

Empreinte hydrothermale des gîtes aurifères mesothermaux dans le Sud de l'Abitibi

Silvain Rafini

*Mini Forum CONSOREM
UQAM, Montréal - 15 février 2018*



Introduction : géologie régionale Sud Abitibi

Province de Churchill

Roches supracrustales
Zone de subduction
protérozoïque inférieur, de type moderne

Province du Lac Supérieur

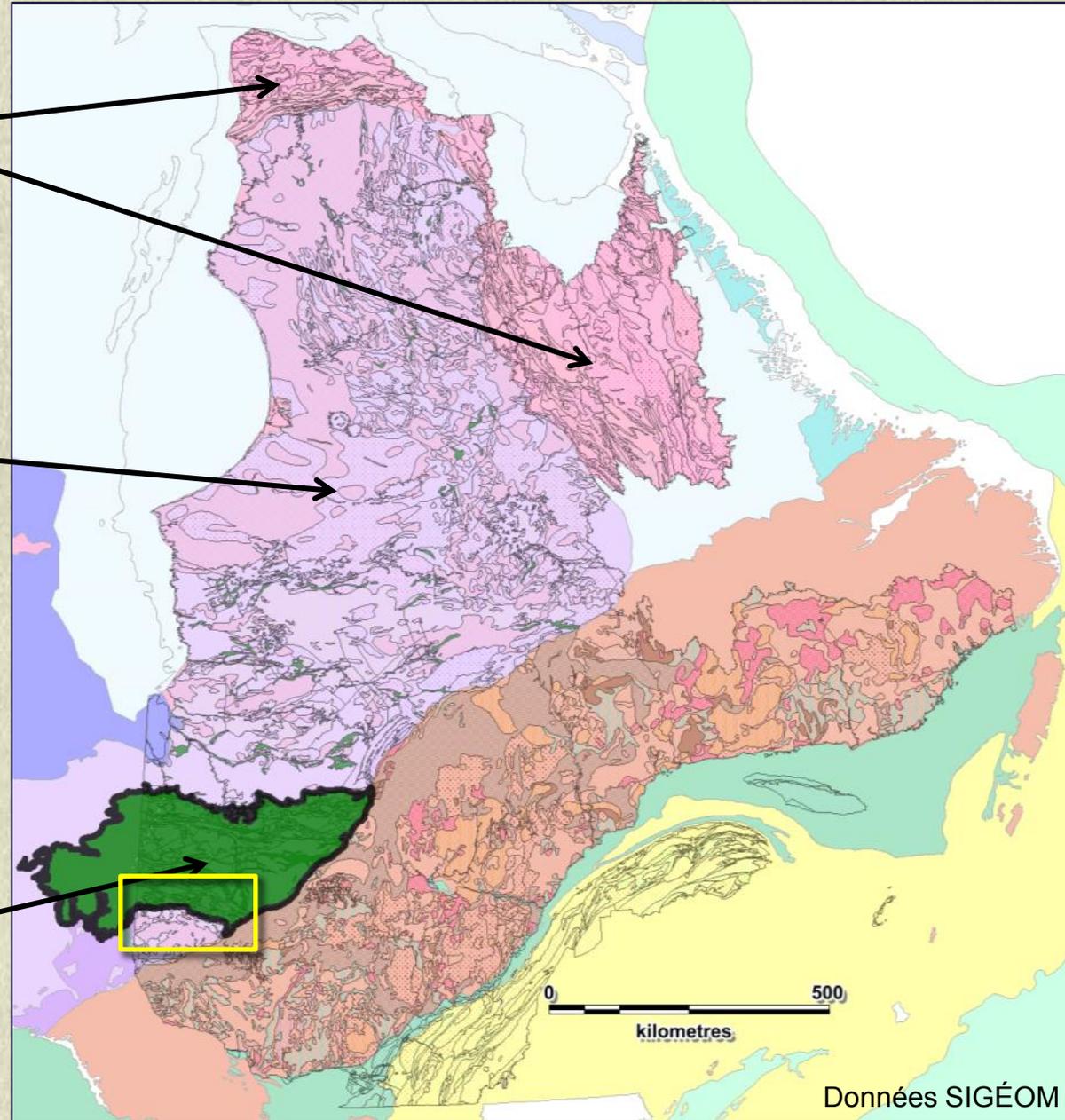
Bouclier canadien
Croûte archéenne cratonisée,
supracrustale à profonde

- **27% de la production mondiale pour le type Au orogénique CRV**
- **Craton archéen « le mieux préservé au monde » pour ce type**

Sous-province de l'Abitibi

Ceinture de Roches Vertes (CRV)

