
Reconnaissance géochimique des protolithes dans les domaines de haut grade métamorphique

Projet 2009-09

Par : SYLVAIN TREPANIER
STEPHANE FAURE

Avril 2010



AVERTISSEMENT

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

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

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

Trépanier, Sylvain, et Faure, Stéphane, 2010. Reconnaissance géochimique des protolithes dans les domaines de haut grade métamorphique. Rapport du projet CONSOREM 2009-09, 24 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

RESUME

Les domaines de roches fortement métamorphisées occasionnent des défis importants pour l'exploration. En particulier, il est communément difficile d'identifier correctement les protolithes (sédimentaire vs ignée) de roches fortement métamorphisées. Pourtant cette identification est critique pour le développement de modèles d'exploration appropriés. Une méthode automatisée de discrimination géochimique des protolithes est ici proposée. La méthode s'applique tant pour les roches peu métamorphisées que fortement métamorphisées (granulites).

Une banque de données contenant un large éventail de roches sédimentaires et ignées non (ou peu) métamorphisées a été constituée et utilisée comme référence pour la reconnaissance automatique des protolithes. Cette reconnaissance est fondée sur des techniques d'apprentissage supervisé pour la discrimination dénommée « machine à vecteurs de support » (*Support Vector Machine, SVM*).

Deux modèles ont été construits : un modèle utilisant les éléments majeurs seulement et un second utilisant les majeurs et les traces Cr, Ni, Sr, Rb, Zr et Ba. Cette méthode est mise en œuvre dans le logiciel Lithomodeleur du Consorem servant au traitement des données lithogéochimiques (projet 2009-01).

Les résultats de reclassification par la méthode sont d'environ 87 % pour le modèle avec les majeurs seulement et de 92 % pour le modèle avec les majeures et Cr, Ni, Sr, Rb, Zr et Ba. Les taux de reclassification varient toutefois selon les types de roches et leur altération. Ils sont excellents pour les roches ignées peu altérées, pour les roches sédimentaires clastiques fines (mudstones) et pour les roches sédimentaires chimiques (calcaires, dolomies, etc). Ils sont plus faibles pour les roches ignées felsiques et intermédiaires altérées ainsi que pour les grès.

La méthode de reconnaissance des protolithes a été testée sur différents cas d'études pour des roches métamorphisées, en contextes minéralisé et non minéralisé. Les cas de Winston Lake et Montauban ont permis de constater que l'altération potassique ou alumineuse des roches ignées rend leur signature semblable à des protolithes sédimentaires. Toutefois, l'examen de plusieurs échantillons de roches ignées altérées dans un même secteur permet de constater un étalement de la réponse entre ignée et sédimentaire, ce qui procure un caractère distinctif par rapport à un secteur dominé par des roches sédimentaires. Les autres cas d'étude situés dans des domaines de haut grade métamorphique permettent de confirmer que la méthode permet une discrimination efficace même jusqu'aux domaines de migmatisation et des granulites.

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	II
RESUME	III
TABLE DES MATIERES.....	IV
1. INTRODUCTION	1
2. METHODE GEOCHIMIQUE D'IDENTIFICATION DES PROTOLITHES IGNEES ET SEDIMENTAIRES	1
2.1 TRAVAUX ANTERIEURS.....	1
2.2 BASE DE DONNEES GEOCHIMIQUES DE REFERENCE	2
2.3 DISCRIMINATION DES ROCHES IGNEES ET SEDIMENTAIRES NON METAMORPHISEES.....	3
2.3.1 <i>Méthode mathématique de discrimination</i>	<i>3</i>
2.3.2 <i>Choix des éléments explicatifs pour la discrimination</i>	<i>3</i>
2.3.3 <i>Choix des échantillons pour calibrer la méthode de discrimination et recalculs des données géochimiques</i>	<i>4</i>
2.3.4 <i>Traitement par machines à support vectoriel.....</i>	<i>5</i>
2.3.5 <i>Classification des roches peu métamorphisées, modèle avec majeurs seulement ..</i>	<i>5</i>
2.3.6 <i>Classification des roches peu métamorphisées, modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr- Ba-Rb-Sr</i>	<i>7</i>
2.4 DISCRIMINATION DES ROCHES IGNEES ET SEDIMENTAIRES METAMORPHISEES DE PROTOLITHES CONNUS/ASSUMES.....	9
2.5 MISE EN ŒUVRE D'UN OUTIL DE DISCRIMINATION	10
2.5.1 <i>Module logiciel d'identification des protolithes.....</i>	<i>10</i>
2.5.2 <i>Informations retournées par le traitement.....</i>	<i>10</i>
3. TESTS SUPPLEMENTAIRES ET EXEMPLES D'APPLICATIONS.....	12
3.1 GISEMENT DE WINSTON LAKE, ONTARIO.....	12
3.2 SECTEUR DE MONTAUBAN, QUEBEC.....	15
3.3 ROCHES DE LA CEINTURE DE NUUVUAGITTUQ, QUEBEC.....	18
3.4 MIGMATITES DU SECTEUR DE SAINT-MALO, BOUCLIER ARMORICAIN, FRANCE	20
3.5 PROVINCE DE GRENVILLE	21
4. CONCLUSIONS	23
REMERCIEMENTS	23
REFERENCES	24

Liste des figures

Figure 1. Densité de distribution de la réponse du système selon le type de roche connu, modèle avec majeurs seulement.	11
Figure 2. Densité de distribution de la réponse du système selon le type de roche connu, modèle avec majeurs + 6 traces.....	11
Figure 3. Géologie de la région du gisement de Winston Lake. Tiré de Osterberg, 1993.	12
Figure 4. Répartition des réponses (0: ignée; 1: sédimentaire) pour les métavolcanites de Winston Lake, modèle avec majeurs seulement.....	14
Figure 5. Répartition des réponses (0: ignée, 1: sédimentaire) pour les métasédiments du bassin de Némiscau, Québec (données de Doyon, 2004).....	14

Figure 6. Géologie et localisation du gisement de Montauban, Québec. Modifié de Prabhu et Webber, 1984.....	16
Figure 7. Réponse du modèle avec majeurs seulement pour les "volcanites et volcanoclastites altérées" du secteur de Montauban.	17
Figure 8. Réponse du modèle avec majeurs seulement pour les gneiss du groupe de Montauban.....	17
Figure 9. Géologie de la ceinture de Nuvvuagittuq. Tiré de O'Neil et al., 2007.....	19
Figure 10. Réponse du modèle avec majeurs + 6 traces pour les unités de "faux-amphibolite" de la ceinture de Nuvvuagittuq.	20

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Études antérieures de discrimination des protolithes sédimentaires et ignés	1
Tableau 2. Matrice de confusion, groupe test.	6
Tableau 3. Matrice de confusion, roches volcaniques du groupe de test.	6
Tableau 4. Matrice de confusion, roches intrusives du groupe de test.	6
Tableau 5. Matrice de confusion, roches sédimentaires clastiques du groupe test. Modèle avec majeurs seulement (n=1187).	7
Tableau 6. Matrice de confusion, roches sédimentaires chimiques du groupe test. Modèle avec majeurs seulement (n=800).	7
Tableau 7. Matrice de confusion, groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr.	8
Tableau 8. Matrice de confusion, roches volcaniques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 538). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.	8
Tableau 9. Matrice de confusion, roches intrusives du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 430). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.	8
Tableau 10. Matrice de confusion, roches sédimentaires clastiques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 354). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.	9
Tableau 11. Matrice de confusion, roches sédimentaires chimiques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 131). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.	9
Tableau 12. Matrice de confusion, roches métamorphisées de protolithe connu/assumé. Modèle avec majeurs.....	10
Tableau 13. Pourcentages de reclassification correcte pour les roches volcaniques du gisement de Winston Lake, selon le type de roche et le faciès d'altération.....	13
Tableau 14. Résultat du traitement des roches de la ceinture de Nuvvugattiuq, modèle avec majeurs + 6 traces.	18
Tableau 15. Résultat du traitement des migmatites du secteur de Saint-Malo, France.	21
Tableau 16. Reconnaissance des gneiss du Grenville dont le protolithe est connu.	22
Tableau 17. Reconnaissance des gneiss du Grenville dont le protolithe est inconnu	22

1. INTRODUCTION

L'exploration en terrains de haut grade métamorphique présente plusieurs défis dont celui d'une reconnaissance correcte des différents protolithes. Lorsque le métamorphisme est faible, des critères texturaux peuvent être utilisés mais en métamorphisme plus élevé, la recristallisation et la croissance de minéraux métamorphiques rendent la tâche plus difficile et seules la minéralogie ou la géochimie permettent une certaine discrimination.

Les différents assemblages de roches volcaniques, plutoniques et sédimentaires déformés et métamorphisés sont décrits grâce à des terminologies descriptives et minéralogiques (schiste à biotite et hornblende par exemple) ce qui est nécessaire pour leur mise en carte. Toutefois une discrimination des protolithes est nécessaire pour l'élaboration de modèles d'exploration appropriés. Des assemblages de rhyolites altérées peuvent, avec le métamorphisme, être confondus avec des roches sédimentaires produisant dans les deux cas des assemblages de quartz-mica-grenat. La simple distinction entre des protolithes sédimentaires et ignés représente donc déjà un élément significatif pour l'exploration.

L'objectif de ce projet est de présenter une méthode géochimique d'identification des protolithes (sédimentaire vs ignée) applicable aux roches de haut grade métamorphique.

La première partie de ce rapport traite de la méthode proposée pour identifier les protolithes. La seconde partie se concentre sur des applications de la méthode pour différents cas. Ces cas serviront de tests additionnels pour la méthode et permettront de voir les possibilités et limites d'application.

2. METHODE GEOCHIMIQUE D'IDENTIFICATION DES PROTOLITHES IGNES ET SEDIMENTAIRES

2.1 Travaux antérieurs

Peu d'études ont abordé le sujet de la classification géochimique des roches selon leur nature sédimentaire vs ignée (**Tableau 1**). Certaines études ont toutefois permis une classification positive des échantillons avec des résultats en général supérieurs à 80 %. Toutefois, ces études étaient limitées à des régions spécifiques (Prabhu et Webber, 1984), sur des banques de données plutôt restreintes (Howarth, 1971) ou sur des types restreints d'unités lithologiques (Shaw, 1972). De plus, aucune de ces études n'a évalué l'influence de l'altération hydrothermale sur les résultats de classification.

