



RAPPORT FINAL

2005

Sous-projet SC12

Modélisation 3D des corps bréchiques et minéralisés

Par

M. Jébrak*, R. Furic*, M.-A. Brulotte* et M. Lalonde*

avec la participation de A. Chatopagay*, B. Guy**, G. Tremblay***,
M. Gauthier* et R. Daigneault****

* Département des Sciences de la Terre et de l'Atmosphère, Université du Québec à Montréal,
C.P. 8888, Succ. Centre-Ville, Montréal (Québec), H3C 3P8

** École Nationale Supérieure des mines de Saint-Étienne de France

*** Département d'informatique, Université du Québec à Montréal

**** Département des sciences appliquées, Université du Québec à Chicoutimi

Soumis à l'administration de DIVEX
avril 2005 – Montréal

Introduction

Le projet DIVEX a pour objectif de contribuer à la diversification du potentiel minéral du Québec. Le projet « Modélisation 3D des corps bréchiques et minéralisés » envisage de développer la compréhension géométrique et structurale des gisements bréchiques dans les environnements métamorphiques en 3D, en tentant d'insérer des paramètres géomécaniques dans les modèles géométriques. Le présent projet vise une famille morphologique de gisements encore mal reconnus, les corps bréchiques. Un grand nombre de minéralisations sont en effet associés à de vaste ensemble de brèche : c'est le cas pour des gisements de Pb-Zn (Mississippi Valley Type), d'or (Carlin type), d'uranium (gisements sous discordance), de cuivre-molybdène (porphyres), de platinoïdes (gabbro vari-texturé) ou polymétalliques (gîte fer-oxydes à Au-Cu-U-REE-Co). L'importance économique de ces gisements est absolument majeure puisque ces gisements constituent parmi les plus importants producteurs d'or, d'uranium, de molybdène, de cuivre, de terres rares, etc. Ces systèmes bréchiques sont également fréquents dans les réservoirs pétroliers.

Ces gisements posent des problèmes fondamentaux et des problèmes appliqués. Sur le plan fondamental, on connaît maintenant les grands mécanismes de fragmentation dans les systèmes hydrothermaux. On dispose de quelques outils de mesure, issus de la sédimentologie et de la géologie structurale. Ces outils sont rarement étalonnés en terme de processus. La modélisation de l'ensemble des processus physiques conduisant à une géométrie globale reste encore très difficile. On ignore à peu près complètement le bilan énergétique de ces processus. Sur le plan appliqué, les explorateurs miniers connaissent de grandes difficultés en vue de réaliser une modélisation des corps de brèches en exploration, aussi bien du point de vue de la géométrie interne que de l'enveloppe externe.

Objectifs

L'objectif de la recherche vise à prévoir la taille et la teneur des corps bréchiques minéralisés. Qu'est ce qui contrôle les volumes de brèches, et donc les tonnages des gisements ? Qu'est ce qui contrôle la perméabilité des brèches, et donc les teneurs des gisements ? Ces paramètres économiques majeurs peuvent théoriquement être prévus si on est capable

de modéliser les processus de genèse de ces minéralisations.

Plusieurs sous-objectifs ont donc été définis : (1) mieux définir quelques exemples de gisements bréchiques sur la base de description rigoureuse, quantitative, dans des environnements métamorphiques fréquents au Québec, et en déduire les mécanismes de genèse; (2) modéliser la formation de ces brèches sur une base numérique; (3) proposer des outils pratiques pour l'exploration minière

Afin de répondre au premier objectif, nous avons choisi la région de Chibougamau pour zone d'étude. Il s'agit d'un secteur relativement bien connu sur le plan de la géologie générale, cartographié par le Ministère des Ressources Naturelles du Québec, et où un appui logistique et financier peut être trouvé pour des travaux de ce type. L'environnement géologique est celui de ceintures de roches vertes contenant des volcanites mafiques et des plutons. Le secteur présente un fort potentiel pour les minéralisations à Cu-Au à caractère porphyrique (Pilote, 1998). Il est très accessible et on dispose d'une base de données régionales extensives (Daigneault et al., 2002). Les minéralisations se situent dans les plutons, donc dans un environnement très fréquent dans le Nord du Québec. Deux secteurs ont été plus particulièrement investigués, dans la région de Troilus, au Nord-Ouest de Chibougamau, et dans celle de Queylus, au Sud de Chibougamau. L'étude visait à reconnaître les volumes bréchiques, connus pour varier dans de grandes proportions (2 à 15 Mm³), et différents paramètres géométriques tels que la granulométrie ou la complexité morphologique des fragments.

Afin de répondre au deuxième objectif, nous avons choisi de développer une modélisation numérique sur une méthode complètement originale, les automates cellulaires, particulièrement bien adaptés pour simuler des processus granulaires. Pour cela, il est nécessaire de concevoir un générateur de roches virtuelles, puis de l'affecter par différents processus de fragmentation et de dissolution. Ce modèle sera comparé aux données statistiques de terrain.

Enfin, afin de répondre au troisième objectif, plusieurs outils diagnostics ont été développés pour les compagnies d'exploration minières, depuis des outils d'aide au diagnostic, très simples, à utiliser sur de terrain, jusqu'à des outils plus complexes de simulation.