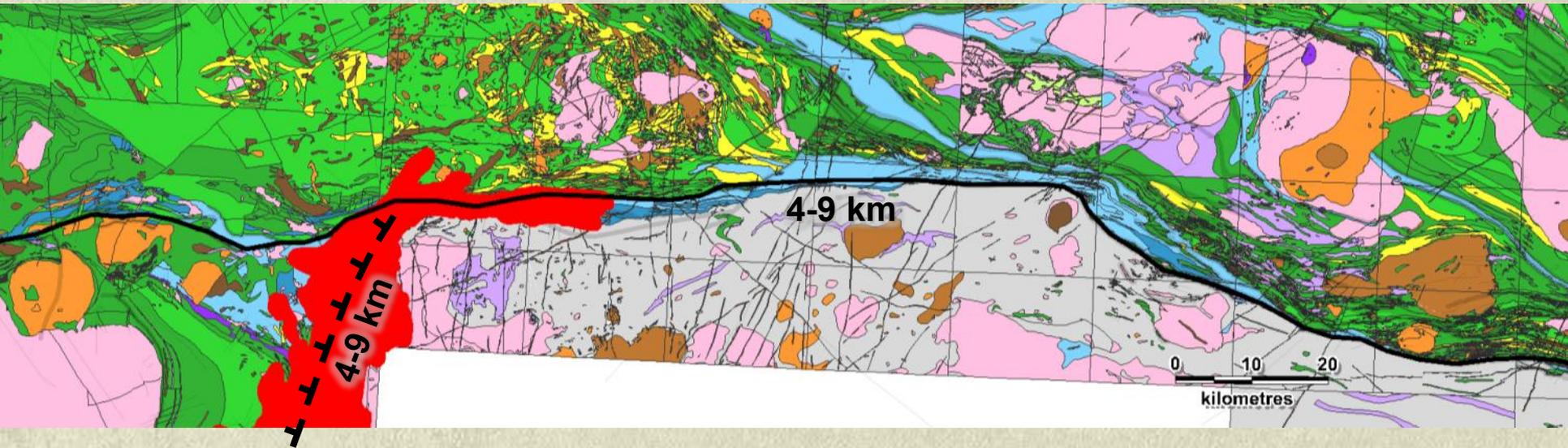
- **La plus grande CRV au monde**
- **81% de la production aurifère canadienne**
- **Provient essentiellement du Sud de la sous-province : la Faille Cadillac**



Introduction : géologie régionale Sud Abitibi

E du Cobalt : rejet normal 4 à 9 km (écart de niveau crustal entre le faciès SV inf. à sup. de l'Abitibi et le faciès amphibolites inf. du Pontiac) ; rejet horizontal fini inconnu

O du Cobalt : pas de rejet visible (mêmes niveaux crustaux de part et d'autre de la faille)



Pendage Sud, mêmes roches de part et d'autre

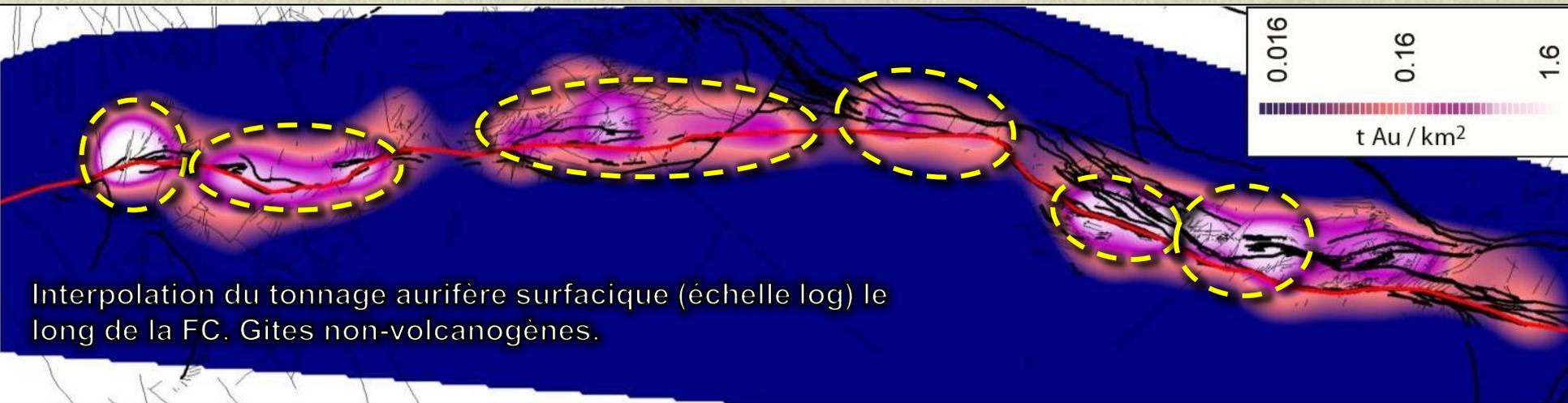
Intraterrane

Pendage Nord, limite lithostratigraphique majeure
(sépare deux provinces aux grades métamorphiques contrastés)

Interterrane

Empreinte de la Faille Cadillac : *alignement aurifère*

- Alignement de minéralisations aurifères relativement continu sur plus de 250 km (excepté sous la couverture protérozoïque)
- Une des structures les plus fertiles au monde :
> 4 200 t Au, 104 gîtes orogénique répertoriés, 37 rang mondial (> 10t Au), 5 géants (>100 tAu)



- **6 camps miniers historiques (tonnage métal, gîtes non-volcanogènes), d'ouest en est :**
 - Camp de Kirkland Lake : 748.88 tAu
 - Camp de Kerr Addison : 347.42 tAu
 - Camp de Rouyn-Noranda : 293.8 tAu (excluant camp central, incluant Joanna et Francoeur-Wasamac)
 - Camp de Cadillac : 55.43 tAu
 - Camp de Malartic : 824.2 tAu
 - Camp de Val d'Or : 557.93 tAu

