
Norme LithoModeleur

Projet 2011-04

Par : SYLVAIN TREPANIER

Octobre 2013



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, S., 2013. Norme LithoModeleur. Rapport du projet CONSOREM 2011-04, 91 p.

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

CONSOREM

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

Tél. : (418) 545-5011 poste 5634

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

RÉSUMÉ

Le logiciel LithoModeleur regroupe l'essentiel des outils lithogéochimiques développés au CONSOREM. Un calcul normatif pour les roches métamorphiques a été développé pour compléter la gamme d'outils géochimiques contenus dans le logiciel. Trois niveaux métamorphiques distincts sont disponibles dans la norme: schiste vert moyen, schiste vert supérieur et amphibolite inférieur à moyen. Différents indices d'altération basés sur les minéraux métamorphiques sont calculés. La norme calcule aussi différentes informations auxiliaires qui peuvent être utiles en exploration (densité, CO₂ normatif, H₂O normatif...).

Ce rapport présente les fondements et la méthode de calcul de la norme intégrée dans LithoModeleur. Les différents diagrammes métamorphiques utilisés sont notamment présentés. Les minéraux calculés par la norme sont comparés à la minéralogie réelle observée dans différents cas. Il s'avère qu'en général, les minéraux normatifs correspondent bien à la minéralogie réelle.

TABLE DES MATIERES

AVERTISSEMENT	I
RÉSUMÉ	II
TABLE DES MATIERES.....	III
LISTE DES FIGURES	V
LISTE DES TABLEAUX	IX
1. INTRODUCTION	1
2. MINERALOGIE NORMATIVE: CONCEPTS.....	1
2.1 DEFINITION.....	1
2.2 SEQUENCES DE CALCUL DE LA NORME	1
3. DIAGRAMMES DE STABILITE DES MINERAUX METAMORPHIQUES ET CALCUL DE LA NORME LITHOMODELEUR	2
4. SEQUENCE DE CALCUL GENERALE DE LA NORME LITHOMODELEUR	2
4.1 ÉTAPE 1: EXTRACTION DU NOMBRE DE MOLES DES ELEMENTS	4
4.2 ÉTAPE 1.5: CALCUL DES MOLES DE C ET H NORMATIFS (OPTION CO ₂ NORMATIF SEULEMENT).....	5
4.3 ÉTAPES 2, 3 ET 4: MINERAUX ACCESSOIRES, SULFURES, CARBONATES, OXYDES	5
4.4 ÉTAPE 5: GAIN AU FEU NORMATIF	5
4.5 ÉTAPE 6: #MG, #MG INITIAL ET DU #K	6
4.6 ÉTAPE 7: DETERMINATION DE L'ASSEMBLAGE METAMORPHIQUE SUR LE TETRAEDRE ACMK 6	
4.7 ÉTAPE 8: CALCUL DES 4 MINERAUX DE L'ASSEMBLAGE METAMORPHIQUE ACMK.....	8
4.8 ÉTAPE 9: MODIFICATION DE L'ASSEMBLAGE SELON CERTAINES CONDITIONS	8
4.8.1 <i>Modification de l'assemblage selon #Mg</i>	8
4.8.2 <i>Modification des feldspaths K-Na et micas blancs</i>	9
4.9 ÉTAPE 10: TRAITEMENT DE L'EXCES OU DU DEFICIT EN SI	9
4.10 ÉTAPE 11: H ₂ O NORMATIF	9
4.11 ÉTAPE 11.5: COMPARAISON ENTRE CO ₂ -H ₂ O NORMATIFS, S, GAF ET LOI (OPTION CO ₂ -H ₂ O NORMATIFS SEULEMENT)	9
4.12 ÉTAPE 12: POIDS POURCENT DES MINERAUX	10
4.13 ÉTAPE 13: DENSITE	10
4.14 ÉTAPE 14: INDICES D'ALTERATION	10
4.15 EXCES ET DEFICIT D'ELEMENTS	10
5. OPTIONS DE CALCUL DE LA NORME LITHOMODELEUR	11
5.1 FACIES METAMORPHIQUES	11
5.2 CALCUL DU FER FE ⁺² ET FE ⁺³	12
5.3 CALCUL DU CO ₂	12
5.3.1 <i>Calcul du CO₂-H₂O normatif</i>	12
6. FACIES METAMORPHIQUES DE LA NORME LITHOMODELEUR	13
7. NORME SCHISTE VERT MOYEN 350C	16
7.1 SULFURES/SULFATES.....	16
7.2 CARBONATES	16
7.3 OXYDES DE FER ET TITANE	17
7.4 TETRAEDRE ACMK ET ASSEMBLAGES METAMORPHIQUES.....	18
7.4.1 <i>Diagramme ACM</i>	18
7.4.2 <i>Diagrammes AKF, AKM, AFM projeté de muscovite</i>	18

7.4.3	<i>Diagramme ANK</i>	19
7.4.4	<i>Diagramme AKC</i>	19
7.4.5	<i>Pôle K-Na et compositions peralcalines</i>	20
7.4.6	<i>Tétraèdre ACMK</i>	20
7.5	MODIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR #MG, K-NA.....	21
7.6	TRAITEMENT DU DEFICIT EN SiO ₂	21
7.7	LISTE COMPLETE DES MINERAUX DU FACIES.....	23
7.8	RÈGLES PÉTROGÉNÉTIQUES.....	23
7.9	INDICES D'ALTERATION.....	23
7.10	COMPORTEMENT DES INDICES POUR LITHOLOGIES NON-ALTEREES ET SEUILS.....	26
7.11	COMPARAISONS ENTRE MINERALOGIE NORMATIVE ET MINERALOGIE OBSERVEE.....	30
7.11.1	<i>Altération de basaltes andésitiques, gabbros, volcanites felsiques en contexte VMS, ceinture de Flin-Flon, Manitoba</i>	30
7.11.2	<i>Altérations de roches métasédimentaires, gîte d'or Touquoy, Nouvelle-Écosse</i>	34
7.11.3	<i>Altérations de komatiites, mine Duquesne, Abitibi</i>	35
7.11.4	<i>Altération de diorites à quartz et de diorites, mine Beaufor, Abitibi</i>	41
7.11.5	<i>Altérations des basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord</i>	43
7.11.6	<i>Altérations de basaltes, gîte d'or Rundle, secteur de Timmins, Ontario</i>	45
7.11.7	<i>Altération d'andésites en chlorite, séricite, silice, mine Hellyer, Australie</i>	48
7.12	COMPARAISON ENTRE CO ₂ NORMATIF ET AUTRES MESURES/ESTIMATIONS DU CO ₂	49
7.13	COMPARAISON DES INDICES D'ALTERATION AVEC INDICES DE NORMAT.....	50
7.13.1	<i>Banque de compilation des partenaires du CONSOREM</i>	50
7.13.2	<i>Mine Millenbach, Rouyn-Noranda</i>	53
7.14	COMPARAISON DES MESURES DE DENSITE ET AUTRES MESURES/ESTIMATIONS DE LA DENSITE ...	55
7.14.1	<i>Bracemac, Matagami</i>	55
7.14.2	<i>Banque de compilation Abitibi</i>	57
8.	NORME SCHISTE VERT SUPERIEUR 450C	57
8.1	SULFURES/SULFATES.....	57
8.2	CARBONATES.....	57
8.3	OXYDES DE FER ET TITANE.....	58
8.4	TETRAEDRE ACMK ET ASSEMBLAGES METAMORPHIQUES.....	58
8.4.1	<i>Diagrammes ACM, ACF et AFM projeté pour l'épidote</i>	58
8.4.2	<i>Diagrammes AKM, AKF, AFM projeté de muscovite</i>	60
8.4.3	<i>Diagramme ANK</i>	60
8.4.4	<i>Diagramme AKC</i>	60
8.4.5	<i>Pôle K et compositions peralcalines</i>	61
8.4.6	<i>Tétraèdre ACMK</i>	61
8.5	MODIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR #MG INITIAL.....	62
8.6	TRAITEMENT DU DEFICIT EN SiO ₂	62
8.7	LISTE COMPLETE DES MINERAUX DU FACIES.....	63
8.8	INDICES D'ALTERATION.....	64
9.	NORME AMPHIBOLITE INFÉRIEUR-MOYEN, 575C	64
9.1	SULFURES/SULFATES.....	64
9.2	CARBONATES.....	64
9.3	OXYDES DE FER ET TITANE.....	65
9.4	TETRAEDRE ACMK ET ASSEMBLAGES METAMORPHIQUES.....	65
9.4.1	<i>Diagramme ACM, ACF et AFM projeté de l'anorthite</i>	65
9.4.2	<i>Diagrammes AKM, AKF et AFM projeté de muscovite</i>	67
9.4.3	<i>Diagramme ACM, projeté de muscovite</i>	68
9.4.4	<i>Diagramme ANK</i>	69
9.4.5	<i>Diagramme AKC</i>	69
9.4.6	<i>Pôle K et compositions peralcalines</i>	70

9.4.7	Tétraèdre ACMK.....	70
9.5	MODIFICATION DE L'ASSEMBLAGE POUR #MG.....	71
9.6	TRAITEMENT DE DEFICIT EN SiO ₂	72
9.7	Liste complète des minéraux du faciès.....	72
9.8	Indices d'altération.....	72
9.9	Comparaisons entre minéralogie normative et minéralogie observée.....	73
9.9.1	Altérations SMV métamorphisées, gîte Montauban, Québec.....	73
9.9.2	Altérations SMV métamorphisées, mine Geco, Ontario.....	75
10.	CONCLUSIONS.....	77
	REMERCIEMENTS.....	77
	RÉFÉRENCES.....	78
	ANNEXE 1: MINÉRAUX NORMATIFS.....	80

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Séquence générale de calcul de la norme LithoModeleur, sans CO ₂ normatif.	3
Figure 2.	Séquence générale de calcul de la norme LithoModeleur, avec CO ₂ normatif.	3
Figure 3.	Séquence de calcul de la norme 350C avec CO ₂ = 0 pour calcul des indices d'altération en phyllosilicates.	4
Figure 4.	Calculs des proportions minérales par algèbre linéaire (tiré de Pruseth, 2009).	8
Figure 5.	Grille pétrogénétique KFMASH (tirée de Spear, 1993). Étoile rouge: schiste vert moyen 350C. Carré vert: schiste vert supérieur 450C. Cercle bleu: amphibolite moyen-supérieur, 575C.	14
Figure 6.	Grille pétrogénétique KNASH (tirée de Spear, 1993). Voir Figure 5 pour la légende des symboles de couleur.	15
Figure 7.	Grille pétrogénétique SMCH (tirée de Spear, 1993). Voir Figure 5 pour la légende des symboles de couleur.....	15
Figure 8.	Diagramme TX-CO ₂ pour le système SCMHC. Ligne verte: 450C, Ligne bleue: 575C. Le schiste vert moyen se trouve hors du diagramme (en bas). Tiré de Spear, 1993.	16
Figure 9.	Diagrammes de phase pour le système SiO ₂ -CaO-MgO-H ₂ O-CO ₂ . Tiré de Spear (1993).	17
Figure 10.	Diagramme ACM pour le faciès schiste vert moyen-supérieur (tiré de Spear, 1993).	18
Figure 11.	Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).....	19
Figure 12.	Diagramme ANK pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).....	19
Figure 13.	Diagramme AKC (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès schiste vert moyen 350C, 2 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.	20
Figure 14.	Tétraèdre ACMK pour le faciès schiste vert moyen 350C.	21
Figure 15.	Diagramme SiO ₂ -CaO-MgO-H ₂ O pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).....	22
Figure 16.	Réactions de carbonatation à la mine Kerr Addison, Ontario. Tiré de Kishida et Kerrich, 1987.	24

Figure 17. Chlorite et séricite normatives 350C pour des lithologies moyennes de Le Maitre (1976), progressivement carbonatées. L'étiquette de chaque point donne le % de CO ₂ ajouté à chaque moyenne.....	25
Figure 18. Indice ALT_PHYLLO 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.....	27
Figure 19. Indice ALT_CHLO 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.....	27
Figure 20. Indice ALT_SER 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.....	28
Figure 21. Indice ALT_PHYLLO 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.....	29
Figure 22. Indice ALT_SER 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.....	29
Figure 23. Indice ALT_CHLO 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.....	30
Figure 24. Chlorite mesurée par diffraction X vs chlorite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	31
Figure 25. Épidote mesurée par diffraction X vs épidote normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	31
Figure 26. Plagioclase mesuré par diffraction X vs albite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	32
Figure 27. Quartz mesuré par diffraction X vs quartz normatif 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	32
Figure 28. Amphiboles mesurées par diffraction X vs amphiboles calciques normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	33
Figure 29. Muscovite mesurée par diffraction X vs séricite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.....	33
Figure 30. Séricite normative 350C vs muscovite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).....	34
Figure 31. Chlorite normative 350C vs chlorite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).....	34
Figure 32. Albite normative 350C vs albite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).....	35
Figure 33. Somme des carbonates 350C vs la somme des carbonates observés, mine Duquesne.....	36
Figure 34. Séricite+Paragonite 350C vs muscovite observée, mine Duquesne.....	36
Figure 35. Séricite+Paragonite NORMAL vs muscovite observée, mine Duquesne.....	37
Figure 36. Chlorite 350C vs chlorite observée, mine Duquesne.....	37
Figure 37. Chlorite 350C vs chlorite observée, mine Duquesne.....	38
Figure 38. Talc+serpentine 350C vs talc+serpentine observé, mine Duquesne.....	38
Figure 39. Talc+serpentine NORMAL vs talc+serpentine observé, mine Duquesne.....	39
Figure 40. Diagramme AKM (+H ₂ O, +SiO ₂) à 350C, sans CO ₂ en excès. Le cercle orange représente la composition du faciès à fuschite de la mine Duquesne. Diagramme généré par le logiciel THERIAK.....	40

Figure 41. Diagramme AKM (+H ₂ O, +SiO ₂) à 350C, avec CO ₂ en excès. Le cercle orange représente la composition du faciès à fuschite de la mine Duquesne. Diagramme généré par le logiciel THERIAK.....	40
Figure 42. Séricite observée vs séricite normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).....	41
Figure 43. Chlorite observée vs chlorite Mg+Fe normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).....	42
Figure 44. Épidote (clinozoïsite) observée vs épidote normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).....	42
Figure 45. Albite observée vs albite normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).	43
Figure 46. Carbonates observés vs carbonates normatifs 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).....	43
Figure 47. Chlorite vs paragonite normatives 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.	44
Figure 48. Chlorite vs quartz normatifs 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.	45
Figure 49. Indice ALT_PARA vs Indice ALT_CHLO 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.....	45
Figure 50. Trémolite+Ferroactinote 350C selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).	46
Figure 51. Épidote 350C selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).....	46
Figure 52. Dolomite+Ankérinite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).	47
Figure 53. Calcite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).	47
Figure 54. Séricite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).....	48
Figure 55. Comparaison entre le CO ₂ analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO ₂ analysé (n = 7 151).	49
Figure 56. Comparaison entre le CO ₂ analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO ₂ -S analysés (n = 1 686).....	50
Figure 57. Comparaison entre l'indice IFRAIS de NORMAT et l'indice ALT_PHYLLO_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).	51
Figure 58. Comparaison entre l'indice ISER de NORMAT et l'indice ALT_SER_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).	51
Figure 59. Comparaison entre l'indice ICHLO de NORMAT et l'indice ALT_CHLO_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).	52
Figure 60. Comparaison entre l'indice IPAF de NORMAT et l'indice ALT_CARBS, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).	52
Figure 61. Indice NORMAT IFRAIS vs ALT_PHYLLO, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).	53
Figure 62. Indice NORMAT ISER vs ALT_SER, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).....	54
Figure 63. Indice NORMAT ICHLO vs ALT_CHLO, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).	54

Figure 64. Comparaison entre densité mesurée et densité de la norme 350C, secteur Bracemac (n=111).	55
Figure 65. Comparaison entre la susceptibilité magnétique mesurée et estimée par NORMAT, secteur Bracemac (n=75).	56
Figure 66. Comparaison entre la susceptibilité magnétique mesurée et magnétite normative 350C, secteur Bracemac (n=75).....	56
Figure 67. Comparaison entre densité de NORMAT et la norme 350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).	57
Figure 68. Diagramme SiO ₂ -CaO-MgO pour le système SiO ₂ – CaO – MgO - H ₂ O - CO ₂ , faciès schiste vert supérieur 450C pour XCO ₂ > 0,03 (tiré de Spear, 1993).	58
Figure 69. Diagramme ACF (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès schiste vert supérieur 450C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).....	59
Figure 70. Diagramme AFM (+H ₂ O, +SiO ₂) projeté de l'épidote pour le faciès schiste vert supérieur 450C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).	59
Figure 71. Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès schiste vert supérieur 450C (tiré de Spear, 1993).	60
Figure 72. Diagramme AKC (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès schiste vert supérieur 450C, 2 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.	61
Figure 73. Tétraèdre ACMK pour le faciès schiste vert supérieur 450C.	62
Figure 74. Diagramme SiO ₂ -CaO-MgO-H ₂ O pour le faciès schiste vert supérieur 450C (tiré de Spear, 1993).	63
Figure 75. Diagramme SiO ₂ -CaO-MgO pour le système SiO ₂ -CaO-MgO-H ₂ O-CO ₂ , faciès amphibolite inférieur-moyen 575C pour XCO ₂ > 0,07 (tiré de Spear, 1993).....	65
Figure 76. Diagramme ACM (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 3kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.	66
Figure 77. Diagramme ACF (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 2,5 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).....	67
Figure 78. Diagramme AFM (+H ₂ O, +SiO ₂) projeté de l'anorthite, pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 2,5 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).....	67
Figure 79. Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès amphibolite inférieur moyen 575C 2.75 kb (tiré de Spear, 1993).	68
Figure 80. Diagramme ACM (+H ₂ O, +SiO ₂) projeté à partir de la muscovite, faciès amphibolite inférieur-moyen 575C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).....	69
Figure 81. Diagramme ANK pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C. Tiré de Spear, 1993.	69
Figure 82. Diagramme AKC (+H ₂ O, +SiO ₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).....	70
Figure 83. Diagramme ACMK pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C.....	71
Figure 84. Anthophyllite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).....	73
Figure 85. Cordiérite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).....	74

Figure 86. Andalousite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).....	74
Figure 87. Biotite normative de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).	74
Figure 88. Cordiérite normative 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).....	75
Figure 89. Anthophyllite normative 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).....	76
Figure 90. Grenat normatif 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).	76
Figure 91. Clinopyroxène normatif selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Minéraux normatifs vs assemblages, mine Hellyer.	48
Tableau 2. Corrélations de Spearman entre CO ₂ analysé et CO ₂ estimés, banque de compilation des partenaires du CONSOREM Abitibi avec CO ₂ analysé.....	49
Tableau 3. Corrélations de Spearman entre valeurs de CO ₂ analysées et estimées, banque de compilation des partenaires du CONSOREM Abitibi avec S et CO ₂ analysés.	50
Tableau 4. Corrélations de Spearman entre densité analysée et estimée, forages du secteur Bracemac (n=110).	55

1. INTRODUCTION

Le logiciel LithoModeleur regroupe l'essentiel des outils lithogéochimiques développés au CONSOREM. LithoModeleur ne contient toutefois pas d'outil de calcul de la norme pour les roches métamorphiques. Un volet du projet 2011-04 avait donc comme objectif de développer une norme pour les roches métamorphiques dans LithoModeleur. Cette norme s'applique aux roches de trois niveaux métamorphiques distincts: schiste vert moyen, schiste vert supérieur et amphibolite inférieur à moyen. Ce rapport présente d'abord les fondements et la méthode générale de calcul de la norme LithoModeleur. La deuxième portion du rapport examine les particularités de calcul spécifiques à chaque niveau métamorphique calculé. Dans la deuxième partie, des comparaisons sont faites entre les minéraux normatifs et la minéralogie réelle observée dans différents exemples. Les différents autres paramètres calculés sont également comparés de différentes façons avec des cas d'application (indices d'altération, densités, volatiles normatifs).

2. MINÉRALOGIE NORMATIVE: CONCEPTS

2.1 Définition

La norme d'une roche se définit comme la composition minéralogique théorique d'une roche si tous les équilibres chimiques avaient pu se réaliser au cours d'une cristallisation très lente (Foucault et Raoult, 1992). La norme a été au départ développée pour les roches magmatiques (ex: norme CIPW, Cross et al., 1902), mais des travaux plus récents l'ont également appliquée aux roches métamorphiques (ex: NORMAT, Piché et Jébrak, 2004).

2.2 Séquences de calcul de la norme

Le calcul de la norme est globalement une approche séquentielle. À chaque étape, des minéraux sont formés et les éléments utilisés sont soustraits du total des éléments disponibles d'une analyse traitée; les étapes subséquentes utilisent les éléments restants. L'élaboration d'une séquence de calcul appropriée est une étape cruciale dans le développement d'une norme.

Les séquences de calcul de la norme débutent généralement par les minéraux les plus prévisibles. Ce sont les minéraux qui contiennent des cations ne se retrouvant que dans un nombre très limité de minéraux. C'est le cas par exemple de l'apatite (P), de la chromite (Cr), des sulfures (S), des carbonates (CO₂), et des oxydes de fer (Fe⁺³). Par la suite, les minéraux contenant uniquement des cations plus communs peuvent être calculés. Dans certaines méthodes, plusieurs minéraux sont calculés simultanément à une étape précise (ex: Mesonorm; Barth, 1959). Plusieurs méthodes de calcul considèrent également certains éléments ubiquistes en excès lors du calcul, puis corrigent à la fin pour le déficit éventuel (ex: Si dans la norme CIPW selon certaines approches du calcul). Les séquences de calcul doivent également tenir compte du fait que certains minéraux ne peuvent coexister dans des roches à l'équilibre chimique. C'est le cas par exemple de l'olivine et du quartz dans la norme CIPW.

Les séquences de calcul des différentes normes ne correspondent donc pas généralement à l'ordre de formation réel des minéraux dans les roches. Par exemple, l'ordre de formation des minéraux dans la norme CIPW ne reflète pas l'ordre de cristallisation des minéraux à partir de magmas.

3. DIAGRAMMES DE STABILITE DES MINERAUX METAMORPHIQUES ET CALCUL DE LA NORME LITHOMODELEUR

Diagrammes de stabilité métamorphique: généralités

Les diagrammes de stabilité des roches métamorphiques permettent de prédire l'assemblage des minéraux présents dans une roche métamorphique selon le faciès métamorphique et la composition globale de la roche. Ce sont généralement des diagrammes ternaires dont les apex sont composés de différents cations ou minéraux. Le choix des cations dépend essentiellement du type de roche auquel on veut appliquer le diagramme; les cations sont choisis en fonction de l'abondance des différents cations majeurs dans un type de roche. Par exemple, le diagramme ACF (Al-Ca-Mg+Fe) est souvent utilisé pour les roches ignées mafiques, alors que le diagramme AKF (Al-K-Mg+Fe) est utilisé pour les pérites. Dans la plupart des diagrammes, certains éléments très répandus dans les roches métamorphiques seront considérés en excès pour simplifier le problème (souvent Si ou H). Des tétraèdres métamorphiques sont parfois utilisés plutôt que des diagrammes ternaires (ex: Barth, 1959) et ont l'avantage de pouvoir inclure un cation supplémentaire.

Diagrammes de stabilité métamorphique et norme

La norme LithoModeleur se base sur des diagrammes de stabilité métamorphique pour déterminer les assemblages minéraux présents dans une roche à un faciès métamorphique donné. Cette approche est également utilisée dans NORMAT (diagramme ternaire ACF; Piché et Jébrak, 2004) et dans Mesonorm (diagramme quaternaire ACFK; Barth, 1959). À l'instar de Mesonorm, la norme LithoModeleur utilise des tétraèdres métamorphiques pour pouvoir inclure un pôle supplémentaire et ainsi mieux représenter la réalité des assemblages métamorphiques.

Limites des diagrammes de stabilité métamorphique

La principale limite des diagrammes de stabilité des roches métamorphiques est qu'ils représentent en réalité une simplification du problème de la stabilité des roches métamorphiques. En effet, chaque diagramme n'inclut que 3 ou 4 cations majeurs alors que la plupart des roches contiennent en réalité un plus grand nombre d'éléments susceptibles d'être présents en abondance (Si, Al, Fe⁺², Fe⁺³, K, Na, Ca, Mg, H, C). De même, les diagrammes qui supposent certains éléments en excès ne peuvent donner les résultats corrects si ces éléments ne sont pas en excès en réalité. Ces diagrammes constituent donc nécessairement une simplification du problème de stabilité des minéraux dans les roches métamorphiques, mais ils demeurent très utiles.

4. SEQUENCE DE CALCUL GENERALE DE LA NORME LITHOMODELEUR

La séquence de calcul de la norme LithoModeleur se distingue de la plupart des autres normes par l'utilisation de deux approches distinctes:

1. L'utilisation d'un tétraèdre métamorphique ACMK pour représenter la stabilité des silicates de Al-Ca-Mg-Fe-K-(Na) (comme Mesonorm, Barth, 1959).
2. Le calcul simultané des proportions minérales dans un assemblage donné par des systèmes d'équations linéaires (Pruseth, 2009).

La séquence générale de calcul de la norme LithoModeleur est donnée à la **Figure 1**. Cette séquence générale s'applique à tous les faciès métamorphiques, dans le cas où le CO₂ normatif n'est pas calculé (voir section 5.3). Si le CO₂ normatif est calculé, des étapes supplémentaires

s'ajoutent au processus (**Figure 2**). Chaque étape de la séquence est expliquée en détail dans les sous-sections suivantes.

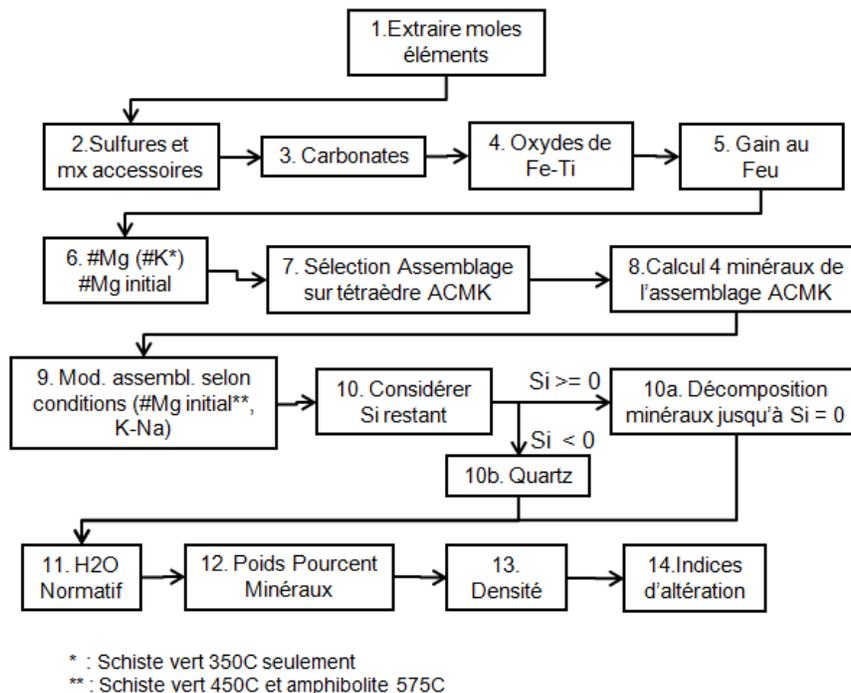


Figure 1. Séquence générale de calcul de la norme LithoModelleur, sans CO₂ normatif.

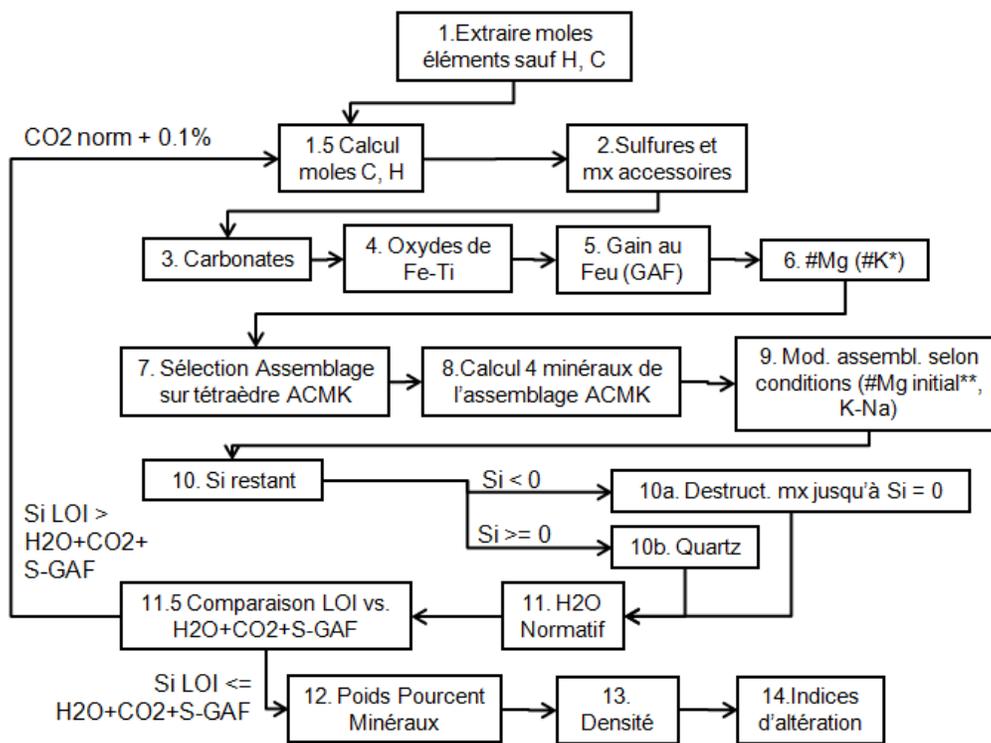


Figure 2. Séquence générale de calcul de la norme LithoModelleur, avec CO₂ normatif.

Il faut noter que les normes 350C et 450C ont une séquence de calcul particulière. La norme est d'abord calculée sans carbonates ($\text{CO}_2 = 0$) (**Figure 3**). Puis la norme est calculée normalement. Ceci sert à calculer des versions sans CO_2 des minéraux servant à des indices d'altération. Seuls les phyllosilicates calculés dans la version sans CO_2 sont sauvegardés dans la sortie finale de la norme.

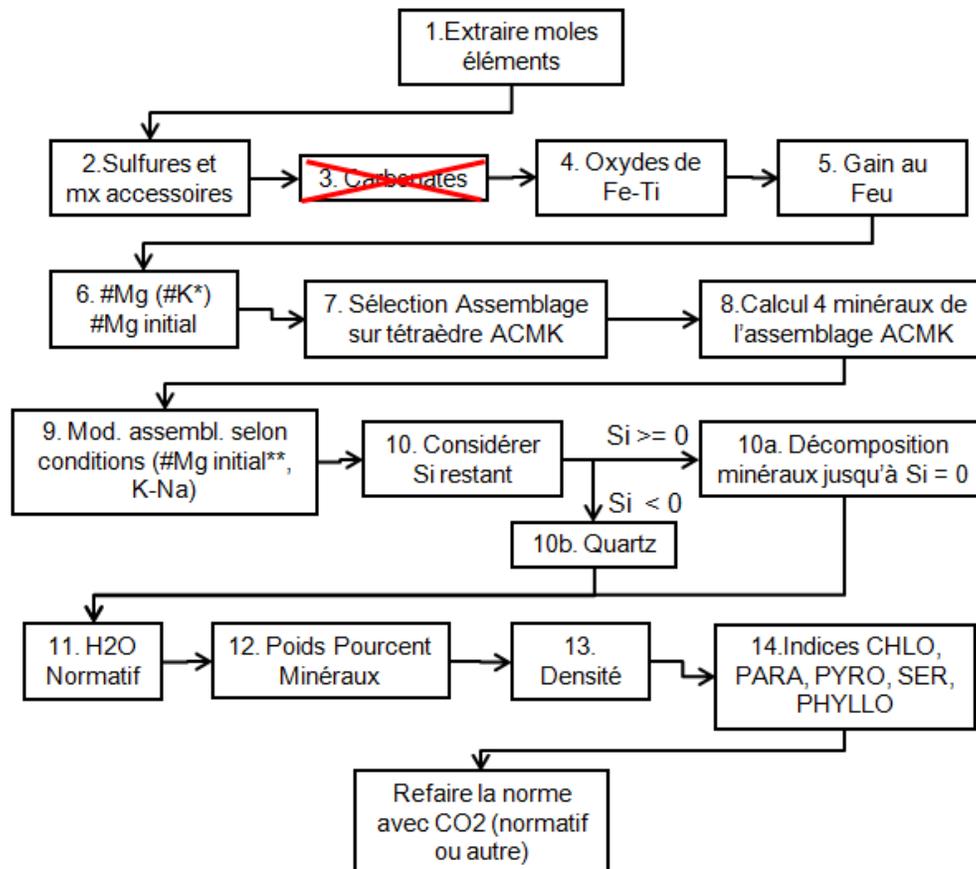


Figure 3. Séquence de calcul de la norme 350C avec $\text{CO}_2 = 0$ pour calcul des indices d'altération en phyllosilicates.

Minéraux de la norme LithoModeleur

Les différents minéraux stables à un faciès métamorphique donné sont énumérés dans les "Types de données chimiques" de LithoModeleur (accessible par "Configuration --> Voir le fichier de définition chimique", dans le menu principal du logiciel). Cette table donne la liste complète de tous les minéraux (majeurs, sulfures, carbonates, accessoires, oxydes). L'entrée pour un minéral donne également le nombre de moles de chaque élément dans le minéral, sa densité et son poids moléculaire. L'**Annexe 1** reprend la liste des minéraux et des poids moléculaires utilisés.

4.1 Étape 1: Extraction du nombre de moles des éléments

Cette étape consiste à extraire le nombre de moles de chaque élément à partir d'une analyse chimique. C'est la valeur recalculée à 100 % qui est utilisée ici. Toutes les opérations de calcul des minéraux s'effectuent par la suite sur les nombres de moles de cations ainsi extraits.

Les valeurs de Fe extraites peuvent varier selon l'option de calcul du fer de la norme sélectionnée par l'utilisateur (voir section 5.2). Si le CO₂ est normatif (voir section 5.3), alors les valeurs de H et de C sont calculées différemment (voir étape 1.5).

4.2 Étape 1.5: Calcul des moles de C et H normatifs (option CO₂ normatif seulement)

Les CO₂ et H₂O normatifs se calculent de façon itérative, en cycles successifs (voir section 5.3 et **Figure 2**). Au premier cycle, le C est fixé à 0. À chaque cycle suivant, le C est augmenté de 0,00227 mole (correspond à 0,1 % CO₂).

Le nombre de moles d'hydrogène (H) normatif est par la suite calculé en faisant la différence entre la perte au feu analysée et la somme des poids de S et de CO₂. La formule est donnée ci-dessous. Dans cette formule, 17,998 représente le poids moléculaire de H₂O et 2 le nombre de moles de H par mole de H₂O (2). Le poids de S est transformé à partir du nombre de moles extrait à l'étape 1 et le poids de CO₂ à partir du nombre de moles de CO₂.

$$\text{moles H normatif} = (\text{Perte au feu}\% - \text{S}\% - \text{CO}_2 \text{ normatif poids}\%) * 2 / 17,998$$

4.3 Étapes 2, 3 et 4: Minéraux accessoires, sulfures, carbonates, oxydes

Les minéraux accessoires, sulfures, carbonates et oxydes sont calculés à cette étape. *Il faut noter que les éléments Si et H sont considérés en excès ici.* Le déficit éventuel en Si sera traité dans une étape ultérieure. Ceci signifie qu'un nombre insuffisant de ces éléments n'empêchera pas la formation des minéraux. Le nombre de moles de chaque élément dans chaque minéral calculé est donné dans les "Types de données chimiques" de LithoModeleur (accessible par "Configuration --> Voir le fichier de définition chimique", dans le menu principal du logiciel). Les données de poids moléculaires et de densités utilisés pour les différents calculs sont également fournies dans ce fichier.

La procédure exacte de calcul et la liste des minéraux accessoires, sulfures, carbonates et oxydes calculés dépendent du faciès métamorphique (voir la section 6 pour les détails).

