

## Conférence du 17 février 2015 - UQAM

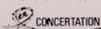
# Nouveaux calculs normatifs et indices d'altération pour les roches de bas et haut grades métamorphiques

Lucie Mathieu, Ph.D.  
Consorem

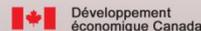
Atelier Consorem



AGNICO EAGLE



URSTM/UQAT



GLENCORE

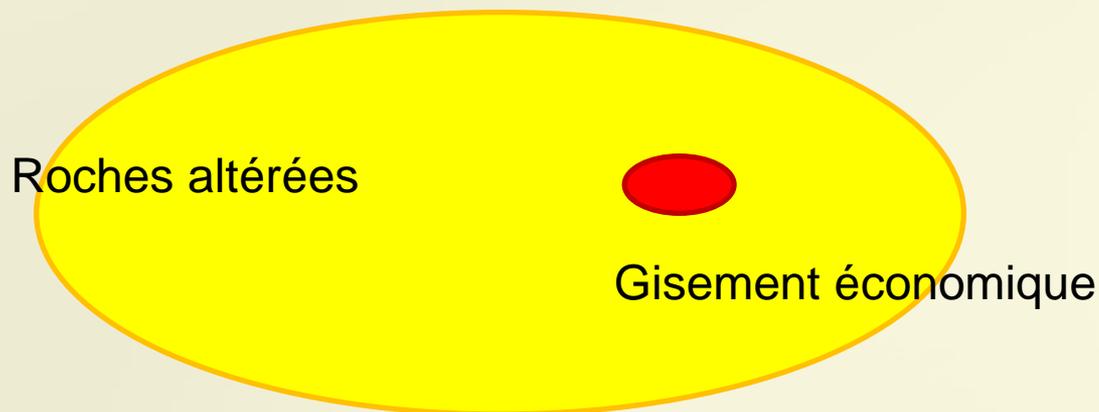


UQAC

UQAM

- **Problématique** : altérations hydrothermales

- « Footprint » des gisements formés par des processus hydrothermaux.
- Les outils nécessaires à l'exploration servent à identifier, classer et quantifier l'altération :
  - Identifier : position des roches altérées?
  - Classer : altération Fe, Mg, Ca, K, Na, Si, C ou H?
  - Quantifier : intensité?



**Altération ( $\Delta$  minéral)**

**Métasomatisme ( $\Delta$  chimique)**

- **Altération hydrothermale : les outils**

- **Indices** : rapports d'éléments majeurs
- **Diagrammes binaires** : pour visualiser les indices
  
- **Bilans de masse par précurseurs uniques** (Grant, 1986)
- **Bilans de masse par précurseurs multiples** (Gaboury, 2001)
- **Bilans de masse par précurseurs modélisés** (Trépanier, 2009, 2012)
- **Et bien d'autres ...**
  
- **Méthode PER** (Pearce Element Ratios ; Pearce, 1968) appliquée aux altérations hydrothermales (cf. Stanley et Madeisky, 1994)
  
- **Indices** d'altérations utilisant des rapports de minéraux normatifs
  - **NORMAT** (Piché et Jébrak, 2004)
  - Norme Consorem Bas Grade ou **CONSONORM\_LG** (Trépanier, 2011)
  - Norme Consorem Haut Grade ou **CONSONORM\_HG** (Mathieu, 2014)

**Indices** : comparent des proportions de minéraux d'altération à des proportions de minéraux « frais ».

cf. orthose vs muscovite

**Indices utilisant les éléments majeurs** : reproduisent mal les minéraux réels.

**Normes** : en prédisant les minéraux, permettent de proposer des indices plus fiables.

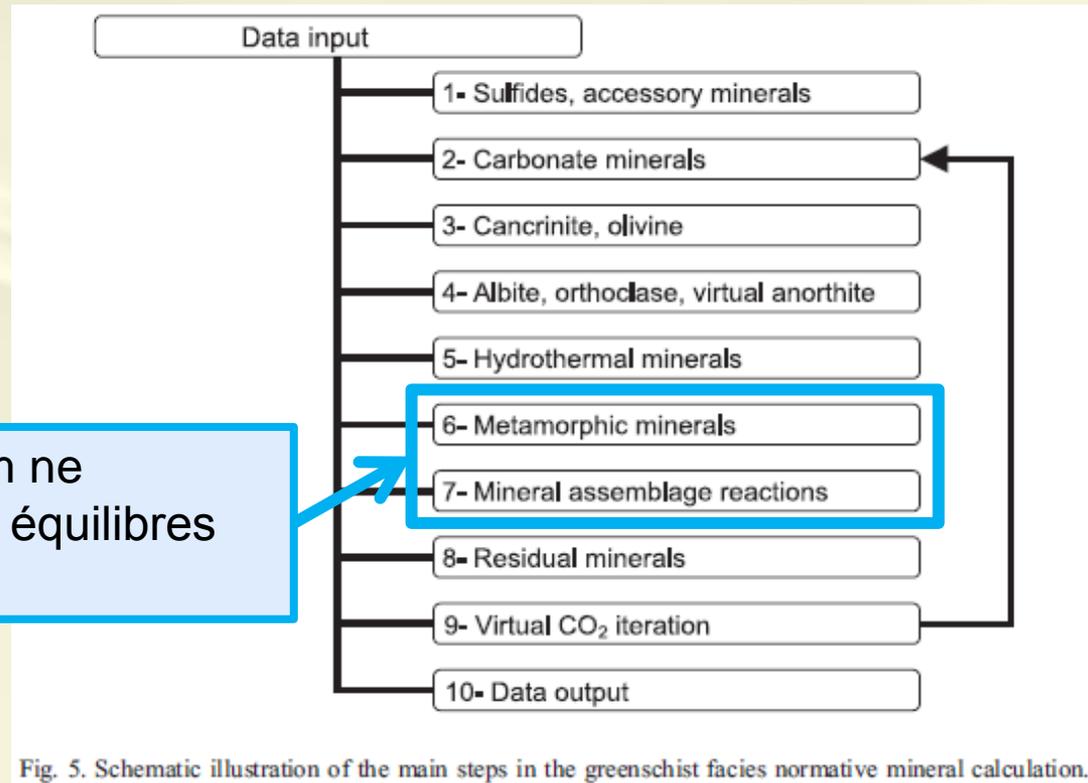
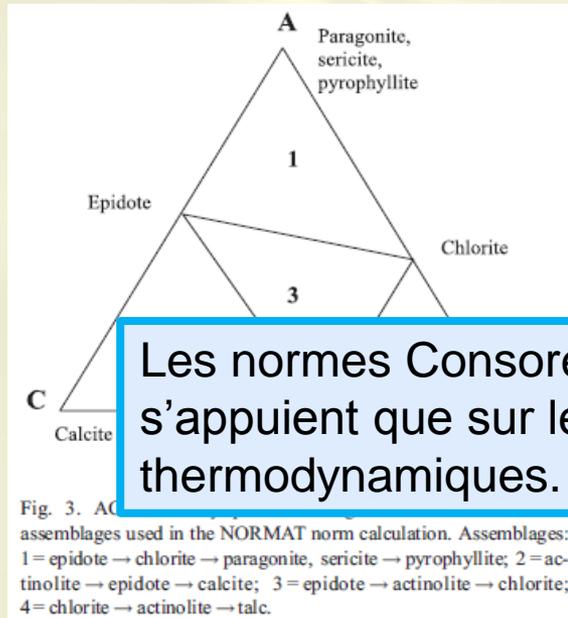
Les normes sont l'outil qui permet l'usage d'indices.