Tableau 1. Études antérieures de discrimination des protolithes sédimentaires et ignés.

Référence	Données sources	Éléments utilisés	Technique de classification	Succès
Howarth, 1971	Roches sédim. vs volcan. (800 éch)	Majeurs	Analyse discriminante	80 %
Shaw, 1972	Grès vs. Volcanites felsiques	Majeurs	Analyse discriminante	85 %
Prabhu et Webber, 1984	Paragneiss, quartzites, volcanites felsiques de Montauban	Majeurs	Analyse discriminante, diagrammes, minéraux normatifs	Variable selon la méthode

2.2 Base de données géochimiques de référence

La première étape dans le développement d'une méthode de discrimination des protolithes est la compilation d'une banque de données géochimiques. Pour que la méthode soit la plus générale possible, cette banque de données se doit de représenter l'éventail le plus large possible de roches sédimentaires, ignées et métamorphiques. Les banques de données suivantes ont été compilées et fusionnées :

- Le SIGÉOM pour tout le Québec, version 2004 (MRNF, 2004)
- Banque GeoRoc (www.georoc.com)
- OZChem de l'Australie
- Banque de données de roches de la Finlande
- Banque de données de roches du Manitoba
- Données personnelles de P. Cousineau, et H. Longuépée
- Compilation d'articles scientifiques

La banque compilée contient un total de 205 353 échantillons. À partir des descriptions, les échantillons ont été classés en différentes catégories :

- Ignée (incluant méta ignée) = 168 182
- Sédimentaire (incluant méta sédimentaire) = 25 261
- Métamorphique de protolithe inconnu = 11 914

Les roches ont été également classées en sous-catégories pour des fins d'analyses plus poussées des résultats :

- Volcanique = 119 749
- Intrusive = 46 813
- Sédimentaire clastique = 11 992
- Sédimentaire chimique = 6 086
- Méta sédimentaire clastique = 4 551
- Méta sédimentaire chimique = 939
- Méta ignée = 2 991

Les roches volcaniques et intrusives ont été classées selon leur degré de fractionnement et leur alcalinité, toujours d'après les descriptions :

- Ultramafique = 4 827
- Mafique = 32 469
- Intermédiaire = 34 828
- Felsique = 30 635
- Sub alcaline
- Alcaline
- Ultra alcaline

Le caractère frais ou altéré des roches volcaniques et ignées a été déterminé à l'aide de diagrammes discriminants présentés dans le cadre du projet Consorem 2008-07 (Rapport en ligne sur https://consorem.uqac.ca/production_scienc). Ces diagrammes sont :

- Champs du PerMafique,
- Alteration Box Plot,
- Champs de l'Indice de Saturation Albite,
- Champs de l'Indice de Saturation Albite-Sericite,
- Champs de l'Indice Chlorite,
- Champs de l'Indice Hashimoto,
- Champs de l'Indice Sericite.

Seuls les échantillons se trouvant dans le champ des roches fraîches sur tous ces diagrammes ont été considérés frais.

Finalement, lorsque les descriptions étaient suffisamment détaillées, plusieurs roches sédimentaires ont été classées selon le type de sédiment:

- Grès (comprend arénites et wackes) = 3 185
- Mudrocks = 1 819
- Conglomérats = 246
- Calcaires et calcaires impurs = 975
- Dolomies et dolomies impures = 668
- Cherts = 31
- Formations de fer = 136
- Phosphorites = 20

La banque compilée comprend donc un éventail très large de roches sédimentaires et ignées, altérées ou non, et provenant de différentes régions, contextes tectoniques et âges. Une telle banque permet donc de développer une méthode générale de discrimination des protolithes.

2.3 Discrimination des roches ignées et sédimentaires non métamorphisées

2.3.1 Méthode mathématique de discrimination

Différentes approches mathématiques pourraient être utilisées pour distinguer les roches sédimentaires des roches ignées non métamorphisées :

- Algorithmiques (ex: si $Al/(K+Na+Ca) > 2$ \diamond sédiment à 90 % probabilité, etc.) ;
- Diagrammes binaires et ternaires sur les majeurs et les traces ;
- Analyses discriminantes linéaires ;
- Arbres, réseaux de neurones et autres méthodes non linéaires.

Étant donné la complexité du problème et la relation non-linéaire probable entre la géochimie et les protolithes, il a été décidé d'utiliser directement les méthodes de discrimination les plus puissantes, c.-à-d. les méthodes non-linéaires. Différentes méthodes non-linéaires ont été testées : machine à vecteurs de support (*Support Vector Machine*, SVM), réseaux neuronaux, k-voisins, etc. Finalement, la méthode des machines à vecteurs de support a été choisie en raison des résultats de reclassification légèrement supérieurs par rapport aux autres méthodes.

2.3.2 Choix des éléments explicatifs pour la discrimination

Un autre paramètre dans le développement d'une méthode de discrimination est le choix des éléments chimiques explicatifs. Le choix des éléments est un compromis entre la puissance de discrimination (plus on utilise d'éléments, plus la puissance de discrimination augmente) et la disponibilité des éléments discriminants dans les banques de données d'exploration (déficientes pour certains éléments mineurs ou traces).

En général, les éléments majeurs, donnés comme oxydes dans les analyses, sont les plus couramment analysés. L'examen de la base de données de référence indique que certains éléments mineurs sont également assez couramment analysés. Ces éléments sont Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr.

Deux ensembles d'éléments ont ainsi été utilisés comme éléments explicatifs pour la discrimination des protolithes. Chaque groupe fera l'objet d'un traitement séparé et deviendra un modèle de traitement distinct.

- Modèle 1 : Majeurs (SiO₂, TiO₂, Al₂O₃, MgO, Fe₂O₃T, CaO, Na₂O, K₂O, MnO, P₂O₅).
- Modèle 2 : Majeurs + 6 éléments mineurs couramment analysés (Cr, Ni, Zr, Ba, Rb, Sr).

2.3.3 Choix des échantillons pour calibrer la méthode de discrimination et recalculs des données géochimiques

Sélection d'échantillons peu ou non métamorphisés

Pour développer une méthode de discrimination des roches ignées vs sédimentaires, il est préférable de se calibrer d'abord sur des roches peu métamorphisées. De cette façon, on s'assure que les roches ont été correctement classées dans les descriptions. Par la suite, la méthode développée pourra être testée et appliquée à des roches métamorphiques puisque le métamorphisme régional est en général relativement isochimique (sauf pour l'ajout ou la perte d'éléments volatils).

Pour chacun des groupes d'éléments explicatifs qui seront utilisés, le nombre d'échantillons de roches peu métamorphisées est le suivant (note : seuls les échantillons contenant de l'information sur les volatils ont été conservés; voir paragraphe plus bas).

- Modèle avec éléments majeurs
 - Volcanique (n= 119 749)
 - Intrusive (n= 46 813)
 - Sédimentaire clastique (n= 11 992)
 - Sédimentaire chimique (n= 6 086)
- Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr
 - Volcanique (n= 74 738)
 - Intrusive (n= 28 237)
 - Sédimentaire clastique (n = 7 469)
 - Sédimentaire chimique (n = 2 582)

Recalculs des données géochimiques

Pour s'assurer que les résultats de l'entraînement sur les roches peu métamorphisées soient transférables à des roches métamorphiques qui ont pu être hydratées ou déshydratées durant le métamorphisme régional, un recalcul à 100 % et anhydre a été effectué avant l'optimisation. La quantité de volatils pour le recalcul anhydre a été faite de deux façons différentes, selon les analyses : 1) par la perte au feu si elle est disponible, sinon 2) par la somme des volatils analysés (H₂O, CO₂, S, etc.). *Les analyses ne contenant pas d'information sur les volatils (PAF ou volatils individuels) ont été éliminées de la banque pour les traitements subséquents.* La formule de recalcul est la suivante :

$$\text{Valeur recalculée} = \text{valeur originale} * (100 + \text{somme volatils}) / \text{Total}$$

Les autres données qui seront traitées ultérieurement pour la détermination de protolithes devront également faire l'objet des mêmes recalculs.

Sélection d'un sous-ensemble balancé d'échantillons pour la discrimination

Le nombre très important d'échantillons de roches non métamorphisées rend difficile l'optimisation par méthodes non linéaires. De plus, la banque de référence contient un net déséquilibre entre le nombre de roches ignées et le nombre de roches sédimentaires. Le traitement par machines à vecteurs de support doit idéalement avoir un nombre subégal d'échantillons de chacun des groupes (ici roches ignées et sédimentaires). D'autre part, il y a également un net déséquilibre entre les différents types de roches à l'intérieur même des roches ignées. Par exemple, le nombre de roches ultramafiques dans la banque est très inférieur aux autres types de roches ignées.

Un échantillonnage aléatoire balancé a donc été réalisé pour régler ce déséquilibre. Un total de 18 644 échantillons a été prélevé aléatoirement pour le modèle avec majeurs (environ 15 % de la banque avec majeurs analysés). Pour le modèle utilisant les majeurs + 6 traces, 9 388 échantillons ont été choisis aléatoirement (20 % de la banque). Les deux séries d'échantillons aléatoires ont été construites pour obtenir les caractéristiques suivantes (les nombres entre parenthèses représentent les nombres réels d'échantillons pour le modèle avec majeurs seulement) :

- Un nombre subégal de roches sédimentaires (10 051) et ignées (9 633) ;
- Un nombre subégal de roches intrusives (4 572) et volcaniques (5 061) ;
- Un nombre balancé de différents degrés de fractionnement des roches ignées :
 - Environ 30 % chacun de roches ignées
 - felsiques (2 763) ;
 - intermédiaires (2 769) ;
 - mafiques (2 969) ;
 - Environ 10 % de roches ultramafiques (1132).