Travaux antérieurs et état des connaissances

L'étude des brèches a fait de nombreux travaux au cours de ces 25 dernières années. Les géologues, en particulier les structuralistes, ont tenté d'établir une classification générale pour les roches bréchiques, en utilisant des critères descriptifs ou génétiques. Sibson (1986) a ainsi développé une classification structurale des brèches, tandis Sillitoe (1985) et Corbett et Leach (1995) se sont spécialisés dans les brèches des systèmes plutoniques et volcaniques dans les environnements d'arc magmatique. Une revue exhaustive des brèches a été réalisée par Laznicka (1988). Les géophysiciens ont souhaité développer des relations quantitatives entre différents paramètres (Scholz, 1989). La fragmentation a été modélisée sur la base de relations physiques théoriques reliant la surface ou la taille des fragments et l'apport énergétique (Rittinger, 1867 ; Kick, 1885 ; Nagahama et Yoshii, 1993).

Nous avons développé une méthodologie rigoureuse d'étude (Jébrak, 1997), méthodologie qui a ensuite été appliquée à divers environnements métallogéniques : porphyres à Mo-F (Ross et al., 2002), gisement d'uranium sous discordance (Lorilleux et al., 2001), karsts au-dessus d'intrusions alcalines (Matton et Jébrak, 2004).

Très peu de simulations de genèse de corps de brèche ont été développées à ce jour. A l'issue de ses études sur les brèches dans la faille de San Andrea, An et Sammis (1994) proposaient le cube fractal comme paradigme synthétique. Cette approche montrait que la courbe granulométrique d'une roche est une fonction de la probabilité de fragmentation à chaque itération scalaire. Plus récemment, l'utilisation de code de calcul géomécanique (Ord et Hobbs, 2002) ou statistique (Empereur-Mot et Villemin, 2003) permet de modéliser la phase de fragmentation. Par contre, ces codes ne permettent pas de modéliser les processus de dissolution, très fréquents dans les systèmes bréchiques, et qui s'expriment par la dimension fractale de bordure (Orford et Whalley, 1987; Berubé et Jébrak, 1999).

A l'échelle locale, nous ne résumerons pas ici en détail les travaux antérieurs sur le secteur de Chibougamau (Daigneault et al., 1990; Pilote, 1998). Localisé à environ 125 km au Nord de la ville de Chibougamau, le gisement Au-Cu de Troilus est situé dans la ceinture archéenne de roches vertes de Frotet-Evans. Dans la région de Troilus, la mine exploitée par Inmet a fait notamment l'objet de travaux par Fraser (1993), Gosselin (1995), et par l'équipe de S. Goodman; cette dernière soutenait que la brèche de Troilus présentait un caractère magmatique précoce; mais cette hypothèse ne fait pas consensus. Dans la

région de Queylus, le travail de Bureau (1980) constitue le mémoire de référence. Plus récemment, Ressources Loubel a réalisé des travaux inédits sur le terrain.

RÉSUMÉ DES ACTIVITÉS FINANÇÉES PAR DIVEX

Les activités financées par Divex ont été constituées par des travaux de compilation, des études de terrains, des traitements de laboratoire et de l'écriture de code informatique. Au financement de Divex s'est ajouté plusieurs financements modestes ou d'appui non comptabilisé : fonds à la découverte du CRSNG pour le chercheur senior (MJ), appui sur le terrain du Fonds Minier de Chibougamau, appui logistique et financement d'analyse par la compagnie INMET mining, prêt de matériel par la compagnie Soquem. Qu'ils en soient tous remerciés !

Travaux de terrain et de laboratoire

Les travaux de terrain ont été réalisés à l'été 2003 et complété à l'été 2004. Ils comprenaient :

- des levés de terrain dans la région de Queylus ; l'équipe, dirigée par R. Furic (supervisé par M. Jébrak), comprenait également A. Chatopagay, et un ou deux juniors pour appuyer le décapage ; des discussions ont eu lieu lors de la visite de l'équipe du Consorem (R. Daigneault, V. Pearson, D. Gaboury, G. Voicu, S. Faure) et de celle du Ministère des Ressources Naturelles;
- des travaux de terrain dans la mine de Troilus. Ces travaux ont été menés par M.A. Brulotte, avec la supervision des géologues de la mine, de M. Gauthier et M. Jébrak.

Les travaux de laboratoire ont été principalement réalisés par les étudiants aux études avancées : R. Furic et M.A. Brulotte (maîtrises en sciences de la Terre, en cours), A. Chatopagay (étudiant post-doctoral). Ils ont compris principalement de la géochimie, de la minéralogie, de la pétrologie et des études texturales en analyses d'image. Un ensemble d'échantillons provenant de gisements de type brèche à fer-oxyde à été étudié afin d'obtenir des comparaisons sur la composition en éléments en trace des magnétites. Ces travaux ont été transmis au projet « Gisements de type fer-oxyde » dont G. Baudouin (Univ. Laval) aura la responsabilité en 2005-06.

Modélisation

La modélisation a été principalement réalisée par M. Lalonde (maîtrise en informatique), avec le concours de G. Tremblay (Département informatique) et M. Jébrak.

