

Conférence du 2 juin 2015 – Rouyn-Noranda

Quantifier l'altération hydrothermale : l'apport des calculs normatifs

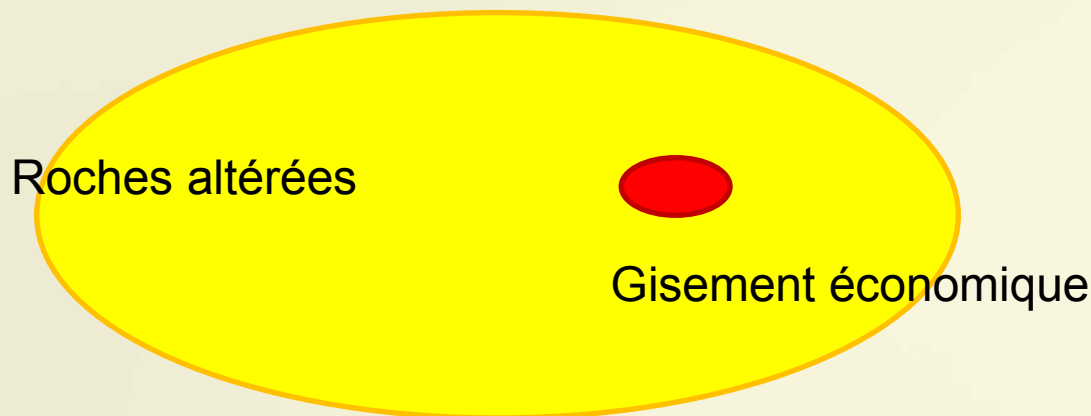
Lucie Mathieu (CONSOREM)
Sylvain Trépanier (Osisko), Réal Daigneault (UQAC)

Forum technologique CONSOREM-DIVEX



- **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 (Δ minéral)

Métasomatisme (Δ 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.

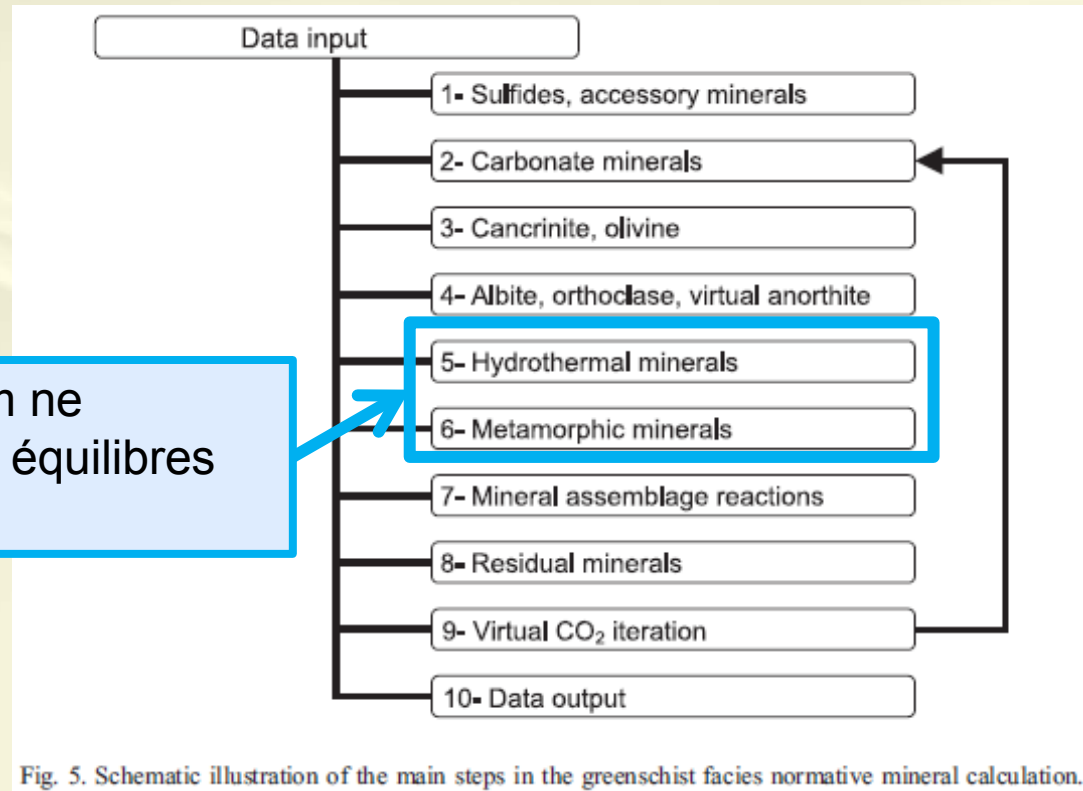
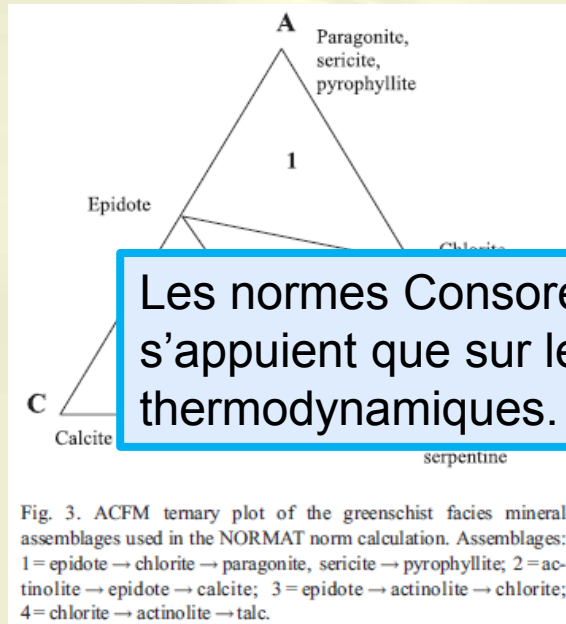
Les normes sont l'outil qui permet l'usage d'indices.

