
CARACTERISTIQUES MINERALOGIQUES ET CHIMIQUES DES ALTERATIONS DANS LES ROCHES DE HAUT GRADE METAMORPHIQUE – PHASE I

Projet 2013-04

Par : Lucie Mathieu, Ph.D.
2014



CONSOREM

Consortium de recherche
en exploration minérale

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. Le CONSOREM ne peut être tenu responsable pour des décisions prises sur la base de ces résultats.

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 :

Mathieu, L., 2014. Caractéristiques minéralogiques et chimiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – Phase I. Rapport, Projet CONSOREM 2013-04, 63 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

De nombreux outils lithogéochimiques qui proviennent soit de la littérature scientifique ou qui ont été développés au CONSOREM peuvent être utilisés en exploration minérale. Parmi les méthodes développées au CONSOREM, la méthode des bilans de masse par modélisation des précurseurs s'est avérée particulièrement efficace pour quantifier l'altération au sein des roches magmatiques. Le CONSOREM a également développé un calcul normatif pour les roches métamorphiques, la norme CONSONORM BasGrade, conçu pour trois faciès: schiste vert moyen, schiste vert supérieur et amphibolite inférieur. CONSONORM BasGrade calcule, en plus des proportions minérales, différents indices d'altération basés sur ces minéraux normatifs, la densité de l'échantillon, le CO₂ et H₂O normatifs, etc.

Les bilans de masse par modélisation des précurseurs et les indices d'altération de la CONSONORM BasGrade sont des méthodes complémentaires, qui permettent de précisément quantifier l'altération hydrothermale dans des roches de faible grade métamorphique.

Cette quantification est cependant plus difficile à effectuer en contexte de haut grade métamorphique avec ces méthodes. En effet, la norme CONSONORM BasGrade ne peut pas être appliquée à des roches de haut grade. Aussi, les bilans de masse ne peuvent être appliqués qu'aux roches magmatiques, alors qu'il est souvent difficile de distinguer les roches ayant des protolithes d'origine sédimentaire ou igné en contexte de haut grade.

Les calculs normatifs ont montré qu'ils étaient capable de faciliter l'identification et la quantification de l'altération en terrain métamorphique, quelque soit l'origine ignée ou sédimentaire des protolithes. Afin d'utiliser cette méthode en terrain de haut grade, les principes de calcul de la CONSONORM BasGrade ont été étendus aux conditions de haut grade dans le cadre de ce projet. La nouvelle norme décrite dans ce rapport est nommée CONSONORM HautGrade et contient dix-sept faciès représentant la majorité des conditions de P-T communes au Québec.

Ce rapport présente les principes du calcul de la CONSONORM HautGrade. Les tests préliminaires indiquent que la norme est capable d'approximer les paragenèses naturelles dans différents contextes métamorphiques. L'applicabilité de la méthode dans la reconnaissance des protolithes altérés sera abordée dans une seconde phase.

TABLE DES MATIÈRES

Avertissement	ii
RÉSUMÉ	iii
Table des matières	iv
Liste des figures.....	vi
Liste des tableaux.....	ix
1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS	1
2 NORMES ET AUTRES DÉFINITIONS	1
2.1 Définition générale.....	1
2.2 Particularité des roches métamorphiques	2
2.3 Changements minéralogiques et chimiques.....	2
2.4 Séquence de calcul des normes	3
2.5 Limites du modèle.....	3
3 MODÈLES THERMODYNAMIQUES ET BASES DE DONNÉES.....	4
3.1 Modèles thermodynamiques.....	4
3.2 Theriak-Domino	4
3.3 Perple_X	5
4 CALCULS NORMATIFS DISPONIBLES	5
4.1 Normes CIPW et Matnorm.....	5
4.2 Mesonorm	5
4.3 NORMAT	6
4.4 Norme Consorem	6
5 SÉQUENCE DE CALCUL DE CONSONORM HautGrade	6
5.1 Utilisation de tétraèdres métamorphiques	6
5.2 Étape 1 : Extraction du nombre de moles des éléments.....	6
5.3 Étape 2 : Extraction des volatils et calcul de la GAF	7
5.4 Étape 3 : Calcul des minéraux accessoires.....	7
5.5 Étape 4 : Calcul des carbonates.....	8
5.6 Étape 5 : Calcul des oxydes Fe-Ti.....	8
5.7 Étape 6 : Calcul des silicates.....	9
5.8 Étape 7 : Réactions entre silicates et carbonates	9
5.9 Étape 8 : Volatils normatifs et itérations	10
5.10 Étape 9 : Message de la colonne « Comment »	11
5.11 Étape 10 : Ajustement de la quantité d'oxydes de Fe-Ti.....	11
5.12 Étape 11 : Poids pourcent des minéraux et densité.....	11
6 CALCUL DES SILICATES	13
6.1 Choix du tétraèdre métamorphique	13
6.2 Choix de l'assemblage et calcul des proportions minérales.....	14

6.3	Ajustements (amphiboles, etc.)	14
6.3.1	Minéraux temporaires	14
6.3.2	Phases à Mg ou K	14
6.3.3	Micas blancs	14
6.3.4	Amphiboles	14
6.3.5	Minéraux FM (ferromagnésiens)	15
6.4	Déficit / excès de silice	15
6.5	Olivine et quartz	15
6.6	Depuis les solutions solides vers les pôles purs	16
7	OPTIONS PROPOSÉES	16
7.1	Calcul du Fe ² -Fe ³	16
7.2	Rapport Fe ³ / (Fe ³ +Fe ²) des oxydes de fer	17
7.3	Calcul du CO ₂	17
7.4	Calcul des minéraux	18
7.5	Niveau de détail	18
7.6	Options de traitement	18
7.7	Option pour les bases de données contenant >25 000 entrées.....	19
8	L'OPTION « CHOISIR LE FACIÈS »	19
8.1	Données pétrographiques	19
8.2	Principe du calcul.....	20
9	PREMIERS TESTS.....	22
10	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	30
	RÉFÉRENCES	31
	ANNEXE A – Diagrammes ternaires pour les carbonates	33
	ANNEXE B – Diagrammes ternaires pour les oxydes.....	34
	ANNEXE C – Tétraèdres pour les réactions quartz - carbonates	35
	ANNEXE D – Tétraèdres Al-Fe-Mg-Mn pour le choix du tétraèdre des silicates	36
	ANNEXE E – Tétraèdres des silicates Al-Ca-MgFe-KNa.....	37
	ANNEXE F – Diagrammes ternaires des minéraux FM	61
	ANNEXE G – Réactions utilisées pour résoudre le déficit en silice	62

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Représentation des 17 faciès de la CONSONORM HautGrade sur un diagramme P-T. Les champs de stabilité de pyrite-pyrrhotine et de quartz-carbonates-graphite utilisés par le calcul sont également représentés.	2
Figure 2.	Vue éclatée du tétraèdre $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-SiO}_2$ du faciès 4AMP600, utilisé pour déterminer si les carbonates peuvent coexister avec le quartz dans une roche ou doivent réagir pour former du graphite et des silicates.	10
Figure 3.	Séquence de calcul schématique de CONSONORM HautGrade.....	12
Figure 4.	Liste complète des minéraux pouvant figurer sur le diagramme ternaire Ca-Mg-Si et exemples de réactions possibles entre ces minéraux (cf. lignes qui lient les minéraux).....	16
Figure 5.	Image montrant la fenêtre de dialogue de CONSONORM HautGrade.	18
Figure 6.	Image montrant la fenêtre de dialogue de l'étape 5bis de la configuration des données minéralogiques.....	21
Figure 7.	Image montrant les deux fenêtres de dialogue permettant à l'utilisateur de choisir, parmi les 17 faciès disponibles, celui qui est le plus approprié pour ses échantillons.	21
Figure 8.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 16 amphibolites métamorphisées de 500-550°C et > 6 kbars à 400-500°C et 9-12 kbars (Brunsmann et al., 2000). Notez que les proportions des minéraux ont été estimées de façon approximative par l'auteure. Les minéraux ont été calculés pour le faciès 7AMP500 (7 kbars et 500°C), avec CO_2 normatif et $\text{Fe}_2\text{-Fe}_3$ répartis selon la méthode de Le Maître (1976) pour les roches volcaniques.....	24
Figure 9.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 marbres et sédiments argileux calco-silicatés métamorphisés à 630°C et 3 kbars (métamorphisme de contact) (Davis et Ferry, 1993). Les minéraux ont été calculés pour le faciès 3AMP675 (3 kbars et 675°C), avec CO_2 normatif et $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ égal à 0,2. Les biotites, clinozoïsites et spinelles observés, dont les proportions sont < 1 wt%, ne sont pas représentés.	24
Figure 10.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 21 gneiss (et anorthosites?) métamorphisés à 9 kbars et 1000°C (pic) et gabbros métamorphisés au faciès des amphibolites (Emmett, 1987). Les minéraux ont été calculés avec CO_2 , FeO et Fe_2O_3 analysés, et pour le faciès 4GRA750 (4 kbars et 750°C).....	25
Figure 11.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 méta-basites et méta-pélites métamorphisées à 9-12 kbars et 800°C (Faak et al., 2012). Notez que les proportions de minéraux ont été estimées de façon approximative par l'auteure. Les minéraux ont été calculés avec FeO et Fe_2O_3 analysés, sans $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 4AMP600 (4 kbars et 600°C).....	25
Figure 12.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 méta-basites et méta-pélites (Hansen et Stuk, 1993). Les minéraux ont été calculés avec $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ égal à 0,2, sans $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 6GRA750 (6 kbars et 750°C); a) espèces minérales calculées et observées; b) nature des roches observées par Hansen et Stuk (1993).....	26
Figure 13.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 25 méta-pélites et marbres métamorphisés à 4,5 kbars et entre 450°C et 525°C (Leger et Ferry, 1993). Les minéraux ont été calculés avec $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ égal à 0,2, CO_2 estimé de façon normative et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et 600°C).....	27

Figure 14.	Comparaison entre la proportion de quartz observé et le contenu en SiO ₂ (wt%) des roches de Leger et Ferry (1993). Ce graphique montre que les auteurs ont surestimé la quantité de quartz contenu dans leurs roches.....	27
Figure 15.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 8 granulites mafiques (méta-cumulats?, méta-gabbros?) et 2 migmatites felsiques du faciès des granulites (Montanini et Tribuzio, 2001). Les minéraux ont été calculés avec CO ₂ normatif et Fe ²⁺ -Fe ³⁺ répartis selon la méthode de Le Maître (1976) pour les roches plutoniques, et pour le faciès 5GRA900 (5 kbars et 900°C).....	28
Figure 16.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 12 granulites migmatitiques métamorphisées à 8-11 kbars et 750-900°C (Nehring et al., 2009). Les minéraux ont été calculés avec Fe ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃ T égal à 0,2, sans CO ₂ -H ₂ O (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 3GRA800 (3 kbars et 800°C).....	28
Figure 17.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 8 péridotites (Eggins et al., 1998; Nozaka, 2010). Les minéraux ont été calculés avec Fe ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃ T égal à 0,2, avec PAF entièrement égale à H ₂ O et pour le faciès 5GRA900 (5 kbars et 900°C).....	29
Figure 18.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 4 limestones (Evans et Bickle, 2005). Les minéraux ont été calculés avec Fe ²⁺ -Fe ³⁺ mesurés, avec H ₂ O-CO ₂ normatifs et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et 600°C). Les chiffres reportés sur le graphique correspondent à la quantité de pyrrhotine contenue dans chacune des quatre roches, et les minéraux cerclés de rouge sont ceux qui proviennent de l'échantillon le plus riche en pyrrhotine.....	29
Figure 19.	Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 2 schistes à Bt-Gr _t (Hirsch et Carlson, 2006). Les minéraux ont été calculés avec Fe ₂ O ₃ /Fe ₂ O ₃ T égal à 0,2, avec H ₂ O-CO ₂ normatifs et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et 600°C).....	30
Figure E-1.	Représentation de l'ensemble des minéraux de CONSONORM HautGrade sur une vue éclatée d'un tétraèdre Al-Ca-FM-KNa.....	37
Figure E-2.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 3AMP675. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.....	52
Figure E-3.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 3GRA800. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou l'actinote sont stables ou non.....	52
Figure E-4.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5GRA900. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le spinelle sont stables ou non.....	53
Figure E-5.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5AMP670. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.....	53
Figure E-6.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP700. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.....	54
Figure E-7.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou la staurotide sont stables ou non.....	54
Figure E-8.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10GRA950. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.....	55

Figure E-9.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 9GRA800. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.	55
Figure E-10.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10AMP700. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.	56
Figure E-11.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP500. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.	56
Figure E-12.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 4AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite, le mica blanc et/ou la staurotide sont stables ou non.	57
Figure E-13.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5SV400. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.	57
Figure E-14.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 9SB450.	58
Figure E-15.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10SB350.	58
Figure E-16.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 4GRA750. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.	59
Figure E-17.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 6GRA750. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.	59
Figure E-18.	Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 6AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou la staurotide sont stables ou non.	60

LISTE DES TABLEAUX

Tableau E-1.	Conditions pour lesquelles la biotite est présente dans les tétraèdres Al-Ca-FM-KNa.....	38
Tableau E-2.	Conditions pour lesquelles le mica blanc et/ou la staurotide sont présents dans les tétraèdres Al-Ca-FM-KNa.....	38
Tableau E-3.	Assemblages du faciès 3AMP675 (3 kbars, 675°C).....	39
Tableau E-4.	Assemblages du faciès 3GRA800 (3 kbars, 800°C).....	39
Tableau E-5.	Assemblages du faciès 5GRA900 (5 kbars, 900°C).....	40
Tableau E-6.	Assemblages du faciès 5AMP670 (5 kbars, 670°C).....	40
Tableau E-7.	Assemblages du faciès 7AMP700 (7 kbars, 700°C).....	41
Tableau E-8.	Assemblage du faciès 7AMP600 (7,5 kbars, 600°C).....	42
Tableau E-9.	Assemblages du faciès 10GRA950 (10 kbars, 950°C).....	44
Tableau E-10.	Assemblages du faciès 9GRA800 (9 kbars, 800°C).....	44
Tableau E-11.	Assemblages du faciès 10AMP700 (10 kbars, 700°C).....	45
Tableau E-12.	Assemblages du faciès 7AMP500 (7 kbars, 500°C).....	45
Tableau E-13.	Assemblages du faciès 4AMP600 (4 kbars, 600°C).....	46
Tableau E-14.	Assemblages du faciès 5SV400 (5 kbars, 400°C).....	48
Tableau E-15.	Assemblages du faciès 9SB450 (9 kbars, 450°C).....	49
Tableau E-16.	Assemblage du faciès 10SB350 (10 kbars, 350°C).....	49
Tableau E-17.	Assemblages du faciès 4GRA750 (4 kbars, 750°C).....	50
Tableau E-18.	Assemblages du faciès 6GRA750 (6 kbars, 750°C).....	50
Tableau E-19.	Assemblages du faciès 6AMP600 (6 kbars, 600°C).....	51

1 PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

La méthode la plus couramment utilisée pour reconnaître les roches altérées par un fluide hydrothermal et pour porter un jugement sur l'intensité de l'altération est la méthode des bilans de masse. Cependant, cette méthode nécessite soit la reconnaissance d'une roche moins altérée appartenant à la même unité (bilans par précurseurs uniques; Grant, 1986), soit l'identification des roches ayant une origine magmatique (bilans par précurseurs modélisés; Trépanier, 2011).

En terrains métamorphisés de grades relativement élevés, les méthodes de bilans de masse ont fait leurs preuves. Toutefois, la reconnaissance de la nature des protolithes n'est pas toujours aisée au sein de roches de haut grade. De plus, la déformation rend les interprétations plus difficiles et empêche, notamment, de facilement reconnaître les roches appartenant à une même unité. Les diverses méthodes de bilan de masse ne sont donc pas toujours applicables en contexte de haut grade.

Les indices d'altération calculés à partir de minéraux normatifs sont une méthode complémentaire aux bilans de masse pour quantifier l'altération. La méthode NORMAT (Piché et Jébrak, 2004) a été précurseur dans ce domaine, et a démontré la performance des indices d'altérations basés sur des paragenèses normatives. Le CONSOREM a également développé un outil de calcul normatif, la norme CONSONORM BasGrade, pour des conditions de faible grade métamorphique (Trépanier, 2013).

Le calcul des minéraux normatifs présente l'avantage de ne nécessiter que l'analyse des éléments majeurs et de pouvoir être applicable à tous types de roches, quelle que soit la nature de leurs protolithes, ignée ou sédimentaire. Cependant, NORMAT et CONSONORM BasGrade sont applicables seulement pour des roches de faible grade métamorphique (schiste vert inférieur et supérieur, amphibolite inférieur).

Le but de ce projet est d'étendre le principe du calcul normatif à des roches haut grade en développant une nouvelle norme capable de calculer des paragenèses pour 17 conditions de P-T typiques, principalement, des facies des granulites et des amphibolites (**Figure 1**). Ce nouvel outil sera désigné CONSONORM HautGrade afin de le distinguer de l'outil CONSOREM antérieur; c'est-à-dire la norme CONSOREM (Trépanier 2013) qui sera désignée CONSONORM BasGrade dans ce rapport.

Ce rapport contient une description du calcul normatif et quelques tests effectués sur des données de la littérature. Ce calcul sera utilisé pour identifier et quantifier l'altération dans la seconde phase de ce projet.

2 NORMES ET AUTRES DÉFINITIONS

2.1 Définition générale

La norme d'une roche correspond à la composition minéralogique théorique ou calculée qu'elle aurait eue si ses minéraux avaient cristallisés **à l'équilibre** (Foucault et Raoult, 1992). Les calculs normatifs ont d'abord été appliqués aux roches magmatiques (cf. norme CIPW; Cross et al., 1902). Dans ce type de roches, la notion d'équilibre décrit des minéraux ayant cristallisés dans un laps de temps relativement court, à partir d'un magma de composition (et de température) similaire. Retenons qu'une norme est avant tout un modèle et que, comme tout modèle, les normes ne sont applicables que sous certaines conditions.

2.2 Particularité des roches métamorphiques

Des travaux postérieurs à la norme CIPW ont étendu le principe du calcul normatif à des roches métamorphiques (Barth, 1959; Piché et Jébrak, 2004). Dans une roche métamorphique, les minéraux en équilibre ont cristallisé dans une gamme de pression (P) et température (T) restreinte et similaire.

Les roches métamorphiques sont d'abord enfouies dans la croûte puis remontées à la surface (cf. chemin P-T). Durant leurs pérégrinations, les roches subissent une variété de conditions de pressions et températures, et chaque nouvelle condition P-T est susceptible d'être matérialisée par la formation de nouvelles phases minérales.

En fait, la formation de nouvelles phases est limitée pour la plupart des conditions P-T, et ne concerne vraiment l'intégralité d'une roche qu'au pic du métamorphisme, où une paragenèse principale se forme. Ce pic est souvent légèrement décalé par rapport à la température maximale atteinte par la roche, car les réactions entre minéraux ont besoin d'un certain laps de temps pour se réaliser. L'objectif des normes est de calculer cette paragenèse principale. Notons que l'entière complexité d'une roche métamorphique, i.e. ses minéraux hérités et ses phases rétrogrades, ne peut pas être reproduite par un calcul normatif.

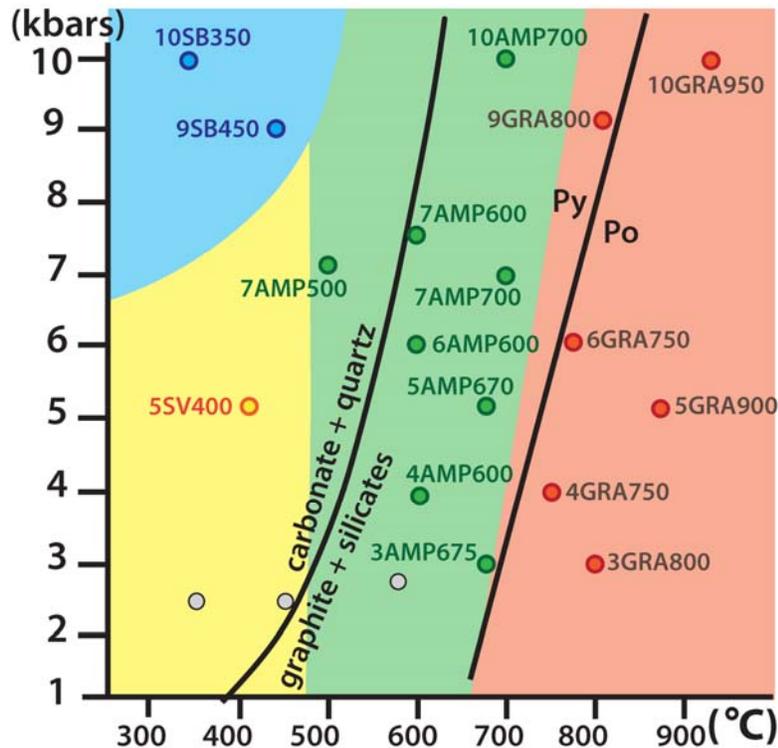


Figure 1. Représentation des 17 faciès de la CONSONORM HautGrade sur un diagramme P-T. Les champs de stabilité de pyrite-pyrrhotine et de quartz-carbonates-graphite utilisés par le calcul sont également représentés.

2.3 Changements minéralogiques et chimiques

Le métamorphisme est un processus relativement isochimique, c'est-à-dire qu'il entraîne d'importants changements minéralogiques, mais de très faibles changements chimiques dans une roche. Le métamorphisme fait cependant varier la proportion des éléments volatils, car l'augmentation de la

température a tendance à dévolatiliser les roches en déstabilisant les minéraux contenant H, C et/ou S.

Le passage d'un fluide hydrothermal dans une roche entraîne des changements minéralogiques (cf. altération) et chimiques (cf. métasomatisme) (Stanley et Madeisky, 1994). Ainsi, le métamorphisme, qui modifie la minéralogie de la roche, entraîne la perte de l'information minéralogique produite par le processus d'altération. Par contre, le métamorphisme conservera, en grande partie, l'empreinte du métasomatisme.

2.4 Séquence de calcul des normes

Tout calcul normatif est séquentiel, c'est-à-dire que les minéraux sont calculés soit un par un, soit par groupe, et toujours de façon successive. À chaque étape, la quantité des éléments utilisés pour former les premières phases est soustraite au total des éléments qui seront utilisés pour former les phases suivantes.

Les calculs débutent par la formation des phases dans lesquelles entre un élément particulier, qui n'est utilisé par aucunes autres phases communément observées dans les roches (cf. le phosphore pour l'apatite). Ensuite, différentes hypothèses sont formulées pour former les minéraux qui intègrent les éléments les plus communs (cf. Fe, Mg, Ca, Al, K, Na, Si). Les calculs normatifs considèrent généralement que Si et H sont en excès, ce qui simplifie le calcul. Ceci rend également nécessaire la mise en place d'une série d'ajustements, effectués à la fin du calcul, pour régler le cas des roches sous-saturées en Si (cf. roches qui contiennent trop de K, Na et autres par rapport à leurs contenus en Si).

La séquence de calcul ne correspond pas à l'ordre naturel dans lequel les phases cristallisent. L'ordre de formation des minéraux de la norme CIPW, par exemple, ne correspond à aucune séquence de cristallisation. Ce principe permet de ne pas introduire de modèle théorique dans le calcul, ce qui fait que la norme CIPW, établie il y a un siècle à un moment où l'on avait une vision floue de la cristallisation fractionnée, soit encore utilisable aujourd'hui. Aussi, certaines normes s'affranchissent du calcul séquentiel et forment certains minéraux de façon simultanée (Pruseth, 2009).

2.5 Limites du modèle

Les normes tentent d'approximer la composition minéralogique principale d'une roche. Elles sont également capables de calculer certaines phases mineures, comme l'apatite ou le zircon, si ces phases contiennent un élément que l'on ne peut pas répartir autrement. D'autres types de phases mineures sont plus difficiles à approximer, ou ne sont pas calculables.

Les calculs sont ainsi limités par le nombre d'espèces minérales prises en considération. Pour la norme CIPW, les minéraux calculables sont ceux qui sont les plus souvent observés dans les roches magmatiques, qui sont des roches qui présentent une variabilité minéralogique relativement limitée. Les roches métamorphiques contiennent une plus grande variété de minéraux, et il est donc nécessaire de sélectionner les phases qui seront ou non intégrées au calcul normatif. Cette sélection est généralement dictée par le degré de documentation thermodynamique attendant à chaque phase.

Une autre limite des calculs normatifs est due à la capacité qu'ont les minéraux d'incorporer les éléments traces les plus variés. Par exemple, le Zn se substitue au Fe et entre dans la structure de nombreux minéraux. Ainsi, lorsque le calcul attribue tout le Zn à la sphalérite, il a tendance à très légèrement surestimer la proportion de ce sulfure. Les différences avec les proportions réelles de sphalérite sont cependant minimales. Ce type de simplification pose un problème plus grave en contexte métamorphique, car la présence de certains éléments traces stabilise ou déstabilise les structures cristallines, augmentant ou diminuant le champ de stabilité de certaines phases. Ce rôle

joué par les traces est encore peu documenté par les modèles thermodynamiques, et est donc difficilement prédictible par le calcul.

3 MODÈLES THERMODYNAMIQUES ET BASES DE DONNÉES

3.1 Modèles thermodynamiques

À la base de tous calculs normatifs on trouve une liste de minéraux qu'il faut calculer. Pour les roches magmatiques, ces minéraux sont ceux que l'on observe le plus souvent. Pour les roches métamorphiques, la liste des minéraux possibles est très longue, varie d'un faciès à l'autre et d'un type de roche à l'autre. Il est donc plus difficile d'établir une liste de minéraux à partir d'observations de terrain.

Les normes CONSONORM BasGrade et HautGrade déterminent les phases principales à calculer pour chaque roche à partir de tétraèdres métamorphiques, qui sont un moyen simple de représenter un grand nombre de silicates pour une condition de P-T donnée et pour toute une gamme de compositions chimiques. Ces tétraèdres sont un amalgame de diagrammes de stabilité métamorphique tirés de la littérature ou produits, dans le cadre de ce projet, à l'aide des logiciels Theriak-Domino (de Capitani et Petrakakis, 2010) et Perple_X (Connolly, 2005).

Ces logiciels sont des interfaces permettant d'utiliser les bases de données thermodynamiques à travers une série de fonctions thermodynamiques, et de représenter les résultats de façons diverses (cf. diagramme ternaire, P-T, pseudo-section, etc.). Les bases de données thermodynamiques, quant à elles, regroupent une série de paramètres décrivant la stabilité des phases minérales (pôles purs et solutions solides).

Ces bases de données ont été établies à partir d'observations faites sur les roches naturelles et d'expériences en laboratoire. Elles sont limitées par notre état de connaissance actuel des minéraux. De plus, les expériences en laboratoire utilisent des systèmes simplifiés : il est donc difficile, à partir de telles données, de prédire le comportement de minéraux contenant des éléments traces non-modélisés, comme le Zn par exemple. Ces banques sont aussi « internally consistent », ce qui semble signifier que les chiffres ont été adaptés pour permettre une certaine compatibilité entre les minéraux lors de la résolution des équations thermodynamiques. Le niveau de modélisation et d'approximation qu'entraîne cette consistance interne n'est pas connu par l'auteur.

Ainsi, le modèle « CONSONORM HautGrade » est basé sur des équilibres qui représentent un premier niveau de modèle ; i.e. une première simplification des cas naturels. Il est important de se souvenir que toutes les phases minérales et les solutions solides ne sont pas aussi bien documentées les unes que les autres, et que ceci peut entraîner des différences entre les minéraux calculés et les minéraux observés.

3.2 Theriak-Domino

Theriak-Domino est une suite de logiciels développés par C. de Capitani (de Capitani et Petrakakis, 2010). La dernière version du logiciel a été compilée en octobre 2010. Elle est fournie avec quelques bases de données formatées de façon à être compatibles avec le code.

Parmi ces bases de données, la base la plus complète, et donc la plus souvent exploitée pendant cette étude, est la JUN92 développée par Berman (1988). Les modifications apportées à cette base de données depuis 1992 sont limitées, et elle n'intègre donc pas le résultat des expériences de ces

vingt dernières années. La base de données JUN92 a été utilisée pour établir une partie des tétraèdres de la norme CONSOREM. Pour la norme HautGrade, d'autres bases ont plus souvent été utilisées (cf. Perple_X).

3.3 Perple_X

Perple_X est une interface très similaire à Theriak-Domino. C'est une collection de programmes Fortran77 développés par J. Connolly (Connolly, 2005). L'avantage majeur de Perple_X est que le code et les bases de données qu'il peut utiliser sont mises à jour régulièrement. Il est également capable d'utiliser un fichier qui décrit les solutions solides des principaux minéraux. Ce fichier a notamment permis, dans le cadre de ce projet, d'introduire la spessartine dans les diagrammes de phases, et de préciser le champ de stabilité de l'amphibole.