**Difficulté** : l'altération crée des roches métamorphiques (cf. faciès de bas grades au minimum).

Les normes disponibles ne sont applicables qu'aux roches ignées (**CIPW**; *Cross et al., 1902, 1912*) et aux roches sédimentaires (cf. *Cohen et Ward, 1991*).

Solutions pour les roches métamorphiques : **NORMAT** (*Piché et Jébrak, 2004*), norme Consorem Bas Grade (*Trépanier, 2012*), étendue par la suite à Haut Grade (*Mathieu, 2014*).

- **NORMAT** (*Piché et Jébrak, 2004*)



- **Les normes Consorem utilisent les innovations suivantes :**

- Calcul normatif du CO<sub>2</sub>, par itérations (*Piché et Jébrak, 2004*) – cf. **NORMAT**
- Calcul séquentiel (*Cross et al., 1902, 1912*) et simultané des minéraux (*Pruseth, 2009*) – cf. normes **CIPW, Matnorm**
- Utilisation de tétraèdres métamorphiques (*Barth, 1959*) – cf. **Mesonorm**

# CALCULS NORMATIFS

# Les principes qui rendent le calcul normatif possible pour les roches métamorphiques

## 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.

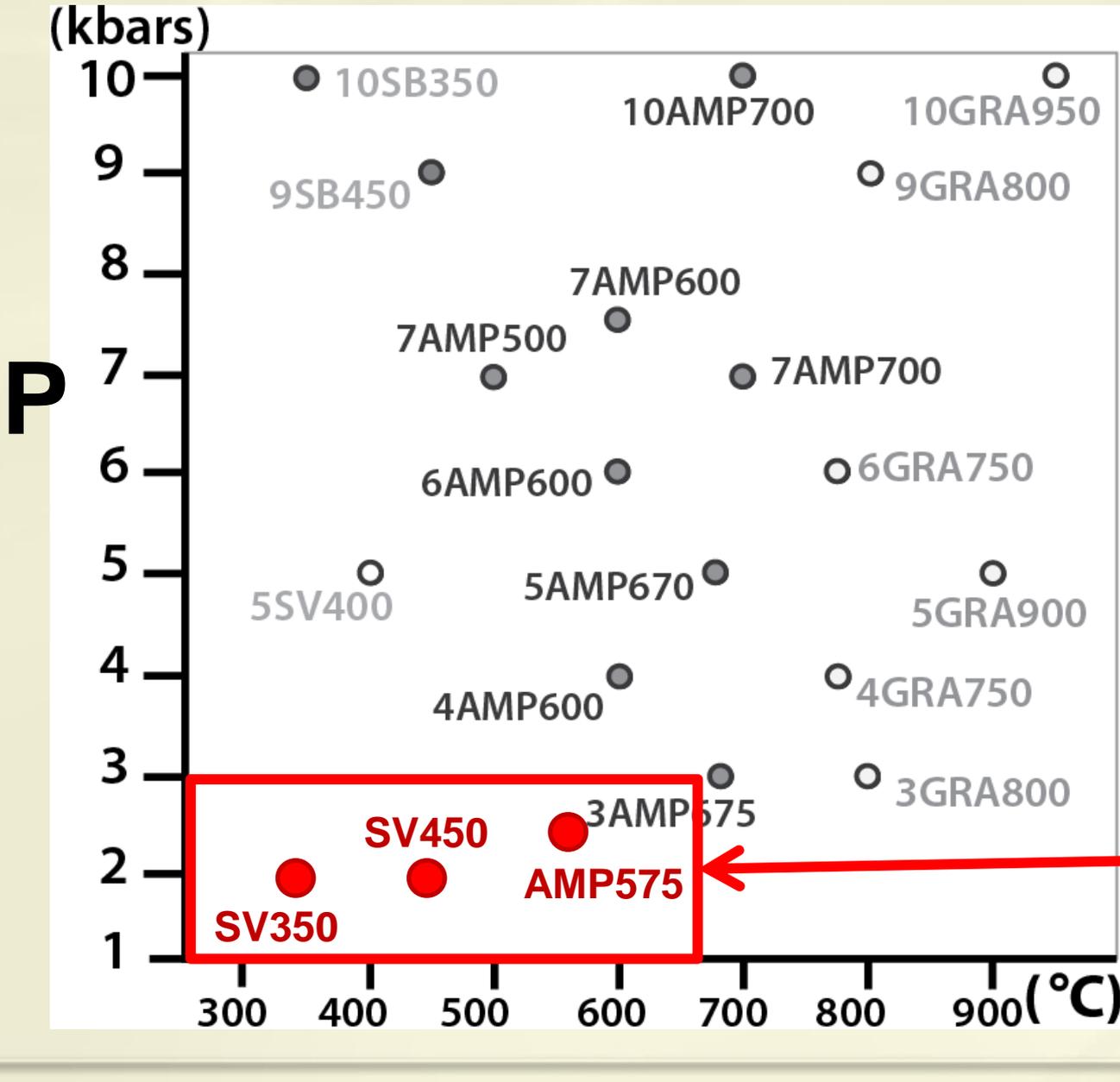
- Exceptions cependant au principe d'isochimie :
  - La perte des **fluides** (H, C, S) peut faire perdre des informations sur l'événement hydrothermal.
  - **Majeurs** : mouvements < cm. Attention à la taille des échantillons.
  - Les **migmatites** sont des roches difficiles à travailler, même lorsque 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 Bas Grade 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 Haut Grade.



