemple, les directions de la contrainte maximale σ_1 sont à faible angle par rapport à la Faille Norbénite, une structure décrochante dans laquelle plusieurs gîtes se sont mis en place (Robert, 1990 ; Sauvé et Makila, 1990). Par contre dans le secteur de la Mine Sigma, les axes de σ_1 sont orthogonaux par rapport à la faille inverse de Manitou et les minéralisations dans ce dépôt se sont mises en place dans un système inverse de type andersonien (Gaboury et al., 2001).

Le coefficient de rupture est calculé pour chaque polygone infinitésimal du modèle. Ce coefficient varie de 0 à 1. Les valeurs se rapprochant de 0 indiquent un très faible potentiel de rupture ou de fracturation, alors que les valeurs qui tendent vers 1 indiquent un très fort potentiel de développer de la fracturation. La majorité des mines sont localisées dans des régions où le coefficient de rupture est proche de 0,3.

7 RELATIONS ET STATISTIQUES SPATIALES ENTRE PRESSIONS ET MINÉRALISATIONS AURIFÈRES

Cette section vise à établir de manière robuste et quantitative les relations spatiales entre les minéralisations aurifères et les différents paramètres de la modélisation : cartes de paléopressions (σ_1 , σ_3 , σ_{moy} , $\Delta\sigma$), déplacements normaux et tangentiels sur les failles, orientation du tenseur de contraintes, et probabilité de rupture, distance des gîtes d'or aux failles et orientation des failles près des gîtes. Le but est de connaître pour chacun de ces paramètres les intervalles de valeurs qui se corréleront le mieux avec la présence de minéralisation.

L'approche statistique utilisée est celle des probabilités conditionnelles appliquées aux données spatiales (Bonham-Carter, 1994). Cette technique permet de quantifier l'association spatiale entre deux cartes binaires (A et B). Dans le cas présent, la carte B est une carte binaire des minéralisations connues. Les différents paramètres géomécaniques et géométriques d'intérêt ont ensuite été séparés en différentes classes de valeurs. Chaque classe de valeurs de chaque paramètre devient alors une carte binaire (multiples cartes A). Chacune de ces cartes binaires (A) peut alors être comparée à celle des minéralisations (B).

Le contraste est une mesure de l'association entre deux cartes binaires (A et B). Il est défini comme étant la différence entre le logarithme naturel de la probabilité conditionnelle de B étant donné A moins le logarithme naturel de la probabilité conditionnelle de B étant donné non-A. Ici, des valeurs de contraste sont donc calculées pour l'association entre la couche des minéralisations (carte B) et chaque classe de paramètres géomécaniques et géométriques définie (cartes A). Les valeurs du contraste supérieures à 0 indiquent une corrélation spatiale positive entre deux cartes binaires, et cette corrélation est d'autant plus importante si elle s'éloigne de 0. À l'inverse, des contrastes inférieurs à 0 indiquent une corrélation négative. Selon notre analyse, des valeurs supérieures à 0,3 ou inférieures -0,3 sont considérées comme étant significatives sur le plan statistique. Le **Tableau 1** résume la sensibilité de la minéralisation vis-à-vis plusieurs des paramètres générés par les modèles géomécaniques ainsi que de la distance et l'orientation des failles modélisées.

Le test de statistique spatiale sur la [Figure 12](#) montre un exemple de la sensibilité des pressions moyennes par rapport aux minéralisations aurifères pour les modèles N330° et N345°. Le modèle N345° est globalement jugé meilleur que le modèle N330° pour les intervalles de pressions entre 328 et 453 Mpa où les valeurs de contrastes sont supérieures à 0,5 (**Tableau 1**). Les minéralisations sont corrélées positivement dans le modèle N330° avec les pressions moyennes autour de 400 Mpa et dans l'intervalle 450 - 500 Mpa. Les minéralisations sont anti-corrélées dans les deux modèles pour des pressions moyennes supérieures à 500 Mpa. Cette relation démontre que les zones de fortes pressions moyennes ne sont pas favorables pour la mise en place de minéralisations aurifères orogéniques. Selon les tests statistiques, les valeurs de pressions inférieures à 350 Mpa dans le modèle N330° ne semblent avoir aucune influence, alors que pour le modèle N345°, les faibles valeurs de pressions (<300 Mpa) sont négativement corrélées à la minéralisation. En résumé, les paramètres du modèle N345° sont plus discriminants statistiquement et sur une plus grande gamme de valeurs que pour l'autre modèle. Pour le modèle N345°, les intervalles de pressions favorables pour les minéralisations sont compris entre 350 et 450, alors qu'ils sont entre 400 et 500 pour le modèle N330°.

Les tests de sensibilité pour les déplacements tangentiels et le coefficient de rupture du modèle N330° sont présentés sur la [Figure 13](#) et le **Tableau 1**. Les minéralisations sont corrélées aux déplacements dextres (valeurs positives sur la [Figure 13 a](#)) et préférentiellement pour des déplacements de l'ordre de 71 à 133 m ([Figure 13 a](#) et **Tableau 1**). Il ne semble pas y avoir de corrélation positive entre les gîtes d'or pour les failles senestres ou pour des déplacements dextres supérieurs à 350 m ([Figure 13 a](#)). Cela indique que les failles qui ont subi de grands décrochements sont moins fertiles. Le test de sensibilité pour le coefficient de rupture indique une corrélation positive avec la minéralisation seulement pour un intervalle de valeurs très restreintes entre 0,27 et 0,32 ([Figure 13 b](#) et **Tableau 1**).

Le test de sensibilité pour connaître l'incidence des minéralisations par rapport à la direction de failles indique que les structures orientées entre N060° et N076° sont les plus minéralisées (**Tableau 1**). Les camps aurifères de Timmins, Kirkland Lake, et de Kerr Addison, de même que la majorité des minéralisations dans le secteur de Chibougamau en sont la preuve. Le test pour la distance des dépôts aux failles montre que les minéralisations ont une corrélation positive mais décroissante dans les 900 premiers mètres avec une valeur de contraste maximal de 1 (**Tableau 1**).

Tableau 1 :

Sensibilité de la minéralisation par rapport aux paramètres géomécaniques

Modèle	Facteur	Contraste maximal	Valeurs	
N330	Pressions moyennes ($(\sigma_1 + \sigma_3)/2$)	0,39	400 à 425 Mpa	
	Différentiel de pression ($\sigma_1 - \sigma_3$)	0,38	210 à 320 Mpa	
	Pressions maximales (σ_1)	0,37	473 à 504 Mpa	
	Pressions minimales (σ_3)	0,69	314 à 352 Mpa	
	Pente pressions moyennes	0,49	$3,3^E6$ à 24^E6	
	Déplacement tangentiel	0,93	71 à 133 m	
	Déplacement normal	0,35	7 à 13 m	
N345	Coefficient de rupture	0,98	0,27 à 0,32	
	Pressions moyennes ($(\sigma_1 + \sigma_3)/2$)	0,71	328 à 453 Mpa	
	Différentiel de pression ($\sigma_1 - \sigma_3$)	0,56	143 à 174 Mpa	
	Pressions maximales (σ_1)	0,62	418 à 471 Mpa	
		1,0	506 à 520 Mpa	
	Pressions minimales (σ_3)	0,56	144 à 173 Mpa	
	Pente pressions moyennes	0,59	$2,3^E6$ à $3,7^E6$	
	<i>Autres paramètres</i>			
	Distance des gîtes à la faille	1,0	0 à 865 m	
	Orientation de la faille	0,7	71 à 76 degrés	

8 CIBLES D'EXPLORATION LE LONG DES COULOIRS DE DÉFORMATION PAR RÉSEAU DE NEURONES

La section précédente montre pour chacun des paramètres géomécanique ou géométrique que seuls certains intervalles de valeurs sont statistiquement mieux corrélés à la présence de minéralisation aurifère. Cependant, la relation spatiale entre les dépôts aurifères et toutes ces couches d'information des modèles N330° et N345° est un problème complexe. Pour surmonter ce problème et dans le but de cibler de nouveaux secteurs d'intérêt pour l'exploration, un réseau de neurones artificiels (RN) a été conçu le long des couloirs de déformation de l'Abitibi.

8.1 Conception du réseau de neurones

En Abitibi, 304 des 360 dépôts d'or (84%) avec tonnage évalué sont situés à moins de 5 km de couloirs de déformation. Ces dépôts représentent 87% du total de l'or (production et réserves) de cette ceinture, soit 5 793 t Au sur un total de 6 672 t selon les données de Gosselin et Dubé (2005). C'est à l'intérieur de ce corridor de ± 5 km que portera l'analyse. La surface de part et d'autre des failles modélisées a été discrétisée en cellules de 1km^2 , ce qui représente 45 315 carrés ([Figures 14 et 15](#)). Le **Tableau 2** résume l'ensemble des paramètres (couches) géomécaniques et géométriques contenus sous la forme de valeurs dans chacune de ces 45 315 cellules de la base de données. Chacune des cellules comprend également de l'information sur la présence ou non de minéralisation.