La base de données utilisée pour construire la CONSONORM HautGrade est la base hp02ver, qui correspond à la base de données de Holland et Powell (1998) révisée par les auteurs de Perple_X (Connolly et Kerrich, 2002; Connolly, 2005). Les modèles de solutions solides sont le fruit du travail de nombreux chercheurs (cf. liste complète des références disponibles sur le site internet de Perple_X).

4 CALCULS NORMATIFS DISPONIBLES

La CONSONORM HautGrade découle d'une série de travaux qui sont résumés ci-dessous. Sa principale référence est la CONSONORM BasGrade (Trépanier 2013), dont le présent calcul est très largement inspiré.

4.1 Normes CIPW et Matnorm

La norme CIPW (Cross et al., 1902), qui est la norme historique la plus utilisée, n'est pas décrite plus avant ici. Pour plus de détails, le lecteur est référé à Cross et al., (1902). Notons seulement que la CIPW a fait l'objet de très nombreuses améliorations et existe sous plusieurs variantes comme la Matnorm par exemple.

La Matnorm (Pruseth, 2009) est une norme CIPW améliorée, pour laquelle certains minéraux sont calculés de façon simultanée. Cette approche permet de ne pas établir de séquence de calcul et d'obtenir des proportions optimales pour un ensemble de minéraux. L'idée de Pruseth (2009) est de calculer les proportions minérales exactes en utilisant un système d'équations linéaires résolues par de l'algèbre matricielle. Cette idée a été reprise par les CONSONORMs.

4.2 Mesonorm

La Mesonorm (Barth, 1959) introduit la possibilité d'un calcul normatif pour les roches du faciès amphibolite. Ce calcul innove également en proposant de représenter les minéraux des différents assemblages pouvant être calculés sur un diagramme ternaire Ca-Al-Mg, afin de reproduire la relation que les types de minéraux métamorphiques pouvant cristalliser à l'équilibre entretiennent avec la composition chimique de cette roche.

La puissance des ordinateurs disponibles aujourd'hui a permis de reprendre cette idée et d'utiliser des tétraèdres, et non des diagrammes ternaires, afin de simplifier la séquence de calcul (cf. Trépanier, 2013).

4.3 NORMAT

NORMAT (Piché et Jébrak, 2004) est une innovation intéressante, qui calcule des minéraux du faciès schiste vert et qui a été pensée avant tout pour pouvoir quantifier l'altération hydrothermale associée, notamment, à des SMV. NORMAT reprend l'idée d'utiliser des diagrammes ternaires pour déterminer les minéraux qui sont en équilibre dans une roche donnée. Cette norme introduit également la notion du calcul itératif visant à estimer le CO₂ normatif à partir de la perte au feu (PAF). Elle propose également le calcul d'une série d'indices visant à faciliter l'étude des SMV.

4.4 Norme Consorem

La norme CONSONORM BasGrade (Trépanier, 2013) est disponible pour trois faciès : schiste vert inférieur et supérieur, amphibolite inférieur. Cette norme utilise des tétraèdres métamorphiques pour déterminer l'assemblage principal, le calcul simultané des minéraux de cet assemblage principal et le calcul itératif permettant d'estimer le CO₂ normatif. Outre le principe de calcul, la structure du code visual basic a en partie été reprise pour la mise en place de CONSONORM HautGrade. La principale différence entre les deux normes est le type de données thermodynamiques sur lesquelles leurs tétraèdres métamorphiques sont basés.

5 SÉQUENCE DE CALCUL DE CONSONORM HAUTGRADE

5.1 Utilisation de tétraèdres métamorphiques

La norme CONSONORM HautGrade utilise des tétraèdres à plusieurs étapes de son calcul. Le principe d'utilisation de tels objets est décrit en détail dans le rapport CONSOREM 2011-04 (Trépanier, 2013; p. 6), et ne sera que succinctement résumé ici.

Chaque tétraèdre est un assemblage de sous-tétraèdres. L'échantillon est localisé dans le tétraèdre principal par ses coordonnées barycentriques, qui correspondent à sa composition en Al, Fe, Mg, Mn, Ca, K et Na pour le tétraèdre des silicates. Ensuite, le code teste, par itérations successives, tous les sous-tétraèdres que contient le tétraèdre principal, jusqu'à ce qu'il trouve celui dans lequel l'échantillon se situe. Puis, les informations attenantes au sous-tétraèdre sélectionné sont utilisées pour effectuer diverses actions.

5.2 Étape 1 : Extraction du nombre de moles des éléments

Tout calcul normatif débute par l'extraction du nombre de moles des éléments qui entrent dans la composition des minéraux qu'il est possible de calculer. Dans le cas de la norme HautGrade, elle extrait les valeurs de Si, Al, Ca, Mg, Fe, Na, K, Ti, Mn, P, Zr, Ba, B, Cr, de divers métaux entrant dans la composition des sulfures principaux et des volatils H, S, C, Cl et F. Notez que si l'un de ces éléments est manquant, la valeur extraite sera 0, ce qui ne gênera pas le bon déroulement du calcul.

Ces nombres de moles sont extraits à partir d'une analyse chimique recalculée à 100%. La valeur du total utilisé par ce recalcul correspond à la somme des oxydes dont le code a besoin pour effectuer son calcul (cf. somme recalculée à l'interne, ignorant ainsi les valeurs d'un éventuel champ « total » de la base de données utilisée). L'état d'oxydation du fer et le type de volatil utilisé pour calculer ce total dépendra des options choisies par l'utilisateur.

La valeur de ce total est disponible dans la colonne intitulée « TOTALoxyde_ (nom du modèle) », que le logiciel ajoute à la base de données Access à la fin du calcul. Si les valeurs du total sont très différentes de 100 wt%, il est recommandé à l'utilisateur de vérifier la validité de son analyse chimique et/ou de choisir d'autres options pour le calcul de Fe₂/Fe₃, par exemple.

5.3 Étape 2 : Extraction des volatils et calcul de la GAF

Le code cherche systématiquement à extraire les valeurs de H₂O, CO₂, S et PAF (« Perte Au Feu »). Si H₂O et CO₂ ont été analysés mais que l'utilisateur choisit de calculer le CO₂ normatif, alors les valeurs analysées seront ignorées, le code n'utilisera que la valeur de la PAF et déterminera la valeur du CO₂ et du H₂O normatifs par itérations successives. Dans le cas contraire, les carbonates seront calculés jusqu'à consommation complète du CO₂ analysé, le code pourra déterminer si les silicates contiennent ou non trop d'eau et aucune itération ou calcul de la GAF (« Gain Au Feu ») ne sera nécessaire.

Le calcul de la GAF est nécessaire seulement lorsque le code doit utiliser la PAF pour estimer C et H. La GAF correspond à l'oxydation du Fe₂ contenu dans les sulfures et les carbonates au moment du chauffage de l'échantillon. Les silicates ne sont pas affectés par ce problème car les liens atomiques sont trop forts dans ce type de minéraux. L'oxydation de FeO en Fe₂O₃ consomme de l'oxygène, ce qui peut rendre la PAF négative, en augmentant plutôt qu'en diminuant le poids de l'échantillon. La GAF se calcule grâce aux formules suivantes (extraites de Trépanier, 2013):

$$\text{GAF \% (sulfure)} = \text{nbr moles minéral} * \text{nbr moles Fe minéral} * 1,5 * 15,998$$

$$\text{GAF \% (carbonate)} = \text{nbr moles minéral} * \text{nbr moles Fe minéral} * 0,5 * 15,998$$

Une fois la GAF calculée, la quantité de H normatif est ajustée grâce à la formule suivante:

$$\text{moles H normatif} = (\text{Perte au feu\%} - \text{S\%} - \text{H}_2\text{O_MOINS \%} + \text{GAF} - \text{CO}_2\text{_normatif \%}) / 9,01$$

L'estimation du C normatif pourra ensuite se faire à partir de cette nouvelle valeur de H, par itérations successives. Notons que pour la première itération, la quantité de CO₂ normatif est fixée à 0. Cette quantité de CO₂ sera ensuite augmentée de 0,1 wt% chaque fois que le code repassera par l'étape 8 (cf. section 5.9).

5.4 Étape 3 : Calcul des minéraux accessoires

Les minéraux accessoires formés au début du calcul sont les suivants : apatite, chromite, sulfures, barite, tourmaline et zircon.

L'apatite est calculée jusqu'à l'épuisement du P (ou du Ca), et avec tout le Cl et le F disponible (ou H). La chromite consomme tout le Cr et utilise du Fe. Le zircon consomme tout le Zr et utilise tout le Si dont il a besoin (cf. Si est considéré en excès).

Les tourmalines ont un champ de stabilité très large, allant des premiers stades de la diagenèse jusqu'à des conditions de P-T élevées, et sont donc calculées pour tous les faciès. Selon que la roche est plutôt riche en Na, Al, Fe ou Mg, l'une des quatre espèces de tourmalines disponibles dans la norme sera calculée. À la fin de son calcul, le code fournit la proportion de tourmaline calculée, sans donner de détail sur l'espèce utilisée. Les quatre tourmalines pouvant être calculées sont des H-tourmalines : foitite, foititeMg, schorl et dravite.

Pour les autres minéraux, si S a été analysé, la quantité maximale de galène, sphalérite, millérite, molybdénite, chalcopryrite, arsénopyrite et barite sera calculée jusqu'à épuisement du Pb, Zn, Ni, Mo, Cu, As et Ba. Si S n'a pas été analysé, alors les sulfures seront quand même calculés à partir de Pb, Zn, Ni, Mo, Cu, As et Ba. La quantité de S entrant dans ces minéraux correspondra alors au S calculé de façon normative.

Notons que les mêmes sulfures sont utilisés quel que soit le grade métamorphique. Cette approximation s'est avérée nécessaire car les champs de stabilité des différents sulfures n'ont pas pu être étudiés en détail dans le cadre de ce projet. Puisque le métamorphisme entraîne des réactions sulfures-sulfures et sulfures-silicates complexes, il est recommandé de ne calculer CONSONORM HautGrade que sur des roches pauvres en sulfures.

Ensuite, si S a été analysé et qu'il n'est pas entièrement consommé par la formation des phases citées ci-dessus, il sera utilisé pour former de la pyrite ou de la pyrrhotine, dépendamment du faciès métamorphique choisi (**Figure 1**).

5.5 Étape 4 : Calcul des carbonates

Lors d'un épisode de carbonatation, les Ca-carbonates se forment tôt puis, si la carbonatation se poursuit, des Fe- et Mg-carbonates peuvent se former. Cette observation a été reproduite par les normes NORMAT et CONSONORM BasGrade, qui calculent les carbonates dans l'ordre suivant : calcite, puis sidérite et magnésite. Ensuite, on fait réagir ces minéraux afin de former la dolomite et/ou l'ankérite.

L'idée de cette séquence de calcul a été reprise dans CONSONORM HautGrade, avec de légères différences. Si le nombre de moles de C est inférieur au nombre de moles de Ca, alors seule la calcite est formée. Sinon, on utilise Ca et tout ou partie de Fe-Mg, selon que la quantité de C est très inférieure ou peu différente de Ca+Fe+Mg, pour calculer les carbonates.

Les carbonates à calculer sont déterminés à partir d'un diagramme ternaire et dépendront de la composition en Ca-Fe-Mg de la roche. Ces diagrammes varient d'un faciès à l'autre (cf. Annexe A). Les carbonates pouvant être calculés sont : calcite, magnésite, sidérite, dolomite et ankérite.

Dans la séquence de calcul, les carbonates seront calculés à cette étape si C a été analysé et que l'utilisateur a choisi d'utiliser le C mesuré. Sinon, et seulement si l'utilisateur a choisi de calculer le CO₂ normatif, les carbonates ne seront pas calculés à cette étape, mais bien aux itérations qui suivront (cf. étape 8, section 5.9).

5.6 Étape 5 : Calcul des oxydes Fe-Ti

Les oxydes sont calculés seulement si la roche contient du Ti et/ou du Fe³⁺. Les oxydes à calculer sont déterminés à partir d'un diagramme ternaire et dépendent de la composition en Fe²⁺-Fe³⁺-Ti de la roche. Ces diagrammes varient d'un faciès à l'autre (cf. Annexe B).

Afin d'utiliser les diagrammes ternaires, il est nécessaire de déterminer quelle quantité de Fe₂ doit être assignée aux oxydes versus silicates. Cette quantité est déterminée par l'utilisateur (cf. section 7. Options proposées).

5.7 Étape 6 : Calcul des silicates

Le calcul des silicates est complexe et est décrit dans la section suivante. Il prend en compte les étapes suivantes :

- Choix du tétraèdre métamorphique parmi les trois disponibles pour chaque faciès. Ce choix dépend du contenu en Fe, Mg et Mn de la roche.
- Utilisation du tétraèdre choisi pour déterminer les quatre minéraux de l'assemblage à calculer. Certains de ces minéraux correspondent en fait à plusieurs minéraux (cf. GRTpyalm correspond en fait à pyrope, almandin et spessartine). Calcul des proportions de ces minéraux par résolution d'équations linéaires (cf. Pruseth, 2009). Ces calculs sont effectués en considérant que Si et H sont en excès.
- Série d'ajustements visant à pallier les limites de représentation de l'ensemble des silicates au sein d'un seul tétraèdre (cf. calcul d'amphiboles additionnelles, répartition du K-Na entre les micas et les feldspaths, etc.).
- Les déficits en Si sont ensuite gérés. Si la roche contient un excès de Si, du quartz est formé. Si la silice est déficitaire, les minéraux sont détruits les uns après les autres au profit de phases moins gourmandes en Si, jusqu'à résolution du problème.
- Si de l'olivine et du quartz ont été formés, ils réagissent pour former de l'orthopyroxène (choix discutable qui pourrait être retiré du calcul si nécessaire).
- Enfin, les minéraux sont répartis entre leurs différents pôles purs : olivine devient fayalite et forstérite, etc.

5.8 Étape 7 : Réactions entre silicates et carbonates

Pour les 13 faciès de faible rapport P/T (**Figure 1**), les carbonates ne peuvent pas coexister avec une trop grande quantité de quartz : ils réagissent pour former plus de silicates et du graphite. Cette réaction a été reproduite dans le calcul de CONSONORM HautGrade.

Ces réactions n'ont lieu que si le quartz est en excès par rapport aux carbonates. Les conditions dans lesquelles le quartz et les carbonates réagissent peuvent être visualisées sur des diagrammes ternaires. Ces diagrammes ont servi à définir un tétraèdre qui est utilisé par le code pour déterminer s'il doit, ou non, détruire les carbonates, transformer le C en graphite et recommencer le calcul des silicates avec les quantités additionnelles de Ca, Fe et Mg disponibles (**Figure 2**). Les tétraèdres sont différents d'un faciès à l'autre (cf. Annexe C).

Notons que pour des roches riches en carbonates (cf. marbres par exemple), les carbonates sont stables à toutes les conditions P-T de CONSONORM HautGrade.

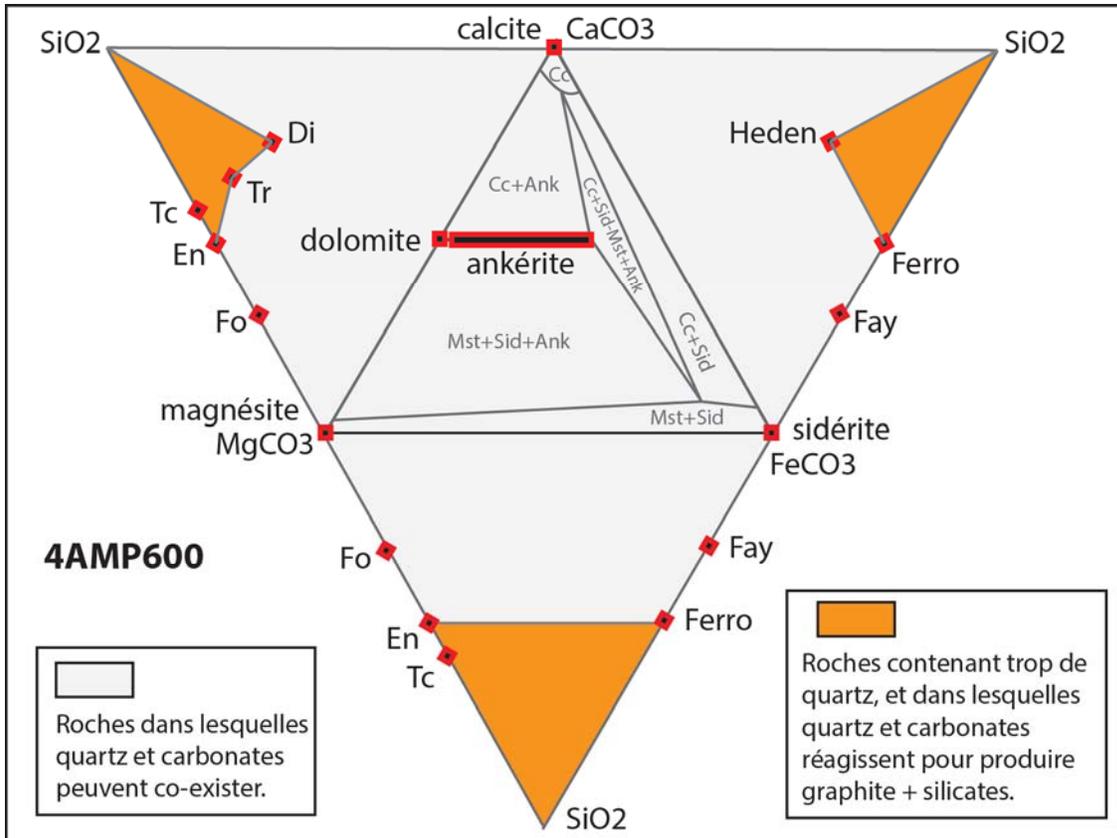


Figure 2. Vue éclatée du tétraèdre $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-SiO}_2$ du faciès 4AMP600, utilisé pour déterminer si les carbonates peuvent coexister avec le quartz dans une roche ou doivent réagir pour former du graphite et des silicates.

5.9 Étape 8 : Volatils normatifs et itérations

À cette étape, la quantité d'H contenue dans les minéraux formés précédemment est calculée et comparée à la quantité d'H disponible. Si l'utilisateur a décidé d'utiliser les éléments mesurés, aucune itération ne sera nécessaire et l'on passera à l'étape 9.

Sinon, si les minéraux contiennent plus d'eau que ce qui est disponible, alors on passera à l'étape 9. Dans le cas contraire, si les minéraux contiennent moins d'H que ce qui est disponible, l'itération débutera.

Ainsi, la quantité de CO_2 normatif, qui était initialement égale à 0, sera augmentée de 0,1 wt%, ce qui aura pour conséquence de diminuer la valeur de l'H. Aussi, les minéraux formés à partir de l'étape 4 incluse seront détruits et le calcul sera repris à partir de l'étape 4. L'itération se poursuivra jusqu'à ce que la quantité d'H contenue dans les silicates soit égale ou légèrement supérieure à la quantité de H disponible. Si cette condition n'est jamais atteinte, alors toute la PAF, qui était initialement considérée comme étant de l'H, sera maintenant considérée comme étant du C.

5.10 Étape 9 : Message de la colonne « Comment »

À la fin du calcul, la colonne « COMMENT_ (nom du modèle) » est ajoutée à la table Access. Cette colonne contient des recommandations qui permettent à l'utilisateur de porter un jugement sur la validité de son calcul.

Si l'utilisateur a choisi de ne pas calculer les volatils de façon normative, alors les messages suivants s'afficheront :

- Si l'eau contenue dans les silicates est égale à $H_2O_{\text{mesuré}} \pm 0,1 \text{ wt\%}$, alors le message sera le suivant : « **Aucun désaccord entre faciès choisi et H₂O mesuré.** ».
- Si les silicates contiennent trop d'eau par rapport à $H_2O_{\text{mesuré}} \pm 0,1 \text{ wt\%}$, alors le message sera le suivant : « **Il est recommandé d'utiliser un faciès de plus haute température.** ».
- Si les silicates ne contiennent pas assez d'eau par rapport à $H_2O_{\text{mesuré}} \pm 0,1 \text{ wt\%}$, alors le message sera le suivant : « **Il est recommandé d'utiliser un faciès de plus basse température.** ».

Si l'utilisateur a choisi de calculer les volatils de façon normative, alors les messages suivants s'afficheront :

- Si l'eau contenue dans les silicates est égale à $H_2O_{\text{normatif}} \pm 0,1 \text{ wt\%}$, alors le message sera le suivant : « **Aucun désaccord entre faciès choisi et H₂O mesuré.** ».
- Si les silicates contiennent trop d'eau par rapport à $H_2O_{\text{normatif}} \pm 0,1 \text{ wt\%}$, alors le message sera le suivant : « **Il est recommandé d'utiliser un faciès de plus haute température.** ».
- Dans ce cas de figure, les excès d' H_2O_{normatif} ont été convertis en CO_2_{normatif} (cf. étapes 4 à 8), et le troisième message n'est pas possible.

5.11 Étape 10 : Ajustement de la quantité d'oxydes de Fe-Ti

À cette étape, le code repasse à travers tous les silicates formés et détermine la quantité de Fe₃ dont ils ont besoin. Jusqu'à présent, tout le Fe₃ avait été pris par les oxydes de Fe-Ti. S'il s'avère que les silicates ont besoin de Fe₃, alors il sera repris aux oxydes. Aussi, si pendant l'étape de destruction des silicates (cf. correction pour le déficit en Si), du Fe₂ a été formé (cf. étape ultime de la destruction des silicates), alors ce Fe₂ sera utilisé pour former plus d'oxydes.

Ainsi, s'il reste du Fe₂ à répartir et/ou si les silicates ont besoin de Fe₃, alors les oxydes de Fe-Ti formés à l'étape 5 seront détruits et leur calcul sera réitéré avec les valeurs ajustées de Fe₂ et Fe₃.

5.12 Étape 11 : Poids pourcent des minéraux et densité

À cette étape, le wt% des minéraux est calculé. Ensuite, la somme des minéraux est effectuée, et extraite dans la colonne « TOTALmineral_ (nom du modèle) ». Cette somme est ensuite utilisée pour recalculer les minéraux normatifs à 100%.

Il est recommandé à l'utilisateur de vérifier que les valeurs de la colonne « TOTALmineral_ (nom du modèle) » soient proches de 100%. Si ces valeurs sont très inférieures à 100, c'est généralement que le calcul des silicates a échoué : le code n'a alors pas généré de message d'erreur mais a abandonné le calcul pour passer à l'échantillon suivant.

Le code multiplie ensuite les proportions et les densités de chaque minéral normatif, et propose une estimation de la densité de la roche totale. Ensuite, si l'utilisateur a choisi d'obtenir des résultats simplifiés, les pôles purs de chaque solution solide sont additionnés. Pour les feldspaths, le calcul est plus complexe. En effet, les trois feldspaths (anorthite, orthose, albite) doivent être répartis en deux groupes : plagioclase et feldspath alcalin. Cette répartition est effectuée selon la méthode de Le Maître (1976) :

Feldspath alcalin = orthose * T

Plagioclase = anorthite * T

Avec $T = (\text{orthose} + \text{albite} + \text{anorthite}) / (\text{orthose} + \text{anorthite})$

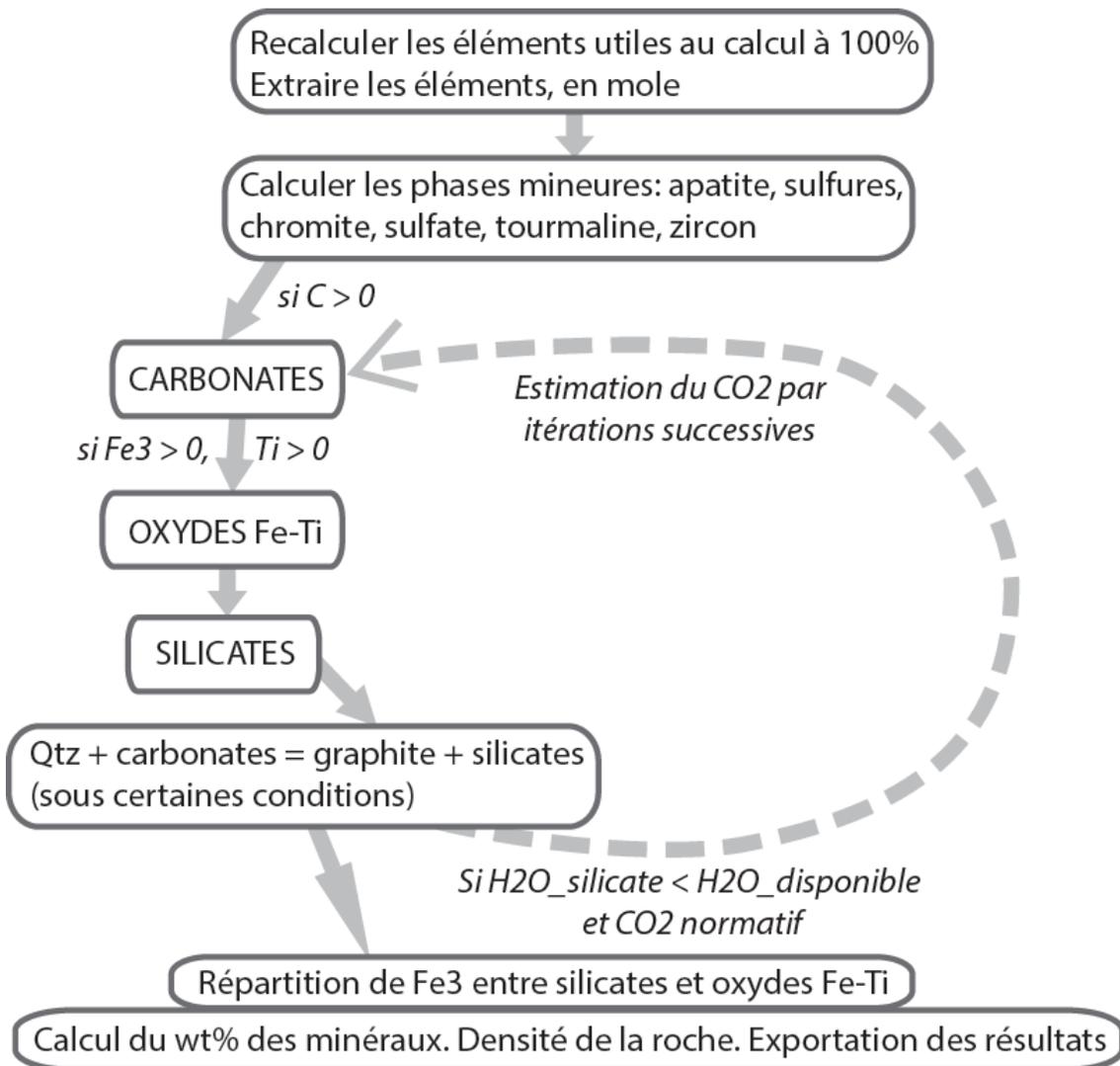


Figure 3. Séquence de calcul schématique de **CONSONORM** HautGrade.

6 CALCUL DES SILICATES

Un soin particulier a été apporté au calcul des silicates car l'objectif principal de CONSONORM HautGrade est de faciliter l'interprétation des roches métamorphiques à partir de paragenèses principales essentiellement constituées de silicates. Comme il a été mentionné précédemment, cette norme n'est pas adaptée aux roches riches en sulfures, car ces minéraux n'ont pas pu être documentés en détail dans le cadre de ce projet.

6.1 Choix du tétraèdre métamorphique

Les tétraèdres métamorphiques qu'utilise le calcul ont les pôles suivants :

- Al
- Ca
- Fe + Mg + Mn
- K + Na

Ainsi, Si et H sont considérés en excès et des ajustements visant à reproduire plus fidèlement les quantités de Si et H disponibles sont effectués plus tard dans la séquence de calcul.

Le rassemblement de K et Na sur un même pôle pose quelques problèmes, car certains minéraux n'intégrant que le K (cf. biotite) pourront être formés même si la roche est déficitaire en K. Pour pallier à ce problème, des ajustements sont également possibles (cf. section 6.3.2).

Le rassemblement de Fe et Mg sur un même pôle pose des problèmes bien plus importants. En effet, selon que la roche est riche en Fe, Mg ou Mn, les phases qui cristalliseront seront très différentes :

- Fe >> (Mg+Mn) : staurotide, olivine, grenat (almandin), chloritoïde, hercynite ou cordiérite, chlorite (daphnite);
- Mg >> (Fe+Mn) : cordiérite, chlorite (súdoïte et autres), carpholite, talc, anthophyllite;
- Mn >> (Fe+Mg) : grenat (spessartine).