2.3.4 Traitement par machines à vecteurs de support

Le traitement par machines à vecteurs de support a été réalisé grâce au logiciel NeuroSolution pour Excel version 5.0. Pour chacun des modèles, les échantillons ont été séparés aléatoirement en 3 groupes : groupe d'entraînement (65 %), validation en cours d'entraînement (15 %) et test (20 %). L'utilisation d'un groupe de test indépendant permet d'évaluer le potentiel de généralisation sur des données qui n'ont pas été utilisées pour la conception de la solution. Les sections suivantes présentent les résultats de classification sur les groupes test.

2.3.5 Classification des roches peu métamorphisées, modèle avec éléments majeurs seulement

Le **Tableau 2** donne les résultats de classification du groupe test pour le modèle avec éléments majeurs seulement. Les résultats indiquent qu'entre 85 et 90 % des échantillons sont correctement classés par la méthode.

Tableau 2. Matrice de confusion, groupe test.
Modèle avec éléments majeurs seulement.

	Connu comme sédimentaire	Connu comme ignée
Identifié sédimentaire par le système	1 753	255
Identifié ignée par le système	213	1 508
% Correct	89,1%	85,5%

Les résultats de classification selon les types de roches volcaniques (**Tableau 3**) et leur altération indiquent que la classification est nettement meilleure pour les roches volcaniques mafiques et ultramafiques que pour les roches intermédiaires-felsiques. De plus, dans tous les cas, le taux de classification correcte est nettement meilleur pour les roches fraîches que pour les roches altérées. Les mêmes tendances sont observées pour les roches intrusives (**Tableau 4**); la différence réside dans le fait que la classification globale de ces roches est meilleure que celle des roches volcaniques. Cette différence est probablement due au fait que dans l'ensemble les roches intrusives sont généralement moins altérées que les roches volcaniques.

Tableau 3. Matrice de confusion, roches volcaniques du groupe de test.
Modèle avec éléments majeurs seulement (n = 823).

TYPE	% CORRECT, ALTÉRÉES	% CORRECT, NON-ALTÉRÉES
FELSIQUE	62,9	79,6
INTERMÉDIAIRE	72,14	97,72
MAFIQUE	87,76	100
ULTRAMAFIQUE	85,90	100
Moyenne	74,91	95,40

Tableau 4. Matrice de confusion, roches intrusives du groupe de test.
Modèle avec éléments majeurs seulement (n = 940)

TYPE	% CORRECT, ALTÉRÉES	% CORRECT, NON-ALTÉRÉES
FELSIQUE	81,52	97,67
INTERMÉDIAIRE	84,24	88,53
MAFIQUE	91,38	100
ULTRAMAFIQUE	90,48	100
Moyenne	87,50	96,18

Le taux de reclassification correcte des roches sédimentaires clastiques à grains fins (mudrock) est plus élevé que celui pour les roches sédimentaires plus grossières (**Tableau 5**). Ceci est probablement une conséquence du fait que les sédiments à grains fins subissent en général une météorisation chimique plus significative que les faciès plus grossiers, ces derniers préservant davantage leur composition initiale (potentiellement ignée). Les taux de reclassification des roches sédimentaires chimiques sont très élevés (**Tableau 6**), ces roches étant en général très différentes des roches ignées au niveau chimique.

Tableau 5. Matrice de confusion, roches sédimentaires clastiques du groupe test. Modèle avec éléments majeurs seulement (n=1187).

TYPE	% CORRECT
MUDROCK	92,11
GRÉS	80,66
CONGLOMÉRAT	73,21
Moyenne	84,16

Tableau 6. Matrice de confusion, roches sédimentaires chimiques du groupe test. Modèle avec éléments majeurs seulement (n=800).

TYPE	% CORRECT
CALCAIRE	100
CALCAIRE IMPUR	100
CHERT	100
DOLOMIE	100
DOLOMIE IMPURE	97,5
FORMATION DE FER	87,5
MUDROCK CALCAREUX	96,9
Moyenne	97,9

2.3.6 Classification des roches peu métamorphisées, modèle avec éléments majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr

L'ajout des six éléments mineurs Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr augmente globalement d'environ 5 % la reclassification correcte des échantillons du groupe test par rapport au modèle utilisant les majeurs seulement (**Tableau 7**). Les résultats pour les roches volcaniques et intrusives (**Tableaux 8 et 9**) montrent que l'augmentation du taux de reclassification par rapport au modèle avec majeurs seulement est principalement observée pour les roches felsiques et intermédiaires (jusqu'à 15 % d'amélioration). Cependant, tout comme pour le modèle avec majeurs seulement, les taux de reclassification correcte des roches altérées ainsi que des roches felsiques/intermédiaires restent généralement plus bas.

L'amélioration des résultats pour les roches sédimentaires clastiques est plus faible (**Tableau 10**). Finalement, pour les roches sédimentaires chimiques, ce modèle permet d'avoir des classifications parfaites de 100 % pour toutes les roches (**Tableau 11**).

Tableau 7. Matrice de confusion, groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr.

	Connu comme sédimentaire	Connu comme ignée
Identifié comme sédimentaire par le système	806	68
Identifié comme ignée par le système	64	790
% Correct	92,64%	91,01%

Tableau 8. Matrice de confusion, roches volcaniques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 538). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.

TYPE	% CORRECT, ALTÉRÉES	% CORRECT, NON-ALTÉRÉES
FELSIQUE	7,73 (+9,8)	92 (+12,4)
INTERMÉDIAIRE	87,30 (+15,1)	98,59 (+0,9)
MAFIQUE	86,79 (-0,9)	100 (+0)
ULTRAMAFIQUE	98,11 (+12,2)	100 (+0)
Moyenne	83,96 (+9,1)	98,24 (+2,8)

Tableau 9. Matrice de confusion, roches intrusives du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 430). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.

TYPE	% CORRECT, ALTÉRÉES	% CORRECT, NON-ALTÉRÉES
FELSIQUE	93,69 (+12,2)	97,22 (-0,4)
INTERMÉDIAIRE	91,40 (+7,2)	88,53 (+6,34)
MAFIQUE	89,25 (-2,1)	100 (+0)
ULTRAMAFIQUE	88,1 (-2,3)	100 (+0)
Moyenne	88,1 (+0,6)	96,18

Tableau 10. Matrice de confusion, roches sédimentaires clastiques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 354). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.

TYPE	% CORRECT
MUDROCK	93.58 (+1.4)
GRÉS	80.66 (+4.56)
CONGLOMÉRAT	66.66 (-6.5)
Moyenne	84.16 (+2.85)

Tableau 11. Matrice de confusion, roches sédimentaires chimiques du groupe de test. Modèle avec majeurs + Cr-Ni-Zr-Ba-Rb-Sr (n = 131). Entre parenthèses, amélioration par rapport au modèle avec majeurs seulement.

TYPE	% CORRECT
CALCAIRE	100
CALCAIRE IMPUR	100
CHERT	100
DOLOMIE	100
DOLOMIE IMPURE	100
FORMATION DE FER	100
MUDROCK CALCAREUX	100
Moyenne	100

2.4 Discrimination des roches ignées et sédimentaires métamorphisées de protolithes connus/présumés

Les sections précédentes montrent que l'approche de discrimination des roches ignées vs sédimentaires fonctionne généralement bien pour des groupes de roches ignées et sédimentaires quelconques peu ou non métamorphisées. Qu'en est-il des roches métamorphisées de protolithes connus? Le **Tableau 12** montre les résultats de classification pour ces roches en utilisant le modèle avec les majeurs seulement. Dans le cas des roches métasédimentaires (schistes, paragneiss, quartzites, marbres, etc.) le taux de reclassification correcte est d'environ 80 %. Pour les roches méta-ignées, il avoisine 90 %. Le taux global est d'environ 84 %, ce qui est relativement proche du taux global de reclassification des roches non métamorphisées par ce même modèle (87 %).

Dans l'ensemble, on peut donc dire que la méthode de discrimination s'applique avec succès à des roches métamorphiques.

Tableau 12. Matrice de confusion, roches métamorphisées de protolithe connu/présumé.
Modèle avec majeurs.

	Connu comme métasédimentaire (paragneiss, marbres, quartzites...)	Connu comme méta-ignée (orthogneiss, amphibolites..)
Identifié comme sédimentaire par le système	1 916	141
Identifié comme ignée par le système	478	1 267
% Correct	80,03 %	89,99 %

2.5 Mise en œuvre d'un outil de discrimination

2.5.1 Module logiciel d'identification des protolithes

Les modèles de machines à vecteurs de support utilisés pour l'identification des protolithes reposent sur des formules mathématiques non linéaires complexes. Le logiciel NeuroSolution 5.0 permet de construire des modules de traitement de type DLL Windows qui prennent en charge les calculs nécessaires. Un module a été construit pour chaque modèle développé (majeurs seulement et majeurs + 6 éléments mineurs). Ces modules sont intégrés dans le logiciel Lithomodeleur de traitement lithogéochimique développé dans le cadre du projet Consorem 2009-01.

2.5.2 Informations retournées par le traitement

Sorties des modules DLL

Les modules DLL de calcul des protolithes fournissent deux réponses numériques : la réponse « ignée » et la réponse « sédimentaire ». La somme des deux se rapproche normalement de 1. Il faut noter que ces deux résultats ne sont pas exactement des probabilités.

Identification textuelle des protolithes

Pour faciliter l'interprétation des données, il est utile d'assigner une étiquette textuelle aux échantillons traités indiquant le protolithe probable et la probabilité d'identification correcte de celui-ci. Pour y arriver, on peut examiner les histogrammes de la densité de répartition des réponses pour le groupe de test selon le groupe connu (**Figures 1 et 2**). Des limites ont été placées arbitrairement sur ces diagrammes en fonctions du ratio des densités sédimentaire / ignée. Lorsque les densités sont semblables, l'identification est incertaine. Au contraire, lorsque les densités sont très contrastées, l'identification est plus certaine. Les limites suivantes ont été déterminées pour les deux modèles (la valeur représente la réponse « sédimentaire » du système).

Modèle avec majeurs seulement :

- Ignée très probable : < 0,2 ;
- Ignée probable : 0,2 – 0,4 ;
- Incertain : 0,4 – 0,7 ;
- Sédimentaire probable : 0,7 – 0,85 ;
- Sédimentaire très probable : > 0,85.