Tableau 2 :
Couches d'information utilisées pour le réseau de neurones

Modèle UDEC avec une contrainte régionale N330°

- 1-Pressions maximales (S1)
- 2-Pressions minimales (S3)
- 3-Différentiel de pression (S1-S3)
- 4-Pressions moyennes ($(S1+S3)/2$)
- 5-Pente des pressions moyennes (Dérivée horizontale)
- 6-Direction des contraintes maximales (Sigma1)
- 7-Déplacement tangentiel (décrochement)
- 8-Déplacement normal (chevauchement)
- 9-Coefficient de rupture

Modèle UDEC avec une contrainte régionale N345°

- 10-Pressions maximales (S1)
- 11-Pressions minimales (S3)
- 12-Différentiel de pression (S1-S3)
- 13-Pressions moyennes ($(S1+S3)/2$)
- 14-Pente des pressions moyennes (Dérivée horizontale)

Autres paramètres

- 15-Différence des pressions moyennes entre les modèles N330° et N345°
- 16-Orientation de la faille
- 17-Distance de la faille
- 18-Présence de minéralisation aurifère orogénique
- 19-Présence de minéralisation aurifère d'origine volcanogène

Les données de base du RN (réseau de neurones) comportent deux classes de données : les cellules minéralisées et celles supposées non-minéralisées. La première classe comporte un total de 230 cellules de 1 km² connues comme étant minéralisées (la position réelle des gîtes), et la seconde est constituée de 230 cellules supposées non-minéralisées et choisies aléatoirement parmi les 45 315 moins 230 cellules restantes. Les cellules de base serviront pour trois groupes différents d'analyses et à différentes étapes d'entraînement du système : 1) le groupe d'entraînement (ou d'apprentissage); 2) le groupe de validation; et 3) le groupe test. Le RN a besoin de cas réels servant d'exemples pour son apprentissage qu'on appelle le groupe d'entraînement. Ce groupe comprend 147 cellules minéralisées (parmi les 230 cellules de base) et 150 autres cellules considérées non-minéralisées (sélection parmi les 230 de cette classe ; **Tableau 3**). L'apprentissage est une phase du développement du RN durant laquelle le comportement du réseau est modifié jusqu'à l'obtention d'un résultat optimal. L'apprentissage sur le groupe d'entraînement se poursuit jusqu'à ce que l'erreur moyenne calculée sur le groupe de validation commence à augmenter. On arrête alors l'apprentissage pour éviter le surentraînement du réseau. La solution retenue par le réseau lors de son entraînement indique un taux de reconnaissance de 72% sur le groupe d'entraînement pour les deux classes de données (**Tableau 3**). Le groupe de validation comprend 42 cellules minéralisées et 39 autres considérées non minéralisées. Le réseau reconnaît 76% et 64% des cellules minéralisées et non minéralisées, respectivement, sur ce dernier groupe (**Tableau 3**). La dernière étape consiste en une contre validation des résultats d'apprentissage sur un groupe test caché mais dont le résultat est connu. Ce dernier est constitué de 41 cellules minéralisées et 41 autres non minéralisées et le système les reconnaît à 78% et 61% respectivement (**Tableau 3**).

Tableau 3 :
Matrice de confusion pour les différents groupes du réseau de neurones

Groupe d'entraînement	Connus minéralisés	Supposés non-minéralisés
Prédits minéralisés (n=147)	106	42
Prédits non-minéralisés (n=150)	41	108
Pourcentage correct (%)	72	72
Groupe de validation	Connus minéralisés	Supposés non-minéralisés
Prédits minéralisés (n=42)	32	14
Prédits non-minéralisés (n=39)	10	25
Pourcentage correct (%)	76	64
Groupe de test	Connus minéralisés	Supposés non-minéralisés
Prédits minéralisés (n=41)	32	16
Prédits non-minéralisés (n=41)	9	25
Pourcentage correct (%)	78	61

A l'aide de son architecture et de ses algorithmes, le réseau est maintenant prêt à rechercher les caractéristiques similaires aux cellules connues minéralisées sur le reste des cellules de la région, c'est à dire sur les 45 315 cellules (**Figure 15**) moins 460 cellules minéralisées et non-minéralisées qui ont servi au RN. La réponse du système se traduit en une probabilité de certitude. Cette probabilité varie entre 0 (très faible) et 1 (très forte). Le potentiel de retrouver des minéralisations aurifères à ± 5 km des failles selon les paramètres géomécaniques et critères de minéralisations choisis (**Tableau 2**) est présenté sur la **Figure 16**. Cette carte de potentiel minéral montre qu'il y a une plus forte probabilité d'avoir des minéralisations le long des accidents E-O et ENE-OSO que sur ceux orientés NO-SE ou ONO-ESE. Plusieurs secteurs potentiels sont mis en évidence même le long des failles matures du point vu de l'exploration comme celles de Cadillac-Larder Lake et de Porcupine-Destor (**Figure 17**). En effets, des zones de probabilité supérieure à 0,9 se retrouvent autour des gisements de classe mondiale de Kirkland Lake et Kerr Addison, en Ontario, mais également au sud du camp de Rouyn-Noranda et à l'Ouest de la

mine Harker Holloway (Ontario). De plus petites zones offrant un potentiel similaire sont localisées le long des failles Parfouru et Manneville (Figure 17). Il est à remarquer que le système a ignoré les minéralisations volcanogènes du camp minier de LaRonde localisées dans des zones de très faibles probabilités.

8.2 Choix des meilleures cibles

Le 95 percentile des valeurs du RN est choisi arbitrairement comme le seuil pour délimiter des cibles d'exploration, ce qui revient à utiliser les valeurs du réseau supérieures à 0,9 (Figure 18). Considérant cette valeur, 114 cibles potentielles sont proposées le long des couloirs de déformation. L'aire couverte par ces dernières (2 568 km²) représente 5,9% de la surface totale des zones de ± 5 km autour des failles (43 315 km²) et 2,6% de la superficie totale de l'Abitibi (97 840 km²).

Un critère supplémentaire de sélection des 114 cibles est proposé. Il s'agit de donner un poids aux cibles en établissant une correspondance spatiale entre la surface des valeurs du RN supérieures à 0,9 et la présence d'altérations géochimiques favorables. Les altérations considérées sont les indices normatifs suivants : IFRAIS, IPAF, CO₂, et IPARA (Piché et Jébrak, 2004). Les données géochimiques utilisées pour construire les grilles d'interpolation de ces indices proviennent de sources variées (Compagnie XSTRATA Copper, Mines Aurizon, Alexis Minerals, Vior et du SIGEOM). La moyenne des altérations IFRAIS, IPAF, CO₂, et IPARA est ensuite calculée pour chaque surface des cibles du RN (Figure 18). On considère arbitrairement comme zones altérées les valeurs supérieures à la moyenne de celles de la grille interpolée plus ou moins l'écart type selon le cas. Les valeurs seuils sont ainsi établies pour chaque indice d'altération (Tableau IV). Ces valeurs seuils servent ensuite à construire des critères d'altération binaires. Pour chacun des quatre indices, une valeur de 1 est assignée à une cellule si sa valeur dépasse le seuil correspondant au Tableau IV. Une valeur de 0 est assignée à la cellule pour cet indice dans le cas contraire.

Tableau 4: Indices d'altération normatifs et valeurs seuils utilisés pour la construction de critères d'altération binaires

Indice normatif ¹	Valeur seuil pour la surface > 0,9	Moyenne pour l'Abitibi ²
IFRAIS	< 80	89±9 (Non altéré = 100)
IPAF	> 30	-7±30 (Totalemment altéré = 100)
CO ₂	> 3	1,4±1,5
IPARA	> 10	7±4

¹ Piché et Jébrak, 2004; ² selon les grilles d'interpolation des indices

L'ordre de priorité des 114 cibles est ensuite basé sur la somme de ces critères d'altération binaires. La priorité 1 est donnée à une cible si la somme des critères d'altérations binaires est de 3 ou 4. La priorité 2 représente une somme de 2 (altérations favorables), alors que la priorité 3 est donnée à une cible pour une somme de 1 (une seule altération favorable). En utilisant cette approche, 10 des 114 cibles potentielles sont classées de priorité 1, 17 de priorité 2 et 23 de priorité 3 pour un total de 50 cibles prioritaires. Les 64 autres cibles de priorité 4 (aucune altération favorable) peuvent être intéressantes du point de vu géomécanique, mais sont localisées dans des zones peu altérées ou, là où les données géochimiques peuvent être déficientes.

9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

La modélisation numérique et les statistiques spatiales montrent que la présence d'or le long des failles est influencée par différents facteurs rhéologiques (structuraux) et géométriques, notamment les pressions moyennes, maximales, et minimales, la quantité de déplacement tangentiel, le coefficient de rupture dans l'encaissant (blocs), la direction des failles et la distance par rapport aux failles. Des intervalles de valeurs plus favorables pour les minéralisations que d'autres sont proposés pour chacun de ces facteurs. Le modèle géomécanique dont la contrainte maximale régionale est orientée N345° est davantage corrélé à la minéralisation. Les tests de sensibilité faits sur plusieurs facteurs de ce modèle montrent des valeurs de contraste plus élevées que pour le modèle avec une contrainte régionale N330° (**Tableau 1**).

