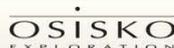


Projet 2013-04

Caractéristiques chimiques et minéralogiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase I

17 novembre 2014 – Atelier CONSOREM, Québec Mines

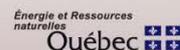
Lucie Mathieu, Ph.D.



AGNICO EAGLE



URSTM/UQAT



GLENCORE



UQAM



UQAC

- **À l'origine du projet...**

- Les roches altérées par des fluides hydrothermaux sont proximales à de nombreux types de gisements (VMS, épithermaux, porphyres, IOCG, etc.).
- **Enjeu:** identifier les roches altérées.
- **Outils:** relations de terrain, texture, minéralogie, chimie.
- Les critères de reconnaissance sont largement connus pour les roches faiblement métamorphisées.
- Qu'en est-il des roches de plus **haut grade** métamorphique?

Sommaire

- 1. Problématique et objectifs**
2. Norme HautGrade
3. Choix du faciès
4. Premiers tests
5. Conclusions

Altération, métasomatisme*

- **Lessivage et décharge:** déplacement des éléments majeurs et traces (à l'exception des immobiles) par un fluide.
- **Autres effets:** changements minéralogiques et volumétriques.

Comment reconnaître les roches altérées et surtout, porter un jugement sur l'intensité de l'altération?

- **Chimie:** les bilans de masse avec précurseurs uniques (Grant 1986) ou modélisés (Trépanier 2008) sont les méthodes les plus performantes, surtout du point de vue de la quantification.
- **Minéralogie:** les normes sont une bonne alternative (ou complément) aux observations pétrographiques pour aborder la problématique du point de vue de la minéralogie.

*Revue, atlas: Thompson et al. (1996), Bonnet et Corriveau (2006), Trépanier (2008)

Outils disponibles: bilans de masse et minéraux normatifs, des méthodes complémentaires (cf. projets Consorem de S. Trépanier).

Type d'altération	Bilans de masse* (précurseurs modélisés)	Norme SV350C* (indices)
Silicification	B.M. SiO ₂	X
Chloritisation sans carbonates	B.M. MgO ou Fe ₂ O ₃	ALT-CHLO
Séricitisation sans carbonates	X	ALT-SER
Altération Chlorite-Calcite	X	ALT-CHL-CC-TLC
Altération en carbonates (Séricite-Dolomite-Ankérite)	(B.M. K ₂ O)	ALT-SER-CARBS
Albitisation	B.M. Na ₂ O	X
Altération potassique	B.M. K ₂ O	X
Carbonatation	X	ALT-CARBS, Indice disc. carbonates

* Logiciel LITHOMODELEUR

La norme SV est particulièrement utile pour identifier les **changements minéralogiques** liés au mouvement des volatils (H₂O et CO₂) (Trépanier 2011).

Outils disponibles et leurs limites

Bilans de masse par précurseurs uniques

- **Méthode s'appliquant à tous types de roches**, à condition de bien reconnaître le précurseur non altéré (Grant 1986).
- **Limite:** en terrain de haut grade, la déformation peut complexifier la reconnaissance de roches plus ou moins altérées appartenant à la même unité.

Bilans de masse par modélisation des précurseurs

- **Avec la modélisation des précurseurs** (Trépanier 2008 à 2011), la méthode des bilans de masse a été grandement perfectionnée.
- **Limite:** ne s'applique qu'à la **plupart** des roches d'origine magmatique, si certains éléments traces sont analysés (Zr, Y, Cr et Nb, Th dans certains cas).

Norme Consorem

- A prouvé qu'elle était un bon complément aux bilans de masse dans certains cas.
- **Limite:** faciès schiste vert inférieur et supérieur, amphibolite inférieur.

Comment contribuer?

Bilans de masse

- **Avec la modélisation des précurseurs**, la méthode a été poussée à son maximum.
- Cette méthode ne pourra pas être étendue aux roches sédimentaires, car leur chimie n'est pas « prédictible ».

Normes

- **Le calcul mis en place sous LithoModeleur** peut être étendu à d'autres grades métamorphiques.

But: étendre le calcul normatif aux conditions de haut grade, afin de développer un outil utilisant les éléments majeurs et applicable sur tous types de protolithes.

Et ensuite: tester un maximum de cas, développer indices et diagrammes adaptés.



Quel type de protolithe pour une roche riche en biotite?

Une roche altérée pourrait contenir des minéraux typiques (**type**) présents en quantités anormales (**mode**), ou associés à des phases inhabituelles (**paragenèse**).

type + mode + paragenèse



Sédiment pélitique?

Roche altérée?

Quel type de protolithe pour une roche riche en biotite?

L'utilité des données normatives

- **Norme:** c'est une façon un peu plus informative de représenter une analyse chimique.
- **Norme CIPW:** **standardise** le nom des roches, permet des regroupements (cf. cartographie) et la comparaison de roches provenant d'endroits différents.
- **NORMAT:** développement d'**indices** applicables aux VMS faiblement métamorphisés (Piché et Jébrak 2004).
- **Norme HautGrade:** pourrait être utilisée de la même façon.

Une roche altérée pourrait contenir des minéraux typiques (**type**) présents en quantités anormales (**mode**), ou associés à des phases inhabituelles (**paragenèse**).

type + mode + paragenèse

Sommaire

1. Problématique et objectifs
- 2. Norme HautGrade**
3. Choix du faciès
4. Premiers tests
5. Conclusions

Les principes qui rendent le calcul normatif possible

Équilibre, paragenèse principale

- **Paragenèse:** assemblage de minéraux ayant cristallisés à l'équilibre, i.e. dans des conditions de P-T similaires (cf. pic du métamorphisme)
- **Avantage:** les roches métamorphiques contiennent souvent une paragenèse principale, qui représente l'essentiel du volume de la roche. Cette paragenèse est modélisable (cf. équilibres thermodynamiques).

Isochimie

- Le métamorphisme ne modifie pas la chimie d'une roche (à part pour les volatils). C'est pour cela que les bilans de masse sont applicables aux roches de tous grades.
- Exceptions cependant au principe d'isochimie:
 - La perte des **fluides** (H, C, S) peut faire perdre des informations sur l'événement hydrothermal.
 - **Majeurs:** mouvements < cm. Attention à la taille des échantillons.
 - Les **migmatites** sont des roches difficiles à travailler, même lorsque le leucosome n'a pas migré.

L'outil qui rend la modélisation possible : la thermodynamique

- **Bases de données thermodynamiques:** elles sont à la base des normes Consorem et HautGrade.
- Bases établies principalement à partir d'expériences faites en laboratoire, avec des **systèmes simples** (cf. oxydes majeurs, très rarement Mn, et peu de traces comme Zn, etc.).
- **Logiciels:** interfaces utilisant les bases de données thermodynamiques et montrant les résultats sous forme de diagrammes variés.
 - **Theriak-Domino** (de Capitani et Petrakakis 2010): utilisé avec la base de données JUN92 (Bermann 1988, etc.). Pour la norme Consorem surtout.
 - **Perple_X** (Connolly): utilisé avec la hp02ver (Holland et Powell 1998; et améliorations de Connolly) et des modèles de solutions solides. Pour la norme HautGrade.