Le projet a compris tout d'abord la réalisation d'un premier prototype, réalisé dès le début 2003. Conçu selon les principes du génie logiciel, ce prototype a été réalisé en Java sur plateforme PC. Il a permis de réaliser un ensemble d'expériences préliminaires qui

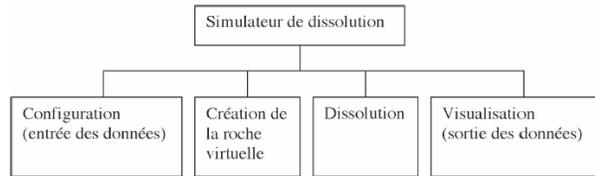


Figure 1: organisation du simulateur de dissolution

ont conduit à préciser la signification de la dimension fractale de contours de fragments. Le prototype a ensuite été porté sur C++ et s'est organisé en plusieurs modules en 2004-05 (Figure 1).

Un environnement de résolution de problème a été utilisé; l'ensemble a ensuite été porté avec des interfaces de type web, de manière à rendre le simulateur plus accessible.

Le principe sous-jacent la modélisation a été l'utilisation d'automate cellulaire. Il s'agit d'une approche relativement nouvelle en sciences de la Terre. On utilise un ensemble de cellules sur une matrice. L'état de chaque cellule évolue avec le temps selon des règles simples qui dépendent de l'état des cellules voisines. Par exemple pour une matrice bidimensionnelle avec un voisinage de 4 cellules, l'état de la cellule (i, j) au temps t + 1 dépend de l'état des 4 cellules voisines i+1, i-1, j+1, j-1 au temps t. Lorsque le temps passe de t à t+1, toutes les cellules changent leur état simultanément. Ainsi, le temps et l'espace d'un automate cellulaire sont discrétisés.

Pour la construction de la roche virtuelle, il faut préciser le type de roche (magmatique, métamorphique ou sédimentaire), le pourcentage de chaque minéral, la taille de chaque type de cristal, présence de phénocristaux, la porosité, etc. Le simulateur utilise un générateur de nombres aléatoires pour créer une instance de roche virtuelle en 3D. Une échelle est implicitement fixée. Chaque cellule de la matrice représente un volume grossièrement équivalent à un grain de sable. Les cristaux plus gros se verront attribués plusieurs cellules contiguës

La configuration de la simulation repose sur une série de paramètres. L'utilisateur doit configurer l'automate cellulaire lui-même. Pour un modèle de dissolution, ceci implique de choisir entre un régime

cinétique et un régime limité par la diffusion (Diffusion Limited Regime - DLR). Ces deux régimes ont été implantés. La simulation repose sur un principe simple : à chaque itération, un grain(cellule) a une probabilité de dissolution. Cette

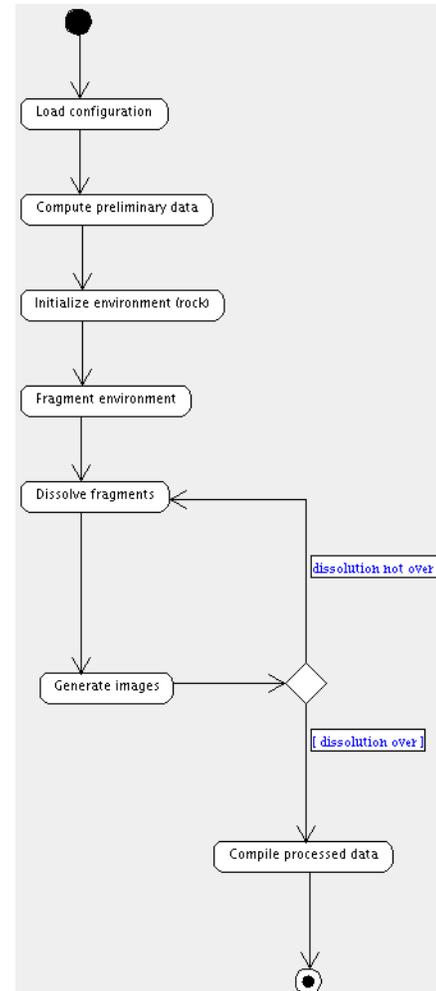


Figure 2 : organigramme du simulateur

probabilité de dissolution varie selon la solubilité du minéral et un coefficient de dissolution fonction de son degré d'exposition au fluide, et donc fonction de ses voisins.

Compte tenu des besoins importants en mémoire, le modèle a été implanté, en particulier les processus de diffusion (loi de Fick). Une version de production en C++ a été implantée sur un super-ordinateur SGI *origin* à 16 processeurs (installé au centre de recherche en climatologie Ouranos), utilisant une technologie de parallélisation Open MP. Les modèles pourront être transférés dans GOCAD, afin d'obtenir une visualisation en 3D.

Présentations et publications

Articles à revue

- Furic, R. and M. Jébrak (2005) Fluidalized breccia pipe in Archean porphyry Cu-Au system, Chibougamau district, Canada. En preparation finale pour *Precambrian research*, 2005
- Jébrak, M. and Lalonde, M. (2004) Clast shapes in fault core zones; From fractal analysis to virtual breccias. Accepted à *Journal of structural Geology*.

Communications

- Furic, R. et Jébrak, M. Les brèches gazeuses, du diamant aux métaux de base. 73^{ème} congrès de l'ACFAS, Chicoutimi, Mai 2005.
- Lalonde, M. et Jébrak, M. Mise en oeuvre d'un modèle de dissolution pour brèches hydrothermales. Colloque du REDIST, UQAC, Mars 2005.
- Jébrak, M., and Lalonde, M. 3D virtual rocks and the rounding of fragments by dissolution. 32rd International Geological Congress, Florence, Italy, August 2004, 87-13, page 428 (CD Rom)
- Furic, R., et Jébrak, M., La brèche de Queylus, une minéralisation inusuelle à cuivre-magnétite dans le pluton de Chibougamau, Abitibi. 72^{ème} congrès de l'ACFAS; journées De Launay, Mai 2004
- Brulotte, M.A., et Jébrak, M., Typologie et genèse de la brèche de Troilus. 72^{ème} congrès de l'ACFAS; journées De Launay, Mai 2004.