Modèle avec majeurs + 6 traces :

- Ignée très probable : $< 0,25$;
- Ignée probable : $0,25 - 0,35$;
- Incertain : $0,35 - 0,65$;
- Sédimentaire probable : $0,65 - 0,85$;
- Sédimentaire très probable : $> 0,85$.

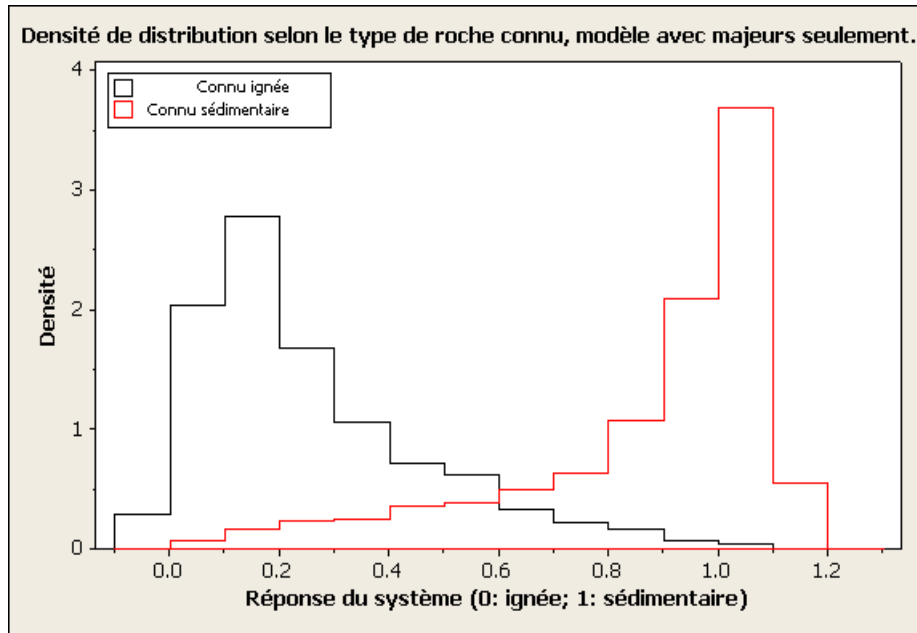


Figure 1. Densité de distribution de la réponse du système selon le type de roche connu, modèle avec majeurs seulement.

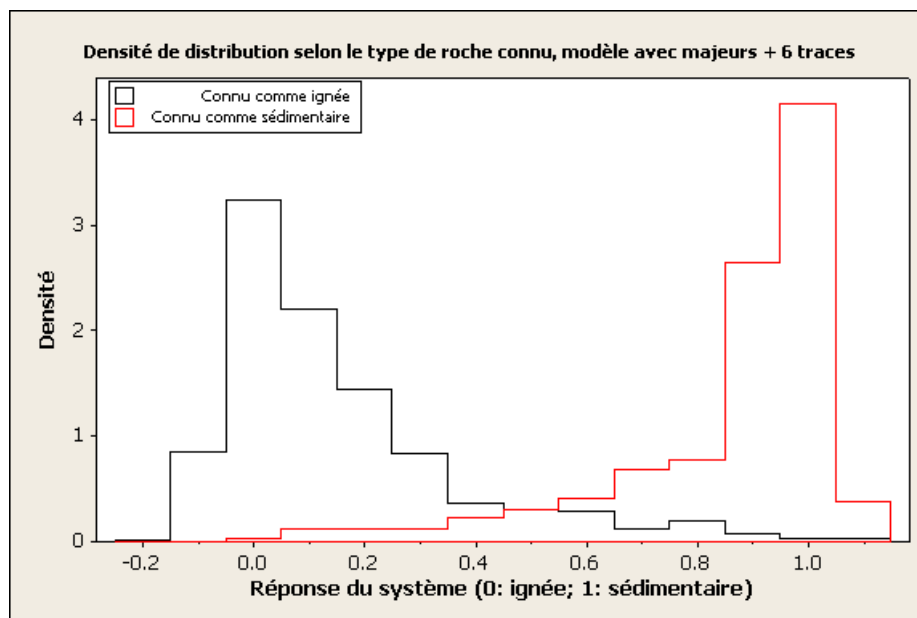


Figure 2. Densité de distribution de la réponse du système selon le type de roche connu, modèle avec majeurs + 6 traces.

3. TESTS SUPPLEMENTAIRES ET EXEMPLES D'APPLICATIONS

3.1 Gisement de Winston Lake, Ontario

Le gisement de Winston Lake en Ontario est situé au nord-est de Thunder Bay. L'ancienne mine est située dans la ceinture de Big Duck, métamorphisée au faciès des amphibolites (**Figure 3**). La région a été cartographiée par Pye (1964) qui l'a divisée en trois unités :

1. « Lower Metasediments » - (Winston Lake Sequence)
2. « Metavolcanics » - Big Duck Sequence
3. « Upper Metasediments »

Il est à noter que la séquence de Winston Lake était alors interprétée comme une séquence métasédimentaire.

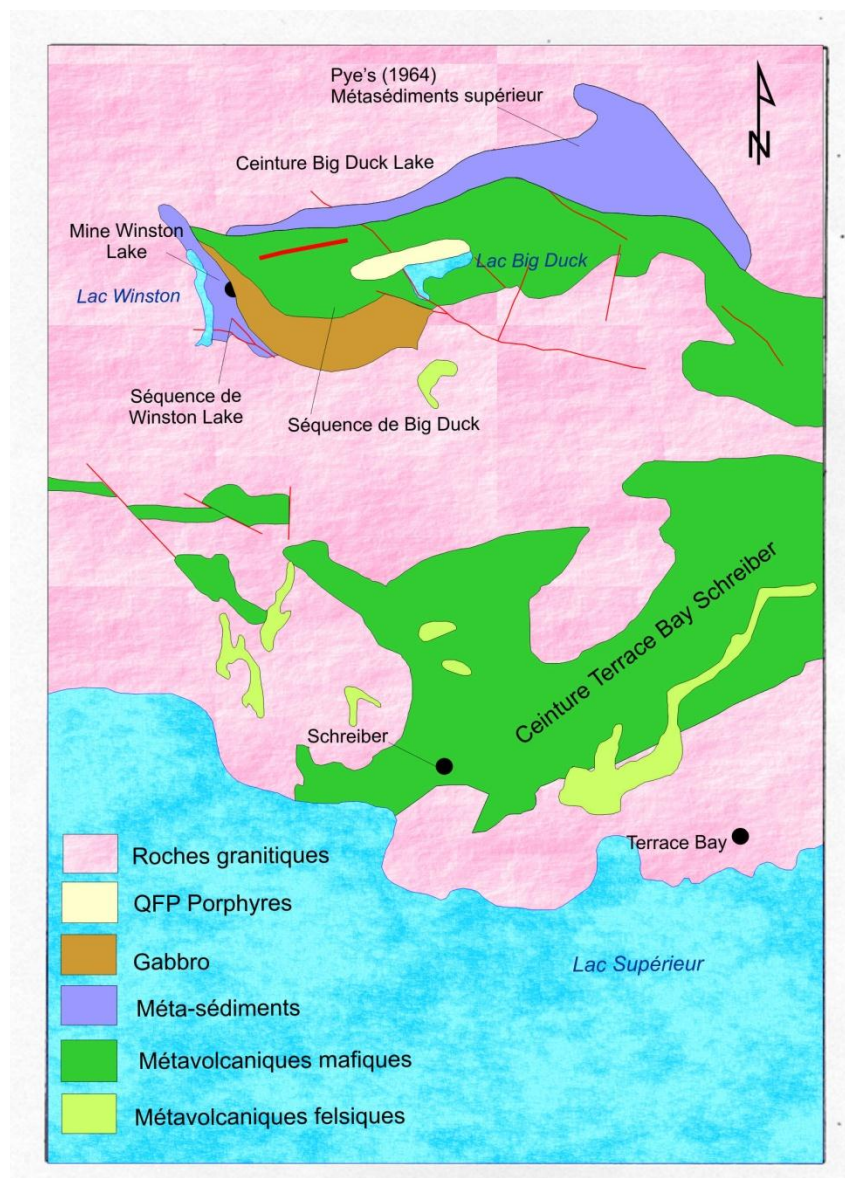


Figure 3. Géologie de la région du gisement de Winston Lake. Tiré de Osterberg, 1993.

Vers la fin des années 70, lors de travaux d'exploration, les géologues de Minnova et CFC ont réinterprété les « Lower Metasediments » de Pye en des métavolcanites altérées (Osterberg, 1993). Cette réinterprétation a mené à la découverte du gisement de Winston Lake en Ontario. Le gisement a produit 3,1 Mt à 14 % Zn et 0,8 % Cu (production jusqu'à 1998; OGS, 2007). Cet exemple montre l'importance d'une interprétation correcte des protolithes.

Osterberg (1993) a étudié en détail le gisement et confirme l'interprétation qu'il s'agit d'un amas de sulfures massifs volcanogènes métamorphisé. Son étude comprend une banque de données lithogéochimiques détaillée qui contient également les types de roches et les faciès d'altération. Ces données ont été traitées par le modèle de discrimination avec majeurs seulement. Les résultats détaillés sont présentés au **Tableau 13**.

Tableau 13. Taux de reclassification correcte pour les roches volcaniques du gisement de Winston Lake, selon le type de roche et le faciès d'altération.

TYPE	« Least-Altered » n = 47	Trémolite-actinote n = 11	Anthophyllite n = 40	Staurotide-Sillimanite n = 13	Biotite n = 27	Sillimanite n = 15	Total
Coulée mafique n=53	100 %	100 %	81,2 %	-	25%	-	82,3%
Pyroclastique felsique n=60	89,4%	100%	77,7%	33%	13,3%	50%	60%
Coulée felsique n=40)	100%	-	50%	30%	33,3%	0%	32,5%
Total	95,9%	100%	75%	30,7%	22,7%	6,6%	62,7%

Cet exemple permet d'évaluer plus clairement l'effet de l'altération et en particulier du type d'altération sur la réponse du système. Pour les roches peu altérées de Winston Lake, la classification est excellente (>89 %) pour tous les types de roches. C'est également le cas pour le faciès d'altération à trémolite-actinote (altération calco-silicatée). Pour l'altération à anthophyllite (probablement une altération à chlorite métamorphisée), les résultats sont inférieurs mais toujours acceptables (75 %). Par contre, les altérations alumineuses et aluminopotassiques (staurotide, sillimanite, biotite) causent des problèmes de reconnaissance. En effet, les roches affectées par ces altérations prennent des signatures qui sont franchement sédimentaires.