4.4 Étape 5: Gain au feu normatif

La perte au feu d'un échantillon est la mesure de la quantité de matériel perdue lors de la chauffe d'un échantillon à 1000 °C. Cette perte est principalement due à la libération des éléments volatiles de l'échantillon (ex: CO₂, S, H₂O⁺ et H₂O⁻). Toutefois, lors de la chauffe de l'échantillon pour l'analyse de la perte au feu, le fer présent sous forme réduite dans les minéraux non-silicatés (carbonates, sulfures) s'oxyde au contact de l'air (De Jongh, 1979). Cette oxydation ajoute de l'oxygène à l'échantillon et cause donc un gain de masse que l'on nomme le gain au feu. Ce gain de masse provoque ainsi une sous-estimation de la quantité réelle de volatiles dans l'échantillon. Pour obtenir une meilleure estimation de la quantité réelle de volatiles d'un échantillon à partir de la perte au feu, il faut donc ajouter le gain au feu calculé à celle-ci.

Deux réactions de gain au feu pour l'oxydation du fer sont possibles selon la nature du minéral calciné. Pour les carbonates, on oxyde le fer sous forme FeO en Fe₂O₃. Pour les sulfures, on passe directement de Fe en Fe₂O₃.

- FeO + 0,5O --> 0,5 Fe₂O₃ (Carbonates)
- Fe + 1,5O --> 0,5 Fe₂O₃ (Sulfures)

Un demi atome d'oxygène est donc ajouté à l'échantillon pour chaque atome de fer présent dans des carbonates, et 1,5 atomes d'oxygène pour chaque fer présent en sulfures.

Le gain au feu en poids pourcent lors de la calcination d'un sulfure peut donc être calculé de la façon suivante. La valeur de 15,998 représente la masse molaire de l'oxygène.

$$GOF\%(sulfure) = nbr\ moles\ minéral * nbr\ moles\ Fe\ minéral * 1,5 * 15,998$$

Pour les carbonates, on applique la formule suivante:

$$GOF\%(carbonate) = nbr\ moles\ minéral * nbr\ moles\ Fe\ minéral * 0,5 * 15,998$$

4.5 Étape 6: #Mg, #Mg initial et du #K

Le tétraèdre ACMK considère que Mg-Fe et que K-Na (schiste vert 350C seul) sont entièrement équivalents entre eux. Or, la liste des minéraux normatifs de chaque faciès comprend en réalité des minéraux ferrifères et magnésiens séparés. Par exemple, la norme schiste vert 350C donne la trémolite (amphibole Mg) et la ferroactinote (amphibole Fe) séparément, ainsi que la paragonite et la séricite séparément (mica blanc sodique vs potassique).

Pour former les bonnes quantités de minéraux ferrifères, magnésiens, potassiques et sodiques, on calcule deux ratios molaires différents. Le #Mg est calculé comme $Mg/(Mg+Fe_2+Fe_3)$ molaire alors que le #K est $K/(K+Na)$ molaire (schiste vert 350C seulement). Le #Mg initial est calculé sur les valeurs initiales de ces éléments en moles. Ces proportions seront utilisées à l'étape 8 pour calculer la bonne quantité de minéraux de chaque pôle. Par exemple, si on détermine à l'étape 8 que l'on doit former 0,5 mole d'amphibole et que le #Mg est de 0,2, on formera en réalité alors 0,1 mole de trémolite et 0,4 mole de ferroactinote. Encore une fois, les valeurs utilisées sont les nombres de moles restants après la formation des minéraux accessoires, sulfures, carbonates et oxydes.

4.6 Étape 7: Détermination de l'assemblage métamorphique sur le tétraèdre ACMK

Chaque faciès métamorphique disponible dans la norme LithoModeleur possède son tétraèdre ACMK, qui est basé sur des minéraux et des diagrammes métamorphiques. Les différents diagrammes à la base des différents tétraèdres sont discutés dans la section 6. Les minéraux de chaque faciès métamorphique sont détaillés dans les types de données chimiques de LithoModeleur.

Localisation des minéraux dans les tétraèdres ACMK

Les nombres de moles définis dans les "Types de données chimiques" de LithoModeleur sont utilisés pour localiser les minéraux présents dans le tétraèdre ACMK. Par exemple, pour la trémolite, on a 0 Al, 2 Ca, 5 Mg, 0 Fe, 0 K. La somme des éléments ACMK est donc de 7. Les coordonnées de la trémolite dans un tétraèdre ACMK sont donc de (0; 2/7; 5/7; 0). Il faut noter que seuls des minéraux composés uniquement de Al, Ca, Mg, Fe, K, Na, Si ou H apparaissent sur les tétraèdres; les autres sont calculés à d'autres étapes.

Assemblages et sous-tétraèdres

Chaque tétraèdre métamorphique est divisé en sous-tétraèdres représentant chacun un assemblage de 4 minéraux stables selon la composition. Par exemple, dans la norme schiste vert 350, on trouve 6 sous-tétraèdres et donc 6 assemblages différents. L'assemblage 1 est formé du sous-tétraèdre Pyrophyllite-Séricite-Chlorite-Épidote. Les coordonnées de ce sous-tétraèdre dans le tétraèdre schiste vert 350 sont alors de (1; 0; 0; 0); (3/4; 0; 0; 1/4); (4,5/14,5; 0; 10/14,5; 0); (3/5; 2/5; 0; 0). Ces différentes coordonnées correspondent aux proportions molaires respectives de ces minéraux en ACMK.

Éléments considérés en excès dans le tétraèdre ACMK

Il faut noter que les tétraèdres ACMK utilisés considèrent que Si, H et C sont présents en excès pour former les minéraux. Ces éléments ne sont donc pas limitatifs pour la formation des minéraux. Ils seront toutefois déduits du total disponible au fur et à mesure de la formation de minéraux. Un déficit éventuel en Si (quantité négative de Si) sera traité dans une étape subséquente. Un déficit éventuel en H ne sera pas traité mais pourra être constaté dans le champ "EXCESDEFICIT". La section 4.15 (étape 15) présente différentes possibilités d'excès ou de déficit en éléments chimiques ainsi que les causes et significations possibles.

Détermination de l'assemblage

Pour déterminer l'assemblage métamorphique, les nombres de moles considérés sont ceux restants après la formation des minéraux accessoires, sulfures, carbonates et oxydes. L'apostrophe indique qu'il s'agit bien des quantités restantes des éléments.

A: Al'
C: Ca'
F: Mg' + Fe2+'
K: K' (+ Na')

Le pôle K est soit formé de K' seul (faciès amphibolite 575 et schiste vert supérieur 450), ou de K'+Na' (faciès schiste vert moyen 350). Cette différence est justifiée plus en détail dans les sections 7, 8 et 9 de ce rapport.

Pour déterminer l'assemblage métamorphique d'un échantillon:

1. Construire dans l'espace cartésien X-Y-Z un tétraèdre régulier ACMK de côté 1.
2. Calculer les coordonnées barycentriques¹ ACMK de l'échantillon à partir des nombres de moles restants.
3. Transformer les coordonnées barycentriques de l'échantillon en coordonnées cartésiennes X, Y, Z.
4. Pour chaque sous-tétraèdre ST :
 - a. Transformer les coordonnées cartésiennes X, Y, Z de l'échantillon en coordonnées barycentriques dans le sous-tétraèdre ST

¹ Coordonnées barycentriques

Les coordonnées barycentriques sont des coordonnées dont les composantes ont une somme strictement égale à 1. Les coordonnées dans les diagrammes ternaires classiques utilisés en géochimie (ex: 0; 0,5; 0,5) sont des coordonnées barycentriques. On peut transformer des coordonnées barycentriques en coordonnées cartésiennes et vice-versa par quelques calculs matriciels relativement simples.

- b. Si les coordonnées barycentriques trouvées en (a) sont toutes strictement supérieures à 0, alors l'échantillon fait partie de ce sous-tétraèdre. Noter l'assemblage correspondant.
- c. Sinon, regarder dans le sous-tétraèdre suivant.

4.7 Étape 8: Calcul des 4 minéraux de l'assemblage métamorphique ACMK

Le sous-tétraèdre ACMK dans lequel un échantillon se positionne détermine la liste des 4 minéraux stables à l'assemblage métamorphique ceci selon la composition de la roche. Il faut maintenant déterminer les quantités exactes de chaque minéral.

Les proportions minérales exactes peuvent être déterminées par des systèmes d'équations linéaires qui peuvent être solutionnés notamment par de l'algèbre matricielle (Pruseth, 2009; **Figure 4**). Cette approche de calcul simultané des proportions minérales d'un assemblage a l'avantage de ne pas avoir à choisir un ordre de formation des minéraux et de toujours arriver à une solution optimale.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & \dots & a_{2n} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & \dots & a_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & a_{n3} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}$$

Figure 4. Calculs des proportions minérales par algèbre linéaire (tiré de Pruseth, 2009).

Dans certains cas, deux minéraux seront réellement formés à partir d'un minéral ainsi calculé. C'est le cas des minéraux ferrifères et magnésiens ainsi que des minéraux potassiques et sodiques de la norme schiste vert moyen. Les ratios calculés à l'étape 6 sont utilisés pour calculer les proportions. Par exemple, la solution précédente donne 0,2 mole de chlorite; si #Mg est de 0,2, on formera réellement 0,04 mole de chlorite Mg et 0,16 mole de chlorite Fe.

Il faut noter finalement que si le mauvais assemblage était choisi à l'étape 7, on aurait des valeurs négatives pour les proportions minérales d'un ou plusieurs minéraux dans la solution donnée. Ceci nous indiquerait alors un problème dans la séquence de calcul, qui serait ainsi facile à détecter.

4.8 Étape 9: Modification de l'assemblage selon certaines conditions

4.8.1 Modification de l'assemblage selon #Mg

L'étape 7 considère que le fer et le magnésium sont complètement interchangeables dans tous les minéraux. Or, dans certains faciès métamorphiques, certains minéraux n'acceptent qu'une petite substitution de Fe par Mg ou vice-versa. Ces minéraux ne se forment également que lorsque le ratio #Mg de la roche totale est très bas ou au contraire très haut. C'est le cas du faciès amphibolite inférieur-moyen, où la cordiérite apparaît dans des compositions très magnésiennes et la staurotide et le grenat plutôt dans des compositions très ferrifères.

Pour mieux représenter ces variations, on considère tout d'abord que le minéral magnésien se forme préférentiellement et qu'il permet au départ une substitution complète entre Fe et Mg. Le pôle M du diagramme reste donc Fe²⁺+Mg. C'est aussi le minéral magnésien plutôt que le ferrifère qui apparaît dans le tétraèdre ACMK et qui est considéré dans les étapes 7 et 8. Par la suite, selon le #Mg initial de l'échantillon, ce minéral magnésien peut être détruit en quelques

réactions successives qui sont tirées des changements entre diagrammes AKM et AKF, ou entre ACM et ACF. De même, selon le #Mg initial, le minéral ferrifère pourra être formé à partir des autres minéraux. Ces modifications se retrouvent au faciès amphibolite 575C et schiste vert supérieur 450C.

4.8.2 Modification des feldspaths K-Na et micas blancs

Le tétraèdre ACMK considère que K et Na sont totalement interchangeables pour les feldspaths et les micas blancs. En réalité, ils ne le sont pas totalement. Cette étape modifie l'assemblage pour mieux représenter cette réalité.

4.9 Étape 10: Traitement de l'excès ou du déficit en Si

Toutes les étapes précédentes supposaient que la silice (Si) était présente en excès. Si c'est le cas à cette étape, la silice en excès est alors transformée en quartz. Sinon, on doit tenter de régler le déficit en Si en décomposant partiellement des minéraux riches en Si pour former des minéraux plus pauvres pour combler ce déficit. Les minéraux formés dépendent du faciès métamorphique, mais se sont communément des minéraux ferromagnésiens comme le talc ou l'anthophyllite (en serpentine, forstérite ou brucite) qui peuvent être décomposés, ainsi que les feldspaths sodiques et potassiques (en néphéline, leucite).

À cette étape du calcul, tous les minéraux sont calculés. La plupart des éléments sauf C et H devraient maintenant être épuisés.

4.10 Étape 11: H₂O normatif

Une fois tous les minéraux calculés, on peut maintenant calculer quelle est la quantité d'eau nécessaire pour former la minéralogie normative calculée. Pour chaque minéral calculé, on utilise la formule ci-dessous. Dans la formule, 17,998 est le poids moléculaire de H₂O, et 2 est le nombre de moles de H par mole de H₂O, c.-à-d. 2. Le H₂O normatif rapporté dans la norme est la somme du H₂O normatif de tous les minéraux de la norme.

$$\%H_2O \text{ normatif minéral} = \text{Nbr moles minéral} * \text{Nbr moles H par mole minéral} * 17,998 / 2$$

4.11 Étape 11.5: Comparaison entre CO₂-H₂O normatifs, S, GAF et LOI (option CO₂-H₂O normatifs seulement)

Cette étape vise à vérifier que la quantité d'éléments volatiles de la norme égale la perte au feu analysée. Si c'est le cas, le traitement itératif du CO₂-H₂O normatifs pourra s'arrêter. Sinon, on poursuit sur un cycle supplémentaire.

$$\text{Perte au feu analysée \%} = H_2O \text{ normatif\%} + CO_2 \text{ normatif\%} + S \text{ analysé\%} - \text{Gain au feu\%}$$

Au cours du calcul itératif du CO₂-H₂O normatifs, le terme de droite débute normalement plus bas que la perte au feu. On arrête le calcul itératif lorsque deux termes sont égaux ou que celui de droite dépasse légèrement la perte au feu. Lorsque c'est le cas, on passe à l'étape 12. Sinon, on recommence à l'étape 1.5. Le nombre de cycles est augmenté de 1 et le CO₂ normatif sera augmenté pour le cycle suivant.

4.12 Étape 12: Poids pourcent des minéraux

Jusqu'à cette étape, tous les calculs de minéraux étaient effectués en mole. Il est normalement préférable d'avoir les valeurs en poids pourcent pour les minéraux finaux car les valeurs en mole pour les minéraux sont dépendantes des formules choisies pour ces minéraux. Pour calculer le poids d'un minéral, il suffit de prendre le nombre de moles calculé multiplié par le poids moléculaire du minéral. Les poids sont ensuite recalculés sur une base de 100 g. Les poids moléculaires des minéraux de différents faciès métamorphiques sont donnés dans les "Types de données chimiques" de LithoModeleur et repris dans l'**Annexe 1**.

4.13 Étape 13: Densité

Les poids calculés et les densités des minéraux permettent de calculer la densité de la roche. La première étape est de calculer le volume occupé pour une masse de 100g de chaque minéral de la norme, selon la formule ci-dessous. Les densités des minéraux sont données dans les "Types de données chimiques" de LithoModeleur.

$$\text{Volume minéral (cm}^3\text{/100g roche)} = \text{Poids minéral (g/100g roche)} / \text{densité minéral (g/cm}^3\text{)}$$

La somme des volumes est par la suite calculée, puis divisée par 100 pour obtenir le volume total des minéraux par gramme de roche. Finalement, la densité globale de la roche en g/cm³ est obtenue en inversant la valeur précédente. La formule suivante résume ces opérations.

$$\text{Densité (g/cm}^3\text{)} = 1 / ((\sum \text{Volume minéral (cm}^3\text{/100g roche)}) / 100)$$

4.14 Étape 14: Indices d'altération

Différents indices d'altération peuvent être calculés à partir des minéraux normatifs. Ces indices sont calculés sur les valeurs en poids pourcent. Les indices varient selon le faciès métamorphique.

4.15 Excès et déficit d'éléments

À la fin du calcul de la norme, le nombre de mole de chaque élément chimique devrait être, sauf exception, de 0. En effet, tous les éléments devraient normalement avoir été utilisés pour former des minéraux. En général, peu d'excès d'éléments surviennent, mais souvent quelques déficits sont observés dans les éléments considérés en excès dans le calcul de la norme (H, C, Si). Les excès et déficits sont donnés en *nombres de moles*. Les principales conditions qui peuvent conduire à des déficits ou excès en minéraux sont données ci-dessous.

- Déficit H
 - **Condition 1:** L'option de calcul du CO₂-H₂O est "normatif" et la perte au feu est analysée.
 - **Signification:** la roche ne contient pas assez d'eau pour former l'assemblage métamorphique calculé. Cela signifie que l'assemblage métamorphique réel de la roche est de plus haute température que celui calculé.
 - **Condition 2:** L'option de calcul du CO₂ est "analysé" ou "réseaux neuronaux" (voir section 5.3) et H₂O est analysé.
 - **Signification:** la roche ne contient pas assez d'eau pour former l'assemblage métamorphique calculé. Cela signifie que l'assemblage

métamorphique réel de la roche est de plus haute température que celui calculé.

- **Condition 3:** L'option de calcul du CO₂-H₂O est "normatif" et la perte au feu n'est **pas** analysée.
 - **Signification:** pas de valeur en H₂O dans l'analyse.
- **Condition 4:** L'option de calcul du CO₂ est "analysé" ou "réseaux neuronaux" (voir section 5.3) et H₂O n'est pas analysé.
 - **Signification:** pas de valeur en H₂O dans l'analyse.
- Excès H
 - **Condition 1:** H₂O est analysé et l'option de calcul du CO₂ est "analysé" ou "réseaux neuronaux" (voir section 5.3).
 - **Signification:** la roche est trop hydratée pour l'assemblage métamorphique calculé. Cela signifie probablement que le niveau métamorphique réel de la roche est plus faible que celui calculé.
- Déficit C
 - **Condition 1:** La roche se place dans un assemblage à calcite sur le diagramme ACMK.
 - **Signification:** la roche est très calcique et pas assez de CO₂ est présent dans l'analyse pour former assez de calcite. Soit le CO₂ n'est pas analysé ou impossible à calculer. Cela peut signifier aussi la présence de silicates de calcium comme la wollastonite.
- Excès C
 - **Condition 1:** Le CO₂ est présent ou calculé dans l'analyse (normatif).
 - **Signification:** un nombre insuffisant de cations comme Ca, Fe, Mg, ou Mn est présent pour le CO₂. Cela peut signifier la présence de sulfures de Cu, Zn, Ni en abondance dans le cas du CO₂ normatif.

5. OPTIONS DE CALCUL DE LA NORME LITHOMODELEUR

La norme LithoModeleur comporte différentes options de calcul qui dépendent du résultat désiré et des caractéristiques des données disponibles. Les options sont détaillées dans les paragraphes suivants.

5.1 Faciès métamorphiques

Trois faciès métamorphiques sont supportés dans LithoModeleur.

- Schiste vert moyen - environ 350C. Minéraux caractéristiques:
 - chlorite, séricite/paragonite, pyrophyllite, trémolite-actinote, talc, calcite, épidote, carbonates Ca-Fe-Mg.
- Schiste vert supérieur - environ 450C. Minéraux caractéristiques:
 - biotite, chloritoïde, chlorite, muscovite, andalousite, trémolite-actinote, talc, calcite, épidote, carbonates Ca-Fe-Mg.
- Amphibolite inférieur-moyen basse pression - environ 575C, 2,5kb. Minéraux caractéristiques:

- cordiérite, staurotide, almandin, grossulaire, anthophyllite, diopside, hornblende, anorthite, muscovite, calcite.

5.2 Calcul du fer Fe^{+2} et Fe^{+3}

Le degré d'oxydation du fer est un paramètre important dans le calcul de la norme. En effet, la présence de fer+3 permet la présence d'oxydes de fer comme la magnétite ou l'hématite aux dépens des silicates ferro-magnésiens (Spear, 1993). Les silicates ferromagnésiens deviennent alors moins abondants et plus magnésiens.

La norme LithoModeleur offre deux méthodes de traitement du fer.

1. Utiliser les valeurs originales en FeO (Fe^{+2}) et Fe_2O_3 (Fe^{+3}) telles qu'analysées. Dans la plupart des banques de données, ces analyses ne sont toutefois pas disponibles, étant donné qu'une analyse chimique assez coûteuse est nécessaire pour les mesurer dans les roches.
2. Fixer un ratio Fe_2O_3/Fe_2O_3T pour la banque entière et extraire les cations Fe^{2+} et Fe^{3+} en se basant sur ce ratio. Le ratio par défaut donné provient de l'examen d'une banque de données de compilation des partenaires du CONSOREM dans laquelle les quantités de FeO et Fe_2O_3 ont été déterminées analytiquement. Le ratio par défaut de 0,20 correspond au ratio moyen de différents types de roches volcaniques de l'Abitibi (basaltes à rhyolites).

5.3 Calcul du CO_2

Le CO_2 est également important dans le calcul de la norme des roches métamorphiques. LithoModeleur offre deux options de calcul du CO_2 pour tous les faciès métamorphiques, et une troisième option pour les roches au faciès schiste vert moyen (350C).

1. Utiliser la valeur originale en CO_2 ou en C telle qu'analysée.
2. Calculer un CO_2 normatif basé sur la perte au feu analysée, sur le gain au feu des minéraux non-silicatés, sur la quantité d'eau des minéraux métamorphiques et éventuellement sur le soufre analysé (voir section 5.3.1). Cette approche est calquée sur celle du calcul du CO_2 normatif de NORMAT (Piché et Jébrak, 2004).
3. Pour le schiste vert moyen seulement, calculer le CO_2 normatif par réseaux neuronaux de LithoModeleur (voir l'aide de LithoModeleur).

5.3.1 Calcul du CO_2 - H_2O normatif

Les CO_2 et H_2O normatifs peuvent être calculés en considérant la perte au feu disponible dans l'échantillon (PAF%), le soufre (S%), le gain au feu de l'échantillon (GAF%) et la quantité de H_2O nécessaire pour former les minéraux hydratés du faciès métamorphique traité. *Ce calcul nécessite donc la présence de la perte au feu dans l'échantillon.* Le soufre est pris directement dans l'analyse (considéré 0 si non fourni dans l'analyse) et le gain au feu est calculé à partir des minéraux ferrifères non-silicatés de l'échantillon. Le H_2O normatif est calculé à partir des minéraux hydratés formés dans le calcul de la norme. *Il faut noter qu'en utilisant cette option, le H_2O qui pourrait être éventuellement analysé est en fait ignoré.*

L'égalité suivante doit être atteinte pour obtenir la solution idéale (tous les % sont des poids %):

$$LOI\% = H_2O \text{ Normatif}\% + CO_2 \text{ Normatif}\% + S\% - GAF\%$$

Le calcul se fait de façon itérative. Un CO₂ normatif de 0 % est d'abord assigné. Au départ, le terme de gauche est inférieur à celui de droite. À chaque itération, on augmente le CO₂ normatif d'une petite quantité. Le calcul s'arrête lorsque le terme de gauche égale ou dépasse légèrement celui de droite. Cette évaluation du CO₂ normatif est fortement inspirée de NORMAT (Piché et Jébrak, 2004). L'algorithme de calcul du CO₂ normatif est donné à la **Figure 2**.

Conditions de fiabilité du CO₂ normatif

Les tests réalisés à la section 6 montrent que le CO₂ normatif calculé est généralement assez fidèle au CO₂ analysé. Cependant, certaines conditions doivent être rencontrées pour obtenir une évaluation juste du CO₂:

1. Le soufre doit être analysé OU les roches doivent être dépourvues en soufre;
2. Les roches doivent être réellement du même faciès métamorphique que celui calculé.

6. FACIES METAMORPHIQUES DE LA NORME LITHOMODELEUR

La norme LithoModeleur permet le calcul à différents faciès métamorphiques. Chaque faciès possède sa propre liste de minéraux et son propre tétraèdre métamorphique. Les sections suivantes présentent les minéraux, tétraèdres et autres calculs relatifs à chaque faciès, et font références aux différentes sources d'informations qui ont été consultées pour les réaliser.

Différentes grilles pétrogénétiques (**Figures 5 à 7**) et diagrammes de phase provenant de Spear (1993) ont été utilisés pour contraindre les conditions et assemblages métamorphiques utilisées dans le calcul des différentes normes. Sur les grilles, des symboles ont été ajoutés pour représenter les conditions métamorphiques correspondant aux différents faciès calculés par la norme LithoModeleur. Les différents diagrammes ternaires qui seront présentés pour chaque faciès représentent des conditions P, T extraites de ces grilles pétrogénétiques.

LithoModeleur inclut également un module de calcul des assemblages métamorphiques basés sur les équilibres thermodynamiques nommé THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Ce module a également été utilisé pour réaliser certains diagrammes difficiles à trouver dans la littérature.

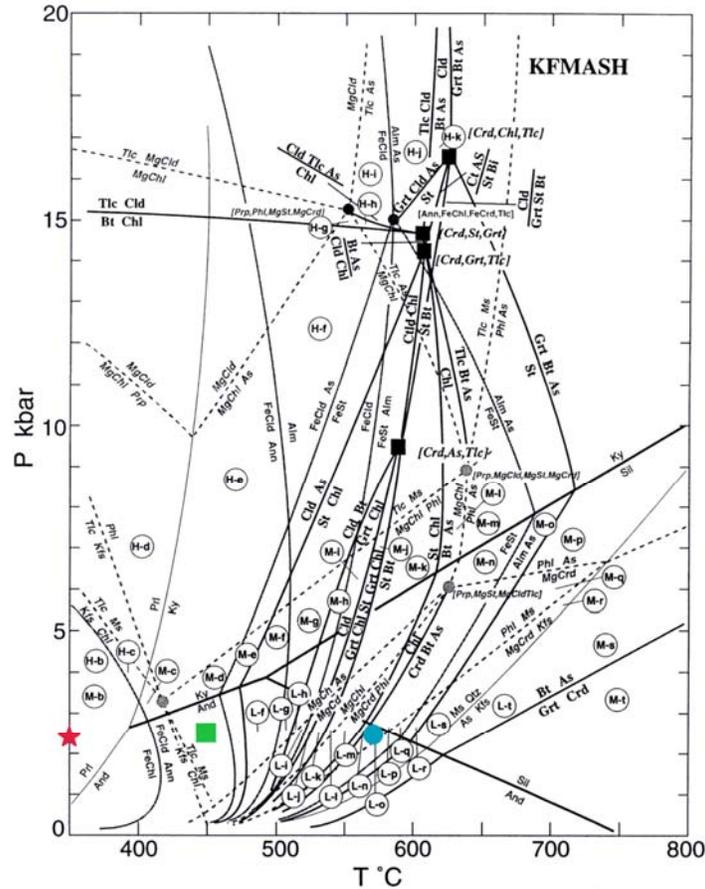


Figure 10-5. P-T grid for pelites in the KFMASH system. KFMASH and KMASH reactions are in solid and dashed gray lines, respectively. Lettered circles refer to phase diagrams depicted in Figures 10-6, 10-10 and 10-12. The prefixes "H", "M" and "L" refers to high, medium and low pressure, respectively. After Spear and Cheney (1989).

Figure 5. Grille pétrogénétique KFMASH (tirée de Spear, 1993). Étoile rouge: schiste vert moyen 350C. Carré vert: schiste vert supérieur 450C. Cercle bleu: amphibolite moyen-supérieur, 575C.

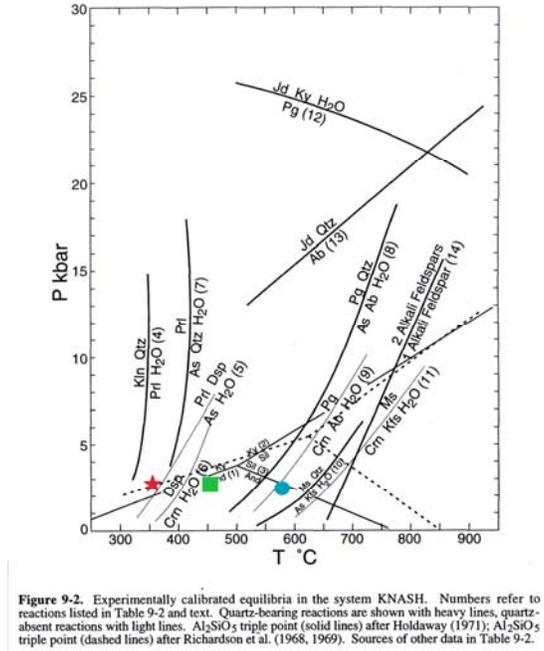


Figure 6. Grille pétrogénétique KNASH (tirée de Spear, 1993). Voir Figure 5 pour la légende des symboles de couleur.

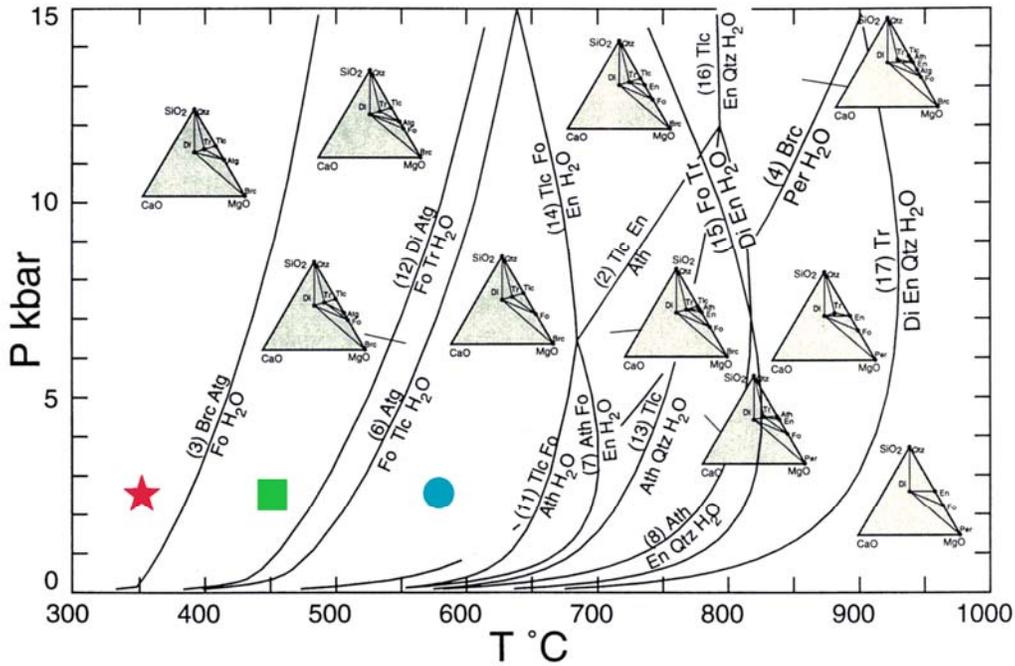


Figure 7. Grille pétrogénétique SMCH (tirée de Spear, 1993). Voir Figure 5 pour la légende des symboles de couleur.

7. NORME SCHISTE VERT MOYEN 350C

Le faciès identifié ici comme schiste vert moyen correspond à une température d'environ 350 degrés Celsius. La pression est évaluée à environ 2,5 kb (étoile rouge sur grilles pétrogénétiques des **Figures 5 à 7**).

7.1 Sulfures/sulfates

Les sulfures sont formés à partir du soufre disponible, dans l'ordre suivant: galène, sphalérite, millérite, molybdénite, chalcopryrite, arsénopyrite, pyrite, anhydrite.

7.2 Carbonates

Les carbonates sont formés dans le même ordre que **NORMAT** (Piché et Jébrak, 2004) à partir de C. La calcite est d'abord créée, puis la magnésite et la sidérite sont formées simultanément. La calcite est ensuite régie simultanément avec magnésite et sidérite pour former dolomite-ankérite. Ceci signifie que calcite et magnésite/sidérite sont mutuellement exclusives. Le diagramme T-XCO₂ (**Figure 8**; **Figure 9**) indique que dolomite et calcite sont stables à cette température.

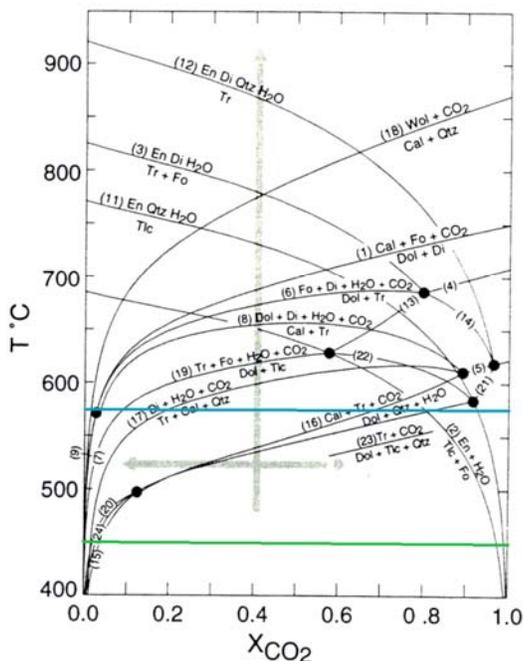


Figure 12-3. A T-XCO₂ diagram for the system SiO₂-CaO-MgO-H₂O-CO₂ and the phases shown in Figure 12-2 computed from the thermodynamic database of Berman (1988) and the PTX computer program of Perkins et al. (1986). P_{fluid} = 5 kbar. Activity of calcite is assumed to be 1.0. Grey arrows show two hypothetical T-X paths (heating at constant fluid composition and fluid infiltration at constant temperature). Phase diagrams encountered along these paths are illustrated in Figures 12-5 and 12-6, respectively.

Figure 8. Diagramme TX-CO₂ pour le système SCMHC. Ligne verte: 450C, Ligne bleue: 575C. Le schiste vert moyen se trouve hors du diagramme (en bas). Tiré de Spear, 1993.

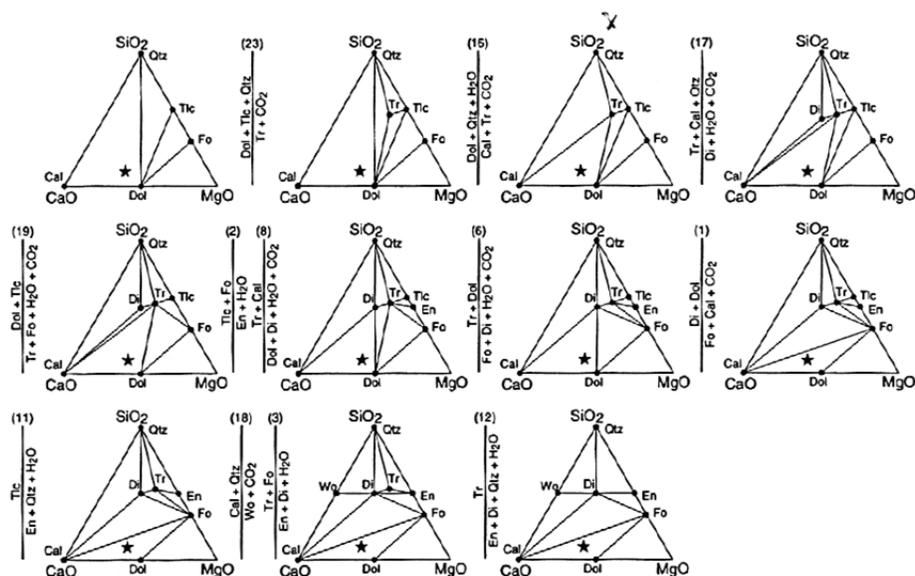


Figure 12-5. A sequence of phase diagrams for the system $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-H}_2\text{O-CO}_2$ showing the evolution of phase diagram topologies for a rock path of heating at constant fluid composition (see Fig. 12-3). The star represents the bulk composition discussed in the text.

Figure 9. Diagrammes de phase pour le système $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-H}_2\text{O-CO}_2$. Tiré de Spear (1993).

7.3 Oxydes de fer et titane

La stabilité des oxydes de fer et de titane durant le métamorphisme est un sujet complexe. En effet, la stabilité des différentes phases dépend à la fois du degré d'oxydation du fer dans la roche, de la quantité de titane et de fer présents et du ratio Fe/Mg molaire de la roche (Spear, 1993). De plus, Fe^{+3} et Ti peuvent être présents en substitution dans plusieurs silicates comme la biotite, la chlorite et l'épidote.

Spear (1993) fournit une règle générale assez simple qui permet de prédire les assemblages d'oxydes présents. En général, pour un #Mg supérieur à 0,45, ce sont le rutile et l'hématite qui dominent. Pour un ratio inférieur, on trouve préférentiellement ilménite et magnétite. La titanite est également un minéral qui peut être stable au faciès schiste vert, si le calcium est disponible dans la roche.

Dans LithoModeleur, la séquence de formation des oxydes est donc la suivante:

- Si $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) < 0,45$ alors
 - Ilménite, puis magnétite, puis titanite, puis rutile, puis hématite.
- Si $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) > 0,45$ alors
 - Titanite, puis rutile, puis hématite.
- Note: $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+})$ est calculé sur les moles présentes après la formation des sulfures et carbonates.