Perple_X

La norme HautGrade s'appuie sur différents travaux

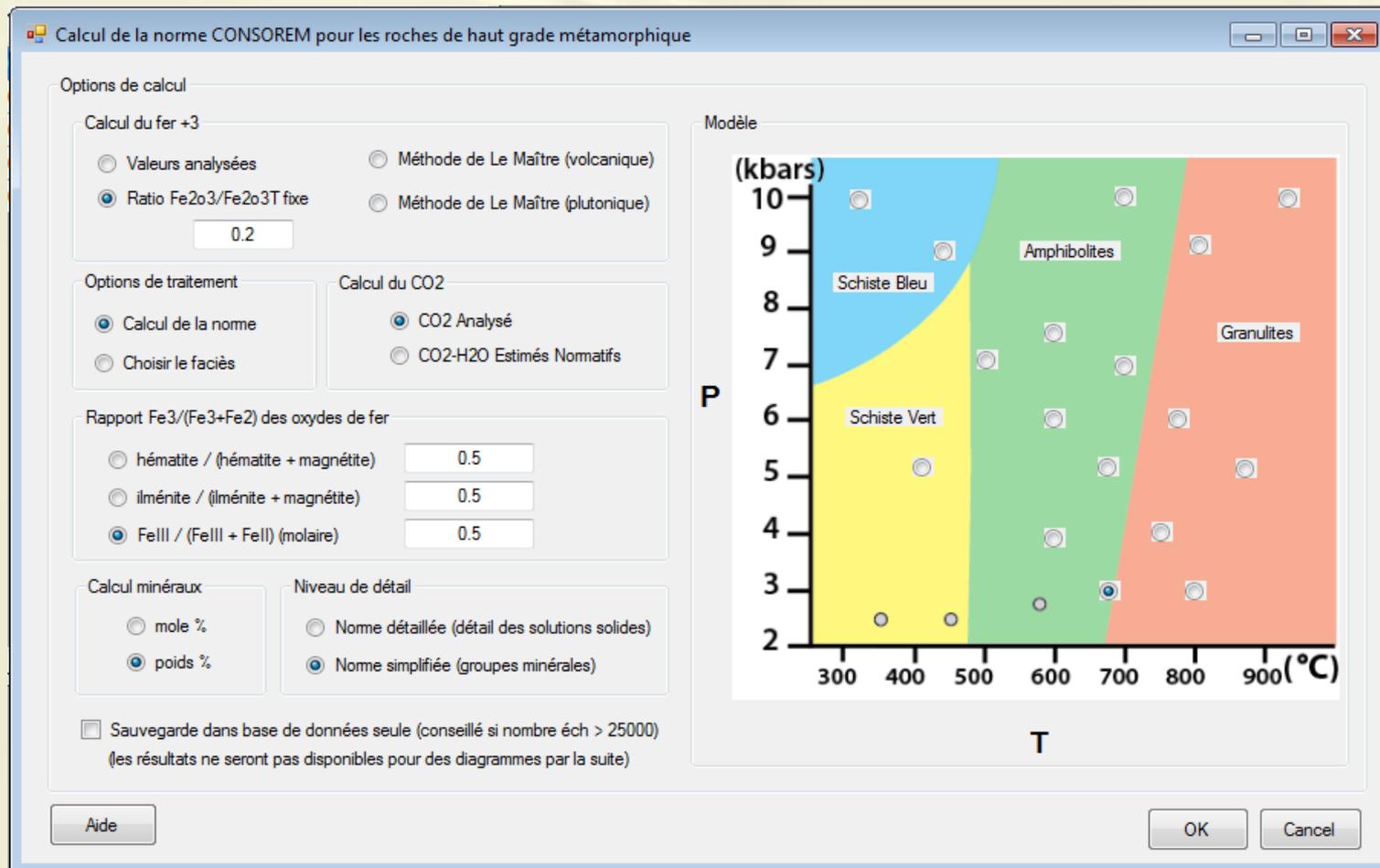
- Norme principalement inspirée de la **norme Consorem** (Trépanier 2012) – projet Consorem 2011-04 (normes schistes verts (x2) et amphibolite inférieur)
- Utilisation de diagrammes ternaires (cf. **Mesonorm**; Barth 1959)
- Calcul du CO₂ normatif, par itération (cf. **NORMAT**; Piché et Jébrak 2004)
- Calcul simultané des minéraux normatifs (cf. **Matnorm**; Pruseth 2009)
- Norme codée sous Visual Basic (pour assurer une compatibilité avec LithoModeleur)
- Nombreux diagrammes basés sur les équilibres thermodynamiques.

CIPW, Matnorm, NORMAT, Mesonorm, norme Consorem

CIPW, Matnorm, NORMAT, Mesonorm, norme Consorem

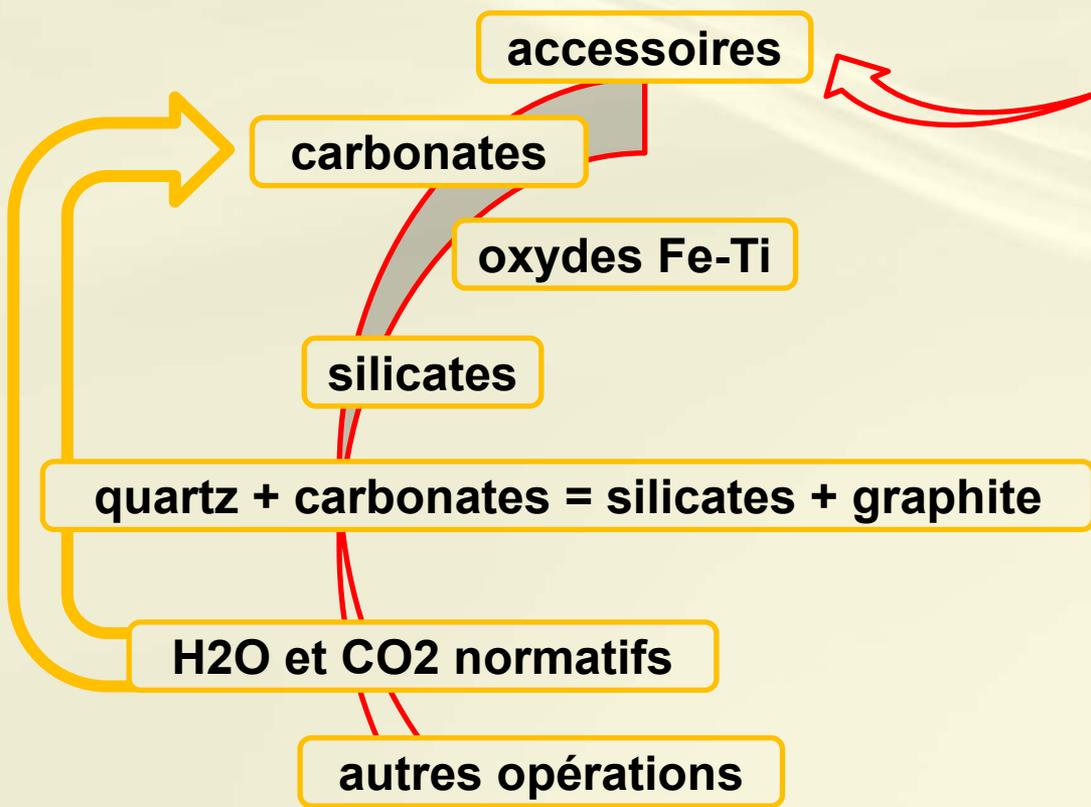
Qu'est-ce que la norme HautGrade?