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*), **CONSONORM_LG** (*Trépanier 2012*), étendue par la suite à Haut Grade – **CONSONORM_HG** (*Mathieu 2014*).

- **NORMAT** (*Piché et Jébrak 2004*)



- **Les CONSONORMs utilisent les innovations suivantes :**

- Calcul normatif du CO₂, 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, assemblage

- **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 un assemblage principal, qui représente l'essentiel du volume de la roche. Cet assemblage 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.

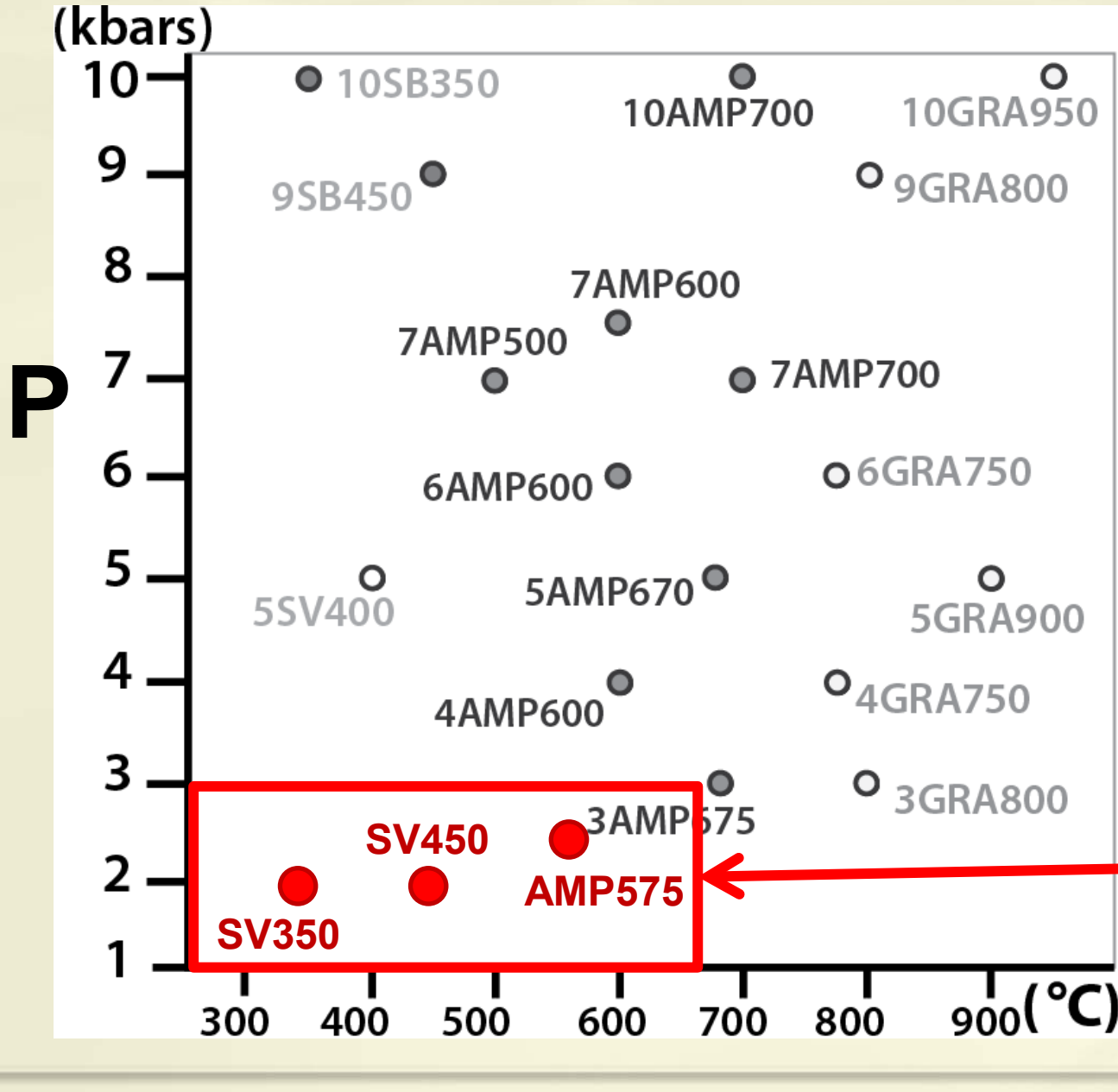
- Exceptions cependant au principe d'isochimie :
 - La perte des **fluides** (H, C, S) peut faire perdre des informations sur l'événement hydrothermal.
 - **Majeurs** : mouvements < cm. Attention à la taille des échantillons.
 - Les **migmatites** sont des roches difficiles à travailler, même lorsque 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 CONSONORMs.
- 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 CONSONORM_LG surtout.
 - **Perple_X** (Connolly) : utilisé avec la hp02ver (Holland et Powell 1998; et améliorations de Connolly) et des modèles de solutions solides. Pour la CONSONORM_HG.



