



## 1. Introduction

Les domaines de roches fortement métamorphosées occasionnent des défis importants pour l'exploration. En particulier, il est souvent difficile d'identifier correctement les protolithes (sédimentaire vs ignée) de roches fortement métamorphosées. Une méthode automatisée de discrimination géochimique des protolithes par apprentissage supervisé est ici proposée. La méthode s'applique tant pour les roches peu métamorphosées que fortement métamorphosées (granulites).

## 2. Apprentissage supervisé par machines à vecteurs de support

L'apprentissage supervisé est une technique du domaine de l'intelligence artificielle qui consiste à fournir à un système une série de cas ou d'exemples dont le résultat est connu pour déduire les règles permettant de retrouver le résultat. Dans le contexte de la reconnaissance géochimique des protolithes, les cas d'apprentissage sont des échantillons dont on connaît le protolithe. Les machines à vecteurs de support ont été choisies comme technique d'apprentissage supervisé.

## 3. Banque de données géochimiques de référence

Une banque de données contenant un large éventail de roches sédimentaires et ignées, métamorphosées ou non, a été constituée. La banque complétée contient un total de 205 353 échantillons de plusieurs sources (SIGÉOM, Ozroc, GEOROC, etc), dont 168 182 ignées, 25 261 sédimentaires et 11 914 métamorphosées de protolithe inconnu. Les roches ont été également classées en sous-catégories pour des fins d'analyses plus poussées des résultats.

## 4. Deux modèles de reconnaissance des protolithes: majeurs seulement, et majeurs + Cr-Sr-Ni-Rb-Zr-Ba.

Deux modèles d'apprentissage ont été construits. Le premier modèle utilise les éléments majeurs SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, MgO, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>T, CaO, MnO, K<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O et P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Le second utilise ces mêmes éléments plus quelques éléments mineurs couramment analysés (Cr-Sr-Ni-Rb-Zr-Ba). Toutes les données sont recalculées à 100% et anhydres, pour être applicables à tous les niveaux métamorphiques.

## 5. Choix des échantillons de la banque de référence pour l'apprentissage supervisé

L'apprentissage a été réalisé sur des roches peu métamorphosées (faciès schiste vert et sous schiste vert). 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, compensé par le recalcul anhydre à 100%).

Un échantillonnage aléatoire de la banque de référence a été réalisé pour obtenir deux sous-banques (une pour chaque modèle) contenant un nombre égal de roches sédimentaires et ignées, condition nécessaire pour l'apprentissage par machines à vecteurs de support. Les deux sous-banques résultantes contiennent 18 644 (majeurs) et 9 388 échantillons (majeurs + 6 mineurs).

## 6. Traitement par machines à vecteurs de support

Les traitements ont été réalisés grâce au logiciel Neurosolutions pour Excel version 5.0. Pour réaliser l'apprentissage de chaque modèle, les données ont été divisées en échantillons d'entraînement (65%), de contre-validation (15%) et de test à posteriori (20%).

## 7. Résultats de classification des échantillons de test

La figure 1 présente les résultats de classification pour plusieurs types de roches, selon le modèle (échantillons de test). Globalement, les résultats sont très bons, avec une proportion de classification correcte de 85,1% pour l'ensemble des roches ignées et de 89% pour l'ensemble des roches sédimentaires (modèle majeurs seul). On constate toutefois que dans le cas des roches ignées altérées, la classification est moins bonne, en particulier pour les roches volcaniques altérées. La classification est parfaite pour les roches sédimentaires chimiques et reste assez bonne pour les roches sédimentaires clastiques (environ 85%). La classification est meilleure pour les mudstones que pour les grès et conglomérats. On constate aussi que le modèle contenant les 6 éléments mineurs est systématiquement égal ou supérieur au modèle avec majeurs seulement. L'amélioration moyenne est de 5% environ.

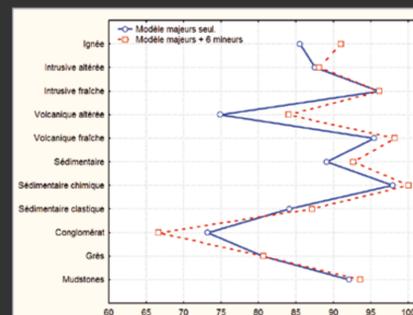


Figure 1: pourcentages de classification correcte pour le groupe de test selon les types de roches et le modèle

La figure 2 permet de constater que différentes sous-catégories de roches ignées montrent des pourcentages de classification qui varient. Les pourcentages sont de 100% pour les roches ultramafiques et mafiques fraîches et restent élevés (>85%) lorsque ces roches sont altérées. Les pourcentages restent bons pour les roches ignées intermédiaires et felsiques fraîches (en général >85%). Les pourcentages les plus bas se retrouvent dans le cas des roches volcaniques intermédiaires et felsiques altérées (62 et 72%). On peut finalement noter que les pourcentages sont généralement plus bas pour les roches volcaniques qu'intusives, et que le modèle avec 6 éléments mineurs performe mieux dans presque tous les cas.