- 17 nouveaux faciès
- Outil intégré à LithoModeleur 3.6.0



Roche	SiO2	Al2O3	CaO	FeOT	MgO	MnO	TiO2
I	43	0.05	0.1	0.43	57.7	0.4	0.07
II	42.4	0.03	0.11	0.71	57.7	0.34	0.03

total
moles
recalcule à 100%



Roche	fayalite	forstérite	etc.
I	1	97	2
II	3	96	1

ou

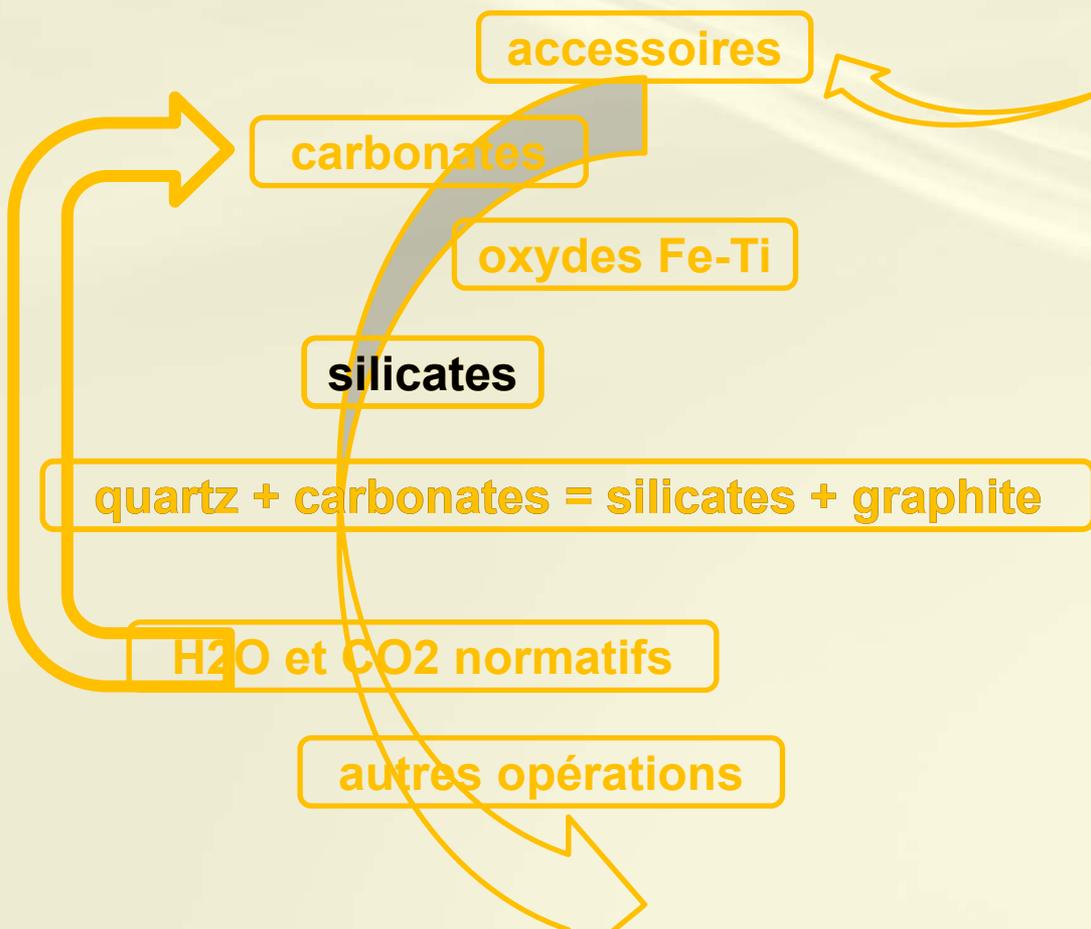
Roche	olivine	etc.
I	98	2
II	99	1

+

TOTALoxyde	TOTALmineral	Comment
101	99.5	Il est ...
98	97	Il est ...

Roche	SiO2	Al2O3	CaO	FeOT	MgO	MnO	TiO2
I	43	0.05	0.1	0.43	57.7	0.4	0.07
II	42.4	0.03	0.11	0.71	57.7	0.34	0.03

total
recalcule à 100%
moles



Roche	fayalite	forstérite	etc.
I	1	97	2
II	3	96	1

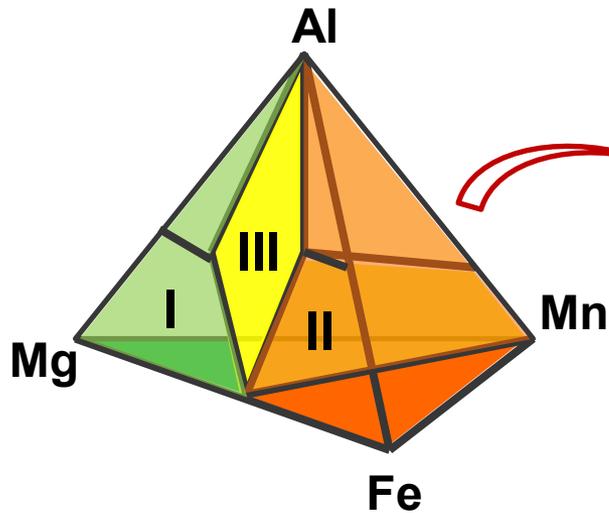
ou

Roche	olivine	etc.
I	98	2
II	99	1

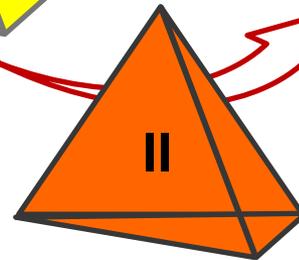
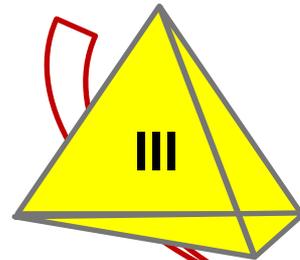
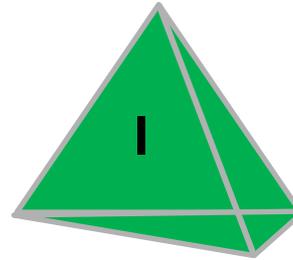
+

TOTALoxyde	TOTALmineral	Comment
101	99.5	Il est ...
98	97	Il est ...