Travaux académiques (UQAM)

- Lalonde, M. MSc. Développement d'un simulateur de fragmentation (Septembre 2005) Maîtrise en Informatique.
- Furic, R. (Mars 2005) Organisation interne et granulométrie des breccia pipes ; le cas de Queylus, Abitibi oriental. Maîtrise en Sciences de la Terre.
- Brulotte, M.A. MSc. (Juin 2005) Les brèches magmatiques – hydrothermales de Troilus, NW de Chibougamau, Québec. Maîtrise en Sciences de la Terre.

Présentation à des utilisateurs

- Beaudoin, G., Jébrak, M. et Fontboté, L. Les gisements fer-oxydes à cuivre et or. Cours intensif, SEG, AEMQ-MRNFPQ, Québec, Novembre 2004

- Jébrak, M., Combien de temps dure une époque métallogénique ? Réunion du CONSOREM et de l'AEMQ, Val d'Or, Forum technologique. 16 Septembre 2004.

Méthodologie

Les brèches constituent des objets complexes très abondants dans la nature. Leur étude ressort de plusieurs domaines : géologie structurale (brèches de faille), sédimentologie (brèche syn-sédimentaire), l'étude des particules, tribologie (étude des frottements), la métallogénie.

Les travaux de caractérisation des brèches de la région de Chibougamau ont utilisés plusieurs méthodes : des levés cartographiques très détaillées, des études pétrographiques et géochimiques des phases d'altération présentes dans et aux alentours des brèches. Ensuite des études visant à caractériser l'organisation interne de la brèche : détermination de la géométrie des fragments, caractérisation de la fabrique et études granulométriques.

L'étude des altérations a consisté en des observation au microscope optique et au microscope électronique à balayage . Ces observations ont été complétées par des analyses chimiques.

L'organisation interne de la brèche a été étudiée en deux étapes. Dans un premier temps nous avons mené une cartographie de détail suivant un maillage métrique des affleurements mettant en évidence des zonalités granulométriques dans la brèche, puis dans un deuxième temps nous avons déterminé pour les différentes zones de la brèche les dimensions fractales de bordures des fragments par la méthode proposée par Bérubé et Jébrak(1999), les variations de distribution granulométrique des fragments et les fabriques. Ces travaux consistaient principalement en du traitement de clichés photographiques réalisés lors des travaux de cartographie.

1. la première distinction se fait sur la nature du ciment (magmatique, hydrothermal, poussière de roche) ;

2. la deuxième évaluation est celle du taux de transport, basée sur le caractère monomictite ou polymictite de la brèche ;

3. la troisième évaluation repose sur la géométrie des fragments, permettant de reconnaître le ou les mécanismes de fragmentation (PSD), la durée des interactions / l'intensité des déséquilibres (Df – Lorilleux et al., 2001), la composante structurale. L'interprétation du rapport matrice vs. élément est complexe. A ce stade, on recherche des zones plus ou moins matures afin de décrire des gradients, et donc

l'évolution d'une brèche et ou son organisation interne (Ross et al. 2002).

Résultats finaux

Nous donnerons ici les résultats sur les caractéristiques et la genèse des brèches de Troilus et de Queylus, et sur les résultats des modélisations numériques.

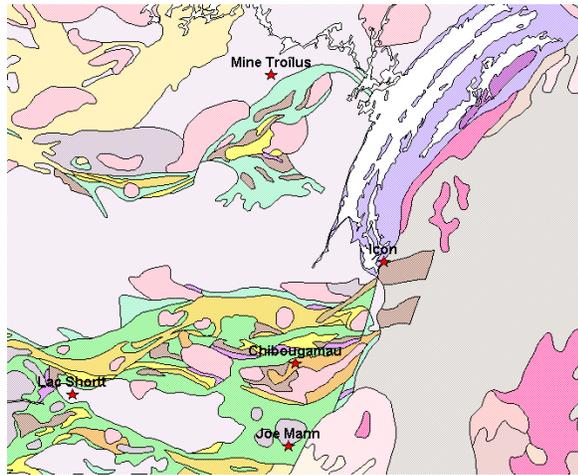


Figure 3 : Carte de situation des zones étudiées

Typologie et genèse de la brèche de Troilus

En se basant sur les caractéristiques morphologiques, géochimiques et pétrologiques, trois groupes de brèches d'origine hydrothermale et une brèche d'origine magmatique ont été mis en évidence.



Figure 4 : brèche de Troilus montrant des auréoles de réactions autour des fragments fortement étirés

Les brèches hydrothermales sont caractérisées par la présence d'auréoles de corrosion autour des

fragments, par des évidences d'assimilation des fragments par la matrice, par l'absence de bordure de trempe aux contacts entre le corps bréchique et l'encaissant et par une altération potassique localement très intense.

La brèche magmatique est caractérisée par une matrice leucocrate à texture grenue, par la présence de porphyres d'anorthite dans la matrice, par des fragments ayant subi une altération potassique (et non la matrice), par la présence d'auréoles de recristallisation et par l'absence de minéraux d'origine hydrothermale.