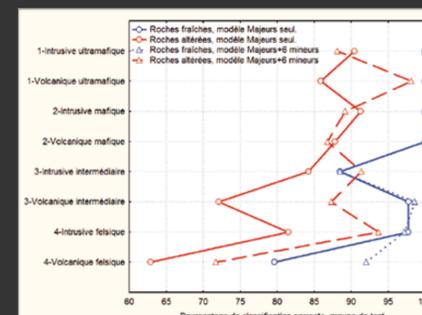


Figure 2: pourcentages de classification correcte pour le groupe de test selon les types de roches intrusives et le modèle

Ces résultats pourraient mener à la conclusion que la méthode est inutile dans le cas des roches volcaniques felsiques altérées en K-Al. Toutefois, on peut tout de même identifier le protolithe en considérant l'ensemble des données disponibles dans un secteur. La figure 3 montre les réponses de 36 échantillons aléatoirement choisis de la banque de Winston Lake. On peut comparer ceci avec la figure 4 qui montre 36 échantillons choisis au hasard dans une banque de données de roches métasédimentaires turbiditiques du bassin d'Opinaca. La banque de données de roches sédimentaires donne des réponses qui sont fortement du côté sédimentaire du graphique. Les roches volcaniques altérées de Winston Lake donnent plutôt des réponses qui se trouvent réparties dans l'ensemble du spectre. On peut donc séparer les vraies unités sédimentaires des unités ignées altérées en comparant un spectre de réponses de plusieurs

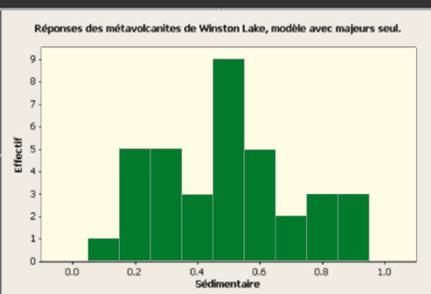


Figure 3. Répartition des réponses (0: ignée; 1: sédimentaire) de 36 échantillons choisis aléatoirement, métavolcanites de Winston Lake, modèle avec majeurs seulement.

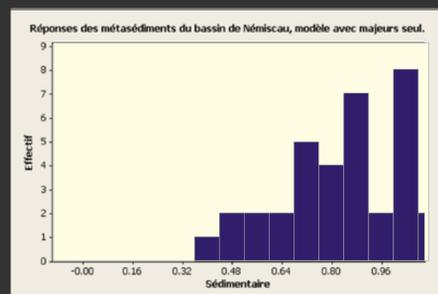


Figure 4. Répartition des réponses (0: ignée; 1: sédimentaire) aléatoirement, turbidites du bassin d'Opinaca (données de Doyon, 2004).

## 8. Application 1: protolithes des roches volcaniques métamorphosées et altérées, gisement de Winston Lake, Ontario

Le gisement de Winston Lake en Ontario est un SMV encaissé dans des roches volcaniques felsiques et mafiques métamorphosées au faciès amphibolite. Les altérations et faciès volcaniques ont été étudiés en détail par Osterberg, 1993. Les données géochimiques de cette étude ont été récupérées et traitées pour reconnaître le protolithe selon le modèle avec majeurs seulement. Toutes les roches sont des roches interprétées comme volcaniques selon les travaux de terrain.

Le tableau 1 montre les résultats de classification pour les différents types de roches et altérations identifiées à Winston Lake. On constate tout d'abord que les échantillons des faciès non-altérés sont presque tous correctement classés comme roches volcaniques. La classification est moins bonne mais acceptable pour le faciès à anthophyllite. Toutefois, les altérations alumineuses-potassiques (biotite, sillimanite, staurotide) rendent les roches volcaniques semblables aux roches sédimentaires. Elles sont alors incorrectement classées comme roches sédimentaires.

Tableau 1: Pourcentages de classification 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%
<b>Total</b>	<b>95,9%</b>	<b>100%</b>	<b>75%</b>	<b>30,7%</b>	<b>22,7%</b>	<b>6,6%</b>	<b>62,7%</b>

## 9. Application 2: migmatisation de roches sédimentaires, massif Armorica, France.

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 2 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). Toutes les roches métasédimentaires peu fusionnées ou les résidus de fusion de la roche donnent des réponses qui sont nettement sédimentaires. Les réponses sont ignées pour les mélanges dominés par du magma. Ceci indique que les parties fusionnées des migmatites donnent des réponses ignées comme prévu alors que les migmatites peu fusionnées ou les résidus de fusion conservent leur réponse sédimentaire.

Tableau 2. 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

## 10. Conclusion

La méthode géochimique d'identification des protolithes fonctionne très bien dans l'ensemble (85-90% correcte), particulièrement pour les roches qui sont peu altérées (>95%). L'altération des roches ignées diminue toutefois le taux de classification correcte (75-85%). Les classifications sont excellentes pour les roches ignées mafiques et ultramafiques et pour roches sédimentaires fines. Elles diminuent mais restent acceptables pour les grès et les roches ignées felsiques non altérées. Pour les roches volcaniques felsiques altérées, la classification est mauvaise mais on peut identifier correctement le protolithe en considérant l'ensemble des réponses de plusieurs échantillons.

## Références

Doyon, J., 2004. Comparaison de la composition des roches métasédimentaires archéennes dans six bassins de la Province du Québec: une étude géochimique et statistique. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Chicoutimi.

Milord, J., 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.

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.