Norme HautGrade



Tétraèdre Al-Fe-Mg-Mn



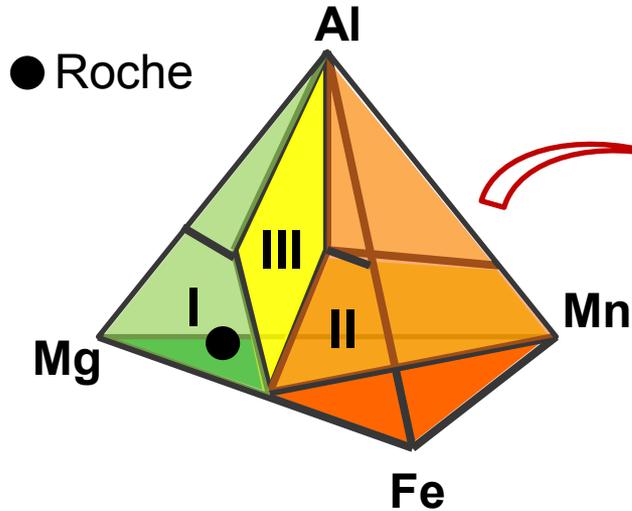
Tétraèdres Al-Ca-FM-KN

- Calcul simultané des proportions de minéraux de l'assemblage sélectionné

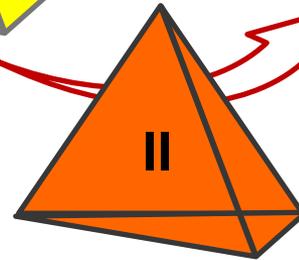
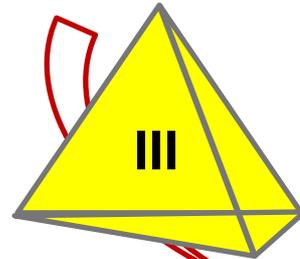
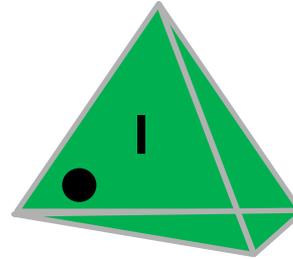
- Ajustements (amphibole, biotite, MicaBlanc, pôle FM, excès/déficit en Si, solutions solides)

- Minéraux présents, ou non, selon les compositions en Fe-Mg-Mn et en K-Na de la roche: biotite, staurotide, épidote, mica blanc.
- Ajouts de solutions solides pour: grenat et feldspath.

Norme HautGrade



Tétraèdre Al-Fe-Mg-Mn



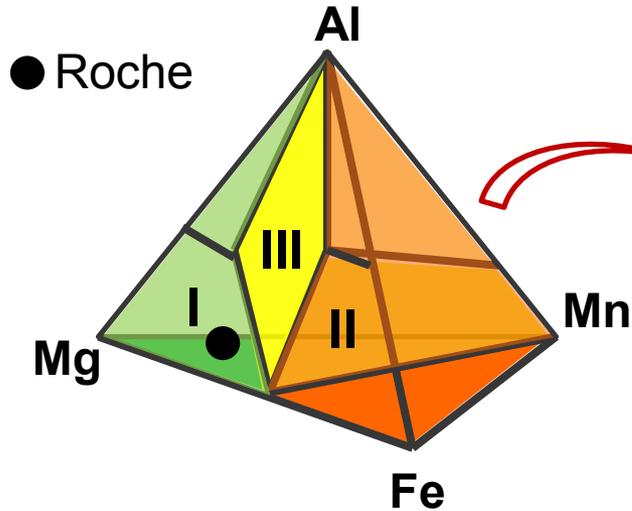
• Calcul simultané des proportions de minéraux de l'assemblage sélectionné

• Ajustements (amphibole, biotite, MicaBlanc, pôle FM, excès/déficit en Si, solutions solides)

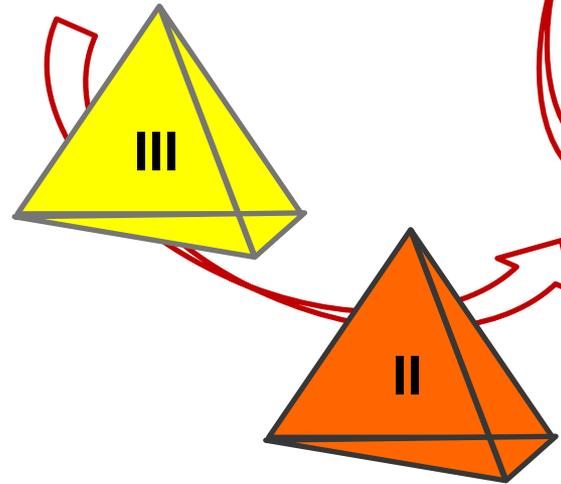
Tétraèdres Al-Ca-FM-KN

- Minéraux présents, ou non, selon les compositions en Fe-Mg-Mn et en K-Na de la roche: biotite, staurotide, épidote, mica blanc.
- Ajouts de solutions solides pour: grenat et feldspath.

Norme HautGrade



Tétraèdre Al-Fe-Mg-Mn



Tétraèdres Al-Ca-FM-KN

- Calcul simultané des proportions de minéraux de l'assemblage sélectionné

- Ajustements (amphibole, biotite, MicaBlanc, pôle FM, excès/déficit en Si, solutions solides)

- Minéraux présents, ou non, selon les compositions en Fe-Mg-Mn et en K-Na de la roche: biotite, staurotide, épidote, mica blanc.
- Ajouts de solutions solides pour: grenat et feldspath.

Sommaire

1. Problématique et objectifs
2. Norme HautGrade
- 3. Choix du faciès**
4. Premiers tests
5. Conclusions

Choix du faciès

Faciliter le choix du faciès

- **option « Calcul de la norme »** : l'utilisateur choisi l'un des 17 faciès, et les résultats sont ajoutés au fichier Access.
- **option « Choisir le faciès »** : aucun champs n'est ajouté à la table Access. Le code compare les minéraux observés avec les minéraux normatifs et produit 2 fenêtres qui permettent de plus facilement choisir le faciès approprié à telle ou telle roche.

Calcul de la norme CONSOREM pour les roches de haut grade métamorphique

Options de calcul

Calcul du fer +3

Valeurs analysées Méthode de Le Maître (volcanique)

Ratio Fe₂O₃/Fe₂O₃T fixe Méthode de Le Maître (plutonique)

0.2

Options de traitement

Calcul de la norme Choisir le faciès

Calcul du CO₂

CO₂ Analysé CO₂-H₂O Estimés Normatifs

Rapport Fe₃/(Fe₃+Fe₂) des oxydes de fer

hématite / (hématite + magnétite) 0.5

ilménite / (ilménite + magnétite) 0.5

Fe^{III} / (Fe^{III} + Fe^{II}) (molaire) 0.5

Calcul minéraux

mole % Norme détaillée (détail des solutions solides)

poids % Norme simplifiée (groupes minérales)

Sauvegarde dans base de données seule (conseillé si nombre éch > 25000)
(les résultats ne seront pas disponibles pour des diagrammes par la suite)

Aide

Modèle

(kbars)

10

9

8

7

6

5

4

3

2

Schiste Bleu

Schiste Vert

Amphibolites

Granulites

P

300 400 500 600 700 800 900 (°C)

T

OK

Cancel

Choix du faciès

Comment indiquer au logiciel quels minéraux ont été observés en lame mince? Utilisez l'interface « Configuration des données ».