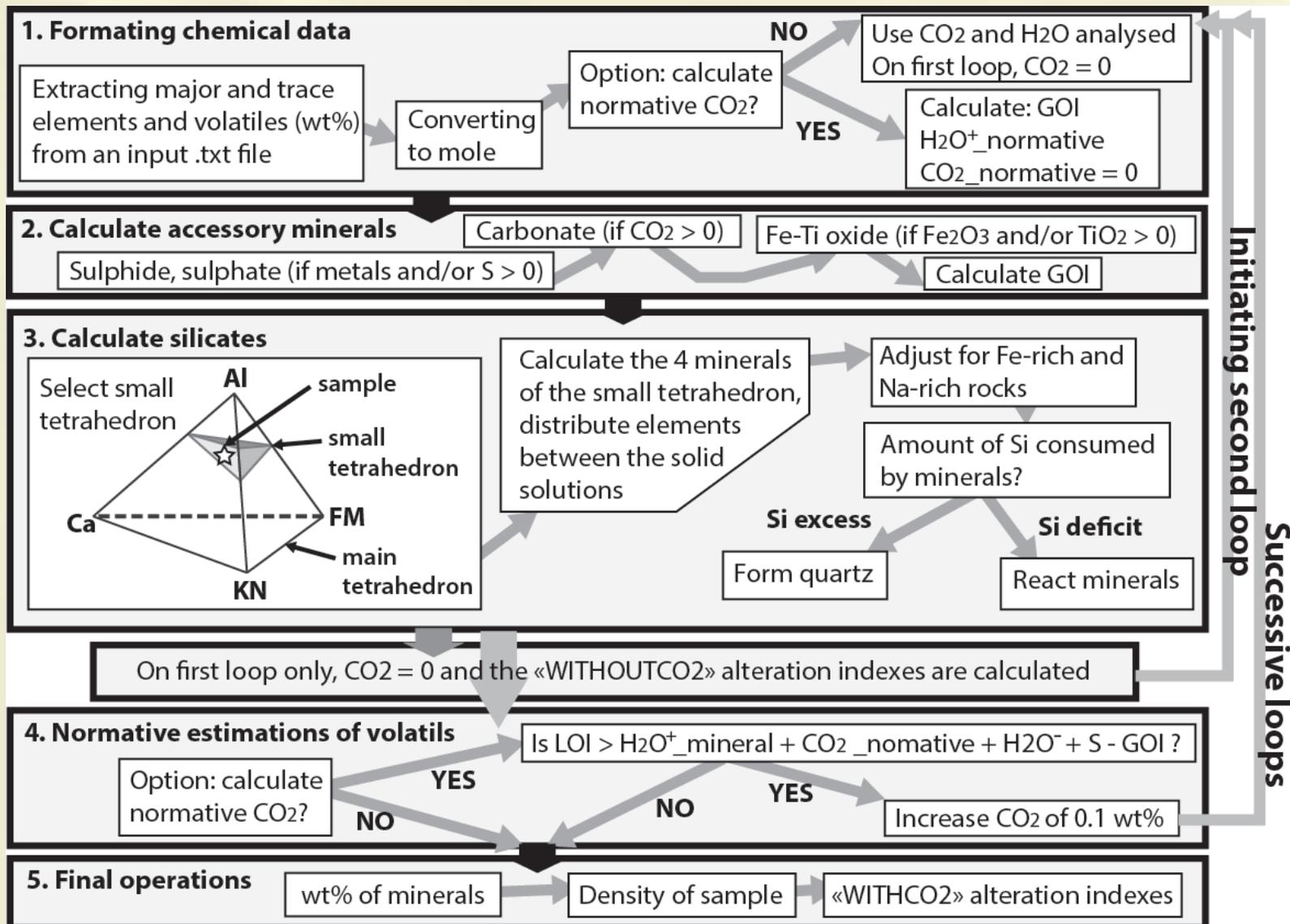
**Perple\_X**



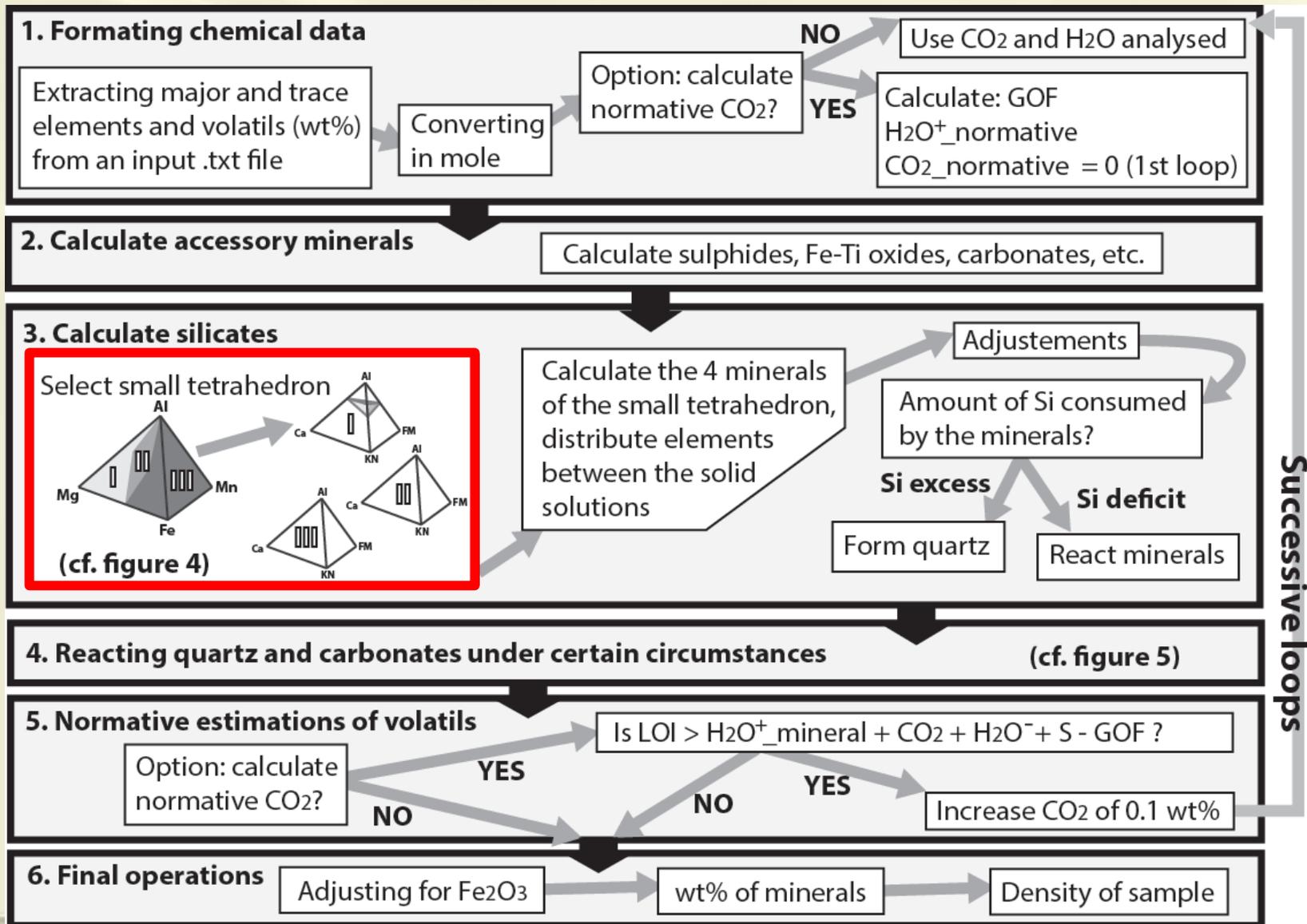
**Norme Haut Grade :**  
 modélise les  
 paragenèses pour 17  
 conditions P-T (cf. 17  
 « faciès »).