Note: dans le cas où $\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}^{2+}) < 0,45$, on doit former rutile et hématite tout de même pour s'assurer d'épuiser tout Ti ou Fe^{+3} qui serait résiduel après la formation de la magnétite et de l'ilménite.

7.4 Tétrahédre ACMK et assemblages métamorphiques

Plusieurs diagrammes sont utilisés pour former le tétrahédre ACMK et les réactions du faciès schiste vert moyen.

7.4.1 Diagramme ACM

Le diagramme ACM provient de Spear (1993) (**Figure 10**). Sur ce diagramme, le pôle M (Fe+Mg) est occupé par la cummingtonite. Sur les diagrammes AKM et SCM, c'est plutôt le talc qui occupe le pôle magnésien. Par analogie avec ces deux autres diagrammes, le talc sera donc choisi ici pour représenter l'aspect magnésien du pôle M du ACM. La grunérite (cummingtonite ferrière) sera conservée comme son équivalent ferrière.

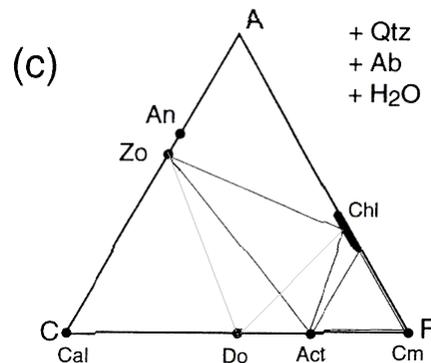


Figure 10. Diagramme ACM pour le faciès schiste vert moyen-supérieur (tiré de Spear, 1993).

Ce diagramme ACM représente en fait deux conditions: quantité de CO₂ faible (lignes noires) et quantité de CO₂ plus élevée (lignes grises). Avec un CO₂ élevé, la dolomite est présente alors que dans le cas où il y a peu de CO₂, c'est l'actinote qui est stable. Dans la norme LithoModeleur les carbonates et donc le CO₂ sont calculés avant la détermination de l'assemblage sur le tétrahédre. Au moment de calculer le tétrahédre, on peut ainsi se considérer en situation sans CO₂; c'est alors l'actinote qui est stable.

7.4.2 Diagrammes AKF, AKM, AFM projeté de muscovite

Le diagramme AKM (**Figure 11**) de ce faciès est relativement simple puisqu'il contient seulement 5 minéraux. Notez que le pôle magnésien est le talc (Tlc) et que le pôle Al est la pyrophyllite (Prl). Pour des compositions très ferrifères et pauvres en aluminium, on constate que le diagramme AKF montre l'apparition de la biotite ferrifère (Ann). On ne peut savoir à quel ratio Mg/(Mg+Fe) la biotite apparaît dans ce faciès car elle n'apparaît pas sur le diagramme AFM (incompatible avec muscovite (Ms)). Étant donné ceci, et comme la biotite est en fait relativement rare au faciès schiste vert moyen, elle sera omise de ce faciès pour simplifier les calculs (NORMAT omet également la biotite de ses calculs). Le diagramme AFM montre également que la chlorite permet une substitution totale entre Fe et Mg.

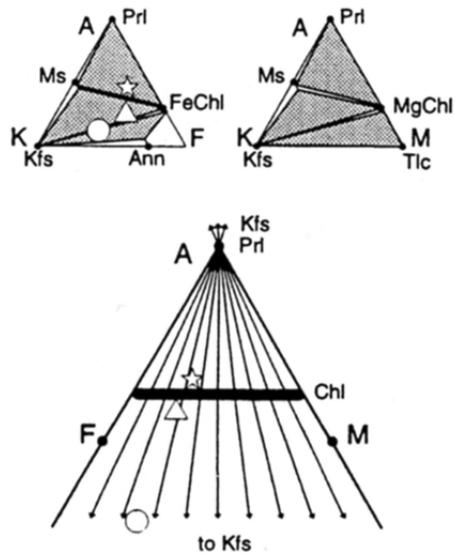


Figure 11. Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).

7.4.3 Diagramme ANK

Le diagramme ANK (**Figure 12**) permet de constater que la paragonite, la muscovite, l'albite et le feldspath potassique sont tous présents à ce faciès. Il y a cependant une substitution partielle seulement entre albite-feldspath K et paragonite-muscovite. Également, en réalité, seulement trois des quatre phases sont présentes à une composition donnée, puisque paragonite est incompatible avec feldspath potassique sur ce diagramme. Donc, pour mieux représenter les assemblages, on fera la réaction Paragonite + Feldspath K --> Albite + Séricite après avoir calculé les minéraux du tétraèdre ACMK. On peut noter finalement que la grille pétrogénétique KNASH (**Figure 6**) donne la pyrophyllite (Prl) comme minéral d'aluminium à 350C et 2,5 kb.

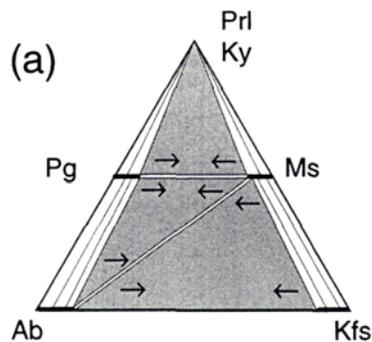


Figure 12. Diagramme ANK pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).

7.4.4 Diagramme AKC

Ce diagramme n'apparaît pas dans la littérature, mais il est nécessaire pour compléter le tétraèdre. Pour générer ce diagramme, le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010) a été utilisé. La banque de données thermodynamiques JUN92.BS a été modifiée pour n'inclure

sur l'arête Ca-Al que la zoïsite, pour correspondre au diagramme ACM précédemment utilisé. H₂O et SiO₂ ont été considérés en excès. La **Figure 13** montre le diagramme AKC résultant.

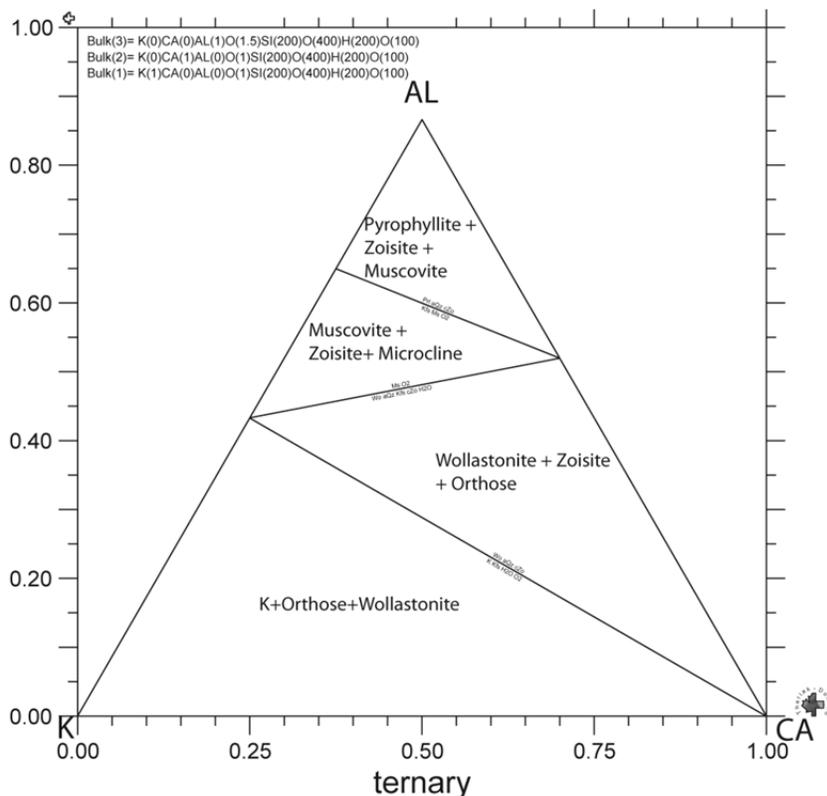


Figure 13. Diagramme AKC (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès schiste vert moyen 350C, 2 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.

7.4.5 Pôle K-Na et compositions peralcalines

Les diagrammes métamorphiques incluant K ou Na présentés précédemment se limitent à des compositions qui sont caractérisées par un ratio $(K+Na)/Al < 1$, qui représente l'essentiel des compositions rencontrées dans des roches métamorphiques typiques. Il existe très peu d'information sur les assemblages métamorphiques présents pour des compositions peralcalines ($(K+Na)/Al > 1$), qui occupent la partie arrière du tétraèdre ACMK. Le pôle K-Na est représenté ici par les sels halite-sylvite, qui pourront être accompagnés de talc, calcite et orthose-albite. Ces compositions peuvent survenir dans le cas de roches ultra-alcalines ou d'altérations ajoutant beaucoup de K et Na à la roche.

7.4.6 Tétrahèdre ACMK

Le tétraèdre ACMK est une combinaison des diagrammes ACF, AKC, et AKM principalement (**Figure 14**). Le tétraèdre comporte 6 assemblages:

1. Pyrophyllite-Chlorite-Épidote-Séricite;
2. Chlorite-Épidote-Orthose-Séricite;

3. Trémolite-Chlorite-Épidote-Orthose;
4. Talc-Chlorite-Orthose-Trémolite;
5. Calcite-Trémolite-Épidote-Orthose;
6. Sylvite-Calcite-Orthose-Talc.

Il faut noter que certains minéraux des assemblages précédents comportent deux pôles, qui sont formés selon le #Mg et le #K:

- Chlorite: Chlorite (Mg) et Chlorite (Fe);
- Orthose: Orthose (K) et Albite (Na);
- Trémolite: Trémolite (Mg) et Ferroactinote (Fe);
- Séricite: Séricite (K) et Paragonite (K);
- Sylvite: Sylvite (K) et Halite (Na);
- Talc: Talc (Mg) et Grunérite (Fe).

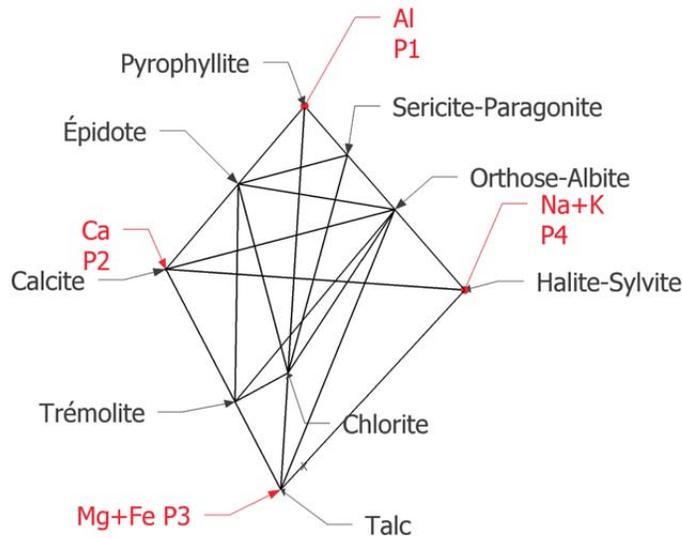
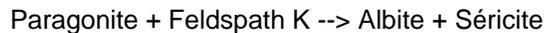


Figure 14. Tétrahédre ACMK pour le faciès schiste vert moyen 350C.

7.5 Modification de l'assemblage pour #Mg, K-Na

Modification de l'assemblage pour K-Na

Le diagramme ANK pour le faciès schiste vert moyen (**Figure 12**) montre une incompatibilité entre paragonite et feldspath potassique. Cette étape vise donc à représenter cette incompatibilité par la réaction suivante:



7.6 Traitement du déficit en SiO₂

Décomposition du talc

Le diagramme SiO₂-CaO-MgO-H₂O illustre les réactions qui permettront de combler le déficit en SiO₂ dans le cas des roches ultramafiques (**Figure 15**). Le talc (Tlc) est la phase qui se retrouve

sur le pôle Mg+Fe du tétraèdre ACMK. La trémolite (Tr) est également présente sur le tétraèdre ACMK. Si on a un déficit en SiO₂, la serpentine (ici antigorite, Atg) est la première phase créée. Si le déficit en silice demeure après toute la destruction du talc, on peut finalement former la brucite (MgO) en décomposant la serpentine.

La réaction de décomposition du talc en serpentine est la suivante:



La quantité exacte de talc est décomposée pour combler le déficit en SiO₂. La serpentine est ainsi incompatible avec le quartz. Si, après toute la décomposition du talc en serpentine, on a encore un déficit en SiO₂, on peut décomposer la serpentine en brucite selon la réaction:

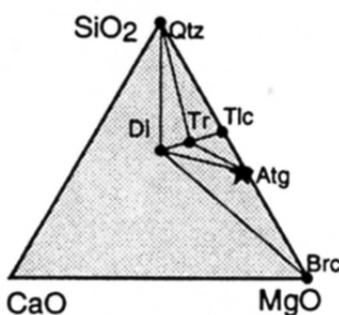
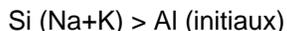


Figure 15. Diagramme SiO₂-CaO-MgO-H₂O pour le faciès schiste vert moyen (tiré de Spear, 1993).

Décomposition de l'orthose et de l'albite

Pour combler le déficit en Si, on peut également décomposer l'orthose et l'albite en leucite et néphéline. Ces minéraux apparaissent normalement dans des compositions plutôt alcalines. Pour cette raison, on ne décompose albite et orthose que si la composition initiale de la roche est peralcaline, c.-à-d. si (Na+K) > Al. On ne décompose que la quantité nécessaire de feldspath pour régler le déficit, en commençant d'abord par détruire l'albite, puis, si le déficit en Si n'est pas comblé, en détruisant l'orthose (comme par la norme CIPW). Néphéline et Leucite seront donc incompatibles avec le quartz.



Décomposition de la pyrophyllite en diaspore

On peut également décomposer la pyrophyllite en diaspore pour combler le déficit en Si. La réaction est la suivante:



7.7 Liste complète des minéraux du faciès

Les minéraux qui se retrouvent dans ce faciès sont donc les suivants:

- Minéraux accessoires: chromite, apatite, sphène;
- Sulfures: pyrite, chalcopryrite, sphalérite galène, millérite, arsénopyrite;
- Carbonates: calcite, dolomite, ankérite, sidérite, magnésite;
- Oxydes Fe-Ti: hématite, magnétite, rutile, ilménite;
- Minéraux du diagramme ACMK: pyrophyllite, chloriteMg, chloriteFe, talc, grunérite, trémolite, ferroactinote, calcite, épidote, feldspath-K, albite, muscovite, paragonite, halite, sylvite;
- Autres minéraux: quartz, serpentine, brucite, néphéline, leucite, diaspore.

7.8 Règles pétrogénétiques

Les différents diagrammes présentés ainsi que les différentes règles énoncées permettent de dresser une liste des incompatibilités en minéraux de la norme schiste vert moyen 350C:

- Pyrophyllite < > Trémolite/Actinote, Talc / Grunérite, Orthose / Albite, Sylvite / Halite;
- Séricite / Paragonite < > Sylvite / Halite, Talc / Grunérite, Trémolite / Actinote;
- Chlorite MgFe < > Sylvite / Halite;
- Epidote < > Talc / Grunérite, Sylvite / Halite;
- Talc / Grunérite < > Pyrophyllite, Épidote, Séricite / Paragonite, Brucite;
- Quartz < > Néphéline, Leucite, Diaspore, Serpentine, Brucite;
- Paragonite < > Feldspath K.

7.9 Indices d'altération

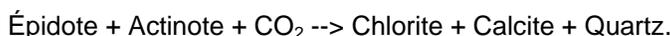
Différents indices d'altération peuvent être développés à partir des minéraux normatifs. Le principe de tous les indices est de calculer la somme de certains minéraux d'altération au numérateur et de diviser par la somme de minéraux potentiellement détruits lors du processus d'altération et des minéraux d'altération. Les indices sont donc du format:

$$\text{Minéraux Altération} / (\text{Minéraux Frais} + \text{Minéraux Altération})$$

Les indices ont des valeurs variant de 0 jusqu'à 100. Ces indices sont regroupés en différentes catégories.

Influence de la carbonatation sur les phyllosilicates normatifs

Avant de présenter les indices d'altération qui ont été développés, il importe de discuter de l'effet de la carbonatation sur les phyllosilicates normatifs. Il est connu que la carbonatation d'une roche s'accompagne de la création de chlorite et/ou de séricite mais sans ajout nécessaire de cations autres que C ou H. Ces réactions ont été bien étudiées notamment par Kishida et Kerrich (1987) (**Figure 16**). Une des réactions les plus importantes dans les roches mafiques et intermédiaires peut être résumée par :



Il s'agit donc d'une réaction qui produit de la chlorite, mais sans ajout de Fe ou Mg à la roche. La réaction suivante est une deuxième réaction de carbonatation, plus intense, qui produit cette fois de la muscovite en détruisant la chlorite formée par la première:



Kerrich et Kishida supposent un ajout de K, mais on peut penser que cet ajout n'est pas nécessaire si la roche est au départ déjà un peu potassique (par exemple plus felsique). Il s'agit donc potentiellement d'une séricitisation sans ajout de cations autre que C. De même, le talc peut être produit à partir de la trémolite.

TABLE 5. Simplified Reactions of Fluid-Rock Interaction at the Kerr-Addison Mine

Stage of alteration rock type	Reaction
Initial stage	
Ultramafic rocks	(1) $3 \text{ tremolite} + 6\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 5 \text{ talc} + 6 \text{ calcite} + 4 \text{ quartz}$ (2) $2 \text{ serpentine} + 3\text{CO}_2 \rightarrow \text{talc} + 3 \text{ magnesite} + 3\text{H}_2\text{O}$ (3) $\text{talc} + 3 \text{ calcite} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3 \text{ dolomite} + 1 \text{ quartz} + \text{H}_2\text{O}$ (4) $\text{talc} + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3 \text{ magnesite} + 4 \text{ quartz} + \text{H}_2\text{O}$
Mafic rocks	(5) $2 \text{ clinozoisite} + 3 \text{ actinolite} + 10\text{CO}_2 + 8\text{H}_2\text{O} \rightarrow 3 \text{ chlorite} + 3 \text{ calcite} + 10 \text{ quartz}$ (6) $\text{albite} + \text{chlorite} + 5 \text{ calcite} + 5\text{CO}_2 + \text{K}^+ \rightarrow \text{muscovite} + 5 \text{ ankerite} + 3 \text{ quartz} + 3\text{H}_2\text{O} + \text{Na}^+$
Advanced stage	
Ultramafic and mafic rocks	(7) $3 \text{ chlorite} + 15 \text{ calcite} + 15\text{CO}_2 + 2\text{K}^+ \rightarrow 15 \text{ ankerite} + 2 \text{ muscovite} + 3 \text{ quartz} + 9\text{H}_2\text{O} + 2\text{H}^+$ (8) $\text{muscovite} + 6 \text{ quartz} + 3\text{Na}^+ \rightarrow 3 \text{ albite} + \text{K}^+ + 2\text{H}^+$

Figure 16. Réactions de carbonatation à la mine Kerr Addison, Ontario. Tiré de Kishida et Kerrich, 1987.

Dans la norme LithoModeleur, la formation de chlorite et/ou séricite durant la carbonatation apparaît très clairement. Des données de Le Maitre (1976) ont été utilisées pour montrer l'effet d'une carbonatation progressive sur des lithologies typiques (gabbro, tonalite). On a effectué un ajout progressif de CO₂ sur ces moyennes et calculé la norme à chaque étape (0, 2.5, 5, 10 et 20 % ajouts en CO₂). La **Figure 17** montre la chlorite et séricite normatives produites à chaque étape de carbonatation pour chaque roche. Le cas de la carbonatation du gabbro est particulièrement intéressant et reproduit de façon très évidente les réactions de Kerrich et Kishida. De 0 à 5 % de CO₂, le gabbro se chloritise graduellement lors de la formation de la calcite (réaction 5 de la **Figure 16**). Puis, de 10 à 20 % de CO₂, la chlorite se détruit graduellement au profit de la séricite et des carbonates contenant Fe et Mg. Dans le cas des tonalites, la chloritisation est moins intense mais visible et la roche est saturée en CO₂ à environ 10 % CO₂.

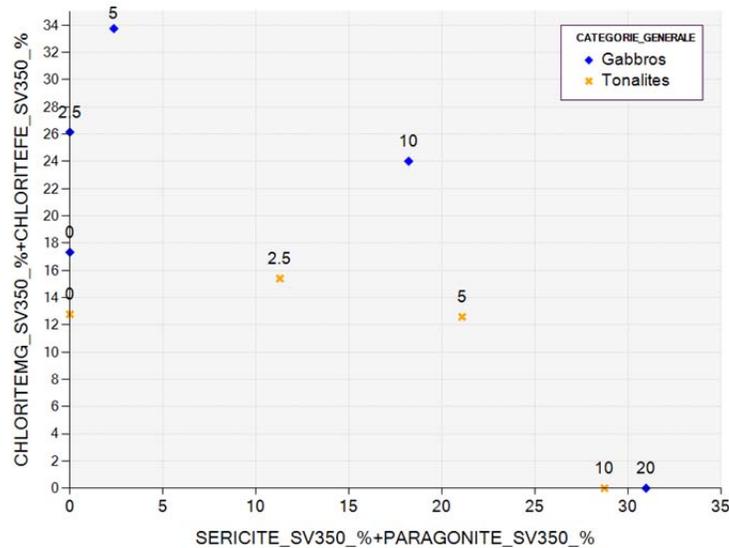


Figure 17. Chlorite et séricite normatives 350C pour des lithologies moyennes de Le Maitre (1976), progressivement carbonatées. L'étiquette de chaque point donne le % de CO₂ ajouté à chaque moyenne.

La chlorite et séricite normatives suivent donc de façon fidèle le comportement attendu lors de la carbonatation. Toutefois, dans plusieurs types de gisements, notamment les gisements volcanogènes de type Noranda, de l'altération en chlorite ou séricite est présente sans carbonatation. Cette chloritisation et séricitisation sont causées par des processus différents tel que la destruction de l'orthose et l'albite primaire, et l'ajout de fer-magnésium par les fluides hydrothermaux.

Pour distinguer la séricite, chlorite, paragonite causées par la carbonatation des autres mécanismes possibles, on peut simplement calculer ces minéraux sous deux conditions: d'abord **en calculant la norme sans CO₂** et ensuite **normalement, avec le CO₂**. La première série de chlorite, séricite, paragonite est dite "SANSCO₂".

Indices d'altération en phyllosilicates, sans CO₂

Une première série d'indices d'altération traite de l'altération en phyllosilicates des roches. **Ces indices sont calculés en calculant la norme SANS CO₂**. Ils s'appliquent particulièrement au cas de chloritisation et de séricitisation causés par d'autres processus que la carbonatation, **par exemple dans les VMS de type Noranda**. Comme il sera démontré dans les sections suivantes, ces indices ressemblent beaucoup aux indices calculés par NORMAT :

- ALT_CHLO_SV350: $(\text{ChloriteMg} * 0,75 + \text{ChloriteFe}) / (\text{Tous})$ (voir définition de « Tous » plus bas);
Note: coefficient de 0,75 pour chlorite Mg pour diminuer l'indice de chloritisation dans le cas de roches très magnésiennes non-altérées.
- ALT_SER_SV350: Séricite / (Tous);
- ALT_PARA_SV350: Paragonite / (Tous);
- ALT_PYRO_SV350: Pyrophyllite / (Tous);

- ALT_PHYLLO_SV350: (Chlorite Mg*0,75 + Chlorite Fe + Séricite + Paragonite + Pyrophyllite) / (*Tous*);
Note: cet indice est similaire à l'indice IFRAIS de NORMAT mais inversé.

« *Tous* » se définit comme la somme de tous les minéraux sauf le quartz et les sulfures.
Notez que la chlorite-Mg est multipliée également par 0,75 dans cette somme.

Indices d'altération en carbonates-phyllosilicates

Ces indices d'altération sont particulièrement utiles dans le cas de carbonatation. Ils sont basés sur les réactions de carbonatation présentées par Kerrich et Kishida (1987) et du résumé de Robert (1995) pour l'altération autour des filons de quartz-carbonates. Les minéraux frais ici sont limités aux silicates de Ca-Mg-Fe qui sont les plus affectés par la carbonatation. **Ici, les phyllosilicates sont calculés avec le CO₂ inclus dans la norme.**

- ALT_CHLO_CC_TLC_SV350: (Calcite + ChloriteMg + ChloriteFe + Talc) / (*Tous Ca-Mg-Fe*)
 - Altération *distale*, la moins intense, en contexte de veines de quartz-carbonates.
- ALT_SER_CARBS_SV350: (Séricite + Ankerite + Dolomite + Magnésite + Sidérite) / (*Tous Ca-Mg-Fe + Orthose + Séricite*)
 - Altération *proximale*, la plus intense, en contexte de veines de quartz-carbonates.
- ALT_CARBS_SV350: (Calcite + Ankerite + Dolomite + Magnésite + Sidérite) / (*Tous Ca-Mg-Fe*)
 - Note: cet indice est similaire à l'indice IPAF de NORMAT.
- *Tous Ca-Mg-Fe*: tous minéraux contenant Fe, Mg ou Ca, sauf sulfures.

7.10 Comportement des indices pour lithologies non-altérées et seuils

Différents échantillons de la banque de référence incluse dans LithoModeleur ont été traités par la norme schiste vert 350C pour tester la variation des valeurs des indices pour des lithologies fraîches. Les échantillons choisis sont ceux de Le Maitre (1976) et Condie (1993). Les **Figures 18, 19 et 20** montrent les indices ALT_PHYLLO, ALT_SER et ALT_CHLO pour ces échantillons. Les valeurs de ALT_PHYLLO des différentes lithologies se chevauchent, ce qui signifie que cet indice ne montre pas une grande dépendance aux lithologies. Pour l'indice ALT_CHLO, on constate des valeurs qui sont plus élevées pour des basaltes-andésites frais que pour des lithologies plus felsiques et qui varient de 17 (basaltes-andésites) à 5 (granites). À l'inverse, l'indice ALT_SER montre des valeurs de 0 pour les basaltes-andésites. Les indices ALT_PARA et ALT_PYRO ont des valeurs de 0 pour toutes les lithologies moyennes (graphiques non montrés ici).

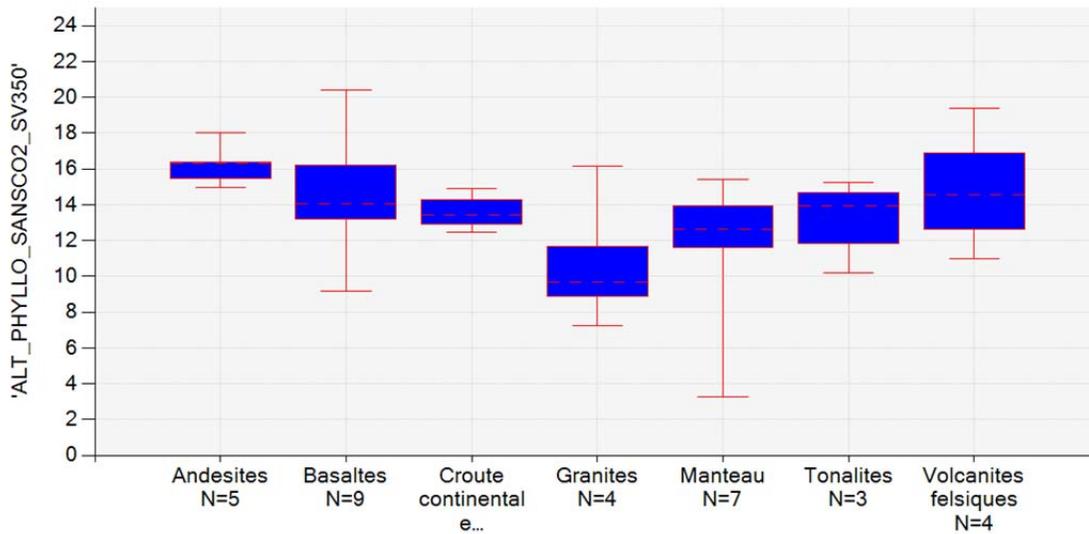


Figure 18. Indice ALT_PHYLLO 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.

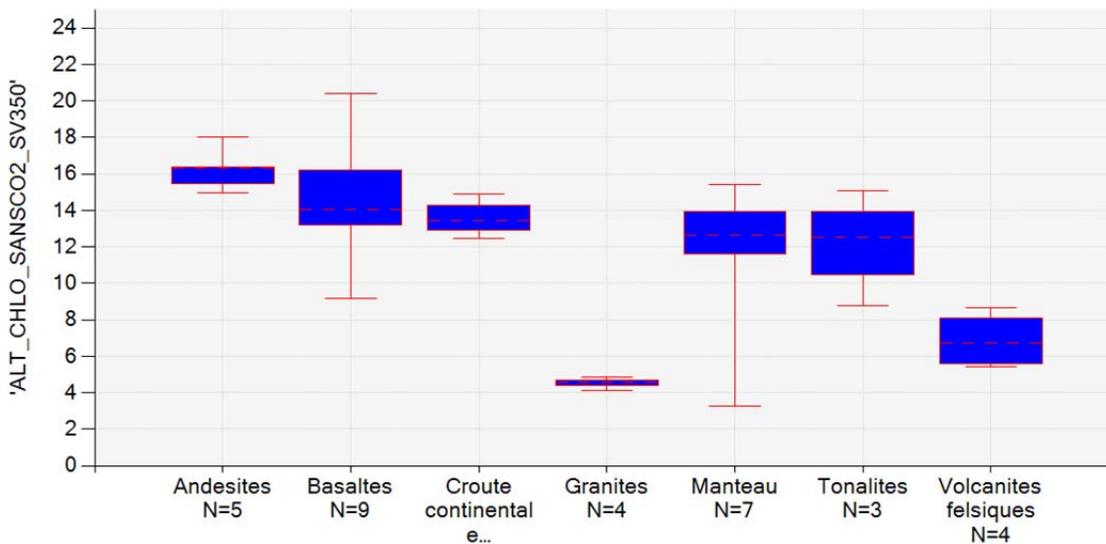


Figure 19. Indice ALT_CHLO 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.

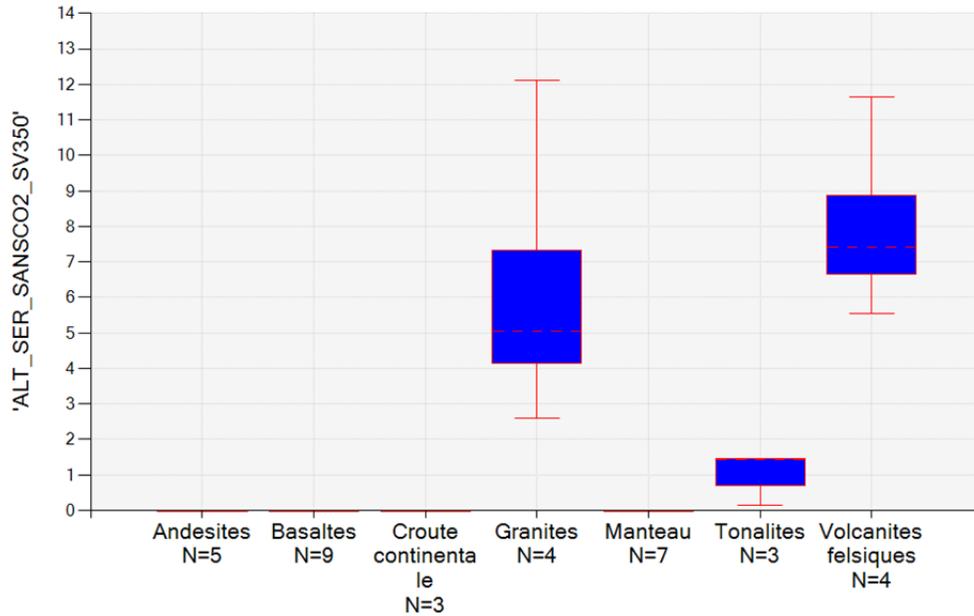


Figure 20. Indice ALT_SER 350C pour différentes lithologies moyennes de la banque de référence de LithoModeleur.

La banque de données de volcanites récentes de contextes subaériens du projet 2008-07 a également été traitée. Ces volcanites montrent très peu d'altération et peuvent également servir à voir le comportement des indices pour des lithologies peu altérées. Les **Figures 21, 22 et 23** montrent les valeurs des indices pour cette banque. Pour ces données, on peut constater que l'indice ALT_PHYLLO et ALT_CHLO varient de 0 à 24, et ALT_SER de 0 à 5. L'indice ALT_PHYLLO montre sur cette banque des valeurs plus basses pour les rhyolites que les autres lithologies.

Donc, l'indice ALT_PHYLLO est relativement indépendant des lithologies. Par contre, les indices ALT_SER et ALT_CHLO ne le sont pas. De façon prévisible, ces deux derniers indices sont plus influencés par les lithologies.

Pour l'indice ALT_PHYLLO, les valeurs des lithologies fraîches varient entre 0 et 25 environ. Donc pour ces indices, on peut dire qu'un seuil d'environ 25 est relativement sûr pour indiquer le début d'une altération, peu importe la lithologie. Pour l'indice ALT_CHLO, le seuil devrait dépendre en fait des lithologies, mais des valeurs supérieures à 25 indiquent une altération. De même, pour l'indice ALT_SER, un indice supérieur à 12 indique une altération peu importe la lithologie. Les indices ALT_PARA et ALT_PYRO indiquent une altération dès que la valeur est différente de 0.

Un champ texte qualifie l'altération selon ces seuils. Ces seuils sont les suivants:

- ALT_CHLO:
 - 0 - 25: <rien>
 - >25: chl
- ALT_SER
 - 0 - 12: <rien>
 - >12: ser
- ALT_PYRO
 - 0: <rien>
 - >0: pyro

- ALT_PARA
 - 0 - 1: <rien>
 - >1: para

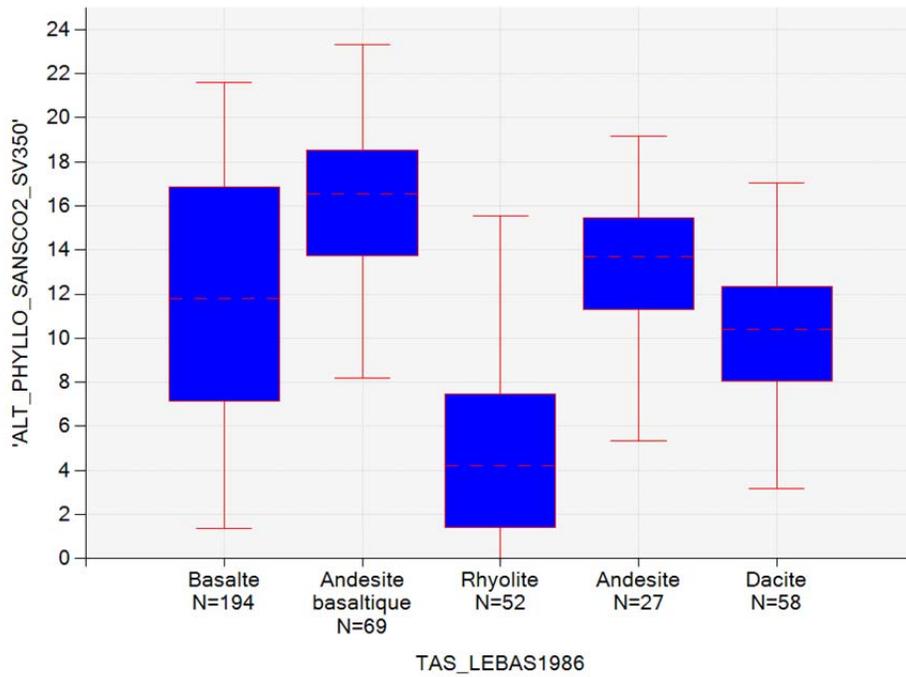


Figure 21. Indice ALT_PHYLLO 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.