Une variété de cibles d'exploration a été générée dans le cadre de ce travail multidisciplinaire. Des cibles visuelles et empiriques découlent directement des deux cartes de paléopressions dérivées de la modélisation géomécanique. Ces cartes procurent des cibles directes et doivent être regardées par secteurs en fonction des différents pièges identifiés : changement de courbure de la faille, intersection de failles, et zone arquée abritant ou concentrant les contraintes locales. Il est souhaitable d'analyser en détail le contexte des anomalies par tronçon de faille, autrement dit de rechercher des anomalies similaires à celles qui expliquent la présence d'un gîte le long de cette structure (exemple de la Faille Casa Berardi). Des styles différents de minéralisations, par exemple disséminées dans les gisements de Malartic et en veines à la Mine Sigma, pourraient être associés à des pressions particulières. Une comparaison entre les 2 modèles (N330° et N345°) au même endroit est également recommandée. D'autres couches rhéologiques ou paramètres pourraient être regardées plus en détail et générer d'autres cibles d'exploration.

Un réseau de neurones qui intègre les différents facteurs rhéologiques et géométriques des deux modèles a généré efficacement au moins 114 cibles d'exploration le long des couloirs de déformation de l'Abitibi. La corrélation positive entre des altérations géochimiques favorables et les résultats du réseau neuronal a permis d'établir un ordre de priorité sur ces cibles. Au total, 10 cibles sont jugées comme étant de première priorité.

L'aspect novateur de cette étude est sans contredit l'exploitation des différents paramètres rhéologiques du logiciel UDEC et une meilleure utilisation des résultats autres que les cartes de pressions traditionnellement utilisées.

10 RÉFÉRENCES

- 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.
- Birch F., 1966. Compressibility; Elastic Constants, in Handbook of Physical constants, revised edition by Clark S. P., *GSA Memoir 97*.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic information systems for geoscientists. Computer Methods in the Geosciences, Volume 3. Pergamon Press, Oxford, 398 p.
- Caine J. S., Evans J. P. et Forster C. B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure, *Geology*, vol. 24, no.11, p. 1025-1028.
- 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.
- Clark S. P., 1966. Handbook of Physical Constants ; revised eds., *GSA Memoir 97*.
- Couture, J-F., Pilote, P., Machado, N. and Desrochers, J-P., 1994. Timing of gold mineralization in the Val-d'Or District, southern Abitibi Belt; evidence for two distinct mineralizing events *Economic Geology*, November; v. 89; no. 7; p. 1542-1551
- Cundall P. A., 1971. A computer model for simulating progressive, large scale movements in blocky rock systems. Proceedings of the International Symposium Rock Fracture, ISRM, Nancy, Paper No. II-8, vol. 1.
- Cundall, P.A., 1980, UDEC—A generalized distinct element program for modelling jointed rocks: Peter Cundall Associates, Report PCAR-1-80, European Research Office, U.S. Army, Contract DAJA37-79-C-0548.
- Daigneault, R. et Archambault, G., 1990. Les grands couloirs de déformation de la Sous-Province de l'Abitibi. *Dans La Ceinture polymétallique du Nord-Ouest québécois 1990*. Editeurs : M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.M. Lulin, G. Riverin et A. Simard. Institut canadien des mines et de la métallurgie, volume spécial 43:43-64.
- Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown, E.H., 2002. Oblique Archean subduction: accretion and exhumation of an oceanic arc during dextral transpression, Southern Volcanic Zone, Abitibi Subprovince Canada. *Precambrian Research* 115: 261-290.
- Daigneault, R., Mueller, W.U. et Chown E.H., 2004. Abitibi greenstone belt plate tectonics: the diachronous 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 (Eds.), Elsevier, Netherlands. p. 88-103
- Faure, S., 2002. Prédiction des paléopressions avec le modèleur 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, MRN, DV 2002-10, p. 22.
- Faure, S., 2005. Paléopressions tectoniques dans la Zone Volcanique Sud de l'Abitibi; implications pour le transport et le dépôt de l'or de type orogénique. 73e Congrès de l'ACFAS, Université du Québec à Chicoutimi, 9-13 mai 2005, p.36.

- Faure, S., 2006. Rôle des pressions tectoniques dans la genèse des minéralisations aurifères mésothermales; exemples de la Ceinture de roches vertes archéennes de l'Abitibi, Québec, Canada. Dans Nouvelles approches de la recherche et de l'exploration minières, Deuxième journées de Launay, Colloque international de Marrakech, Octobre 2006, p. 63-65.
- Faure, S. et Rafini, S., 2004a. Paléopressions tectoniques et minéralisations aurifères à la Mine Sigma, Abitibi. Dans Abitibi 2004, Périodes métallogéniques de l'Abitibi : du concept à l'application. Résumés de conférence, p.22-24.
- Faure, S. et Rafini, S., 2004b. Modélisation des paléocontraintes et des paléopressions le long de la Faille Porcupine-Destor. Rapport 2003-03 en ligne. 53 p.
- Gaboury, D., Carrier, A., Crevier, M., Pelletier, C. et Sketchley, D. A., 2001. Predictive Distribution of Fault-Fill and Extensional Veins: Example from the Sigma Gold Mine, Abitibi Subprovince, Canada. *Economic Geology*, 96: 1397-1406.
- Goodman R. E., 1989. *Rock Mechanics*, second edition, eds John Wiley and Sons, New York, 562 p.
- Goldfarb, R. J., Baker, T., Dubé, B., Groves, D. I., Hart, C. J. R. et Gosselin, P., 2005. Distribution, characteristics, and genesis of gold deposits in metamorphic terranes. *Economic Geology* 100th anniversary volume, p. 407-450.
- Gosselin, P. et Dubé, B., 2005. Gold deposits of Canada : distribution, geological parameters and gold content. Geological Survey of Canada, Open file 4896, 64 p.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Knox-Robinson, C.M., Ojala, J., Gardoll, S., Yun, G.Y., et 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.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F. Hart, C. J. R., 2003. Gold Deposits in Metamorphic Belts: Overview of Current Understanding, Outstanding Problems, Future Research, and Exploration Significance. *Economic Geology* 98: 1-29.
- Hauksson, E., 2008. Analysis of Earthquake Data from the Greater Los Angeles Basin and Adjacent Offshore Area, Southern California San Andreas. USA Geological Survey, Rapport Publique 07HQGR0048.
- Holyland, P. W., 1990. Simulation of the dynamics of Archaean deformation in the Yilgarn Block, Western Australia., Abstract Volume. Third International Archaean Symposium, Perth, Geoconferences W.A. Inc., Perth. Geoconferences W.A. Inc., Perth, 347-349.
- Holyland, P., Ridley, J. R., Vearncombe, J.R., 1993. Stress mapping technology (STMTM): Geofluids '93: Contributions to an International Conference on Fluid Evolution, Migration and Interaction in Rocks, Torquay, England, 272-275.
- Ingebritsen, S.E., et Sanford, W.E., 1998. *Groundwater in geologic processes*: Cambridge, Cambridge University Press, 341 p.
- Itasca, 2004a. Universal Distinct Element Code, Theory and Background. Second edition. Itasca Consulting Group Inc.
- Itasca, 2004b. Universal Distinct Element Code, Command Reference. Second edition. Itasca Consulting Group Inc.

- Itasca, 2004c. Universal Distinct Element Code, User's Guide. Second edition. Itasca Consulting Group Inc.
- Li, Y. G. Chen, P. Cochran, E. S., Vidale, J. E., 2007. Seismic velocity variations on the San Andreas fault caused by the 2004 M6 Parkfield Earthquake and their implications. *Earth Planets Space*, 59: 21–31.
- Mizoguchi, K., Hirose, T., Shimamoto, T. et Fukuyama, E., 2008. Internal structure and permeability of the Nojima fault, southwest Japan. *Journal of Structural Geology*, 30: 513-524.
- Ojala, J.V., Ridley, J.R., Groves, D.I., Hall, G.C., 1993. The Granny Smith gold deposit: the role of heterogeneous stress distribution at an irregular granitoid contact in a greenschist facies terrane. *Mineralium Deposita* 28, 409-419.
- Piché, M. et Jébrak, M., 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 82: 59-77.
- Pusch R., 1995. Rock mechanics on a geological base ; *Developments in Geotechnical Engineering 77*, Elsevier, Amsterdam, p. 327-350.
- Ridley, J., 1993. The relations between mean rock stress and fluid flow in the crust: with reference to vein- and lode-style gold deposits. *Ore Geology Reviews*, 8: 23-37.
- Robert, F., 1990. An overview of gold deposits in the Eastern Abitibi belt. *Dans La Ceinture polymétallique du Nord-Ouest québécois 1990*. Editeurs; M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.M. Lulin, G. Riverin et A. Simard. Institut canadien des mines et de la métallurgie, volume spécial 43:93-106.
- Robert, F., Poulsen, K. H., Cassidy, K. F. et Hodgson, C. J., 2005. Gold metallogeny of the Superior and Yilgarn Cratons. *Economic Geology 100th anniversary volume*, p. 1001-1033.
- Sauvé, P. et Makila, A., 1990. Geology of the Camflo Mine, Malartic, Quebec. *Dans La Ceinture polymétallique du Nord-Ouest québécois 1990*. Editeurs; M. Rive, P. Verpaelst, Y. Gagnon, J.M. Lulin, G. Riverin et A. Simard. Institut canadien des mines et de la métallurgie, volume spécial 43:245-254.
- Sibson R. H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes, *Jour. Structural Geol.*, vol. 18, p. 1031-1042.
- Sibson R. H. et Scott J., 1998. Stress/fault controls on the containment and release of overpressured fluids: Examples from gold-quartz vein systems in Juneau, Alaska; Victoria, Australia and Otago, New Zealand, *Ore Geology Reviews*, p. 293–306.
- Stephanson, S. S. O., 1999. Effect of a fault on in situ stresses studied by the distinct element method. *Inter. Jour. of Rock Mech. and Mining Sc.* 36: 1051-1056.
- Townend J. et Zoback M. D., 2000. How faulting keeps the crust strong ? *Geology*, 28: 399-402.