Pour des roches de compositions intermédiaires, les phases possibles seront un mélange entre les différentes phases citées ci-dessus. Notons que la présence de Mn dans une roche augmente le champ de stabilité du grenat, et diminue celui des autres minéraux ferromagnésiens.

Les différences entre les roches riches en Mg, Fe ou Mn sont trop importantes pour être seulement gérées par des ajustements faits à partir du premier assemblage calculé. Pour pallier à ce problème, trois tétraèdres ont été mis en place pour chaque faciès :

- Tétraèdre I : pour les roches riches en Mg;
- Tétraèdre II : pour les roches riches en Fe (ou Mn). Ce tétraèdre contient un maximum de grenat. Aussi, si la roche est riche en Mn, ce tétraèdre est sélectionné et ajusté, pour limiter la cristallisation de phases ferrifères qui n'acceptent qu'une quantité limitée de Mn dans leurs structures;
- Tétraèdre III : pour les roches de compositions intermédiaires en Fe (ou Mn) et Mg.

Le choix du tétraèdre approprié se fait via l'utilisation d'un autre tétraèdre, dont les pôles sont Al-Fe-Mg-Mn, et qui contient les trois zones I, II et III. Ces zones permettent de faire un choix entre les différents tétraèdres disponibles. La taille de ces zones varie selon les faciès, ce qui permet de faire

augmenter le champ de stabilité du grenat, par exemple, pour les faciès de plus haute T, etc. (cf. Annexe D).

6.2 Choix de l'assemblage et calcul des proportions minérales

Une fois le tétraèdre Al-FM-KNa-Ca des silicates choisi (Annexe E), il est utilisé pour déterminer l'assemblage de silicates à calculer. Cet assemblage est constitué de quatre minéraux dont les proportions sont ensuite calculées selon la méthode de Pruseth (2009) (cf. section 4.1), en considérant que Si et H sont en excès.

6.3 Ajustements (amphiboles, etc.)

6.3.1 Minéraux temporaires

Selon les minéraux calculés à l'étape précédente, certains ajustements peuvent être nécessaires. Tout d'abord, la norme contient une série de minéraux (cf. FSP et GRT) désignés comme « temp » pour temporaire. Ces minéraux ont des compositions intermédiaires entre l'orthose, l'albite et l'anorthite, pour les feldspaths (FSP), ou entre le pyrope, l'almandin et le grossulaire, pour les grenats (GRT). La proportion de ces minéraux est donc répartie entre orthose-albite et anorthite, et entre pyrope-almandin et grossulaire à cette étape.

6.3.2 Phases à Mg ou K

Ensuite, la sudoïte, qui contient seulement du Mg et pas de Fe, est en partie détruite. Le fer qui lui a été assigné est alors transmis au chloritoïde.

La biotite est un minéral à K. Ainsi, le Na qui lui a été assigné doit lui être retiré, ce qui entraîne la destruction de la « Na-biotite ». Dans deux cas, les faciès 10SB350 et 9SB450, la « Na-biotite » devient du glaucophane, qui ne peut être créé que de cette façon. Pour les autres roches, la « Na-biotite » devient du feldspath alcalin. L'excès de Fe-Mg produit par ces réactions est transformé en minéraux ferromagnésiens (cf. olivine, etc.). Ensuite, si des minéraux riches en Al ont été formés (cf. aluminosilicates, staurotide, etc.), ils réagissent avec les minéraux ferromagnésiens pour former des phases de compositions intermédiaires en Al et FM (cf. cordiérite, chloritoïde, etc.).

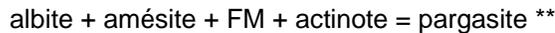
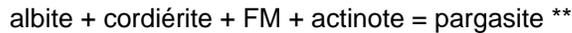
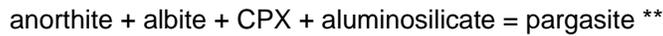
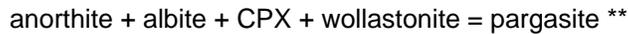
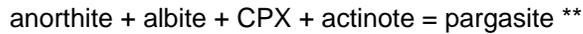
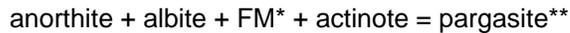
6.3.3 Micas blancs

Contrairement à la biotite, les micas blancs (muscovite et paragonite) présentent une solution solide complète entre Na et K. Cependant, lorsqu'ils coexistent avec le feldspath alcalin, ils ont tendance à s'approprier la majeure partie du Na, alors que le feldspath prend plutôt le K disponible. Ces échanges de K et Na entre ces minéraux ont été reproduits par le calcul normatif.

6.3.4 Amphiboles

Ensuite, la proportion d'amphiboles est ajustée pour les 8 faciès des amphibolites uniquement. Cet ajustement s'est avéré nécessaire car les amphiboles sont sous-représentées dans les diagrammes ternaires découlant de la résolution des équations thermodynamiques. Le groupe des amphiboles est en fait très complexe et n'est pas encore entièrement compris par les données expérimentales. Ceci pourrait expliquer que leurs solutions solides ne puissent pas toujours être déduites par le calcul.

Les ajustements effectués visent à produire le plus d'amphiboles possible, grâce aux réactions suivantes :



*FM: minéraux ferromagnésiens (ne contenant que Fe, Mg, Si, (H)).

**Ces équations ne sont pas à l'équilibre car les proportions des phases détruites pour permettre la création de nouvelles amphiboles varient selon leurs abondances initiales.

6.3.5 Minéraux FM (ferromagnésiens)

Le pôle FM des tétraèdres peut correspondre aux minéraux suivants : olivine, OPX, talc, anthophyllite, rhodonite ou pyromangite. La détermination du ou des minéraux représentés par ce pôle FM est effectuée en fonction de la valeur des rapports Mg/Fe, Mg/Mn et Fe/Mn. Les minéraux FM de CONSONORM HautGrade sont représentés dans des diagrammes ternaires adaptés des diagrammes produits par Perple_X (cf. Annexe F).

6.4 Déficit / excès de silice

À cette étape du calcul, la quantité de Si nécessaire aux silicates formés précédemment est calculée. Si la roche contient un excès de Si, du quartz est formé. Sinon, si la silice est déficitaire, les minéraux sont détruits les uns après les autres jusqu'à la résolution du problème.

La séquence de destruction des minéraux est déterminée par leur richesse en Si (par rapport à leurs contenus en Fe-Mg-K-Na-Ca-Al-H) : les plus gourmands en silice sont détruits en premier. Les réactions permettant de calculer des phases moins riches en silice (cf. Annexe G) ont été déterminées à partir d'une série de diagrammes ternaires, calculés avec Perple_X pour chaque faciès, dont l'un des pôles était toujours Si et dont les autres pôles pouvaient correspondre à K, Na, Fe, Mg, Ca ou Al (**Figure 4**).

6.5 Olivine et quartz

Si de l'olivine et du quartz ont été formés, ils réagissent pour former de l'orthopyroxène. Ce choix est discutable et pourrait être retiré du calcul si nécessaire. En effet, dans les roches magmatiques, l'olivine et le quartz cristallisent dans des conditions très différentes et ne peuvent donc pas coexister à l'équilibre. Dans les roches métamorphiques cependant, le quartz se forme si la silice est en excès, et l'olivine se forme dans des roches riches en Fe. Ainsi, ces deux minéraux pourraient théoriquement coexister.

6.6 Depuis les solutions solides vers les pôles purs

Enfin, les minéraux sont répartis entre leurs différents pôles purs. Ces pôles purs sont au nombre de deux pour la plupart des minéraux : Mg-minéraux et Fe-minéraux, K-minéraux et Na-minéraux. Le grenat est la seule exception, avec deux pôles purs (pyrope et almandin), si le rapport $(Fe+Mg)/(Fe+Mg+Mn)$ est supérieur à 0,9, et trois pôles purs (pyrope, almandin et spessartine) dans les autres cas.

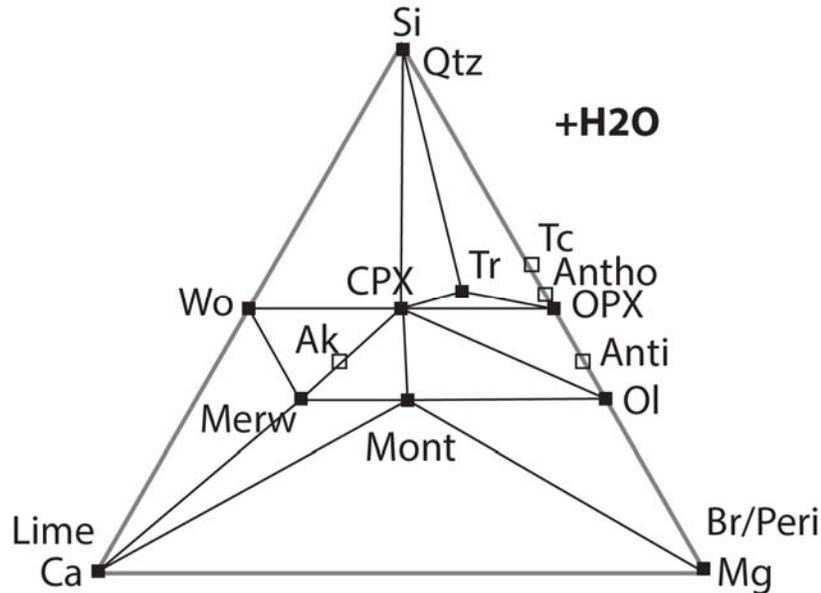


Figure 4. Liste complète des minéraux pouvant figurer sur le diagramme ternaire Ca-Mg-Si et exemples de réactions possibles entre ces minéraux (cf. lignes qui lient les minéraux).

7 OPTIONS PROPOSÉES

La fenêtre de dialogue (**Figure 5**) de CONSONORM HautGrade qui est disponible sous l'outil logiciel demande à l'utilisateur de sélectionner une série d'options, qui sont décrites ci-après.

Notez que la liste complète des espèces minérales calculables par CONSONORM HautGrade, ainsi que la liste des constituants de ces minéraux, leurs densités et leurs masses molaires sont disponibles dans le fichier « Types de données chimiques » de l'outil logiciel (accessible par "Configuration --> Voir le fichier de définition chimique", dans le menu principal du logiciel).

7.1 Calcul du Fe2-Fe3

La bonne détermination des quantités de FeO et Fe₂O₃ présentes dans la roche est essentielle car elle conditionnera la quantité d'oxydes de Fe-Ti que l'on pourra former, et pourra influencer sur le type de tétraèdre métamorphique (cf. I, II ou III) qui sera utilisé.

Options disponibles :

- **Valeurs analysées** : le code cherche d'abord à utiliser Fe_2O_3 ou FeO . Si ces valeurs sont nulles, il convertira FeOT , ou $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$, en Fe_2 .
- **Ratio $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$ fixe** : l'utilisateur peut fixer cette valeur, qui permettra au code de déterminer la quantité de Fe_2 et Fe_3 à partir de FeOT ou de $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{T}$. Dans ce cas, si Fe_2O_3 et FeO ont été analysés, le code n'en tiendra pas compte. Notez qu'il vaut mieux appliquer une même valeur à des roches similaires.
- **Méthode de Le Maître (volcanique)** : même calcul que celui utilisé par la norme CIPW. Le code utilise la quantité de Si-Na-K de la roche (cf. diagramme TAS) pour estimer la quantité de $\text{Fe}_2\text{-Fe}_3$ (Le Maître, 1976). Ne s'applique qu'aux roches volcaniques.
- **Méthode de Le Maître (plutonique)** : idem, mais pour les roches plutoniques.

7.2 Rapport $\text{Fe}_3 / (\text{Fe}_3 + \text{Fe}_2)$ des oxydes de fer

Au moment du calcul des oxydes de Fe-Ti, le code a besoin de savoir quelle quantité de Fe_2 attribuer aux oxydes (cf. section 5.6). Plutôt que de faire un choix arbitraire, cette option permet à l'utilisateur de contraindre cette répartition à partir d'observations qu'il aura faites dans sa zone d'étude. L'idée est d'utiliser les proportions d'oxydes principaux de la roche pour estimer si les oxydes de Fe-Ti contiennent plutôt du Fe_2O_3 ou du FeO . Notons que le choix du bon paramètre n'est pas critique pour des roches riches en silicates, mais l'est en revanche pour des roches riches en oxydes.

Options disponibles :

- **Hématite / (hématite+magnétite)** : estimation de la quantité d'hématite versus magnétite qu'une roche contient.
- **Ilménite / (ilménite+magnétite)** : idem, pour des roches contenant plutôt de l'ilménite.
- **Fell / (Fell + Fell) (molaire)** : estimation de la quantité de Fe_2 et Fe_3 molaires que les oxydes d'une roche contiennent.

7.3 Calcul du CO_2

L'utilisateur peut soit choisir d'utiliser le CO_2 analysé, soit demander à ce que la norme calcule le CO_2 normatif à partir de la PAF.

Options disponibles :

- **CO_2 analysé** : le code utilisera la valeur de C (ppm), CO_2 ou C_PCT (wt%). Si ces valeurs sont nulles, aucun carbonate ne sera calculé.
- **$\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ normatifs** : le code utilisera la valeur de la PAF. À la première itération, il considérera que toute la PAF correspond à du H_2O . Ensuite, il augmentera progressivement le rapport $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$, jusqu'à estimer la valeur de CO_2 et H_2O normatifs par itérations successives.

7.4 Calcul des minéraux

L'utilisateur peut obtenir les proportions des minéraux normatifs en wt% (**poids %**) ou en proportions molaires (**mole %**).

7.5 Niveau de détail

Options disponibles :

- **Norme détaillée** : le code fournira la liste détaillée de tous les pôles purs qu'il a calculés. Cette option a l'avantage de donner les détails des types d'amphiboles ou de grenats qui ont été calculés. Cependant, elle ajoute un très grand nombre de colonnes à la table de données Access, qui ne sont pas toujours faciles à gérer par la suite.
- **Norme simplifiée** : cette option permet de réduire la quantité de données produites par le code, en regroupant, par exemple, pyrope-almandin-grossulaire-spessartine sous la dénomination de grenat.

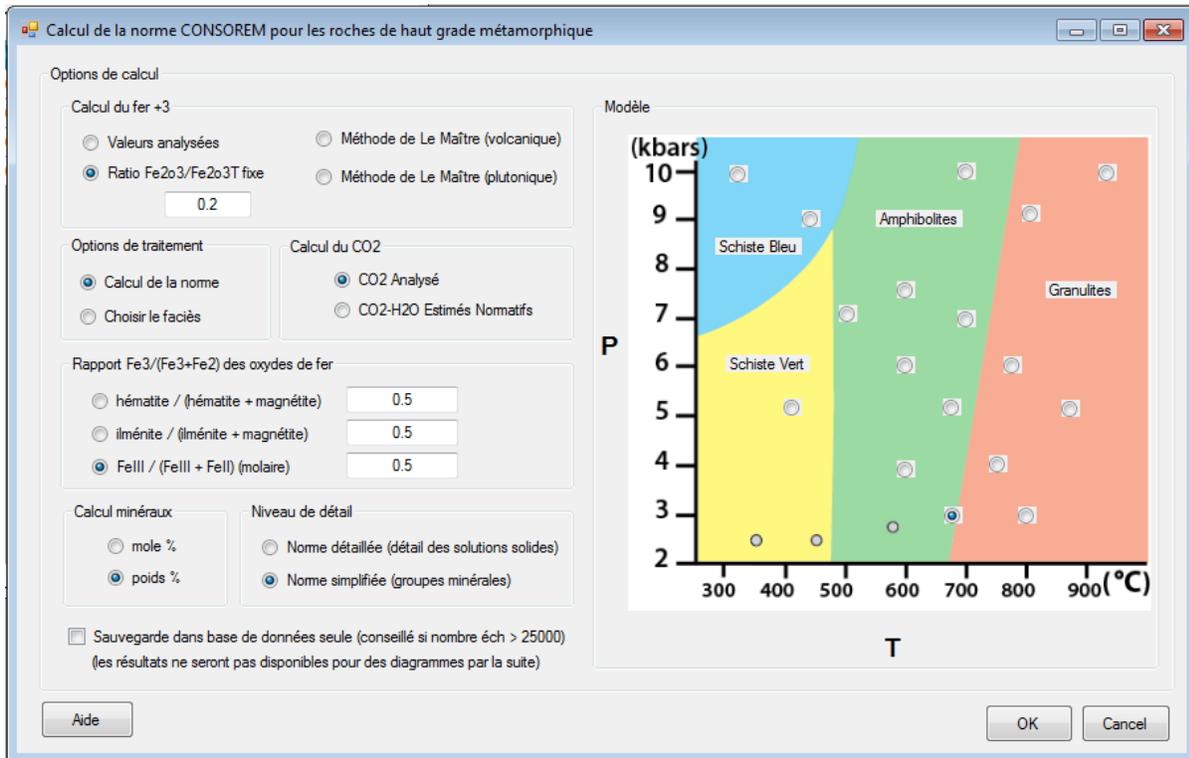


Figure 5. Image montrant la fenêtre de dialogue de CONSONORM HautGrade.

7.6 Options de traitement

Options disponibles :

- **Calcul de la norme** : cette option calcule CONSONORM HautGrade pour l'un des 17 faciès disponibles, et ajoute le résultat de son calcul à la table Access. L'utilisateur peut sélectionner

le faciès pour lequel il souhaite effectuer son calcul dans la partie droite de la fenêtre de dialogue (**Figure 5**), où chaque faciès disponible est représenté sur un diagramme binaire P-T.

- **Choisir le faciès** : cette option n'ajoutera pas de nouvelles colonnes à la table de données Access, mais produira deux nouvelles fenêtres de dialogue visant à aider l'utilisateur dans son choix du faciès approprié (cf. section 8).

7.7 Option pour les bases de données contenant >25 000 entrées

À la fin du calcul, le code ajoute les données calculées à la table de données Access tout en créant ses propres listes à l'interne, qui lui permettront d'utiliser les données pour d'autres traitements (cf. diagrammes, etc.). Ce processus peut s'avérer très long si la base de données contient beaucoup d'entrées.

Pour des bases de données contenant plus de 25 000 échantillons, il est recommandé de cocher l'option « Sauvegarde dans base de données seule (conseillée si nombre éch > 25 000) » située en bas à gauche de la fenêtre de dialogue (**Figure 5**). Si cette option est cochée, les minéraux normatifs ne seront pas disponibles pour des diagrammes par la suite. Ils pourront cependant le devenir si l'utilisateur choisit de reconfigurer ses données (cf. Menu « Configuration »).

8 L'OPTION « CHOISIR LE FACIÈS »

L'option « Choisir le faciès », qui est proposée par la fenêtre de dialogue principale (**Figure 5**), fournit des informations qui visent à aider l'utilisateur à choisir le faciès approprié parmi les 17 disponibles. Il est recommandé de n'appliquer cette option qu'à un nombre limité d'échantillons, car la charge de calcul est 17 fois plus importante que celle demandée par le calcul d'une seule norme.

Cette option compare les minéraux observés par l'utilisateur dans sa roche aux minéraux normatifs. Ainsi, elle demande à l'utilisateur d'informer le logiciel sur la paragenèse de sa roche.

8.1 Données pétrographiques

Avant de calculer la norme, au moment où l'utilisateur configure ses données géochimiques, il a la possibilité d'informer le code sur la paragenèse de ses roches. Les proportions des minéraux observés doivent, au préalable, être présentes dans la base de données Access, sous la forme suivante :

- Le nom des champs doit correspondre au nom d'une phase minérale. Il est recommandé d'utiliser les mêmes noms que ceux intégrés au logiciel, afin d'accélérer le processus.
- Les données stockées dans ces champs correspondent aux proportions des minéraux observés dans la roche (si cette information n'est pas disponible, mettez un 1 (ou autres) pour les phases présentes dans votre roche, et un 0 pour les phases absentes).

Ensuite, au moment de la configuration des données (Menu « Configuration » - Définir les relations entre les colonnes de la base de données et les éléments chimiques), une fenêtre de dialogue, à l'étape 5^{bis}, permet à l'utilisateur d'informer le code sur les paragenèses de ses roches. Cette fenêtre

de dialogue (**Figure 6**) s'utilise de la même façon que les autres fenêtres qui permettent de définir les oxydes, les éléments mineurs, traces, précieux et volatils ainsi que les isotopes.

8.2 Principe du calcul

Dans une première étape, le code calcule les minéraux normatifs pour chaque échantillon, et pour chacun des 17 faciès. Il ne conserve que le résultat simplifié du calcul.

Une fois le calcul achevé, le code effectue deux comparaisons :

- 1) Comparaison du nom des espèces minérales :** pour chaque roche, le code vérifie que l'ensemble des minéraux observés dans la roche ont été calculés par le code. Lorsqu'un minéral observé a été calculé, le résultat de la comparaison reste à 100%. Si un minéral qui a été observé dans la roche n'a pas été calculé, alors le score final diminue, et s'éloigne de 100%. Au final, des chiffres allant de 0 à 100 sont attribués à chacun des 17 faciès disponibles, qui permettent d'évaluer la performance de chaque faciès. Ces chiffres sont montrés dans une nouvelle fenêtre, sur un diagramme P-T (**Figure 7**).
- 2) Comparaison des proportions des espèces minérales :** Pour chacun des faciès, le code crée un diagramme binaire avec, sur l'axe des X, les proportions recalculées à 100% des minéraux observés dans la roche et, sur l'axe des Y, les proportions recalculées à 100% des minéraux normatifs. Ces graphiques sont montrés à l'utilisateur dans une autre fenêtre (**Figure 7**). Ces diagrammes permettent à l'utilisateur de vérifier que les proportions des phases les plus abondantes sont, ou non, correctement reproduites par le calcul. Il arrive fréquemment que les phases moins abondantes soient moins bien calculées, soit parce qu'elles sont plus atypiques, qu'elles sont plus difficiles à estimer en lame mince ou qu'elles correspondent à des phases qui ne sont pas en équilibre avec la paragenèse principale (cf. minéraux rétrogrades, etc.).
- 3) Note sur les recalculs à 100% :** le code calcule lui-même la somme des minéraux observés et des minéraux normatifs pour effectuer son recalcul. Il n'est donc pas nécessaire d'indiquer la somme des minéraux observés au moment de la configuration des données. Notez que si vous n'avez reconnu qu'un quart, par exemple, des minéraux de votre échantillon, les résultats du recalcul seront faux, car le code considère que vous lui avez fourni une paragenèse complète.

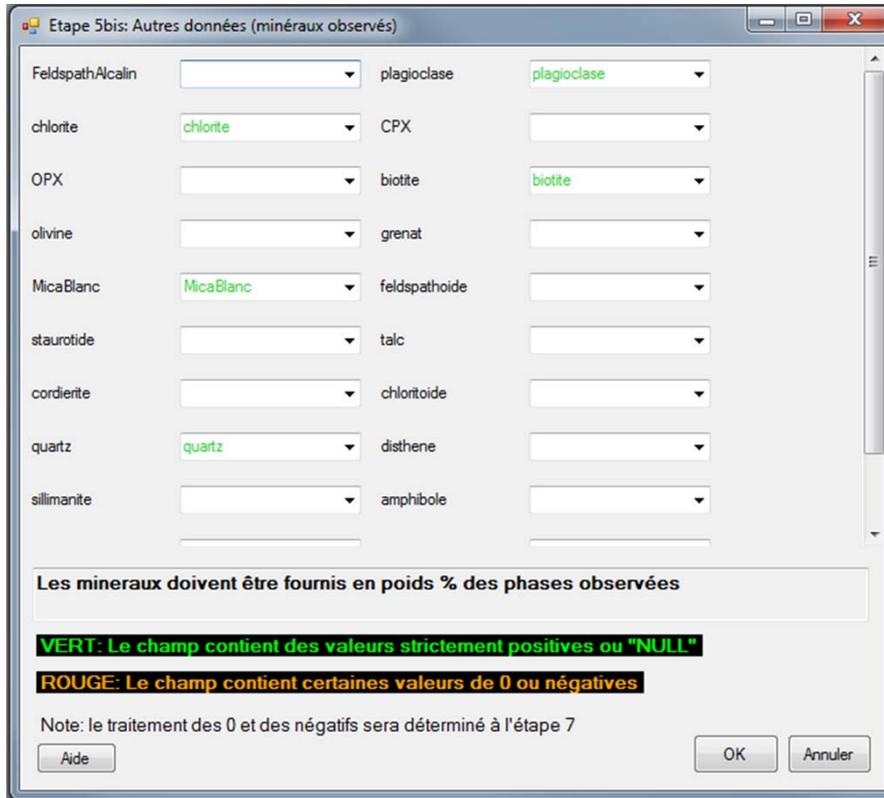


Figure 6. Image montrant la fenêtre de dialogue de l'étape 5bis de la configuration des données minéralogiques.

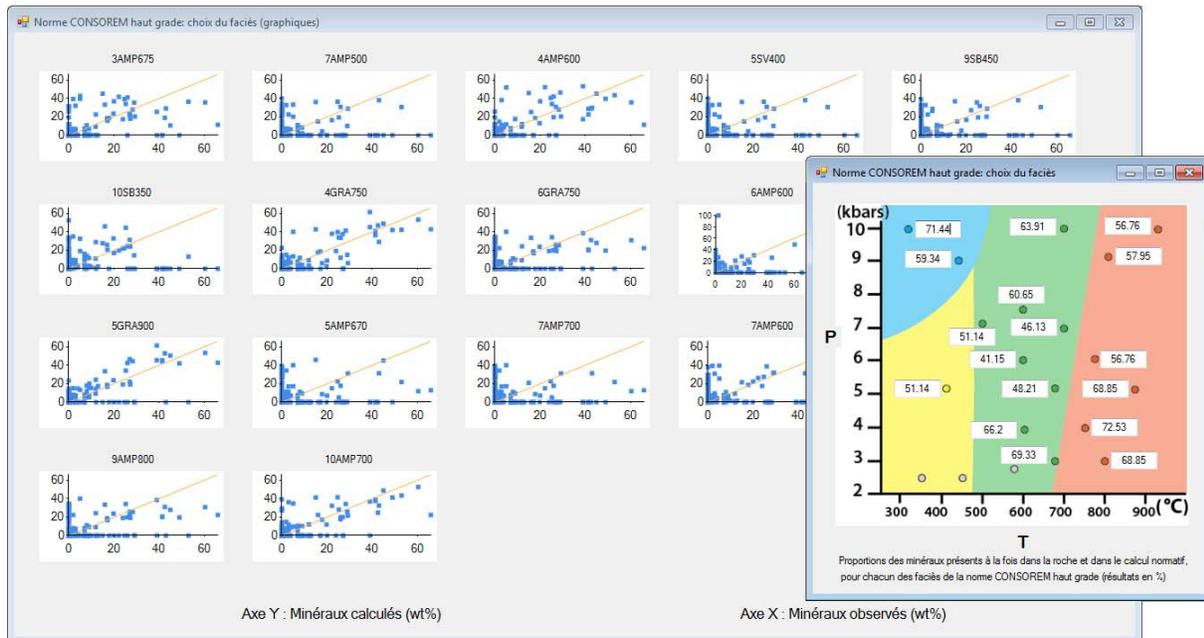


Figure 7. Image montrant les deux fenêtres de dialogue permettant à l'utilisateur de choisir, parmi les 17 faciès disponibles, celui qui est le plus approprié pour ses échantillons.

9 PREMIERS TESTS

Les premiers tests ont été effectués sur des données de la littérature provenant d'une série d'articles sélectionnés sur la base de trois critères : 1) étude sur des roches de haut grade; 2) contenir des analyses roche totale; 3) contenir des informations pétrographiques, plus ou moins quantitatives selon les cas. Les résultats de ces premiers tests sont énumérés ci-dessous.