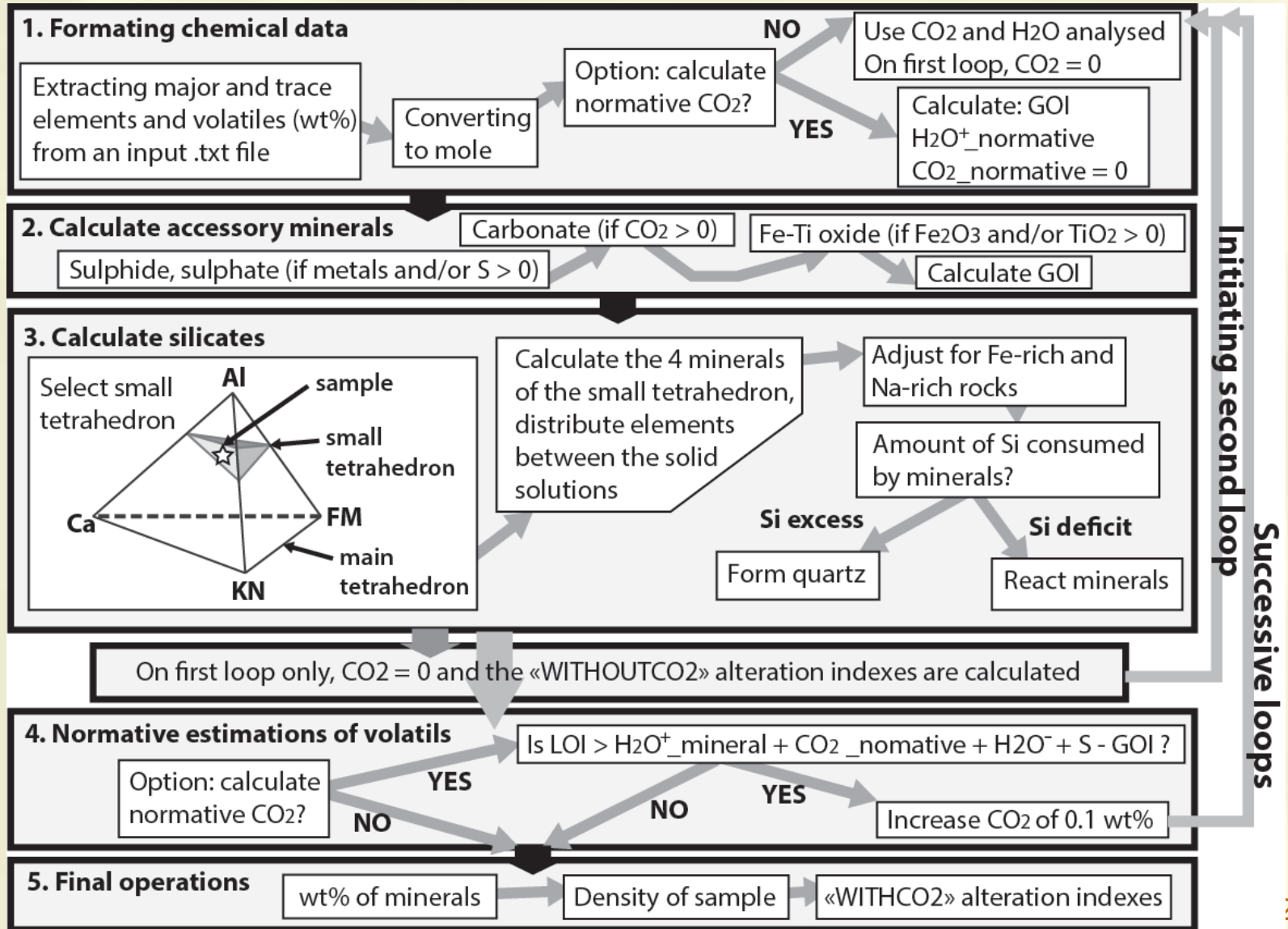
Perple_X



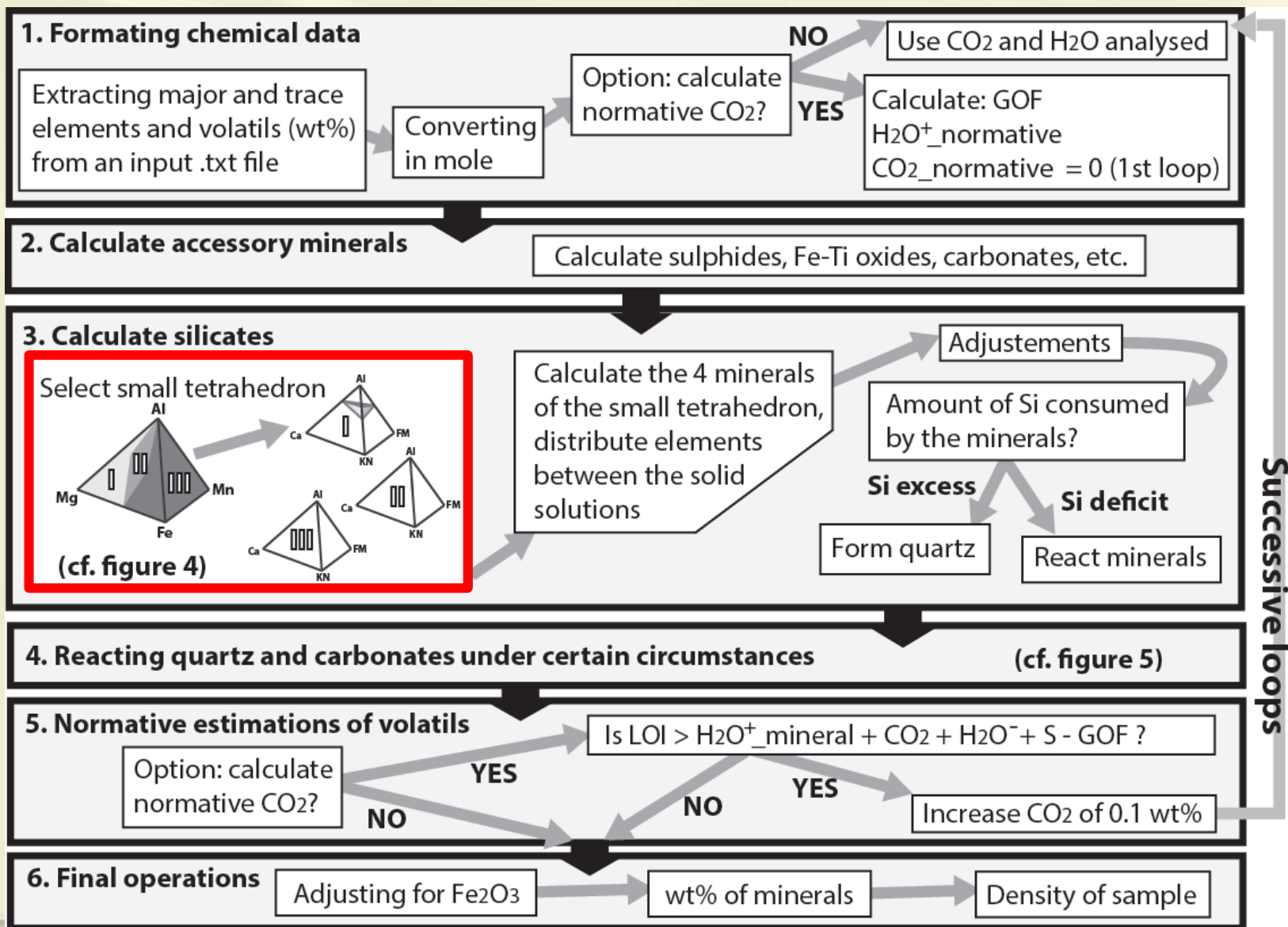
CONSONORM_HG :
modélise les
assemblages pour 17
conditions P-T (cf. 17
« modèle »).