Portrait métallogénique régional Au

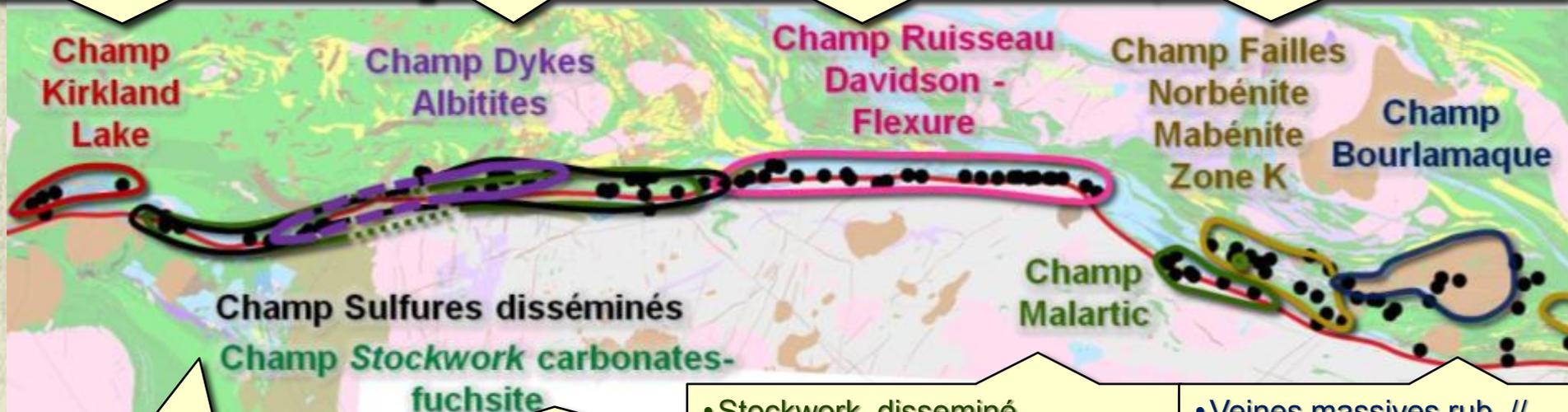
Segmentation géologique (104 gîtes): plusieurs styles distincts le long du metallotecte
 → **8 champs** montrant des caractéristiques relativement homogènes

- Veines semi-massives rub. // Smyl ENE + peu pentées (*tension*)
- Sulfures <3% (PY-MO-CPY)
- Alteration K
- Syénite tardi-tectonique

- PY disséminée 15%
- Forte albitisation
- Dykes d'albitite

- Rés. veinules, veines semi-massives rub. //Smyl
- Sulfures 10-15% (PY-ARS-PO)
- Biotite

- Veines rub. semi-massives + rés. veinules ; // Smyl
- Sulfures <5% (PY)
- Gain Na, lessivage K
- I1-I2 calco-alkalines déformées // Smyl



- PY diss 7-40%
- Pas de veines
- Contrôle strati V3 ferrifère

- Stockwork, rés. de veinules
- Peu de sulfures (PY-ARS)
- Carbonates+++ , fuchsite
- Ultramafigues

- Stockwork, disséminé
- (PY-MO-CPY) < 5% (local. 20%)
- Gain Na, fort gain K, microcline
- I1-I2 tardi-tectonique calco-alkalines / alcalines

- Veines massives rub. // Smyl E-W + (*tension flat*)
- Sulfures 10-30% (PY-CPY) TM, scheelite
- Au dans la pyrite

// Smyl : parallèle à la foliation mylonitique

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogenèse Au

Segmentation géologique (104 gîtes): plusieurs styles distincts le long du metallotecte
→ 8 champs montrant des caractéristiques relativement homogènes

→ **Portrait des altérations dominantes associées à ces champs**

D'après les descriptions de gîtes (observation)