Étape 1: définition des oxydes (%)

SiO2
TiO2
Fe2O3T
FeO
K2O
P2O5
MnO
U3O8
BeO

Les oxydes

Étape 2: définition des éléments mineurs et traces (PPM)

Li
B
F
Mg
P
Cl
Ca
Ti
Cr

Les éléments mineurs et traces

Étape 3: définition des éléments précieux (PPB)

Ru
Pd
Os
Pt

Les éléments précieux

Étape 4: définition des volatiles (%)

LOI
CO2
S_PCT
SO3
H2O_MOINS

Les volatiles

Étape 5bis: Autres données (minéraux observés)

ND143_ND144		FeldspathAlcalin	plagioclase	plagioclase
EPSILON_ND		chlorite	chlorite	CPX
SR87_SR86_INI		OPX		biotite
PB206_PB204_INI		olivine		grenat
PB207_PB204_INI		MicaBlanc	MicaBlanc	feldspathoide
PB208_PB204_INI		staurotide		talc
OS186_OS188		cordierite		chloritoide
OS187_OS188		quartz	quartz	disthene
RE187_OS188		sillimanite		amphibole

Les minéraux doivent être fournis en poids % des phases observées

VERT: Le champ contient des valeurs strictement positives ou "NULL"

ROUGE: Le champ contient certaines valeurs de 0 ou négatives

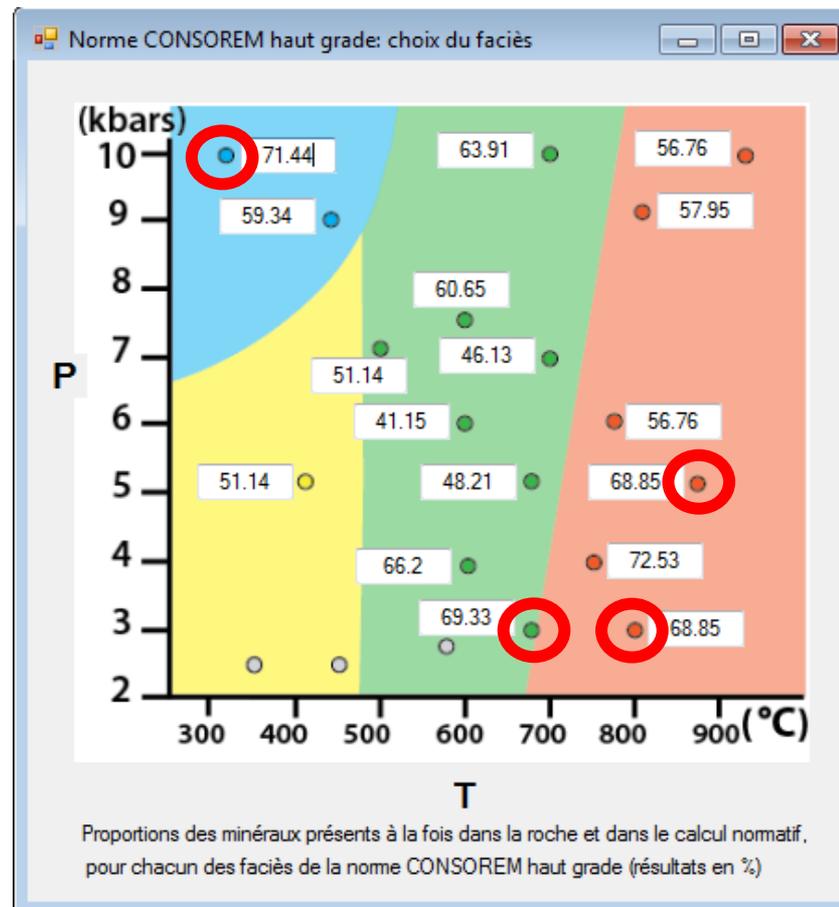
Note: le traitement des 0 et des négatifs sera déterminé à l'étape 7

Aide OK Annuler

Choix du faciès

Faciliter le choix du faciès

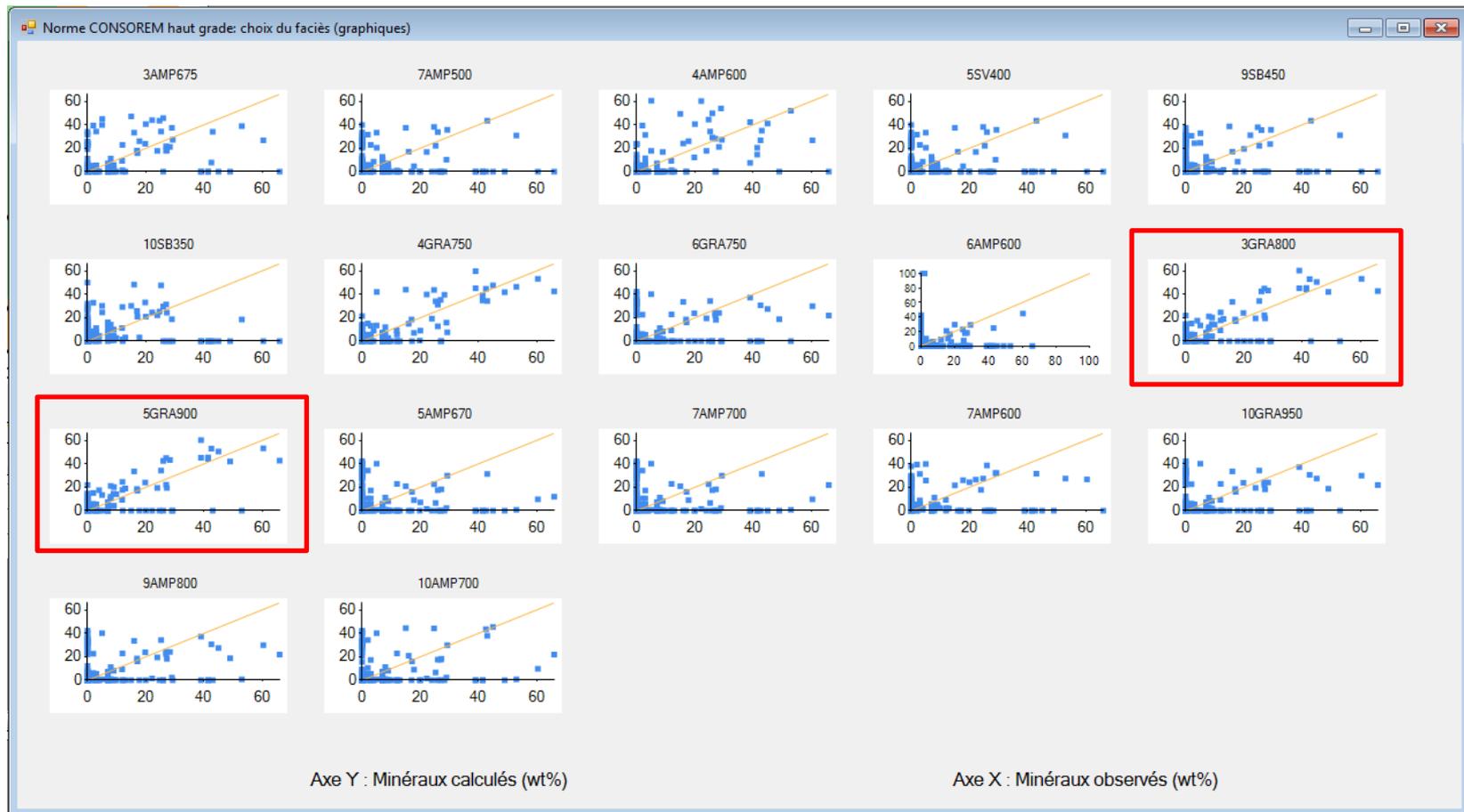
- **Première fenêtre fournie par le code:** la norme calcule-t-elle le bon **type** de minéraux?