**Norme Bas Grade :**  
 modélise les  
 paragenèses pour 3  
 conditions P-T.

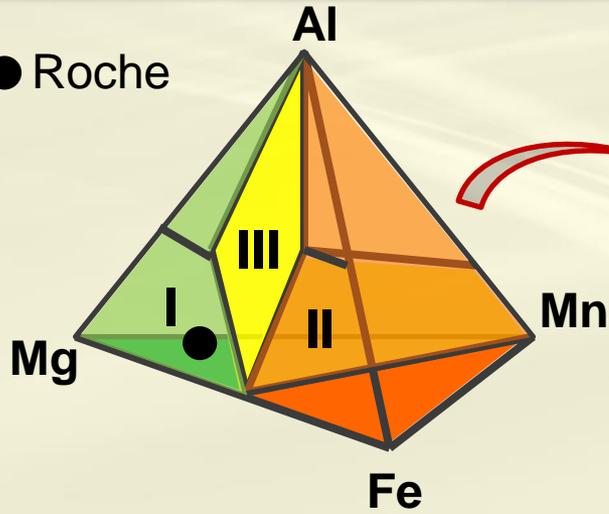
# Séquence de calcul de la norme Consorem Bas Grade (Trépanier, 2011)



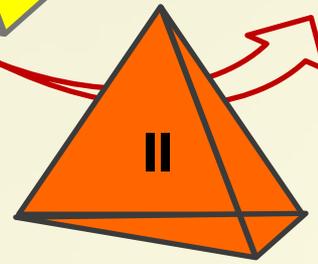
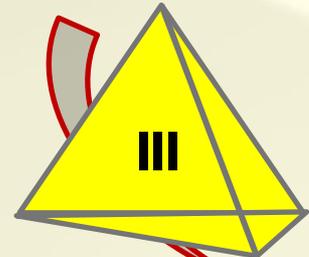
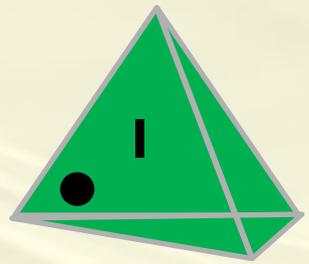
# Séquence de calcul de la norme Consorem Haut Grade (Mathieu, 2014)



● Roche



**Tétraèdre Al-Fe-Mg-Mn**

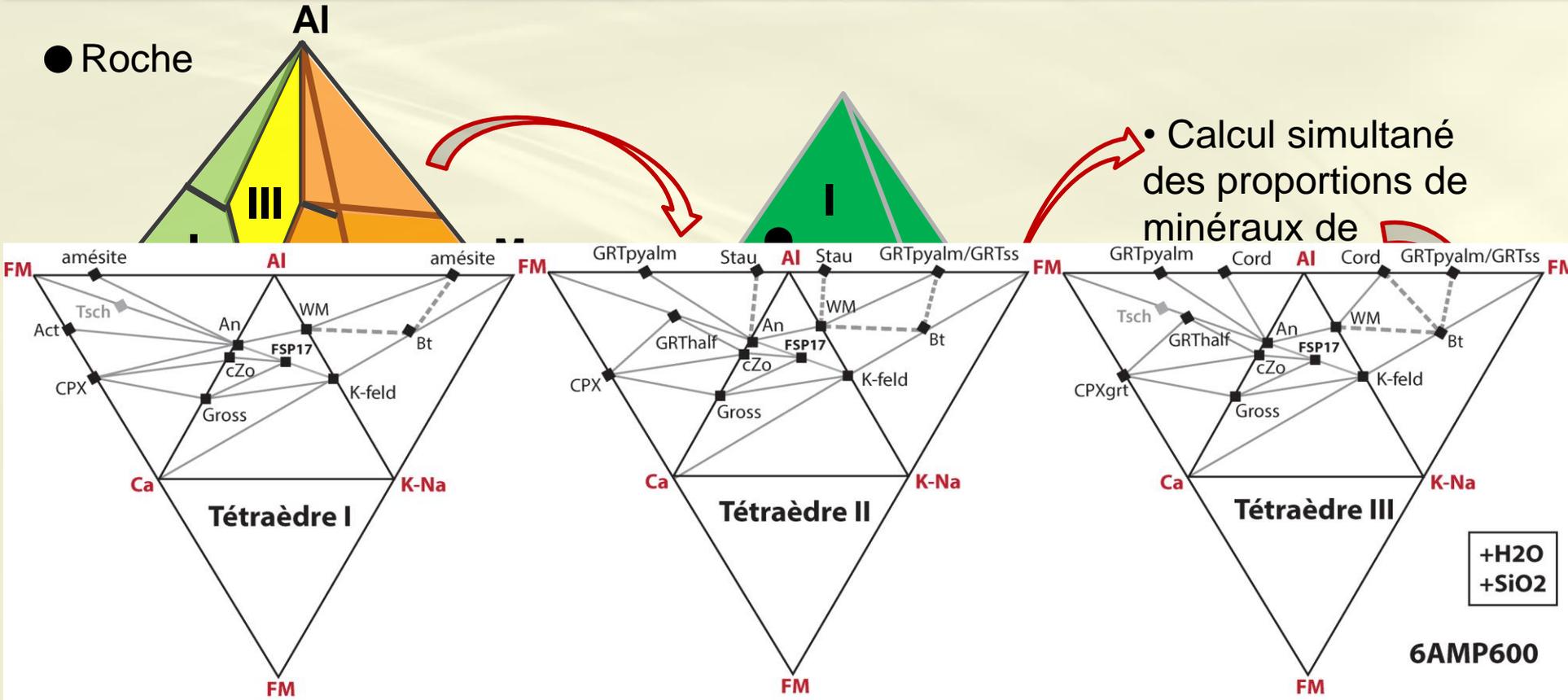


**Tétraèdres Al-Ca-FM-KN**

- 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.

● Roche



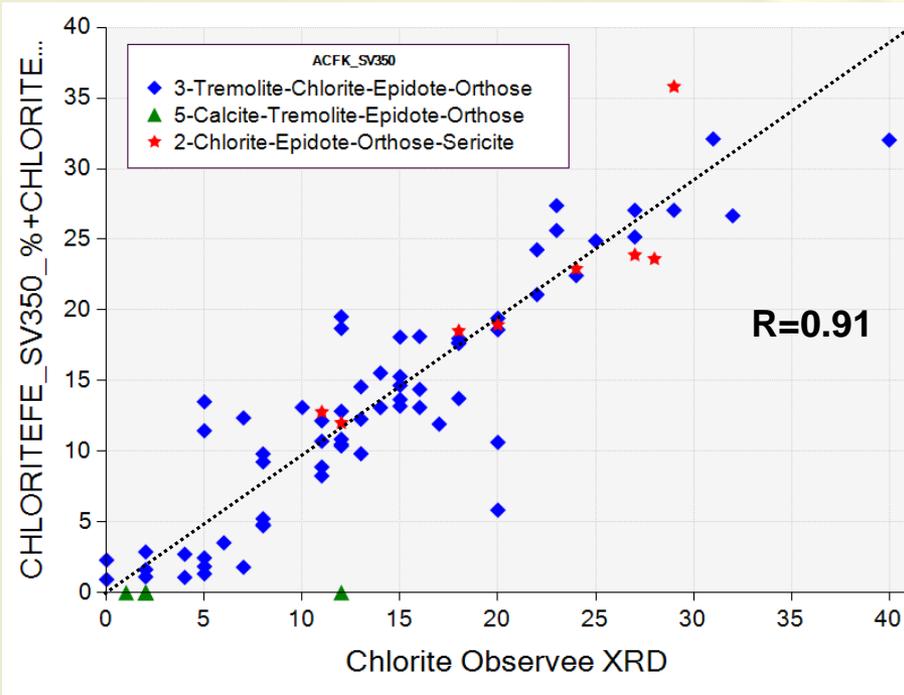
## Tétraèdres Al-Ca-FM-KN

- 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.