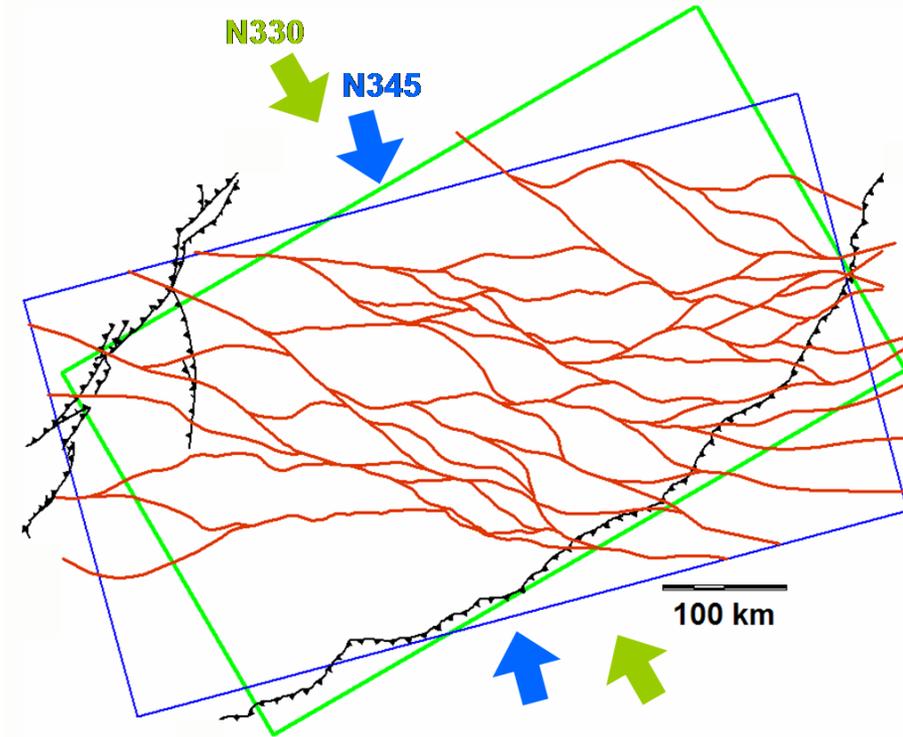


Figure 1. Failles modélisées pour les deux modèles géomécaniques avec leur cadre respectif et les contraintes maximales régionales (sigma 1) orientées N330° et N345°. Les failles de chevauchement (en noir) à l'ouest et à l'est sont celles du Kapuskasing et du Front de Grenville respectivement. [Retour au texte.](#)

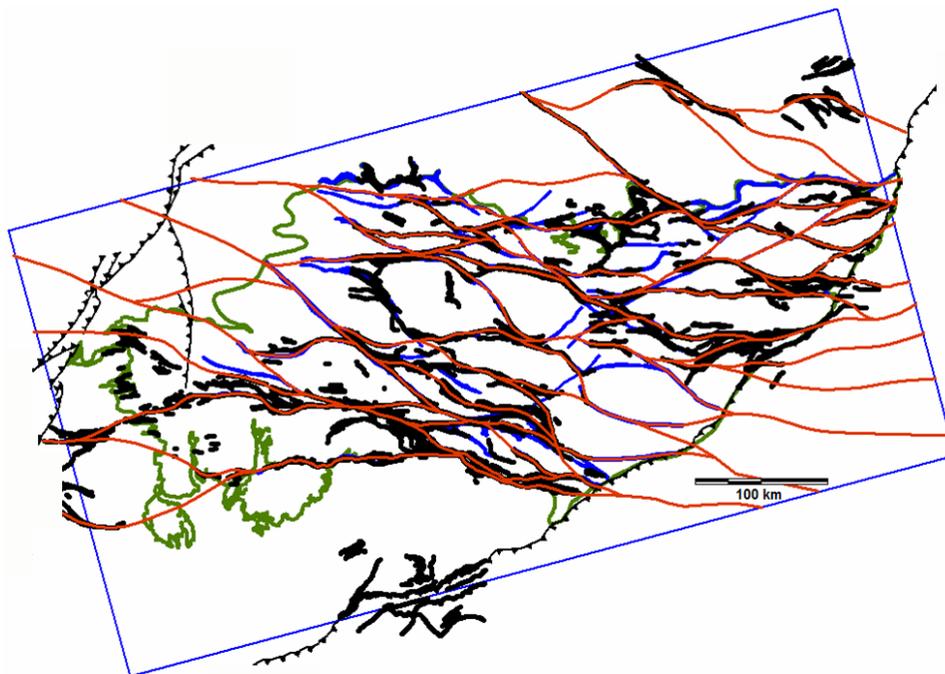


Figure 2. Failles modélisées (en rouge sur la [Figure 1](#)) et failles de compilations géologiques de Daigneault et Archambault (1990), en bleu et du SIGEOM (2008), en noir. Contour de l'Abitibi en vert foncé. [Retour au texte.](#)

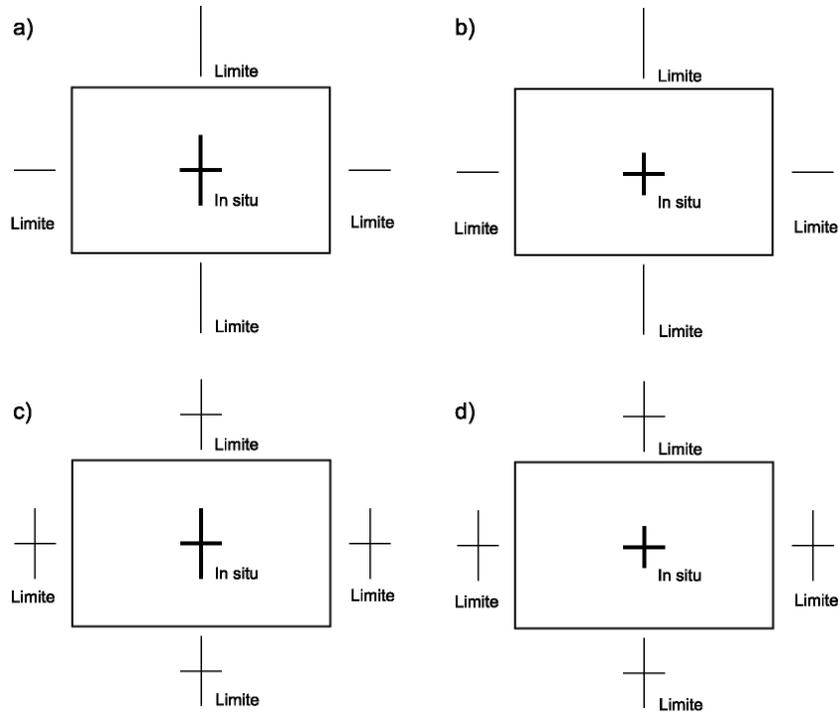


Figure 3. Exemples de configurations possibles des tenseurs de contraintes in situ et aux limites de modèles. Le cas c) correspond aux modèles N330° et N345°. [Retour au texte.](#)

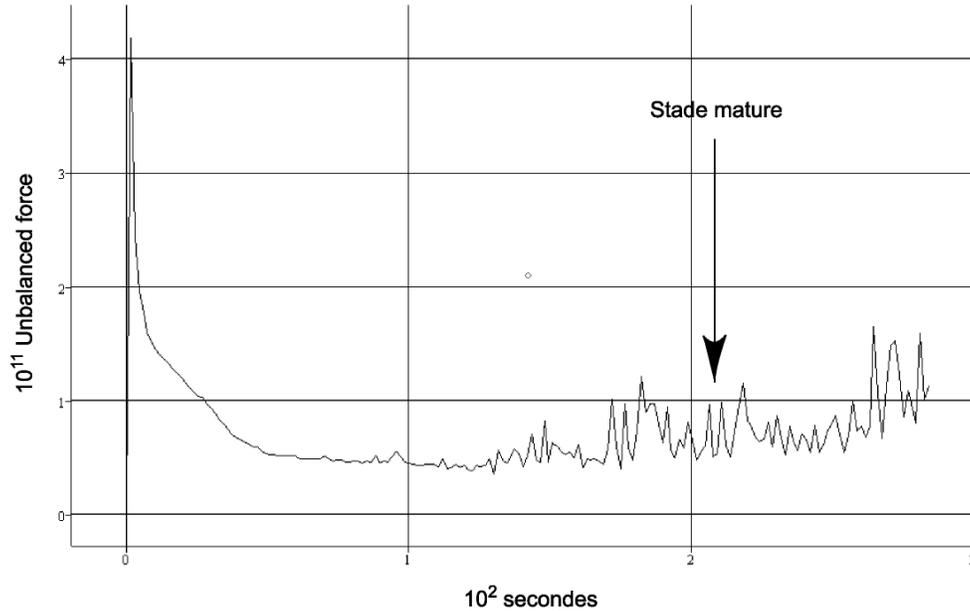


Figure 4. Évolution de l'état d'équilibre du modèle N330° dans le temps, matérialisée par son énergie libre (unbalance force). [Retour au texte.](#)