Les variations de composition des fragments constitués de tonalite, granodiorite, monzonite, et monzodiorite pourraient s'expliquer par l'origine multiphasée de l'intrusif dioritique. En effet, une combinaison de différenciation magmatique lors de la cristallisation et de pulsations magmatiques prenant place dans la chambre magmatique semble expliquer la variation de composition des fragments.

La composition minéralogique de la brèche hydrothermale est le résultat d'un remplacement minéralogique de l'intrusif dioritique par un fluide hydrothermal, appauvri en SiO_2 et riche en FeO , MgO , CaO et en métaux (Cu , Au). Les matrices des brèches hydrothermales sont sous saturées en SiO_2 par rapport aux fragments qu'elles contiennent. Ce caractère est inhabituel car la plupart des fluides hydrothermaux sont sur-saturés en silice et ne semblent pas être capable de produire un lessivage dans la matrice. Seuls les fluides associés à des altérations de type épidosite sous-marines sont connus pour présenter des caractéristiques de ce type. Ainsi, la présence de basaltes altérés en épidosites à la base de la séquence stratigraphique et de fragments altérés en épidote dans la brèche hydrothermale indique qu'une altération de type épidosite à probablement contribué à générer un fluide hydrothermal sous saturé en SiO_2 , lequel serait à l'origine de la bréchification hydrothermale. Toutefois des travaux supplémentaires (isotopes d'oxygène et analyse à la microsonde des épidosites) devraient être réalisés afin d'étayer cette hypothèse.

À la lumière des travaux réalisés dans le cadre de la maîtrise de M.A. Brulotte, le modèle génétique des brèches de Troilus s'établirait en cinq étapes :

1. Mise en place de l'intrusif dioritique;
2. Épisode précoce d'altération hydrothermale potassique et calcique relié à la fin du magmatisme, dans un contexte d'évolution porphyrique post-solidus;

3. Bréchification magmatique de l'intrusif résultant en une intrusion magmatique multiphasée;
4. Déséquilibre géochimique entre les fragments et matrice suivi par la cristallisation des minéraux néoformés à partir du fluide hydrothermal et des fragments digérés;
5. Épisode de déformation ductile avec une remobilisation de la minéralisation cupro-aurifère avec enrichissement dans les zones à forte schistosité;



Figure 5 : corps bréchiques montrant de fortes variations granulométriques; brèche de Queylus (largeur de la photographie 80 cm)

Typologie et genèse des brèches de Queylus

La brèche de Queylus se situe sur le flanc sud de l'anticlinal de Chibougamau au sein du pluton du même nom. Ce massif granitique synvolcanique daté à 278 ± 2 Ma (Krogh, 1982) occupe le cœur de l'antiforme, tandis que le flanc sud comprend la formation de Stella et la formation d'Haïy. Le pluton de Chibougamau est un massif granitique polyphasé dans lequel 4 phases majeures sont identifiables: la méladiorite à hornblende, la diorite quartzifère à hornblende et/ou chlorite, la tonalite à biotite et/ou chlorite et la leucotonalite.

Les gîtes et gisements cuprifères du district archéen de Chibougamau de ce district sont interprétés, comme des veines de cuivre en relation avec une intrusion felsique, ou comme des indices porphyriques. Le gîte de Queylus est considéré aujourd'hui comme un indice porphyrique où la brèche serait l'expression d'un breccia pipe. Il comprend la brèche de Queylus à proprement parler mais aussi un second affleurement de brèche de dimensions plus réduites. L'étude des altérations

présentes sur cette brèche montre une superposition de deux types d'altération majeurs : d'abord une altération phyllique précoce très intense anté bréchification, et ensuite, une altération plus calcosodique liée à la minéralisation cuprifère.

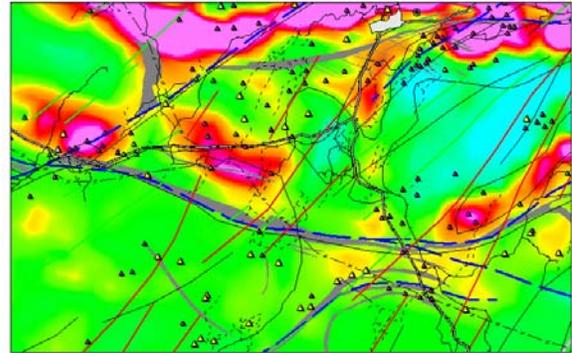


Figure 6 : Carte magnétique de la région sud du granite de Chibougamau, montrant les zones magnétiques près de Queylus

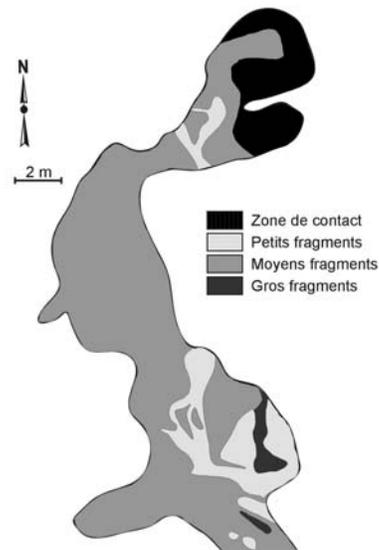


Figure 7 : Cartographie de la brèche de Chibougamau (Furic, 2005)

Une cartographie détaillée des différents affleurements de brèches montre qu'elle présente des caractéristiques d'organisation particulières, notamment une organisation en poches de différentes granulométries. L'étude de la géométrie des fragments, de leur granulométrie et de leurs orientations montre que la brèche se divise en deux faciès : les zones classées et les zones non classées. La zone classée présente des distributions granulométriques chaotiques, une bimodalité des

dimensions fractales de bordure, et une tendance à l'alignement des fragments de manière sub-parallèle aux contacts des poches. La zone non classée présente des distributions granulométriques régulières, des dimensions fractales uni-modales, et une orientation majoritaire des fragments marquée.