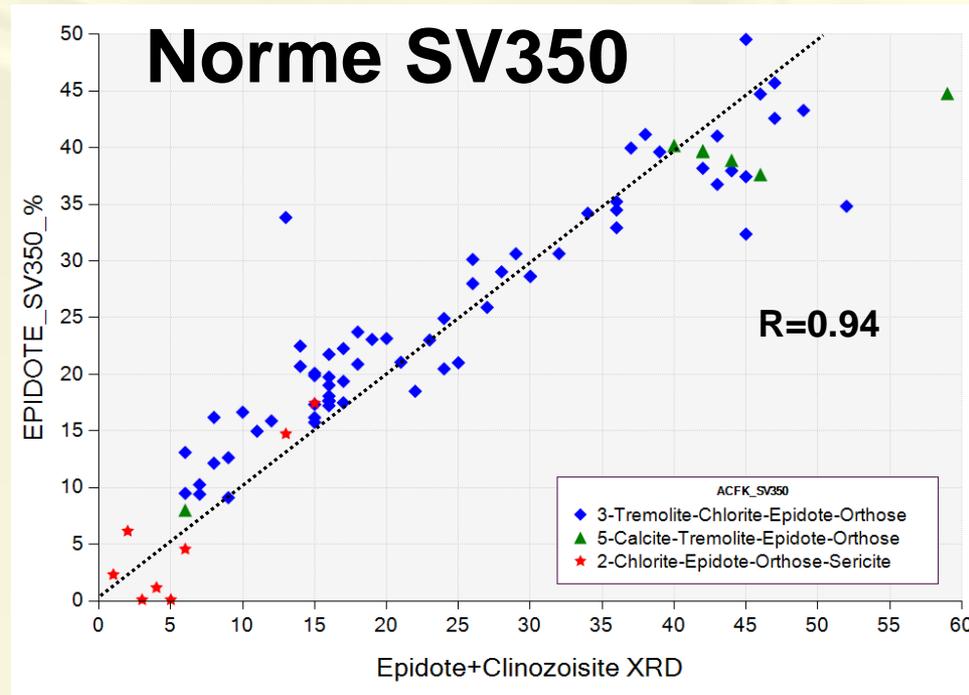
# VALIDER les NORMES

# Exemple 1 : altération de basaltes andésitiques, gabbros, volc. felsiques en contexte SMV, ceinture de Flin-Flon, Manitoba

Minéralogie quantitative mesurée par diffraction-X



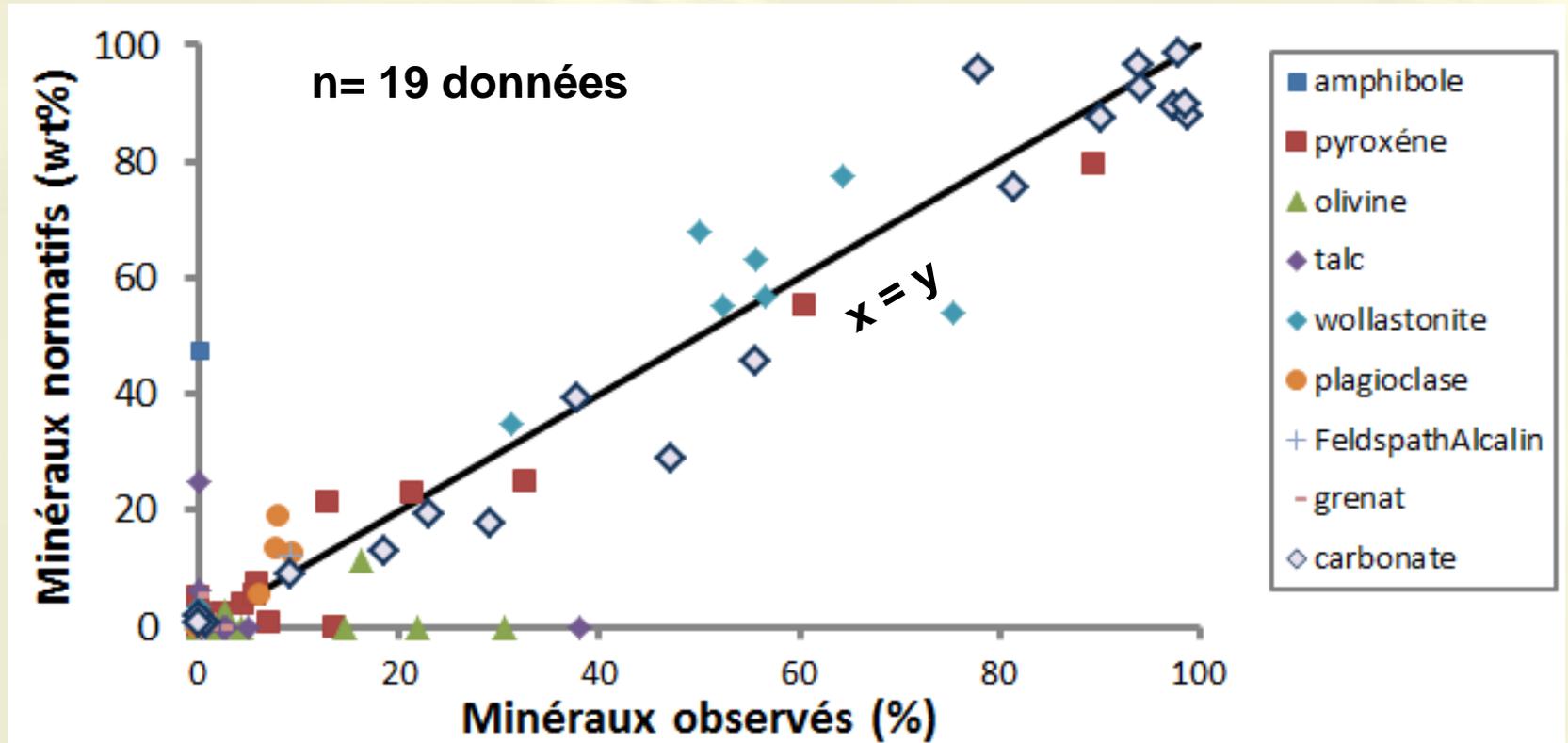
Chlorite mesurée par diffraction X vs chlorite normative 350C.



Épidote+Clinzoïsité mesurées par diffraction X vs épidote normative 350C.