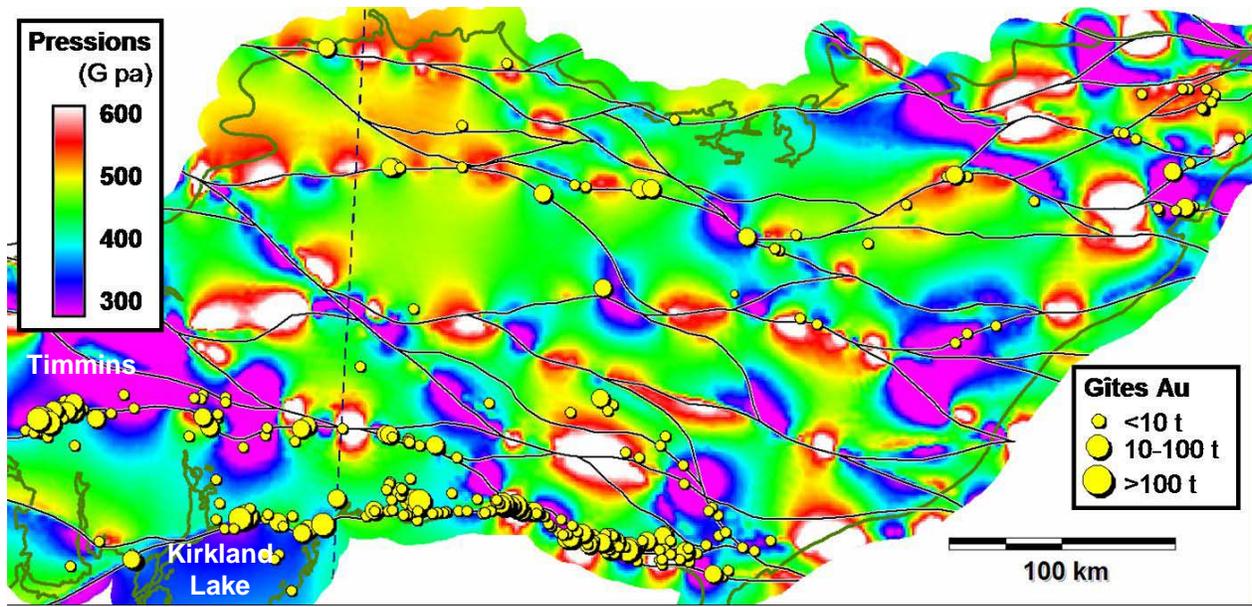


Figure 5. Contraintes moyennes prédites par le modèle N345°. Ligne pointillée : frontière entre les provinces de l'Ontario à l'ouest et de Québec à l'est. Information sur les gîtes selon les données de Gosselin et Dubé (2005). [Retour au texte.](#)

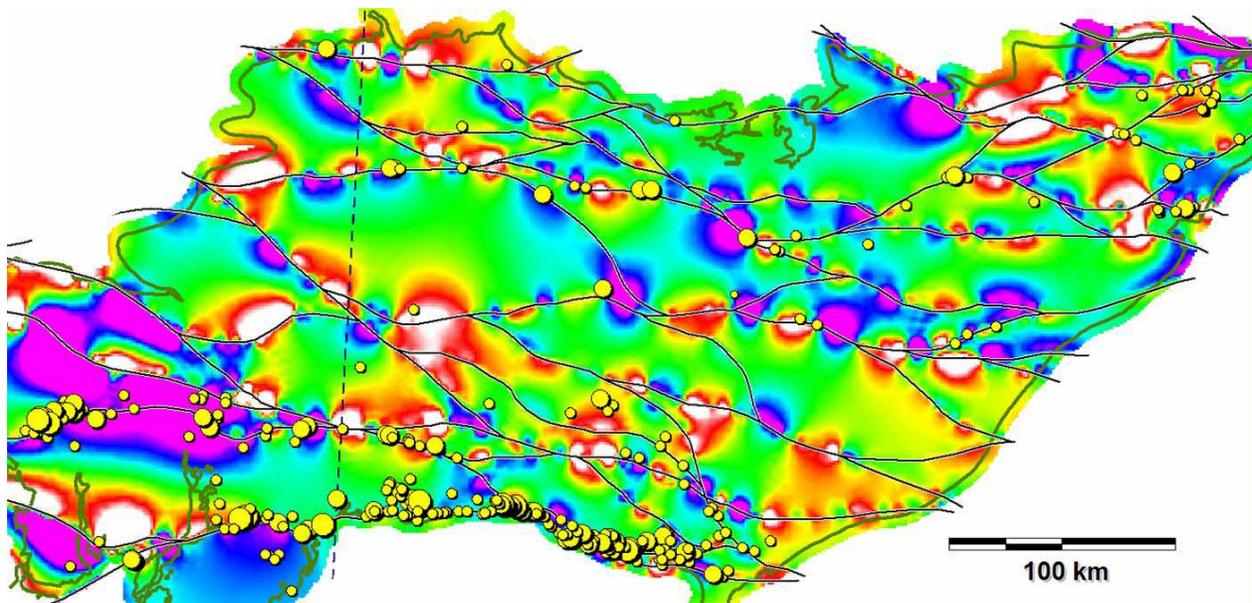


Figure 6. Contraintes moyennes prédites par le modèle N330°. Mêmes légendes que sur la figure 5. [Retour au texte.](#)

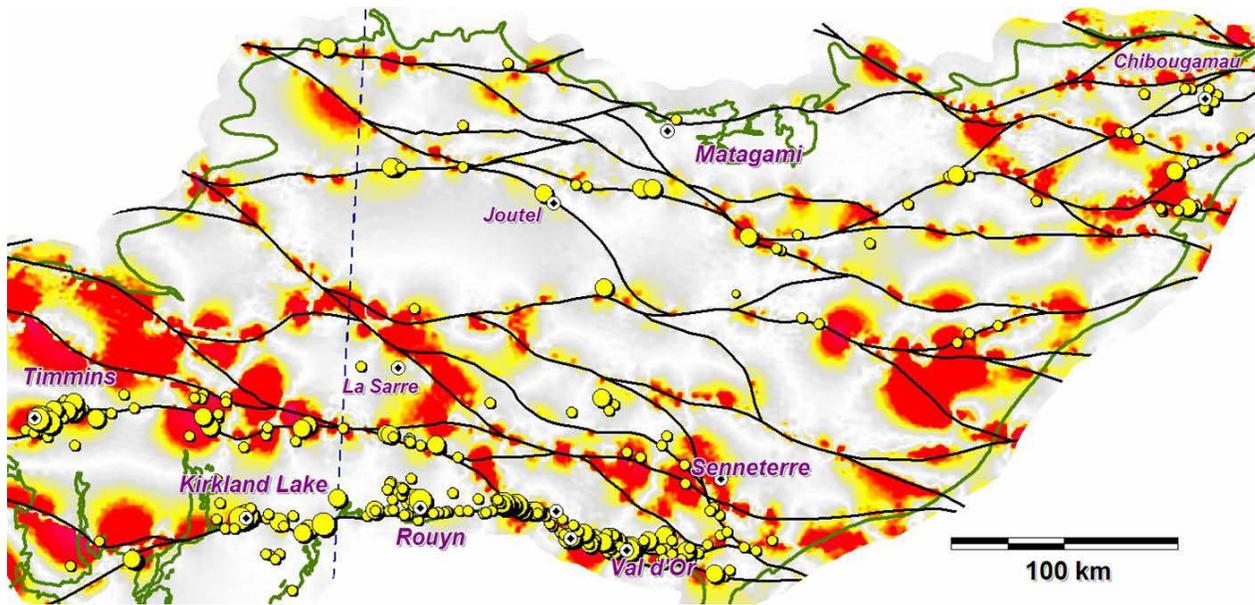


Figure 7. Différence entre les résultats des deux modèles. Les zones en rouges indiquent de fortes différences de pressions moyennes (positives ou négatives), alors que les régions en gris clair et blanc représentent des régions où les deux modèles ont réagi sensiblement de la même manière. Mêmes légendes que sur la figure 5. [Retour au texte.](#)