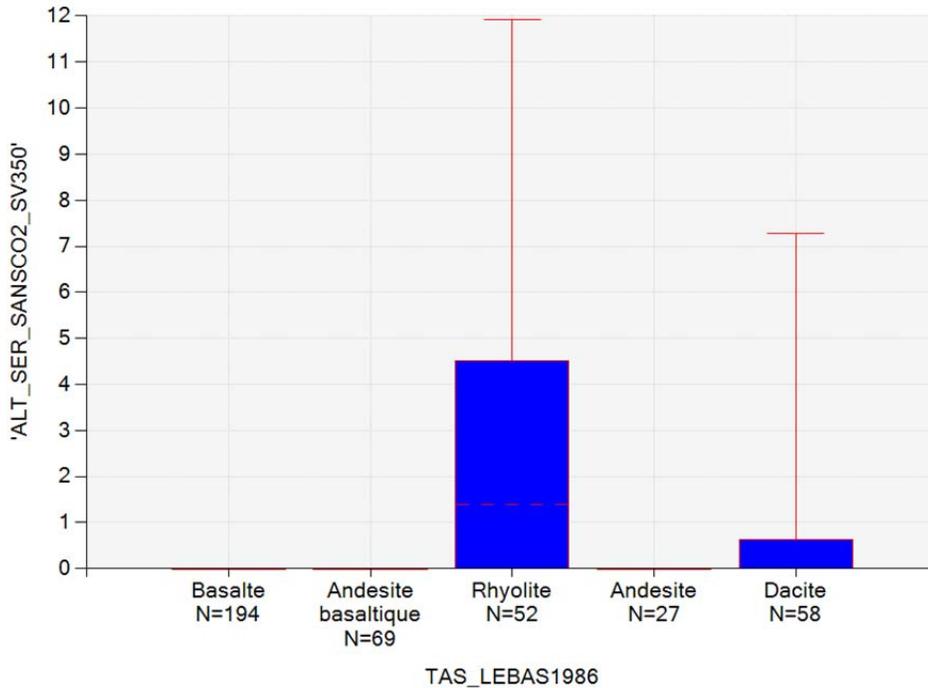


Figure 22. Indice ALT_SER 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.

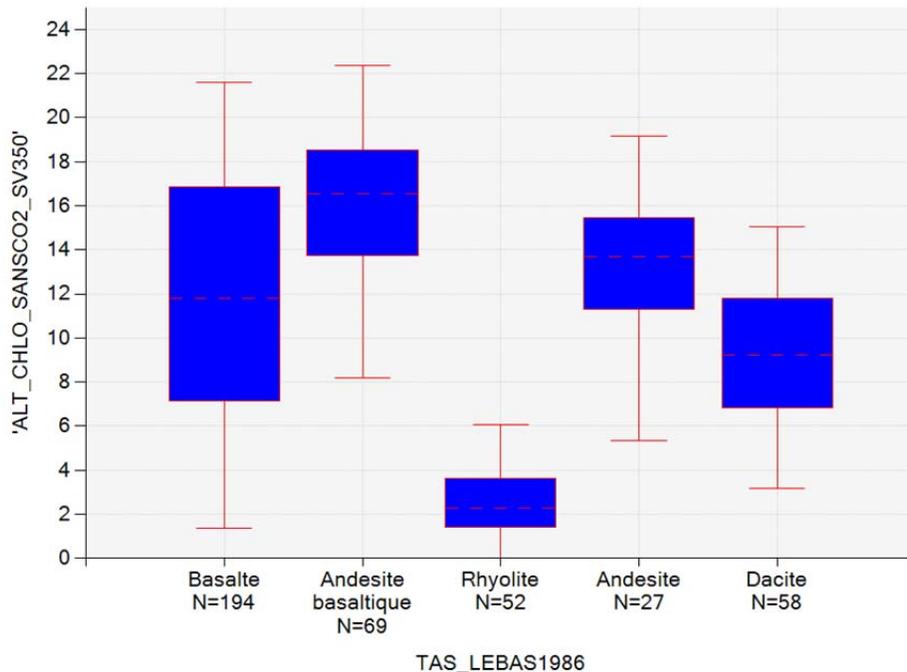


Figure 23. Indice ALT_CHLO 350C pour différentes lithologies peu altérées tirées du projet 2008-07.

7.11 Comparaisons entre minéralogie normative et minéralogie observée

La question de la correspondance entre la minéralogie normative et la minéralogie réelle est examinée dans cette section. Trois types de données minéralogiques ont été utilisés ici. Elles sont classées en ordre décroissant de précision:

1. Minéralogie quantitative, mesurée par diffraction-X. C'est l'analyse minéralogique la plus précise;
2. Minéralogie semi-quantitative, estimée par lames minces;
3. Assemblages de minéraux majeurs rapportés (qualitatif).

7.11.1 Altération de basaltes andésitiques, gabbros, volcanites felsiques en contexte VMS, ceinture de Flin-Flon, Manitoba

Le secteur de Bear Lake dans la ceinture de Flin Flon au Manitoba est une succession volcanique bimodale dominée par des basaltes andésitiques, qui contient des SMV (Galley, 2009). On trouve également des dacites et rhyolites dans les données analysées.

Cet exemple a été choisi en raison du couplage de 81 analyses lithogéochimiques avec des données de diffraction au rayon X qui donnent une minéralogie quantitative. La majorité de ces analyses sont des basaltes, andésites et gabbros variablement altérés, mais on trouve aussi des dacites, rhyolites et intrusions intermédiaires. La norme 350C a été calculée sur ces données, avec le CO₂ normatif et un ratio Fe₂O₃/Fe₂O_{3T} de 0,20.

Les **Figures 24 à 29** comparent la chlorite, l'épidote, l'albite, le quartz, les amphiboles et la séricite analysées par diffraction X et calculés par la norme. Dans l'ensemble, la minéralogie normative correspond très bien avec la minéralogie par diffraction-X.

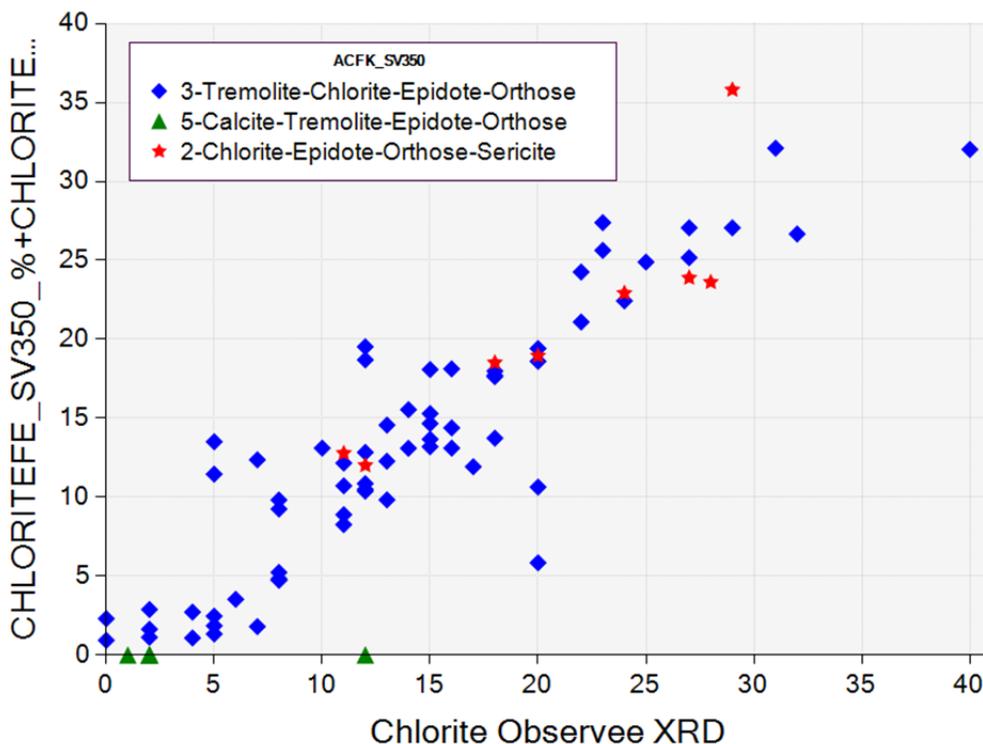


Figure 24. Chlorite mesurée par diffraction X vs chlorite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

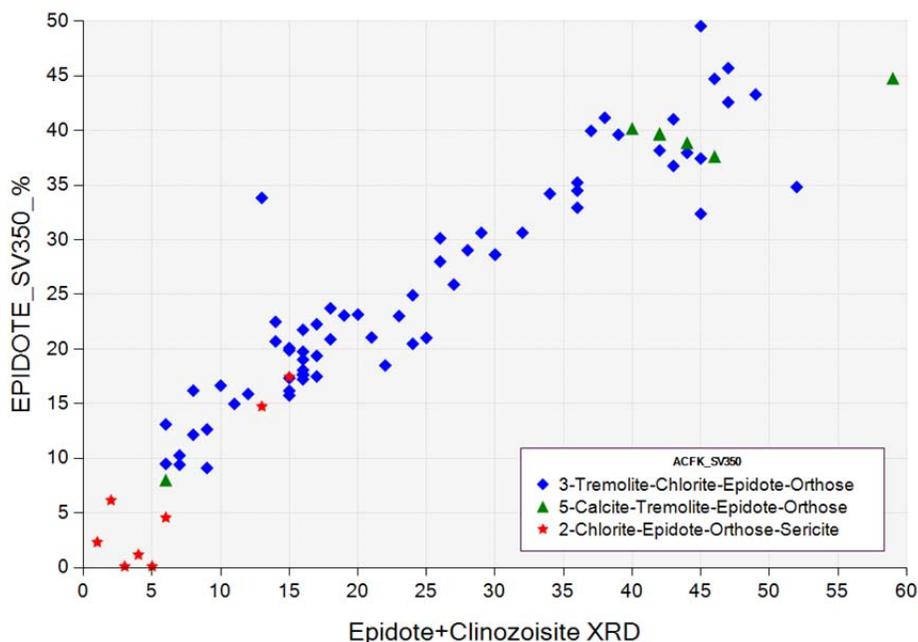


Figure 25. Épidote mesurée par diffraction X vs épidote normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

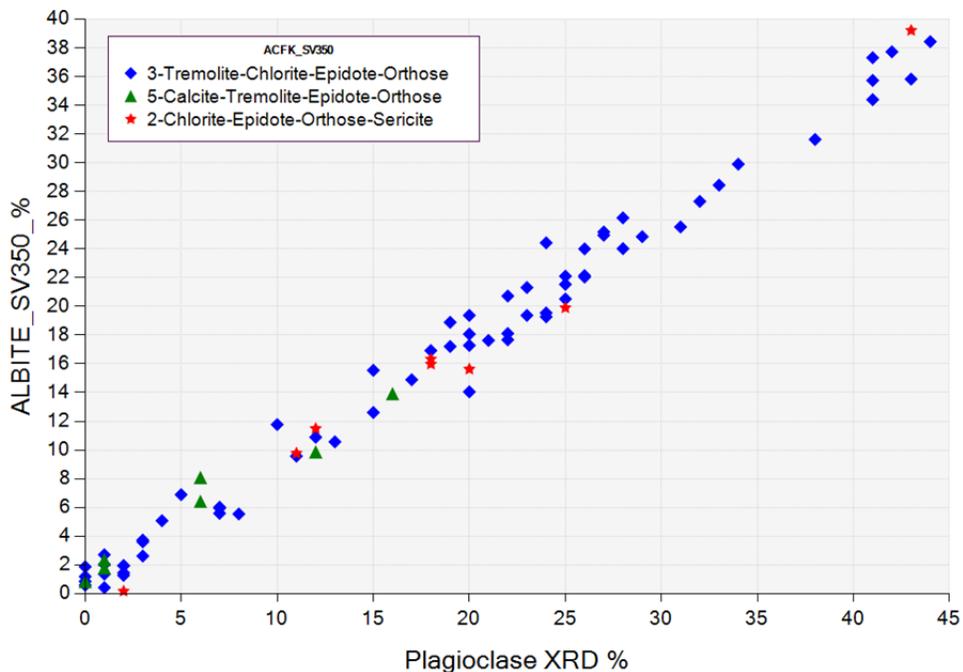


Figure 26. Plagioclase mesuré par diffraction X vs albite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

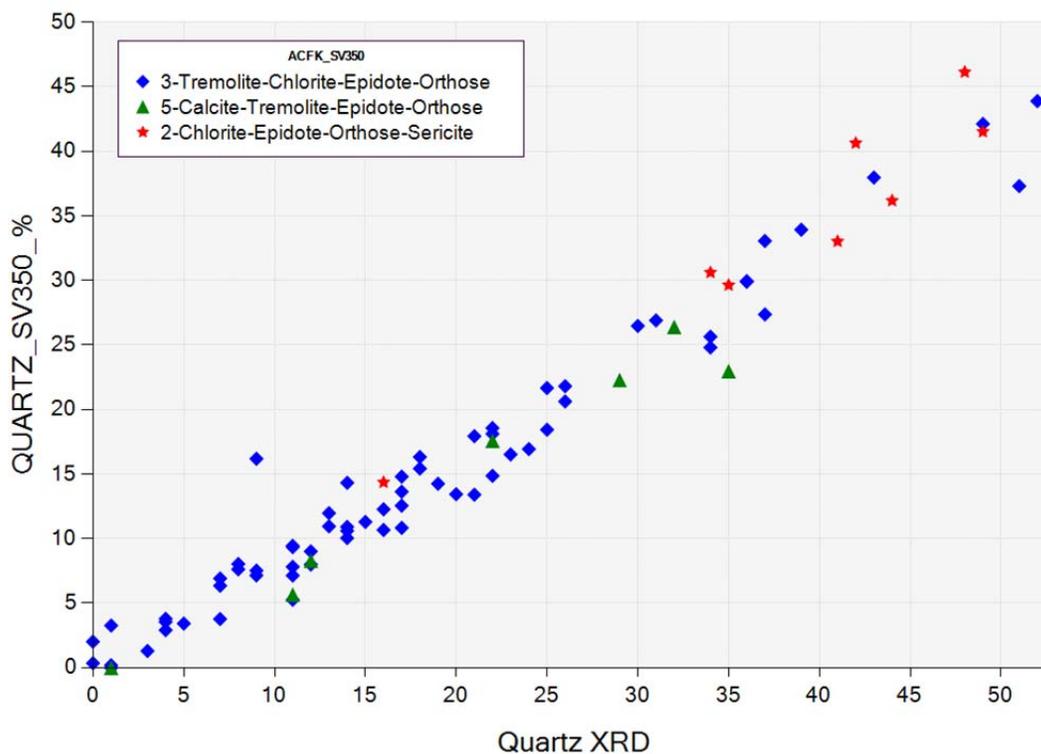


Figure 27. Quartz mesuré par diffraction X vs quartz normatif 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

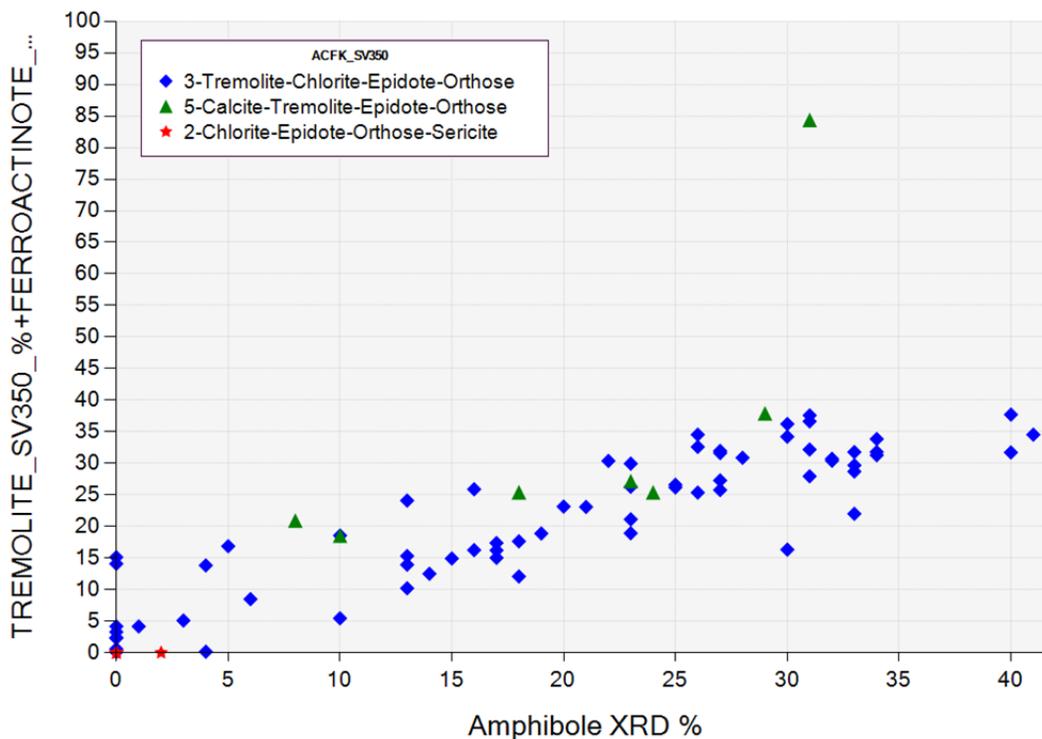


Figure 28. Amphiboles mesurées par diffraction X vs amphiboles calciques normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

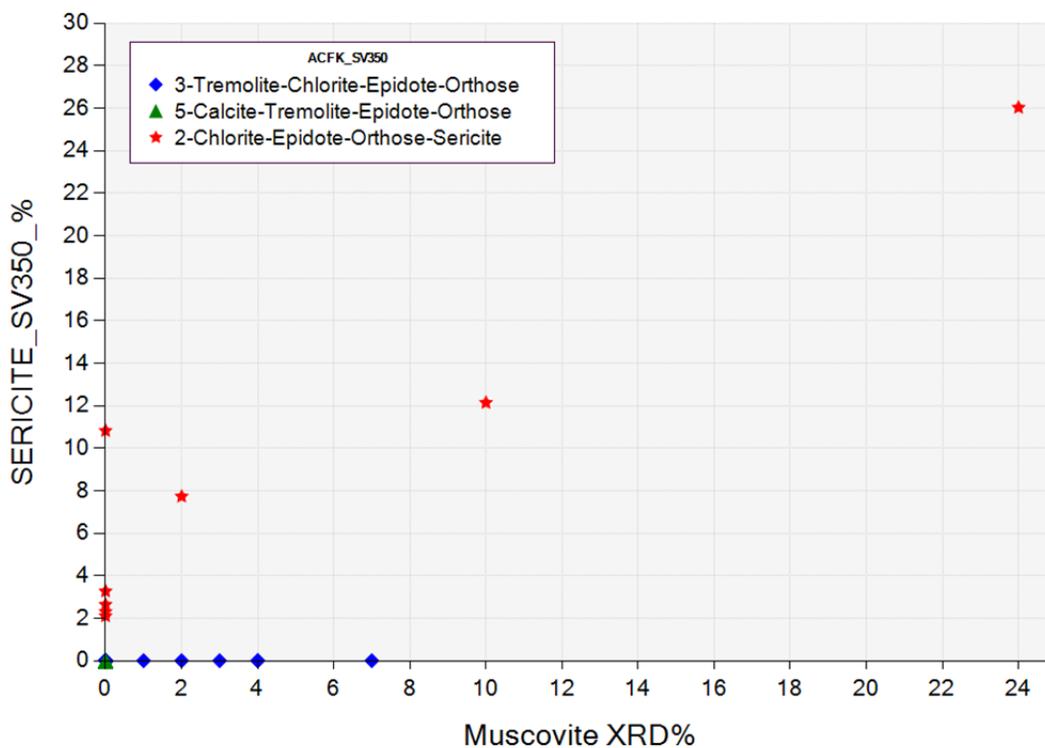


Figure 29. Muscovite mesurée par diffraction X vs séricite normative 350C, secteur de Bear Lake, Manitoba.

7.11.2 Altérations de roches métasédimentaires, gîte d'or Touquoy, Nouvelle-Écosse

La zone Touquoy est une minéralisation aurifère encaissée dans des turbidites du bassin de Méguma en Nouvelle-Écosse (Bierlein et Smith, 2003). Cet exemple a été choisi en raison d'analyses de diffraction-X quantitatives qui accompagnent les analyses lithogéochimiques des siltstones hôtes de la minéralisation. Ceci permet une comparaison quantitative des proportions minérales. Les proportions normatives des principaux minéraux (séricite, chlorite et albite) sont relativement semblables à ce qui a été mesuré par la diffraction X (**Figures 30, 31 et 32**).

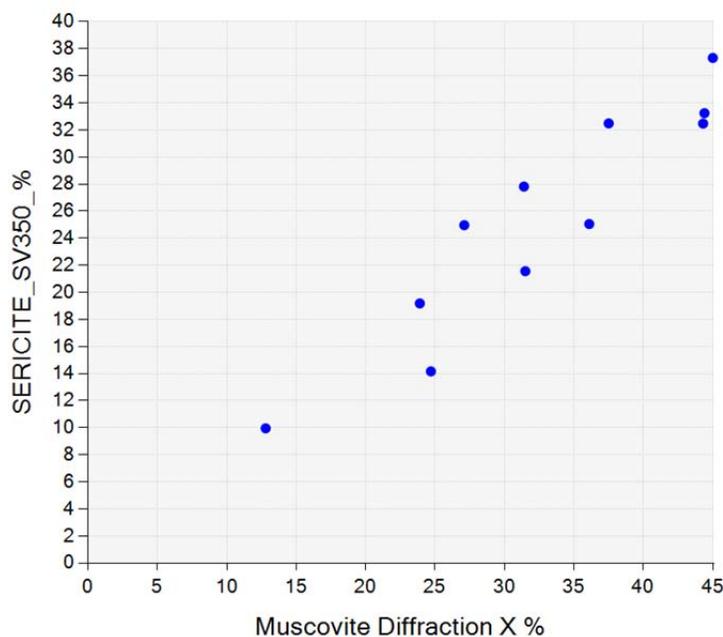


Figure 30. Séricite normative 350C vs muscovite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).

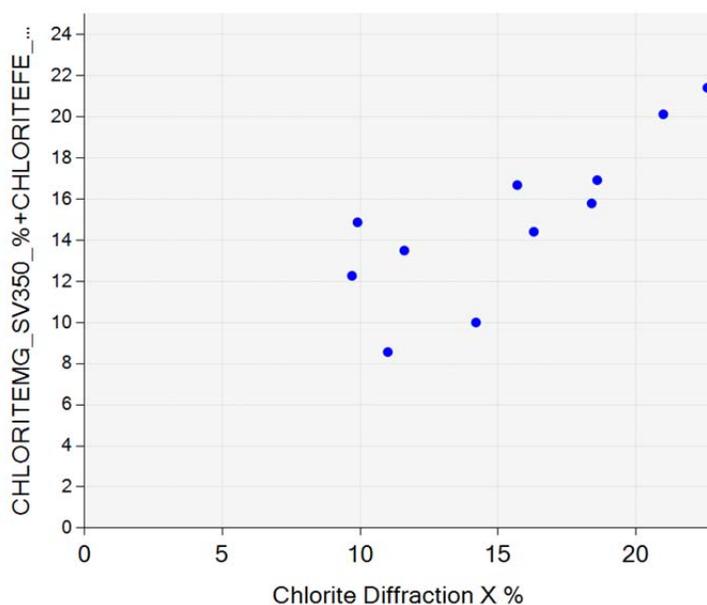


Figure 31. Chlorite normative 350C vs chlorite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).

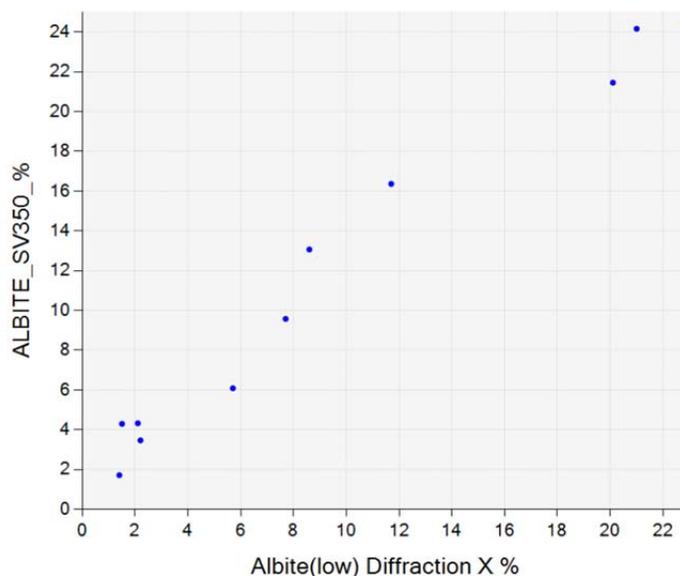


Figure 32. Albite normative 350C vs albite par diffraction X, zone Touquoy (données de Bierlein et Smith, 2003).

7.11.3 Altérations de komatiites, mine Duquesne, Abitibi

Le dernier exemple présente des données sur des roches ultramafiques de la mine d'or Duquesne en Abitibi. Les données utilisées sont inédites et ont été fournies par Denys Vermette de Ressources Alexis. Elles comprennent des analyses chimiques ainsi que la minéralogie modale par lames minces. La norme 350C et NORMAT ont été calculés sur ces données. Le CO₂ a été calculé de façon normative et les valeurs analysées en FeO-Fe₂O₃ ont été utilisées.

La **Figure 33** montre la somme des carbonates observés vs. normatifs. Dans l'ensemble, on observe une bonne correspondance entre l'observation et la norme pour les carbonates. Par contre, on trouve des différences importantes dans les quantités de chlorite, serpentine/talc et séricite (**Figures 34, 36 et 38**). Les mêmes différences apparaissent pour NORMAT (**Figures 35, 37 et 39**). Les différences sont particulièrement importantes pour la muscovite, qui est observée dans les faciès ultramafiques mais qui se retrouve en plus petite quantité dans les normes.

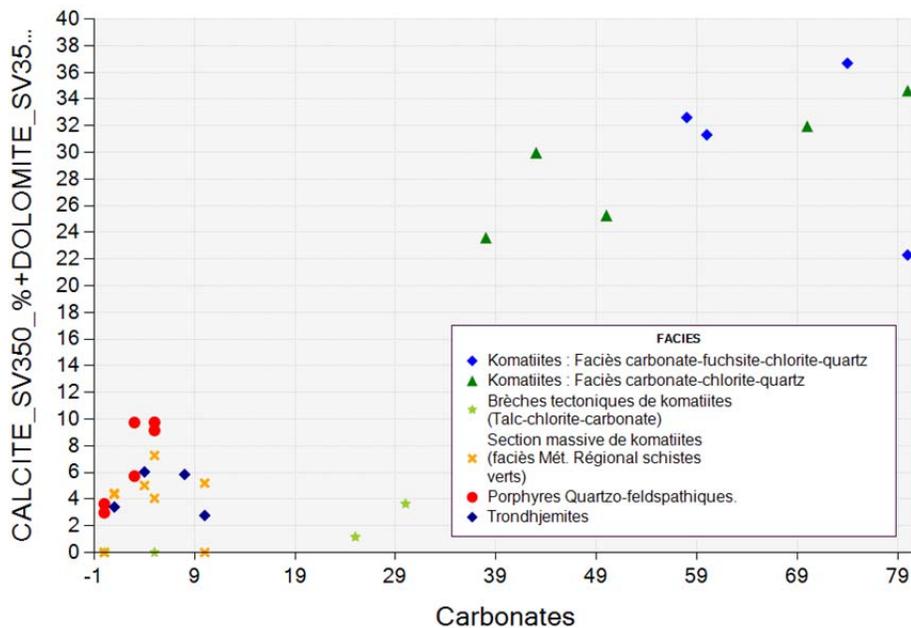


Figure 33. Somme des carbonates 350C vs la somme des carbonates observés, mine Duquesne.

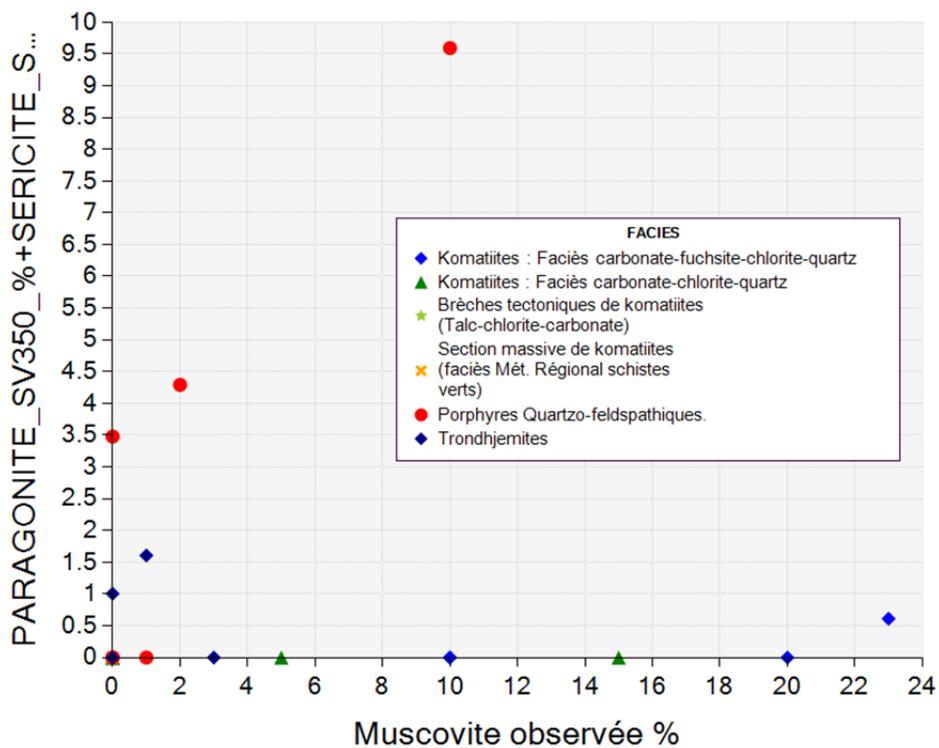


Figure 34. Séricite+Paragonite 350C vs muscovite observée, mine Duquesne.

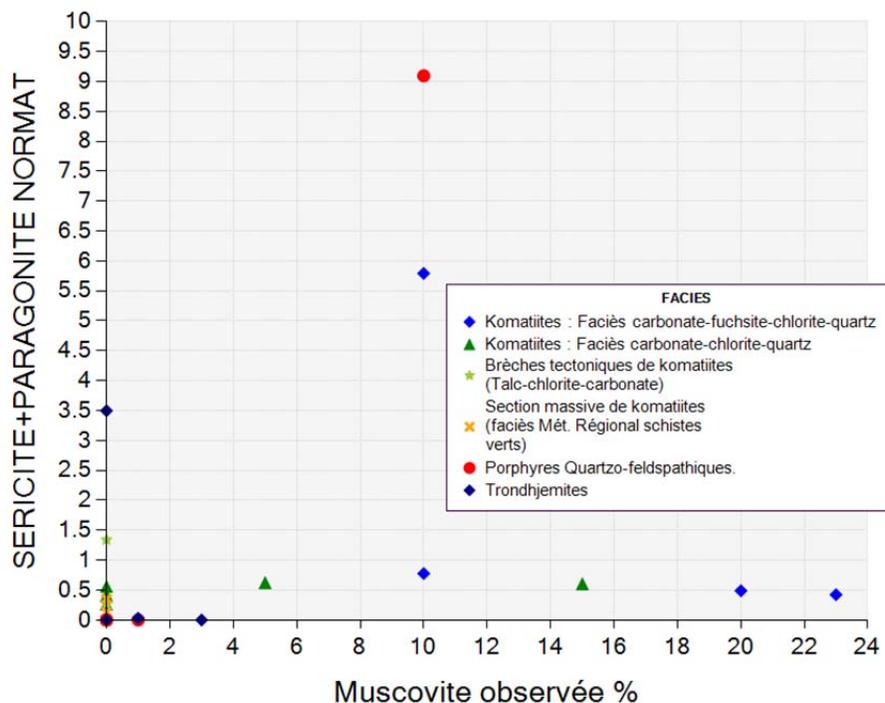


Figure 35. Sérécite+Paragonite NORMAT vs muscovite observée, mine Duquesne.

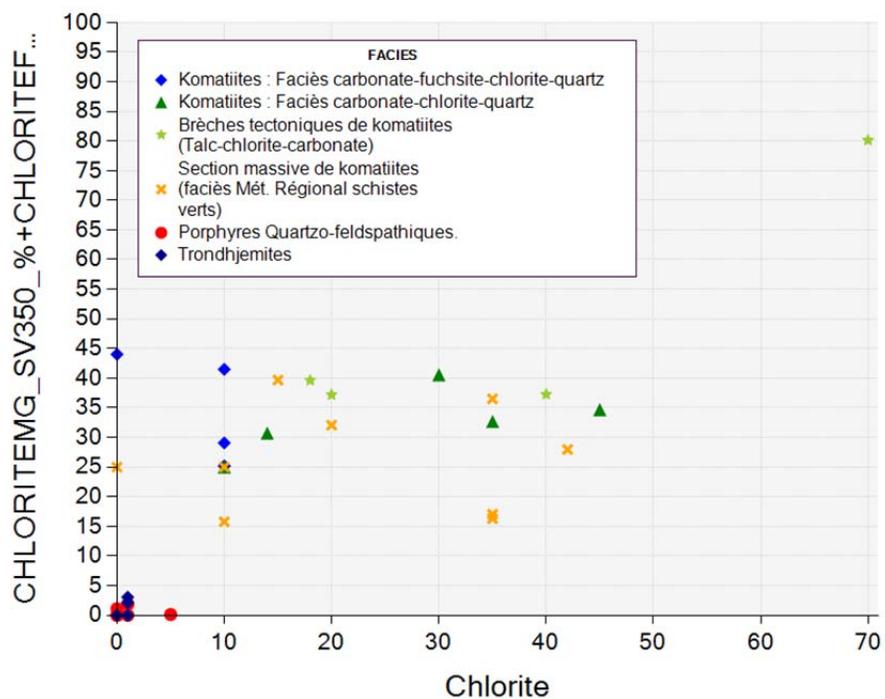


Figure 36. Chlorite 350C vs chlorite observée, mine Duquesne.

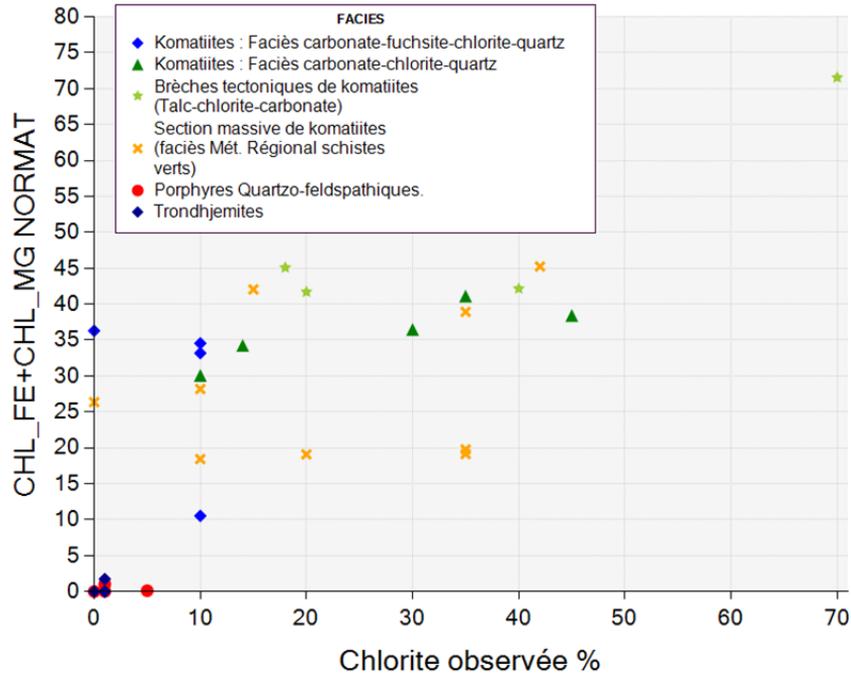


Figure 37. Chlorite 350C vs chlorite observée, mine Duquesne.

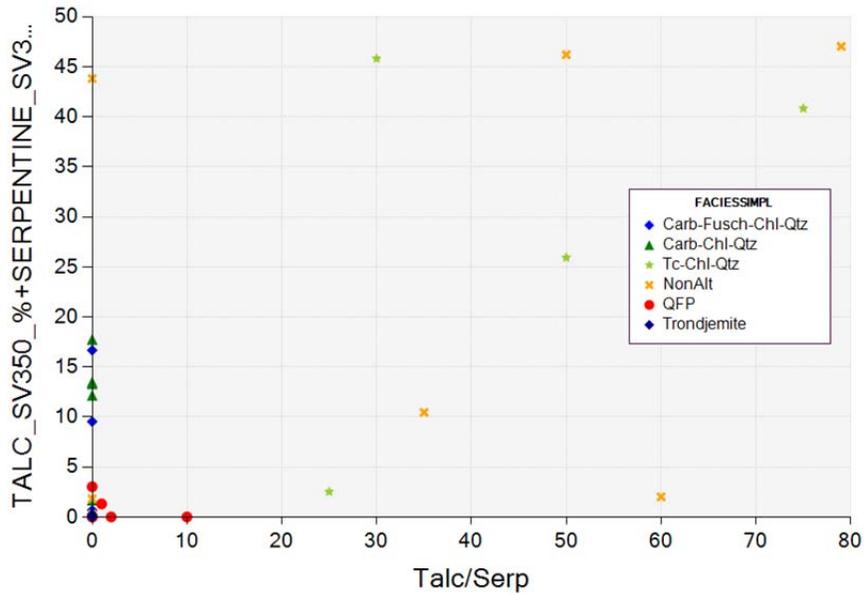


Figure 38. Talc+serpentine 350C vs talc+serpentine observé, mine Duquesne.