L'affleurement de la brèche sud montre clairement que la brèche de Queylus s'est développée dans une structure en trans-tension de type pull-appart, excluant ainsi l'origine purement phréato-magmatique admise jusqu'à présent. L'organisation interne de la brèche en poches granulométrique s'accorde avec une fluidalisation de la brèche.

Le phréato-magmatisme invoqué jusqu'à présent dans la genèse de ces brèches, n'est pas le seul mécanisme en cause. Ces brèches sont avant tout des brèches qui se sont développées dans un cisaillement dextre évoluant vers un pull-appart. Les évidences de ségrégation granulométrique durant le transport impliquent une fluidalisation du matériel. Cette fluidalisation se caractérise à l'affleurement par une organisation en poches granulométriques des fragments.

Bien qu'au cœur d'un district porphyrique le gîte de Queylus apparaît sous certains aspects à la croisée de plusieurs types de gîtes. L'altération phyllique et sa situation en sommet de coupole s'accorde avec un modèle porphyrique cependant les altérations liées à la minéralisation, les quantités importantes de magnétite et d'hématite, la présence d'allanite et la faible teneur en titane sont des tendances courantes dans les gisements de type Fer-Oxydes. Les gisements à fortes quantités de magnétite et d'hématite sont très souvent des intermédiaires entre des gisements de type Kiruna et des gisements de type Olympic Dam (Mark et al, 2005). Il en va de même pour les gisements de type porphyrique à caractère oxydant qui pourraient être un troisième pôle de cette grande famille des gisements riches en magnétite.

Modélisation numérique

La modélisation numérique a permis de mettre en évidence très rapidement des résultats originaux, en cours de soumission pour publication.

Le premier résultat est que la morphologie des fragments d'une brèche dépend principalement de la cinétique de dissolution (Sahimi et Tsotsis, 1988) et de l'avancement de cette dissolution sur les bords des fragments: les brèches matures sont plus complexes que les brèches immatures ; on peut donc utiliser la dimension fractale de contour comme paramètre définissant la maturité d'une brèche.

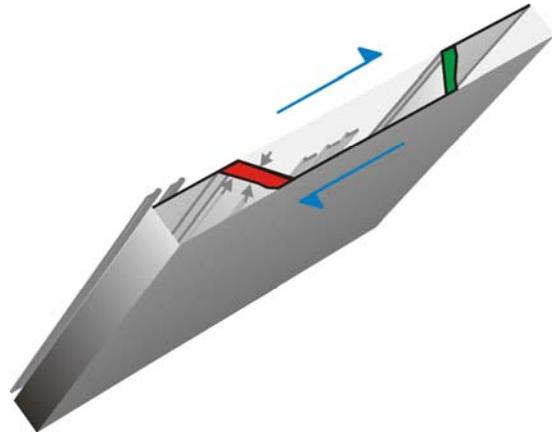


Figure 8 : modèle de formation de la brèche de Queylus par trans-tension

L'évolution vers la maturité est cependant différente selon le régime de dissolution. Dans le cas d'un régime où le taux de dissolution croît avec la surface disponible (régime limité par la diffusion), et en particulier pour une croissance en fonction du log de la surface disponible, on obtient un progressif arrondi des angles, et donc la formation de boules. On connaît bien ce processus dans la formation de chaos granitique, ou de dissolution en environnement hydrothermal peu agressif. Par contre, dans le cas d'un régime de dissolution où le taux est indépendant de la surface disponible (régime cinétique), on obtient des morphologies beaucoup plus complexe : cette complexité maximale, conduit à une forte production de particules en suspension dans le fluide hydrothermale et à de fortes dimensions fractales de contour, facile à identifier sur le terrain. Ce mode de dissolution traduit des environnements hydrothermaux très agressifs (Figure 10).

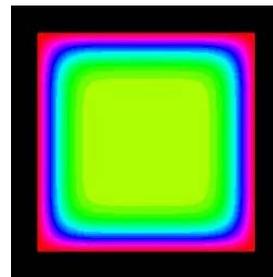


Figure 9 : Modèle de diffusion sous forme de loi d Fick

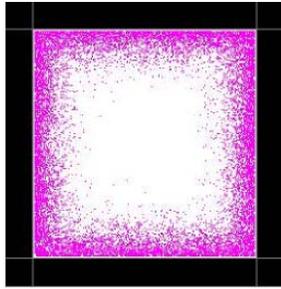


Figure 10 : Modèle de diffusion avec automate cellulaire

Le deuxième type de résultat permet de mesurer l'importance de la nature de la roche qui se dissout par rapport à la morphologie finale. Deux paramètres ont été mesurés : la porosité initiale de la roche est un facteur important qui accélère le processus de dissolution. Cependant, la nature de la roche dissoute joue un rôle mineur dans la morphologie finale. On peut observer ce rôle mineur dans un diagramme de Streikensen où des courbes d'isodimensions fractales des fragments ont été calculées à partir d'expérience pour différents types de roche. Toute chose égale par ailleurs, ce sont les roches surtout riches en feldspath K qui donnent des morphologies les plus complexes sous l'effet de la corrosion.