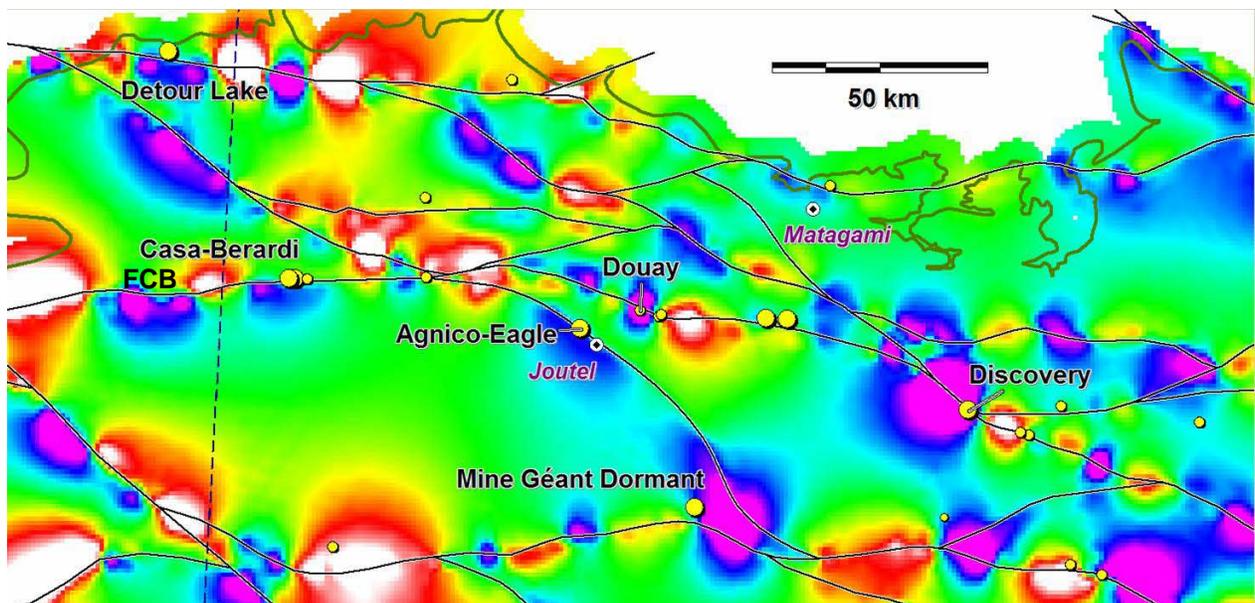


Figure 8. Détails des pressions moyennes pour le modèle N330° dans le Nord de la ceinture de l'Abitibi, le long de la Faille Casa-Berardi (FCB). Mêmes légendes que sur la figure 5. [Retour au texte.](#)

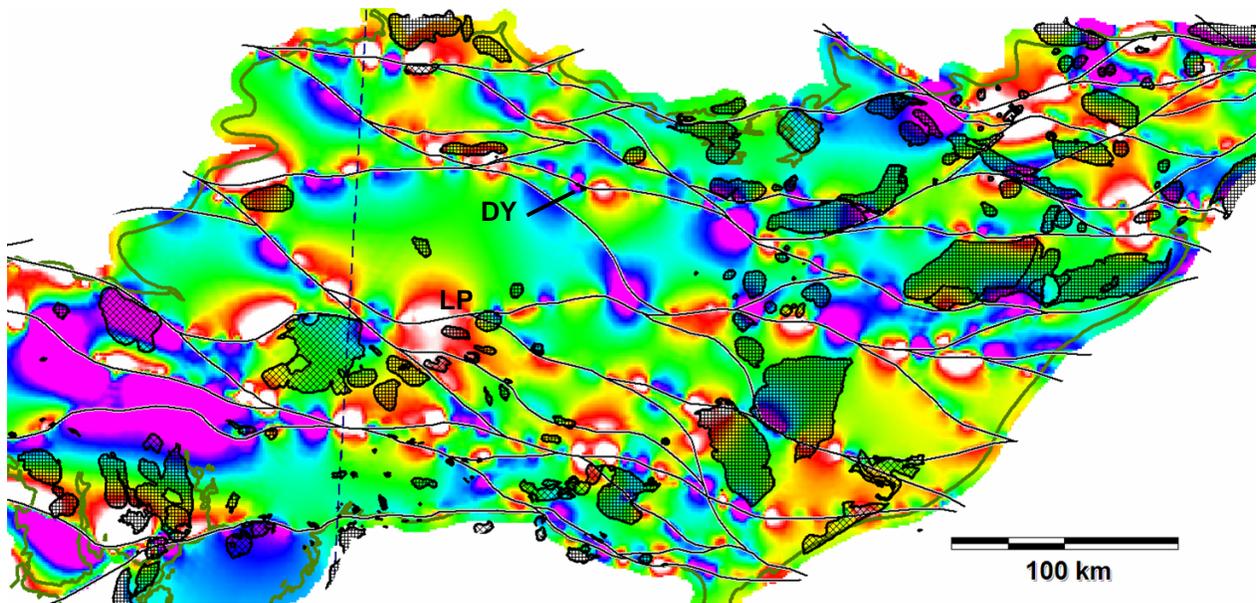


Figure 9. Contraintes moyennes pour le modèle N330° et plutons syntectoniques. Mêmes légendes que sur la figure 5. DY : syénite de Douay; LP : monzonite du Lac de la Perdrix. [Retour au texte.](#)

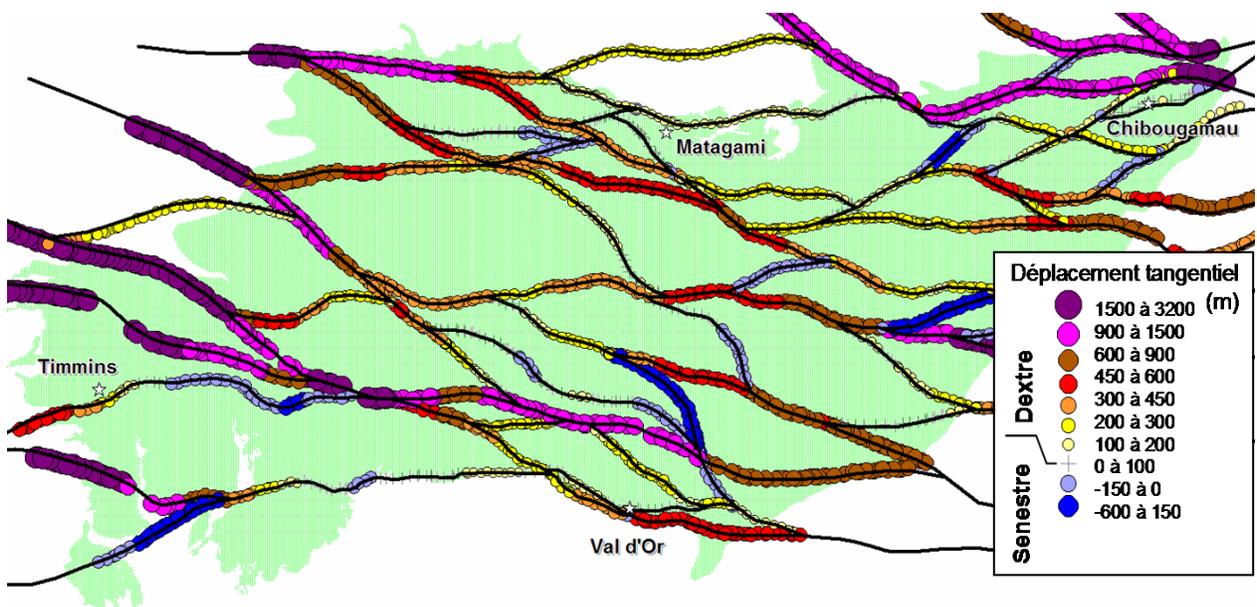


Figure 10. Quantité de déplacement tangentiel (en mètre) et sens des décrochements le long des failles du modèle N330°. [Retour au texte.](#)

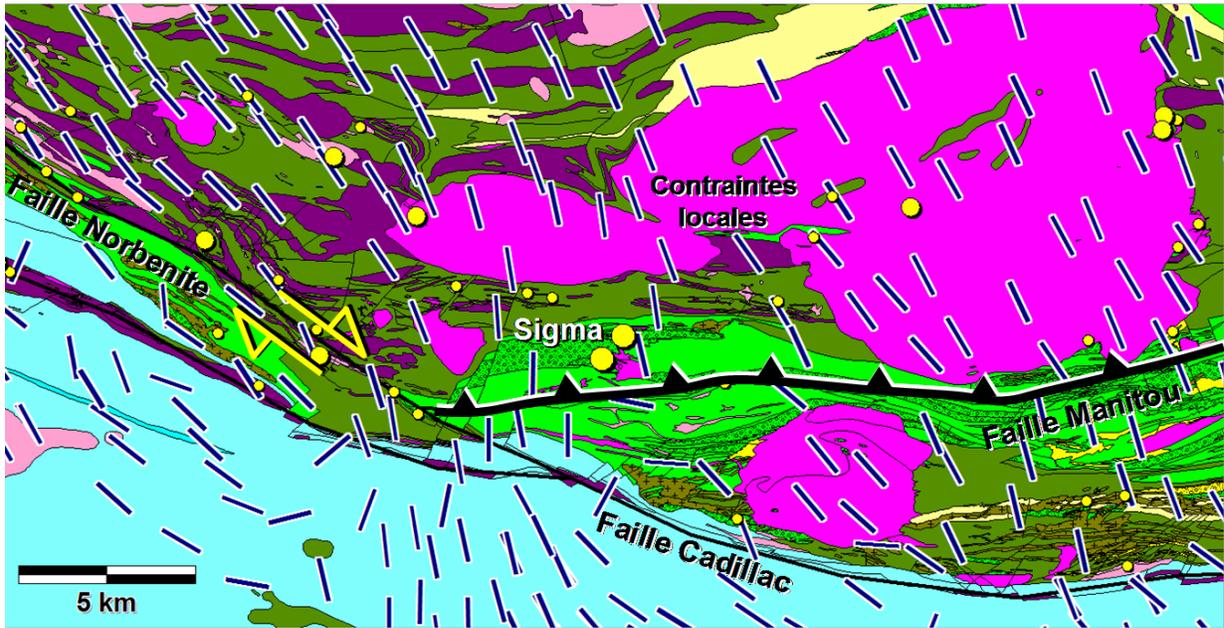


Figure 11. Réorientation des contraintes maximales locales sigma1 (traits noirs) dans la région de Val-d'Or – Malartic (sud de l'Abitibi) en bordure de la faille décrochante de Norbénite, la faille inverse de Manitou, et le couloir de déformation de la Faille Cadillac. Direction de la contrainte régionale N330° indiquée par les deux flèches vertes. [Retour au texte.](#)