Choix du faciès

Faciliter le choix du faciès

- **Deuxième fenêtre** fournie par le code: la norme calcule-t-elle les bonnes **proportions** de minéraux?



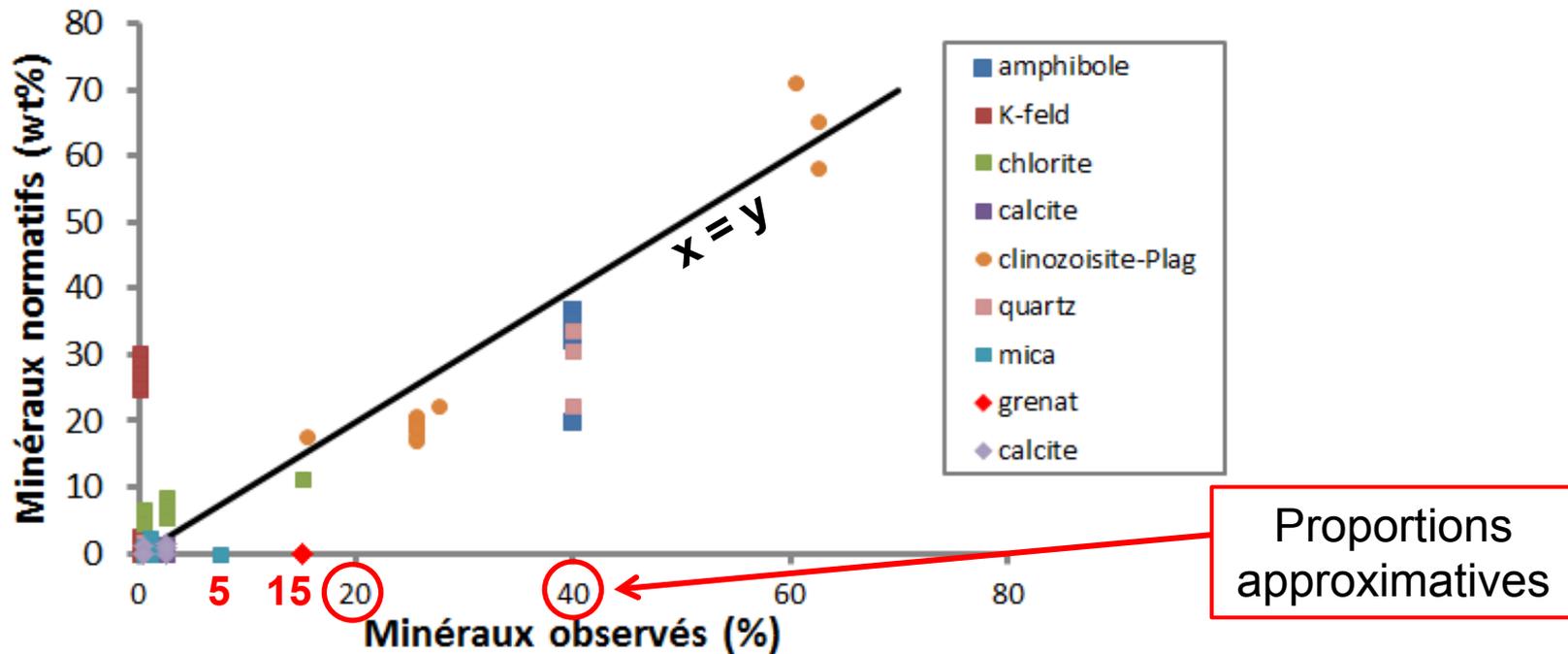
Sommaire

1. Problématique et objectifs
2. Norme HautGrade
3. Choix du faciès
- 4. Premiers tests**
5. Conclusions

Premiers tests

Premiers tests : utilisation de données de la littérature (attention, les proportions des minéraux réels ne sont pas toujours justes et/ou précises)

- Premier exemple : **Brunsmann et al. (2000)**; 16 amphibolites
- La norme ne calcule pas l'anorthite, mais surestime le clinozoïsite.

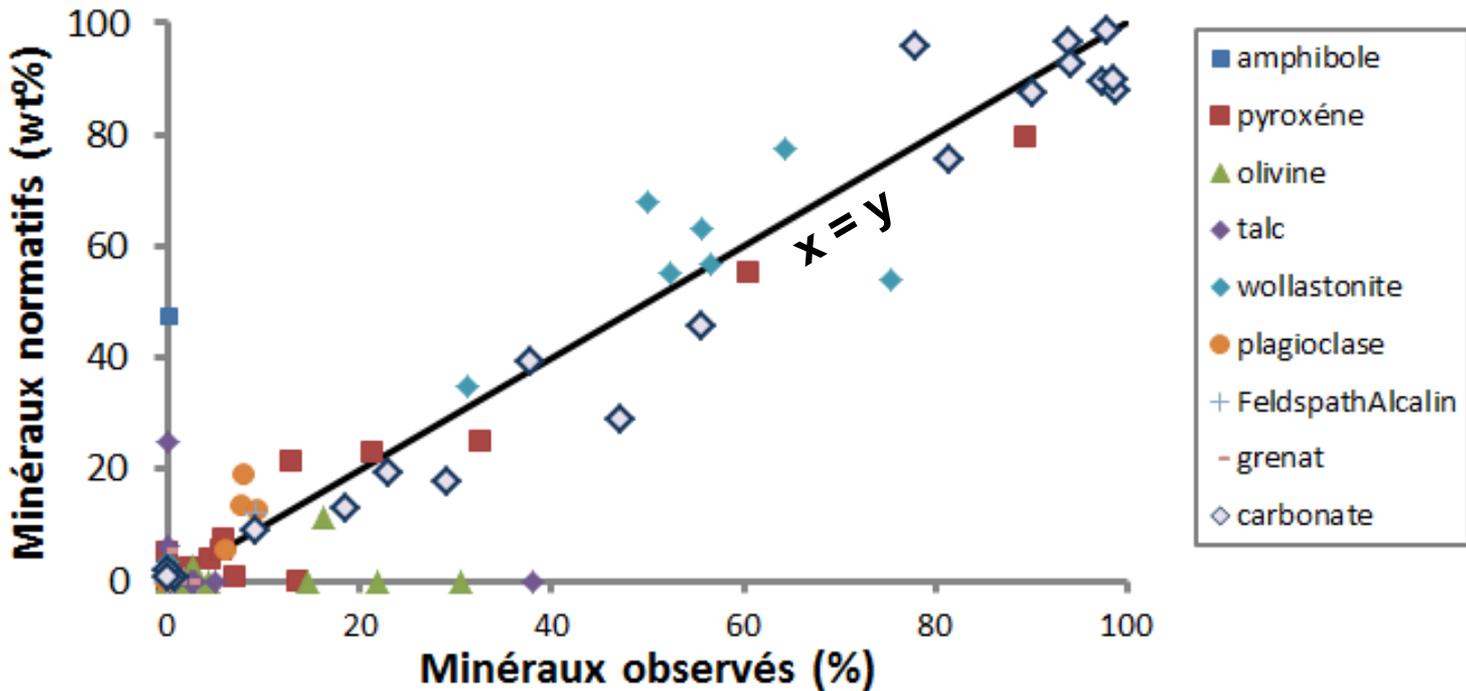


Faciès 7AMP500 (7 kbars et 500 C), CO₂ normatif, Fe²⁺-Fe³⁺ (méthode de Le Maître -volcanique)