CONSONORM_LG :
modélise les
assemblages pour 3
conditions P-T.

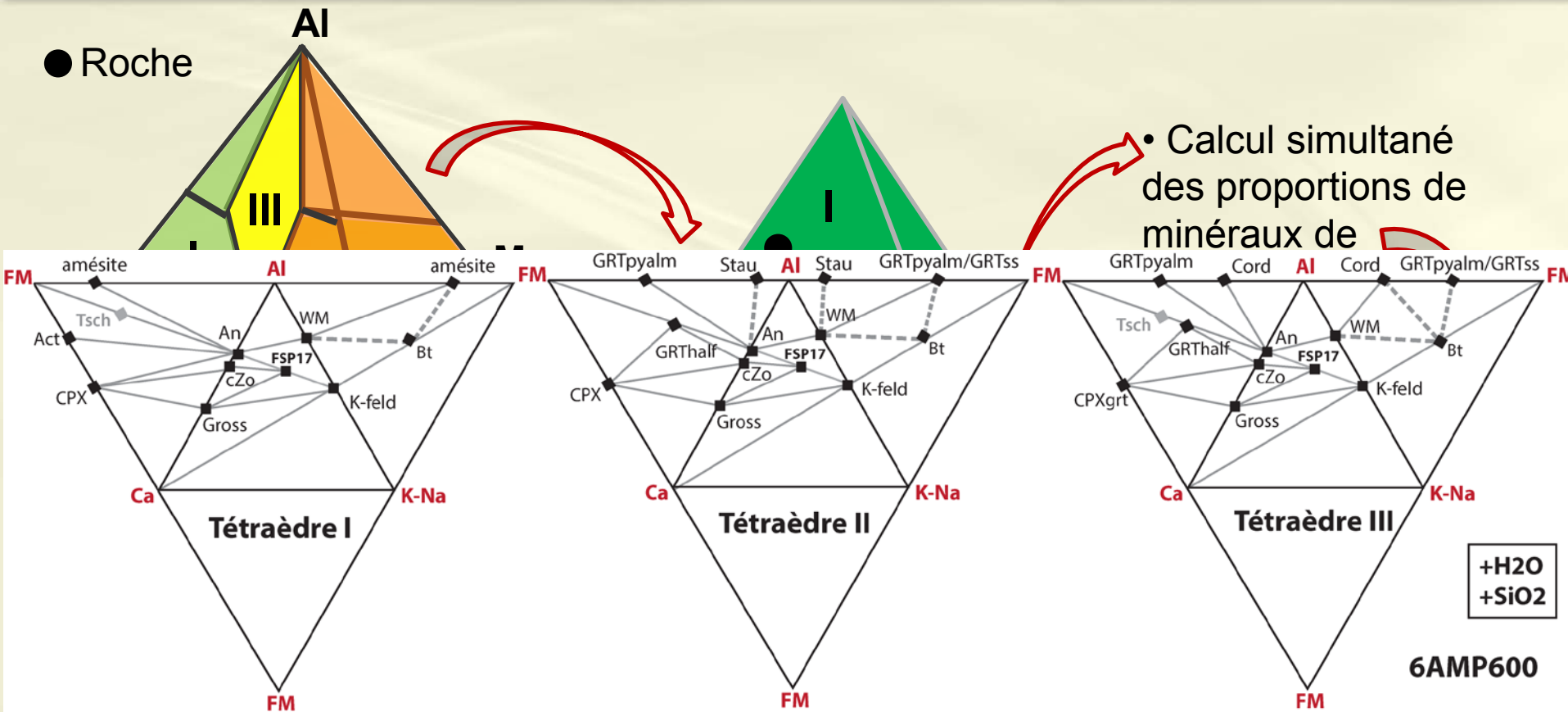
Séquence de calcul de la norme CONSONORM_LG (Trépanier 2011)