On pourrait conclure par ces résultats que la méthode ne permet pas de distinguer des roches volcaniques ayant subi des altérations alumineuses/potassiques de roches sédimentaires. C'est probablement le cas si on considère un seul échantillon ou un nombre restreint d'échantillons. Par contre, lorsqu'on considère quelques dizaines d'échantillons, la signature de roches volcaniques altérées est distincte. Si on prend par exemple 35 échantillons choisis aléatoirement dans la banque de Winston Lake et qu'on examine les réponses données par le système sur un histogramme, on constate que l'on obtient des réponses étalées assez uniformes entre ignée (0) et sédimentaire (1) (**Figure 4**). La **Figure 5** montre la répartition des réponses pour un même nombre d'échantillons provenant du bassin de Nemiscau au Québec, un bassin de turbidites métamorphisées typique des grands bassins de turbidites de la Province de Supérieur (données de Doyon, 2004). On note que dans le cas d'un véritable bassin sédimentaire les réponses se trouvent essentiellement du côté sédimentaire.

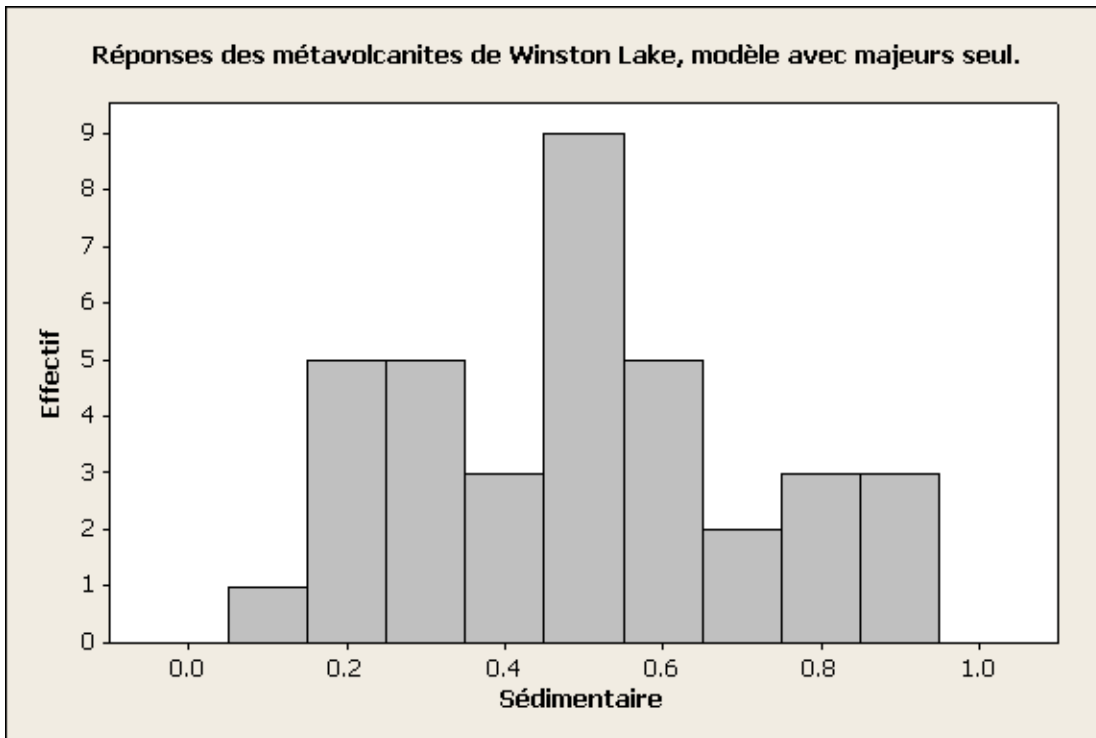


Figure 4. Répartition des réponses (0: ignée; 1: sédimentaire) pour les métavolcanites de Winston Lake, modèle avec majeurs seulement.

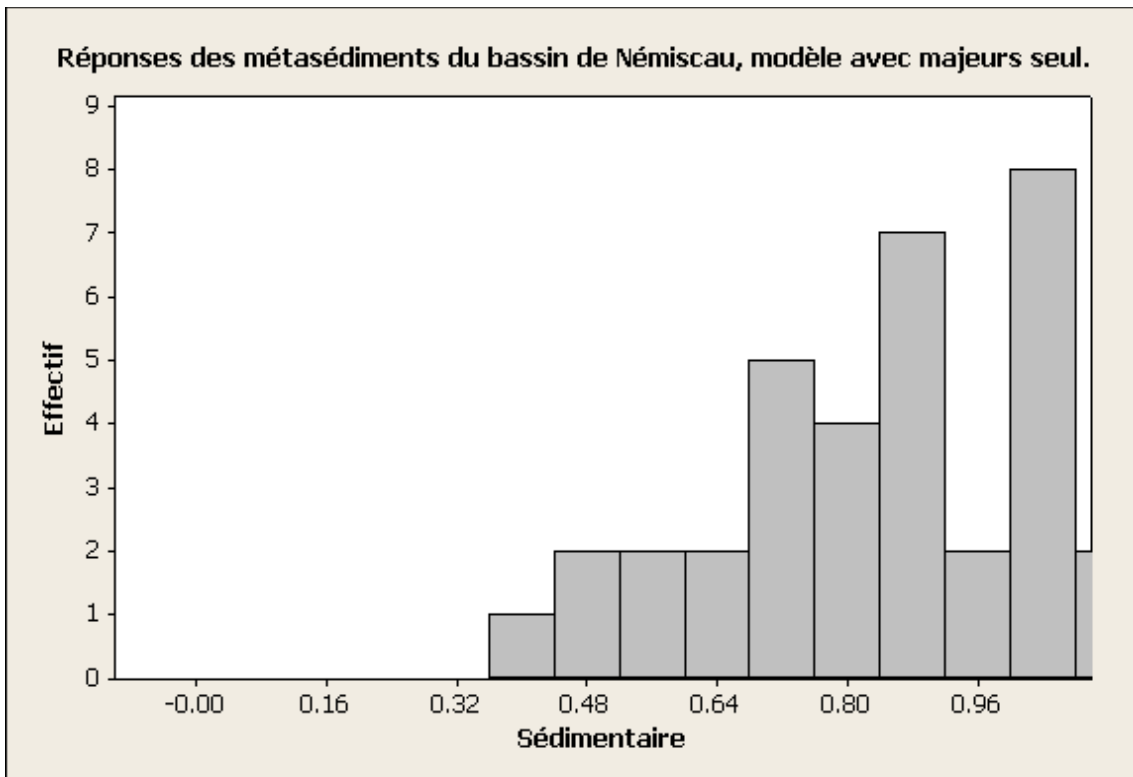


Figure 5. Répartition des réponses (0: ignée, 1: sédimentaire) pour les métasédiments du bassin de Némiscau, Québec (données de Doyon, 2004).

L'exemple de Winston Lake permet de conclure que :

- Le modèle fonctionne bien pour les roches métavolcaniques peu altérées, ainsi que pour les altérations calcosilicatées et à antophyllite (chlorite).
- Le modèle ne permet pas de distinguer des échantillons individuels ayant subi des altérations alumino-potassiques de vraies roches métasédimentaires.
- La distinction de roches méta ignées ayant subi des altérations alumino-potassiques peut se faire en observant la distribution des réponses pour quelques dizaines d'échantillons variablement altérés.
 - Si les réponses s'étalent assez uniformément d'ignée à sédimentaire, il s'agit probablement de volcanites altérées.
 - Si les réponses sont essentiellement du côté sédimentaire, il s'agit probablement de roches métasédimentaires.

3.2 Secteur de Montauban, Québec

Le gisement de Montauban au Québec est situé dans la province de Grenville au nord-est de Trois-Rivières (**Figure 6**).

Prabhu et Webber (1984) se sont penchés sur la discrimination géochimique des roches hôtes de la minéralisation ainsi que de différents gneiss gris et à biotite du secteur. Ces auteurs ont d'abord compilé trois sources de données de références pour calibrer leurs méthodes de discrimination : 1) des roches volcaniques felsiques tertiaires et récentes peu altérées d'un peu partout dans le monde 2) des roches volcaniques felsiques du secteur de Rouyn-Noranda, Québec et 3) des grès provenant de la littérature.

Quatre approches ont été testées par Prabhu et Webber (1984) sur les données de référence puis appliquées aux roches de Montauban. Ces approches sont :

- Le diagramme $\log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ vs $\log((\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O})/\text{K}_2\text{O})$,
- Le diagramme Si vs Mg de Niggli,
- Le quartz normatif, et
- La fonction discriminante de Shaw (1972).

Ces auteurs concluent par l'application de ces méthodes que les gneiss de Montauban sont d'origine majoritairement sédimentaire, mais que plusieurs tendent du côté des roches ignées.

Les données rapportées dans l'article de Prabhu et Webber (1984) ne sont que des moyennes pour différents types de roches. Ces moyennes ne peuvent donner une idée de l'étalement réel de plusieurs échantillons. L'exemple de Winston Lake a montré l'importance d'examiner les réponses de plusieurs échantillons dans le cas de zones d'altérations hydrothermales métamorphisées.

Bernier et MacLean (1993) ont examiné la question des protolithes des roches altérées en utilisant une méthode de log-ratios d'éléments immobiles. Les profils des log-ratios des gneiss à sillimanite, à biotite-muscovite, quartzitiques et à cordiérite-anthophyllite sont comparables aux gneiss quartzo-feldspathiques à biotite de la région. Ces mêmes gneiss sont semblables à des roches volcaniques felsiques ou intermédiaires des îles en arc modernes. Ces auteurs concluent que les gneiss sont le produit de l'altération de roches volcaniques intermédiaires à felsiques ou de roches sédimentaires volcanoclastiques. Toutefois, aucune comparaison n'est faite entre les gneiss quartzo-feldspathiques à biotite de la région et des roches sédimentaires typiques, ce qui ne permet pas de conclure de façon certaine sur la nature sédimentaire ou ignée des protolithes.