(exemple repris de Trépanier, 2011)

## Exemple 2 : paragenèses de marbres et d'amphibolites (données de Davis et Ferry, 1993)



Faciès 3AMP675 (3 kbars et 675 C), CO<sub>2</sub> normatif, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Fe<sub>2</sub>O<sub>3T</sub> = 0,2

## Exemple 3 : base de données de l'Abitibi (SIGEOM et partenaires du Consorem)

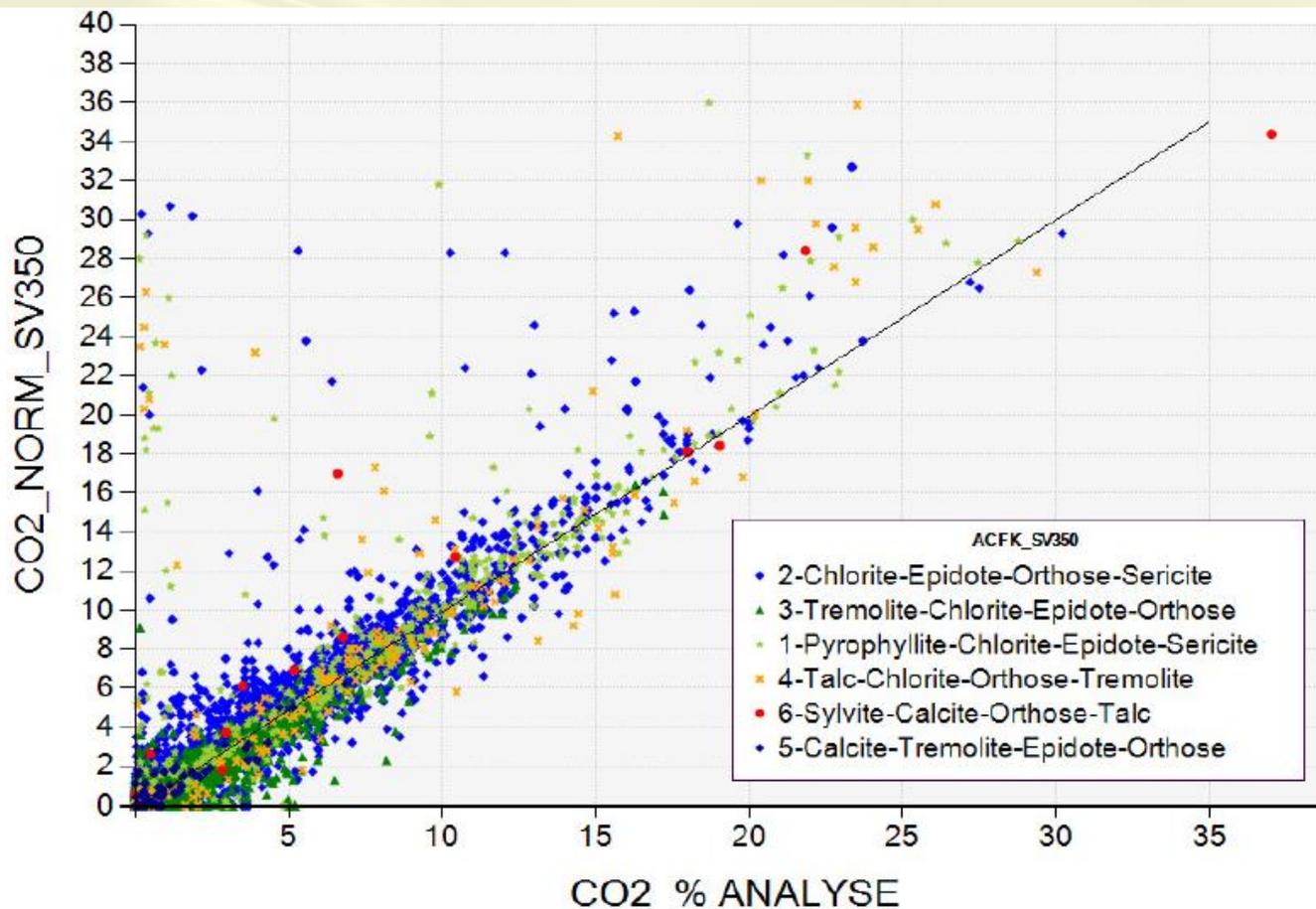
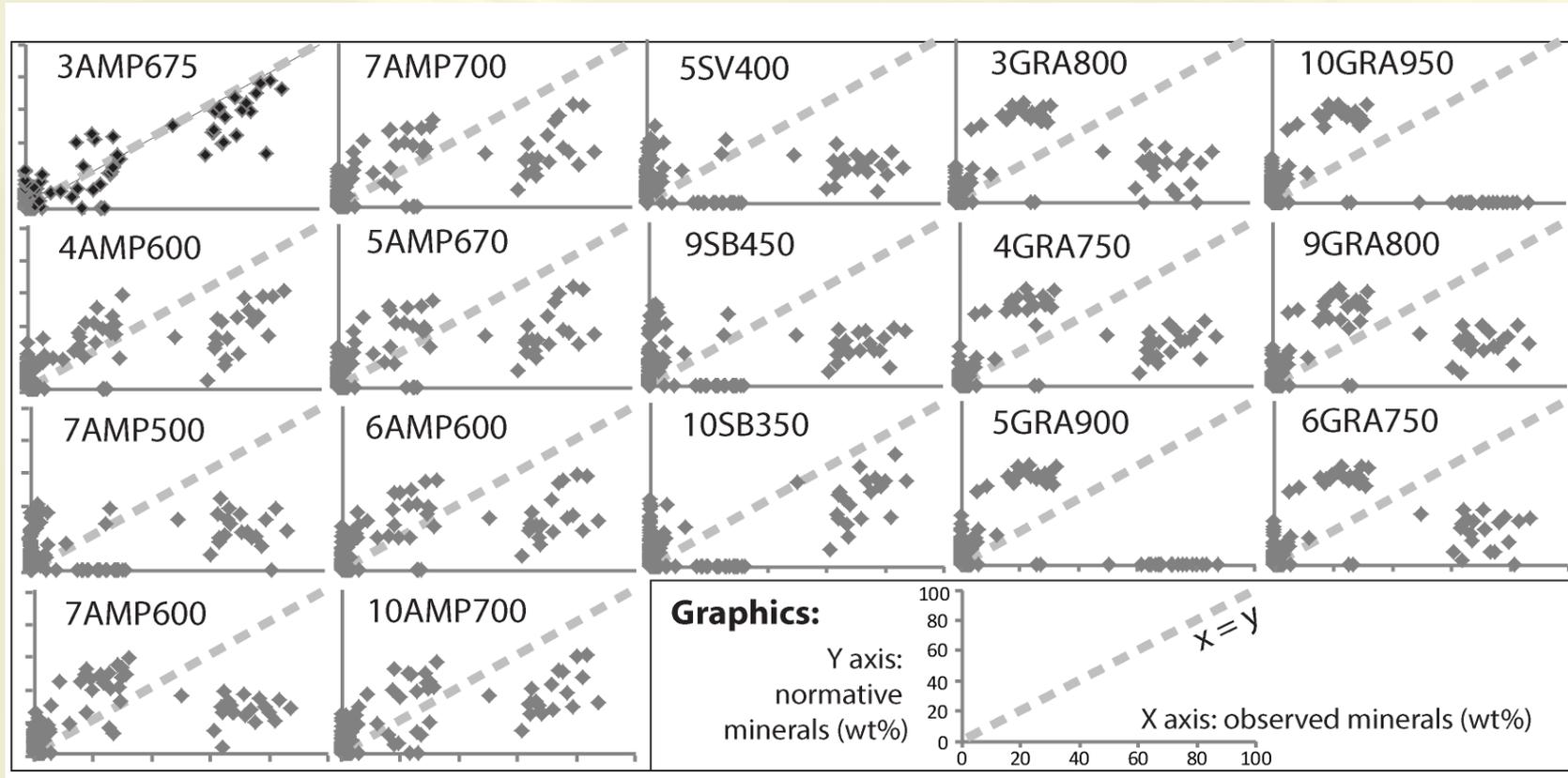


Figure 55. Comparaison entre le CO<sub>2</sub> analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO<sub>2</sub> analysé (n=7151).