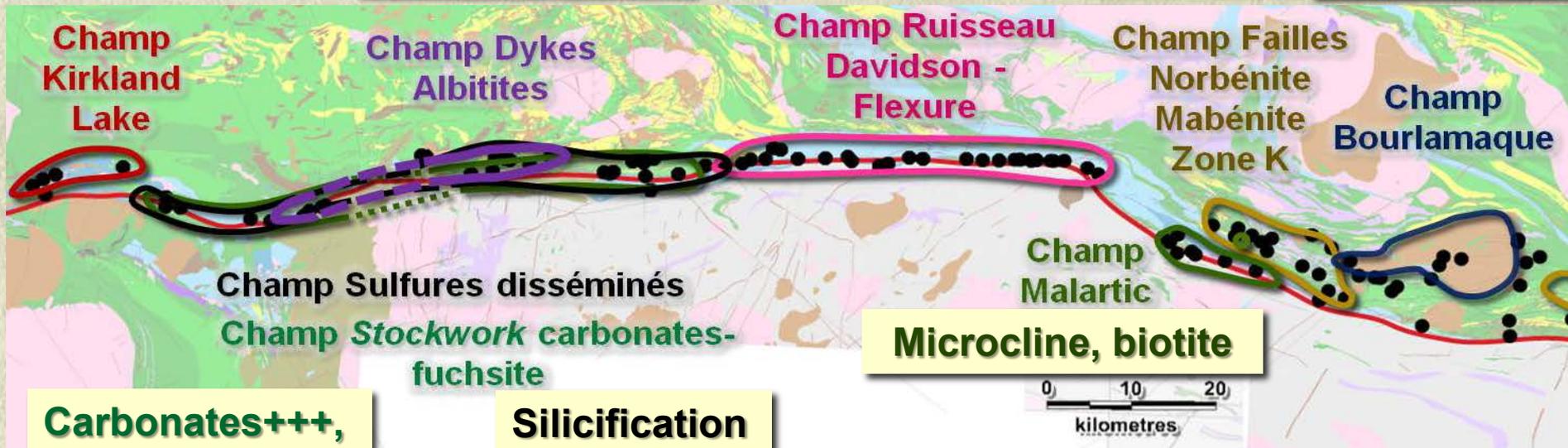
**Silice, séricite ±
FeldsK**

**Intense
albitisation**

Biotite

Albite

**Tourmaline,
scheelite**



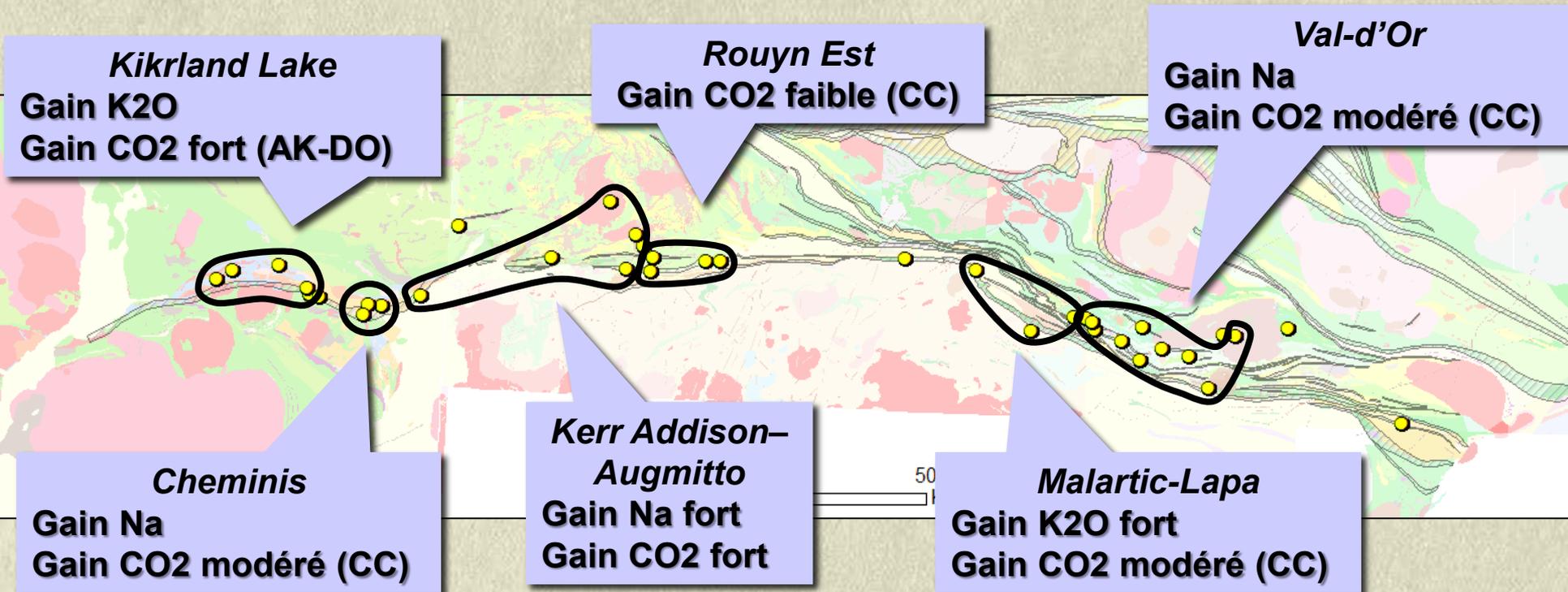
D'après compilation 230 documents sur 104 gîtes associés à la Faille Cadillac

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogenèse Au

D'après analyses lithogéochimiques

Compilation 405 analyses lithogéochimiques d'éch minéralisés (> 1 g/t) provenant de 57 gites Au en Abitibi