Premiers tests

Davis et Ferry (1993): 19 marbres et amphibolites

- Bonne estimation, sauf pour quelques phases mineures (cf. olivine versus talc).

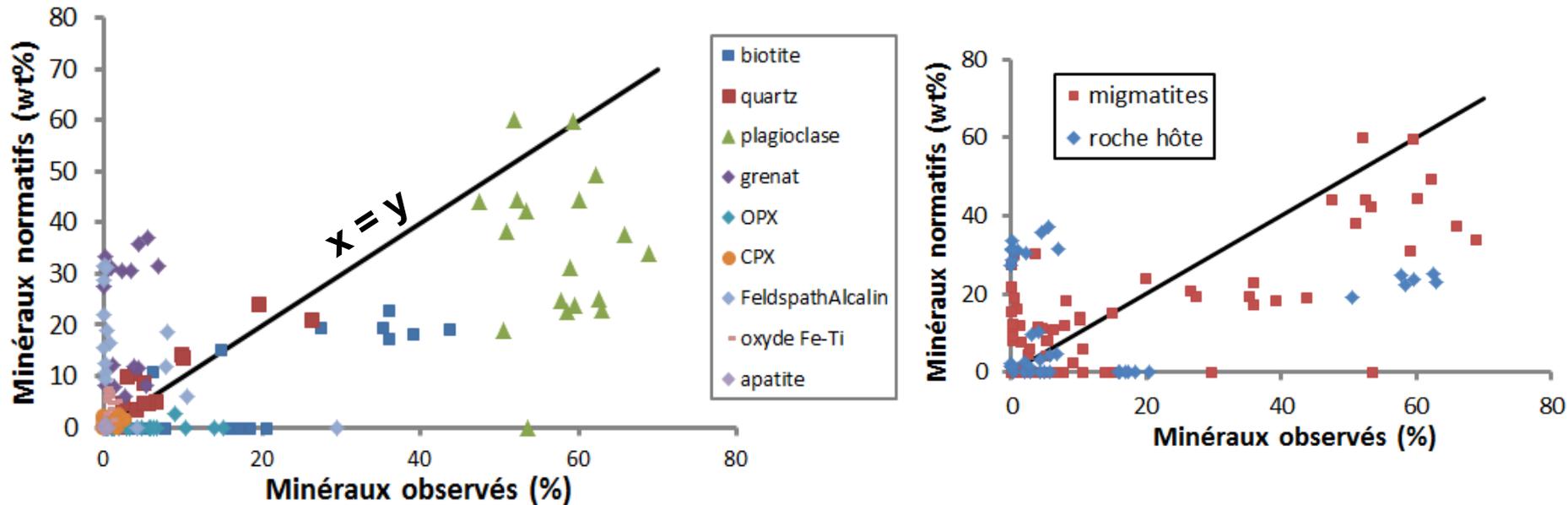


Faciès 3AMP675 (3 kbars et 675 C), CO₂ normatif, Fe₂O₃/Fe₂O_{3T} = 0.2

Premiers tests

Hansen et Stuk (1993): 19 méta-basites et méta-pélites

- Mélanosomes et leucosomes bien estimés (faciès granulitique).
- Roche hôte mal calculée: elle contient des amphiboles et serait sans doute mieux reproduite avec un faciès de plus faible grade (amphibolite?).

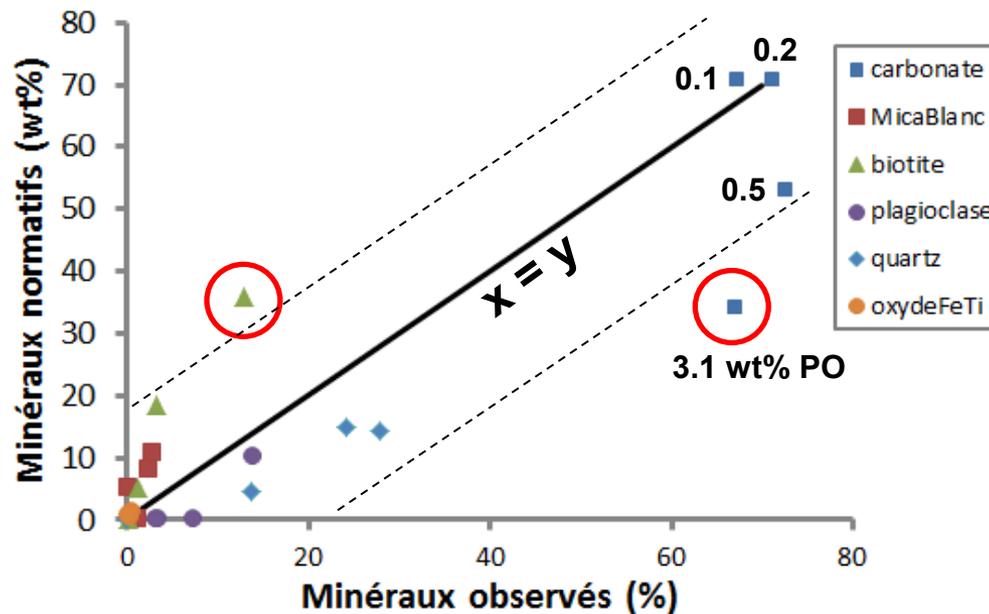


Faciès 6GRA750 (6 kbars et 750 C), PAF non analysée, $Fe_2O_3/Fe_2O_3T = 0.2$

Premiers tests

Evans et Bickle (2005): 4 limestones

- Une roche pose problème car CO₂ a été estimé de façon normative et S n'a pas été dosé alors que cette roche contient 3 wt% de pyrrhotine : sans S analysé, pas de PO calculée, trop de biotite calculée, donc trop de H₂O requis et plus assez de CO₂ restant pour faire des carbonates.