Une petite carte de format bancaire permettant d'illustrer les mécanismes de dissolution a été réalisée et est distribuée largement.

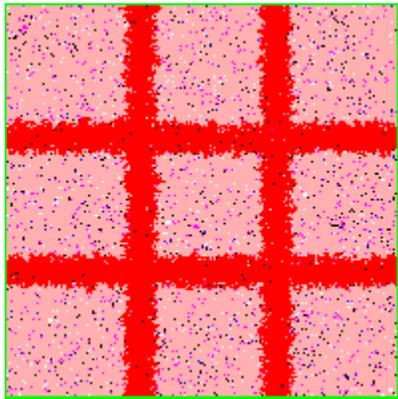


Figure 11 : Représentation 2 D d'une brèche virtuelle avec corrosion d'une roche granitique (feldspath en rose, biotite en noir, quartz en blanc). Les zones dissoutes sont figurées en rouge. Remarquez la complexité du contour des fragments

La validation et la vérification du modèle reste à réaliser. Elles devraient se baser sur des tests avec

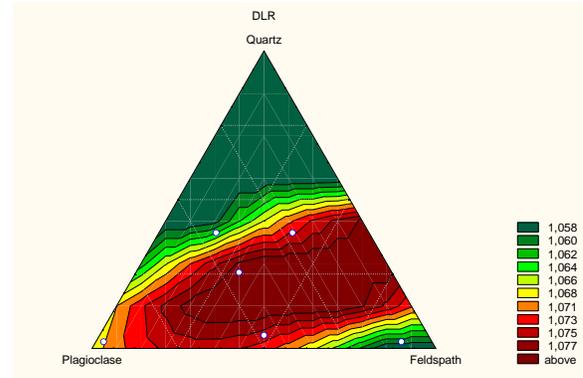


Figure 12 : Triangle de Streikensen montrant la sensibilité des roches magmatiques à la corrosion par des fluides hydrothermaux. La zone en rouge correspond à une zone susceptible de présenter les fragments aux contours les plus complexes

des experts et sur une quantification des résultats par une approche fractale

Les travaux réalisés au cours de DIVEX seront poursuivis dans le cadre d'un contrat de recherche qui a été signé au début de 2005 entre l'UQAM et la société COGEMA, deuxième producteur d'uranium dans le monde. Le projet prévoit notamment de réaliser un outil de diagnostic sur le web intégrant les processus de simulation développés au cours des études de DIVEX. Une maîtrise a été entamée afin de développer cet outil (A. Pouradier, UQAM).

Enfin, les travaux de simulation pourront être poursuivis dans trois directions :

- pour améliorer la construction de la roche virtuelle, par l'application par exemple des lois de cristallisation à partir de la composition d'un magma de composition donnée;
- pour augmenter la taille des matrices par l'utilisation de super-ordinateur parallèle
- pour implanter la notion de fragment et lui permettre une évolution autonome : déplacement dans un conduit liquide ou gazeux en mouvement (fluidisation), ou effondrement.

Conclusions

Les travaux réalisés dans le cadre de DIVEX ont permis de développer de meilleures connaissances sur les gisements en environnement bréchiques et de développer des outils d'appuis à la prospection minière.

Sur le plan fondamental, l'étude des brèches de Quylus et de Troilus a permis de proposer de nouveaux modèles de mise en place de ces gisements. A Queylus, le pipe bréchique est issu d'un processus de fluidalisation dans un contexte d'ouverture tectonique en transtension le long d'accident E-W. Ce pipe est vraisemblablement situé au sommet d'une coupole magmatique à caractère porphyrique. A Troilus, les brèches résultent à la fois de processus magmatique de sommet de coupole, et d'altération post-solidus à caractère hydrothermal.

Ainsi, l'étude de la brèche de Queylus permet de répondre à une des questions de base du projet. Les volumes de brèches sont contrôlés dans certains cas par les conditions d'ouverture le long des failles. C'est la géométrie en transtension qui va permettre de calculer le volume minéralisé potentiel. Ces résultats rejoignent clairement les travaux de R. Sibson (2001) et de Corbett et Leach (1995) sur les systèmes porphyriques et épithermaux dans la zone Pacifique. Les systèmes Archéens obéissent aux mêmes lois. Comme dans les systèmes plus récents, on peut s'attendre à rencontre le long de ces failles :

- brèche hydraulique à or (Sibson, 2001);
- des brèches de dissolutions pouvant être minéralisées en uranium le long des failles (Lorilleux et al., 2001);
- des brèches à cuivre et or, issues de fluidalisation au sommet de porphyres (Furic et al. 2005).

Il est donc vraisemblable que l'analyse des virgations des failles à une échelle régionale permet de prédire l'emplacement potentiel des zones de failles, mais aussi le volume possible des zones en transtension.