- 1) **Brunsmann et al. (2000) (amphibolites)** : Les échantillons utilisés documentent 16 amphibolites métamorphisées de 500-550°C et > 6 kbars à 400-500°C et 9-12 kbars (Brunsmann et al., 2000). Le plagioclase n'est pas calculé par la norme mais est observé dans la roche et la clinozoïsite (épidote) est calculée mais surestimée par rapport aux proportions observées; cependant, la corrélation clinozoïsite calculée versus plagioclase observé est bonne. Notons que l'anorthite et la clinozoïsite ont des compositions proches. Le faciès 7AMP500 utilisé pour ce calcul ne peut pas former d'anorthite et forme de la clinozoïsite à la place (**Figure 8**). Pour les autres minéraux, l'estimation est bonne, sauf pour le grenat (non calculé) et les feldspaths alcalins (non observés dans la roche, à moins que l'albite ait été comptabilisée comme plagioclase).
- 2) **Davis et Ferry (1993) (sédiments argileux et marbres)** : Les échantillons utilisés documentent 19 marbres et sédiments argileux calco-silicatés métamorphisés à 630°C et 3 kbars (métamorphisme de contact) (Davis et Ferry, 1993). Bonne estimation des phases principales (cf. carbonates, wollastonite et pyroxènes). Une partie des phases mineures est plus ou moins bien estimée mais, dans l'ensemble, les bons types de minéraux sont retrouvés par la norme (**Figure 9**). Notons que les pôles Ca des tétraèdres métamorphiques de CONSONORM HautGrade sont similaires d'un faciès à l'autre : les paragenèses de roches principalement constituées de calcite et de wollastonite varient donc peu en fonction des variations de P-T.
- 3) **Emmett (1987) (gneiss, gabbro, anorthosite)** : Les échantillons utilisés documentent 21 gneiss (et anorthosites?) métamorphisés à 9 kbars et 1000°C (pic) et gabbros métamorphisés au faciès des amphibolites (Emmett, 1987). L'estimation des feldspaths est bonne, celle des pyroxènes pose problème. Ces problèmes sont principalement causés par les anorthosites et leurs jotunites, et ce pour une raison inconnue, alors que la paragenèse des gabbros et des gneiss est bonne. Cet exemple montre que CONSONORM HautGrade ne s'applique qu'aux ensembles de minéraux ayant cristallisés à l'équilibre : les anorthosites, qui sont des roches magmatiques présentant des points communs avec les cumulats (cf. minéraux ayant pu cristalliser dans différentes conditions de T-X, et détachés de leurs magmas), ne sont pas adaptées pour ce type de calcul. La biotite n'est pas calculée pour le faciès choisi (4GRA750), mais l'est pour d'autres faciès : ce minéral mineur (1 à 10% observé) semble être rétrograde (**Figure 10**).
- 4) **Faak et al. (2012) (méta-basites et méta-pélites)** : Les échantillons utilisés documentent 19 méta-basites et méta-pélites métamorphisées à 9-12 kbars et 800°C (Faak et al., 2012). Estimation relativement bonne, compte tenu que les proportions des minéraux observés sont approximatives. Les amphiboles et les biotites sont les minéraux les moins bien estimés par ce test (**Figure 11**). Les principaux problèmes sont en fait causés par les méta-pélites, peut-être parce que ni la PAF, ni H₂O, ni CO₂ n'ont été analysés.
- 5) **Hansen et Stuk (1993) (migmatites mafiques)** : Les échantillons utilisés documentent 19 méta-basites et méta-pélites (Hansen et Stuk, 1993). L'estimation est assez bonne pour les leucosomes et les mélanosomes à biotite de ces roches. L'estimation est moins bonne pour les plagioclases et les grenats de la roche hôte de ces migmatites; la roche hôte est en effet riche en amphiboles, qui sont mal estimées par le faciès des granulites choisi pour le calcul. Ainsi, il semble que ces roches aient à la fois une paragenèse d'amphibolite (roche hôte non-

migmatisée) et de granulite (veines migmatitiques) que le faciès choisi 6GRA750 ne peut pas reproduire à lui seul (**Figure 12**).

- 6) **Leger et Ferry (1993) (méta-pélites à marbres)** : Les échantillons utilisés documentent 25 méta-pélites et marbres métamorphisés à 4,5 kbars et entre 450°C et 525°C (Leger et Ferry, 1993). L'estimation de la calcite et de l'ankérite est très bonne. La norme calcule aussi des quantités mineures de sidérite, magnésite et dolomite, qui ne sont pas observées dans la roche (**Figure 13**). Seuls les autres silicates, qui sont des phases mineures, permettent de contraindre le type de faciès, puisque la quantité de carbonate et de quartz est relativement insensible aux variations de P-T. Notons que le quartz est sous-estimé par la norme. En fait, une corrélation entre SiO₂ (wt%) et quartz_observé montre que la roche ne peut pas contenir autant de quartz pour la quantité de SiO₂ disponible : la norme offre donc une meilleure estimation de la proportion de quartz que les auteurs de l'article (**Figure 14**).
- 7) **Montanini et Tribuzio (2001) (granulites mafiques et migmatites felsiques)** : Les échantillons utilisés documentent 8 granulites mafiques (méta-cumulats?, méta-gabbros?) et 2 migmatites felsiques du faciès des granulites (Montanini et Tribuzio, 2001). L'estimation est relativement bonne, sauf pour quelques olivines, plagioclases et surtout pour les CPX. La roche décrite dans l'article contient des amphiboles, ce qui laisse supposer qu'une paragenèse principale du faciès des granulites côtoie une paragenèse rétrograde. Aussi, cet exemple montre qu'il est difficile de travailler avec des cumulats, dont l'assemblage principal ne semble pas correspondre à un assemblage minéral formé à l'équilibre (**Figure 15**).
- 8) **Nehring et al. (2009) (granulites)** : Les échantillons utilisés documentent 12 granulites migmatitiques métamorphisées à 8-11 kbars et 750-900°C (Nehring et al., 2009). L'estimation est relativement bonne, sauf pour l'amphibole. En effet, la roche contient de l'amphibole, alors qu'elle appartient au faciès des granulites, et la norme calcule de l'olivine (non observée dans la roche) et du plagioclase plus ou moins bien estimé. Il est possible que l'amphibole observée dans la roche soit rétrograde, et qu'elle provienne de réactions entre les olivines et les anorthites. La biotite semble également être rétrograde (**Figure 16**).
- 9) **Eggins et al. (1998), Nozaka (2011) (péridotites)** : Les échantillons utilisés documentent 8 péridotites (Eggins et al., 1998; Nozaka, 2010). L'estimation de l'OPX et de l'olivine est bonne. Notons que ces minéraux du pôle Fe-Mg des tétraèdres sont peu sensibles aux variations de P-T (sauf pour les faciès de haut rapport P/T). Aussi, dans les roches de Nozaka (2011), l'OPX correspond à OPX+talc, et l'olivine correspond à olivine+serpentine (**Figure 17**).
- 10) **Evans et Bickle (2005) (calcaires)** : Les échantillons utilisés documentent 4 limestones (Evans et Bickle, 2005). L'estimation des carbonates et des micas est bonne pour trois roches. Pour la quatrième roche cependant, la quantité de carbonates est sous-estimée parce que la quantité de biotite est surestimée et consomme trop de H₂O-normatif (qui devrait en fait être du CO₂ normatif). Si la biotite est surestimée dans ce cas-ci, c'est parce que la quantité de fer allouée aux silicates est surestimée puisque cette roche est la seule à contenir beaucoup de pyrrhotine (3 wt%) : seulement, S n'est pas analysé et la quantité de S ne peut pas être estimée normativement à partir de la PAF. Ainsi, le fait de négliger l'analyse du soufre entraîne une très mauvaise estimation de la quantité de silicates et, par répercussion, de la quantité de carbonates (**Figure 18**). **Lorsque les roches contiennent > 2-3 wt% de sulfures, il est recommandé de toujours analyser le S pour éviter ce type de problèmes.**
- 11) **Hirsch et Carlson (2006) (schiste à biotite et grenat)** : Les échantillons utilisés documentent 2 schistes à Bt-Grt (Hirsch et Carlson, 2006). Les deux micas et le grenat sont bien estimés. Notons que ce type de roche (schiste à biotite) est moins sensible que d'autres aux variations de P-T (cf. les mêmes minéraux étaient formés pour les 7 faciès de température ≤ 600°C). En effet, il est souvent plus difficile de contraindre les conditions de P-T du pic du métamorphisme avec des roches riches en Si-Al-K qu'avec des roches riches en minéraux ferromagnésiens (**Figure 19**).

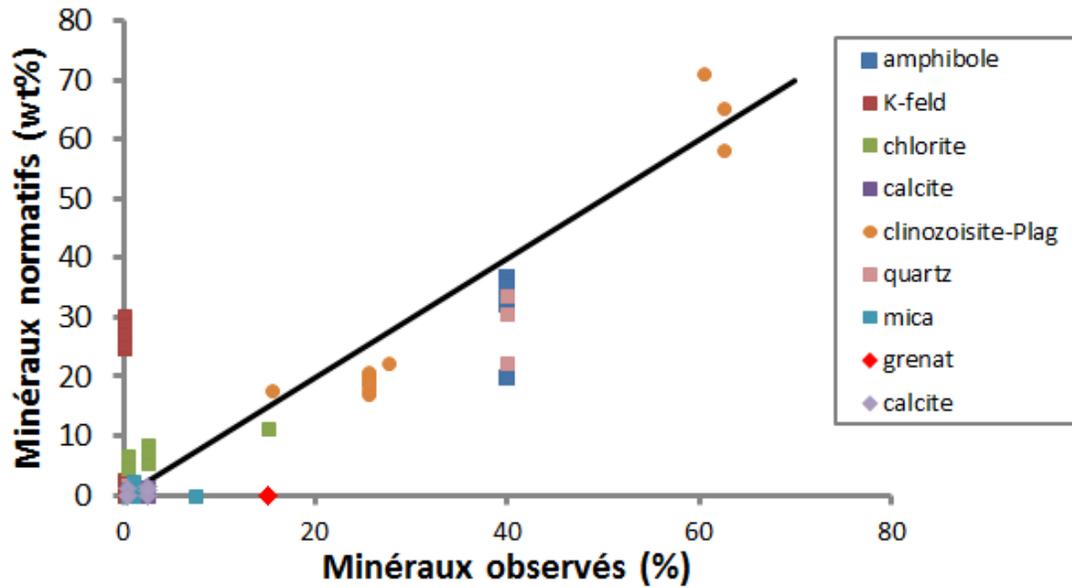


Figure 8. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 16 amphibolites métamorphisées de 500-550°C et > 6 kbars à 400-500°C et 9-12 kbars (Brunsmann et al., 2000). Notez que les proportions des minéraux ont été estimées de façon approximative par l'auteure. Les minéraux ont été calculés pour le faciès 7AMP500 (7 kbars et 500°C), avec CO₂ normatif et Fe²⁺-Fe³⁺ répartis selon la méthode de Le Maître (1976) pour les roches volcaniques.

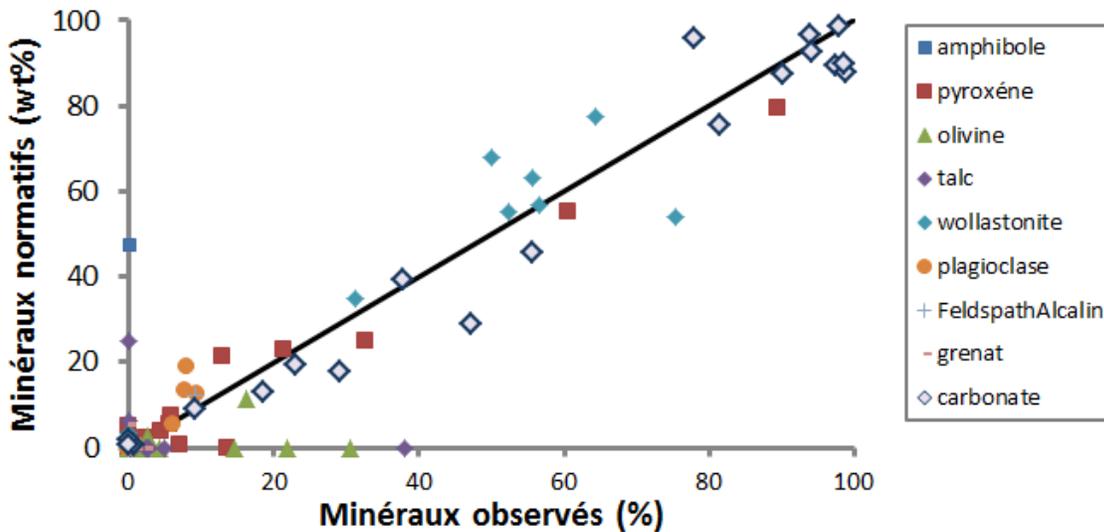


Figure 9. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 marbres et sédiments argileux calco-silicatés métamorphisés à 630°C et 3 kbars (métamorphisme de contact) (Davis et Ferry, 1993). Les minéraux ont été calculés pour le faciès 3AMP675 (3 kbars et 675°C), avec CO₂ normatif et Fe₂O₃/Fe₂O_{3T} égal à 0,2. Les biotites, clinzoisites et spinelles observés, dont les proportions sont < 1 wt%, ne sont pas représentés.

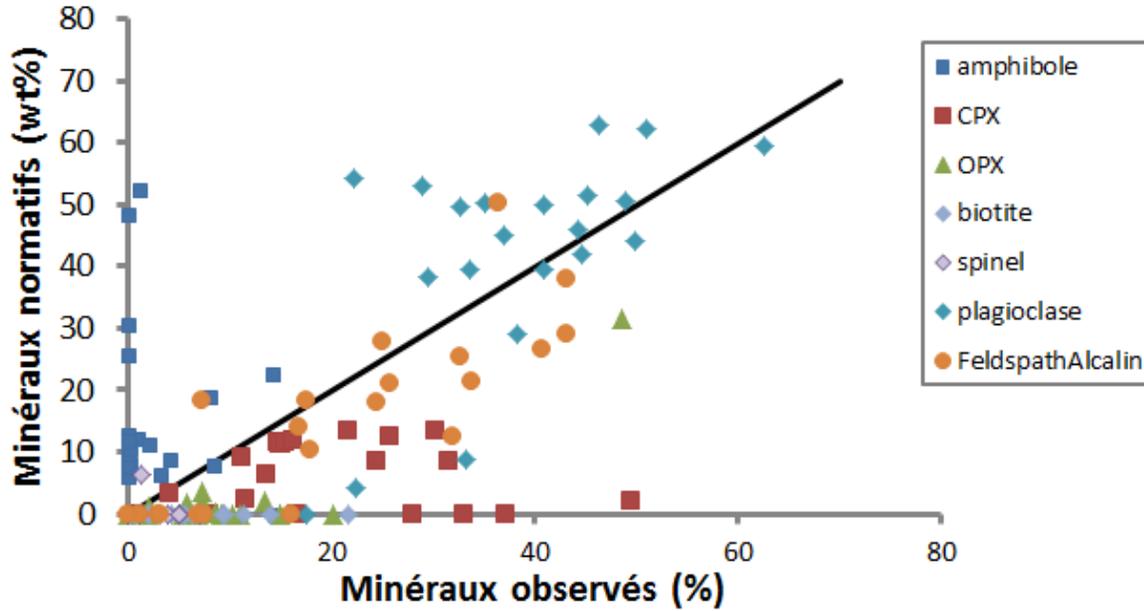


Figure 10. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 21 gneiss (et anorthosites?) métamorphisés à 9 kbars et 1000°C (pic) et gabbros métamorphisés au faciès des amphibolites (Emmett, 1987). Les minéraux ont été calculés avec CO₂, FeO et Fe₂O₃ analysés, et pour le faciès 4GRA750 (4 kbars et 750°C).

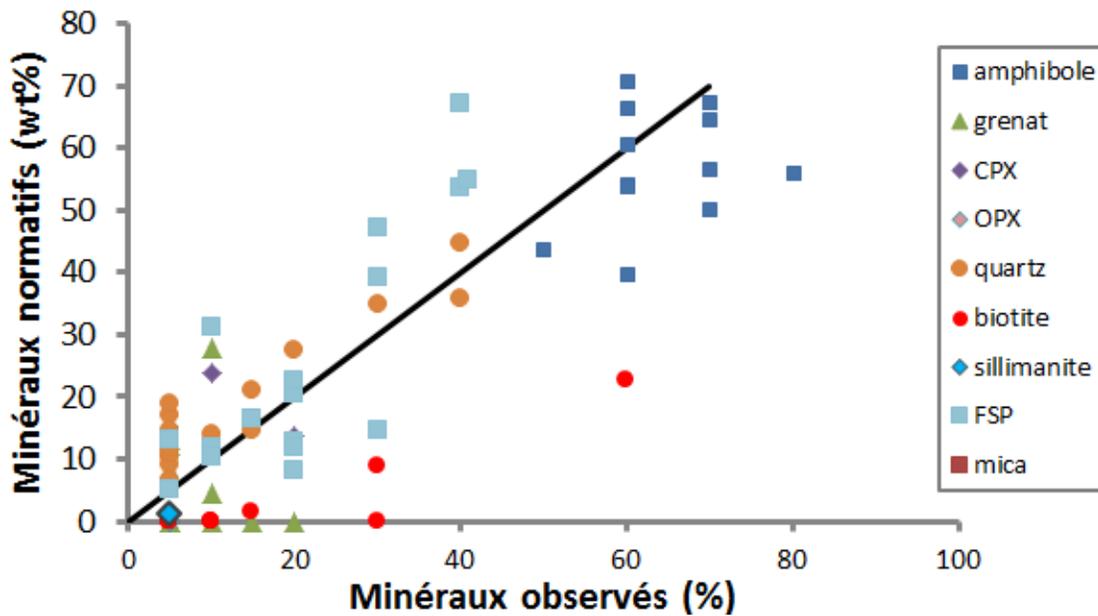


Figure 11. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 méta-basites et méta-pélites métamorphisées à 9-12 kbars et 800°C (Faak et al., 2012). Notez que les proportions de minéraux ont été estimées de façon approximative par l'auteure. Les minéraux ont été calculés avec FeO et Fe₂O₃ analysés, sans CO₂-H₂O (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 4AMP600 (4 kbars et 600°C).

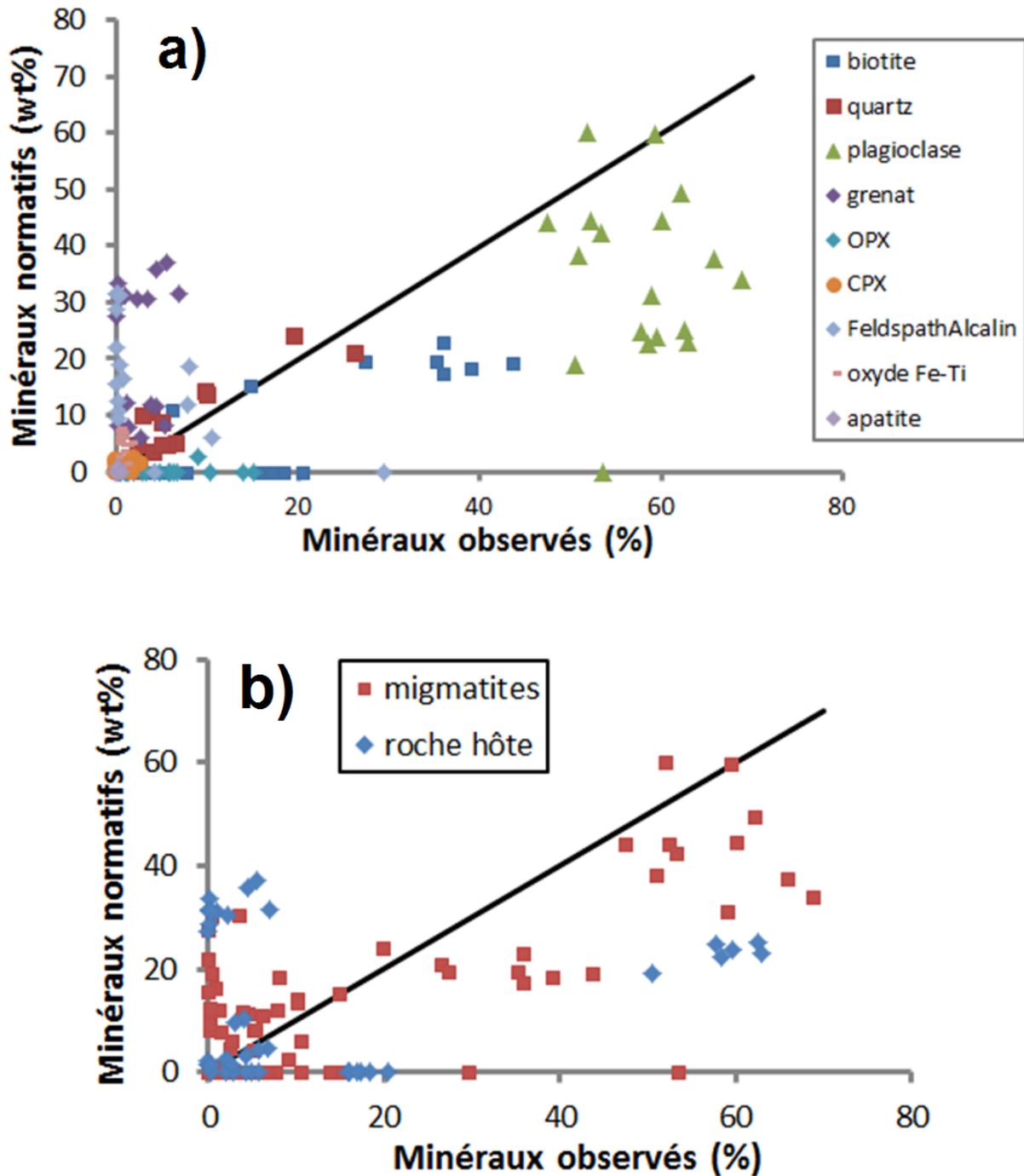


Figure 12. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 19 méta-basites et méta-pélites (Hansen et Stuk, 1993). Les minéraux ont été calculés avec Fe_2O_3/Fe_2O_3T égal à 0,2, sans CO_2-H_2O (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 6GRA750 (6 kbars et 750°C); a) espèces minérales calculées et observées; b) nature des roches observées par Hansen et Stuk (1993).

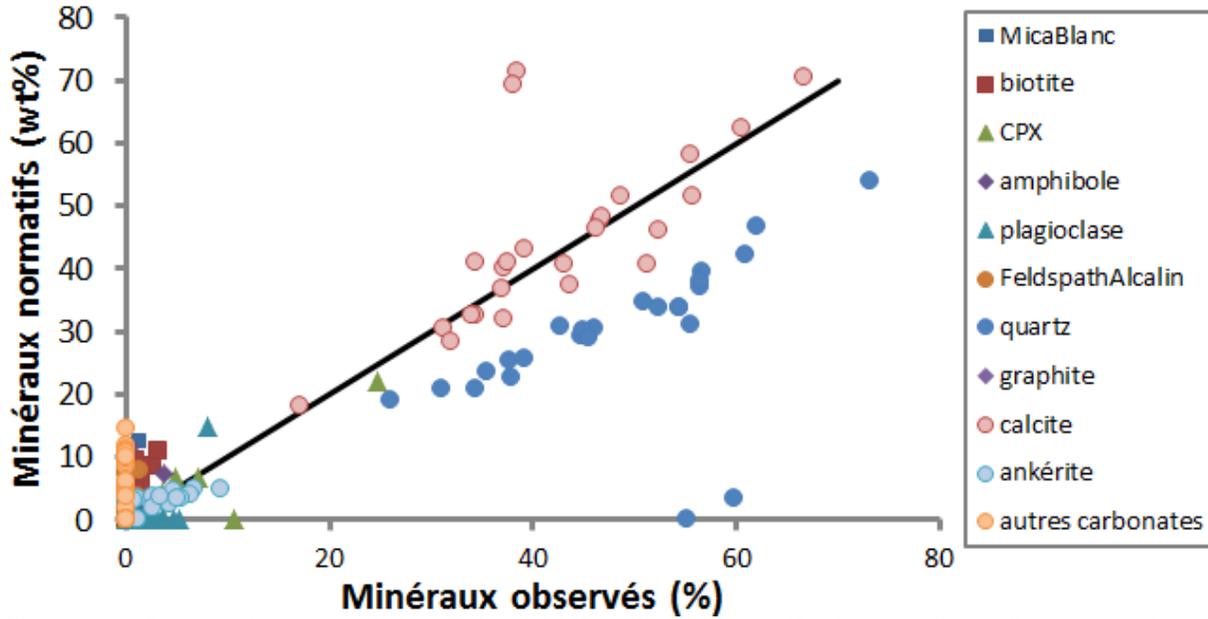


Figure 13. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 25 méta-pélites et marbres métamorphisés à 4,5 kbars et entre 450°C et 525°C (Leger et Ferry, 1993). Les minéraux ont été calculés avec Fe_2O_3/Fe_2O_3T égal à 0,2, CO_2 estimé de façon normative et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et 600°C).

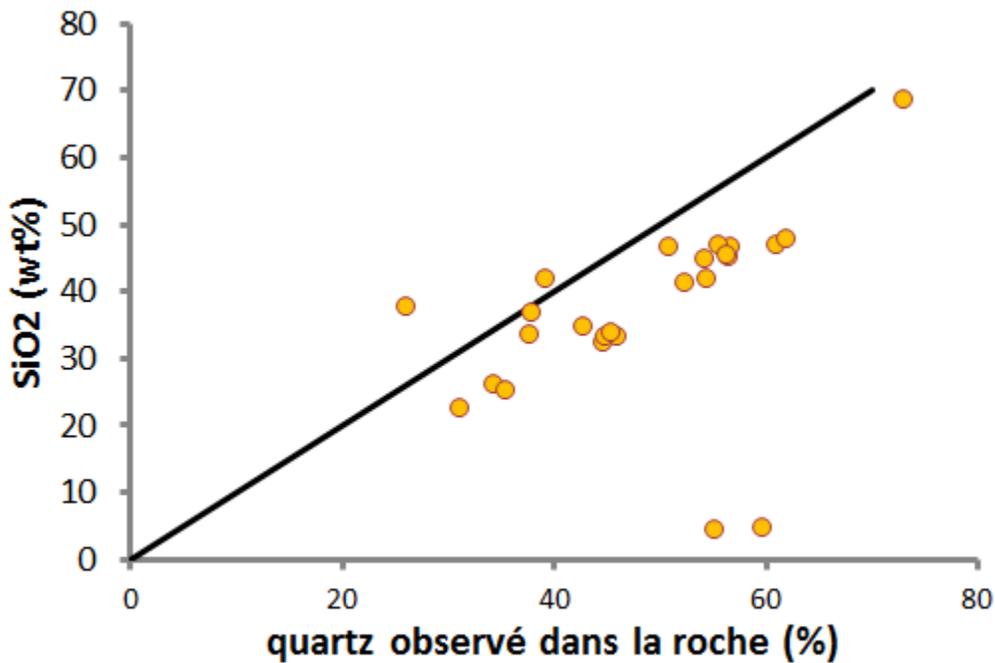


Figure 14. Comparaison entre la proportion de quartz observé et le contenu en SiO_2 (wt%) des roches de Leger et Ferry (1993). Ce graphique montre que les auteurs ont surestimé la quantité de quartz contenu dans leurs roches.

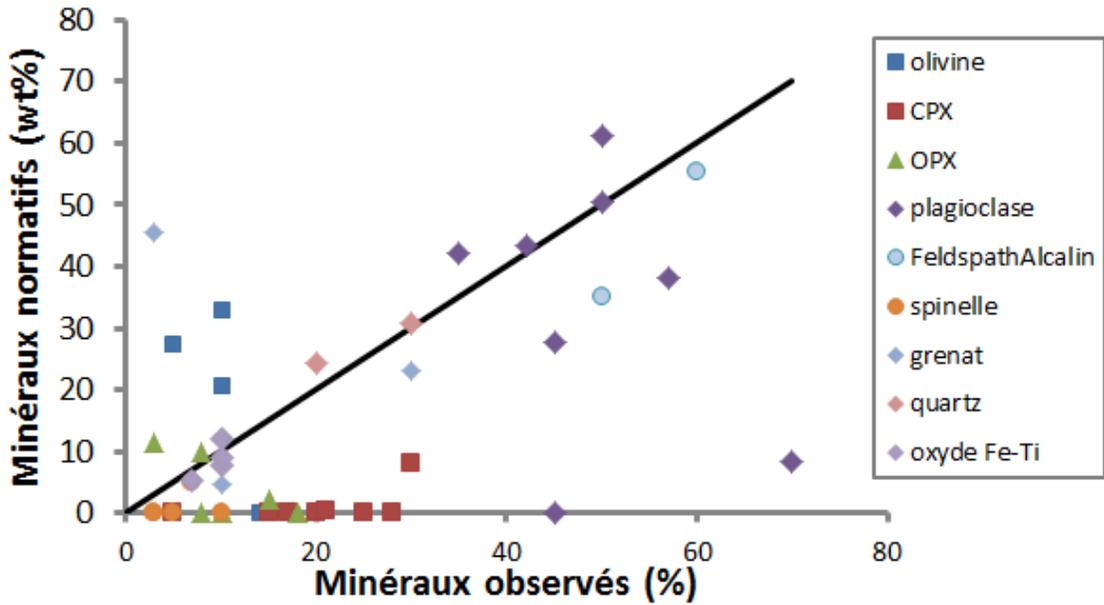


Figure 15. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 8 granulites mafiques (méta-cumulats?, méta-gabbros?) et 2 migmatites felsiques du faciès des granulites (Montanini et Tribuzio, 2001). Les minéraux ont été calculés avec CO₂ normatif et Fe₂-Fe₃ répartis selon la méthode de Le Maître (1976) pour les roches plutoniques, et pour le faciès 5GRA900 (5 kbars et 900°C).