Séquence de calcul de la norme CONSONORM_HG (Mathieu 2014)



● Roche



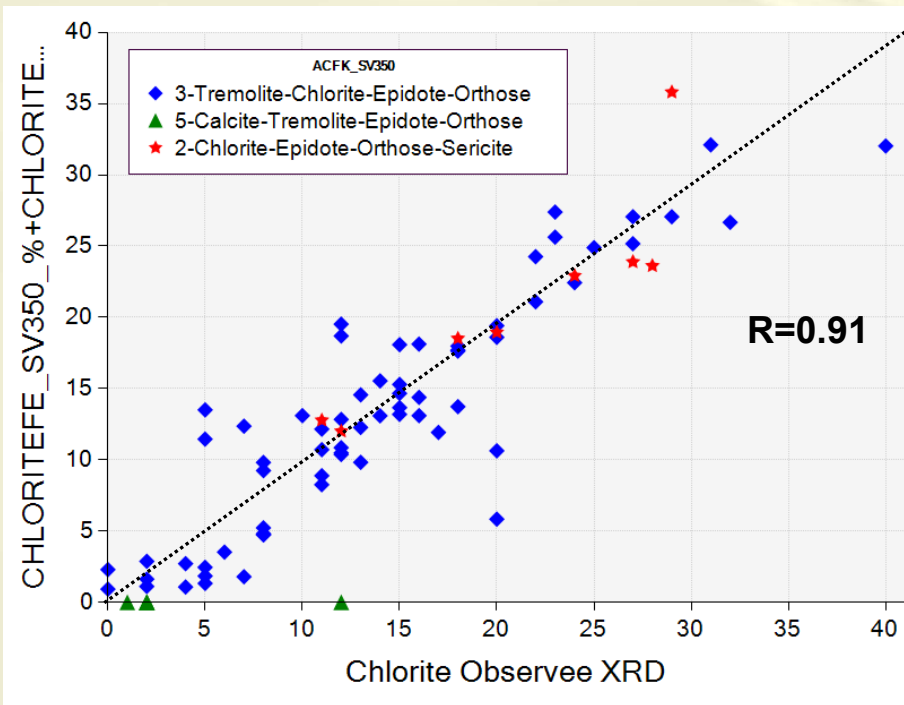
Tétraèdres Al-Ca-FM-KN

- 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.

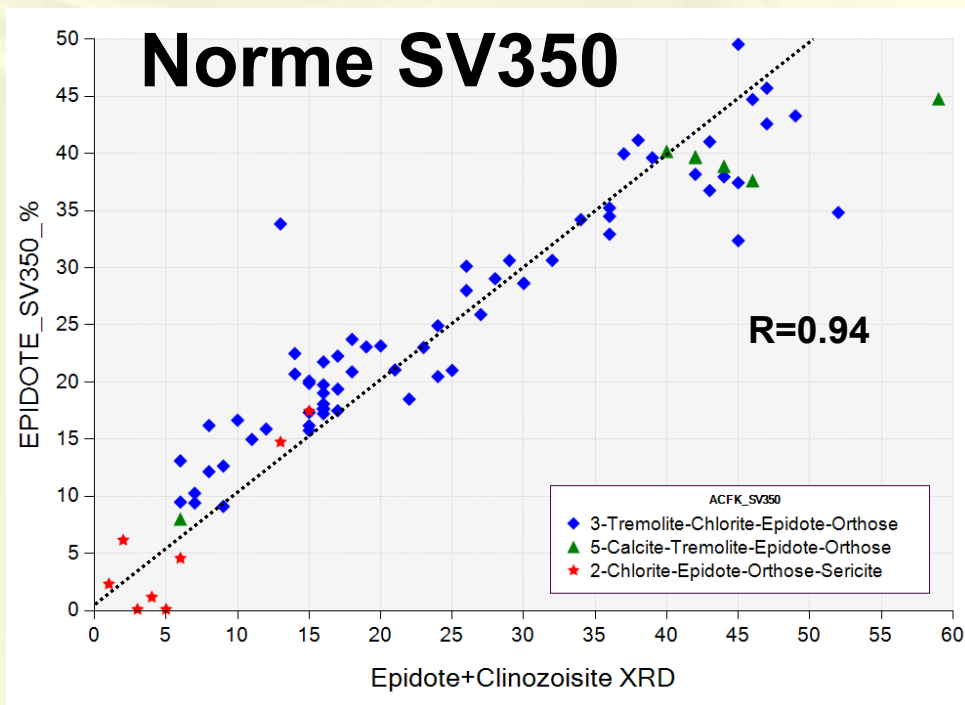
VALIDER les NORMES

Exemple 1 : basaltes andésitiques, gabbros et volcaniques felsiques altérés en contexte de VMS, ceinture de Flin-Flon, Manitoba