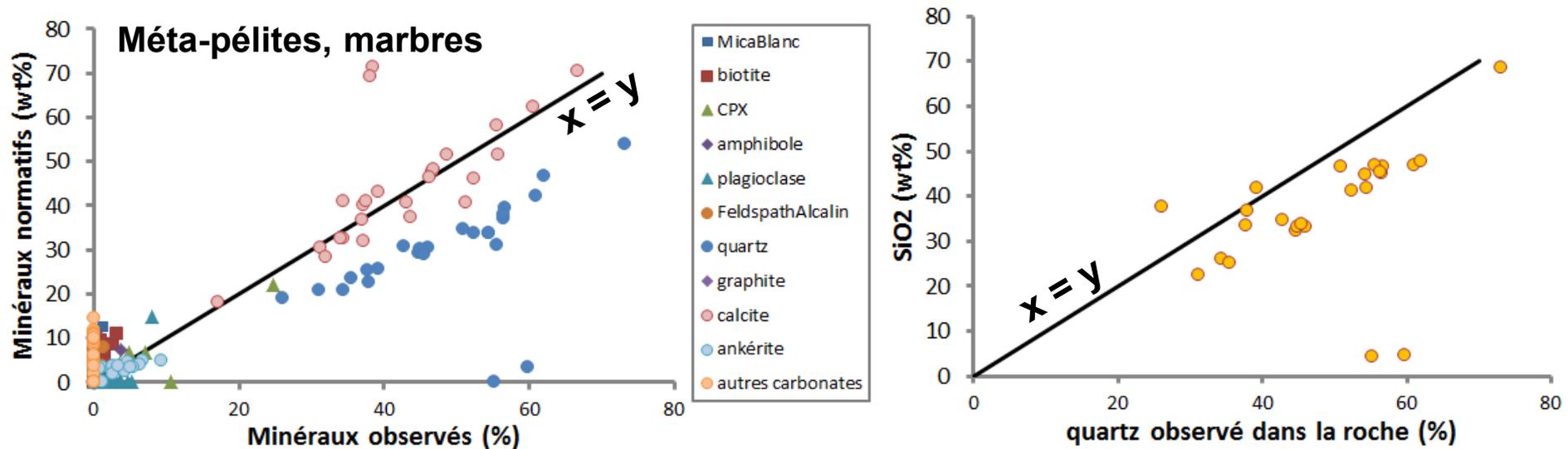
Faciès 6AMP600 (6 kbars et 600 C), CO₂ normatif, Fe₂O₃ et FeO mesurés.

Premiers tests

Leger et Ferry (1993): 25 méta-pélites et marbres

Hirsch et Carlson (2006): 2 schistes à biotite et grenat

- Bonne estimation des carbonates et des micas. Le quartz est rarement un problème.
- Roches pour lesquelles de nombreux faciès conviennent: il est très difficile de restreindre la P-T du pic du métamorphisme avec ce type de roches.



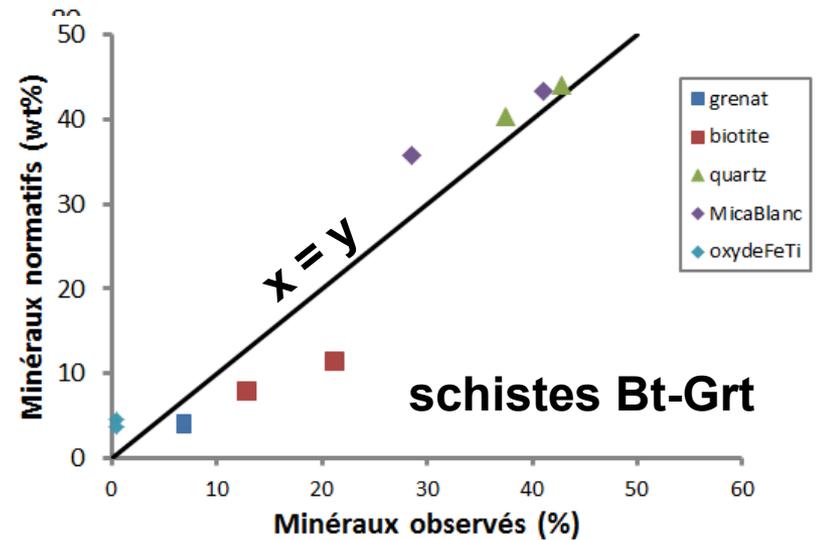
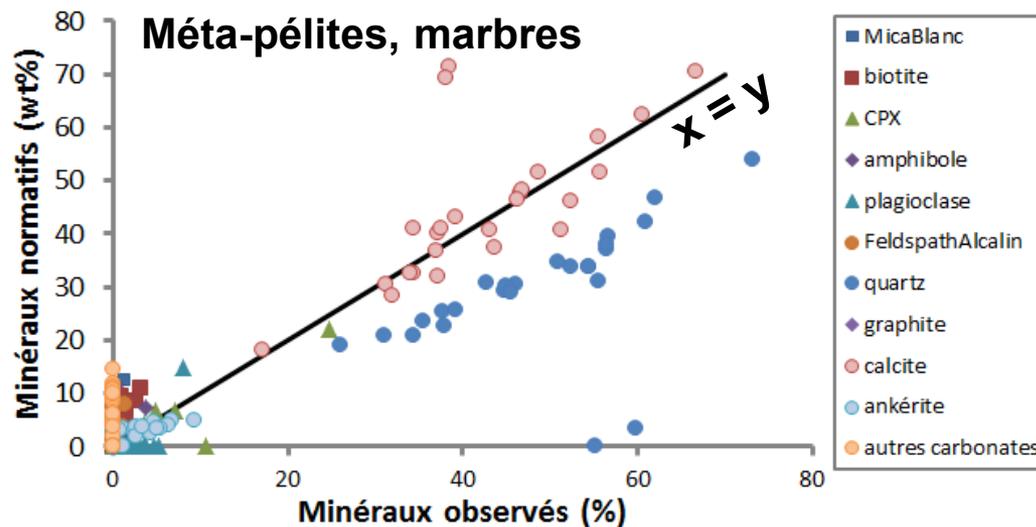
Faciès 6AMP600 (6 kbars et 600 C), CO₂ normatif, Fe₂O₃/Fe₂O_{3T} = 0.2

Premiers tests

Leger et Ferry (1993): 25 méta-pélites et marbres

Hirsch et Carlson (2006): 2 schistes à biotite et grenat

- Bonne estimation des carbonates et des micas. Le quartz est rarement un problème.
- Roches pour lesquelles de nombreux faciès conviennent: il est très difficile de restreindre la P-T du pic du métamorphisme avec ce type de roches.



Faciès 6AMP600 (6 kbars et 600 C), CO₂ normatif, Fe₂O₃/Fe₂O_{3T} = 0.2

Sommaire

1. Problématique et objectifs
2. Norme HautGrade
3. Choix du faciès
4. Premiers tests
- 5. Conclusions**

Conclusions

Analyses chimiques

Roche	SiO2	Al2O3	CaO	FeO	MgO	MnO	TiO2
I	43	0.05	0.1	0.43	57.7	0.4	0.07
II	42.4	0.03	0.11	0.71	57.7	0.34	0.03

**Bilans de masse
(précurseurs uniques)**

**Bilans de masse
(précurseurs modélisés)**

Norme Consorem

**Nombreux moyens
disponibles pour
exploiter ces données**

Norme HautGrade

Indices, volatils normatifs

**Développer des méthodes
permettant d'exploiter ces
données**

Remerciements:

S. Trépanier – Virginia

Merci de votre attention