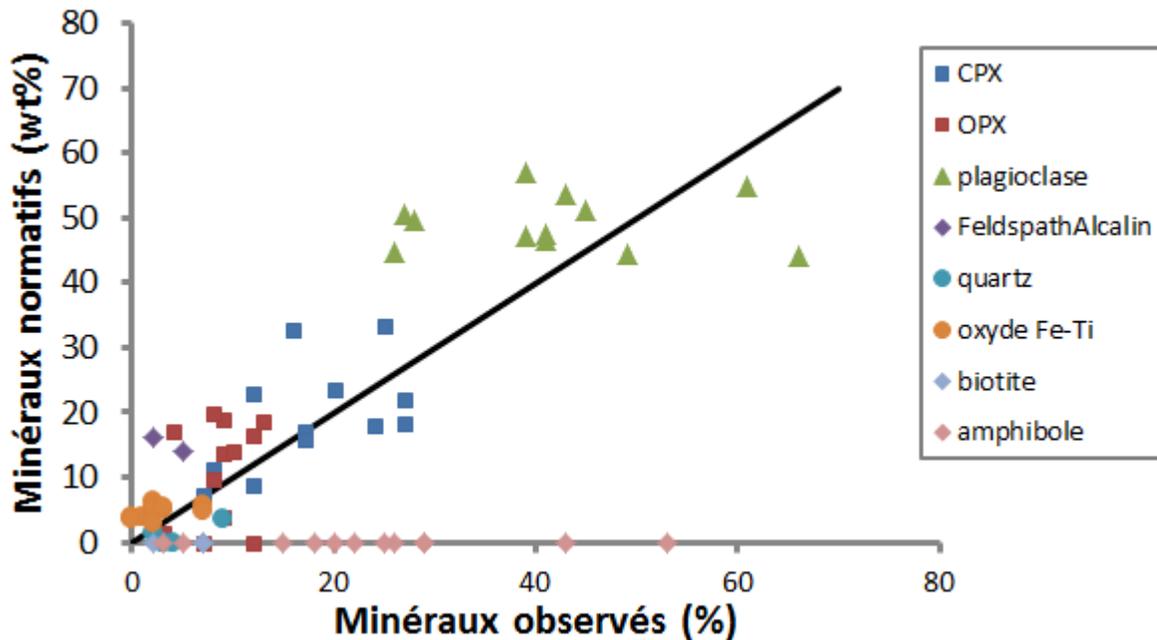


Figure 16. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 12 granulites migmatitiques métamorphosées à 8-11 kbars et 750-900°C (Nehring et al., 2009). Les minéraux ont été calculés avec Fe₂O₃/Fe₂O₃T égal à 0,2, sans CO₂-H₂O (cf. PAF non analysée) et pour le faciès 3GRA800 (3 kbars et 800°C).

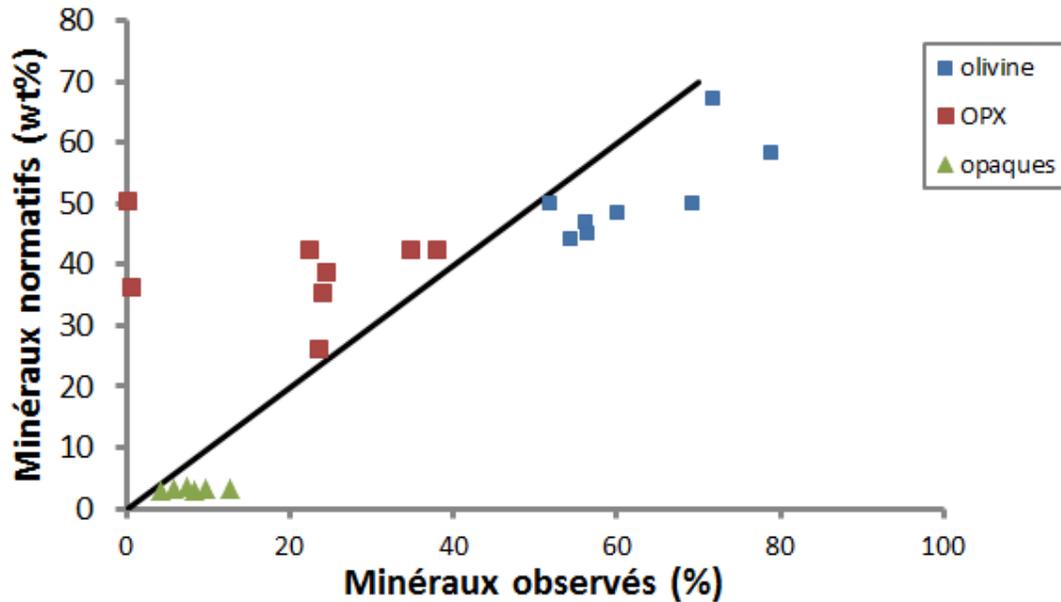


Figure 17. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 8 péridotites (Eggins et al., 1998; Nozaka, 2010). Les minéraux ont été calculés avec Fe_2O_3/Fe_2O_3T égal à 0,2, avec PAF entièrement égale à H_2O et pour le faciès 5GRA900 (5 kbars et $900^\circ C$).

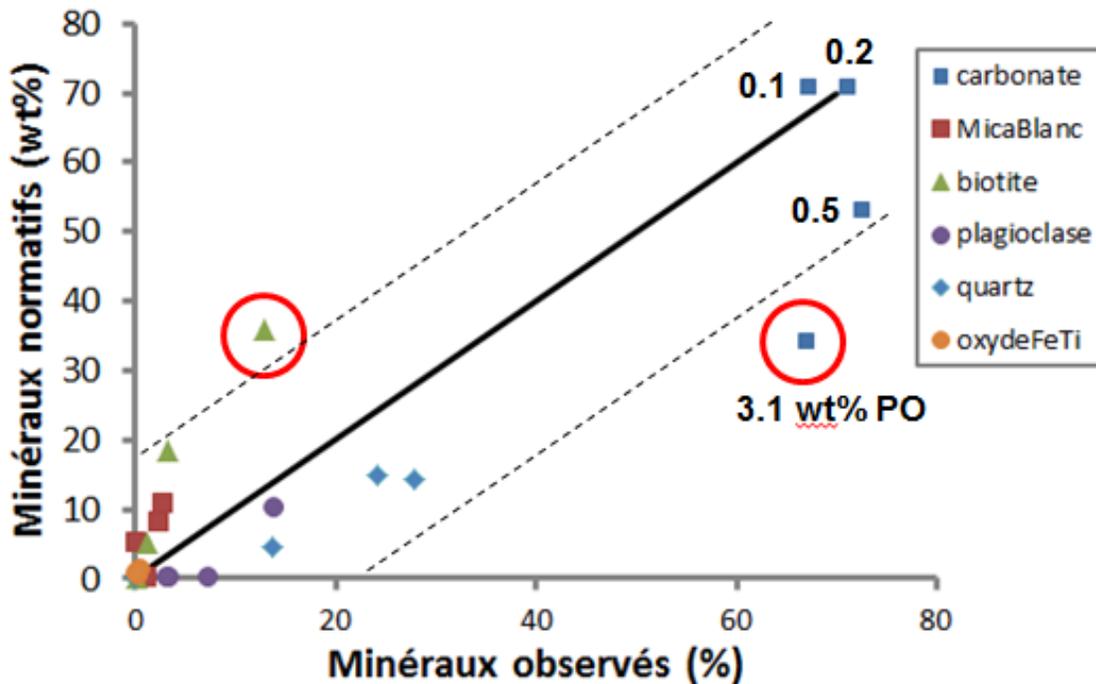


Figure 18. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 4 limestones (Evans et Bickle, 2005). Les minéraux ont été calculés avec Fe_2-Fe_3 mesurés, avec H_2O-CO_2 normatifs et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et $600^\circ C$). Les chiffres reportés sur le graphique correspondent à la quantité de pyrrhotine contenue dans chacune des quatre roches, et les minéraux cerclés de rouge sont ceux qui proviennent de l'échantillon le plus riche en pyrrhotine.

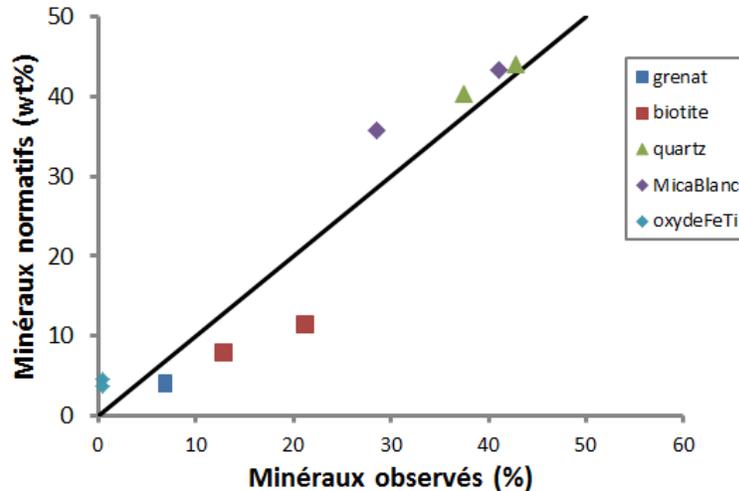


Figure 19. Comparaison entre les minéraux observés et normatifs de 2 schistes à Bt-Grt (Hirsch et Carlson, 2006). Les minéraux ont été calculés avec Fe_2O_3/Fe_2O_3T égal à 0,2, avec H_2O-CO_2 normatifs et pour le faciès 6AMP600 (6 kbars et 600°C).

10 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Le projet 2013-04 a permis la mise en place de CONSONORM HautGrade, qui est une extension de CONSONORM BasGrade CONSOREM, et qui s'applique dorénavant à 17 nouvelles conditions P-T des faciès schiste vert, schiste bleu, amphibolite et granulite. Ces conditions sont toutes inférieures à 1 kbars (0,1 GPa), car des conditions de plus haute pression (cf. élogite et Ultra High Pressure – UHP) sont rares au Québec.

Le calcul normatif est complexe et fait intervenir plusieurs niveaux de modèles. Il est important de garder en tête les différentes hypothèses formulées tout au long du calcul afin de pouvoir interpréter les résultats et prendre du recul face aux chiffres fournis par ce calcul. Gardons toujours à l'esprit, par exemple, que CONSONORM BasGrade et HautGrade reposent sur des bases de données thermodynamiques provenant d'expériences de laboratoire, effectuées sur des systèmes simplifiés. Ces systèmes simplifiés sont constitués des principaux éléments majeurs et négligent les traces : il est pourtant possible que des traces comme le Zn modifient grandement le champ de stabilité de minéraux comme la staurotide, tout comme le Mn qui modifie le champ du grenat.

Les premiers tests effectués sur des données de la littérature sont cependant positifs. CONSONORM HautGrade reproduit relativement bien les principales phases, et notamment des minéraux difficiles à modéliser comme les amphiboles, les biotites et les micas blancs. L'estimation des carbonates est bonne, même lorsque le CO_2 doit être estimé de façon normative (sauf lorsque la roche contient beaucoup de sulfures et que le S n'est pas analysé). Ainsi, la minéralogie des roches non-altérées et métamorphisées à des grades élevés est bien reproduite par le calcul.

Dans la seconde phase de ce projet, la problématique des roches altérées sera abordée. Les calculs effectués avec ce type de roches permettront sans doute d'améliorer le modèle « CONSONORM HautGrade ». Une surabondance d'éléments traces, qui sont habituellement peu concentrés dans des roches non-altérées, pourrait notamment produire des aberrations, qui pourraient permettre de repérer les roches altérées. Enfin, l'utilisation d'un maximum de cas naturels permettra de proposer diagrammes et indices adaptés aux roches altérées puis métamorphisées à des grades métamorphiques élevés.

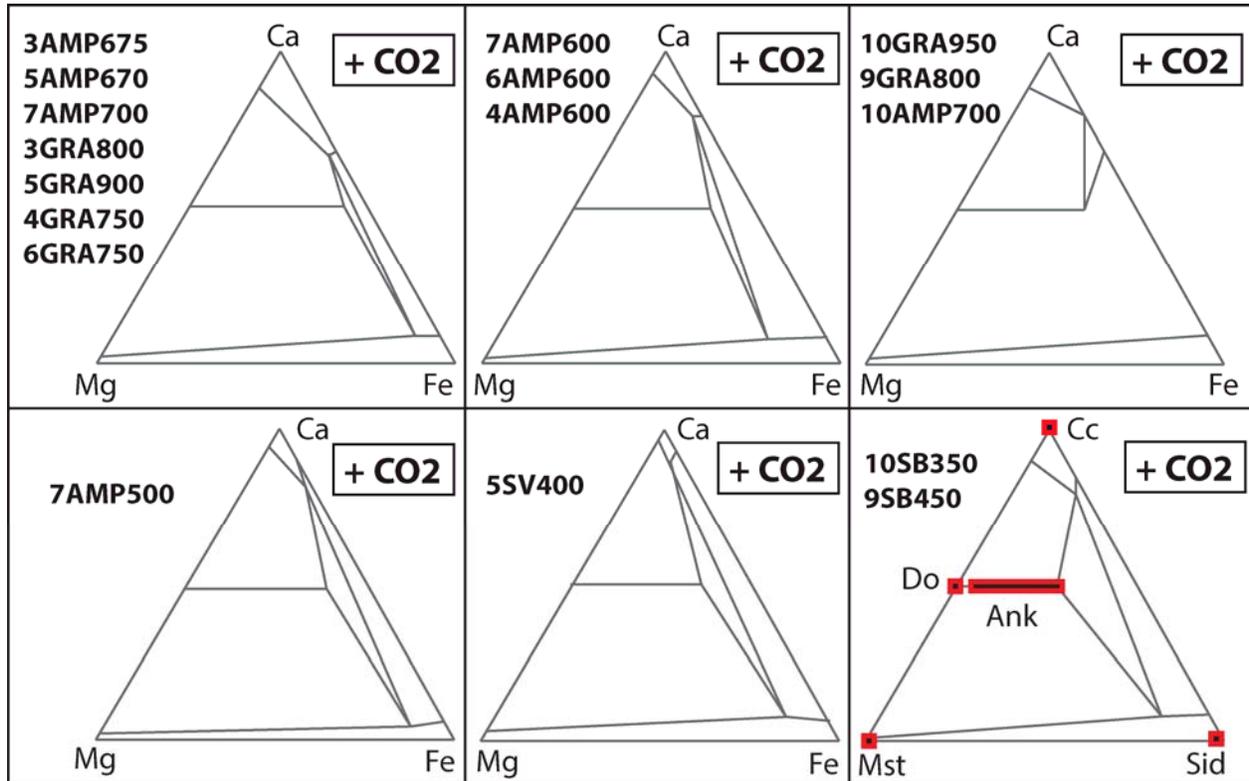
RÉFÉRENCES

- Barth, T.F.W., 1959. Principles of Classification and Norm Calculations of Metamorphic Rocks. The Journal of Geology , p.135-152.
- Berman, R.G., 1988. Internally-Consistent Thermodynamic Data for Minerals in the System Na₂O-K₂O-CaO-MgO-FeO-Fe₂O₃-Al₂O₃-SiO₂-TiO₂-H₂O-CO₂. Journal of petrology 29(2), p. 445-522.
- Brunsmann, A., Franz, G., Erzinger, J., Landwehr, D., 2000. Zoisite- and clinozoisite-segregations in metabasites (Tauern Window, Austria) as evidence for high-pressure fluid–rock interaction. Journal of metamorphic geology 18(1), p. 1-21.
- de Capitani, C., Petrakakis, K., 2010. The computation of equilibrium assemblage diagrams with Theriak/Domino software. American Mineralogist 95, p. 1006-1016.
- Connolly, J.A.D., 2005. Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation. Earth and Planetary Science Letters 236, p. 524-541 (Errata).
- Connolly, J.A.D., Kerrick, D.M., 2002. Metamorphic controls on seismic velocity of subducted oceanic crust at 100-250 km depth. Earth and Planetary Science Letters 204, p. 61-74.
- Cross, W., Iddings, J.P., Pirsson, L.V., Washington, H.S., 1902. A quantitative chemico-mineralogical classification and nomenclature of igneous rocks. Journal of Geology (10), p. 555-690.
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 1962. Rock-forming minerals. (several books).
- Davis, S.R., Ferry, J.M., 1993. Fluid infiltration during contact metamorphism of interbedded marble and calc-silicate hornfels, Twin Lakes area, central Sierra Nevada, California. Journal of Metamorphic Geology 11(1), p. 71-88.
- Eggins, S.M., Rudnick, R.L., McDonough, W.F., 1998. The composition of peridotites and their minerals: a laser-ablation ICP–MS study. Earth and Planetary Science Letters 154(1-4), p. 53-71.
- Emmett, T.F., 1987. A reconnaissance study of the distribution of Ba, Nb, Y, and Zr in some Jotun kindred gneisses from Central Jotunheimen, southern Norway. Journal of metamorphic geology 5(1), p. 41-50.
- Evans, K.A., Bickle, M.J., 2005. An investigation of the relationship between bulk composition, inferred reaction progress and fluid-flow parameters for layered micaceous carbonates from Maine, USA. Journal of metamorphic geology 23(3), p. 181-197.
- Faak, K., Chakraborty, S., Dasgupta, S., 2012. Petrology and tectonic significance of metabasite slivers in the Lesser and Higher Himalayan domains of Sikkim, India. Journal of metamorphic geology 30(6), p. 599-622.
- Foucault, A., Raoult, J.F., 1992. Dictionnaire de géologie. 3e édition.
- Franzolin, E., Schmidt, M.W., Poli, S., 2011. Ternary Ca–Fe–Mg carbonates: subsolidus phase relations at 3.5 GPa and a thermodynamic solid solution model including order/disorder. Contributions to Mineralogy and Petrology 161(2), p. 213-227.
- Grant, J.A., 1986. The isocon diagram; a simple solution to Gresens' equation for metasomatic alteration. 81(8), p. 1976-1982.
- Haggerty, S.E., 1991. Oxide textures; a mini-atlas. Reviews in Mineralogy and Geochemistry 25, p. 129-219.
- Hansen, E., Stuk, M., 1993. Orthopyroxene-bearing, mafic migmatites at Cone Peak, California: evidence for the formation of migmatitic granulites by anatexis in an open system. Journal of metamorphic geology 11(2), p. 291-307.

- Hirsch, D.M., Carlson, W.D., 2006. Variations in rates of nucleation and growth of biotite porphyroblasts. *Journal of metamorphic geology* 24(8), p. 763-777.
- Holland, T.J.B., Powell, R., 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest. *Journal of Metamorphic Geology* 16, p. 309-343.
- Leger, A., Ferry, J.M., 1993. Fluid infiltration and regional metamorphism of the Waits River Formation, north-east Vermont, USA. *Journal of Metamorphic Geology* 11(1), p. 3-29.
- Lindsey, W.L., 1991. Iron oxide solubilization by organic matter and its effect on iron availability. *Iron Nutrition and Interactions in Plants, Developments in Plant and Soil Sciences* 43, p. 29-36.
- McSwiggen, P.L., 1993. Alternative solution model for the ternary carbonate system CaCO_3 - MgCO_3 - FeCO_3 . *Physics and Chemistry of Minerals* 20(1), p. 42-55.
- Le Maître, R.W., 1976. Some problems of the projection of chemical data into mineralogical classifications. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 56(2), p. 181-189.
- Montanini, A., Tribuzio, R., 2001. Gabbro-derived Granulites from the Northern Apennines (Italy): Evidence for Lower-crustal Emplacement of Tholeiitic Liquids in Post-Variscan Times. *Journal of Petrology* 42(12), p. 2259-2277.
- Nehring, F., Foley, S.F., Hölttä, P., Van Den Kerkhof, A.M., 2009. Internal Differentiation of the Archean Continental Crust: Fluid-Controlled Partial Melting of Granulites and TTG–Amphibolite Associations in Central Finland. *Journal of Petrology* 50(1), p. 3-35.
- Nozaka, T., 2011. Constraints on anthophyllite formation in thermally metamorphosed peridotites from southwestern Japan. *Journal of metamorphic geology* 29(4), p. 385-398.
- Perple_X (site internet): <http://www.perplex.ethz.ch/>
- Piché, M., Jébrak, M., 2004. Normative minerals and alteration indices developed for mineral exploration. *Journal of Geochemical Exploration* 82(1-3), p.59-77.
- Pruseth, K.L., 2009. MATNORM: Calculating NORM using composition matrices. *Computers and Geosciences* 35(9), p. 1785-1788.
- Stanley, C.R., Madeisky, H.E., 1994. Lithochemical exploration for hydrothermal ore deposits using Pearce element ratio analysis. In: Lentz DR (ed), *Alteration and Alteration Processes associated with Ore-forming systems: Geological Association of Canada, Short Course Note* 11, p. 193-211.
- Theriak-Domino (Site internet): <http://titan.minpet.unibas.ch/minpet/theriak/theruser.html>
- Trépanier, S., 2011. Guide pratique d'utilisation de différentes méthodes de traitement de l'altération et du métasomatisme. *Projet CONSOREM 2008-07*, p. 209.
- Trépanier, S., 2013. Norme LithoModeleur. *Projet CONSOREM 2011-04*, p. 91.

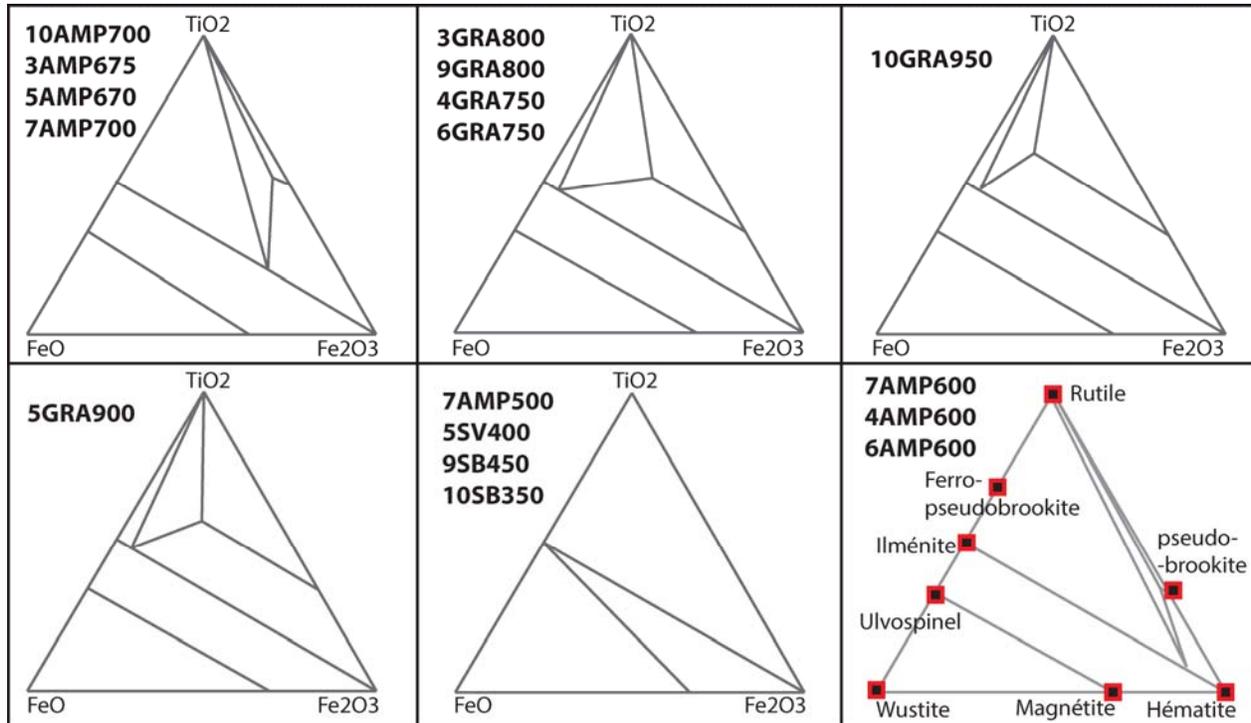
ANNEXE A – DIAGRAMMES TERNAIRES POUR LES CARBONATES

Diagrammes ternaires Ca-Mg-Fe utilisés pour le calcul des carbonates. Ces diagrammes proviennent de la littérature (McSwiggen, 1993; Franzolin et al., 2011).



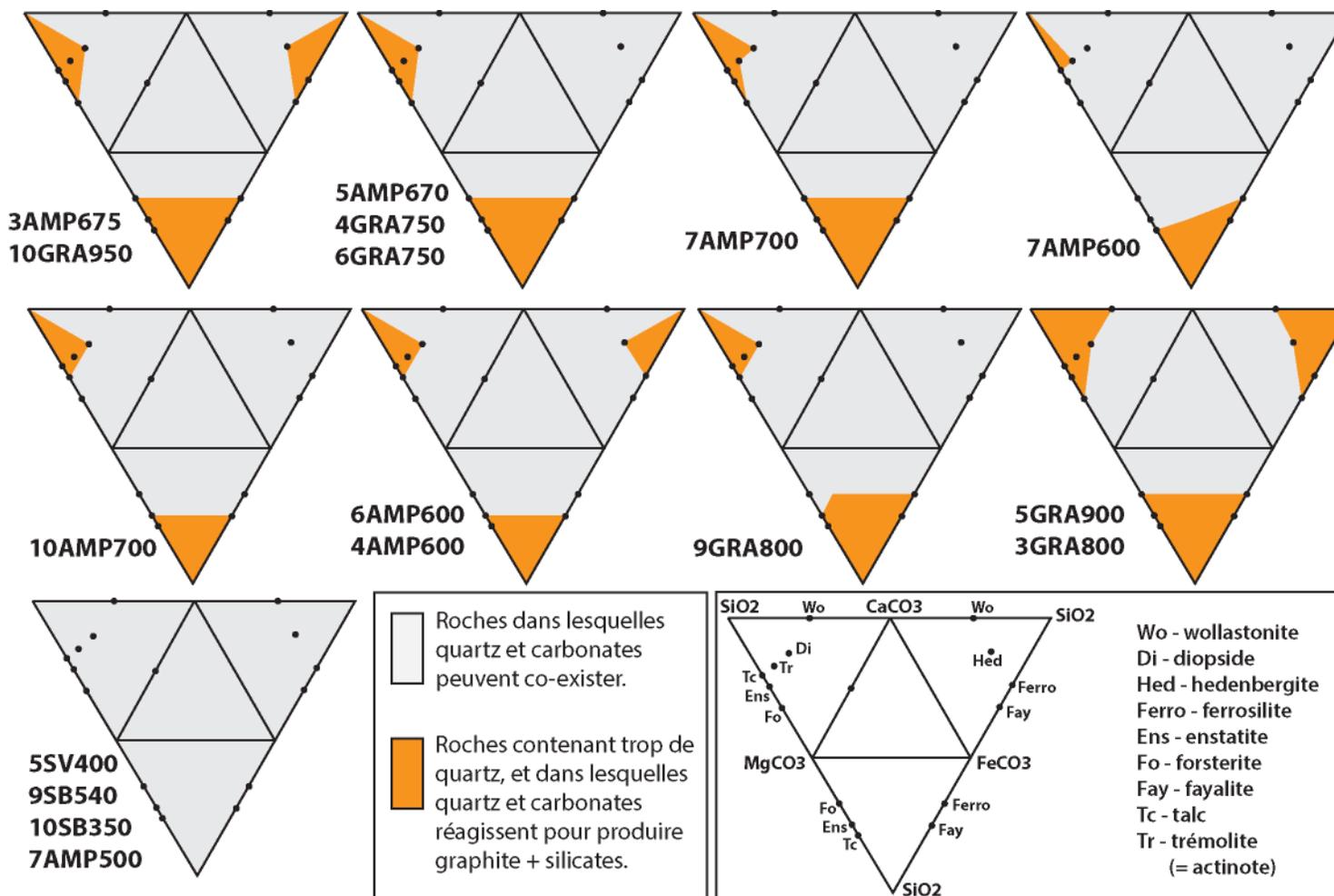
ANNEXE B – DIAGRAMMES TERNAIRES POUR LES OXYDES

Diagrammes ternaires Ti-Fe₂-Fe₃ utilisés pour le calcul des oxydes de Fe-Ti. Ces diagrammes proviennent de la littérature (Deer et al., 1962; Haggerty, 1991; Lindsey, 1991).