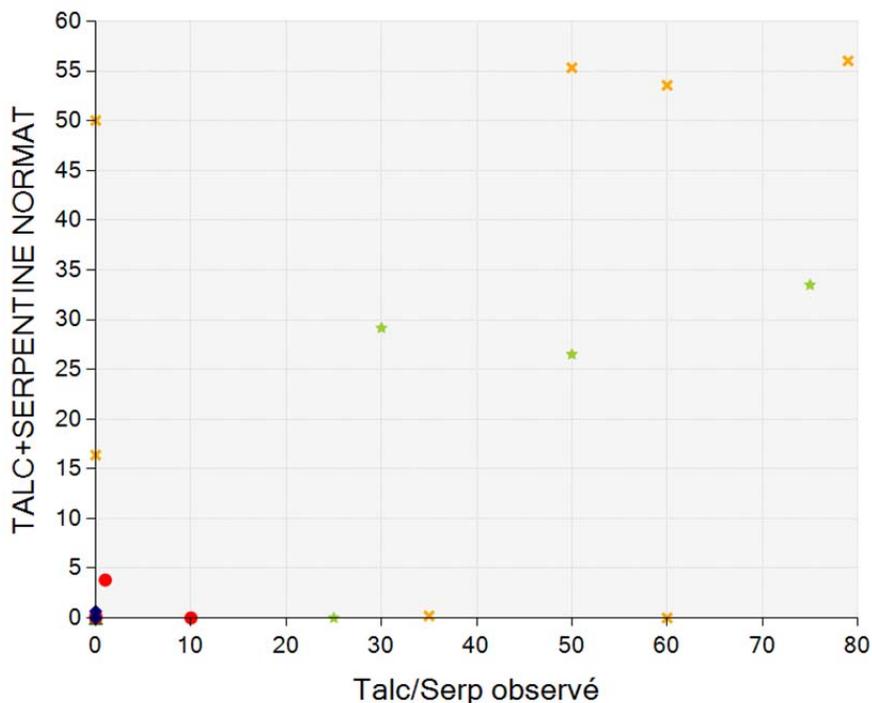


Figure 39. Talc+serpentine NORMAT vs talc+serpentine observé, mine Duquesne.

On peut également comparer les minéraux normatifs avec les faciès observés (**Figures 40, 41, 42 et 43**). Ces différences pourraient s'expliquer par des changements dans la stabilité des silicates en présence d'une grande quantité de CO_2 , en particulier pour les roches riches en magnésium. La **Figure 41** montre le diagramme AKM dans lequel le CO_2 est considéré en excès. À la **Figure 40**, on voit le même système sans le CO_2 en excès. On constate que pour des conditions riches en magnésium, on passe d'un assemblage à Feldspath K + Talc + Chlorite sans CO_2 à un assemblage à Muscovite + Chlorite + Magnésite. Ceci pourrait expliquer en particulier la présence de muscovite dans les faciès ultramafiques carbonatés et son absence dans la norme.

Cet exemple montre que le métamorphisme réel de roches ultramafiques en contexte de carbonatation amène une complexité qui est difficile à modéliser dans tous les cas. NORMAT et la norme schiste vert 350C semblent incapables de reproduire la minéralogie réelle observée dans les roches ultramafiques carbonatées.

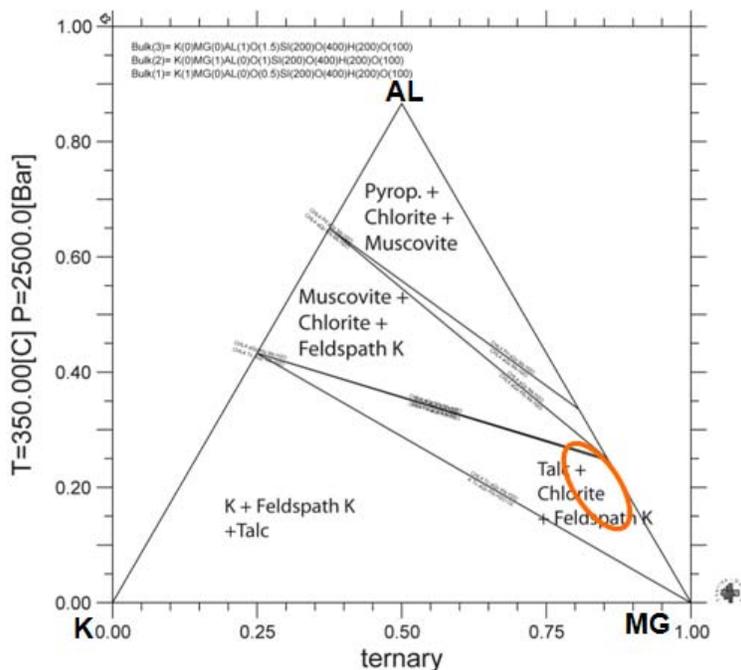


Figure 40. Diagramme AKM (+H₂O, +SiO₂) à 350C, sans CO₂ en excès. Le cercle orange représente la composition du faciès à fuschite de la mine Duquesne. Diagramme généré par le logiciel THERIAK.

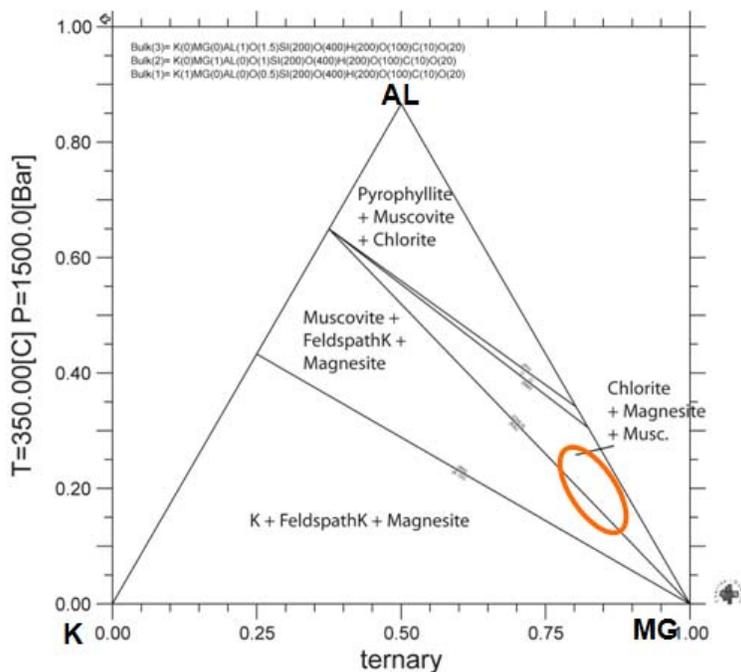


Figure 41. Diagramme AKM (+H₂O, +SiO₂) à 350C, avec CO₂ en excès. Le cercle orange représente la composition du faciès à fuschite de la mine Duquesne. Diagramme généré par le logiciel THERIAK.

7.11.4 Altération de diorites à quartz et de diorites, mine Beaufor, Abitibi

La mine d'or Beaufor se situe en périphérie du batholithe de Bourlamaque dans le secteur de Val-d'Or en Abitibi. Il s'agit d'une minéralisation aurifère filonienne à quartz-carbonates. Roussy (2003) y a étudié la structure, la composition des veines et l'altération. Le travail comprend des analyses de différents faciès d'altération ainsi que la minéralogie modale observée par lames minces.

Les données de Roussy (2003) ont été récupérées et traitées par la norme 350C avec le CO₂ normatif et un ratio Fe₂O₃/Fe₂O₃T fixe de 0,20. Dans l'ensemble, la minéralogie normative correspond très bien avec la minéralogie observée (**Figures 42 à 46**). Ceci indique que la carbonatation des roches intermédiaires donne des assemblages qui sont correctement prédits par la norme.

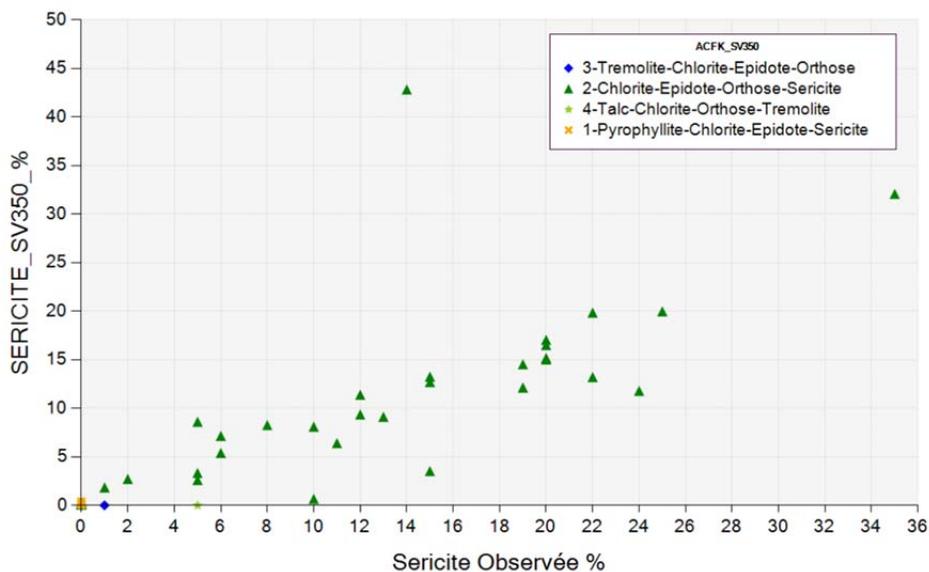


Figure 42. Séricite observée vs séricite normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).

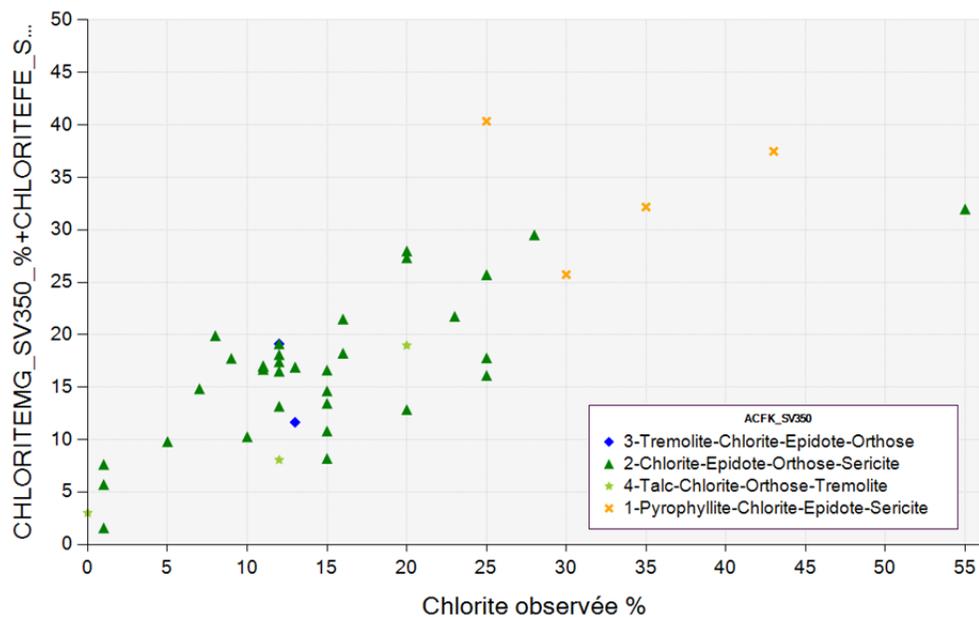


Figure 43. Chlorite observée vs chlorite Mg+Fe normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).

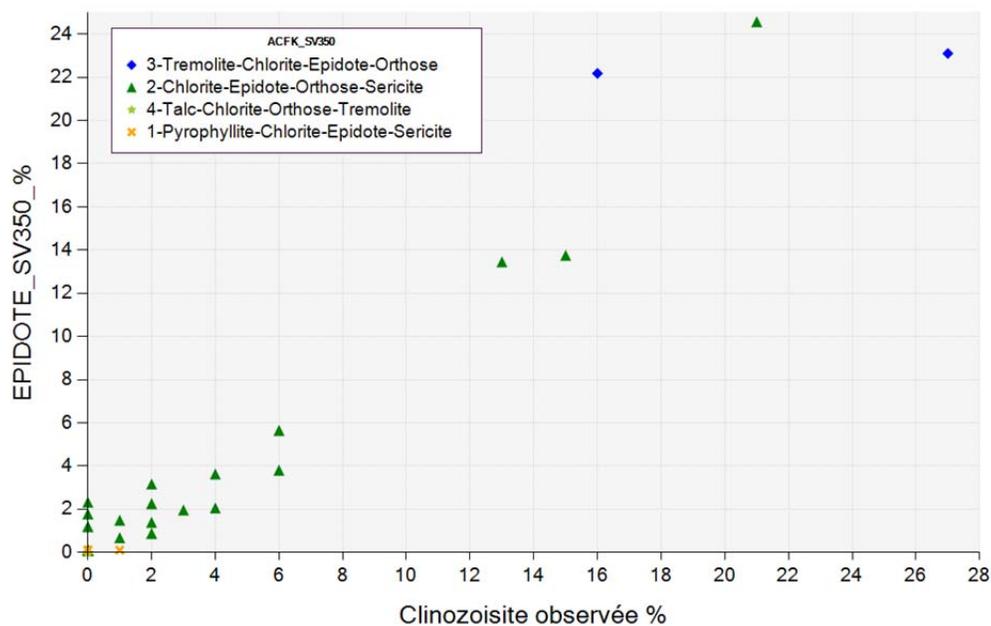


Figure 44. Épidote (clinzoisite) observée vs épidote normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).

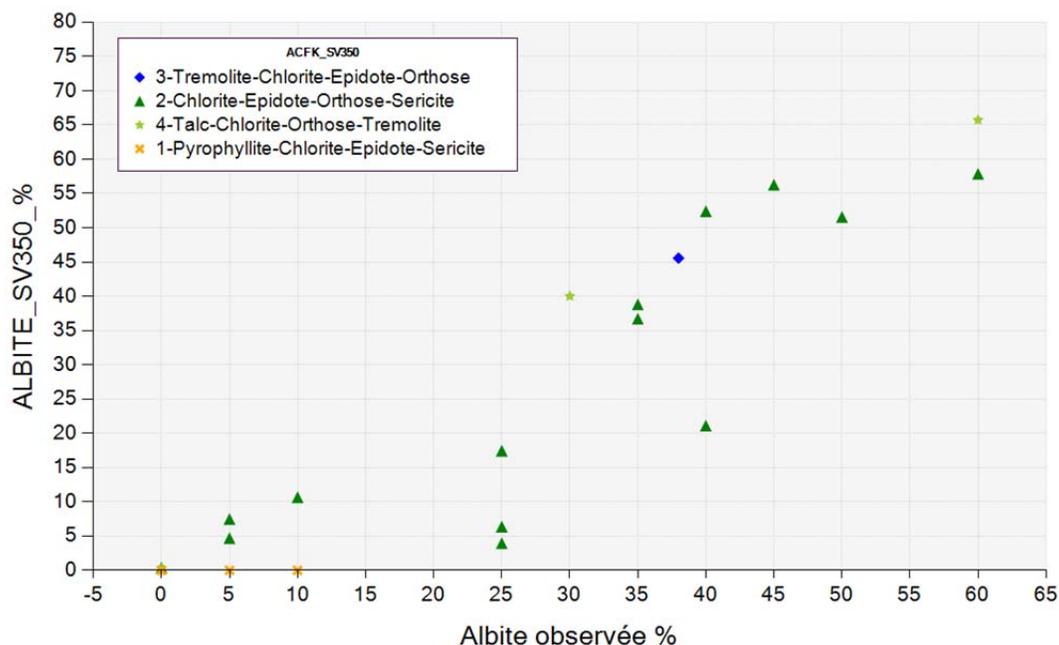


Figure 45. Albite observée vs albite normative 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).

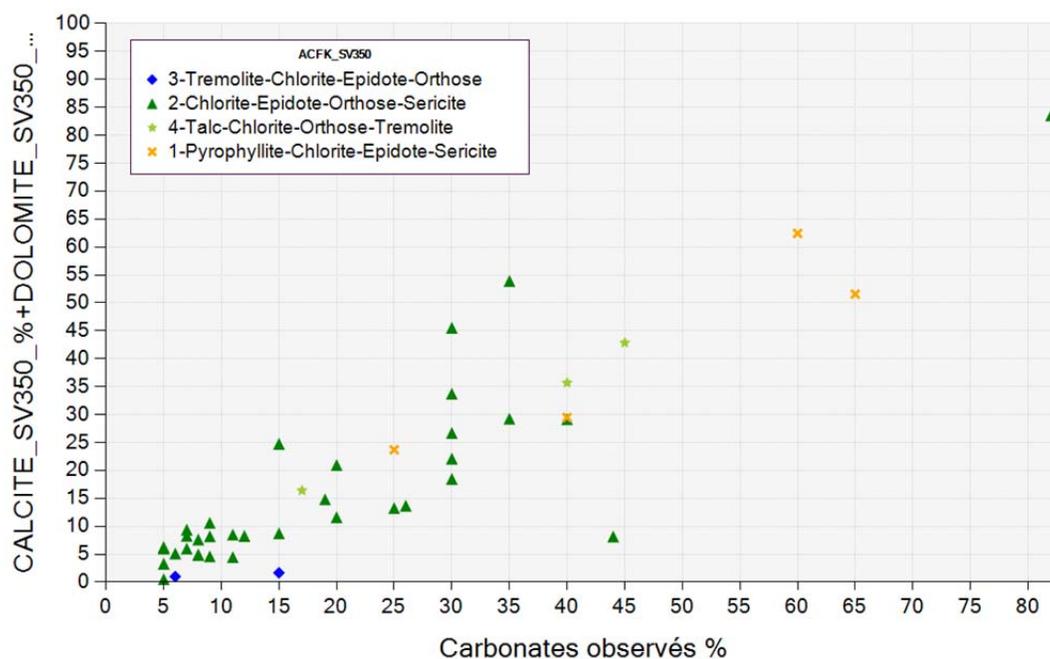


Figure 46. Carbonates observés vs carbonates normatifs 350C, mine Beaufor (données de Roussy, 2003).

7.11.5 Altérations des basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord

Le champ hydrothermal TAG est un champ hydrothermal actuel situé sur la dorsale médio-atlantique. Des monticules de sulfures polymétalliques récents y ont été identifiés. L'altération des basaltes du secteur a été étudiée en détail dans le cadre d'un projet de forages océaniques

(Ocean Drilling Project; Humphries et al., 1998). Trois faciès d'altération y ont été décrits: des basaltes frais, des basaltes altérés en quartz-chlorite-pyrite (premier stade d'altération) et des basaltes altérés en paragonite-quartz-pyrite (stade plus avancé d'altération).

La **Figure 47** montre la chlorite et la paragonite normatives de la norme 350C. Les basaltes frais ne contiennent pas de paragonite normative, et environ 15-20 % de chlorite normative. Tous les basaltes chloritisés sauf 2 montrent des proportions de chlorite normative qui sont supérieures à 40 %. Quelques basaltes chloritisés montrent également un peu de paragonite normative (jusqu'à 5 %). Les basaltes paragonitisés/silicifiés montrent toujours de la paragonite normative (entre 1 et 16 % de paragonite normative). Les basaltes altérés en paragonite-quartz ont également du quartz normatif abondant (**Figure 48**). On peut également noter que les basaltes altérés en chlorite-quartz ont du quartz normatif plus élevé que les basaltes frais. Ces altérations sont encore plus claires en considérant les indices ALT_CHLO et ALT_PARA (**Figure 49**). Cet exemple montre une bonne correspondance entre minéralogie observée et normative.

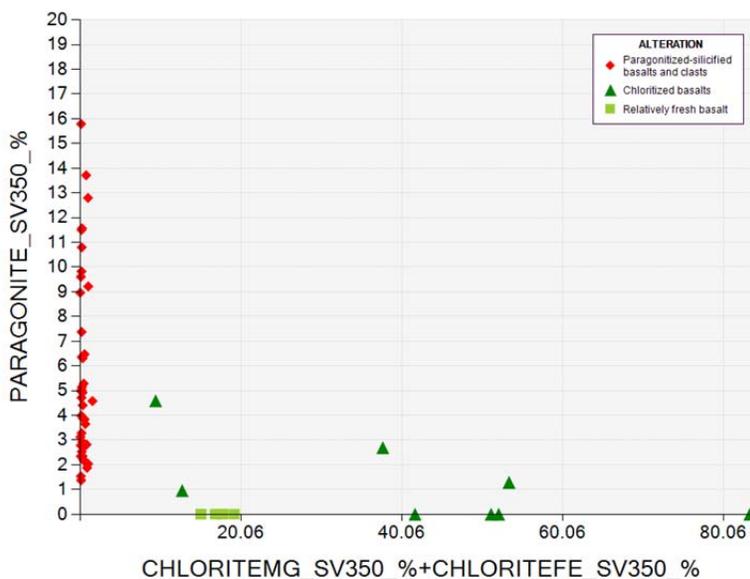


Figure 47. Chlorite vs paragonite normatives 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.

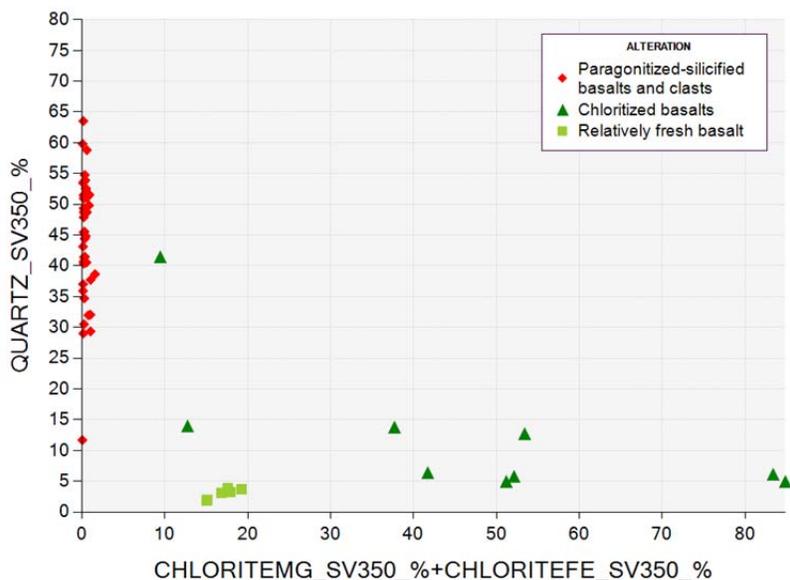


Figure 48. Chlorite vs quartz normatifs 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.

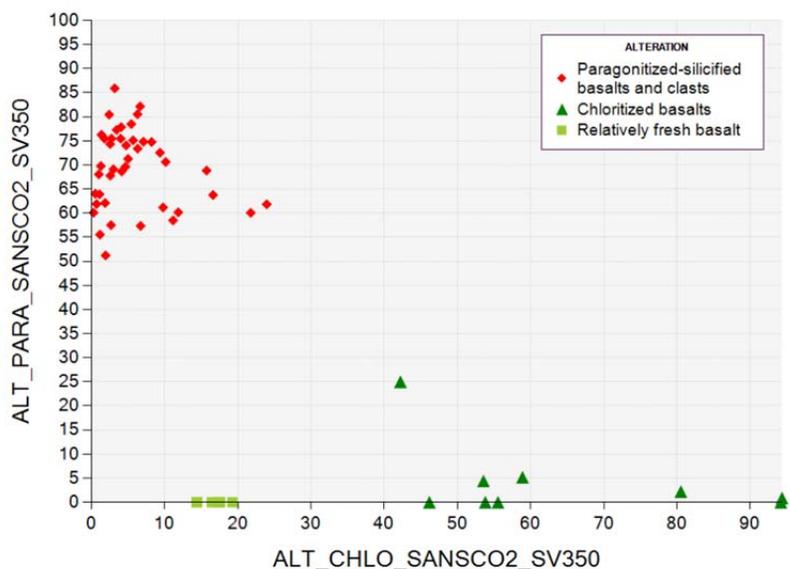


Figure 49. Indice ALT_PARA vs Indice ALT_CHLO 350C, basaltes du champ hydrothermal TAG, Atlantique Nord. Données de Humphries et al., 1998.

7.11.6 Altérations de basaltes, gîte d'or Rundle, secteur de Timmins, Ontario

Ce cas provient d'une étude détaillée de la carbonatation autour du gîte d'or Rundle encaissé dans des basaltes-porphyrés dans le secteur de Timmins en Ontario (Love et Roberts, 1991). La minéralogie de l'altération y est bien caractérisée et le faciès d'altération de chaque échantillon est bien identifié. La norme schiste vert 350C a été calculée sur ces données avec les valeurs FeO-Fe₂O₃ analysées et le CO₂ analysé.

Les **Figures 50** et **51** montrent les amphiboles et l'épidote normatives. Comme décrit, les amphiboles normatives sont abondantes dans les deux premiers assemblages et absents dans les deux derniers. De même, l'épidote normative est présente dans les deux premiers assemblages tel qu'observé et absente dans les deux derniers. La dolomite est présente dans l'assemblage 4 et absente dans les autres, tel qu'observé (**Figure 52**). La calcite normative est pour sa part prédite dans tous les assemblages, mais non-décrite dans le dernier (**Figure 53**). La sérécite normative est présente dans les deux derniers assemblages et absente dans les premiers (**Figure 54**). Cet exemple montre donc une bonne relation entre la minéralogie observée et normative pour un cas de carbonatisation de basaltes au schiste vert.

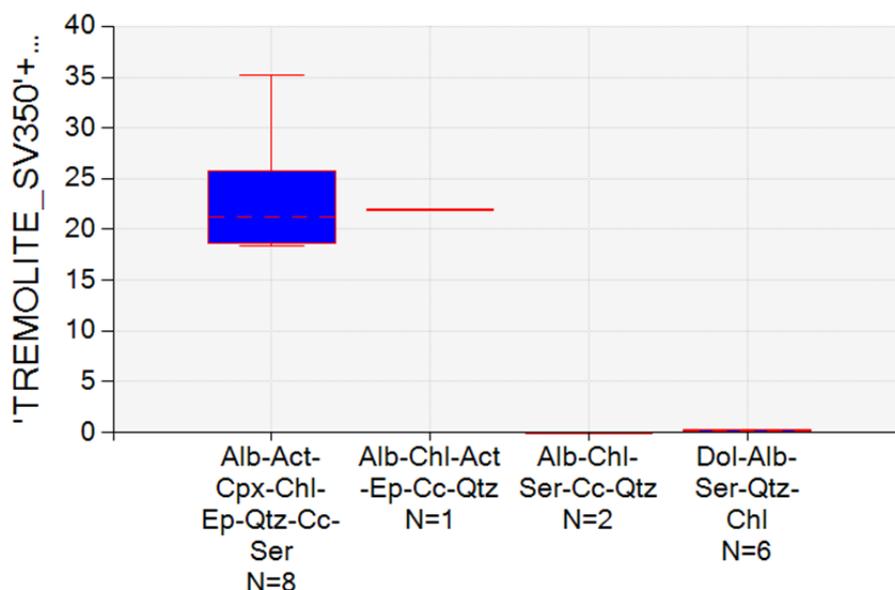


Figure 50. Trémolite+Ferroactinolite 350C selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).

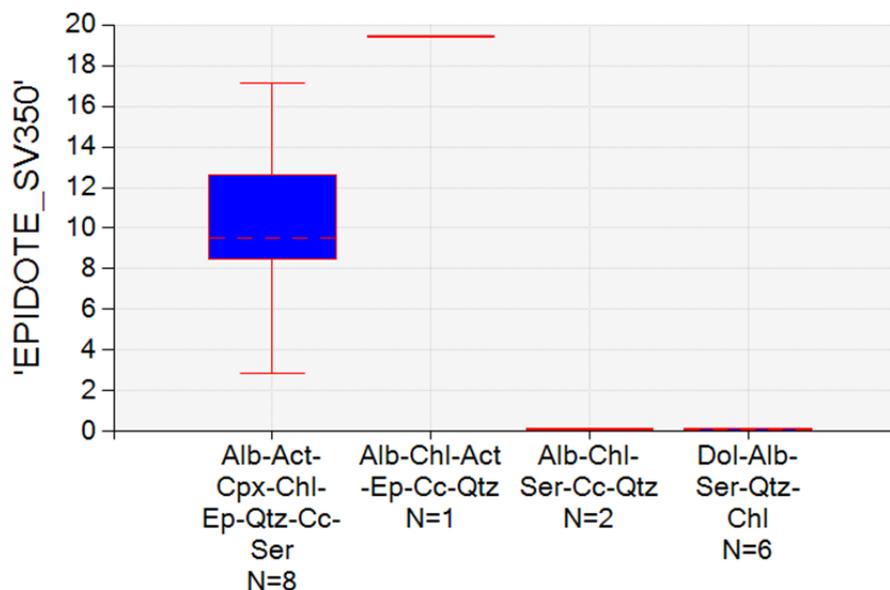


Figure 51. Épidote 350C selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).

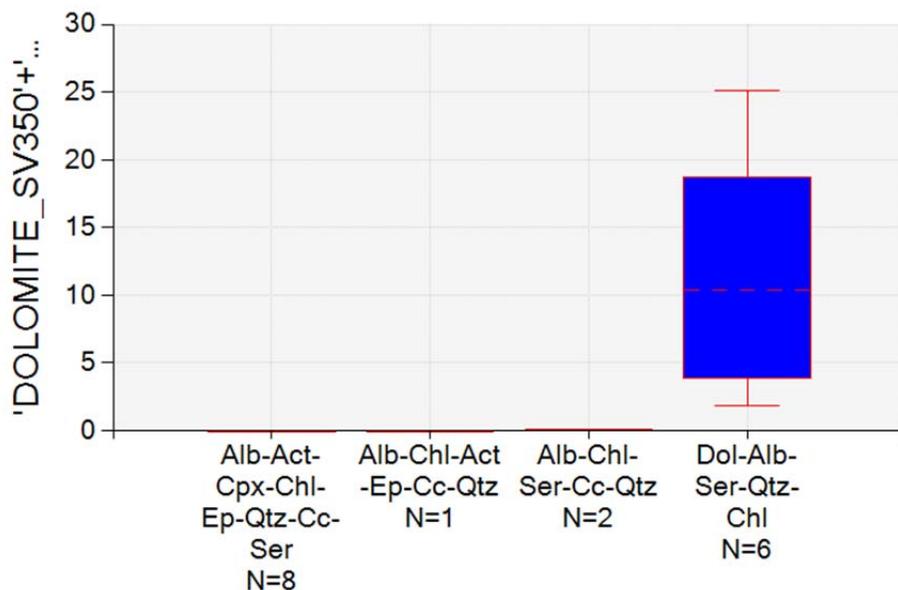


Figure 52. Dolomite+Ankérite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).

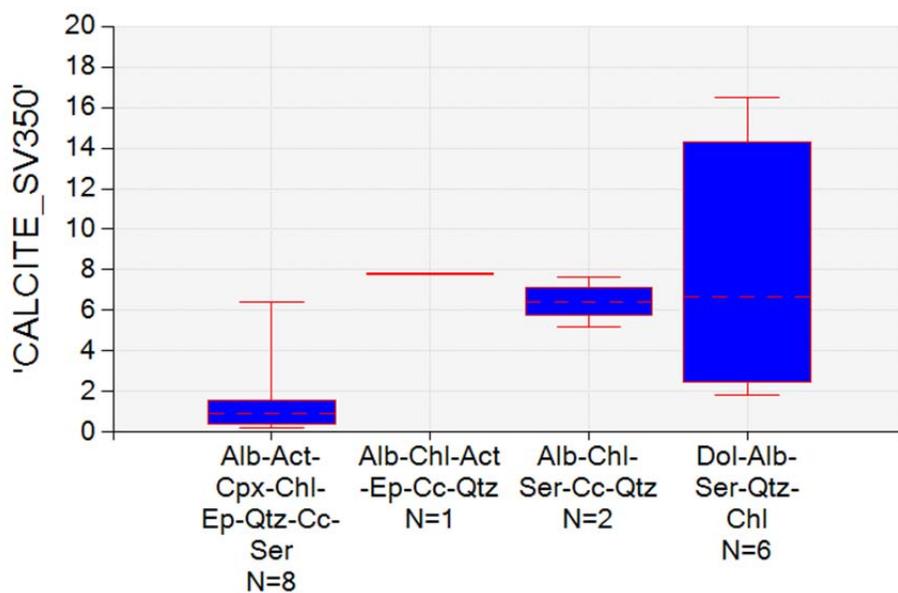


Figure 53. Calcite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).

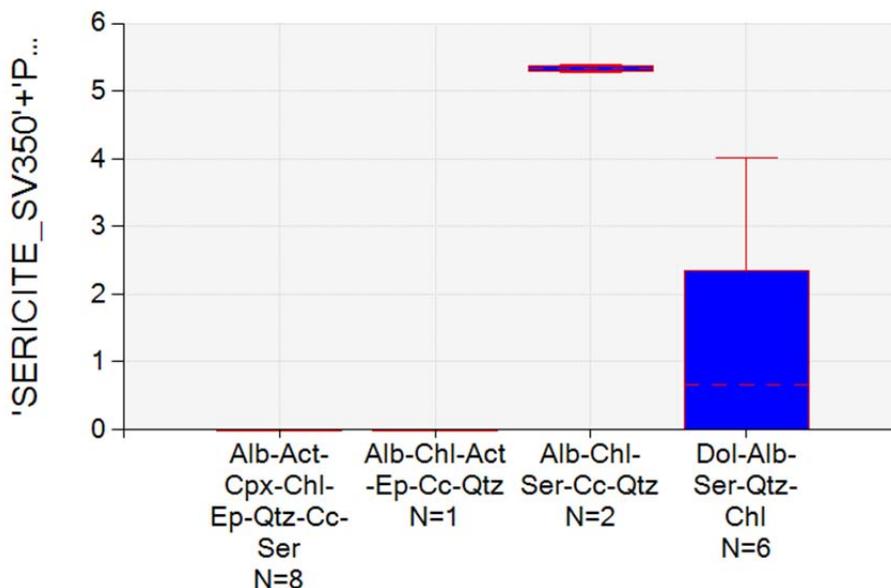


Figure 54. Séricite selon assemblage réel, gîte d'or Rundle (données de Love et Roberts, 1991).

7.11.7 Altération d'andésites en chlorite, séricite, silice, mine Hellyer, Australie

Cet exemple provient d'une étude de l'altération hydrothermale associée au VMS Zn-Cu-Pb Hellyer en Australie (Schardt et al., 2001). La norme 350C a été calculée sur des valeurs moyennes des différents faciès d'altération. La minéralogie des différents faciès d'altération est bien décrite et a été rapportée avec les données.

Le **Tableau 1** montre les proportions des différents minéraux selon le faciès d'altération décrit. En général, la minéralogie correspond bien avec ce qui est attendu. La zone à chlorite contient la chlorite la plus abondante. Le quartz est prédominant dans le cœur silicifié, mais est présent dans les autres zones d'altération également, tel que décrit. Seule l'andésite fraîche ne contient pas de quartz en grande quantité. La séricite est abondante dans toutes les zones d'altération, mais absente ailleurs.

Tableau 1. Minéraux normatifs vs assemblages, mine Hellyer.