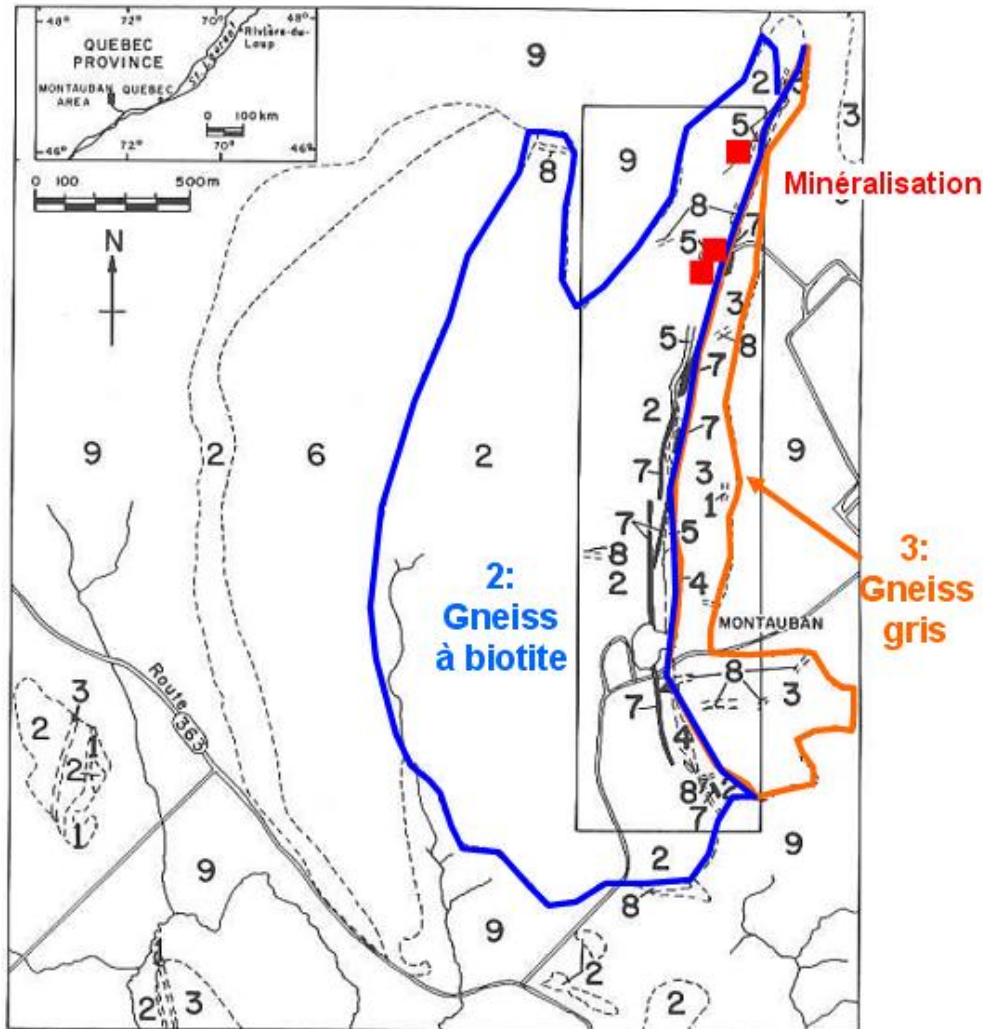


Figure 6. Géologie et localisation du gisement de Montauban, Québec. 1. Quartzite, 2. Gneiss à biotite, 3. Gneiss gris, 4. Calcaire et roche calco-silicaté, 5. Gneiss à cordiérite-anthophyllite, 6. Métabasalte, 7. Amphibolite, 8. Pegmatite, 9. Argilite et roche sédimentaires stratifiée. Modifié de Prabhu et Webber, 1984.

Des échantillons géochimiques du secteur nous ont été fournis par Nadeau, 2009 (comm. pers.). Cette banque comprend 17 échantillons de « gneiss » du Groupe de Montauban dont le protolithe demeure inconnu, mais qui sont le plus souvent interprétés comme des paragneiss (Nadeau, comm. pers.). Onze échantillons sont interprétés comme des volcanoclastites et volcanites felsiques sur la base de l'association et de relations de terrains avec des laves coussinées entre autres. Ces échantillons montreraient de l'altération hydrothermale selon plusieurs diagrammes discriminants.

La **Figure 7** montre les réponses du modèle avec majeurs seulement sur les 11 échantillons de volcanoclastites et volcanites felsiques altérées. La réponse est étalée assez uniformément d'ignée à sédimentaire. Par analogie avec le cas de Winston Lake, cet étalement des réponses entre les pôles sédimentaires et ignés suggère que ces roches soient effectivement des métavolcanites variablement altérées, comme l'interprète Nadeau (comm. pers.).

La **Figure 8** montre les réponses pour les gneiss du Groupe de Montauban. La réponse y est très clairement bimodale. Un groupe de 6 échantillons présente des réponses franchement sédimentaires (valeur « sédimentaire », supérieures à 0,85). Le reste des échantillons (11) affiche des réponses situées entre 0,25 et 0,56, en majorité (8 sur 11) entre 0,25 et 0,40. Ce groupe est fort probablement d'origine ignée.

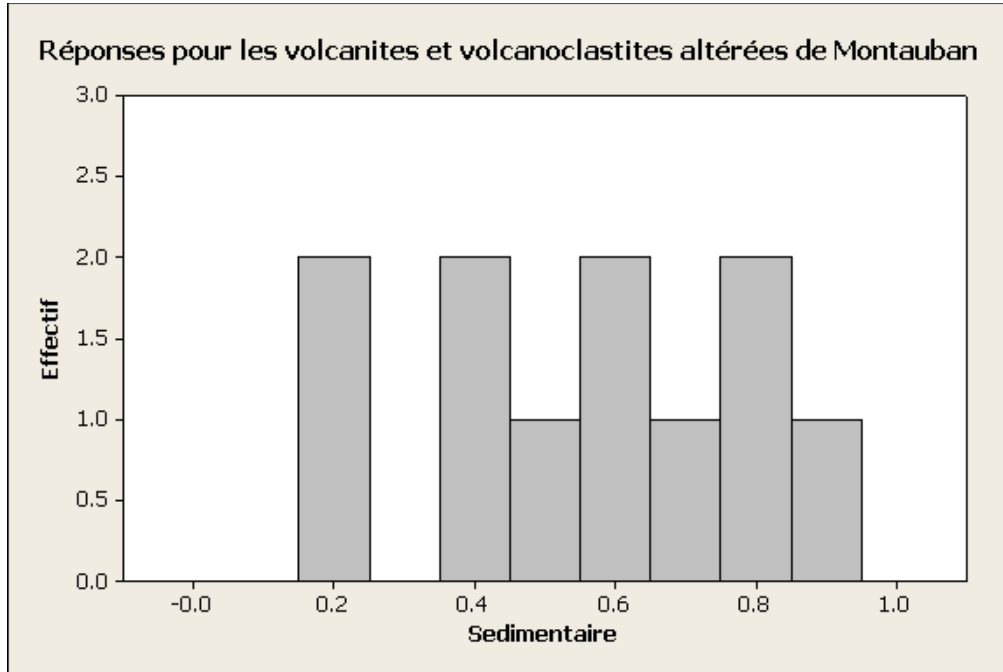


Figure 7. Réponse du modèle avec majeurs seulement pour les "volcanites et volcanoclastites altérées" du secteur de Montauban.

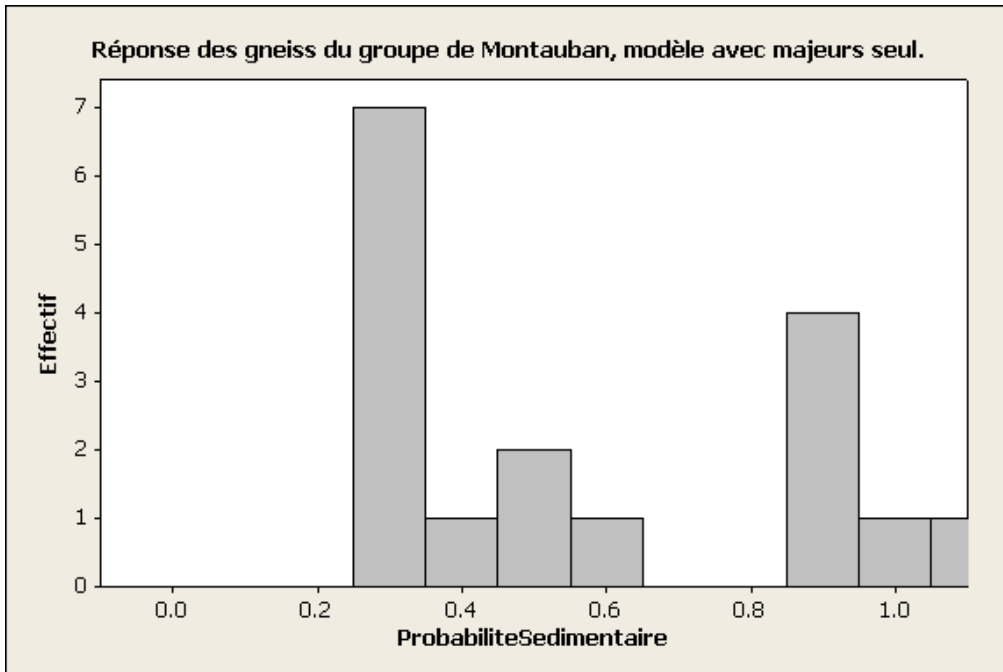


Figure 8. Réponse du modèle avec majeurs seulement pour les gneiss du Groupe de Montauban.