ANNEXE C – TÉTRAÈDRES POUR LES RÉACTIONS QUARTZ - CARBONATES

Vues éclatées des tétraèdres $\text{CaCO}_3\text{-MgCO}_3\text{-FeCO}_3\text{-SiO}_2$ utilisés pour déterminer si les carbonates peuvent coexister dans une roche ou doivent réagir avec le quartz pour former du graphite et des silicates. Les diagrammes ternaires ayant un pôle égal à SiO_2 proviennent de Perple_X. Les diagrammes ternaires $\text{Ca-Mg-Fe (+CO}_2\text{)}$ proviennent de la littérature (cf. Annexe A).



ANNEXE E – TÉTRAÈDRES DES SILICATES AL-CA-MGFE-KNA

Ci-dessous, vous trouverez la liste des assemblages qui constituent les sous-tétraèdres formant les 3 tétraèdres principaux disponibles pour chacun des 17 faciès de la norme Haut Grade.

Les assemblages utilisent des minéraux particuliers, dont voici la liste :

- **GRTss** : correspond à la proportion de GRTpyalm. Cependant, lorsque ce nom particulier apparaît, le code fait réagir FM + anorthite pour créer un maximum de grenats (pyrope, almandin, grossulaire) supplémentaires.
- **GRTss05** : idem, mais crée moitié moins de grenats.
- **CPXgrt** : idem, mais CPXgrt correspond à la proportion de CPX.
- **GRThalf** : $(2/3) * \text{GRTpyalm} + (1/3) * \text{grossulaire}$
- **GROSSss** : $(1/3) * \text{GRTpyalm} + (2/3) * \text{grossulaire}$
- **FSP04, FSP05_A, FSP05_B, FSP06, FSP07, FSP09, FSP11, FSP17** : anorthite + K-feld, selon différentes proportions. Les numéros correspondent à ceux donnés à l'interne aux 17 faciès.

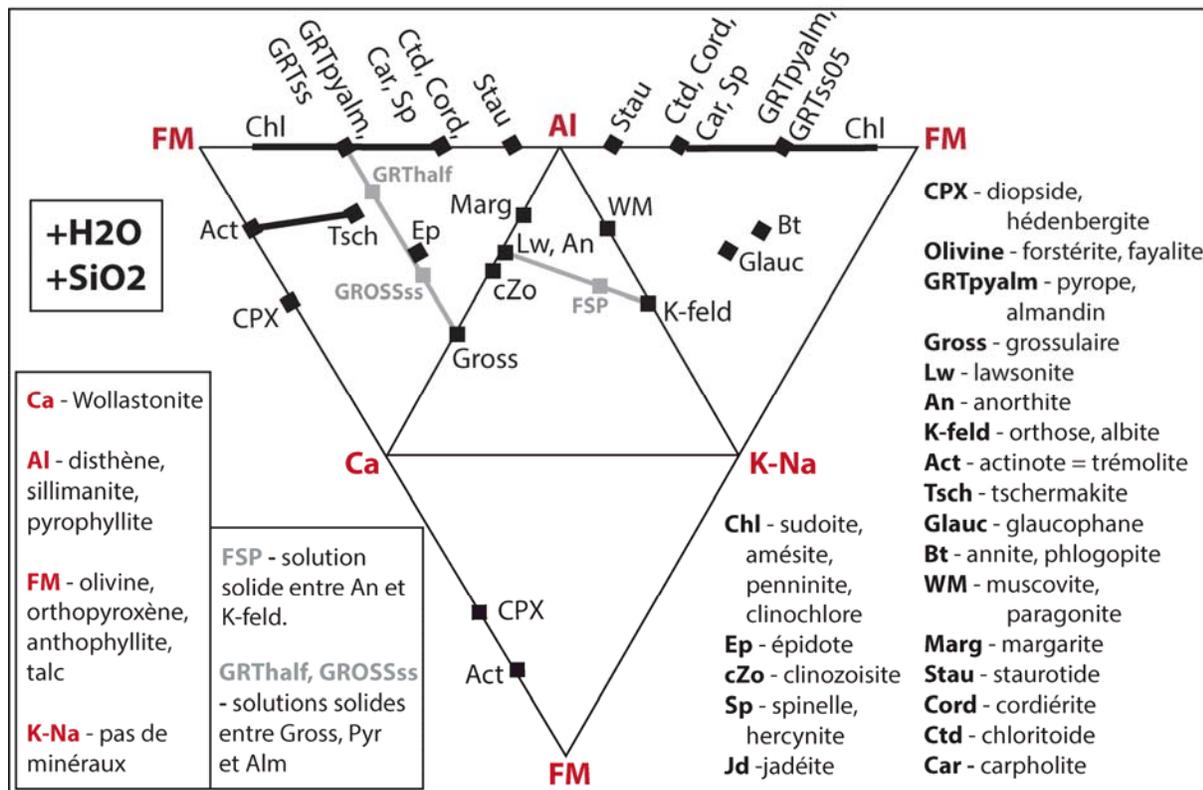


Figure E-1. Représentation de l'ensemble des minéraux de CONSONORM HautGrade sur une vue éclatée d'un tétraèdre Al-Ca-FM-KNa.

Aussi, la biotite, le mica blanc et la staurotide ont nécessité des ajustements particuliers (cf. **Tableaux E-1, E-2, E-3**) :

- **Biotite** : champ de stabilité ajusté à l'aide, notamment, du rapport $Na/(Na+K)$. En effet, la biotite est un K-minéral. Ainsi, si une roche contient beaucoup plus de Na que de K, il n'est pas possible de former de la biotite. Le champ de stabilité de la biotite, tout comme celui de tous les minéraux à Fe-Mg (cf. Annexe D), peut aussi être limité par la richesse en Mn de la roche. Enfin, la biotite est plus fréquente dans les roches riches en Mg que dans celles riches en Fe.
- **Mica blanc** : idem, ce minéral est peu fréquent dans des roches contenant très peu de K. Cependant, et contrairement à la biotite, le mica blanc est une solution solide complète entre les pôles Na et K (cf. paragonite et muscovite), et il a donc une plus grande tolérance à la présence de Na que la biotite.
- **Staurotide** : minéral présent seulement dans les faciès les plus riches en fer (cf. $Fe \gg (Mg + Mn)$). Un ajustement similaire a dû être fait pour le spinelle (cf. faciès 5GRA900).

Tableau E-1. Conditions pour lesquelles la biotite est présente dans les tétraèdres Al-Ca-FM-KNa.

Conditions pour avoir de la biotite				
Faciès	Na/(Na+K)	Mg/(Fe+Mg)	Mg/(Mn+Mg)	Fe/(Fe+Mn)
3AMP675	< 0,9	> 0,63	> 0,35	
3GRA800	< 0,85	> 0,8	> 0,5	
5GRA900	< 0,2	> 0,85	> 0,6	
5AMP700	< 0,9		> 0,2	> 0,9
7AMP700	< 0,9		> 0,25	> 0,9
7AMP600	< 0,9		> 0,05	> 0,7
10GRA950	< 0,25	> 0,82	> 0,6	
9GRA800	< 0,9	> 0,7	> 0,4	
7AMP500	< 0,9		> 0,05	> 0,45
4AMP600	< 0,9		> 0,05	> 0,8
5SV400	< 0,9		> 0,05	> 0,3
4GRA750	< 0,9	> 0,7	> 0,5	
6GRA750	< 0,9	> 0,4	> 0,67	
6AMP600	< 0,9		> 0,05	> 0,7

Tableau E-2. Conditions pour lesquelles le mica blanc et/ou la staurotide sont présents dans les tétraèdres Al-Ca-FM-KNa.

Mica blanc présent si :		Staurotide présente si :		
Faciès	Na/(Na+K)	Faciès	Mg/(Fe+Mg)	Fe/(Fe+Mn)
5AMP700	< 0,3	7AMP600	tous	> 0,95
7AMP700	< 0,6	4AMP600	< 0,12	> 0,94
9GRA800	< 0,2	6AMP600	< 0,15	> 0,74
4AMP600	< 0,2			

Tableau E-3. Assemblages du faciès 3AMP675 (3 kbars, 675°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	
cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	
FM, anorthite, actinote, K-feld	anorthite, FM, K-feld, CPX	FM, anorthite, actinote, K-feld	
anorthite, CPX, actinote, K-feld		anorthite, CPX, actinote, K-feld	avec biotite
cordiérite, anorthite, biotite, FM	GRTpyalm, biotite, K-feld, anorthite	cordiérite, GRTpyalm, biotite, anorthite	
cordiérite, anorthite, biotite, K-feld	GRTss05, biotite, FM, anorthite	cordiérite, K-feld, biotite, anorthite	
		FM, anorthite, biotite, GRTss05	sans biotite
cordiérite, anorthite, FM, K-feld	GRTss05, FM, K-feld, anorthite	cordiérite, GRTpyalm, anorthite, K-feld	
		FM, GRTss05, anorthite, K-feld	

Tableau E-4. Assemblages du faciès 3GRA800 (3 kbars, 800°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	CPX, anorthite, K-feld, wollastonite	
cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	spinelle, anorthite, K-feld, sillimanite	cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	
	spinelle, anorthite, K-feld, GRTpyalm		
	GRTss05, anorthite, K-feld, FM		Mg/(Fe+Mg) > 0,8
FM, anorthite, actinote, K-feld		FM, anorthite, actinote , K-feld	
anorthite, CPX, actinote, K-feld		anorthite, CPX, actinote , K-feld	Mg/(Fe+Mg) < 0,8
anorthite, CPX, FM, K-feld		anorthite, CPX, FM, K-feld	
cordiérite, anorthite, biotite, FM		GRTss05, FM, biotite, anorthite	avec biotite
cordiérite, anorthite, biotite, K-feld		GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
		biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	sans biotite
cordiérite, anorthite, K-feld, FM		GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	
		GRTss05, FM, K-feld, anorthite	

Tableau E-5. Assemblages du faciès 5GRA900 (5 kbars, 900°C).

Tétraèdre I (Mg)	Conditions	Tétraèdre II (Fe)	Mg/(Fe+Mg)	Tétraèdre III (Mg-Fe)
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous	K-Na, K-feld, FM, wollastonite
CPX, anorthite, K-feld, wollastonite		CPX, anorthite, K-feld, wollastonite		CPX, anorthite, K-feld, wollastonite
cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite		GRTss, anorthite, K-feld, FM		FM, anorthite, CPX, K-feld
FM, anorthite, CPX, K-feld		FM, anorthite, CPX, K-feld		cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite
				cordiérite, anorthite, K-feld, GRTpyalm
				GRTss, anorthite, K-feld, FM
cordiérite, anorthite, biotite, FM	avec biotite	spinelle , anorthite, K-feld, sillimanite	< 0,05	
cordiérite, anorthite, biotite, K-feld		spinelle , anorthite, K-feld, GRTpyalm		
cordiérite, anorthite, K-feld, FM	sans biotite	sillimanite, anorthite, K-feld, GRTpyalm	> 0,05	

Tableau E-6. Assemblages du faciès 5AMP670 (5 kbars, 670°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	
CPX, anorthite, FSP04, grossulaire	CPX, anorthite, FSP04, grossulaire	CPX, anorthite, FSP04, grossulaire	
CPX, wollastonite, FSP04, grossulaire	CPX, wollastonite, FSP04, grossulaire	CPX, wollastonite, FSP04, grossulaire	
CPX, wollastonite, FSP04, K-feld	CPX, wollastonite, FSP04, K-feld	CPX, wollastonite, FSP04, K-feld	
actinote, anorthite, FM, K-feld	CPXgrt, FM, anorthite, K-feld	actinote, anorthite, FM, K-feld	
anorthite, CPX, actinote, K-feld		anorthite, CPX, actinote, K-feld	
cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc		cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	avec biotite et avec mica blanc
biotite, anorthite, K-feld, MicaBlanc		cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	
biotite, anorthite, cordiérite, MicaBlanc			
cordiérite, anorthite, biotite, FM			
cordiérite, biotite, anorthite, K-feld			
cordiérite, biotite, anorthite, FM			

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	GRTpyalm, sillimanite, anorthite, K-feld	cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	Avec mica blanc et/ou sans biotite
cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	GRTss, FM, anorthite, K-feld	cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	
cordiérite, FM, anorthite, K-feld		GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	
cordiérite, biotite, anorthite, K-feld		GRTss, FM, K-feld, anorthite	
cordiérite, biotite, anorthite, FM			
cordiérite, FM, anorthite, K-feld	GRTpyalm, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite et/ou sans mica blanc
cordiérite, sillimanite, anorthite, K-feld	GRTpyalm, anorthite, K-feld, MicaBlanc	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
	GRTpyalm, biotite, anorthite, K-feld	biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
	GRTss, biotite, anorthite, FM	cordiérite, sillimanite, anorthite, K-feld	

Tableau E-7. Assemblages du faciès 7AMP700 (7 kbars, 700°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
FSP05_A, K-feld, CPX, wollastonite	FSP05_A, K-feld, CPX, wollastonite	FSP05_A, K-feld, CPX, wollastonite	
FSP05_A, grossulaire, CPX, wollastonite	FSP05_A, grossulaire, CPX, wollastonite	FSP05_A, grossulaire, CPX, wollastonite	
FSP05_B, grossulaire, CPX, clinozoïsite	FSP05_B, grossulaire, CPX, clinozoïsite	FSP05_B, grossulaire, CPX, clinozoïsite	
FSP05_B, grossulaire, CPX, FSP05_A	FSP05_B, grossulaire, CPX, FSP05_A	FSP05_B, grossulaire, CPX, FSP05_A	
FSP05_B, anorthite, CPX, clinozoïsite	FSP05_B, anorthite, CPX, clinozoïsite	FSP05_B, anorthite, CPX, clinozoïsite	
actinote, anorthite, FM, K-feld	CPXgrt, FM, anorthite, K-feld	actinote, anorthite, FM, K-feld	
anorthite, CPX, actinote, K-feld	GRTpyalm, sillimanite, anorthite, K-feld	anorthite, CPX, actinote, K-feld	
cordiérite, sillimanite, anorthite, K-feld			
cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	GRTpyalm, biotite, anorthite, K-feld	cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	
biotite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	GRTss, biotite, anorthite, FM	cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	
biotite, anorthite, cordiérite, MicaBlanc			
cordiérite, anorthite, biotite, FM			
cordiérite, biotite, anorthite, K-feld			
cordiérite, biotite, anorthite, FM			

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	GRTpyalm, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	cordiérite, anorthite, sillimanite, MicaBlanc	avec mica blanc et/ou sans biotite
cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	GRTpyalm, anorthite, K-feld, MicaBlanc	cordiérite, anorthite, K-feld, MicaBlanc	
cordiérite, FM, anorthite, K-feld	GRTss, FM, anorthite, K-feld	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	
cordiérite, FM, anorthite, K-feld	GRTss, FM, anorthite, K-feld	GRTss, FM, K-feld, anorthite	
		cordiérite, sillimanite, anorthite, K-feld	
cordiérite, biotite, anorthite, K-feld	GRTpyalm, biotite, anorthite, K-feld	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite
cordiérite, biotite, anorthite, FM	GRTss, biotite, anorthite, FM	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
		biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
		cordiérite, sillimanite, anorthite, K-feld	

Tableau E-8. Assemblage du faciès 7AMP600 (7,5 kbars, 600°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Fe/(Mn+Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite		K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
grossulaire, clinozoïsite, FSP06, CPX	grossulaire, clinozoïsite, FSP06, CPX		grossulaire, clinozoïsite, FSP06, CPX	
grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX		grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	
grossulaire, FSP06, K-feld, CPX	grossulaire, FSP06, K-feld, CPX		grossulaire, FSP06, K-feld, CPX	
anorthite, FSP06, clinozoïsite, actinote	anorthite, FSP06, clinozoïsite, actinote		anorthite, FSP06, clinozoïsite, actinote	
CPX, FSP06, clinozoïsite, actinote	CPX, FSP06, clinozoïsite, actinote		CPX, FSP06, clinozoïsite, actinote	
CPX, FSP06, K-feld, actinote	CPX, FSP06, K-feld, actinote		CPX, FSP06, K-feld, actinote	
amésite, margarite, MicaBlanc, anorthite	FSP06, K-feld, FM, CPX		FSP06, FM, CPX, GRThalf	
margarite, MicaBlanc, amésite, disthène	anorthite, margarite, MicaBlanc, GRThalf		FSP06, clinozoïsite, CPX, GRThalf	
	MicaBlanc, margarite, GRTpyalm, GRThalf		FSP06, clinozoïsite, anorthite, GRThalf	
	FSP06, FM, CPX, GRThalf			
	FSP06, clinozoïsite, CPX, GRThalf			
	FSP06, clinozoïsite, anorthite, GRThalf			

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Fe/(Mn+Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
biotite, amésite, MicaBlanc, anorthite	biotite, GRTpyalm, MicaBlanc, GRThalf		margarite, MicaBlanc, amésite, disthène	avec biotite
biotite, amésite, FM, actinote	biotite, GRTpyalm, FM, GRThalf		GRTpyalm, amésite, margarite, biotite	
biotite, MicaBlanc, K-feld, anorthite	biotite, MicaBlanc, K-feld, anorthite		margarite, amésite, biotite, MicaBlanc	
amésite, actinote, biotite, anorthite	GRThalf, biotite, MicaBlanc, anorthite		biotite, GRTpyalm, FM, GRThalf	
biotite, K-feld, actinote, anorthite	margarite, MicaBlanc, disthène, staurotide	> 0,95	biotite, MicaBlanc, K-feld, anorthite	
	margarite, MicaBlanc, GRTpyalm, staurotide		GRThalf, biotite, MicaBlanc, anorthite	
	margarite, MicaBlanc, GRTpyalm, disthène	< 0,95	FSP06, K-feld, FM, CPX	
			anorthite, margarite, MicaBlanc, GRThalf	
			biotite, margarite, GRTpyalm, GRThalf	
			GRThalf, biotite, margarite, MicaBlanc	
amésite, MicaBlanc, K-feld, anorthite	GRThalf, MicaBlanc, K-feld, GRTpyalm		margarite, MicaBlanc, amésite, disthène	sans biotite
amésite, FM, K-feld, actinote	GRThalf, MicaBlanc, K-feld, anorthite		FSP06, K-feld, FM, CPX	
amésite, actinote, K-feld, anorthite	GRTpyalm, FM, K-feld, GRThalf		anorthite, margarite, MicaBlanc, GRThalf	
			MicaBlanc, margarite, amésite, GRThalf	
			GRThalf, MicaBlanc, K-feld, amésite	
			GRThalf, MicaBlanc, K-feld, anorthite	
			GRTpyalm, amésite, K-feld, GRThalf	
			GRTpyalm, FM, K-feld, GRThalf	

Tableau E-9. Assemblages du faciès 10GRA950 (10 kbars, 950°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
FSP07, grossulaire, anorthite, CPX	FSP07, grossulaire, anorthite, CPX	FSP07, grossulaire, anorthite, CPX	
FSP07, grossulaire, wollastonite, CPX	FSP07, grossulaire, wollastonite, CPX	FSP07, grossulaire, wollastonite, CPX	
FSP07, K-feld, wollastonite, CPX	FSP07, K-feld, wollastonite, CPX	FSP07, K-feld, wollastonite, CPX	
cordiérite, K-feld, anorthite, sillimanite	GRTpyalm, K-feld, anorthite, sillimanite	cordiérite, K-feld, anorthite, sillimanite	
anorthite, K-feld, CPX, FM	anorthite, K-feld, CPXgrt, FM	anorthite, K-feld, CPX, FM	
cordiérite, biotite, K-feld, anorthite	GRTpyalm, biotite, K-feld, anorthite	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite
cordiérite, biotite, FM, anorthite	GRTss, biotite, FM, anorthite	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
cordiérite, FM, K-feld, anorthite	GRTss, FM, K-feld, anorthite	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	sans biotite
		GRTss, FM, K-feld, anorthite	

Tableau E-10. Assemblages du faciès 9GRA800 (9 kbars, 800°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
FSP08, grossulaire, anorthite, CPX	FSP08, grossulaire, anorthite, CPX	FSP08, grossulaire, anorthite, CPX	
FSP08, grossulaire, wollastonite, CPX	FSP08, grossulaire, wollastonite, CPX	FSP08, grossulaire, wollastonite, CPX	
FSP08, K-feld, wollastonite, CPX	FSP08, K-feld, wollastonite, CPX	FSP08, K-feld, wollastonite, CPX	
actinote, CPX, K-feld, anorthite	GRTpyalm, K-feld, anorthite, sillimanite	cordiérite, K-feld, anorthite, sillimanite	
	anorthite, K-feld, CPXgrt, FM	anorthite, K-feld, CPX, actinote anorthite, K-feld, actinote, FM	
sillimanite, K-feld, anorthite, biotite	GRTss, biotite, K-feld, anorthite	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite
biotite, cordiérite, FM, actinote	GRTss, biotite, FM, anorthite	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
sillimanite, anorthite, biotite, cordiérite		biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
actinote, cordiérite, anorthite, biotite			
biotite, K-feld, actinote, anorthite			sans biotite
actinote, cordiérite, K-feld, anorthite	GRTss, FM, K-feld, anorthite	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	
K-feld, anorthite, sillimanite, cordiérite		GRTss, FM, K-feld, anorthite	
actinote, K-feld, FM, cordiérite			

Tableau E-11. Assemblages du faciès 10AMP700 (10 kbars, 700°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
grossulaire, clinozoïsite, FSP09, CPX	grossulaire, clinozoïsite, FSP09, CPX	
grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	
grossulaire, FSP09, K-feld, CPX	grossulaire, FSP09, K-feld, CPX	
CPX, FSP09, K-feld, actinote	CPXgrt, FM, K-feld, anorthite	
anorthite, FSP09, clinozoïsite, actinote	GROSSss, clinozoïsite, FSP09, CPX	
CPX, FSP09, clinozoïsite, actinote	GROSSss, clinozoïsite, FSP09, anorthite	
MicaBlanc, biotite, disthène, anorthite	K-feld, biotite, GRTss, anorthite	avec biotite et avec mica blanc
MicaBlanc, biotite, K-feld, anorthite	FM, biotite, GRTss, anorthite	
disthène, anorthite, K-feld, actinote	disthène, MicaBlanc, anorthite, GRTpyalm	avec mica blanc et/ou sans biotite
FM, disthène, K-feld, actinote	K-feld, MicaBlanc, anorthite, GRTpyalm	
	K-feld, FM, GRTss, anorthite	
FM, actinote, disthène, biotite	K-feld, biotite, GRTss, anorthite	avec biotite et/ou sans mica blanc
actinote, anorthite, disthène, biotite	FM, biotite, GRTss, anorthite	
biotite, actinote, K-feld, anorthite	K-feld, disthène, anorthite, GRTpyalm	
K-feld, biotite, disthène, anorthite	K-feld, FM, GRTss, anorthite	

Tableau E-12. Assemblages du faciès 7AMP500 (7 kbars, 500°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
clinozoïsite, K-feld, grossulaire, CPX	clinozoïsite, K-feld, grossulaire, CPX	clinozoïsite, K-feld, grossulaire, CPX	
wollastonite, K-feld, grossulaire, CPX	wollastonite, K-feld, grossulaire, CPX	wollastonite, K-feld, grossulaire, CPX	
margarite, MicaBlanc, disthène, amésite	chloritoïde, disthène, MicaBlanc, margarite	GRTpyalm, disthène, MicaBlanc, margarite	
clinozoïsite, K-feld, actinote, CPX	MicaBlanc, chloritoïde, daphnite, GRThalf	clinozoïsite, FM, GRTpyalm, MicaBlanc	
clinozoïsite, MicaBlanc, margarite, amésite	daphnite, GRThalf, FM, MicaBlanc	clinozoïsite, GRTpyalm, MicaBlanc, margarite	
	clinozoïsite, chloritoïde, MicaBlanc, margarite		
	clinozoïsite, GRThalf, chloritoïde, MicaBlanc		

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
FM, actinote, biotite, amésite	GRThalf, FM, biotite, MicaBlanc	clinozoïsite, FM, biotite, MicaBlanc	avec biotite
clinozoïsite, MicaBlanc, biotite, amésite	clinozoïsite, K-feld, biotite, MicaBlanc	clinozoïsite, K-feld, biotite, MicaBlanc	
clinozoïsite, MicaBlanc, biotite, K-feld	CPX, GRThalf, FM, biotite	CPX, actinote, clinozoïsite, biotite	
clinozoïsite, biotite, actinote, amésite	CPX, GRThalf, clinozoïsite, biotite	FM, actinote, clinozoïsite, biotite	
actinote, biotite, K-feld, clinozoïsite	GRThalf, clinozoïsite, biotite, MicaBlanc	biotite, CPX, K-feld, clinozoïsite	
	biotite, CPX, K-feld, clinozoïsite		
clinozoïsite, K-feld, actinote, amésite	GRThalf, K-feld, FM, MicaBlanc	clinozoïsite, K-feld, FM, MicaBlanc	sans biotite
clinozoïsite, MicaBlanc, K-feld, amésite	K-feld, clinozoïsite, MicaBlanc, GRThalf	K-feld, actinote, CPX, clinozoïsite	
actinote, FM, K-feld, amésite	K-feld, GRThalf, CPX, clinozoïsite	K-feld, FM, actinote, clinozoïsite	
	K-feld, GRThalf, CPX, FM		

Tableau E-13. Assemblages du faciès 4AMP600 (4 kbars, 600°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Stau?	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Conditions
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
FSP11, CPX, anorthite, grossulaire	FSP11, CPX, anorthite, grossulaire		FSP11, CPX, anorthite, grossulaire	
FSP11, CPX, wollastonite, grossulaire	FSP11, CPX, wollastonite, grossulaire		FSP11, CPX, wollastonite, grossulaire	
FSP11, CPX, wollastonite, K-feld	FSP11, CPX, wollastonite, K-feld		FSP11, CPX, wollastonite, K-feld	
actinote, CPX, anorthite, K-feld	CPX, anorthite, FM, K-feld		actinote, CPX, anorthite, K-feld	
actinote, anorthite, FM, K-feld			actinote, anorthite, FM, K-feld	
cordiérite, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	GRTss, anorthite, FM, biotite	tous	cordiérite, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	avec biotite et avec mica blanc
MicaBlanc, K-feld, anorthite, biotite	biotite, GRTpyalm, MicaBlanc, anorthite		cordiérite, anorthite, MicaBlanc, K-feld	
biotite, cordiérite, MicaBlanc, anorthite	biotite, K-feld, MicaBlanc, anorthite			
biotite, cordiérite, anorthite, FM	staurotide, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	avec		
cordiérite, biotite, K-feld, anorthite	staurotide, GRTpyalm, MicaBlanc, anorthite	avec		

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Stau?	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Conditions	
cordiérite, biotite, anorthite, FM	staurotide, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	avec			
	staurotide, anorthite, MicaBlanc, K-feld	avec			
	sillimanite, GRTpyalm, MicaBlanc, anorthite	sans			
	FM, GRTss, biotite, anorthite	sans			
	biotite, GRTpyalm, K-feld, anorthite	sans			
cordiérite, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	staurotide, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	avec	cordiérite, anorthite, MicaBlanc, sillimanite	avec mica blanc et/ou sans biotite	
	MicaBlanc, K-feld, anorthite, cordiérite	avec	cordiérite, anorthite, MicaBlanc, K-feld		
	cordiérite, K-feld, FM, anorthite	sans			
		GRTpyalm, anorthite, MicaBlanc, K-feld	sans		
	FM, GRTss, K-feld, anorthite	sans			
cordiérite, K-feld, sillimanite, anorthite	staurotide, GRTpyalm, K-feld, anorthite	avec	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite et/ou sans mica blanc	
	cordiérite, biotite, K-feld, anorthite	avec	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite		
	cordiérite, biotite, anorthite, FM	avec	biotite, cordiérite, K-feld, anorthite		
		GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	avec		cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite
		FM, GRTss, biotite, anorthite	sans		
	biotite, GRTpyalm, K-feld, anorthite	sans			
cordiérite, K-feld, FM, anorthite	FM, GRTss, K-feld, anorthite	avec	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	sans biotite, sans mica blanc	
	staurotide, GRTpyalm, K-feld, anorthite	avec	GRTss, FM, K-feld, anorthite		
		GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	avec		cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite
		GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	sans		
		FM, GRTss, K-feld, anorthite	sans		