Faciès	% Chlorite normative	Séricite normative	Pyrite normative	Quartz normatif
Unaltered andesite	14,1	0	3,5	1,4
Stringer Zone: Quartz-Sericite	13,2	16,0	6,6	29,9
Ser Zone Sericite, minor chlorite, quartz	18,5	15,2	9,1	27
Chlorite Zone: Chlorite, minor sericite, quartz, carbonate	50,2	14,5	12,5	14,2
Si Core Quartz-Sericite-Pyrite	5,5	16,5	12,9	53,2

7.12 Comparaison entre CO₂ normatif et autres mesures/estimations du CO₂

Le CO₂ normatif calculé par la norme LithoModeleur 350C peut être comparé avec d'autres évaluations ou mesures du CO₂ de la roche. Sept mille cent cinquante et un (7 151) échantillons de la banque de compilation des partenaires du CONSOREM de l'Abitibi ont été extraits dont le CO₂ a été déterminé analytiquement. De ce nombre, 1686 ont également le soufre analysé.

Le CO₂ par réseaux neuronaux et le CO₂ normatif de NORMAT ont été calculés sur cette banque. Le **Tableau 2** montre les coefficients de corrélation de Spearman entre le CO₂ analysé et les différentes évaluations du CO₂. D'un premier coup d'œil, les compilations entre le CO₂ analysé et les CO₂ estimés sont très similaires. Toutefois, le CO₂ estimé par réseaux neuronaux est légèrement supérieur aux autres pour cette banque. La **Figure 55** montre que l'évaluation du CO₂ par la norme LithoModeleur est globalement assez juste (pente de 1 avec ordonnée à l'origine de 0 sur le diagramme).

Tableau 2. Corrélations de Spearman entre CO₂ analysé et CO₂ estimés, banque de compilation des partenaires du CONSOREM Abitibi avec CO₂ analysé

Mesure du CO ₂	Corrélation vs CO ₂ analysé
NORMAT	0,9047
Réseaux Neuronaux	0,9177
Norme CONSOREM Schiste Vert	0,9063

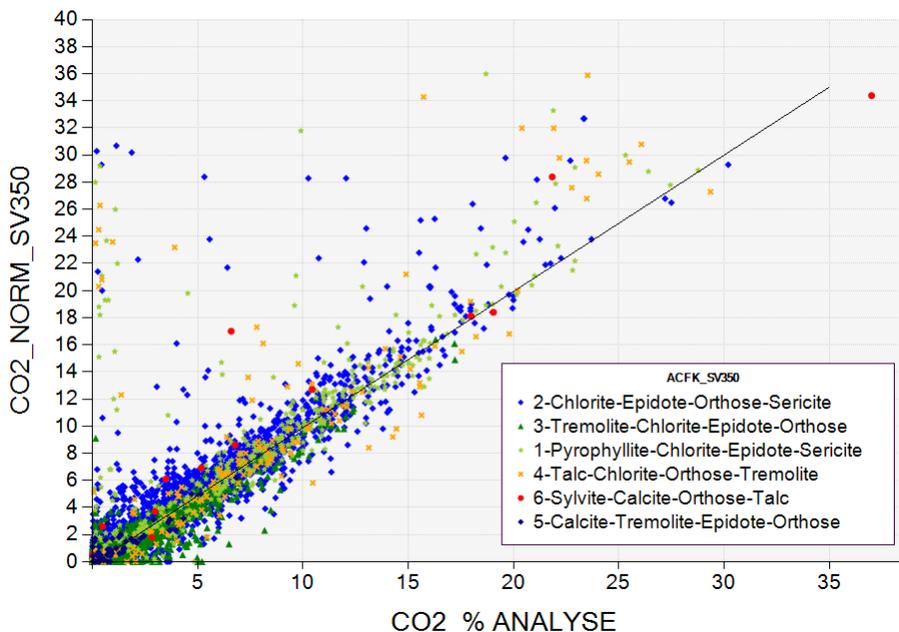


Figure 55. Comparaison entre le CO₂ analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO₂ analysé (n = 7 151).

Les mêmes comparaisons ont été effectuées sur la sous-banque de données contenant le soufre. Pour cette banque, NORMAT a été recalculé en fournissant le soufre comme élément analysé. Le soufre a également été inclus dans le calcul de la norme LithoModeleur. Le **Tableau 3** donne les coefficients de corrélation entre le CO₂ analysé et estimés pour cette banque. Pour cette banque, le CO₂ de la norme LithoModeleur est nettement supérieur aux autres mesures. La **Figure 56** montre que l'évaluation du CO₂ par LithoModeleur est assez juste lorsque le S est présent également.

Tableau 3. Corrélations de Spearman entre valeurs de CO₂ analysées et estimées, banque de compilation des partenaires du CONSOREM Abitibi avec S et CO₂ analysés.

Mesure du CO ₂	Corrélation vs CO ₂ analysé
NORMAT	0,8314
Réseaux Neuronaux	0,8326
Norme CONSOREM Schiste Vert	0,8808

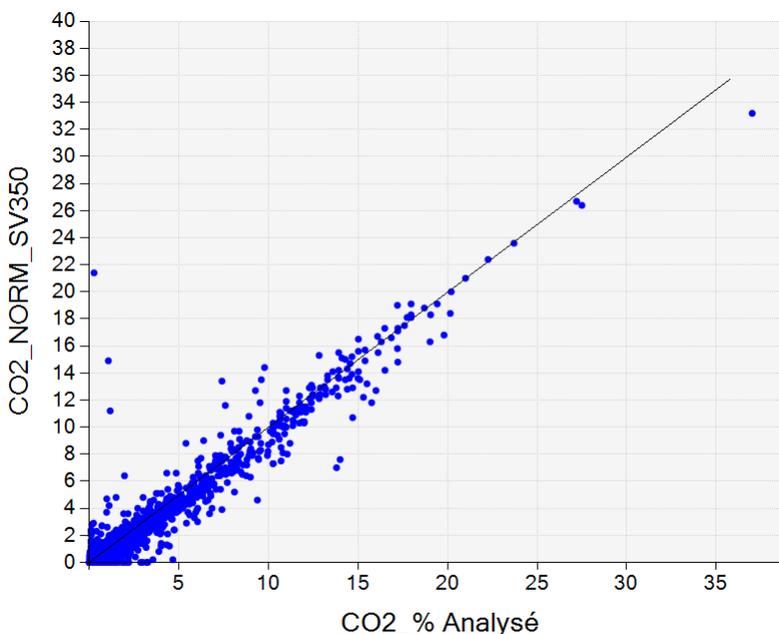


Figure 56. Comparaison entre le CO₂ analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO₂-S analysés (n = 1 686).

7.13 Comparaison des indices d'altération avec indices de NORMAT

7.13.1 Banque de compilation des partenaires du CONSOREM

La **Figure 57** montre la relation entre l'indice IFRAIS de NORMAT et l'indice ALT_PHYLLO de LithoModeleur 350C pour la banque de compilation présentée à la section précédente. Ces deux indices donnent des signaux qui sont très similaires ($r = -0,8$). Les signaux donnés par les indices ISER et ALT_SER sont également assez semblables ($r = 0,68$; **Figure 58**) Les indices

ICHLO et ALT_CHLO sont toutefois assez différents (**Figure 59**). Ceci est dû au fait que les phyllosilicates sont calculés simultanément alors que les minéraux hydrothermaux de NORMAT sont calculés en séquence (Para --> Ser --> Chlo --> Pyro).

L'indice IPAF de NORMAT permet d'évaluer la carbonatation. La **Figure 60** permet de constater qu'il existe une relation étroite entre IPAF et l'indice ALT_CARBS ($r = 0,97$), même si ces indices sont calculés de façon très différente en réalité.

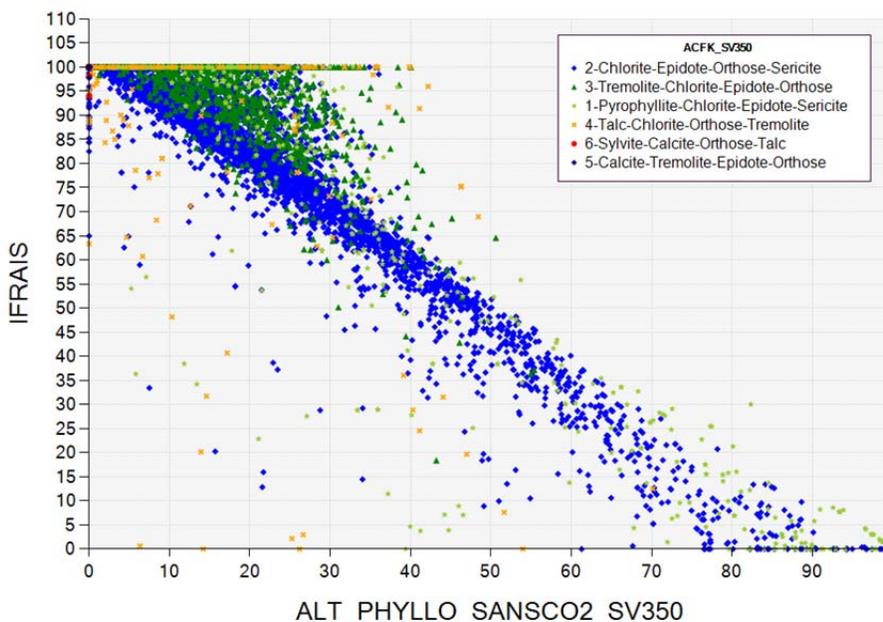


Figure 57. Comparaison entre l'indice IFRAIS de NORMAT et l'indice ALT_PHYLLO_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).

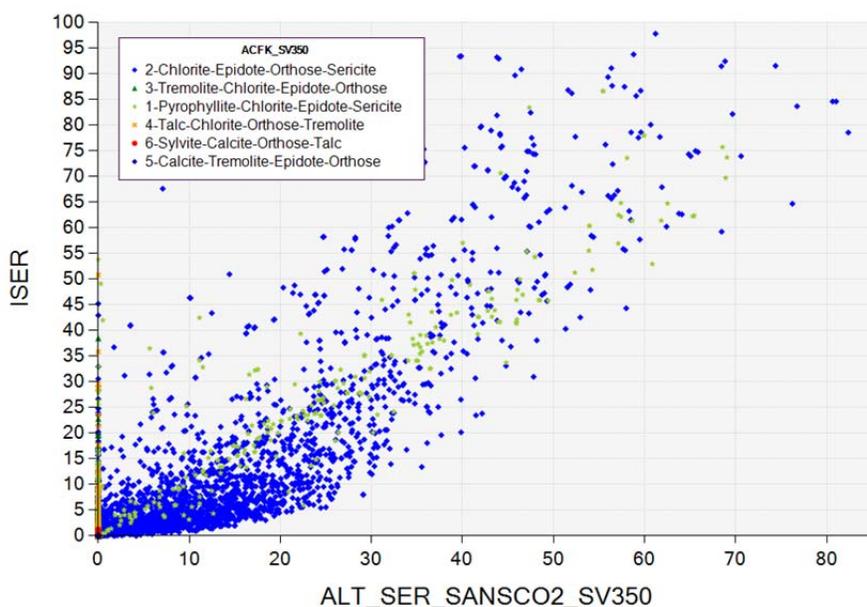


Figure 58. Comparaison entre l'indice ISER de NORMAT et l'indice ALT_SER_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).

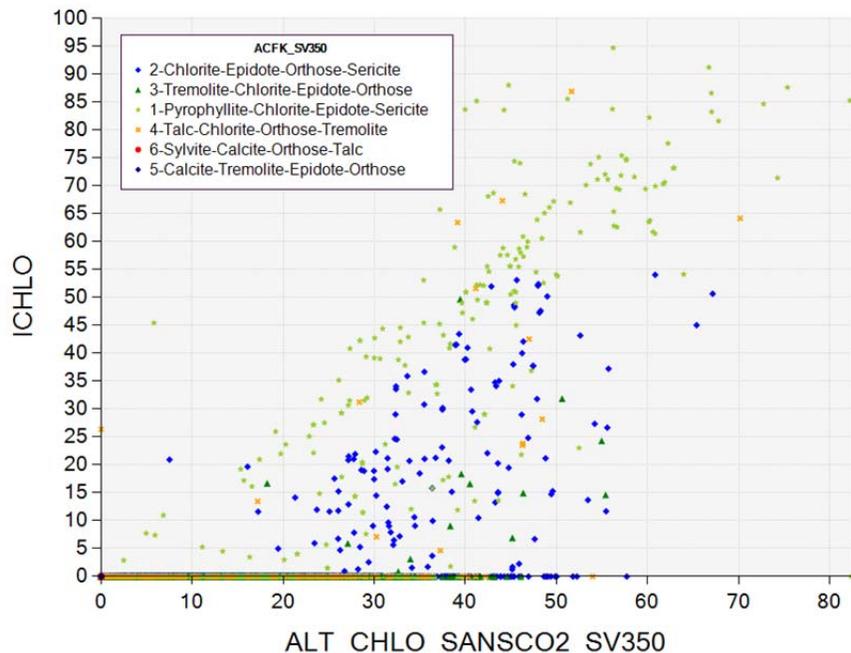


Figure 59. Comparaison entre l'indice ICHLO de NORMAT et l'indice ALT_CHLO_350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).

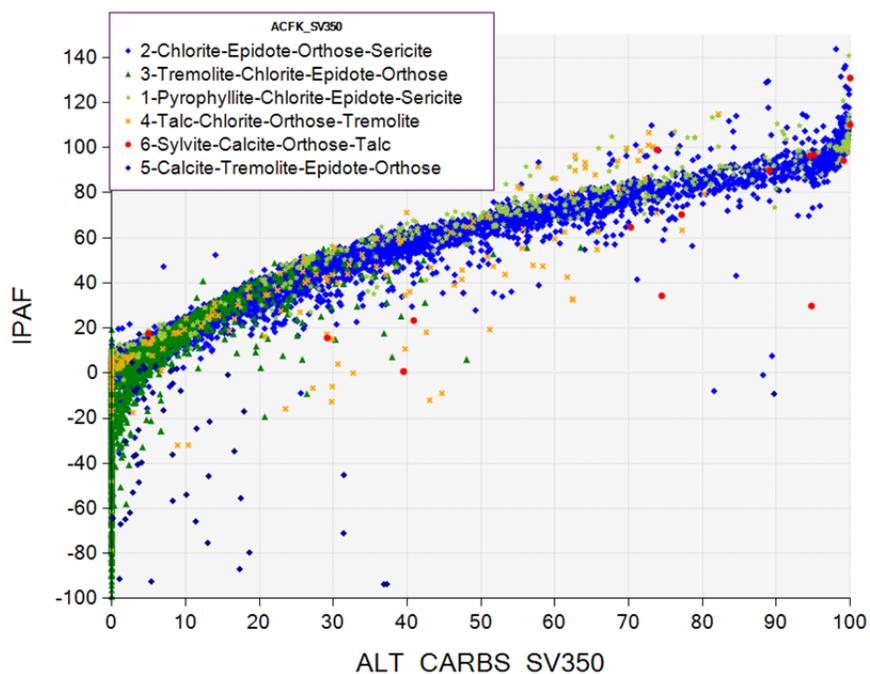


Figure 60. Comparaison entre l'indice IPAF de NORMAT et l'indice ALT_CARBS, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).

7.13.2 Mine Millenbach, Rouyn-Noranda

Riverin (1980) a étudié l'altération autour de la mine Millenbach autour de Rouyn-Noranda. L'article fournit une série de moyennes des différents faciès volcaniques et des différentes altérations des unités présentes autour de la mine. Les lithologies sont des andésites, des rhyolites et des porphyres à quartz-feldspath. Ces lithologies sont fraîches, séricitisées, silicifiées ou fortement chloritisées. La norme LithoModeleur schiste vert 350C a été calculée sur ces données (ratio Fe_2O_3/Fe_2O_3T fixe à 0,25) ainsi que la norme NORMAT par Normat 3.0 (ratio Fe_2O_3/Fe_2O_3T fixe à 0,25, autres options par défaut). Aucun CO_2 ni LOI n'était disponible dans la banque, donc les deux normes ont utilisé le CO_2 calculé comme source.

La **Figure 61** montre la relation entre l'indice NORMAT IFRAIS et ALT_PHYLLO pour les données de Riverin. Globalement, une très bonne corrélation existe entre les deux mesures d'altération. Quelques différences apparaissent au niveau des roches très altérées. L'indice IFRAIS culmine à une valeur de <5 pour les altérations "Spotted", "Giant spots", "Core" et "Silicified", mais on note une certaine progression dans ALT_PHYLLO dans ces échantillons (entre 75 et 100). Les indices NORMAT ISER et l'indice ALT_SER donnent des résultats qui sont très semblables (**Figure 62**). Les indices ICHLO et ALT_CHLO sont plus différents (**Figure 63**). Alors que ALT_CHLO augmente graduellement avec l'altération, ICHLO augmente brusquement dans les zones les plus altérées.

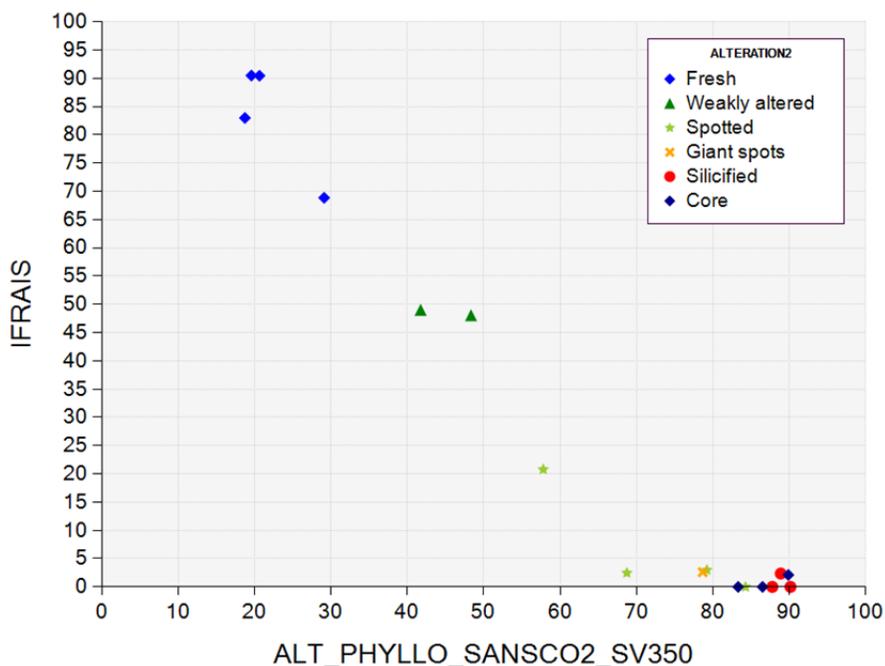


Figure 61. Indice NORMAT IFRAIS vs ALT_PHYLLO, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).

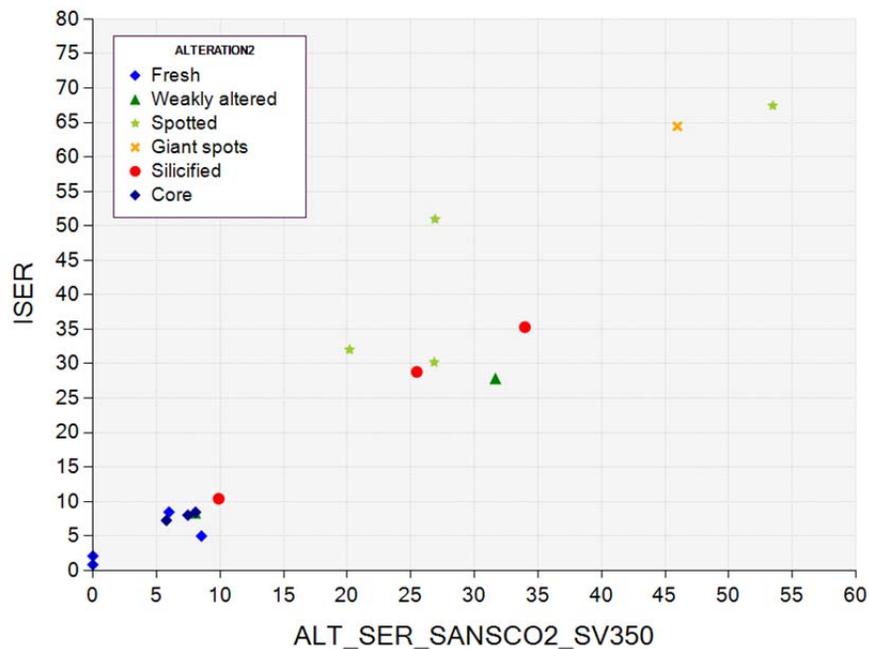


Figure 62. Indice NORMAL ISER vs ALT_SER, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).

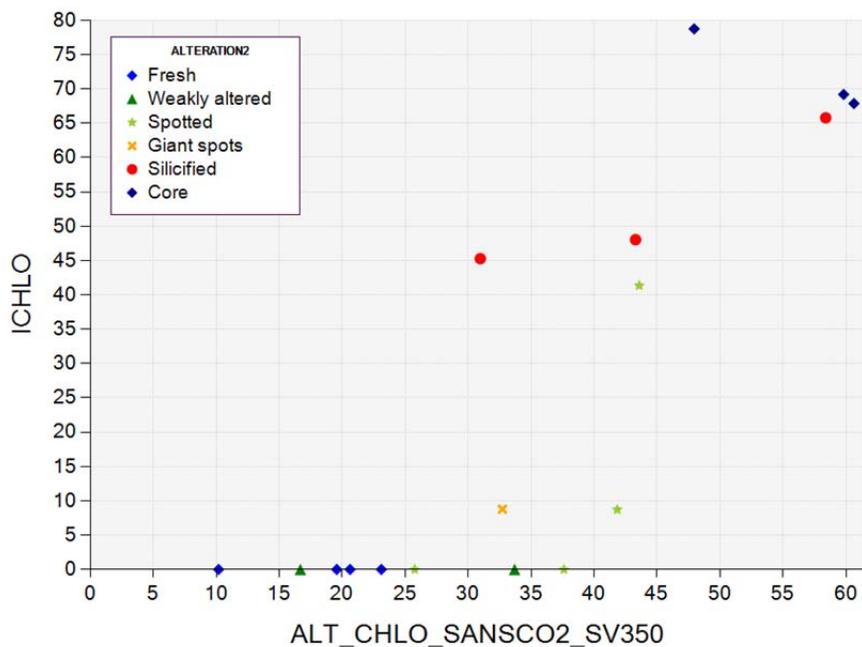


Figure 63. Indice NORMAL ICHLO vs ALT_CHLO, norme 350C. Données de Millenbach (Riverin, 1980).

7.14 Comparaison des mesures de densité et autres mesures/estimations de la densité

7.14.1 Bracemac, Matagami

Une banque de données géochimiques et physiques de cinq forages du secteur de Bracemac à Matagami a été fournie par XStrata-Zn. La densité et le magnétisme y ont été mesurés systématiquement à chaque 10 cm par atténuation gamma (Ross et al., 2011). Les données physiques ont été couplées avec les analyses chimiques pour comparer l'évaluation de la densité et du magnétisme. NORMAT et la norme LithoModeleur ont été calculés sur cette banque (ratio Fe_2O_3/Fe_2O_3T fixe à 0,25 pour les deux méthodes, CO_2 normatif).

Le **Tableau 4** indique que les corrélations entre la densité mesurée et la densité NORMAT sont d'environ 0,77. Les estimations de la densité par NORMAT et par LithoModeleur sont donc très similaires ($r=0,98$ entre NORMAT et LithoModeleur). La **Figure 64** montre la relation entre la densité mesurée et la densité LithoModeleur 350C.

Tableau 4. Corrélations de Spearman entre densité analysée et estimée, forages du secteur Bracemac ($n=110$).

Mesure de la densité	Corrélation vs densité analysée
NORMAT	0,7756
Norme CONSOREM Schiste Vert	0,7639

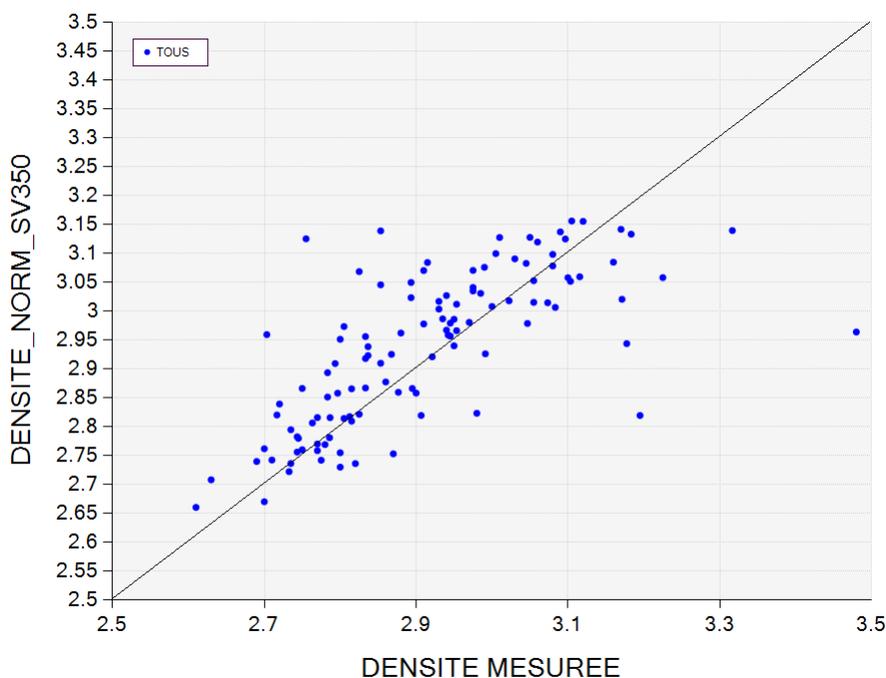


Figure 64. Comparaison entre densité mesurée et densité de la norme 350C, secteur Bracemac ($n=111$).

Le magnétisme a également été mesuré à Bracemac. La **Figure 65** montre que le magnétisme calculé par NORMAT se corrèle mal avec le magnétisme réel, même si les valeurs les plus magnétiques réelles sont également les plus élevées estimées par NORMAT. La **Figure 66** montre que la magnétite 350C correspond encore moins que celui de NORMAT avec le magnétisme mesuré.

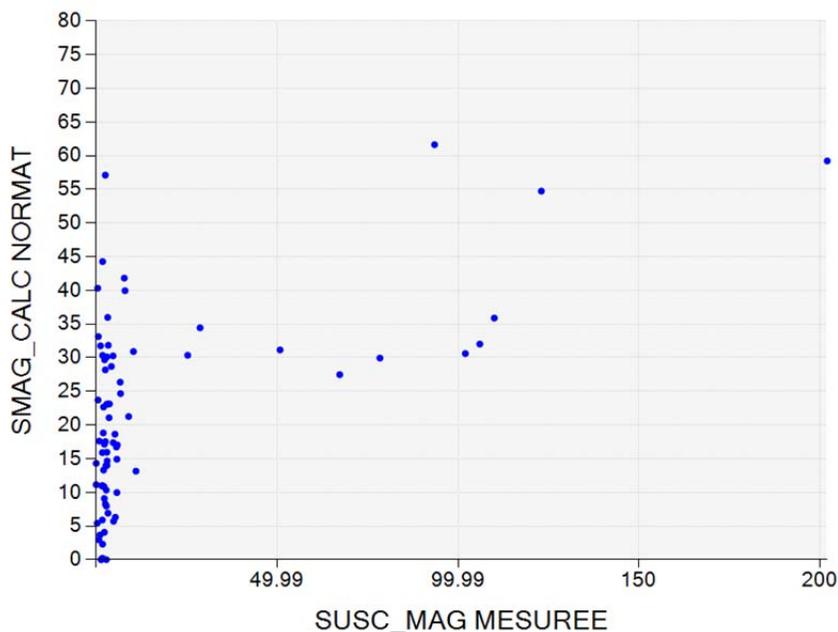


Figure 65. Comparaison entre la susceptibilité magnétique mesurée et estimée par NORMAT, secteur Bracemac (n=75).

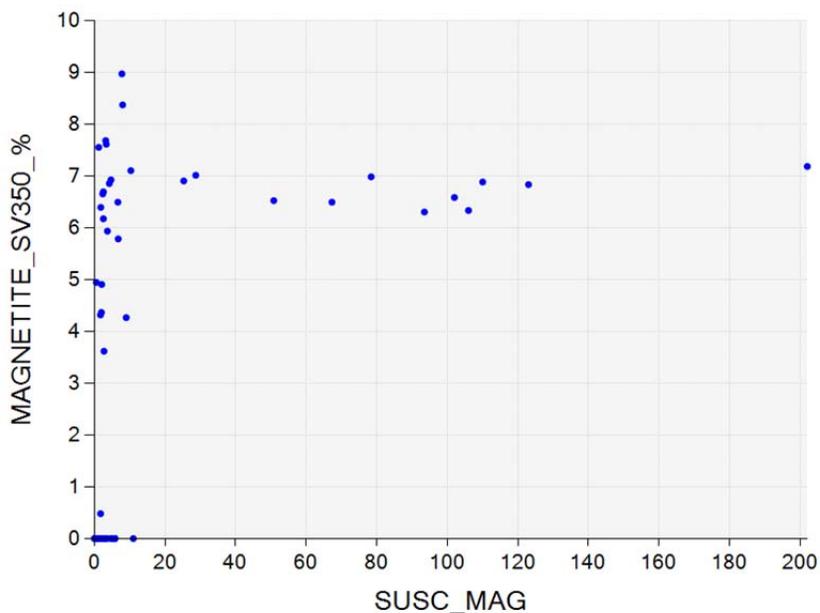


Figure 66. Comparaison entre la susceptibilité magnétique mesurée et magnétite normative 350C, secteur Bracemac (n=75).

Il faut noter que ces données ne contiennent pas le Fe_2O_3 réel analysé. Cette mesure est probablement critique dans l'évaluation du magnétisme de la roche.

7.14.2 Banque de compilation Abitibi

On peut comparer l'évaluation de la densité par NORMAT et par LithoModeleur 350C pour la banque de compilation de l'Abitibi. La corrélation entre les deux évaluations est excellente ($r = 0,97$; **Figure 67**).

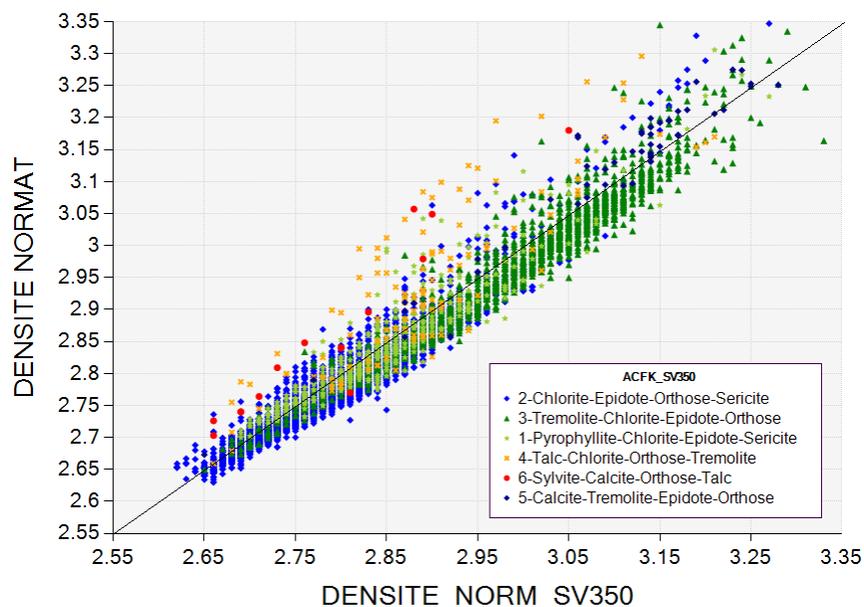


Figure 67. Comparaison entre densité de NORMAT et la norme 350C, banque de compilation Abitibi (n = 7 151).

8. NORME SCHISTE VERT SUPERIEUR 450C

Le faciès identifié ici comme schiste vert supérieur correspond à une température d'environ 450 degrés celsius. La pression est évaluée à environ 2,5 kb (carré vert sur grilles pétrogénétiques; **Figures 5, 6 et 7**).

8.1 Sulfures/sulfates

Les sulfures sont formés à partir du soufre disponible, dans l'ordre suivant: galène, sphalérite, millérite, molybdénite, chalcoppyrite, arsénopyrite, pyrite, anhydrite.

8.2 Carbonates

À une température de 450C, les mêmes carbonates semblent stables qu'à 350C (**Figure 8**). À cette température et avec un $\text{XCO}_2 > 0,03$ (c.-à-d. juste un peu de CO_2 dans le système), le système $\text{CaO} - \text{MgO} - \text{H}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{CO}_2$ montre que la dolomite et la calcite restent stables pour toutes les compositions du tétraèdre (**Figure 68**).

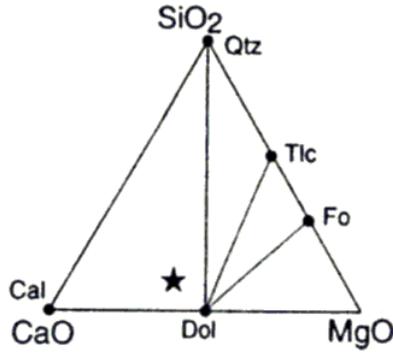


Figure 68. Diagramme SiO_2 -CaO-MgO pour le système $\text{SiO}_2 - \text{CaO} - \text{MgO} - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_2$, faciès schiste vert supérieur 450C pour $X_{\text{CO}_2} > 0,03$ (tiré de Spear, 1993).

8.3 Oxydes de fer et titane

Les oxydes de fer et de titane sont calculés de la même façon que pour la norme schiste vert 350C. Voir la section 7.3 pour les détails.

8.4 Tétrahédre ACMK et assemblages métamorphiques

Plusieurs diagrammes sont utilisés pour former le tétraèdre ACMK et les réactions du faciès schiste vert supérieur.

8.4.1 Diagrammes ACM, ACF et AFM projeté pour l'épidote

Le diagramme ACM pour le faciès schiste vert supérieur est le même que celui du schiste vert moyen (**Figure 10**). Comme pour le faciès schiste vert moyen, on utilise talc-grunérite pour le pôle Mg-Fe. Voir la section 7.4.1 pour les particularités de l'utilisation de ce diagramme dans la norme LithoModeleur. Sur le diagramme ACF (**Figure 69**) on note l'apparition d'une phase supplémentaire, le chloritoïde. Sur un diagramme AFM projeté de l'épidote (**Figure 70**) on constate que le chloritoïde apparaît à partir #Mg initial < 0,65.

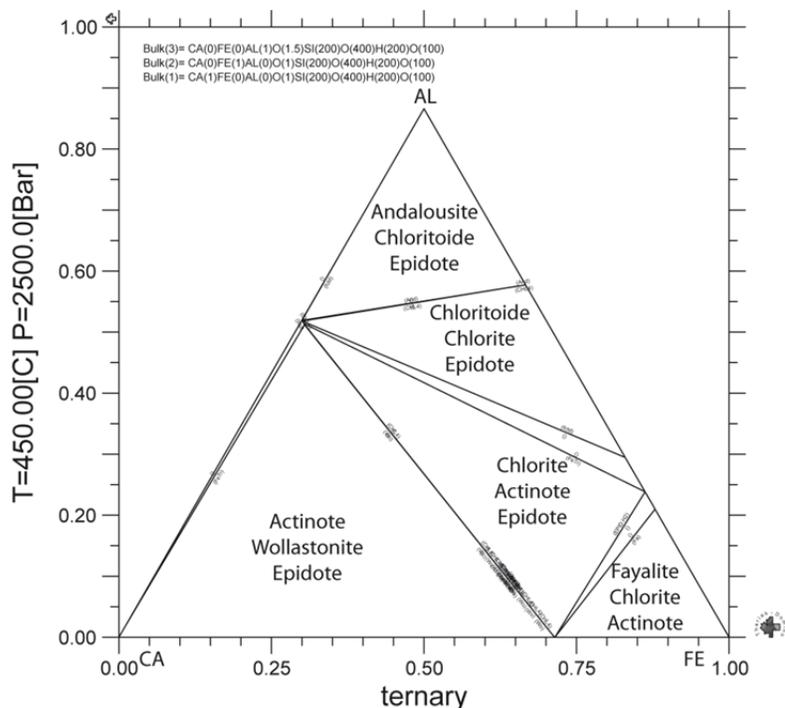


Figure 69. Diagramme ACF (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès schiste vert supérieur 450C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

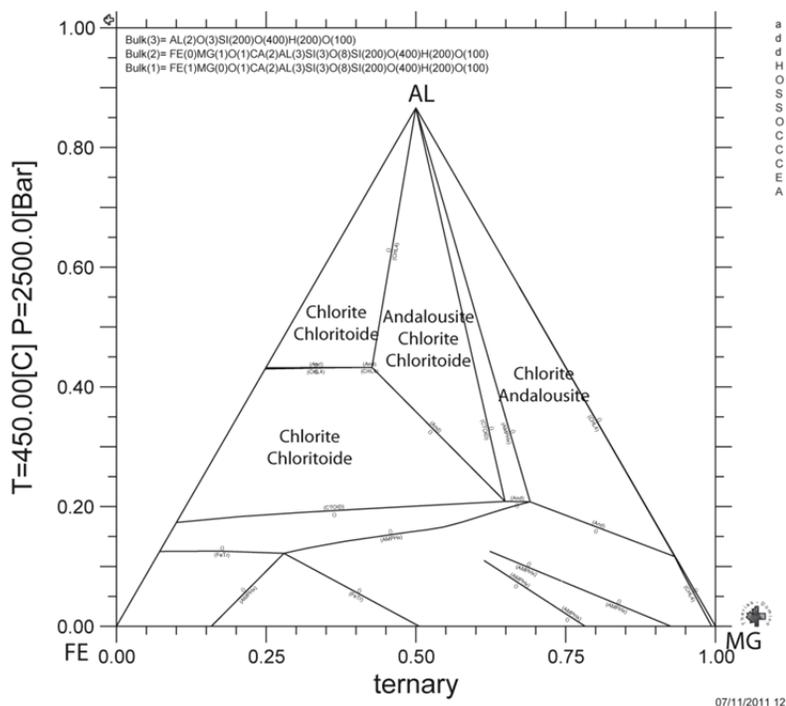


Figure 70. Diagramme AFM (+H₂O, +SiO₂) projeté de l'épidote pour le faciès schiste vert supérieur 450C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

8.4.2 Diagrammes AKM, AKF, AFM projeté de muscovite

Le AKM de ce faciès (**Figure 71**) montre la présence de la biotite magnésienne (phlogopite) qui était absente au faciès schiste vert moyen. Également, la chlorite magnésienne ne coexiste plus avec le feldspath potassique. Pour des compositions ferrifères, le chloritoïde apparaît. Le diagramme AFM (**Figure 71**) nous indique que le chloritoïde apparaît pour des #Mg environ inférieurs à 0,3. Il faut noter finalement que le pôle aluminium est maintenant occupé par l'andalousite plutôt que la pyrophyllite.