(exemple repris de Trépanier, 2011)

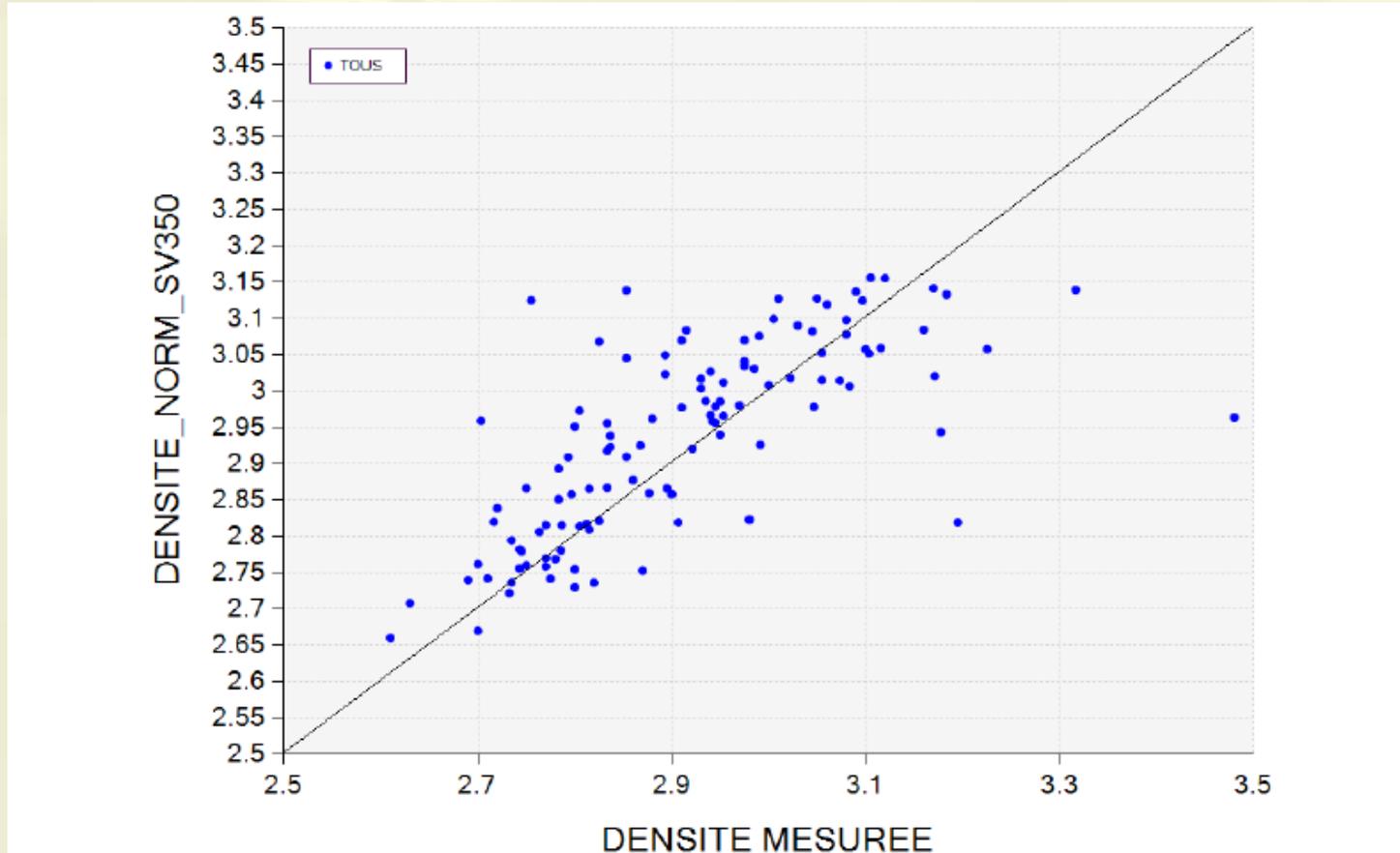
## Exemple 4 : norme Haut Grade utilisée pour contraindre (approximativement) les conditions du pic du métamorphisme

%  
 minéraux  
 calculés  
 par les  
 17 faciès  
 de la  
 norme  
 Haut  
 Grade



% minéraux observés par Barros Gomes et al. (1964) (amphibolites)

## Exemple 5 : secteur Bracemac (densités mesurées par atténuation gamma ; Ross et al., 2011)



**Figure 64. Comparaison entre densité mesurée et calculée (norme SV350), secteur Bracemac (n= 111).**

(exemple repris de Trépanier, 2011)