Minéralogie quantitative mesurée par diffraction-X



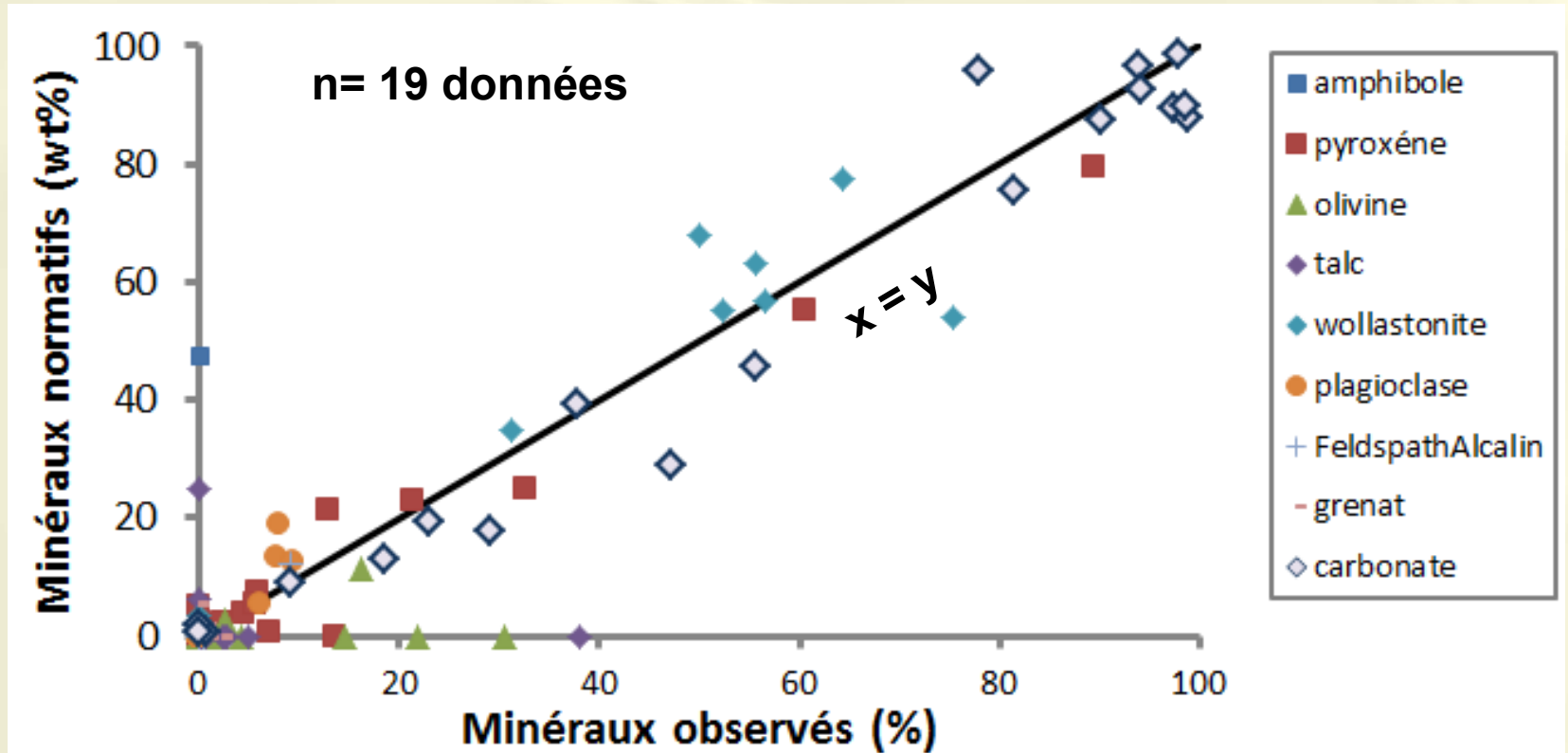
Chlorite mesurée par diffraction X vs chlorite normative 350C.



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

(exemple repris de Trépanier 2011)

Exemple 2 : Marbres et d'amphibolites (données de Davis et Ferry 1993)