Gains/pertes métagénétiques dominantes obtenus par les bilans de masse

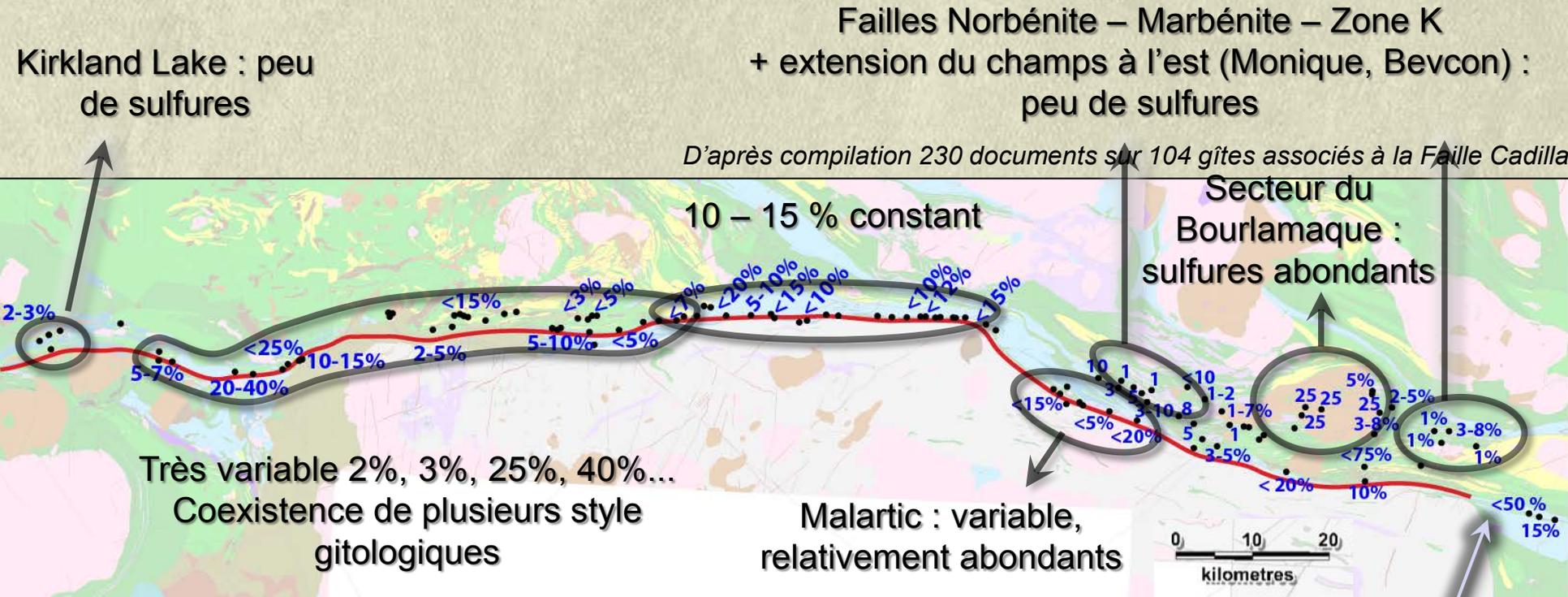


Plusieurs empreintes métagénétiques distinctes → plusieurs fluides ? Reflète existence de systèmes hydrothermaux distincts dans temps et espace ?

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogenèse Au

Abondance de sulfures dans le minerai

D'après compilation des descriptions de 104 gîtes (2012)



Abondance et nature des sulfures sont très hétérogènes

→ Suggère la **coexistence de plusieurs mécanismes de précipitation aurifère**

→ Cohérents à l'échelle locale : **champs**

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogénèse Au

Assemblage de sulfures dans le minerai

D'après compilation des descriptions de 104 gîtes (2012)

Secteur Champ Flexure Faille Cadillac

Arsénopyrite abondante (jusqu'à 10%)