Pour représenter l'apparition du chloritoïde en présence de séricite, et les changements des assemblages de AKM à AKF, on effectue d'abord la réaction suivante: si #Mg initial est < 0,3 :

- Andalousite + Chlorite --> Chloritoïde.
- Chlorite + Séricite --> Chloritoïde + Biotite.

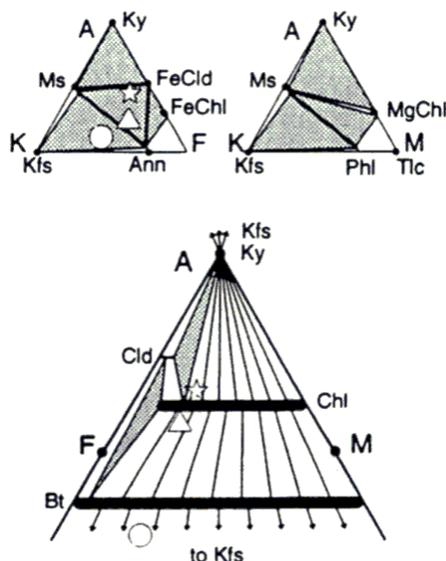


Figure 71. Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès schiste vert supérieur 450C (tiré de Spear, 1993).

8.4.3 Diagramme ANK

Le diagramme ANK pour le faciès schiste vert 450C est le même que celui du faciès schiste vert moyen (**Figure 12**). La paragonite devrait donc être stable ici (et l'être jusqu'à environ 500C selon la pression considérée). Toutefois, on ne peut envisager ici une substitution complète de K-Na dans les minéraux en raison de la présence de la biotite qui elle ne peut inclure Na. Pour simplifier les assemblages et les calculs, la paragonite n'est donc pas considérée ici comme phase stable. Comme une seule phase de silicates sodiques est alors présente (albite), on pourra calculer l'albite avant de faire le tétraèdre ACMK. Le pôle K du tétraèdre ne sera donc pas K+Na mais bien K seulement.

8.4.4 Diagramme AKC

Le diagramme AKC ne se retrouve pas dans la littérature, mais est requis pour compléter correctement le tétraèdre métamorphique. Comme pour le schiste vert 350C, la zoisite est la seule phase considérée sur le pôle Ca-Al pour correspondre au diagramme ACF. Le diagramme

résultant généré par THERIAK avec la banque JUN92.bs (De Capitani et Petrakakis, 2010) est identique à celui du schiste vert 350C (**Figure 72**).

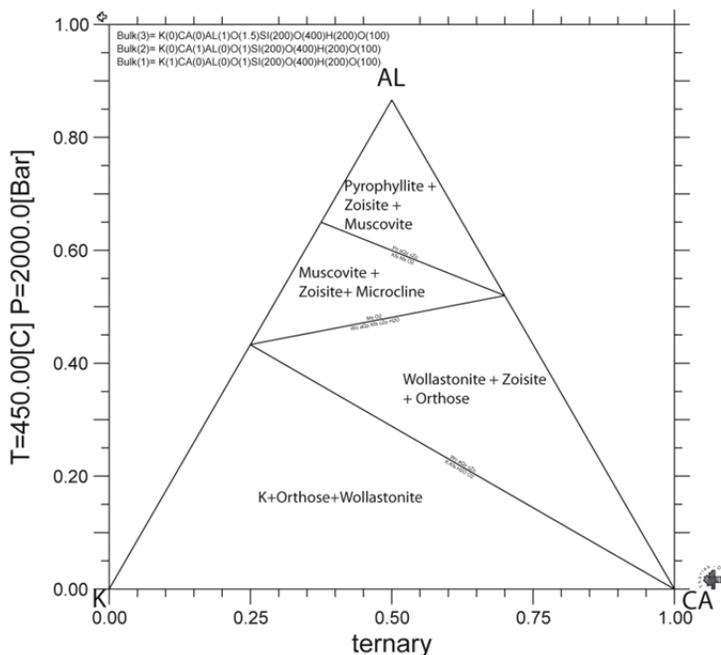


Figure 72. Diagramme AKC (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès schiste vert supérieur 450C, 2 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.

8.4.5 Pôle K et compositions peralcalines

Le pôle K sera formé ici de la sylvite. Comme pour le schiste vert moyen, un déficit en silice éventuel pourra être comblé en décomposant l'albite en néphéline puis le microcline en leucite, si la roche est peralcaline, (K+Na > Al) (voir section 7.4.5 également).

8.4.6 Tétrahédre ACMK

Le tétraèdre ACMK est une combinaison des diagrammes précédents (**Figure 73**). Le tétraèdre comporte 8 assemblages:

1. Calcite – Épidote – Trémolite – Orthose;
2. Trémolite - Épidote - Chlorite – Biotite;
3. Talc – Chlorite – Trémolite – Biotite;
4. Andalousite - Chlorite - Épidote – Séricite;
5. Biotite – Chlorite – Séricite - Épidote;
6. Biotite – Séricite – Orthose - Épidote;
7. Sylvite - Calcite - Talc - Orthose;
8. Trémolite – Orthose – Épidote - Biotite.

Il faut noter que certains minéraux des assemblages précédents comportent deux pôles, qui sont formés selon le #Mg:

- Chlorite: Chlorite (Mg) et Chlorite (Fe)
- Trémolite: Trémolite (Mg) et Ferroactinote (Fe)

- Biotite: Biotite (Mg) et Biotite (Fe)
- Talc: Talc (Mg) et Grunérite (Fe)

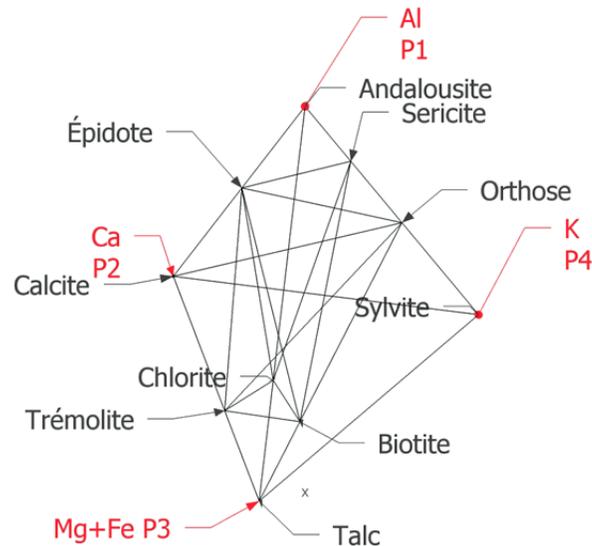


Figure 73. Tétrahédre ACMK pour le faciès schiste vert supérieur 450C.

8.5 Modification de l'assemblage pour #Mg initial

Modification de l'assemblage pour Mg-Fe

Les diagrammes AFM et AKF montrent la présence de chloritoïde pour des compositions ferrifères. Sur le diagramme AFM, on constate que ce minéral apparaît vers un #Mg initial inférieur à 0,3. Si le #Mg initial calculé est inférieur à 0,3, on fait les réactions suivantes, qui représentent le passage du diagramme AKM vers AKF:

- Si #Mg initial < 0,3 et séricite présente
 - ChloriteMgFe + 7,75 Andalousite + 2,5 H₂O --> 10 ChloritoïdeMgFe + 3,25 Quartz
 - 0,516 ChloriteMgFe + 0,516 Séricite --> 2,161 ChloritoïdeMgFe + 2,161 BiotiteMgFe + 0,677 Quartz + 1,709 H₂O
- Si #Mg initial < 0,65 et épidote présente
 - ChloriteMgFe + 7,75 Andalousite + 2,5 H₂O --> 10 ChloritoïdeMgFe + 3,25 Quartz

8.6 Traitement du déficit en SiO₂

Décomposition du talc

Le diagramme SiO₂-CaO-MgO-H₂O (**Figure 74**) pour le faciès schiste vert supérieur 450C est très semblable au schiste vert moyen sauf pour l'apparition d'une phase supplémentaire: la forstérite. Le talc (Tlc) est la phase qui se retrouve sur le pôle Mg+Fe du tétraèdre ACMK. La trémolite (Tr) est également présente sur le tétraèdre ACMK. Si on a un déficit en SiO₂, la serpentine (ici antigorite, Atg) est la première phase créée. Par la suite, on crée la serpentine si le déficit n'est pas comblé, puis la forstérite et finalement la brucite.

La réaction de décomposition du talc en serpentine est la suivante:



La quantité exacte de talc est décomposée pour combler le déficit en SiO_2 . La serpentine est ainsi incompatible avec le quartz. Si, après toute la décomposition du talc en serpentine, on a encore un déficit, on peut décomposer la serpentine en forstérite selon la réaction:



Finalement, on peut décomposer la forstérite en brucite si le déficit n'est toujours pas comblé :

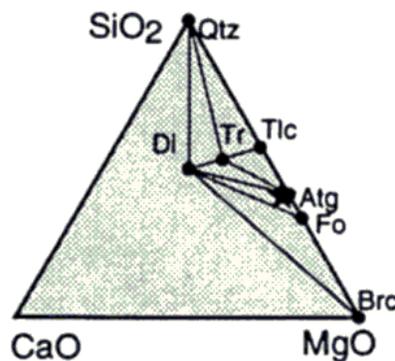
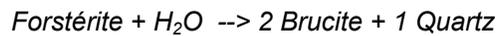


Figure 74. Diagramme SiO_2 - CaO - MgO - H_2O pour le faciès schiste vert supérieur 450C (tiré de Spear, 1993).

Décomposition de l'orthose et de l'albite

Pour combler le déficit en Si, on peut également décomposer l'orthose et l'albite en leucite et néphéline. Cette décomposition se fait dans les mêmes conditions qu'au faciès schiste vert moyen (voir la section 7.6).

8.7 Liste complète des minéraux du faciès

- Minéraux accessoires: chromite, apatite, sphène;
- Sulfures: pyrite, chalcopryrite, sphalérite, galène, millérite, arsénopyrite;
- Carbonates: calcite, dolomite, ankérite, sidérite, magnésite;
- Oxydes Fe-Ti: hématite, magnétite, rutile, ilménite;
- Minéraux du diagramme ACMK: andalousite, chloriteMg, chloriteFe, biotiteMg, biotiteFe, talc, grunérite, trémolite, ferroactinote, calcite, épidote, feldspath-K, muscovite, sylvite;
- Autres minéraux: quartz, albite, chloritoïdeMg, chloritoïdeFe, serpentine, brucite, forstérite, néphéline, leucite, diaspore.

8.8 Indices d'altération

Les indices d'altération suivants sont proposés pour le faciès schiste vert supérieur 450C. Il faut noter qu'ici les indices en phyllosilicates sont calculés également SANS le CO₂ dans la norme, comme pour la norme 350C (voir section 7.9).

- ALT_CHLO: (Chlorite Mg * 0,75 + Chlorite Fe) / *Tous*;
Note: coefficient de 0,75 pour chlorite Mg pour diminuer l'indice de chloritisation dans le cas de roches très magnésiennes non-altérées.
- ALT_SER: Séricite / *Tous*;
- ALT_BIOT: (BiotiteMg+ BiotiteFe) / *Tous*
- ALT_AND: Andalousite / *Tous*;
- ALT_CTD: (ChloritoïdeMg + ChloritoïdeFe) / *Tous* ;
- ALT_PHYLLO: (Chlorite Mg*0,75 + Chlorite Fe + Séricite + Andalousite + BiotiteMg + BiotiteFe + ChloritoïdeMg + ChloritoïdeFe) / *Tous* ;
- ALT_CARB: (Calcite + Dolomite + Ankérite + Magnésite + Sidérite) / *Tous Ca-Mg-Fe*;

« *Tous* » se définit comme la somme de tous les minéraux sauf le quartz et les sulfures.

Tous Ca-Mg-Fe: tous minéraux contenant Fe, Mg ou Ca, sauf sulfures.

9. NORME AMPHIBOLITE INFÉRIEUR-MOYEN, 575C

Le faciès identifié ici comme amphibolite inférieur-moyen correspond à une température d'environ 450 degrés Celsius. La pression est évaluée à environ 2,75 kb (carré vert sur grilles pétrogénétiques; **Figures 5, 6 et 7**). Ceci correspond à un gradient géothermique élevé.

9.1 Sulfures/sulfates

Les sulfures sont formés à partir du soufre disponible, dans l'ordre suivant: galène, sphalérite, millérite, molybdénite, chalcopryrite, arsénopyrite, pyrite, anhydrite.

9.2 Carbonates

À une température de 575C, les carbonates de Ca-Fe-Mg (ankérite-dolomite) ne coexistent pas avec le quartz (**Figure 75**). Comme les compositions où le quartz est sursaturé représentent la grande majorité des types de roches usuelles (volcaniques mafiques à felsiques, sédimentaires clastiques), les carbonates de Ca-Fe-Mg ne seront pas inclus dans la norme à 575C.

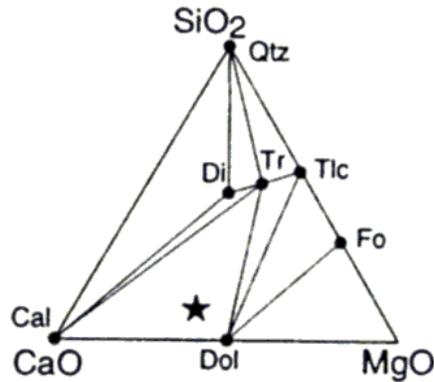


Figure 75. Diagramme $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO}$ pour le système $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-H}_2\text{O-CO}_2$, faciès amphibolite inférieur-moyen 575C pour $X_{\text{CO}_2} > 0,07$ (tiré de Spear, 1993).

9.3 Oxydes de fer et titane

Les oxydes de fer et de titane sont calculés de la même façon que pour la norme schiste vert 350C. Voir la section 7.3 pour les détails.

9.4 Tétrahédre ACMK et assemblages métamorphiques

Plusieurs diagrammes sont utilisés pour former le tétraèdre ACMK et les réactions du faciès amphibolite inférieur à moyen.

9.4.1 Diagramme ACM, ACF et AFM projeté de l'anorthite

Le diagramme ACM pour le faciès amphibolite inférieur-moyen a été généré grâce au logiciel THERIAK, avec la base thermodynamique JUN92.bs. Le quartz et l'eau sont considérés en excès. La **Figure 76** montre ce diagramme et les différentes phases stables. Il faut noter que dans la norme, l'anthophyllite remplace le talc pour le pôle magnésien, ceci pour mieux représenter les assemblages observés dans les roches pauvres en Ca (Spear, 1993).

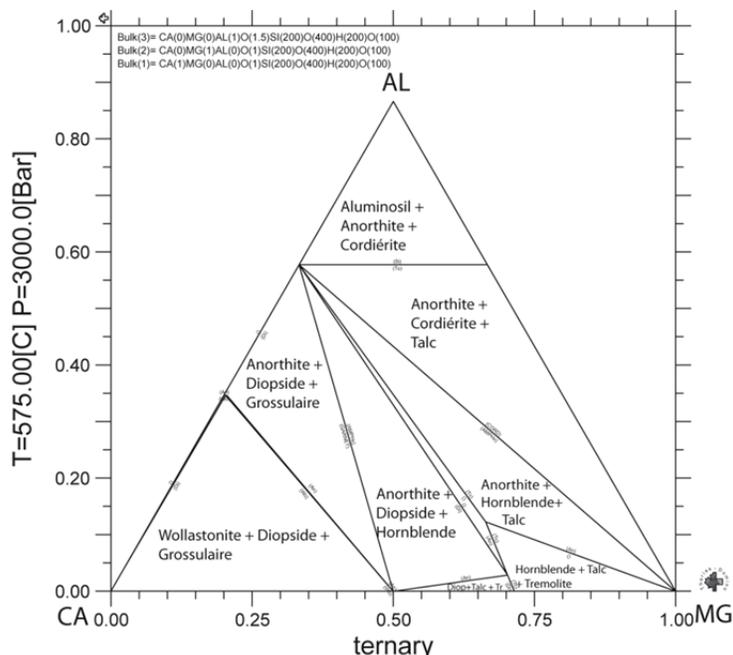


Figure 76. Diagramme ACM (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 3kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010). Voir le texte pour les conditions.

Sur ce diagramme, on trouve la trémolite en plus de la hornblende comme amphiboles. Cependant, la trémolite occupe un champ limité de stabilité sur le diagramme, étant limitée à des compositions très riches en Ca-Mg-Fe et très pauvres en Al. Pour simplifier les assemblages, la trémolite est supprimée ici. La calcite remplace aussi la wollastonite.

Le diagramme ACF de ce faciès montre que le grenat almandin apparaît dans des conditions ferrifères (**Figure 77**). Un diagramme AFM projeté de l'anorthite (**Figure 78**), permet de constater que l'almandin apparaît à #Mg initial < 0,40 environ.

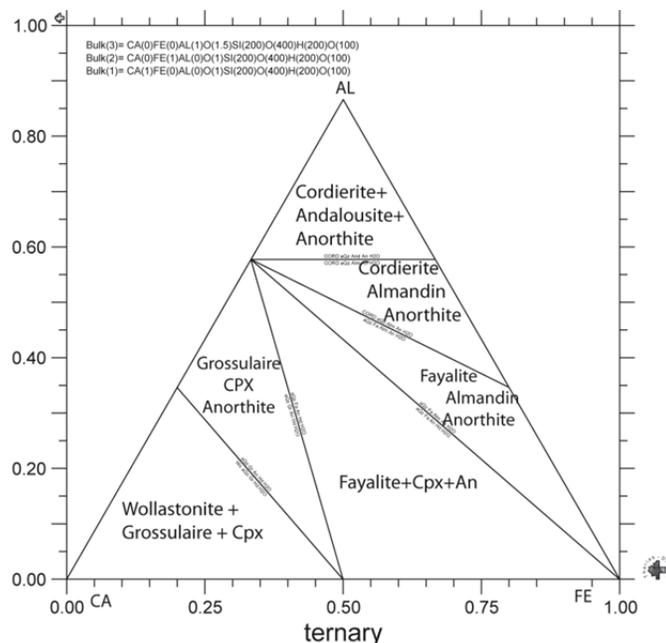


Figure 77. Diagramme ACF (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 2,5 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

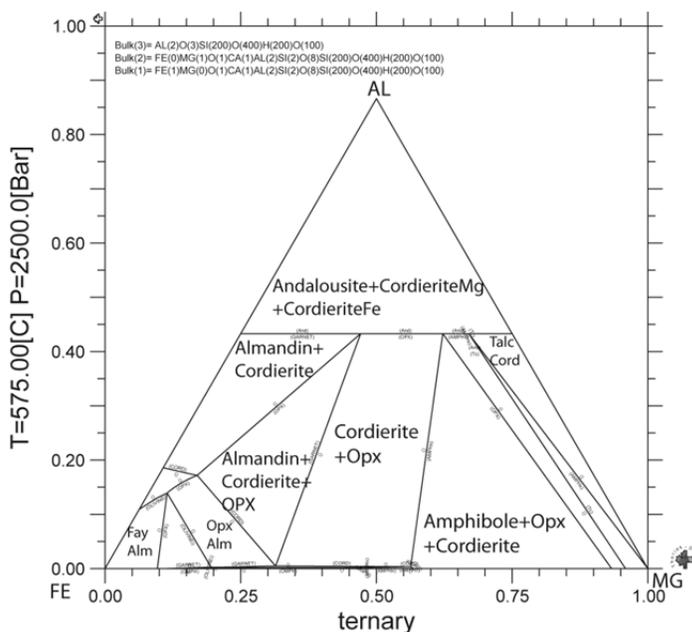


Figure 78. Diagramme AFM (+H₂O, +SiO₂) projeté de l'anorthite, pour le faciès amphibolite inférieur-moyen 575C, 2,5 kb. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

9.4.2 Diagrammes AKM, AKF et AFM projeté de muscovite

Le AKM de ce faciès (**Figure 79**) montre la présence de la cordiérite. On constate sur le diagramme AFM correspondant que la cordiérite n'est stable que pour des #Mg initial > 0,55 en

présence de muscovite. Le diagramme AKF montre la présence de la staurotide et du grenat almandin pour des compositions ferrifères. Sur le diagramme AFM, on voit que la staurotide apparaît pour un #Mg initial < 0,3, avec la staurotide apparaissant avant le grenat almandin. Des réactions peuvent permettre de passer d'un état vers un autre et sont présentées plus bas.

Il faut noter finalement que le pôle aluminium est occupé par l'andalousite.

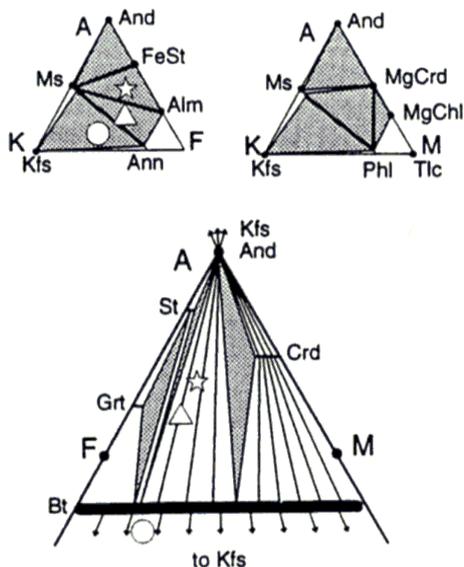


Figure 79. Diagrammes AKF, AKM et AFM projeté de muscovite pour le faciès amphibolite inférieur moyen 575C 2.75 kb (tiré de Spear, 1993).

9.4.3 Diagramme ACM, projeté de muscovite

La présence de phases se plaçant au centre ou sur les arêtes des diagrammes ternaires soulève la question de la compatibilité de ces phases avec les autres diagrammes ternaires. La question de la stabilité des phases à Ca-Mg (diopside, hornblende) avec celles à K-Al-Mg (biotite, muscovite, feldspath-K) est particulièrement importante.

Pour examiner la stabilité de ces phases, un diagramme ACM a été réalisé par le logiciel THERIAK (données thermodynamiques JUN92.bs), projeté à partir de la muscovite comme le sont réalisés les diagrammes AFM (De Capitani et Petrakakis, 2010). Ce diagramme (**Figure 80**) permet donc d'examiner la stabilité des phases potassiques et calciques-magnésiennes.

On constate sur ce diagramme que la hornblende, le diopside, le grenat grossulaire, et la wollastonite/calcite sont incompatibles avec la muscovite. Le grossulaire et la wollastonite/calcite sont incompatibles avec la biotite. Ces informations sont considérées dans la construction du tétraèdre ACMK.

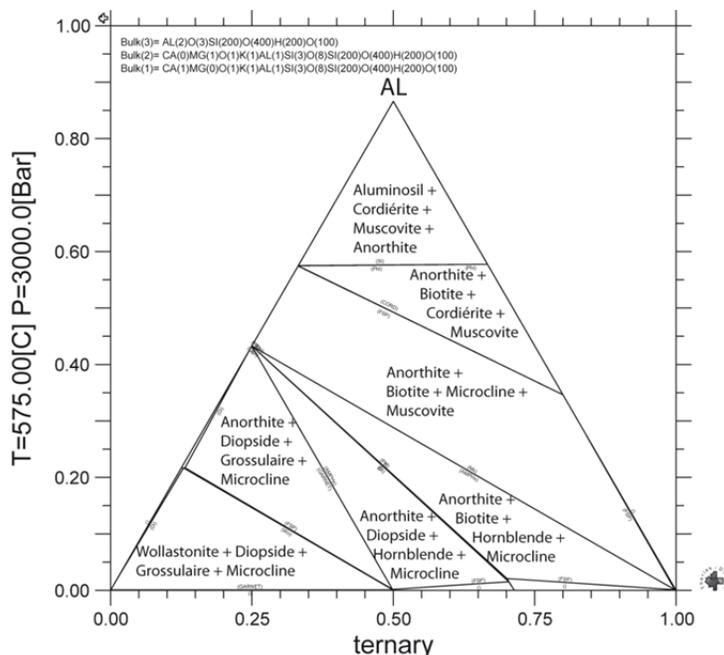


Figure 80. Diagramme ACM (+H₂O, +SiO₂) projeté à partir de la muscovite, faciès amphibolite inférieur-moyen 575C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

9.4.4 Diagramme ANK

Le diagramme ANK pour l'amphibolite 575C montre que la paragonite n'est plus stable à ce faciès (**Figure 81**). La seule phase sodique est donc l'albite dans ce faciès. On simplifiera donc le tétraèdre pour n'avoir que K pour le 4e pôle plutôt que K+Na comme au faciès schiste vert.

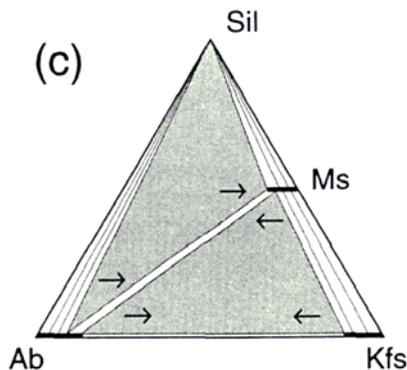


Figure 81. Diagramme ANK pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C. Tiré de Spear, 1993.

9.4.5 Diagramme AKC

Le diagramme AKC de ce faciès (**Figure 82**) a été généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010), avec la banque thermodynamique JUN92.bs. Ce diagramme montre la stabilité des phases Ca-Al avec les phases à K-Al.

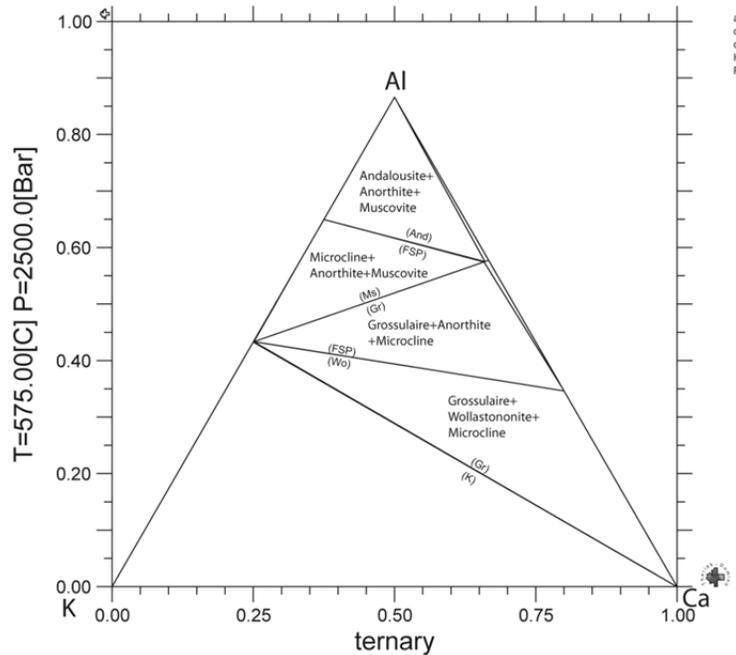


Figure 82. Diagramme AKC (+H₂O, +SiO₂) pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C. Généré par le logiciel THERIAK (De Capitani et Petrakakis, 2010).

9.4.6 Pôle K et compositions peralcalines

Le pôle K sera formé ici de la sylvite. Comme pour les autres faciès métamorphiques, un déficit en silice éventuel pourra être comblé en décomposant l'albite en néphéline puis le microcline en leucite, si la roche est peralcaline, (K+Na > Al) (voir section 7.4.5 également).

9.4.7 Tétrahédre ACMK

Le tétraèdre ACMK est une combinaison des diagrammes ACF et AKM principalement (**Figure 83**). Le tétraèdre comporte 12 assemblages:

1. Calcite - Diopside - Grossulaire - Microcline;
2. Anorthite - Diopside - Grossulaire - Microcline;
3. Anorthite - Diopside - Hornblende - Microcline;
4. Anorthite - Anthophyllite - Hornblende - Biotite;
5. Anorthite - Anthophyllite - Cordiérite - Biotite;
6. Andalousite - Anorthite - Cordiérite - Muscovite;
7. Anthophyllite - Diopside - Hornblende - Biotite;
8. Anorthite - Biotite - Cordiérite - Muscovite;
9. Anorthite - Biotite - Microcline - Muscovite;
10. Anorthite - Biotite - Hornblende - Microcline;
11. Biotite - Diopside - Hornblende - Microcline;
12. Anthophyllite - Calcite - Microcline - Sylvite;

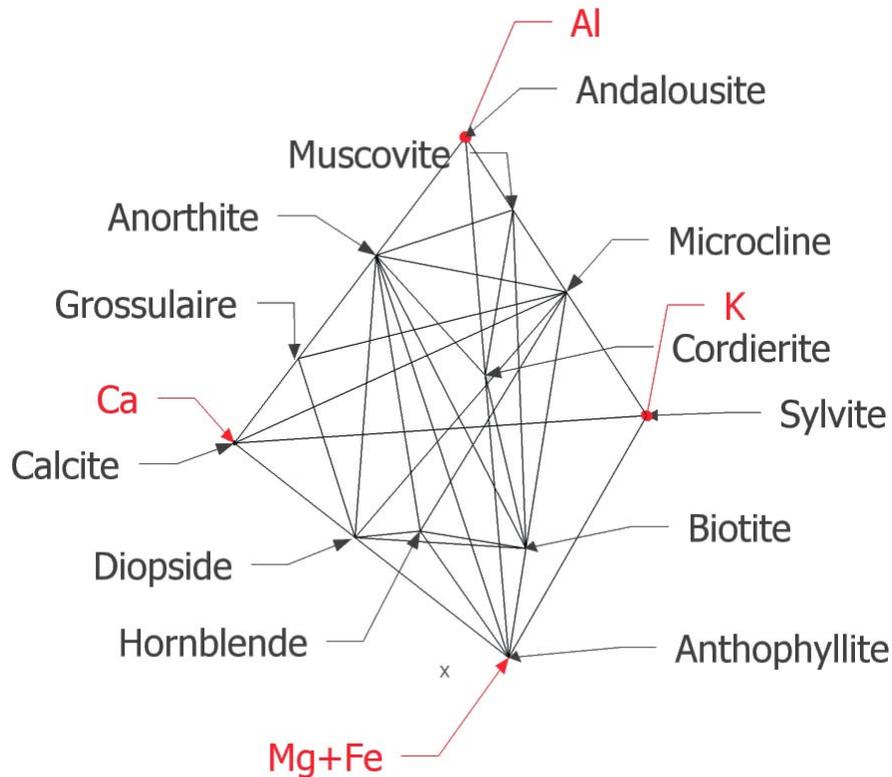


Figure 83. Diagramme ACMK pour le faciès amphibolite inférieur-moyen, 575C.

9.5 Modification de l'assemblage pour #Mg

Modification de l'assemblage pour Mg-Fe

Le diagramme AKF et AFM projeté de muscovite (**Figure 79**) montre l'apparition du grenat almandin et de la staurotide pour des compositions ferrifères avec muscovite, ainsi que la disparition de la cordiérite. De même, le diagramme ACF et AFM projeté de l'anorthite montre que l'almandin est stable pour des compositions ferrifères avec anorthite. Selon les conditions suivantes, on effectue alors les réactions dans la séquence donnée plus bas. Il faut noter que si #Mg initial < 0,33, on effectue d'abord les réactions de destruction de la cordiérite. Dans le cas des minéraux ferro-magnésiens, chaque unité de minéral impliqué est en fait divisée entre le pôle Mg et Fe selon le #Mg (non initial). Par exemple, si une réaction indique 2 Biotite et que le #Mg est 0,25, alors ce sera en fait 0,5 Biotite Mg et 1,5 Biotite Fe qui seront impliquées.

- Si muscovite > 0
 - si #Mg initial < 0,55 alors
 - 7,5 Cordiérite + 5 Muscovite --> 5 Biotite + 20 Andalousite + 17,5 Quartz;
 - 3,5 Cordiérite + H₂O --> Anthophyllite + 7 Andalousite + 1,25 H₂O;
 - Si #Mg initial < 0,3
 - 9 Andalousite + 0,286 Anthophyllite + 1,714 H₂O --> Staurotide + 2,785 Quartz;
 - 15,5 Andalousite + 2 Biotite + 6 H₂O --> 3 Staurotide + 2 Muscovite + 3,5 Quartz;

- Staurotide + 1,64 Anthophyllite --> 4,5 Almandin + 3,643 Quartz + 3,643 H₂O;
- Staurotide + 3,833 Biotite + 9,5 Quartz --> 4,5 Almandin + 3,833 Muscovite + 3,833 H₂O;
- Si anorthite > 0
 - si #Mg initial < 0,40 alors
 - 2 Cordiérite+ 5/7 Anthophyllite --> 3 Almandin + 63/7 Quartz + 5/7 H₂O.

9.6 Traitement de déficit en SiO₂

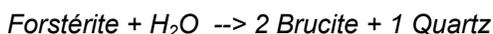
Décomposition du talc

Le diagramme SiO₂-CaO-MgO-H₂O pour le faciès amphibolite 575C montre la disparition de la serpentine comme phase stable dans ce faciès. Notons que dans le cas de la norme, tel que mentionné précédemment, on remplace le talc par l'anthophyllite. Pour combler un déficit éventuel en silice, on pourra donc décomposer l'anthophyllite en forstérite, puis la forstérite en brucite.

La réaction de décomposition du talc en serpentine est la suivante:



La quantité exacte de talc est décomposée pour combler le déficit en SiO₂. Si le déficit n'est pas comblé après avoir détruit tout le talc, on peut décomposer la forstérite en brucite:



Décomposition de l'orthose et de l'albite

Pour combler le déficit en Si, on peut également décomposer l'orthose et l'albite en leucite et néphéline. Cette décomposition se fait dans les mêmes conditions qu'au faciès schiste vert moyen (voir la section 7.6).

9.7 Liste complète des minéraux du faciès

- Minéraux accessoires: chromite, apatite, sphène;
- Sulfures: pyrite, chalcopyrite, sphalérite, galène, millérite, arsénopyrite;
- Carbonates: calcite;
- Oxydes Fe-Ti: hématite, magnétite, rutile, ilménite;
- Minéraux du diagramme ACMK: andalousite, biotiteMg, biotiteFe, cordiériteFe, cordiériteMg, anthophylliteMg, anthophylliteFe, muscovite, microcline, sylvite, hornblendeMg, hornblendeFe, diopside, hédénbergite, grossulaire, anorthite;
- Autres minéraux: quartz, albite, staurotideFe, staurotideMg, almandin, pyrope, brucite, forstérite, néphéline, leucite, diaspore.