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

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

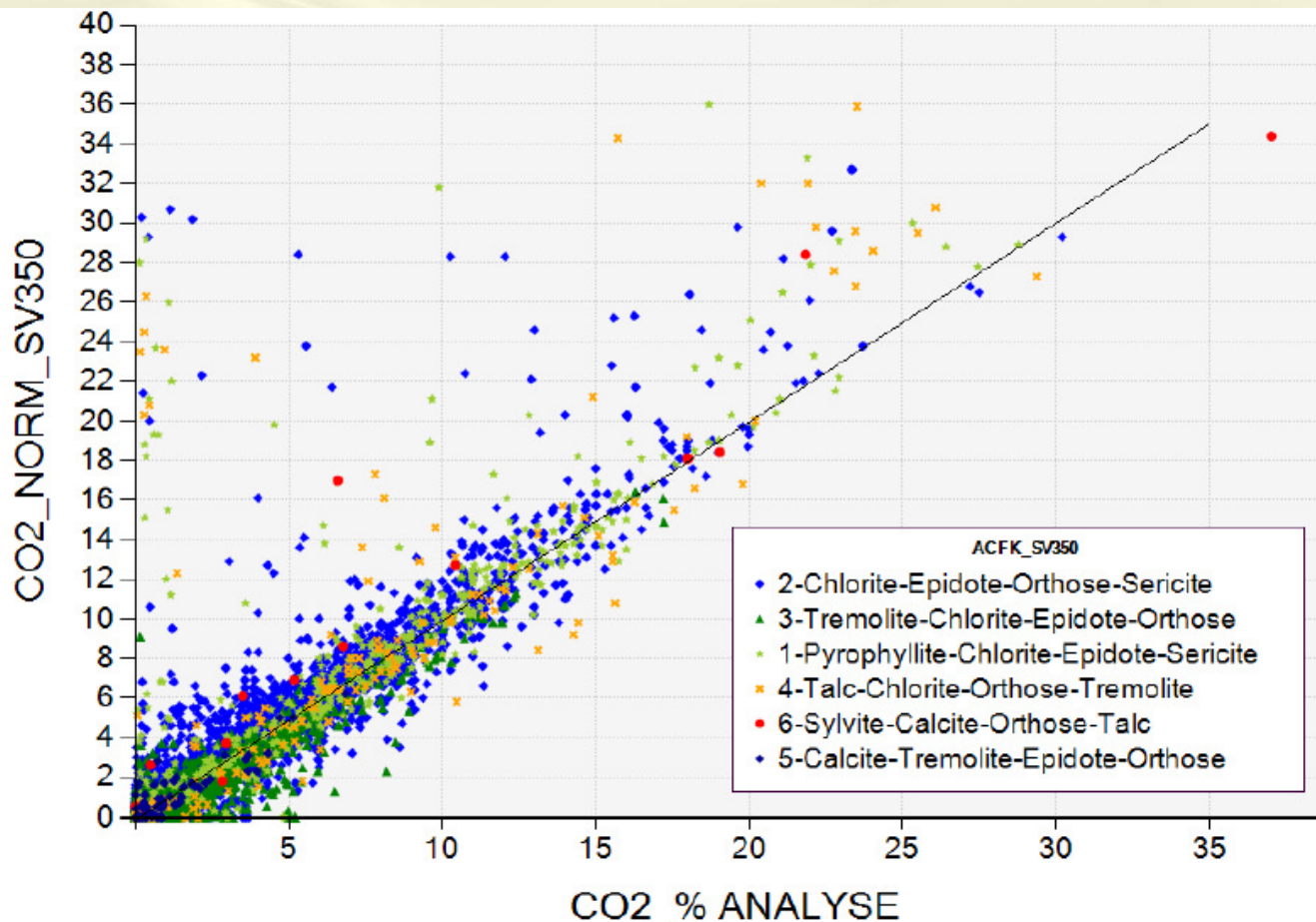


Figure 55. Comparaison entre le CO₂ analysé et estimé par norme 350C, banque de compilation Abitibi avec CO₂ analysé (n=7151).

(exemple repris de Trépanier 2011)

CALCULER des INDICES d'ALTÉRATION à partir des MINÉRAUX NORMATIFS

Indices d'altération de la CONSONORM_LG (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