Tableau E-14. Assemblages du faciès 5SV400 (5 kbars, 400°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	
grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite	grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite	grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite	
actinote, K-feld, CPX, clinozoïsite	chloritoïde, margarite, MicaBlanc, pyrophyllite	GRTpyalm, margarite, MicaBlanc, pyrophyllite	
margarite, MicaBlanc, sudoïte, pyrophyllite	chloritoïde, daphnite, clinozoïsite, MicaBlanc	GRTpyalm, margarite, clinozoïsite, MicaBlanc	
margarite, MicaBlanc, sudoïte, amésite	chloritoïde, margarite, clinozoïsite, MicaBlanc		
amésite, margarite, MicaBlanc, clinozoïsite			
biotite, amésite, FM, actinote	daphnite, biotite, CPX, FM	GRTpyalm, biotite, CPX, FM	sans biotite
biotite, amésite, MicaBlanc, actinote	daphnite, biotite, MicaBlanc, clinozoïsite	GRTpyalm, biotite, MicaBlanc, clinozoïsite	
biotite, K-feld, MicaBlanc, clinozoïsite	K-feld, biotite, MicaBlanc, clinozoïsite	K-feld, biotite, MicaBlanc, clinozoïsite	
amésite, actinote, MicaBlanc, clinozoïsite	daphnite, CPX, biotite, clinozoïsite	GRTpyalm, CPX, biotite, clinozoïsite	
biotite, actinote, K-feld, clinozoïsite	CPX, biotite, K-feld, clinozoïsite	CPX, biotite, K-feld, clinozoïsite	
K-feld, amésite, FM, actinote	daphnite, K-feld, FM, CPX	GRTpyalm, K-feld, FM, CPX	avec biotite
K-feld, MicaBlanc, amésite, clinozoïsite	daphnite, K-feld, MicaBlanc, clinozoïsite	GRTpyalm, K-feld, MicaBlanc, clinozoïsite	
amésite, actinote, K-feld, clinozoïsite	daphnite, CPX, K-feld, clinozoïsite	GRTpyalm, CPX, K-feld, clinozoïsite	

Tableau E-15. Assemblages du faciès 9SB450 (9 kbars, 450°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite
grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite
grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite	grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite	grossulaire, K-feld, CPX, clinozoïsite
actinote, K-feld, CPX, clinozoïsite	margarite, MicaBlanc, chloritoïde, disthène	margarite, MicaBlanc, GRTpyalm, disthène
margarite, MicaBlanc, sudoïte, disthène	daphnite, MicaBlanc, chloritoïde, clinozoïsite	GRTpyalm, biotite, FM, CPX
margarite, MicaBlanc, sudoïte, amésite	daphnite, biotite, FM, CPX	biotite, MicaBlanc, K-feld, clinozoïsite
amésite, margarite, MicaBlanc, clinozoïsite	biotite, MicaBlanc, K-feld, clinozoïsite	biotite, GRTpyalm, MicaBlanc, clinozoïsite
biotite, amésite, FM, actinote	biotite, daphnite, MicaBlanc, clinozoïsite	GRTpyalm, margarite, MicaBlanc, clinozoïsite
biotite, amésite, MicaBlanc, clinozoïsite	chloritoïde, margarite, MicaBlanc, clinozoïsite	biotite, CPX, K-feld, clinozoïsite
biotite, K-feld, MicaBlanc, clinozoïsite	daphnite, GRThalf, clinozoïsite, biotite	GRTpyalm, GRThalf, clinozoïsite, biotite
amésite, actinote, biotite, clinozoïsite	daphnite, GRThalf, CPX, biotite	GRTpyalm, GRThalf, CPX, biotite
biotite, actinote, K-feld, clinozoïsite	clinozoïsite, GRThalf, CPX, biotite	clinozoïsite, GRThalf, CPX, biotite
	biotite, CPX, K-feld, clinozoïsite	

Tableau E-16. Assemblage du faciès 10SB350 (10 kbars, 350°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite
grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite	grossulaire, K-feld, CPX, wollastonite
grossulaire, K-feld, CPX, lawsonite	grossulaire, K-feld, CPX, lawsonite	grossulaire, K-feld, CPX, lawsonite
actinote, K-feld, CPX, lawsonite	margarite, MicaBlanc, chloritoïde, pyrophyllite	margarite, MicaBlanc, GRTpyalm, pyrophyllite
margarite, MicaBlanc, carpholite, pyrophyllite	daphnite, MicaBlanc, chloritoïde, lawsonite	GRTpyalm, biotite, FM, CPX
margarite, MicaBlanc, carpholite, amésite	daphnite, biotite, FM, CPX	biotite, MicaBlanc, K-feld, lawsonite
amésite, margarite, MicaBlanc, lawsonite	biotite, MicaBlanc, K-feld, lawsonite	biotite, GRTpyalm, MicaBlanc, lawsonite
biotite, amésite, FM, actinote	biotite, daphnite, MicaBlanc, lawsonite	GRTpyalm, margarite, MicaBlanc, lawsonite
biotite, amésite, MicaBlanc, lawsonite	chloritoïde, margarite, MicaBlanc, lawsonite	GRTpyalm, CPX, lawsonite, biotite
biotite, K-feld, MicaBlanc, lawsonite	daphnite, CPX, lawsonite, biotite	biotite, CPX, K-feld, lawsonite
amésite, actinote, biotite, lawsonite	biotite, CPX, K-feld, lawsonite	
biotite, actinote, K-feld, lawsonite		

Tableau E-17. Assemblages du faciès 4GRA750 (4 kbars, 750°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	
anorthite, wollastonite, K-feld, CPX	anorthite, wollastonite, K-feld, CPX	anorthite, wollastonite, K-feld, CPX	
cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	
CPX, actinote, anorthite, K-feld	FM, CPX, anorthite, K-feld	FM, actinote, anorthite, K-feld	
		actinote, CPX, anorthite, K-feld	
cordiérite, actinote, anorthite, biotite	GRTpyalm, anorthite, K-feld, biotite	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite
cordiérite, anorthite, K-feld, biotite	GRTss, anorthite, FM, biotite	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
cordiérite, actinote, FM, biotite		biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
biotite, actinote, K-feld, anorthite			
cordiérite, actinote, K-feld, FM	GRTss, anorthite, FM, K-feld	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	sans biotite
cordiérite, actinote, anorthite, K-feld		GRTss, FM, K-feld, anorthite	

Tableau E-18. Assemblages du faciès 6GRA750 (6 kbars, 750°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite	
anorthite, grossulaire, K-feld, CPX	anorthite, grossulaire, K-feld, CPX	anorthite, grossulaire, K-feld, CPX	
grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	grossulaire, wollastonite, K-feld, CPX	
cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	GRTpyalm, anorthite, K-feld, sillimanite	cordiérite, anorthite, K-feld, sillimanite	
FM, actinote, anorthite, K-feld	FM, CPXgrt, anorthite, K-feld	FM, actinote, anorthite, K-feld	
CPX, actinote, anorthite, K-feld		actinote, CPX, anorthite, K-feld	
cordiérite, anorthite, K-feld, biotite	GRTpyalm, anorthite, K-feld, biotite	GRTss, FM, biotite, anorthite	avec biotite
cordiérite, anorthite, FM, biotite	GRTss, anorthite, FM, biotite	GRTpyalm, cordiérite, biotite, anorthite	
		biotite, cordiérite, K-feld, anorthite	
cordiérite, anorthite, FM, K-feld	GRTss, anorthite, FM, K-feld	GRTpyalm, cordiérite, K-feld, anorthite	sans biotite
		GRTss, FM, K-feld, anorthite	

Tableau E-19. Assemblages du faciès 6AMP600 (6 kbars, 600°C).

Tétraèdre I (Mg)	Tétraèdre II (Fe)	Stau?	Tétraèdre III (Mg-Fe)	Condition
K-Na, K-feld, FM, wollastonite	K-Na, K-feld, FM, wollastonite		K-Na, K-feld, FM, wollastonite	tous
wollastonite, grossulaire, CPX, K-feld	wollastonite, grossulaire, CPX, K-feld		wollastonite, grossulaire, CPX, K-feld	
FSP17, grossulaire, CPX, K-feld	FSP17, grossulaire, CPX, K-feld		FSP17, grossulaire, CPX, K-feld	
FSP17, grossulaire, CPX, clinozoïsite	FSP17, grossulaire, CPX, clinozoïsite		FSP17, grossulaire, CPX, clinozoïsite	
FSP17, anorthite, CPX, clinozoïsite	CPX, FSP17, GRThalf, FM		CPXgrt, FSP17, GRThalf, FM	
amésite, anorthite, MicaBlanc, disthène	CPX, FSP17, GRThalf, clinozoïsite		CPXgrt, FSP17, GRThalf, clinozoïsite	
actinote, anorthite, FM, K-feld	anorthite, FSP17, GRThalf, clinozoïsite		anorthite, FSP17, GRThalf, clinozoïsite	
actinote, CPX, anorthite, K-feld	staurotide, anorthite, MicaBlanc, disthène	avec	cordiérite, anorthite, MicaBlanc, disthène	
	GRTpyalm, anorthite, MicaBlanc, staurotide	avec		
	GRTpyalm, anorthite, MicaBlanc, disthène	sans		
amésite, biotite, FM, anorthite	GRTss, anorthite, FM, biotite		cordiérite, biotite, MicaBlanc, anorthite	avec biotite
biotite, amésite, MicaBlanc, anorthite	GRTpyalm, biotite, MicaBlanc, anorthite		K-feld, biotite, MicaBlanc, anorthite	
biotite, K-feld, MicaBlanc, anorthite	K-feld, biotite, MicaBlanc, anorthite		CPXgrt, biotite, K-feld, FSP17	
	CPX, biotite, K-feld, FSP17		cordiérite, anorthite, GRTpyalm, biotite GRTpyalm, anorthite, FM, biotite	
K-feld, amésite, FM, anorthite	MicaBlanc, K-feld, GRTpyalm, anorthite		K-feld, MicaBlanc, cordiérite, anorthite	sans biotite
K-feld, amésite, MicaBlanc, anorthite	FM, K-feld, GRTss, anorthite		K-feld, GRTss, FM, anorthite	
	CPXgrt, FM, K-feld, FSP17		GRTpyalm, K-feld, cordiérite, anorthite CPXgrt, FM, K-feld, FSP17	

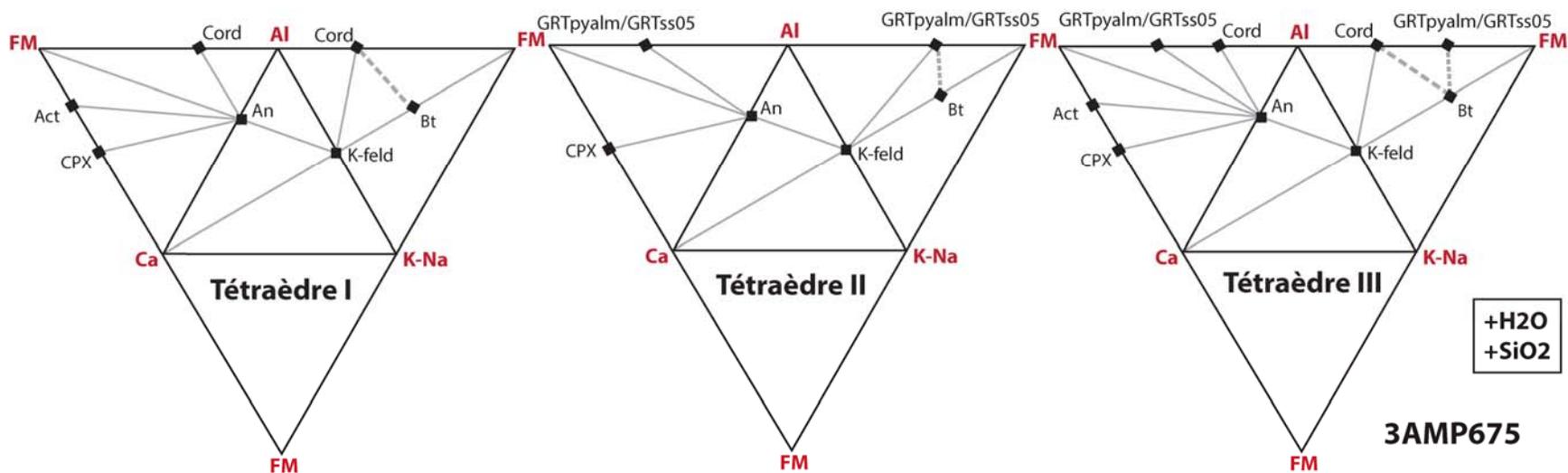


Figure E-2. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 3AMP675. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

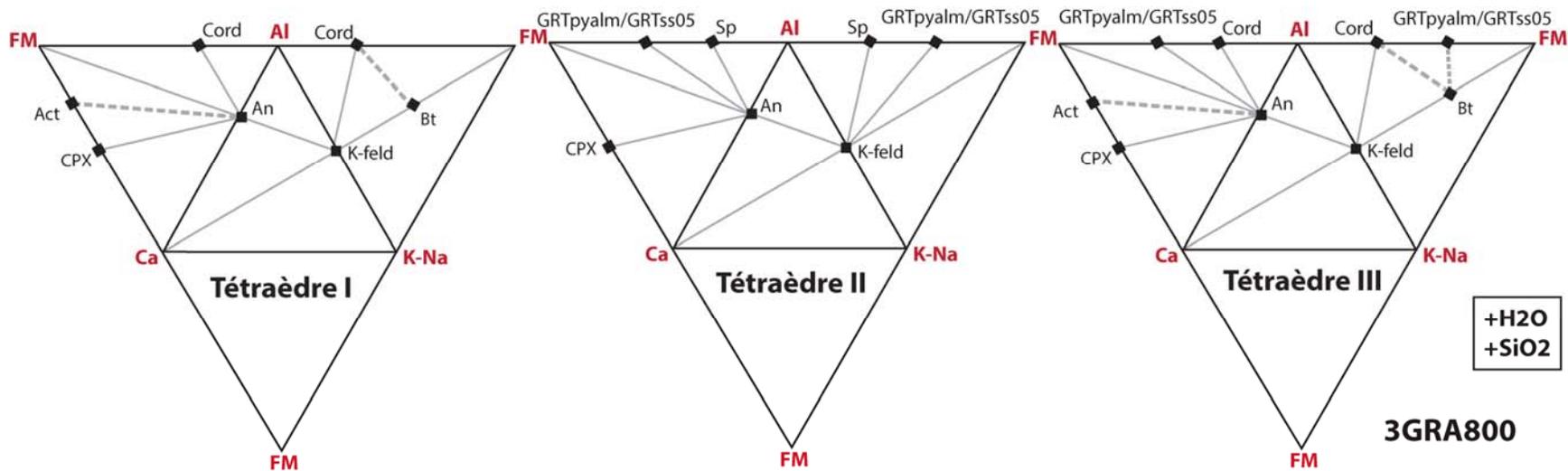


Figure E-3. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 3GRA800. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou l'actinote sont stables ou non.

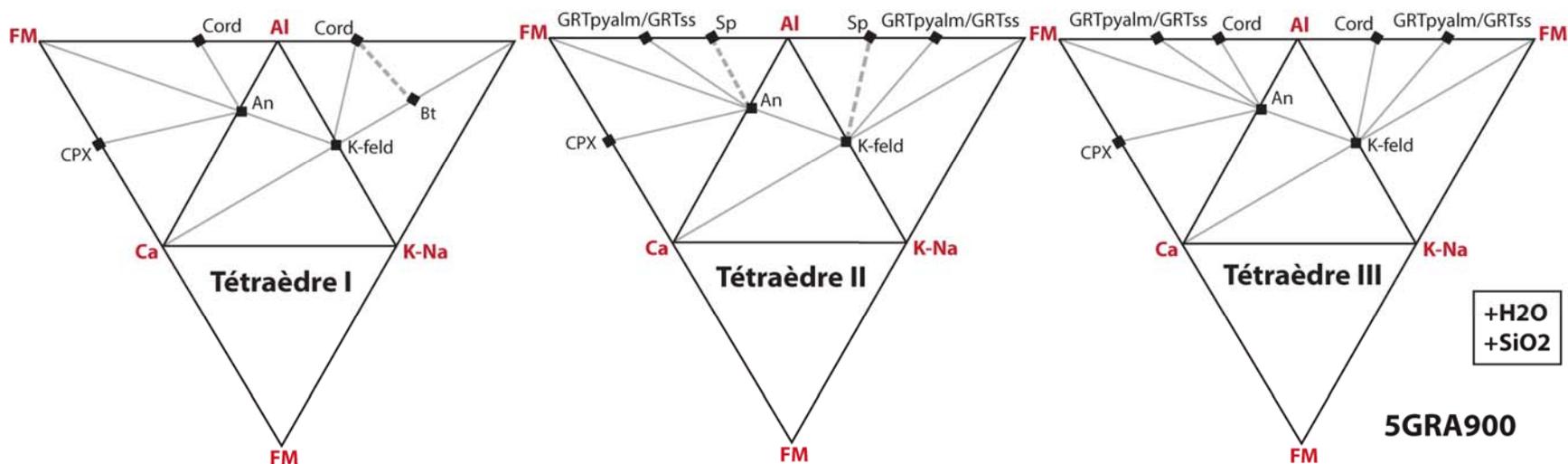


Figure E-4. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5GRA900. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le spinelle sont stables ou non.

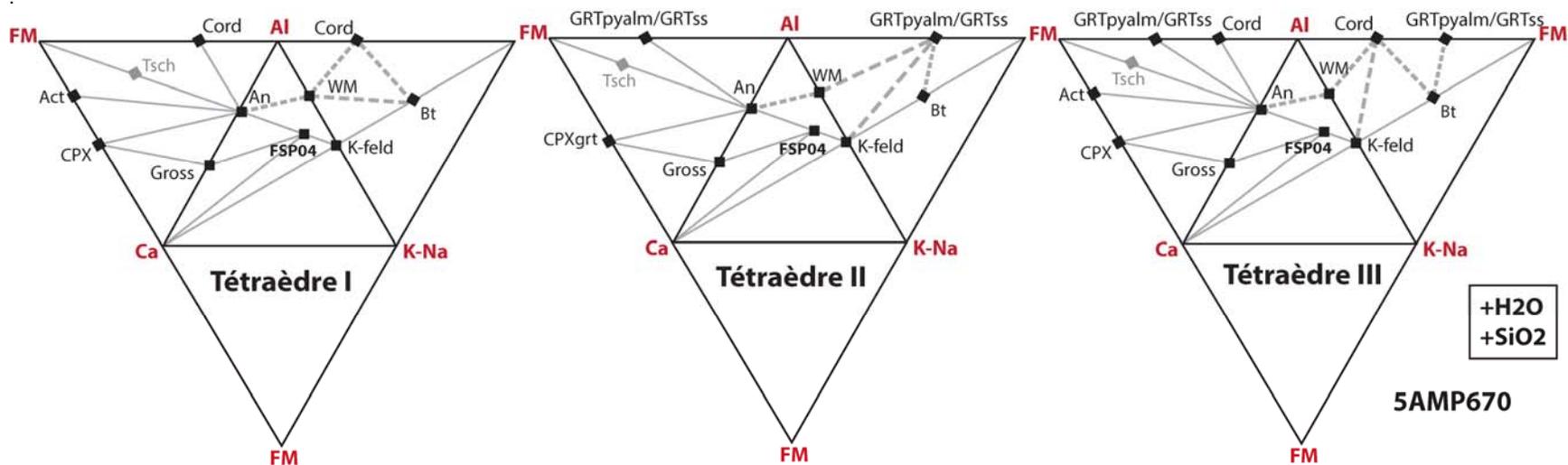


Figure E-5. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5AMP670. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.

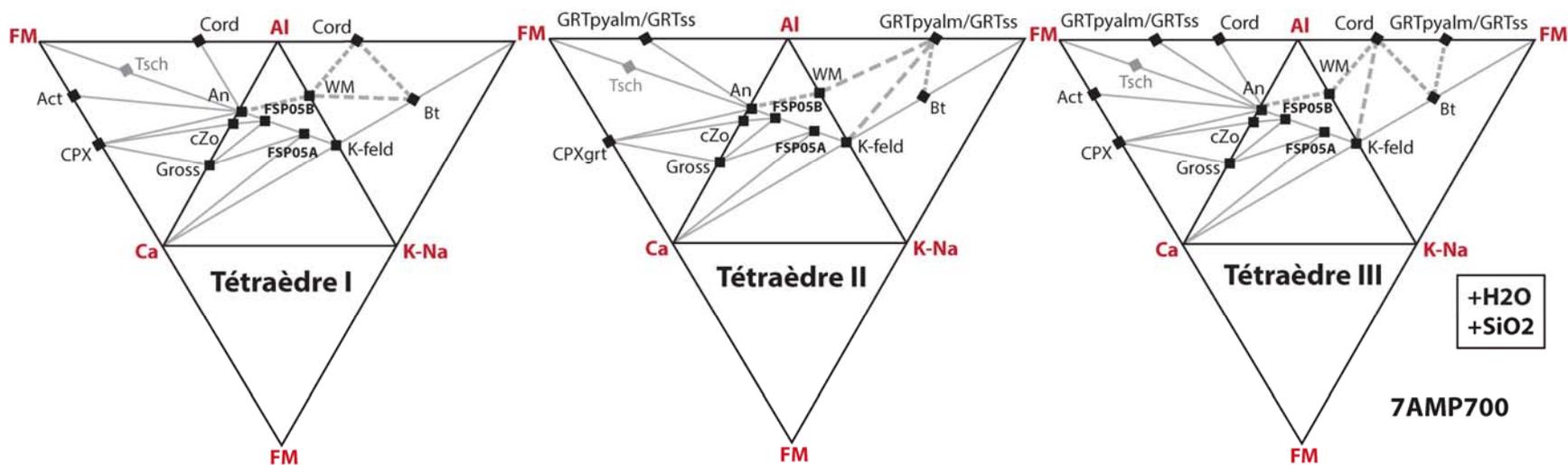


Figure E-6. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP700. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.

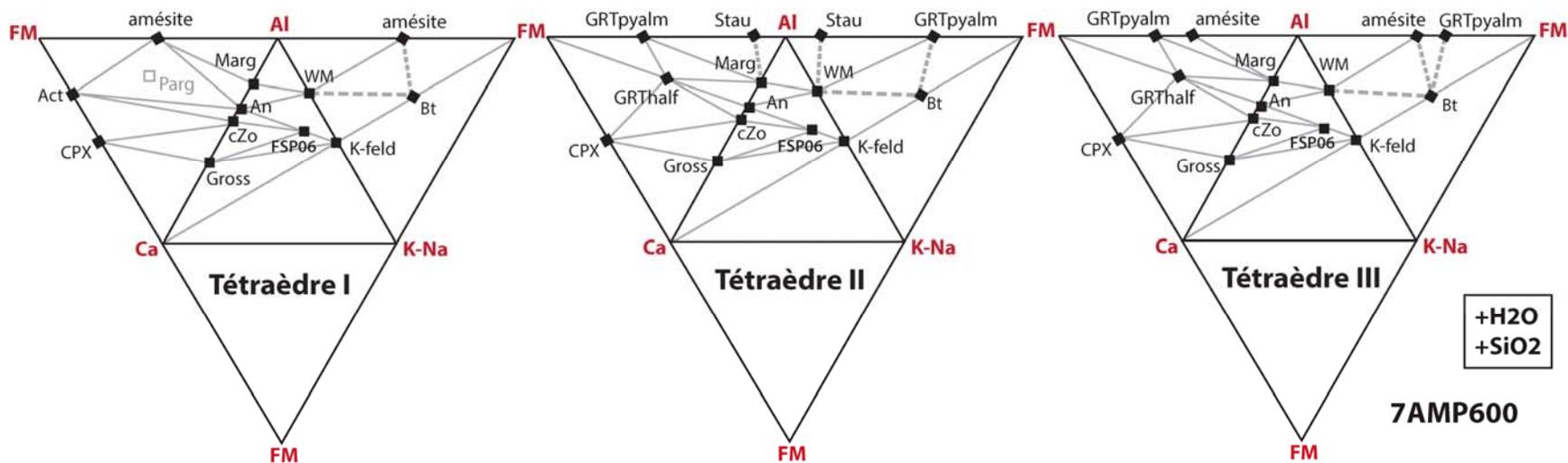


Figure E-7. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou la staurotite sont stables ou non.

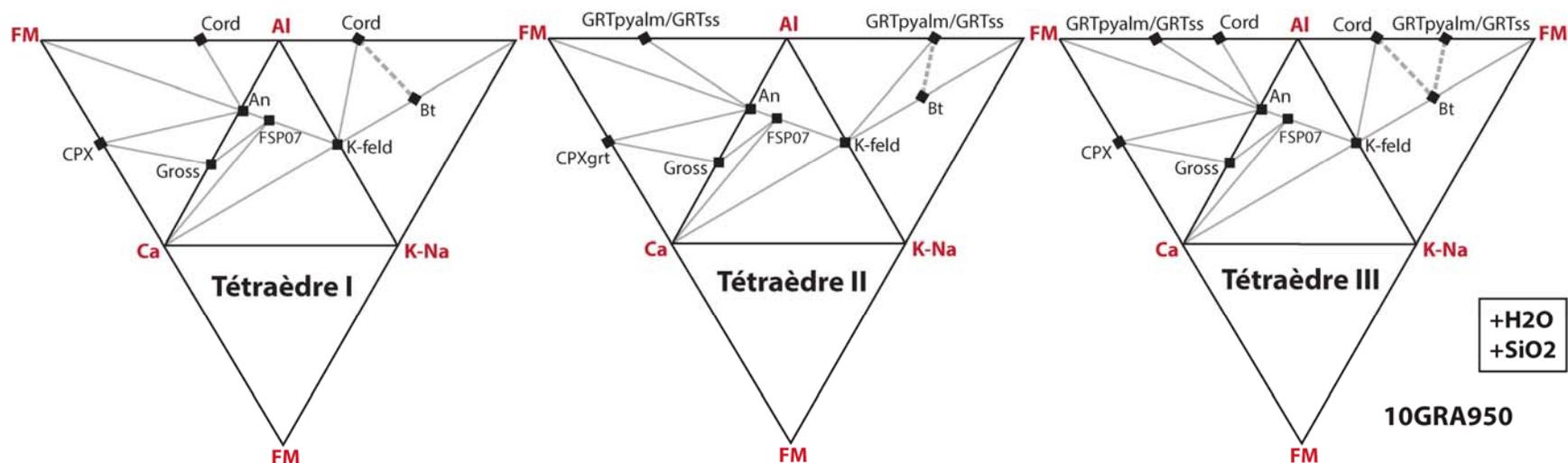


Figure E-8. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10GRA950. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

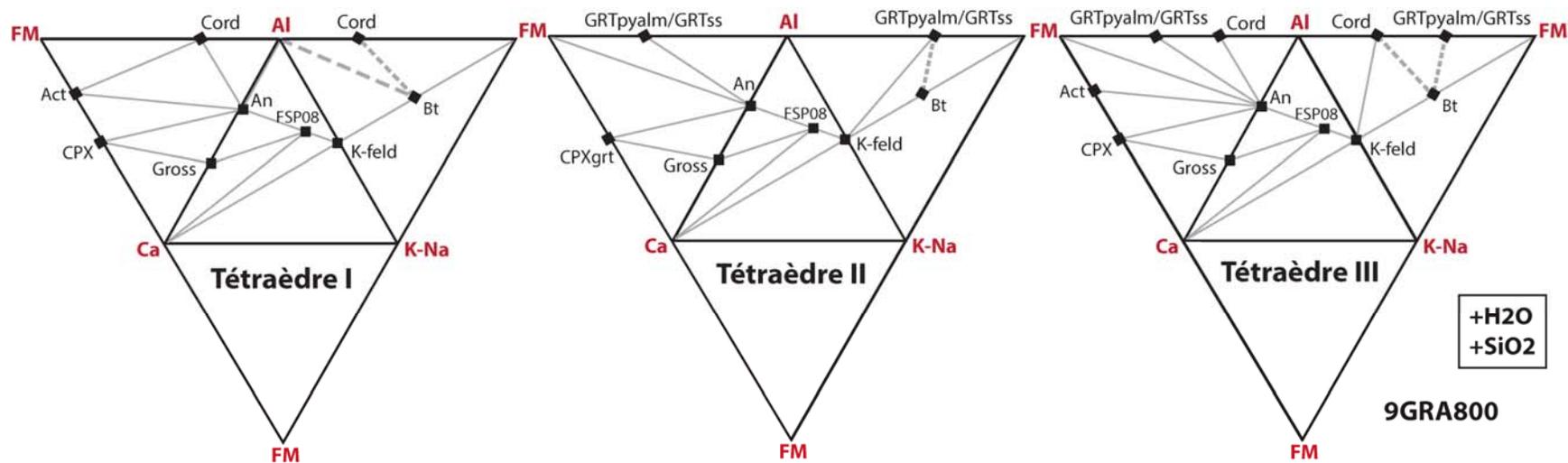


Figure E-9. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 9GRA800. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

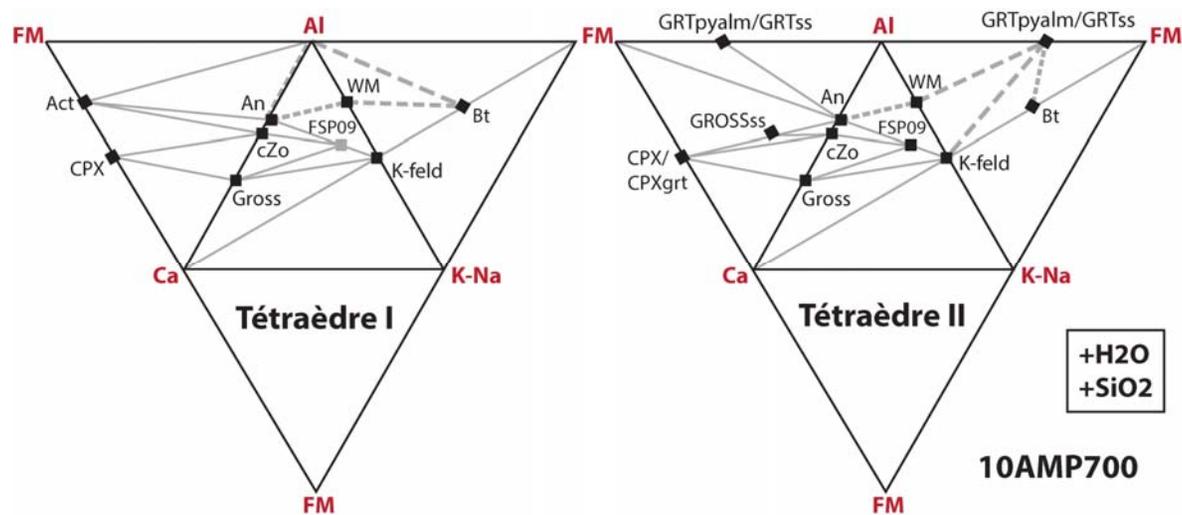


Figure E-10. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10AMP700. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou le mica blanc sont stables ou non.