9.8 Indices d'altération

Les indices d'altération suivants sont proposés pour le faciès 575C. Il faut noter qu'ici les indices en phyllosilicates ne sont pas calculés sans le CO₂ dans la norme.

- ALT_MUSCV: Muscovite / Tous;
- ALT_BIOT: (BiotiteMg+ BiotiteFe) / Tous;

- ALT_AND: Andalousite / *Tous*;
- ALT_STD_GRT: (Staurotide Mg + Staurotide Fe + Almandin + Pyrope) / *Tous*;
- ALT_CRD_ANTH: (CordiériteMg + CordiériteFe + AnthophylliteMg + AnthophylliteFe) / *Tous*;

« *Tous* » se définit comme la somme de tous les minéraux sauf le quartz et les sulfures.

9.9 Comparaisons entre minéralogie normative et minéralogie observée

9.9.1 Altérations SMV métamorphisées, gîte Montauban, Québec

Le premier exemple retenu concerne les altérations volcanogènes métamorphisées au faciès amphibolite ($620 \pm 50^\circ\text{C}$ et $6,5 \pm 1$ kb; Bernier et MacLean, 1993) au gîte Montauban. Bernier et MacLean (1993) donnent des analyses typiques de différents faciès d'altération. Ces données ont été traitées par la norme LithoModeleur 575C.

La **Figure 84** montre l'anthophyllite normative pour différents faciès. Comme attendu, l'anthophyllite est abondante dans le faciès à cordiérite-anthophyllite, qui représente le centre de la zone d'altération. La cordiérite normative de ce même assemblage et de celui à biotite-cordiérite est également bien reproduite (**Figure 85**). L'andalousite normative apparaît exclusivement dans le faciès à nodules de sillimanite (**Figure 86**). La biotite normative est présente dans tous les faciès, tel qu'observé mais est particulièrement abondante dans le faciès à biotite-cordiérite (**Figure 87**). Il faut noter finalement que bien que le grenat soit noté dans un des faciès, aucun grenat normatif n'apparaît. Ceci peut être dû au fait que la température de la norme est de 575°C , ce qui est à la limite inférieure de l'estimation de la température du métamorphisme à Montauban ($625 \pm 50^\circ\text{C}$) et que la pression est plus élevée que celle de la norme.

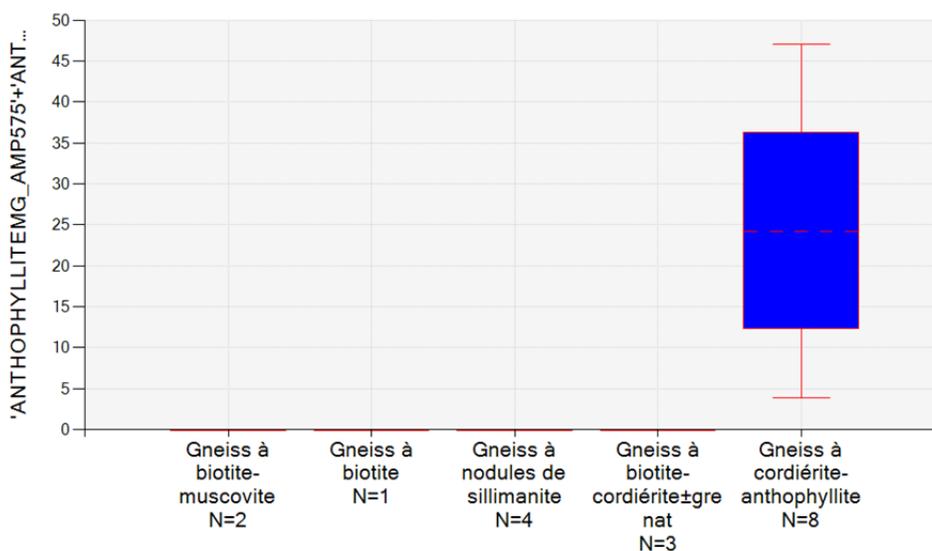


Figure 84. Anthophyllite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).

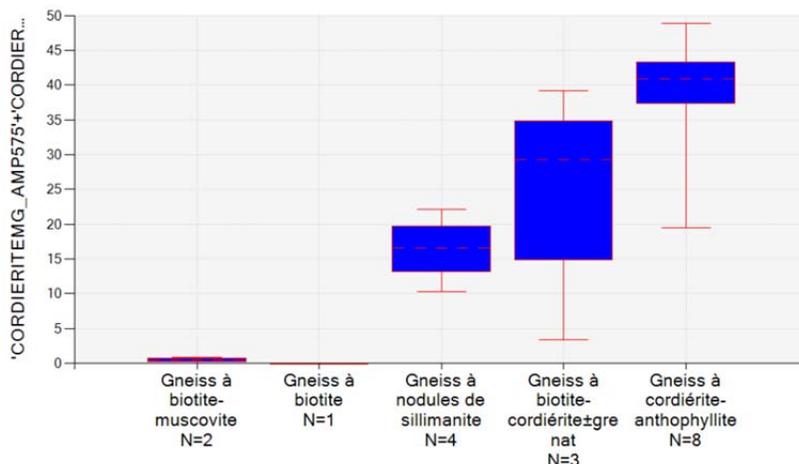


Figure 85. Cordiérite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).

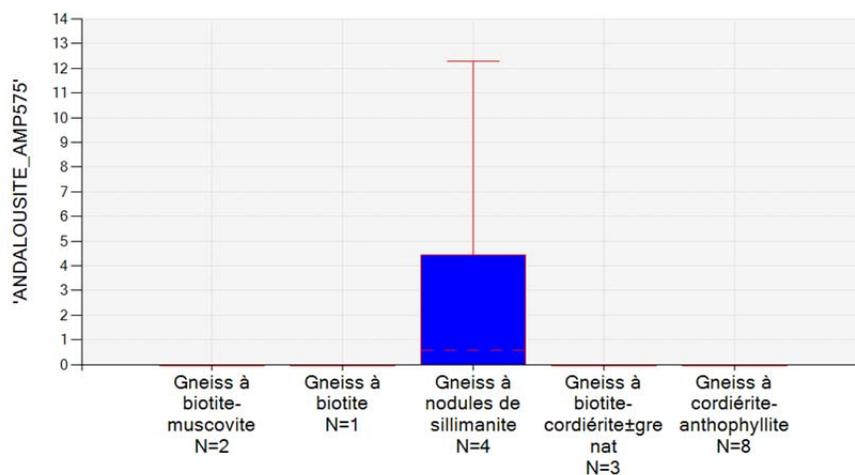


Figure 86. Andalousite de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).

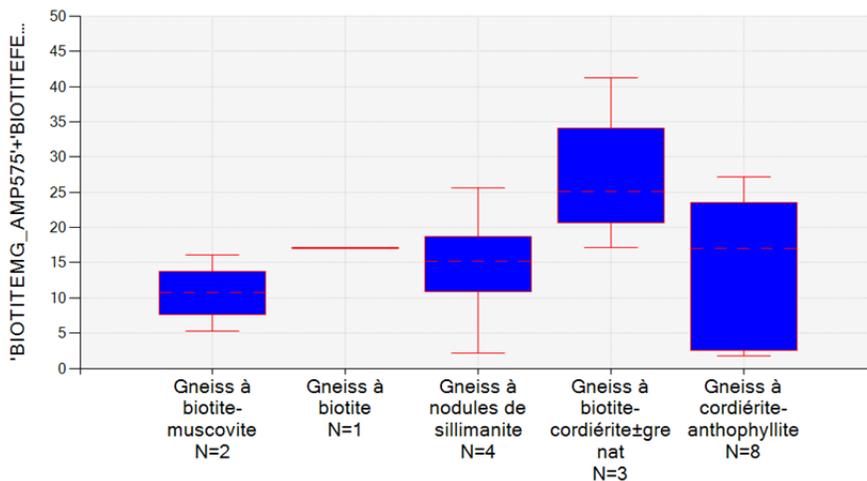


Figure 87. Biotite normative de la norme 575C selon le faciès, gîte Montauban (données de Bernier et MacLean, 1993).

9.9.2 Altérations SMV métamorphisées, mine Geco, Ontario

Cet exemple provient de l'ancienne mine Geco située en Ontario, dans la ceinture de Manitouwadge. Il s'agit d'un gisement de Zn-Cu de type SMV métamorphisé au faciès amphibolite. Les données de Pan et Fleet (1995) ont été traitées par la norme LithoModèleur 575C.

Les **Figures 88 et 89** montrent la cordiérite normative et l'anthophyllite selon l'assemblage réel observé. On constate que la cordiérite et l'anthophyllite sont les plus abondantes dans le faciès à cordiérite-orthoamphibole et dans deux échantillons de dyke. Ces dykes sont décrits comme des roches à cordiérite-orthoamphiboles riches en grenat. La **Figure 90** montre le grenat normatif. On constate qu'un seul des deux dykes à grenat contient du grenat normatif, et que les deux amphibolites à grenat n'ont pas de grenat normatif. Sur la **Figure 91**, on voit que le clinopyroxène normatif apparaît comme prévu dans le faciès calcosilicaté contenant réellement du clinopyroxène, grenat grossulaire et amphibole calcique (Pan et Fleet, 1995).

Pour Geco, la cordiérite, l'anthophyllite et le clinopyroxène semblent donner des réponses similaires à ce qui est attendu. La quantité de grenat normative est toutefois inférieure à ce qui était attendu. Ceci pourrait être dû au fait que les conditions métamorphiques estimées à Geco sont de 625C et 3-6 kbar, ce qui est plus élevé que la norme.

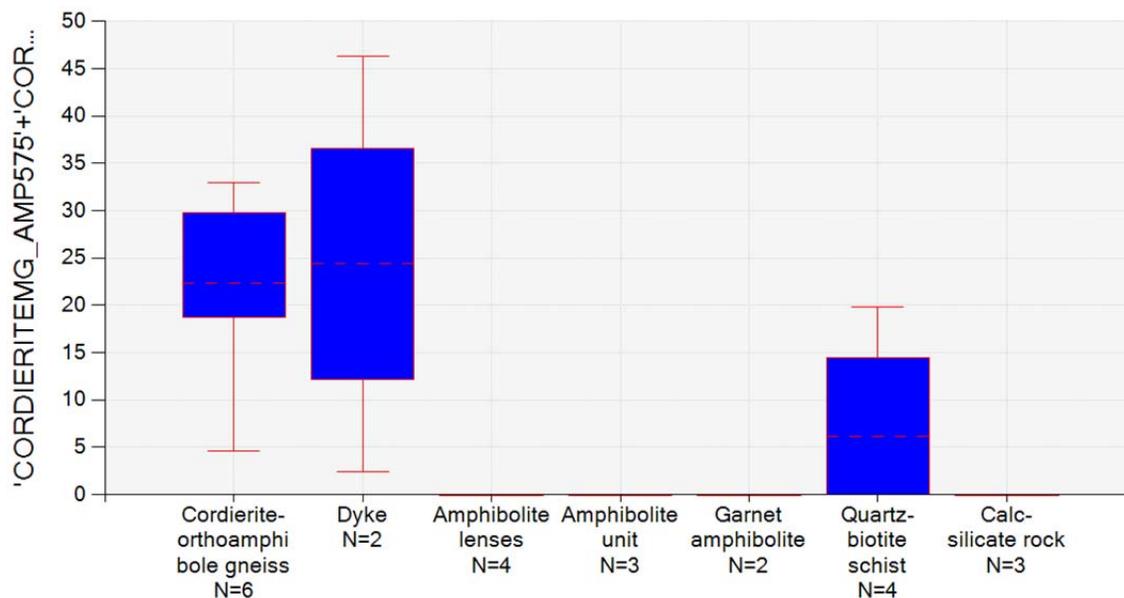


Figure 88. Cordiérite normative 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).

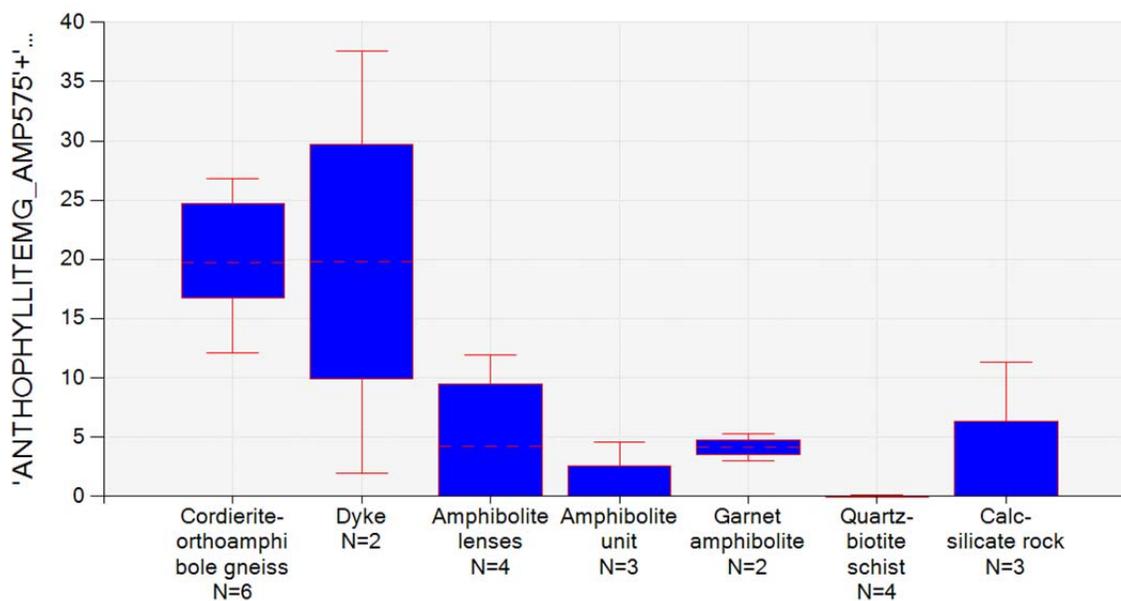


Figure 89. Anthophyllite normative 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).

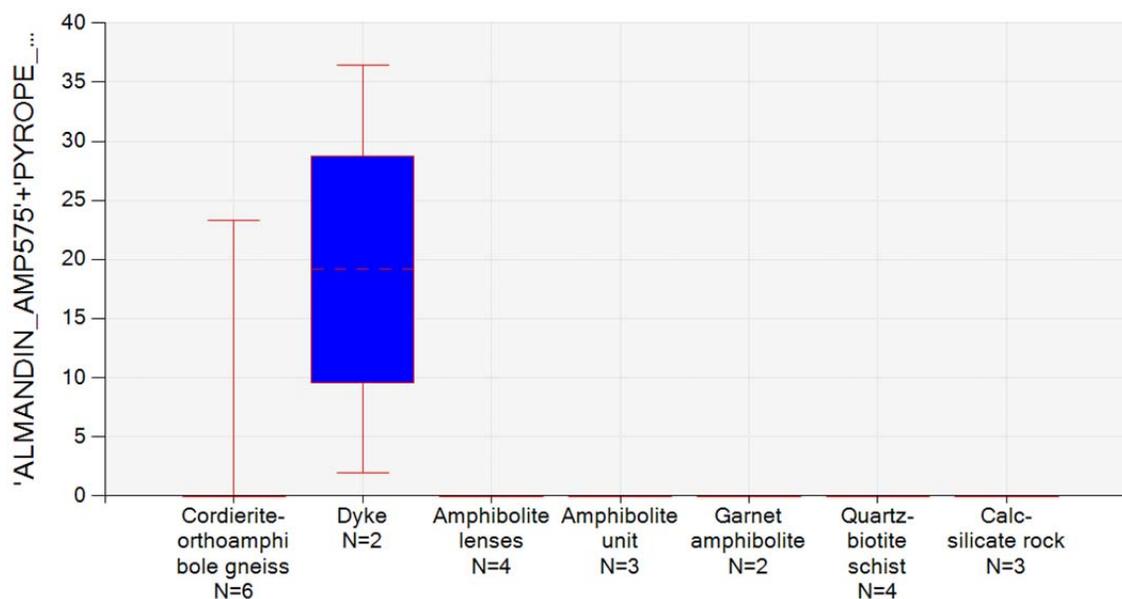


Figure 90. Grenat normatif 575C selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).

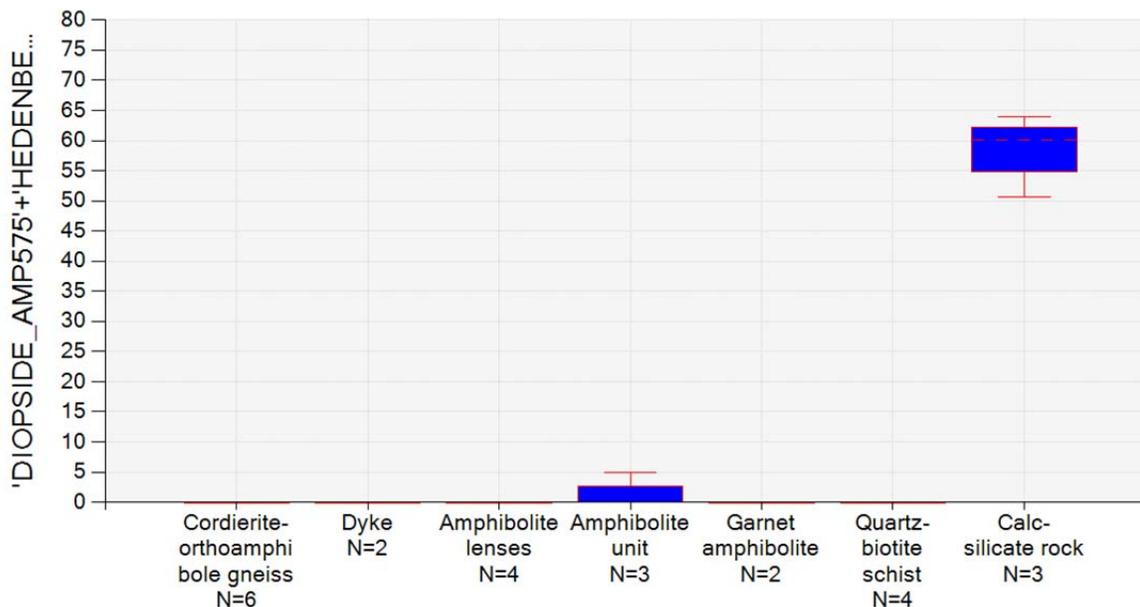


Figure 91. Clinopyroxène normatif selon le faciès, mine Geco (données de Pan et Fleet, 1995).

10. CONCLUSIONS

La norme LithoModeleur permet de calculer rapidement la minéralogie normative pour trois faciès métamorphiques distincts. L'utilisation de tétraèdres métamorphiques et de systèmes d'équations linéaires simplifie grandement le calcul de la norme. Plusieurs indices d'altération permettent d'évaluer rapidement l'altération dans les roches ignées. Dans le futur, d'autres faciès peuvent être ajoutés au calcul de la norme.

REMERCIEMENTS

Les personnes suivantes ont contribué de façon importante à ce projet: Stéphane Faure, Benoit Lafrance et Silvain Rafini pour plusieurs discussions constructives et tests de la norme, Denys Vermette pour les données de la mine Duquesne, Geneviève Boudrias, Réal Daigneault et Julie Menier pour la lecture critique et pour l'édition du document.

RÉFÉRENCES

- Barth, T.F.W., 1959. Principles of classification and norm calculations of metamorphic rocks. *Journal of geology* 67, p. 135-152.
- Bernier, L., et MacLean, W.H., 1993. Litho-geochemistry of a metamorphosed VMS alteration zone at Montauban Grenville Province, Quebec. *Exploration and Mining Geology*, vol 2. pp. 367-386.
- Bierlein, F.P., Smith, P.K., 2003. The Touquoy Zone deposit: an exemple of "unusual" orogenic gold mineralization in the Meguma terrane, Nova Scotia, Canada. *Journal canadien des sciences de la terre* 40, p. 447-466.
- Condie, K.C., 1993. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chemical Geology* 104, p.1-37.
- Cross, W., Iddings, J.P., Pirrson, L.V. et Washington, H.S., 1902. A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks. *Journal of geology* 10, p. 555-590.
- De Capitani, C. et Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. *American Mineralogist* 95, p. 1006-1016.
- de Jong, E. J., 1979. Nucleation - a review. In: de Jong, E. J., Jancic, S. J. (Eds.), *Industrial Crystallization* 78. New York: North-Holland Publishing Company, pp. 3-18
- Foucault, A., Raoult, J.F., 1992. *Dictionnaire de géologie*. 3e édition.
- Humphries, S.E., Alt, J.C., Teagle, D.A.H., et Honnorez, J.J., 1998. Geochemical changes during alteration of basement in the stockwork beneath the active TAG hydrothermal mound. *Proceedings of the ocean drilling program, Scientific Results* 158, p. 255-276.
- Galley, A., Bailes, A., Hillary, E., Taylor, B., 2009. Hydrothermal alteration study of the VMS-hosting Paleoproterozoic Bear Lake volcanic suite, Flin Flon Belt, Northern Manitoba. *Commission Géologique du Canada, Dossier public* 6054.
- Kishida, A., Kerrich, R., D., 1987. Hydrothermal alteration zoning and gold concentration at the Kerr-Addison lode gold deposit, Kirkland Lake, Ontario. *Economic Geology* #82.
- Le Maitre, R.W., 1976. The chemical variability of some common igneous rock. *Journal of Petrology* 17, p.589-639.
- Love, D.A., et Robert, R.G., 1991. The geology and geochemistry of gold mineralization and associated alteration at the Rundle gold deposit, Abitibi subprovince, Ontario. *Economic Geology* 86, p.644-666.
- Pan, Y., et Fleet, M.E., 1995. Geochemistry and origin of cordierite-orthoamphibole gneiss and associated rocks at an Archean volcanogenic massive sulphide camp: Manitouwadge, Ontario, Canada. *Precambrian Research* 74, 1-2, p.73-89.
- Piché, M., et Jébrak, M., 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 82, p. 59-77.
- Pruseth, K., 2009. Calculation of the CIPW norm: new formulae. *Journal of Earth Science Systems* 118 no 1, p. 101-113.

- Riverin, G., et Hodgson, C.J., 1980. Wall-Rock alteration at the Millenbach Cu-Zn mine, Noranda, Quebec. *Economic Geology* 75, p. 424-444.
- Robert, F., 1995. Filons de quartz-carbonates aurifères. Dans: *Géologie des types de gîtes minéraux du Canada*, p. 387-404.
- Ross, P.S., Bourke, A., Fresia, B., et Debreil, J.A., 2011. Analyse multiparamétrique à haute résolution de carottes de forages dans la région de Matagami - Partie 2, résultats préliminaires. Document SIGEOM GM-65522.
- Roussy, J., 2003. Relations entre la distribution de l'or, la structure, la composition des veines et de l'altération hydrothermale à la mine Beaufor, Val d'Or, Québec. Mémoire de maîtrise de l'Université Laval, 311p.
- Schardt, C., Cooke, D.R., Gemell, J.B., et Large, R.R., 2001. Geochemical modelling of the zoned footwall alteration pipe, Hellyer volcanic-hosted massive sulfide deposit, western Tasmania, Australia. *Economic Geology* 96, p. 1037-1054.
- Spear, F., 1993. *Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature-time paths*. 799 p. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.

ANNEXE 1: MINÉRAUX NORMATIFS

Note: les densité et poids moléculaires du faciès SV350 sont tirées de Piché et Jébrak, 2004, ou de www.webminerals.com pour certains minéraux.

<NOM>ALBITE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>NaAlSi₃O₈</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>262.22</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.63</DENSITE>

<NOM>BRUCITE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>MgOOH</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>57.304</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.39</DENSITE>

<NOM>CHLORITEMG_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>Mg₁₀Al_{4.5}Si_{5.5}O₂₀(OH)₁₆</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>1110.91</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.75</DENSITE>

<NOM>CHLORITEFE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>Fe₁₀Al_{4.5}Si_{5.5}O₂₀(OH)₁₆</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>1426.31</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>3.3</DENSITE>

<NOM>EPIDOTE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>Ca₂Al₃Si₃O₁₂(OH)</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>454.36</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>3.3</DENSITE>

<NOM>LEUCITE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>KAlSi₂O₆</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>218.2472</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.48</DENSITE>

<NOM>NEPHELINE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>NaAlSi₃O₈</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>146.08</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.61</DENSITE>

<NOM>ORTHOSE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>KAlSi₃O₈</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>278.33</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.56</DENSITE>

<NOM>PARAGONITE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>NaAl₃Si₃O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>382.20</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.78</DENSITE>

<NOM>PYROPHYLLITE_SV350</NOM>

<FORMULE_MINERAL>Al₂Si₄O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>360.31</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>2.81</DENSITE>

<NOM>QUARTZ_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>SiO2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>60.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.62</DENSITE>

<NOM>SERICITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAl3Si3O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>398.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.83</DENSITE>

<NOM>SERPENTINE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg6Si4O10(OH)8</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>554.22</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.54</DENSITE>

<NOM>TALC_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg3Si4O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>379.27</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.75</DENSITE>

<NOM>GRUNERITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe7Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>1001.61</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.66</DENSITE>

<NOM>TREMOLITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca2Mg5Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>812.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.05</DENSITE>

<NOM>FERROACTINOTE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca2Fe5Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>972.056</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.51</DENSITE>

<NOM>CALCITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>100.09</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.71</DENSITE>

<NOM>DOLOMITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaMg(CO3)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>184.40</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.84</DENSITE>

<NOM>ANKERITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaFe(CO3)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>215.94</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.05</DENSITE>

<NOM>MAGNESITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MgCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>84.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3</DENSITE>

<NOM>SIDERITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeCO3</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>115.86</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.96</DENSITE>

<NOM>RHODOCROSITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MnCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>114.95</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.69</DENSITE>

<NOM>APATITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca5P3O12(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>502.30</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.19</DENSITE>

<NOM>MAGNETITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe3O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>231.54</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.15</DENSITE>

<NOM>CHROMITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeCr2O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>171.84</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.79</DENSITE>

<NOM>TITANITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaTiSiO4(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>197.05</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.48</DENSITE>

<NOM>RUTILE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>TiO2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>79.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.8</DENSITE>

<NOM>HEMATITE_SV350</NOM>
<POIDS_MINERAL>159.7</POIDS_MINERAL>
<FORMULE_MINERAL>Fe2O3</FORMULE_MINERAL>
<DENSITE>5.28</DENSITE>

<NOM>ILMENITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeTiO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>151.73</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.79</DENSITE>

<NOM>HALITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NaCl</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>23</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.17</DENSITE>

<NOM>SYLVITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KCl</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>39.0983</POIDS_MINERAL> //Cl pas compté dans poids.
<DENSITE>2</DENSITE>

<NOM>DIASPORE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>AlOOH</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>59.99</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.40</DENSITE>

<NOM>ANHYDRITE_SV350</NOM>
<POIDS_MINERAL>136.14</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.35</DENSITE>

<NOM>PYRITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>119.98</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.01</DENSITE>

<NOM>CHALCOPYRITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CuFeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>183.52</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.19</DENSITE>

<NOM>SPHALERITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>ZnS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>480.68</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.9</DENSITE>

<NOM>GALENE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>PbS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>239.26</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>7.4</DENSITE>

<NOM>MOLYBDENITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MoS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>128.01</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.5</DENSITE>

<NOM>MILLERITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NiS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>90.78</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.5</DENSITE>

<NOM>ARSENOPYRITE_SV350</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeAsS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>194.9</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>6.07</DENSITE>

Note: les densité et poids moléculaires du facies SV450 sont tirées de Piché et Jébrak, 2004, ou de www.webminerals.com pour certains minéraux absents de NORMAT.

<NOM>ALBITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NaAlSi3O8</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>262.22</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.63</DENSITE>

<NOM>ANDALOUSITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Al2SiO5</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>162.04</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.15</DENSITE>

<NOM>BIOTITEMG_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KMg3AlSi3O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>417.24</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.83</DENSITE>

<NOM>BIOTITEFE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KFe3AlSi3O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>512.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.34</DENSITE>

<NOM>BRUCITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MgOOH</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>57.304</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.39</DENSITE>

<NOM>CHLORITEMG_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg10Al4.5Si5.5O20(OH)15</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>1096.91</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.75</DENSITE>

<NOM>CHLORITEFE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe10Al4.5Si5.5O20(OH)15</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>1410.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.3</DENSITE>

<NOM>CHLORITOIDEMG_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MgAl2SiO5(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>220.37</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.57</DENSITE>

<NOM>CHLORITOIDEFE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeAl2SiO5(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>251.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.7</DENSITE>

<NOM>EPIDOTE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca2Al3Si3O12(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>454.36</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.3</DENSITE>

<NOM>FERROACTINOTE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca2Fe5Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>972.056</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.51</DENSITE>

<NOM>FORSTERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg2SiO4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>140.69</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.22</DENSITE>

<NOM>GRUNERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe7Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>1001.61</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.66</DENSITE>

<NOM>LEUCITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAlSi2O6</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>218.2472</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.48</DENSITE>

<NOM>NEPHELINE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NaAlSiO4</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>146.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.61</DENSITE>

<NOM>ORTHOSE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAlSi₃O₈</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>278.33</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.56</DENSITE>

<NOM>PYROPHYLLITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Al₂Si₄O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>360.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.81</DENSITE>

<NOM>QUARTZ_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>SiO₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>60.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.62</DENSITE>

<NOM>SERICITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>398.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.83</DENSITE>

<NOM>SERPENTINE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg₆Si₄O₁₀(OH)₈</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>554.22</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.54</DENSITE>

<NOM>TALC_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>379.27</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.75</DENSITE>

<NOM>TITANITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaTiSiO₄(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>197.05</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.48</DENSITE>

<NOM>TREMOLITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca₂Mg₅Si₈O₂₂(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>812.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.05</DENSITE>

<NOM>CALCITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaCO₃</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>100.09</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.71</DENSITE>

<NOM>DOLOMITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaMg(CO₃)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>184.40</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.84</DENSITE>

<NOM>ANKERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaFe(CO₃)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>215.94</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.05</DENSITE>

<NOM>MAGNESITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MgCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>84.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3</DENSITE>

<NOM>SIDERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>115.86</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.96</DENSITE>

<NOM>RHODOCROSITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MnCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>114.95</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.69</DENSITE>

<NOM>APATITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca5P3O12(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>502.30</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.19</DENSITE>

<NOM>CHROMITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeCr2O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>171.84</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.79</DENSITE>

<NOM>MAGNETITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe3O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>231.54</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.15</DENSITE>

<NOM>RUTILE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>TiO2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>79.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.8</DENSITE>

<NOM>HEMATITE_SV450</NOM>
<POIDS_MINERAL>159.7</POIDS_MINERAL>
<FORMULE_MINERAL>Fe2O3</FORMULE_MINERAL>
<DENSITE>5.28</DENSITE>

<NOM>ILMENITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeTiO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>151.73</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.79</DENSITE>

<NOM>SYLVITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KCl</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>39.0983</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2</DENSITE>

<NOM>ANHYDRITE_SV450</NOM>
<POIDS_MINERAL>136.14</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.35</DENSITE>

<NOM>PYRITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>119.98</POIDS_MINERAL>

<DENSITE>5.01</DENSITE>

<NOM>CHALCOPYRITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CuFeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>183.52</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.19</DENSITE>

<NOM>SPHALERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>ZnS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>480.68</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.9</DENSITE>

<NOM>GALENE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>PbS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>239.26</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>7.4</DENSITE>

<NOM>MOLYBDENITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MoS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>128.01</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.5</DENSITE>

<NOM>MILLERITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NiS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>90.78</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.5</DENSITE>

<NOM>ARSENOPYRITE_SV450</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeAsS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>194.9</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>6.07</DENSITE>

<!--Densités faciès amphibolite prises de <http://webmineral.com>.
Densités calculées par la structure cristalline.-->

<NOM>ALBITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NaAlSi3O8</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>262.22</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.63</DENSITE>

<NOM>ALMANDIN_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe3Al2Si3O12</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>497.74</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.32</DENSITE>

<NOM>ANDALOUSITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Al2SiO5</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>162.04</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.15</DENSITE>

<NOM>ANORTHITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaAl2Si2O8</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>277.41</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.75</DENSITE>

<NOM>ANTHOPHYLLITEMG_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg7Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>780.80</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.67</DENSITE>

<NOM>ANTHOPHYLLITEFE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe7Si8O22(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>1001.61</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.80</DENSITE>

<NOM>BIOTITEMG_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KMg3AlSi3O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>417.24</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.83</DENSITE>

<NOM>BIOTITEFE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KFe3AlSi3O10(OH)2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>512.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.34</DENSITE>

<NOM>BRUCITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MgOOH</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>57.304</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.37</DENSITE>

<NOM>CALCITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>100.09</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.71</DENSITE>

<NOM>CORDIERITEMG_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg2Al4Si5O18</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>584.95</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.48</DENSITE>

<NOM>CORDIERITEFE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe2Al4Si5O18</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>647.27</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.67</DENSITE>

<NOM>DIOPSIDE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaMgSi2O6</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>216.55</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.26</DENSITE>

<NOM>FAYALITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe2SiO4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>203.78</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.66</DENSITE>

<NOM>FORSTERITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg2SiO4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>140.69</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.22</DENSITE>

<NOM>GROSSULAIRE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca3Al2Si3O12</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>450.44</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.59</DENSITE>

<NOM>HORNBLÉNDEM_G_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca₂Mg₅AlSi₇O₂₂(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>811.24</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.96</DENSITE>

<NOM>HORNBLÉNDEF_G_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca₂Fe₅AlSi₇O₂₂(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>968.94</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.38</DENSITE>

<NOM>HEDENBERGITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaFeSi₂O₆</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>248.09</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.68</DENSITE>

<NOM>MICROCLINE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAlSi₃O₈</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>278.33</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.56</DENSITE>

<NOM>MUSCOVITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KAl₃Si₃O₁₀(OH)₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>398.31</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.83</DENSITE>

<NOM>PYROPE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg₃Al₂Si₃O₁₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>403.12</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.56</DENSITE>

<NOM>QUARTZ_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>SiO₂</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>60.08</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.65</DENSITE>

<NOM>STAURITIDEM_G_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Mg₂Al₉Si₄O₂₀(OH)₄</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>791.77</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.54</DENSITE>

<NOM>STAURITIDEF_G_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe₂Al₉Si₄O₂₀(OH)₄</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>854.85</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.64</DENSITE>

<NOM>TITANITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CaTiSiO₄(OH)</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>197.05</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.55</DENSITE>

<NOM>SYLVITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>KCl</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>39.0983</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>1.99</DENSITE>

<NOM>APATITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Ca₅P₃O₁₂(OH)</FORMULE_MINERAL>

<POIDS_MINERAL>502.30</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.16</DENSITE>

<NOM>CHROMITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeCr2O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>171.84</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.09</DENSITE>

<NOM>RHODOCROSITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MnCO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>114.95</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>3.69</DENSITE>

<NOM>MAGNETITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>Fe3O4</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>231.54</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.15</DENSITE>

<NOM>RUTILE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>TiO2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>79.88</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.8</DENSITE>

<NOM>HEMATITE_AMP575</NOM>
<POIDS_MINERAL>159.7</POIDS_MINERAL>
<FORMULE_MINERAL>Fe2O3</FORMULE_MINERAL>
<DENSITE>5.28</DENSITE>

<NOM>ILMENITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeTiO3</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>151.73</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.79</DENSITE>

<NOM>ANHYDRITE_AMP575</NOM>
<POIDS_MINERAL>136.14</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>2.35</DENSITE>

<NOM>PYRITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>119.98</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.01</DENSITE>

<NOM>CHALCOPYRITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>CuFeS2</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>183.52</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.2</DENSITE>

<NOM>SPHALERITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>ZnS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>480.68</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>4.08</DENSITE>

<NOM>GALENE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>PbS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>239.26</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>7.60</DENSITE>

<NOM>MOLYBDENITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>MoS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>128.01</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5</DENSITE>

<NOM>MILLERITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>NiS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>90.78</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>5.37</DENSITE>

<NOM>ARSENOPYRITE_AMP575</NOM>
<FORMULE_MINERAL>FeAsS</FORMULE_MINERAL>
<POIDS_MINERAL>194.9</POIDS_MINERAL>
<DENSITE>6.19</DENSITE>