Les résultats présentés ici suggèrent que les roches hôtes et environnantes de la minéralisation sont probablement métavolcaniques. À l'échelle plus régionale, le groupe de Montauban semble contenir à la fois des roches sédimentaires et volcaniques, assez distinctes les unes des autres. Cette conclusion est différente de celle de Prabhu et Webber qui ont assigné une origine sédimentaire pour l'ensemble des gneiss à l'échelle régionale. Toutefois, il est difficile de comparer les résultats étant donné que la localisation exacte des échantillons de Prabhu et Webber n'est pas disponible. Il est possible que les deux banques proviennent simplement d'unités différentes.

3.3 Roches de la ceinture de Nuvvuagittuq, Québec

La ceinture de Nuvvuagittuq est une des plus anciennes ceintures volcano-sédimentaires du monde, datée à 3,8 Ga (O'Neil et al., 2007). La lithologie dominante dans la ceinture est une amphibolite rubanée grise composée de proportions variables de plagioclase, cummingtonite et biotite (**Figure 9**). Les amphibolites montrent du rubanement et certaines sont riches en grenat. Ces caractéristiques ont mené l'interprétation d'une partie des amphibolites comme des roches métasédimentaires (Simard et al., 2003). Elles ont toutefois été réinterprétées par O'Neil et al. (2007) sur des bases géochimiques comme étant des roches pyroclastiques/volcaniques mafiques variablement altérées. La ceinture contient également des formations de fer rubanées, des unités siliceuses et des roches ultramafiques.

Les données lithogéochimiques fournies par O'Neil et al. (2007) ont été traitées par le modèle avec majeurs + 6 éléments traces (85 échantillons). Les résultats détaillés pour les différents types de roches sont donnés au **Tableau 14**.

Tableau 14. Résultat du traitement des roches de la ceinture de Nuvvugattiuq, modèle avec majeurs + 6 traces.

Roche	Prob. Sédimentaire	Interprétation	n
Type-1 Amphibolitic chill margin and layer	0,086	Ignée très probable	5
Ultramafic Type-1	0,129	Ignée très probable	13
Ultramafic Type-2	0,148	Ignée très probable	11
Gabbro	0,232	Ignée probable	13
Biotite-rich Faux-Amphibolite	0,2489	Ignée probable	5
Cummingtonite-rich Faux-Amphibolite	0,268	Ignée probable	10
Type-2 Amphibolitic chill margin M and layer L	0,337	Ignée probable	3
Greenstone	0,390	Ignée probable	11
Garnet-bearing Faux-Amphibolite	0,6069	Incertain	6
Grt Si-rich unit	0,6952	Incertain	1
BIF	0,9108	Sédimentaire très probable	6
Si-Formation	1,092	Sédimentaire très probable	1

Tout d'abord, on peut constater que l'unité de formation de fer (BIF) ainsi que l'unité siliceuse sont classées comme sédimentaires par le système. Ceci confirme que ces unités sont bel et

bien des roches sédimentaires d'origine probablement chimique. Les gabbros, les roches ultramafiques et les roches vertes sont correctement classés comme ignées.

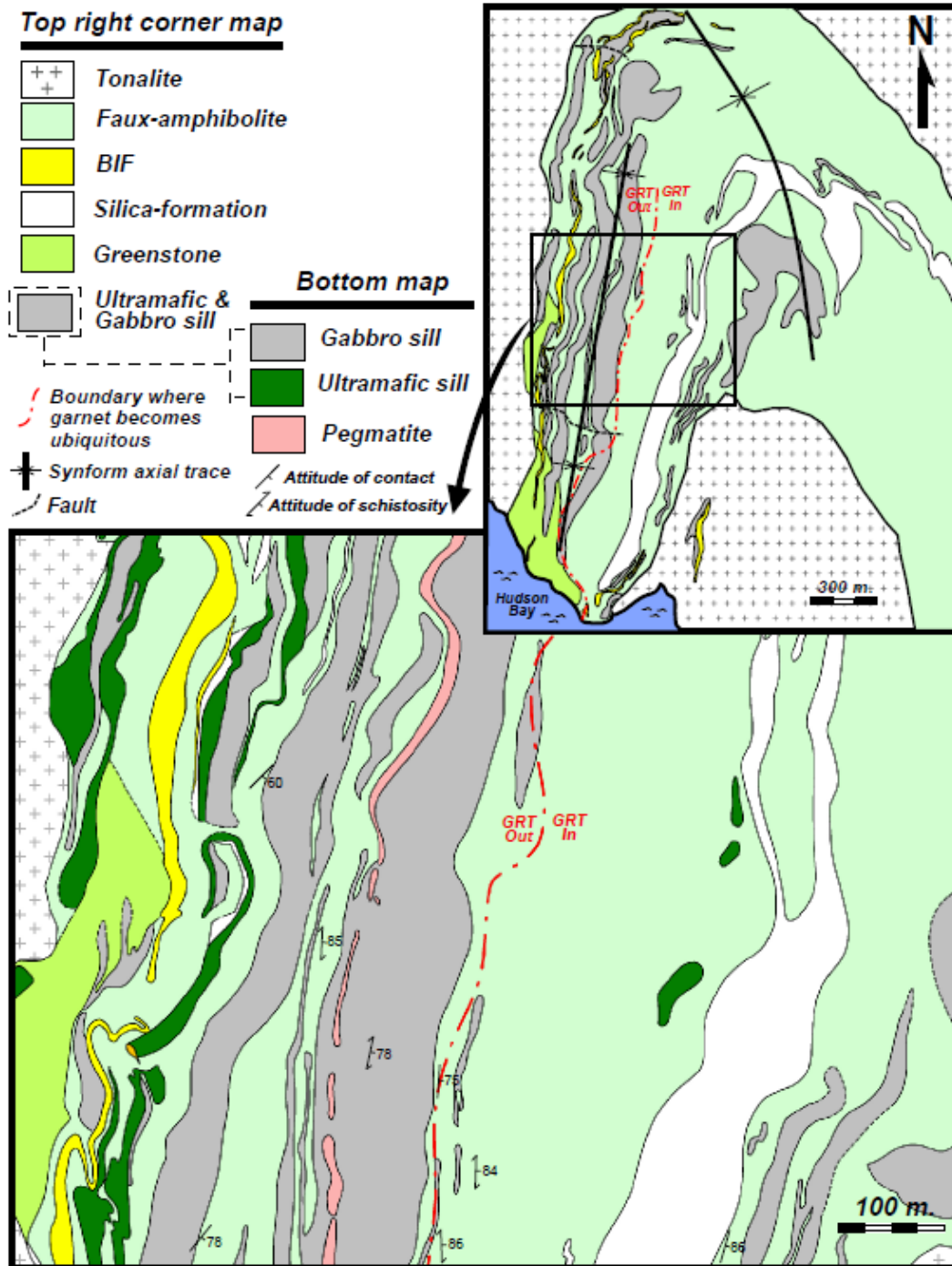


Figure 9. Géologie de la ceinture de Nuvvuagittuq. Tiré de O'Neil et al., 2007.

Dans le cas de l'unité de « faux » amphibolite, les réponses sont variables. Les unités riches en grenat donnent des réponses qui sont en moyenne dans la zone d'incertitude de la méthode. On peut examiner l'étalement des réponses de cette unité sur un histogramme (**Figure 10**). La réponse est assez clairement bimodale; le pic vers 0,6 correspond aux amphibolites à grenat alors que les valeurs concentrées vers 0,3 représentent les autres amphibolites. Ceci suggérerait que les amphibolites à grenat représentent une unité de nature ou d'altération différente des autres et qu'il n'y a pas un continuum de compositions entre les amphibolites à grenat d'une part et les autres amphibolites d'autre part.

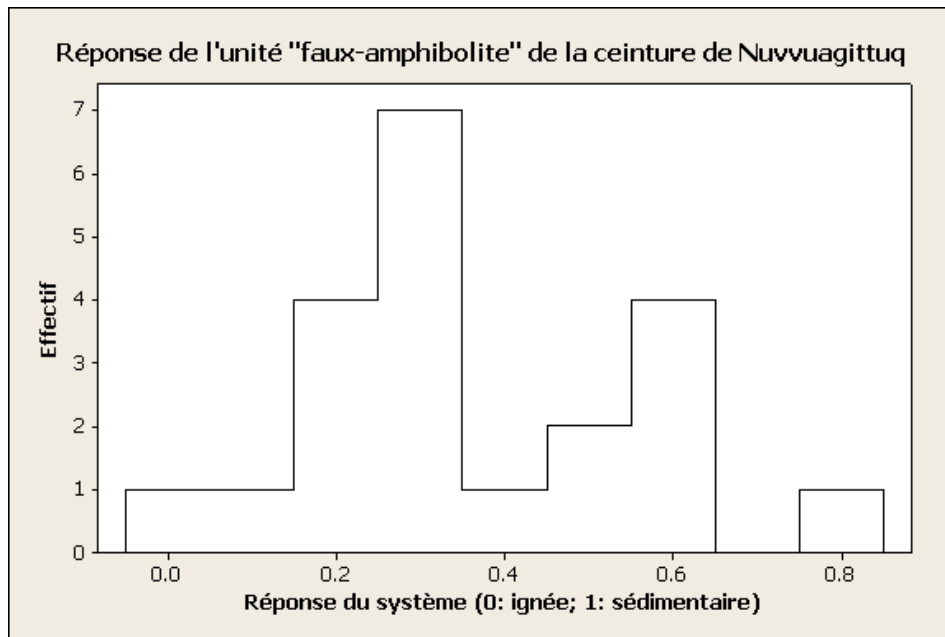


Figure 10. Réponse du modèle avec majeurs + 6 traces pour les unités de "faux-amphibolite" de la ceinture de Nuvvuagittuq.

3.4 Migmatites du secteur de Saint-Malo, bouclier armoricain, France

Les zones de roches métamorphiques de haut grade contiennent communément des unités migmatisées. Il est intéressant d'étudier la réponse du système de reconnaissance des protolithes dans ces zones de fusion partielle.

Milord et al. (2001) ont étudié en détail la formation des migmatites dans un secteur du bouclier armoricain en France. Leur étude intègre la pétrographie et la géochimie des roches pour modéliser l'ensemble du processus de migmatisation du secteur et la relation avec les différents faciès de migmatites. Le protolithe des migmatites est une roche métasédimentaire.