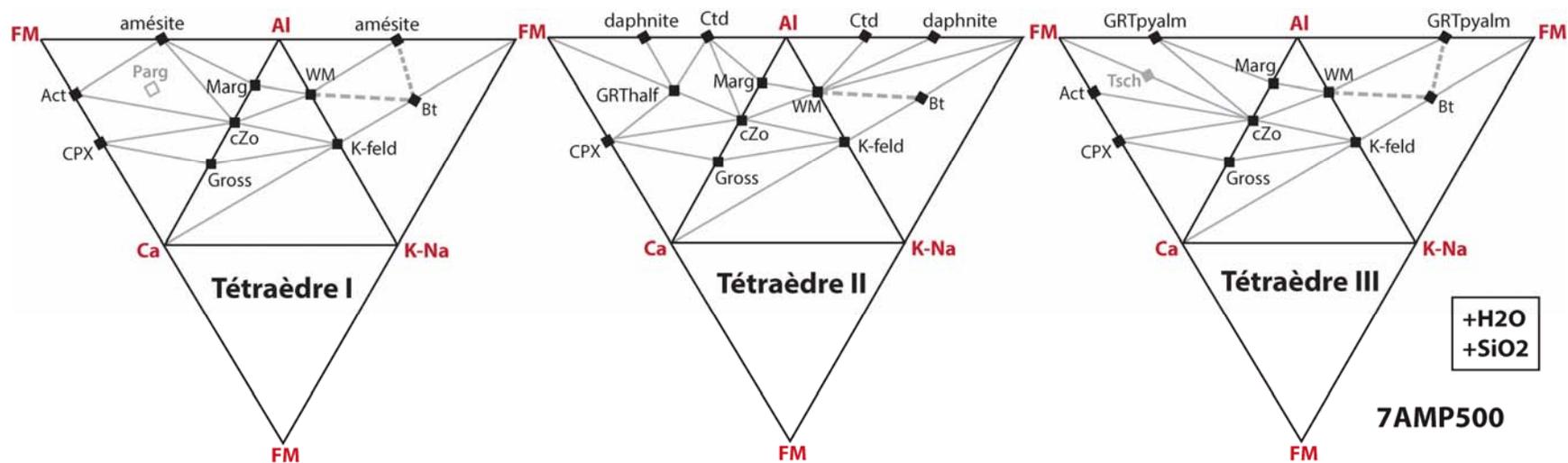


Figure E-11. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 7AMP500. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

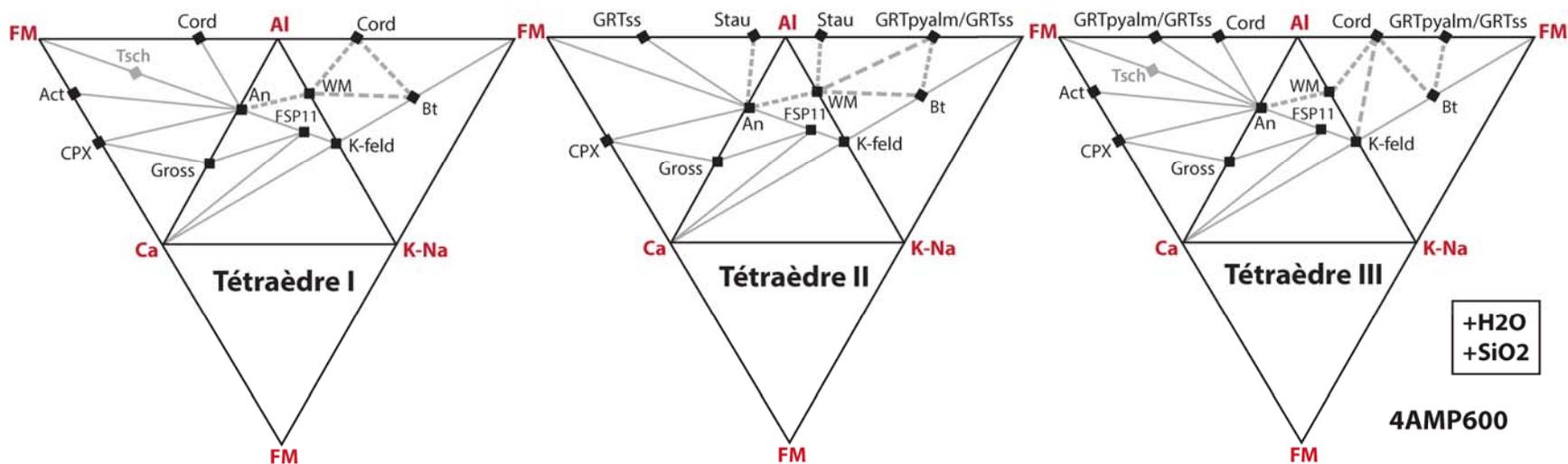


Figure E-12. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 4AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite, le mica blanc et/ou la staurotide sont stables ou non.

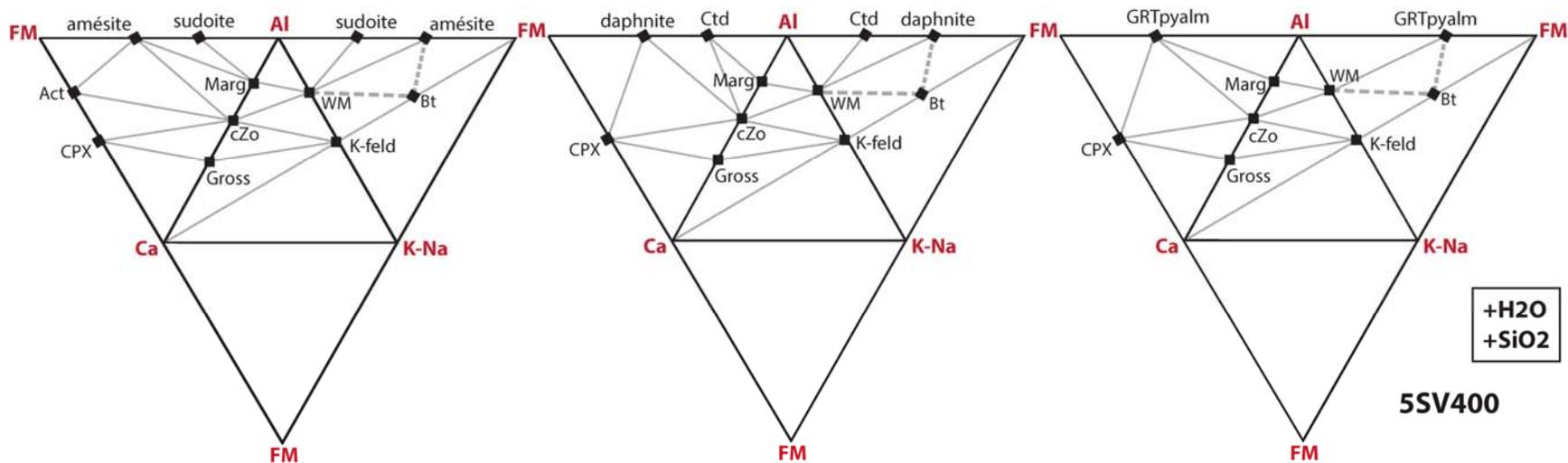


Figure E-13. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 5SV400. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

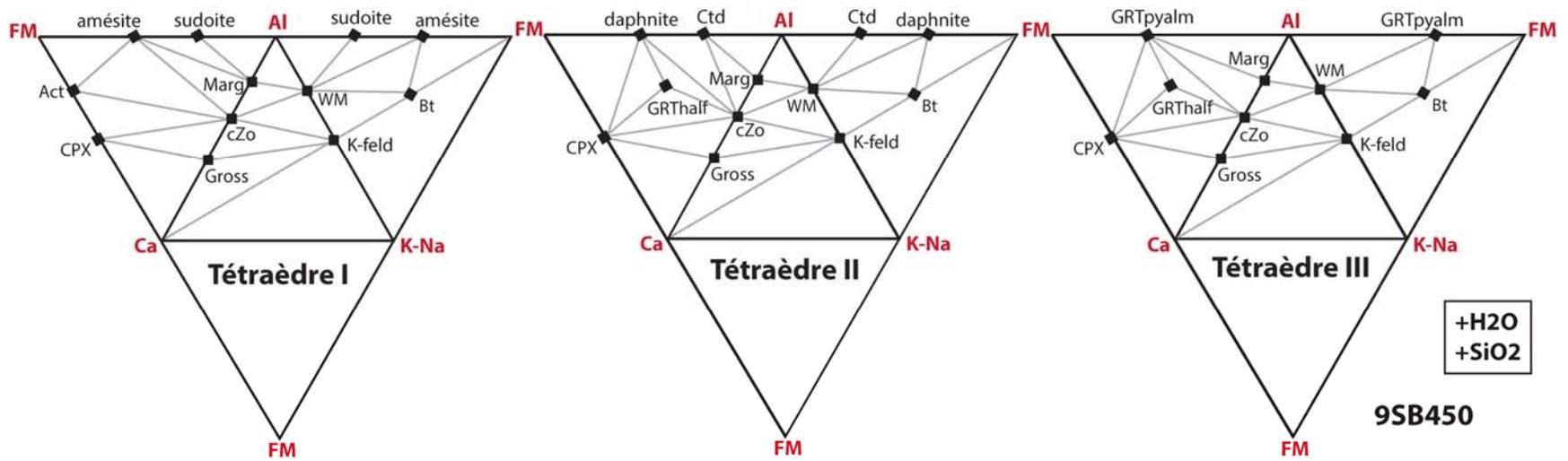


Figure E-14. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 9SB450.

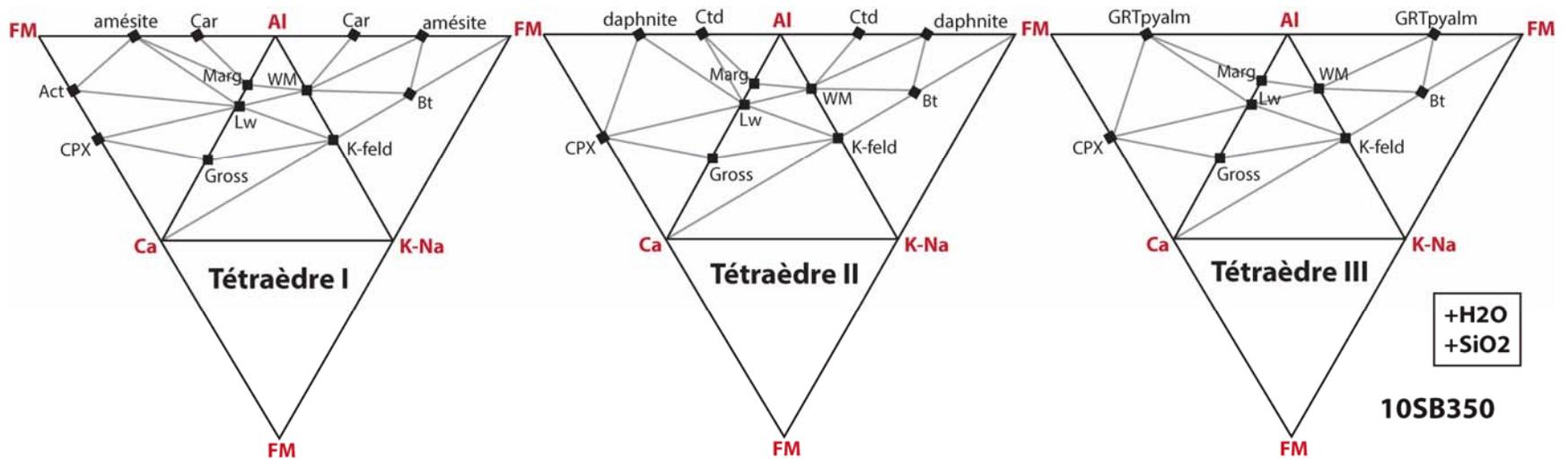


Figure E-15. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 10SB350.

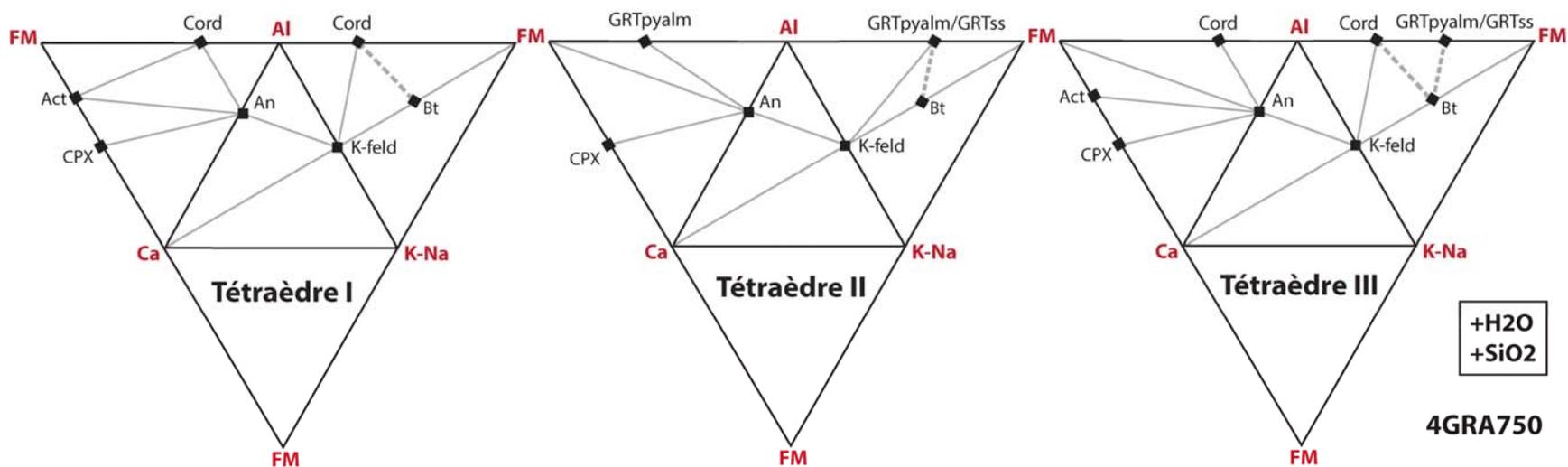


Figure E-16. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 4GRA750. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

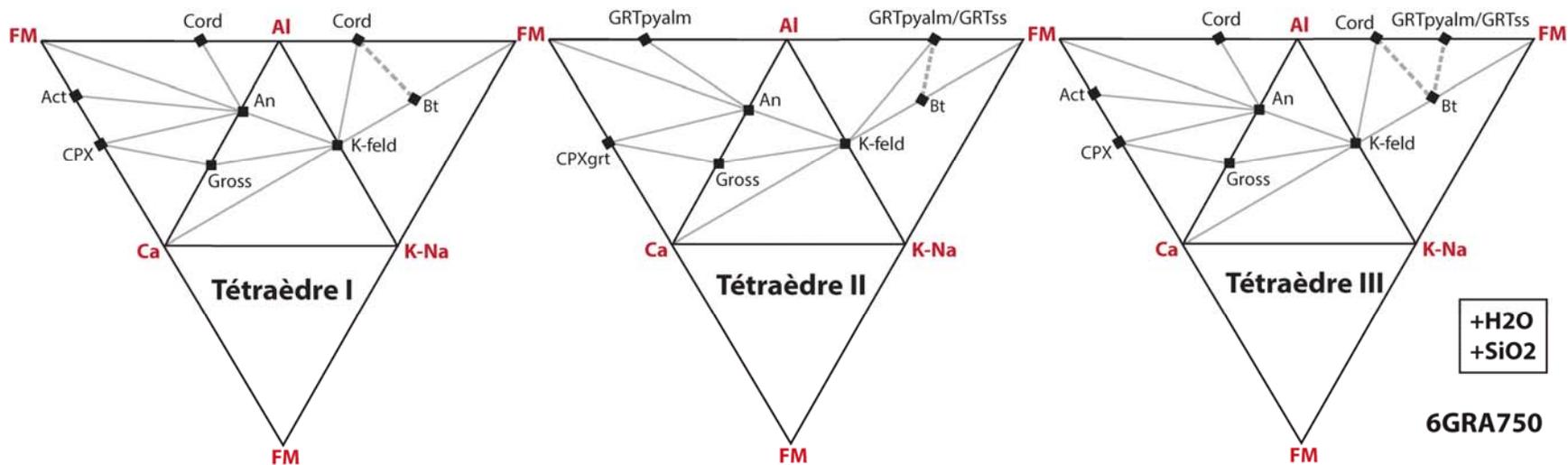


Figure E-17. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 6GRA750. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite est stable ou non.

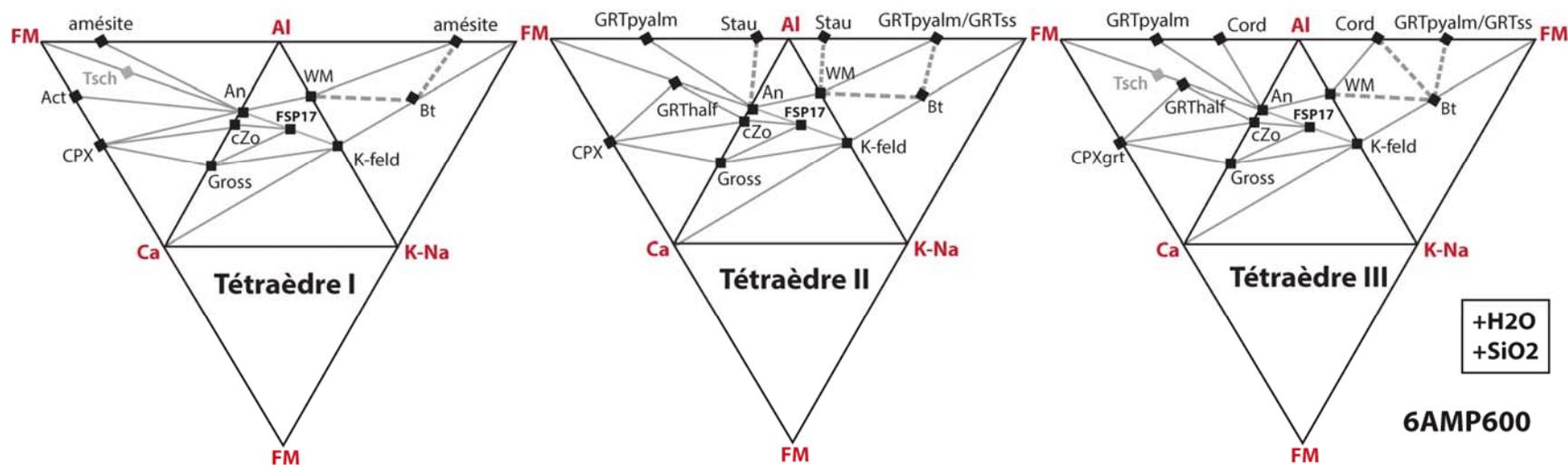
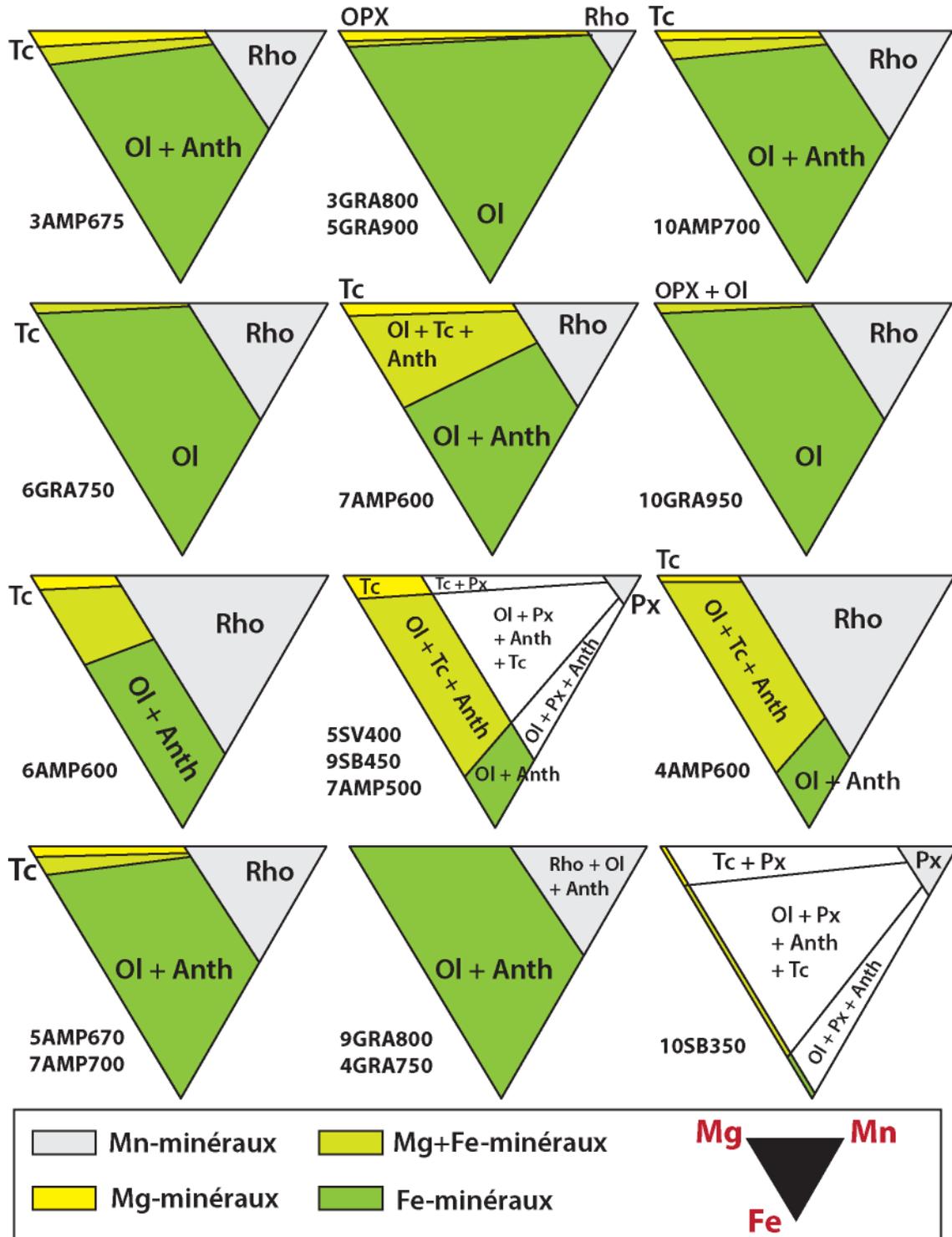


Figure E-18. Vues éclatées des 3 tétraèdres Al-Ca-FM-KNa du faciès 6AMP600. Les traits en pointillés désignent les sous-assemblages dont la composition peut varier selon que la biotite et/ou la staurotide sont stables ou non.

ANNEXE F – DIAGRAMMES TERNAIRES DES MINÉRAUX FM

Diagrammes ternaires Fe-Mg-Mn représentant les minéraux du pôle FM, pour chaque faciès.



ANNEXE G – RÉACTIONS UTILISÉES POUR RÉSOUDRE LE DÉFICIT EN SILICE

Réactants	Produits	Facès
aluminosilicate ou pyrophyllite	Al ₂ O ₃ *	tous
cordiérite	OPX + Al ₂ O ₃	10GRA950, 9GRA800
	amésite + Al ₂ O ₃	3AMP675, 5AMP670, 7AMP700
	spinelles	autres
carpholite	amésite + Al ₂ O ₃	
glaucophane	albite + MgO* + FeO*	
orthose	leucite	
albite	jadéite	7AMP500, 5SV400, 9SB450, 10SB350
	néphéline	autres
leucite	kalsilite	
muscovite	kalsilite + Al ₂ O ₃	
paragonite	jadéite	10SB350
	néphéline	autres
biotite	kalsilite + MgO + FeO	
jadéite	néphéline	
lawsonite	grossulaire + Al ₂ O ₃	
anorthite	grossulaire + margarite + Al ₂ O ₃	7AMP600, 10AMP700, 7AMP500, 5SV400, 9SB450
	grossulaire + Al ₂ O ₃	autres
margarite	clinozoïsite + Al ₂ O ₃	
talç	OPX + Al ₂ O ₃	10AMP700
	antigorite	7AMP500, 4AMP600, 5SV400, 9SB450, 10SB350
	anthophyllite	autres
anthophyllite	OPX + Al ₂ O ₃	
actinote	OPX + CPX	5GRA900, 10GRA950
	CPX + antigorite	7AMP500, 5SV400, 9SB450, 10SB350
	olivine + CPX	autres
hédénbergite	olivine + wollastonite	si wollastonite > 0
diopside	akermanite + wollastonite	si wollastonite > 0; 3GRA800, 5GRA900
	merwinite + wollastonite	si wollastonite > 0; autres
CPX	olivine + wollastonite	si Mg / (Fe+Mg) < 0,1
	wollastonite + MgO + FeO	si Mg / (Fe+Mg) > 0,1; 10SB350
	monticellite	si Mg / (Fe+Mg) < 0,1; autres
tschermakite	grossulaire + penninite + Al ₂ O ₃	
épidote	grossulaire + penninite + Al ₂ O ₃	
staurotide	spinelles + Al ₂ O ₃	7AMP600, 4AMP600, 6AMP600
	chloritoïde + Al ₂ O ₃	7AMP500
	pyrope-almandin + Al ₂ O ₃	autres
clinozoïsite	grossulaire + Al ₂ O ₃	
antigorite	olivine	7AMP500, 4AMP600
	MgO + FeO	autres

Réactants	Produits	Faciès
akermanite	merwinite + monticellite	
OPX	olivine	
grossulaire	gehlenite + wollastonite	
pyrope- almandin	spinelles + olivine	
spessartine	Al ₂ O ₃ + MnO*	
chloritoïde	amésite + Al ₂ O ₃	10SB350
	spinelles	autres
daphnite	olivine + spinelles	
sudoïte	amésite + Al ₂ O ₃	
amésite	MgO + Al ₂ O ₃	10SB350
	spinelles + MgO	7AMP600, 7AMP500, 4AMP600, 9SB450, 6AMP600
	spinelles + olivine	
pénninite	olivine + spinelles	
monticellite	merwinite + MgO + FeO	
gehlenite	lime + Al ₂ O ₃	
merwinite	lime + MgO	
olivine	FeO + MgO	
wollastonite	lime	
MnO	téphroïte	
téphroïte	MnO (oxyde)	

*Al₂O₃ = diasprore, corindon

*MgO = périclase, brucite

*MnO = pyroxmangite, rhodonite

*FeO = FeO additionnel (réparti dans les oxydes après le calcul des silicates)