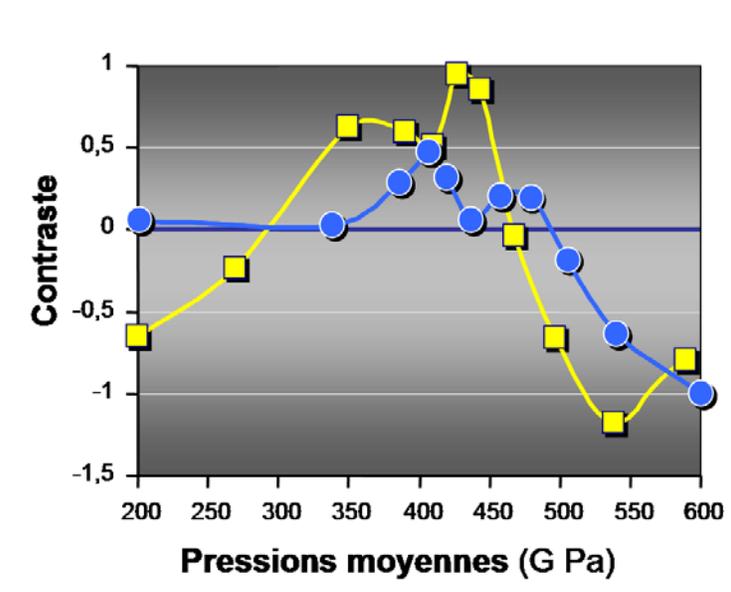


Figure 12. Test de statistique spatiale montrant la sensibilité des pressions moyennes par rapport aux minéralisations aurifères en Abitibi pour les modèles N330° (ligne bleue) et N345° (ligne jaune). Explications supplémentaires dans le texte. [Retour au texte.](#)

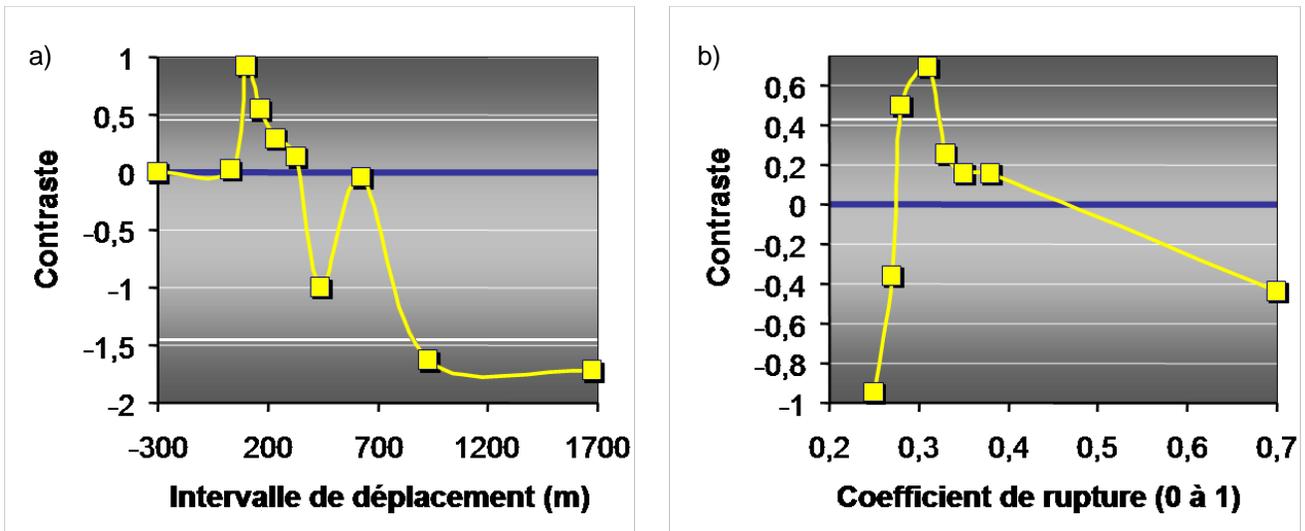


Figure 13. Test de statistique spatiale montrant la sensibilité des déplacements tangentiels (a) et du coefficient de rupture (b) par rapport aux minéralisations aurifères en Abitibi du modèle N330°. [Retour au texte.](#)

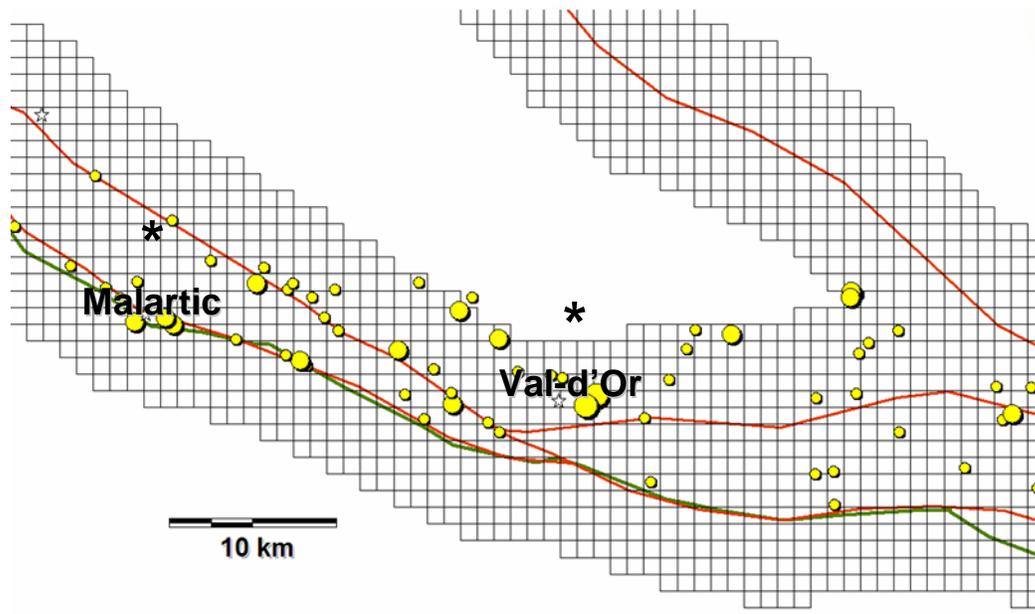


Figure 14. Exemple de discrétisation de la surface autour des failles (zone tampon de 5 km) en cellules de 1 km² pour le modèle de réseau de neurones. [Retour au texte.](#)

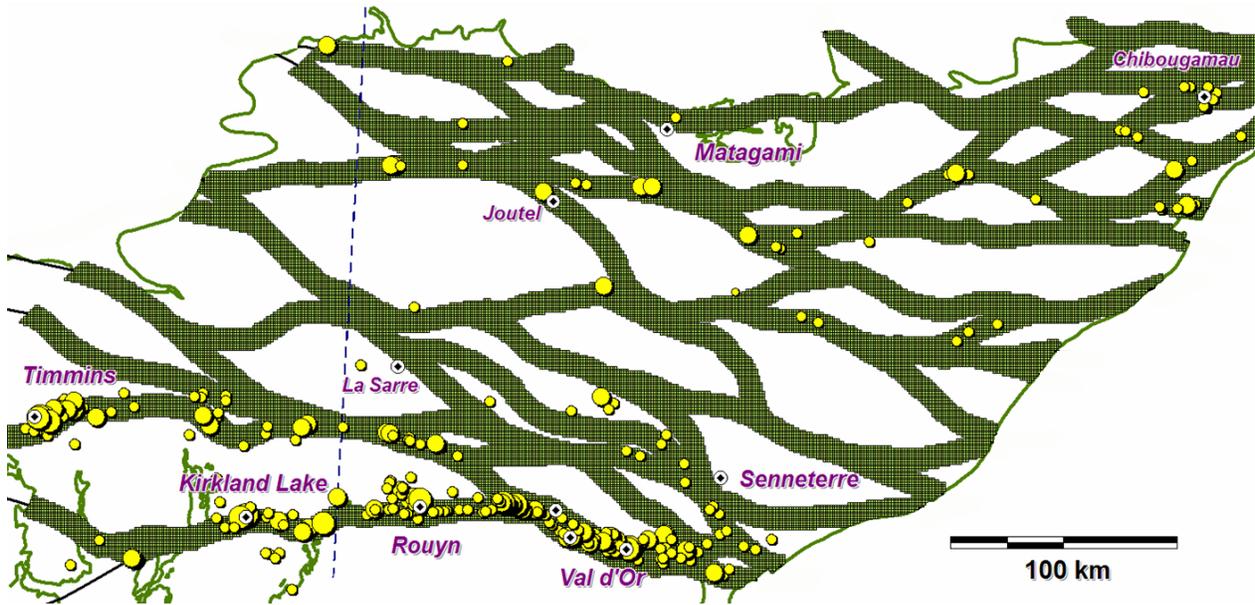


Figure 15. Vue d'ensemble de la discrétisation de la surface autour des failles et des 45 315 cellules de 1 km² pour le réseau de neurones. Légendes sur la figure 5. [Retour au texte.](#)