La deuxième question portait sur le contrôle de la perméabilité des brèches, et donc les teneurs des gisements. Les travaux de terrain et la simulation informatique permettent de donner quelques pistes de réponses. Trois paramètres sont essentiels :

- le taux de dilatation; dans le cas des modèles étudiés, ce taux est une fonction du mouvement le long des failles; il est généralement très faible;
- la loi de fragmentation. Une loi de type fractale semble moins favorable pour obtenir une forte perméabilité. En effet, la poussière de roche produite dans un contexte de forte différentiel des contraintes (explosion, friction) à tendance à s'organiser selon une tessellation (type Arrhenius) favorisant un modèle compact, avec peu de porosité.
- la durée des interactions et les processus de dissolution; ce sont ces processus qui ont été

particulièrement étudiés au cours de cette étude. Les outils mis au point permettront à la fois un diagnostic plus facile sur le terrain et des simulations qui appuieront à la fois la reconnaissance des processus, et la prévision de la perméabilité.

RÉFÉRENCES

- An, L., Sammis, C. G. (1994) Particle size distribution of cataclastic fault materials from southern California: a 3-D study. *Pageoph.*; 143: 203-227.
- Bureau, S. (1980) Zones de brèches associées à des gîtes de porphyres cuprifères dans la région de Chibougamau, Québec. Université du Québec à Chicoutimi; 103 p.
- Bérubé, D., Jébrak, M. (1999) High precision boundary fractal analysis for shape characterization. *Computers & Geosciences*. 25: 1059-1071.
- Corbett, G. J., Leach, T. M. (1995) S.W. Pacific Rim Au/Cu Systems : Structure, Alteration and Mineralization. Vancouver: University of British Columbia, (Short Course, MRDU).
- Daigneault, R. St-Julien, P., Allard, G. O. (1990) Tectonic evolution of the northeast portion of the Archean Abitibi greenstone belt, Chibougamau area, Quebec. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27: 1714-1736.
- Daigneault R., Mueller W. U., 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.
- Empereur-Mot, L., Villemin, T. (2003) OBSIFRAC: Database-supported software for 3D modeling of rock mass fragmentation; *Computers & Geosciences*, 29: 173 - 181 .
- Fraser, R. J. (1993) The Lac Troilus gold-copper deposit, Northwestern Quebec: A possible Archean Porphyry system. *Economic Geology*, 88: 1685-1699.
- Gosselin, C. (1995) Synthèse géologique de la région de Frotet-Troilus et ses implications pour l'exploration. Ministère des Ressources Naturelles, Québec; ORO 95-10. 8 p.
- Jébrak, M. (1997) Hydrothermal breccias in vein-type ore deposits: A review of mechanisms, morphology and size distribution. *Ore Geology Reviews*, 12: 111-134.
- Kick F. (1885) *Das Gesetz der proportionalem Widerstrand und seine Anwendung*. Arthus Felix.
- Krogh, T.E. (1982) Improved accuracy of U-Pb zircon ages by the creation of more concordant systems using air abrasion technique. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46: 637-649.
- Laznicka, P. (1988) *Breccias and coarse fragmentites, petrology, environments, associations, ores*. Amsterdam: Elsevier; (Developments in Economic Geology).
- Lorilleux G., Jébrak M., Cuney M., Baudemont D. (2001) Polyphased hydrothermal breccias associated with unconformity-type uranium mineralization (Canada): from fractal analysis to structural significance. *Journal of Structural Geology*, 24: 323-338.

- Matton, G., Jébrak, M. (2005) Resolving the Richat enigma: doming and hydrothermal karstification above an alkaline complex. *Geology*, Aout, sous presse.
- Nagahama, H., Yoshii, K. (1993) Fractal dimension and fracture of brittle rocks. *International Journal for Rock Mechanics and Min. Sci. and Geomechanics Abstracts*. 30:173-175.
- Ord, A., Hobbs, B. E. (2002) Modelling fluid flow and fractures. Geological Association of Canada, Mineralogical Association of Canada, Programme et Résumés; Saskatoon. p. 85-86.
- Orford, J. D., Whalley, W. B. (1987) The quantitative description of highly irregular sedimentary particles: The use of the fractal dimension. Marshall, J. R. *Clastic Particles*. New York: Van Nostrand Reinhold Co.; 1987; pp. 267-280.
- Pilote, P., (1998) éditeur. *Géologie et Métallogénie du district minier de Chapais-Chibougamau*. Nouvelle vision du potentiel de découverte. Ministère des Ressources Naturelles 180 p.; (DV 98-03). Livret-guide d'excursion.
- Rittinger P. R. v. (1867) *Lehrbuch des Aufbereitungskunde*. Ernst und Korn.
- Ross P. S., Jébrak M., Walker B. (2002) Discharge of hydrothermal fluids from a magma chamber and concomitant formation of a stratified breccia zone at the Questa Porphyry Molybdenum deposit, New Mexico. *Economic Geology*, 97: 1679-1699.
- Sahimi M., Tsotsis T. T. (1988) Dynamic scaling for fragmentation of reactive porous medias. *Physical Review Letters*, 59: 888-891.
- Scholz, C. H. (1989) Mechanics of faulting. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 17: 309-334.
- Sibson, R. H. (1986) Brecciation processes in fault zones: inferences from earthquake rupturing. *Pure and Applied Geophysics*, 124: 159-174.
- Sibson, R. H. (2001) Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition. Richards, J. P. and Tosdal, R. M. *Review in Economic Geology*, 14; Structural controls on ore genesis. pp. 1-24.
- Sillitoe, R. H. (1985) Ore-related breccias in volcanoplutonic arcs. *Economic Geology* 80: 1467-1514.