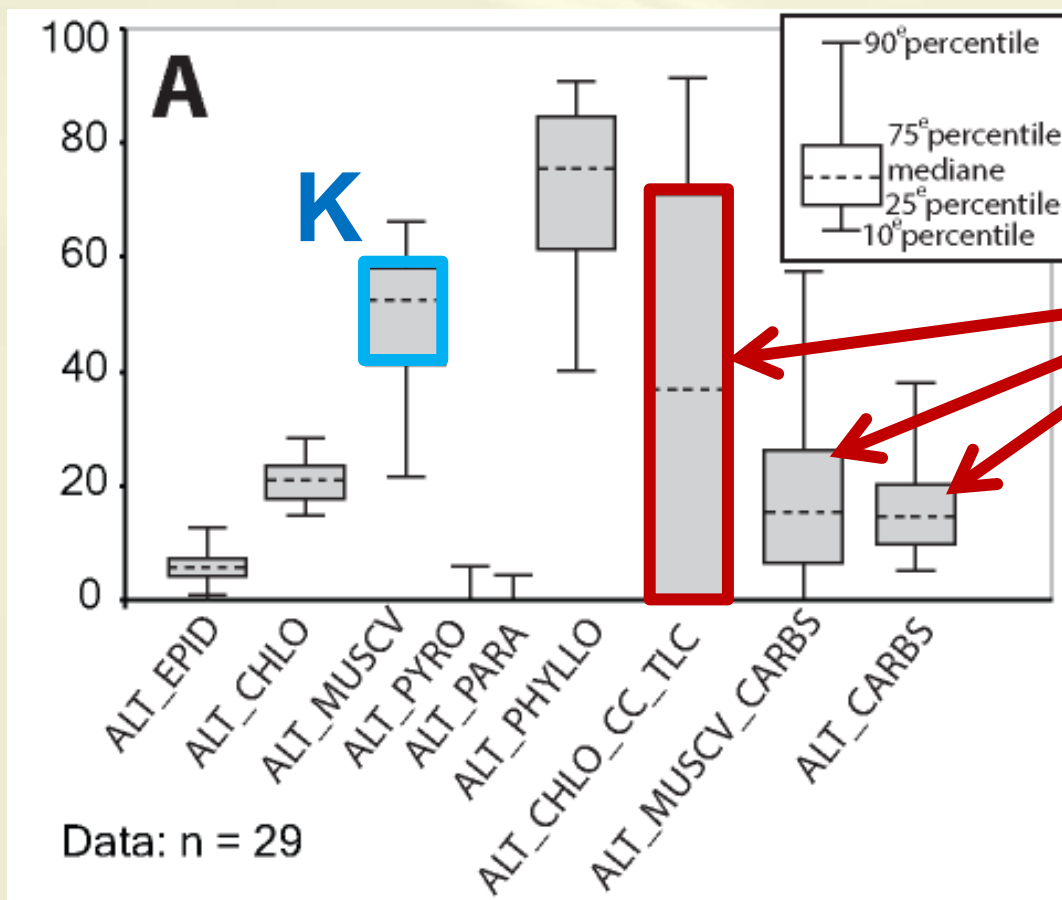
Indice **Carbonates**

- 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 (CO₂ et K)



Norme SV350

CO₂

(carbonates,
chlorite, muscovite)

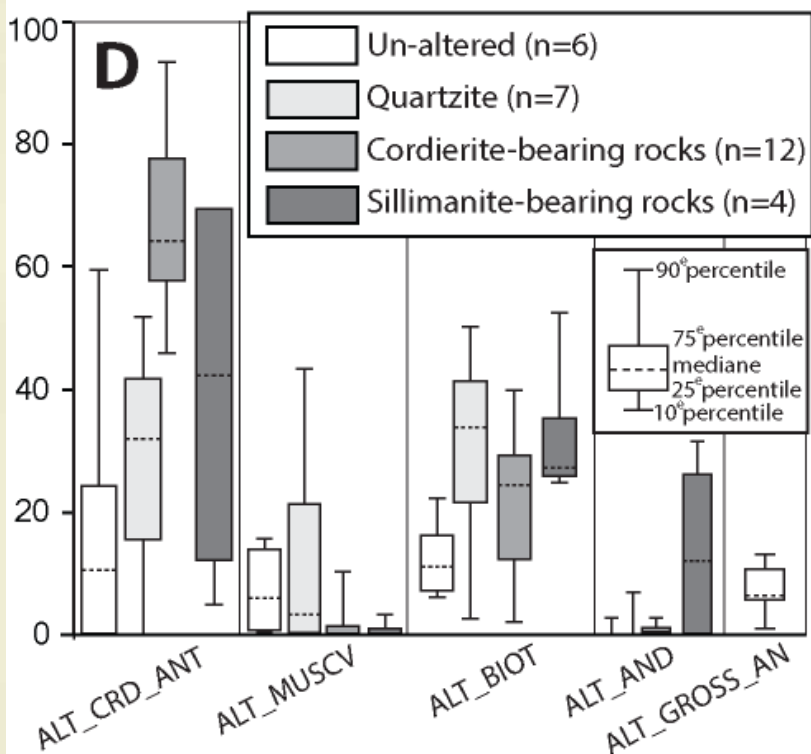
épidote + actinote + CO₂ -->
chlorite + calcite + quartz

albite + chlorite + calcite -->
muscovite + ankérite

(Kishida et Kerrich 1987)

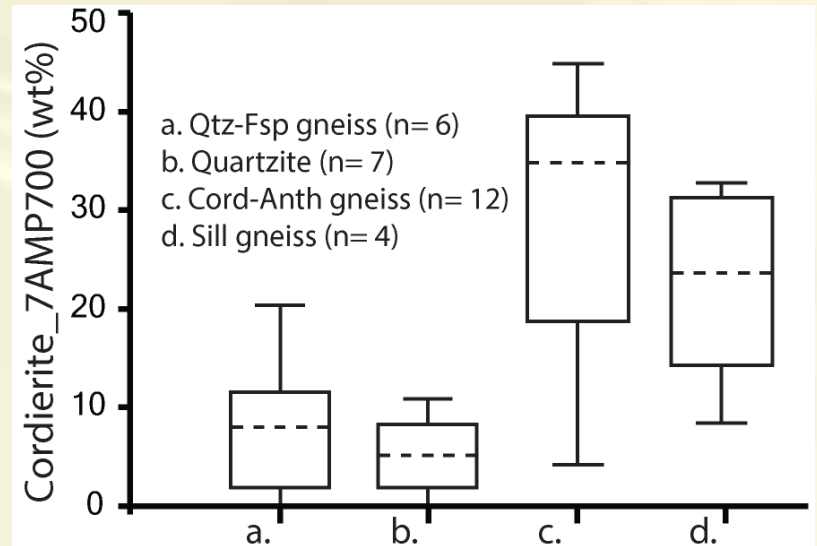
Données : Bierlein et Smith (2003)

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

- 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)

Documents cités

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

Projet CONSOREM 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

Articles : Trépanier et al. (soumis 2015) – CONSONORM_LG
Mathieu et al. (soumis 2015) – CONSONORM_HG

Merci de votre attention