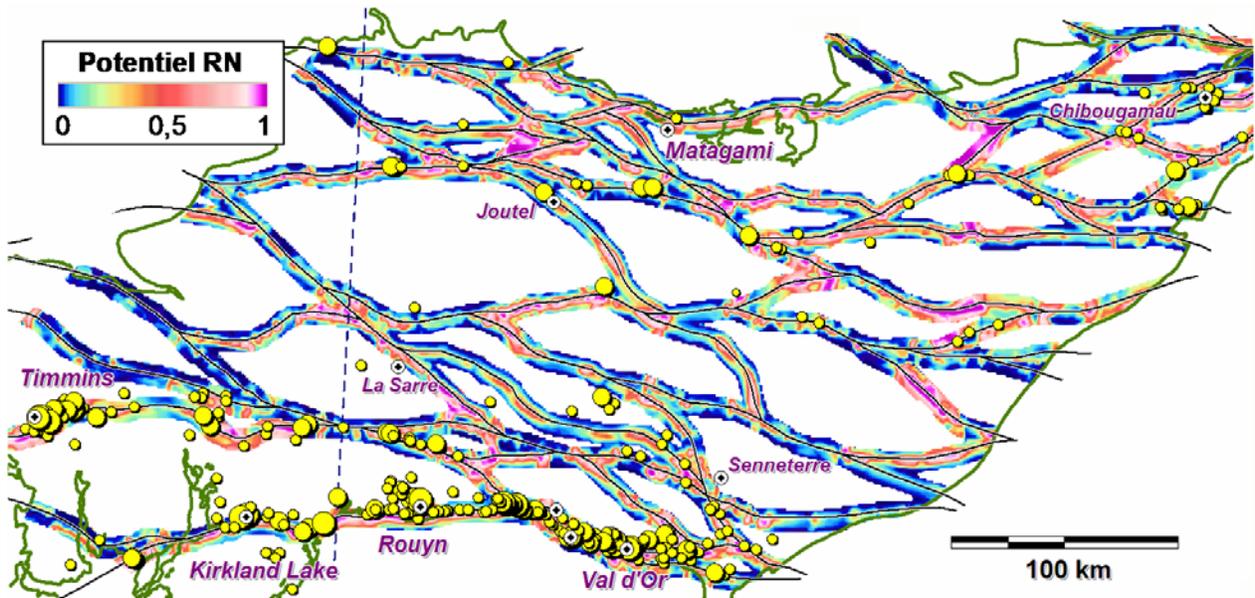


Figure 16. Carte du potentiel indiquant les localisations susceptibles de retrouver des minéralisations aurifères le long des couloirs de déformation selon le réseau de neurones (RN). 1 signifie un fort potentiel. Explications supplémentaires dans le texte. Légendes sur la figure 5. [Retour au texte.](#)

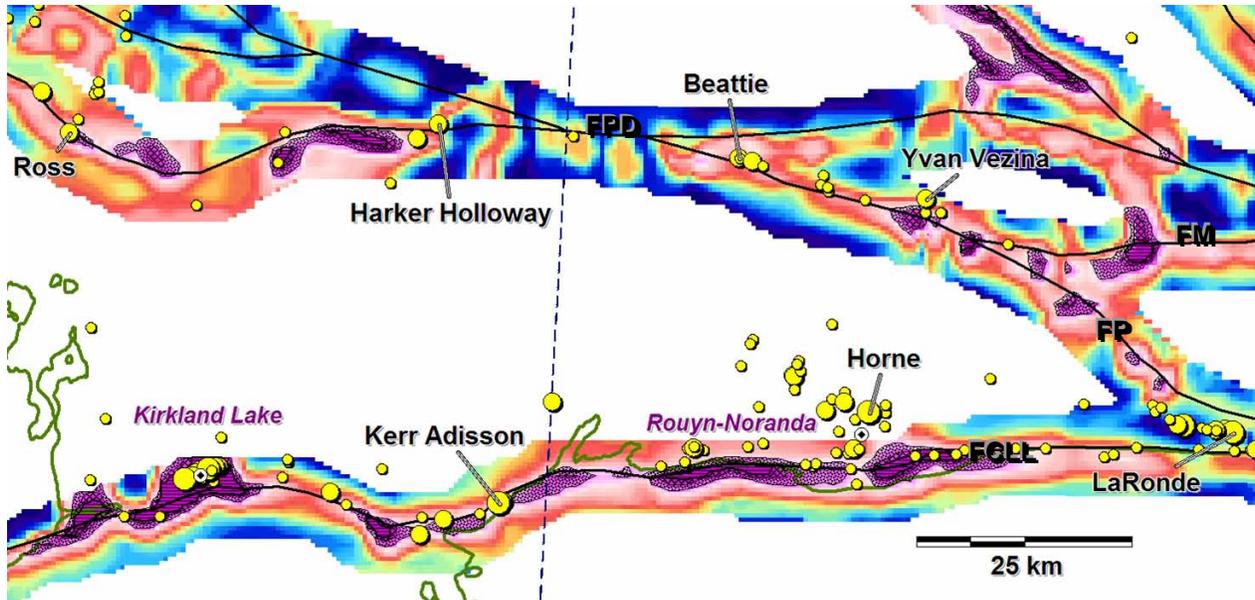


Figure 17. Détails de la carte de potentiel de la Figure 15 au sud de l'Abitibi. FPD : Faille Porcupine - Destor; FCLL : Faille Cadillac - Larder Lake; FP : Faille Parfouru; FM : Faille Manneville. Légendes sur les figures 5 et 16. [Retour au texte.](#)

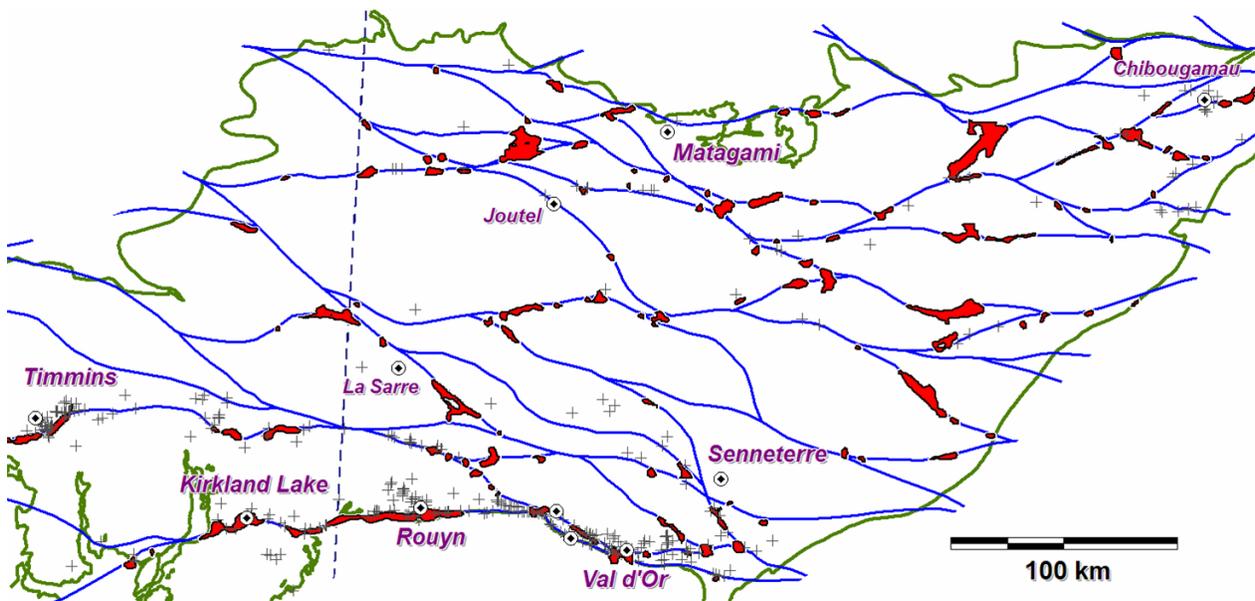


Figure 18. Les 114 cibles d'exploration (en rouge) correspondant aux valeurs supérieures au 95 percentile (0,9) du réseau de neurones (Figures 16 et 17). Les croix grises correspondent aux gîtes d'or. [Retour au texte.](#)