Dix-huit échantillons de l'étude de Milord et al. (2001) ont été traités par le modèle avec majeurs seulement. Le **Tableau 15** donne les résultats pour les différents types de migmatites ainsi que l'interprétation de l'origine des différents types de migmatites telles qu'énoncées dans l'article Milord et al. (2001).

Tableau 15. Résultat du traitement des migmatites du secteur de Saint-Malo, France.

TYPE	Interprétation (Milord et al, 2001)	Nombre éch.	Réponse moyenne (1 = sed, 0 = ign)	Interprétation
Roche métasédimentaire	Protolithe non fusionné	1	0,98	Sédimentaire très probable
Diatexite mésocrate	Roche métasédimentaire migmatisée sans extraction de magma à grande échelle	4	0,81 (1,05;1,05;0,52;0,62)	Sédimentaire probable
Diatexite mélanocrate	Résidu de fusion, extraction <= 40 % de magma	4	0,90 (1,01;0,98;0,86;0,73)	Sédimentaire très probable
Schlieren mafique	Résidu de fusion, 60-70% extraction de magma	1	0,94	Sédimentaire très probable
Diatexite leucocrate	Mélange de magma + 5-50% de résidu	4	0,32 (0,12; 0,17; 0,34; 0,60)	Ignée probable
Granite anatectique	Magma	2	0,16 (0,13; 0,18)	Ignée très probable

Les résultats de classification des migmatites sont significatifs. Les migmatites, qui globalement ne montrent pas d'extraction de magma à grande échelle, ainsi que le protolithe sédimentaire, montrent des réponses clairement sédimentaires. C'est le cas de la roche métasédimentaire initiale et des diatexes mésocrates. Les migmatites qui représentent plutôt des résidus de fusion, telles que les diatexites mélanocrates et les schlieren mafiques, conservent nettement leurs signatures sédimentaires. Par contre, les roches qui sont des produits de fusion comme les granites anatectiques, ou les migmatites leucocrates, donnent des réponses plutôt ignées.

Cet exemple permet de conclure que :

- Les migmatites qui n'ont pas subi d'extraction de magma à grande échelle dans ce cas et qu'elles conservent leur signature sédimentaire.
- Les résidus de fusion de roches sédimentaires (restites) conservent leur signature sédimentaire.
- Les roches dominées par des produits de fusion ont une signature ignée.

Cet exemple permet de constater le changement de signature associé à la migmatisation. Globalement, les migmatites d'origine sédimentaire garderont leur signature sédimentaire. Seuls les produits de la fusion qui en sont séparés prennent une signature ignée.

3.5 Province de Grenville

La Province de Grenville représente un laboratoire naturel d'envergure pour tester la reconnaissance des protolithes dans les terrains haut grade métamorphique. Un test de reconnaissance en utilisant les éléments majeurs seulement a été réalisé sur des échantillons géochimiques provenant de la banque de données du SIGEOM (2004). Les échantillons métamorphisés (code débutant par M) sont au nombre de 1 079. Les échantillons sont divisés selon que l'origine sédimentaire ou ignée est connue (828 échantillons) et les autres gneiss dont

l'origine est inconnu (251 échantillons). La grande majorité de ces échantillons (70 %) sont localisés dans des domaines métamorphisés au faciès supérieur des amphibolites, alors que 18 % et 12 % des échantillons respectivement sont dans des domaines granulitiques ou au faciès moyen des amphibolites.

Le **Tableau 16** résume les résultats du classement pour les gneiss dont l'origine sédimentaire ou ignée est connue. Le taux de reconnaissance des protolithes ignés est meilleur que pour ceux d'origine sédimentaire avec un taux de reconnaissance s'approchant des roches ignées non (ou peu) métamorphisés (**Tableau 2**) et altérées ou non (**Tableau 4**).

Dans l'ensemble, les gneiss d'origine sédimentaire donnent des taux de reconnaissance d'environ 20 % plus bas que pour les roches non métamorphisées et non altérées (**Tableaux 2, 5 et 6**). Les roches calcosilicatées donnent un taux d'identification à 79 %. Par contre les métaquartzites, les paragneiss et les schistes donnent de moins bons résultats. Les paragneiss ont le plus haut taux d'inconnu (20 %), ce qui se reflète dans le faible reconnaissance de l'origine sédimentaire (49 %).

Tableau 16. Reconnaissance des gneiss du Grenville dont le protolithe est connu.

Nom de la roche	Code*	Nb total	Prob. Ignée	Prob. Sédimentaire	Inconnu	% de reconnaissance
<i>Origine ignée</i>						
Orthogneiss	M3	193	164	9	20	85
Gneiss granitiques et granulitiques	M6, M7	75	64	5	6	85
<i>Origine sédimentaire</i>						
Roches calcosilicatées, marbres et skarns	M14, M13, M15	225	29	178	18	79
Métaquartzite	M12	58	15	37	6	64
Paragneiss et schistes	M4	277	88	137	52	49

*Code selon le SIGEOM

Les autres échantillons dont l'origine n'est pas connue, au nombre de 251, représentent des gneiss indifférenciés (M, M1), des diatexites et des migmatites (M21, M22), des gneiss rubanés (M2), et des gneiss quartzo-feldspathiques (M5). Le **Tableau 17** résume l'origine probable de ces gneiss. Les diatexites et migmatites, qui sont les produits de la fusion partielle et à l'origine des intrusions granitiques, montrent un caractère igné dominant à 66 %. Une proportion de 70 % des gneiss quartzo-feldspathiques et des gneiss rubanés indiquent un protolithe ignée. Les résultats pour les gneiss indifférenciés sont ambigus à l'image de leur classification et du nombre élevé d'inconnus.

Tableau 17. Reconnaissance des gneiss du Grenville dont le protolithe est inconnu

Nom de la roche	Code*	Nb total	Prob. Ignée	Prob. Sédimentaire	Inconnu
<i>Origine inconnue</i>					
Diatexites et migmatites	M21, M22	29	19	7	3
Gneiss Qz-Feldspathiques et gneiss rubanés	M5, M2	79	55	17	7
Gneiss indifférenciés	M, M1	131	52	54	25

*Code selon le SIGEOM

L'ensemble des résultats indique que la méthode de classification des protolithes est utile comme outil d'assistance à la cartographie, en particulier pour les gneiss d'origine ignée. Le mauvais résultat de classement pour les paragneiss (49 %) pourrait s'expliquer par le fait que les descriptions dans la banque de données sont assez variées et que cette catégorie de gneiss est un terme de terrain assez large et difficile à catégoriser.

Comme la reconnaissance du caractère igné montre de bons résultats (**Tableau 16**), il serait possible d'isoler les échantillons à probabilité ignée dans les gneiss dont l'origine est inconnue (**Tableau 17**), comme les gneiss quartzo-feldspathiques par exemple, et retourner par la suite à la carte géologique.

4. CONCLUSIONS

La méthode de discrimination entre protolithes ignées et sédimentaires permet de reconnaître les protolithes de façon efficace dans les cas généraux. Les différents tests et exemples d'application permettent de conclure plus particulièrement que :

- La méthode est très efficace pour distinguer les roches ignées peu altérées des roches sédimentaires chimiques ou clastiques, qu'elles soient métamorphisées ou non.
- Les altérations potassiques et alumineuses des roches ignées les rendent similaires aux roches sédimentaires du point de vue chimique. La méthode leur assigne alors, de façon erronée, un protolithe sédimentaire. Ces roches peuvent toutefois être distinguées des roches sédimentaires par le traitement de plusieurs échantillons, qui montreront alors un étalement des réponses complet entre les pôles igné et sédimentaire selon le degré d'altération.
- Dans le cas des migmatites dérivées de roches sédimentaires, les produits résiduels de la fusion ainsi que les migmatites n'ayant pas subi d'extraction significative de magma à grande échelle conservent leur signature sédimentaire. Les produits de fusion prennent par contre une signature ignée.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier Léopold Nadeau et Réal Daigneault pour leurs commentaires et remarques constructives ainsi que Geneviève Boudrias pour la mise en page et les corrections du manuscrit.

RÉFÉRENCES

- Bernier, L., et MacLean, W.H., 1993. Lithogeochemistry of a metamorphosed VMS alteration zone at Montauban Grenville Province, Quebec. *Exploration and Mining Geology*, vol 2. pp. 367-386.
- Doyon, J., 2004. Comparaison de la composition des roches métasédimentaires archéennes dans six bassins de la Province du Supérieur : une étude géochimique et statistique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.
- Howarth, R.J., 1971. An empirical discriminant method applied to sedimentary-rock classification from major-element geochemistry. *Mathematical Geology*, vol 3. pp. 51-60.
- Milord, I., Sawyer, E.W., et Brown, M., 2001. Formation of diatexite migmatite and granite magma during anatexis of semi-pelitic metasedimentary rocks: An example from St. Malo, France. *Journal of Petrology*, vol 42. pp. 487-505.
- O'Neil, J., Maurice, C., Stevenson, R.K., Larocque, J., Cloquet, C., David, J., et Francis, D., 2007. The geology of the 3.8 Ga Nuvviagittuq greenstone belt, Northeastern Superior Province, Canada. *Earth's Oldest Rocks*. Edited by Martin J. van Kranendonk, R. Hugh Smithies and Vickie C. Bennett *Developments in Precambrian Geology*, Vol. 15 (K.C. Condie, Series Editor).
- Osterberg, S.A., 1993. Stratigraphy, physical volcanology, and hydrothermal alteration of the footwall rocks to the Winston Lake massive sulfide deposit, northwestern Ontario. Thèse de doctorat, Université du Minnesota.
- Prabhu, M.K., et Webber, G.R., 1984. Origin of quartzofeldspathic gneisses at Montauban-les-Mines, Quebec. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol 21. pp. 336-345.
- Pye, E. G., 1964. Mineral Deposits of the Big Duck Lake Area. Ontario Dept. of Mines, Geological Report No. 27
- Shaw, D.M., 1972. The origin of the Apsley gneiss, Ontario. *Journal Canadien des Sciences de la Terre*, vol 9. pp. 18-35.
- Simard, M., Parent, M., David, J., et Sharma, K.N.M., 2003. Géologie de la région de la rivière Innuksuac (34K et 34L). Ministère des Ressources naturelles et de la faune du Québec, document RG-2002-10.