Pyrite, pyrrhotite, faible chalcoppyrite

Secteur

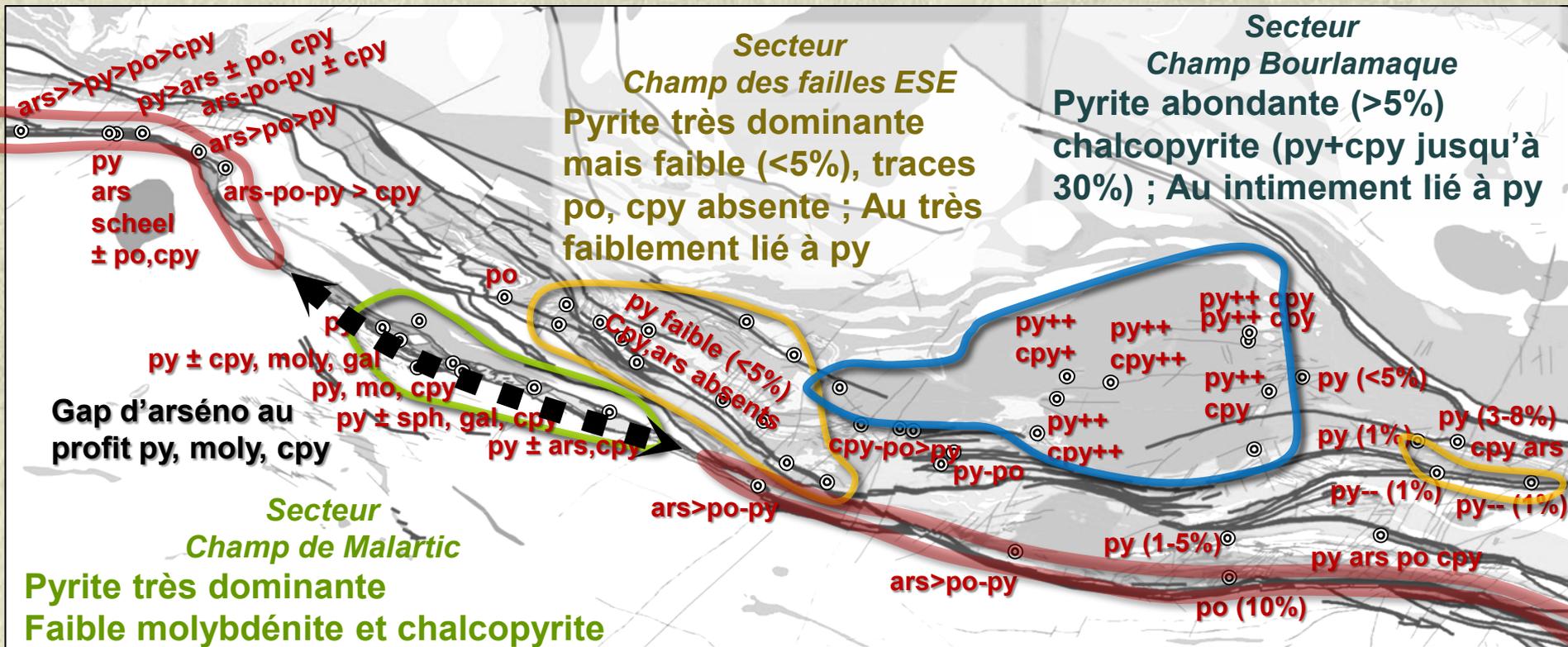
Champ des failles ESE

**Pyrite très dominante
mais faible (<5%), traces
po, cpy absente ; Au très
faiblement lié à py**

Secteur

Champ Bourlamaque

**Pyrite abondante (>5%)
chalcoppyrite (py+cpy jusqu'à
30%) ; Au intimement lié à py**



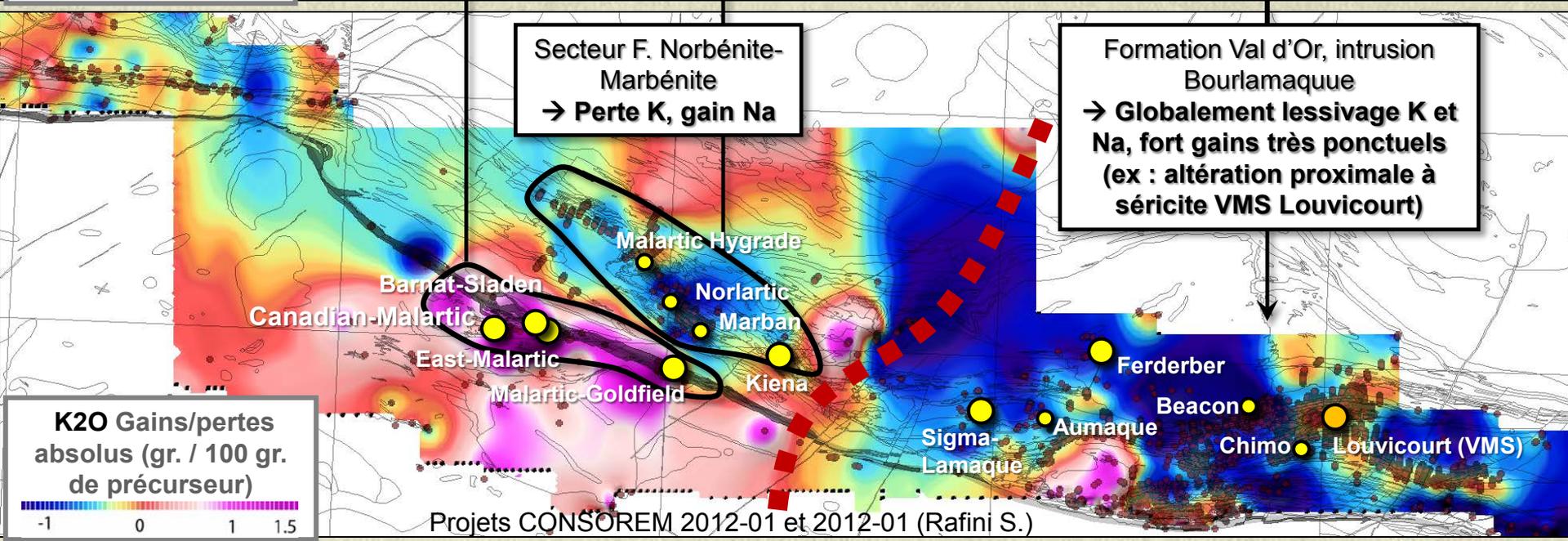
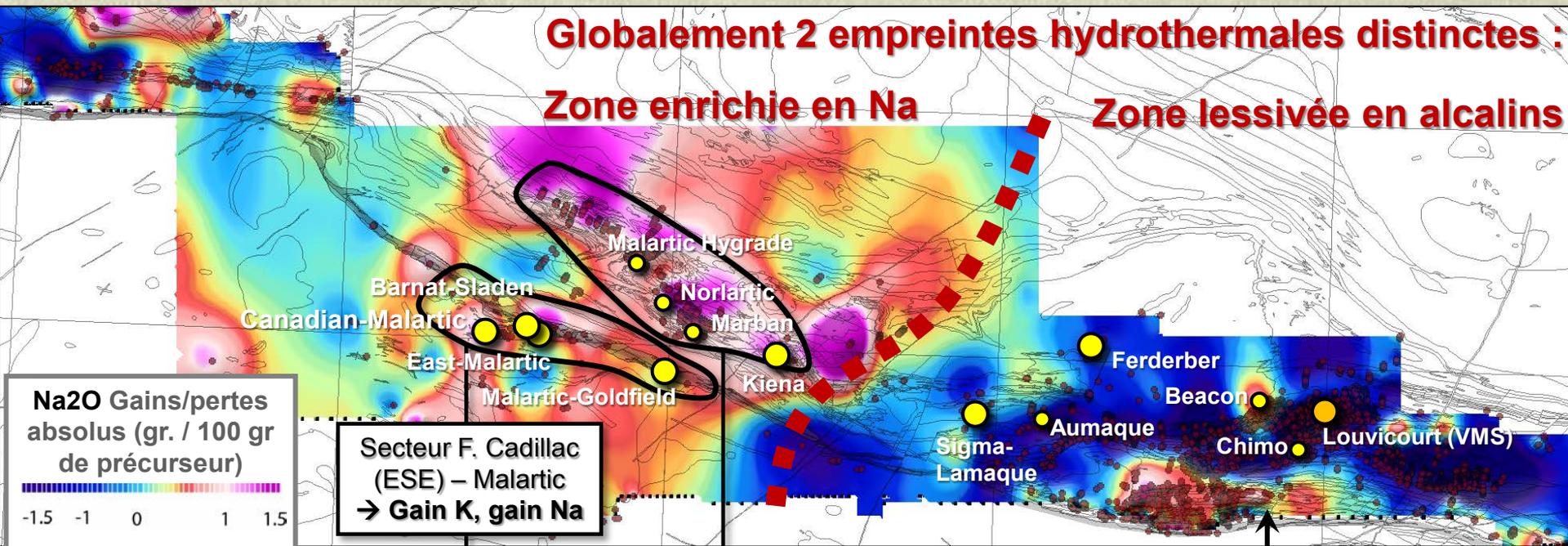
→ Assemblage de sulfures délimite des champs