# **CALCULER des INDICES d'ALTÉRATION à partir des MINÉRAUX NORMATIFS**

## Indices d'altération de la norme Consorem Bas Grade (Trépanier, 2011)

Altération en **chlorite**

- ALT\_CHLO

**Séricitisation**

- ALT\_SER

Altération en **paragonite**

- ALT\_PARA

Altération **pyrophyllite**

- ALT\_PYRO

Altération en **phyllosilicates**

- ALT\_PHYLLO

Indice **Chlorite – Calcite – Talc**

- altération orogénique distale
- ALT\_CHL\_CC\_TLC

Indice **Séricite – Carbonates** Ca-Mg-Fe

- altération orogénique proximale
- ALT\_SER\_CARBS

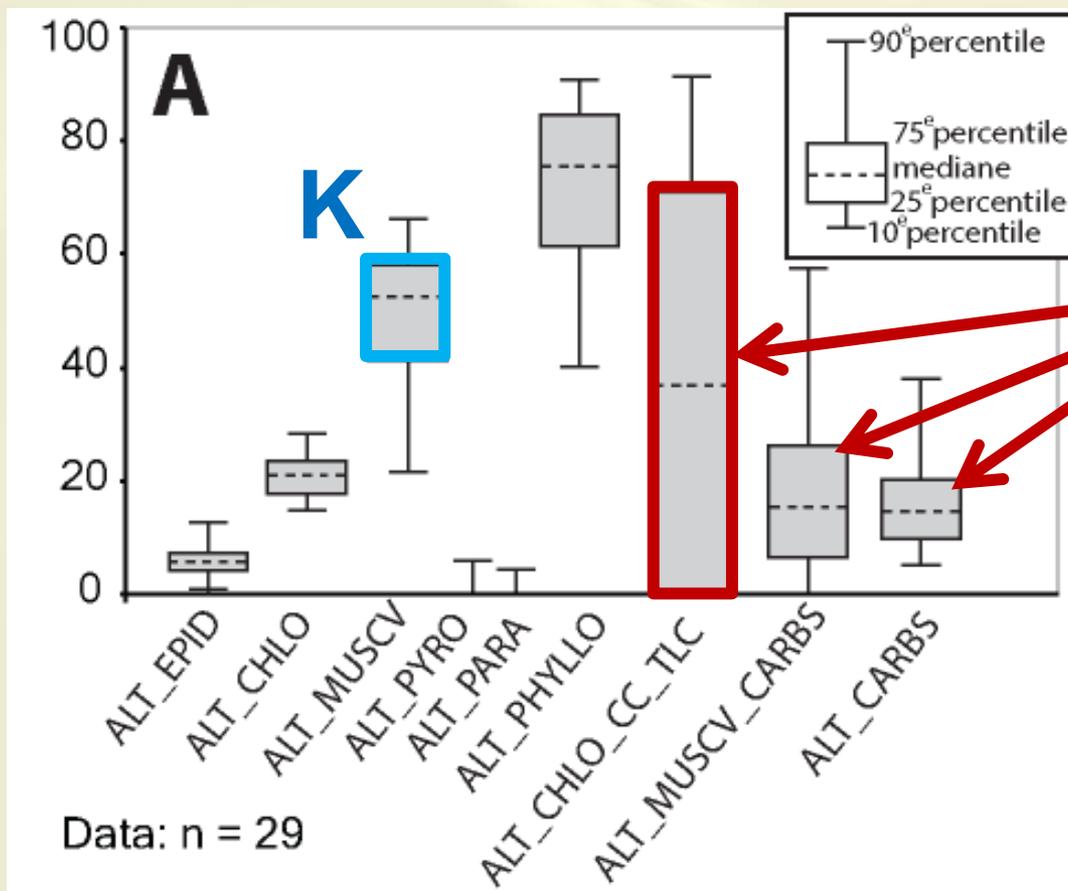
Indice **Carbonates**

- ALT\_CARBS

**Avantages sur les bilans de masse :**

- Utilise l'analyse des majeurs
- CARBONATATION très bien prédite

## Exemple 1 : gisement d'or de Touquoy, Nouvelle-Écosse ; altération de méta-siltstones (CO<sub>2</sub> et K)



## Norme SV350

**CO<sub>2</sub>**  
(carbonates,  
chlorite, muscovite)

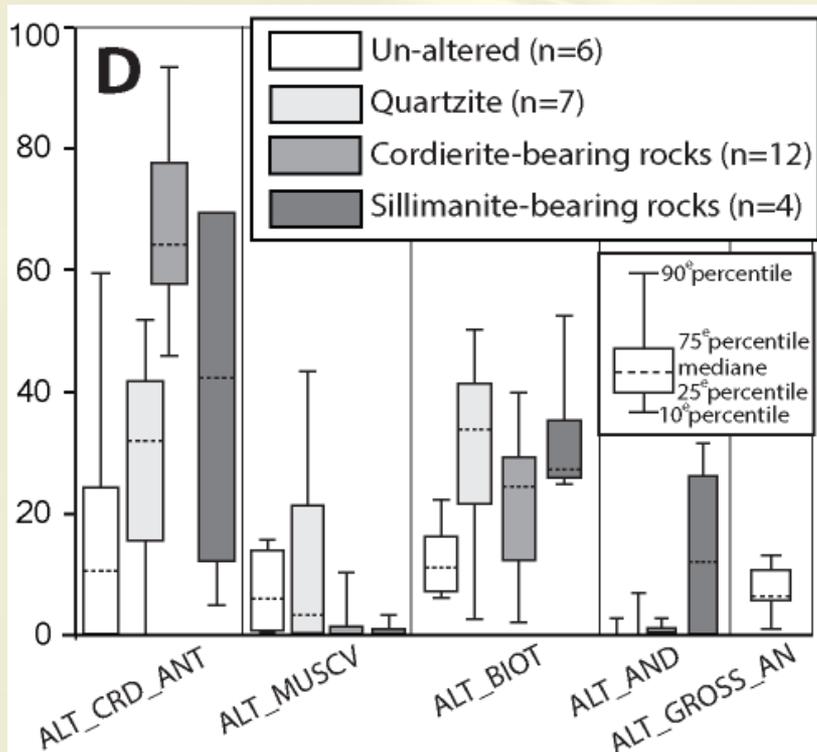
épidote + actinote + CO<sub>2</sub> -->  
chlorite + calcite + quartz

albite + chlorite + calcite -->  
muscovite + ankérite

(Kishida et Kerrich, 1987)

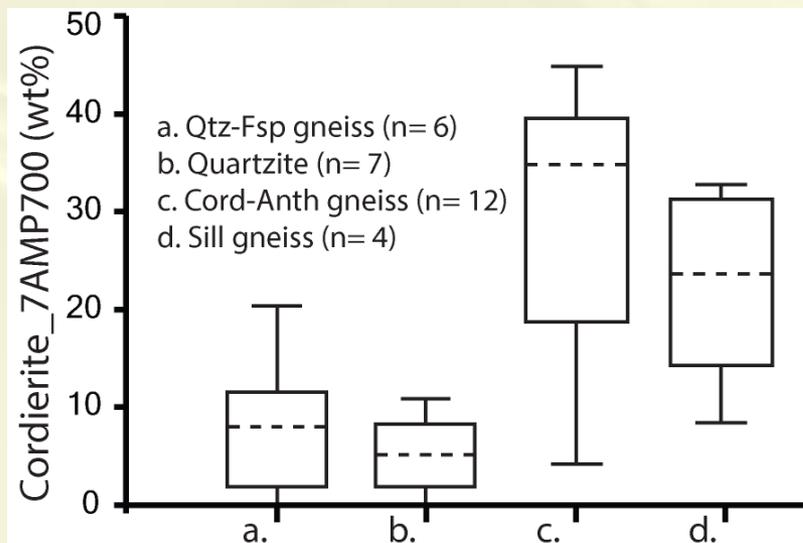
Données : Bierlein et Smith (2003)

## Exemple 2 : VMS de Montauban, Grenville, Québec



## Norme AMP575

## Norme 7AMP700



Altération Fe-Mg dominante :  
**cordiérite, anthophyllite**

**Biotite** : K provient du précurseur felsique, et pas d'une altération K.

# CONCLUSIONS

## Points forts des bilans de masse (cf. conférence de S. Trépanier)

- Gains/pertes en Na, K, Fe, Mg, Ca, Si
- Calculs très précis
- Gains en Na-K (« albitisation », « altération K », pas la « séricitisation »)

## Points forts des indices dérivés de calculs normatifs

- Altérations Na, K, Fe, Mg, Ca, Si
- Altérations Na-K (acide) : « séricitisation »
- Gains relatifs en Al (« argilisation », etc.)
- Carbonatation
- Quantifie le quartz (cf. « silicification » et son contraire, les pertes de quartz dues à des ajouts de Na, K, Fe, Mg et/ou Ca)

**Conclusions** : méthodes COMPLÉMENTAIRES

# Norme Haut Grade et indices d'altération : à venir (avril 2016)

## Projets Consorem cités

**Projet 2011-04** (S. Trépanier) Norme Lithomodeleur

**Projet 2013-04** (L. Mathieu) Caractéristiques chimiques et minéralogiques des altérations dans les roches de haut grade métamorphique – phase I

[http://www.consorem.ca/rapports\\_publics.html](http://www.consorem.ca/rapports_publics.html)

**Remerciements**

# Merci de votre attention