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogénèse Au

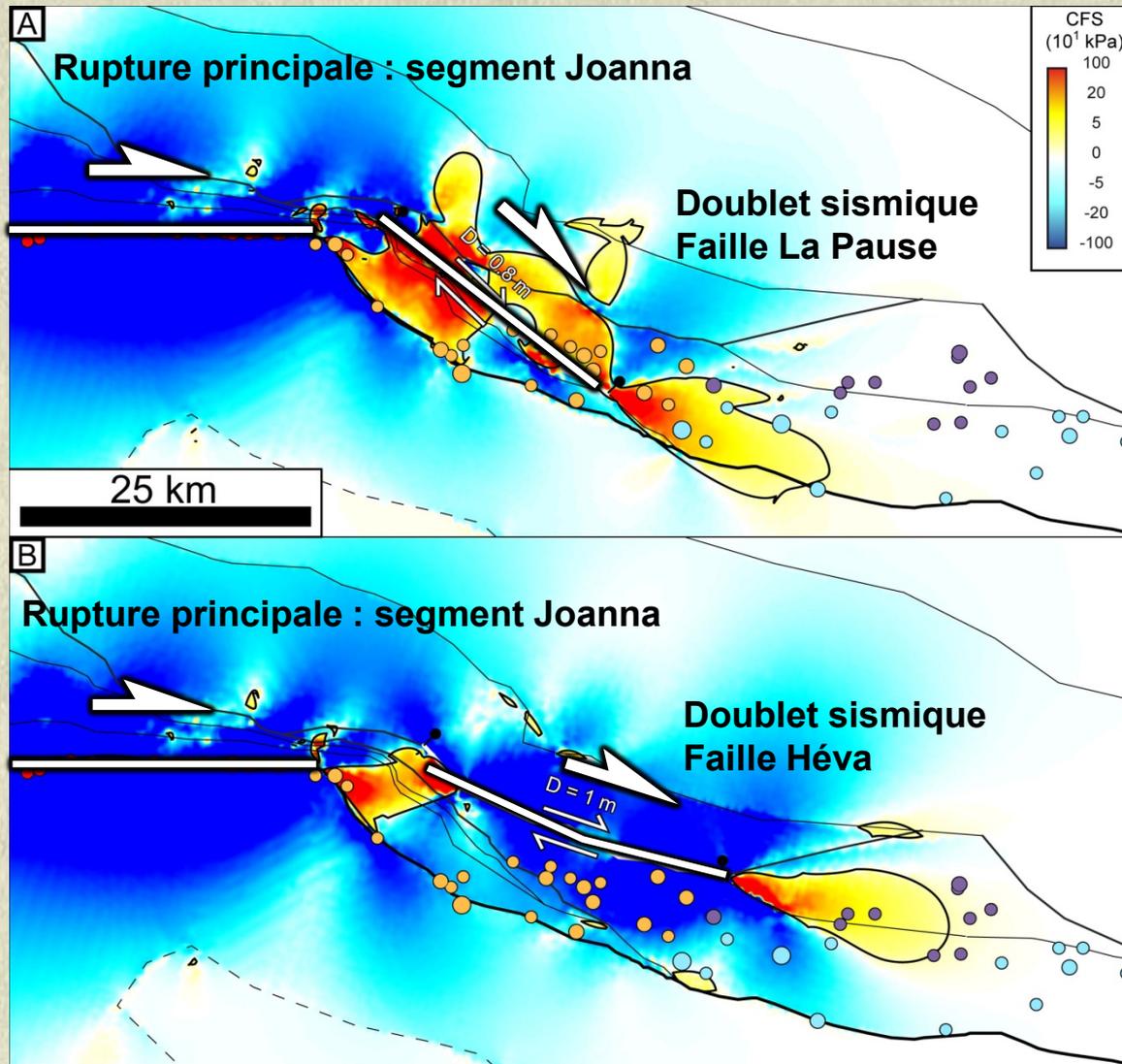
Globalement 2 empreintes hydrothermales distinctes :

Zone enrichie en Na

Zone lessivée en alcalins



Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogénèse Au



Modélisation numérique des zones d'activité hydrothermale déclenchées par la sismicité de la Faille Cadillac et des failles subsidiaires

Bedeau et al. (sous presse)
Geofluids

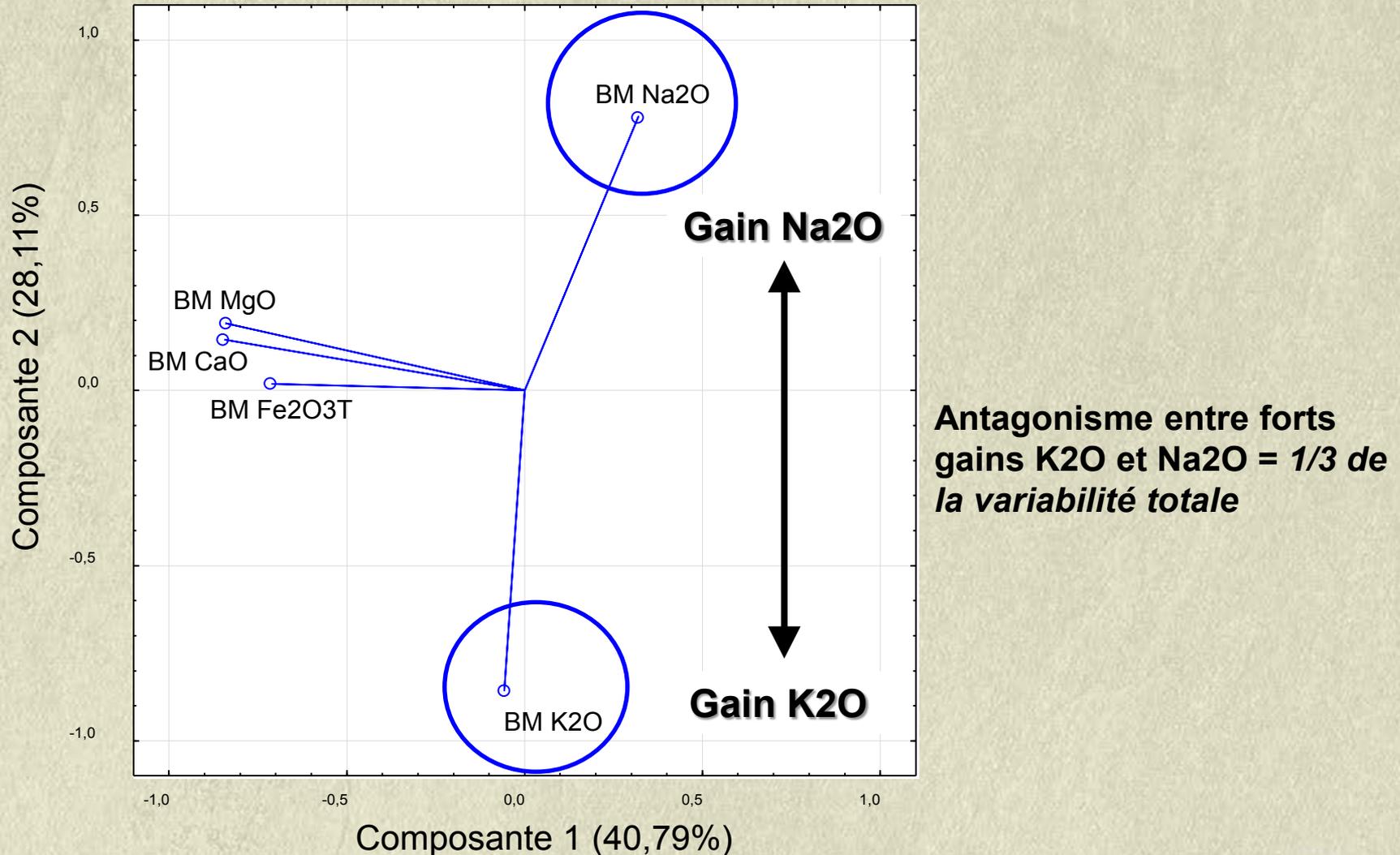
Les systèmes hydrothermaux cosismiques sont **dissociés dans le temps et l'espace** → Empreinte métasomatique régionale hétérogène

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogenèse Au

Antagonisme entre les gains métasomatiques K₂O et Na₂O associés à l'or

Population de 405 échantillons minéralisés (> 1 g/t) provenant de 57 gîtes Au en Abitibi

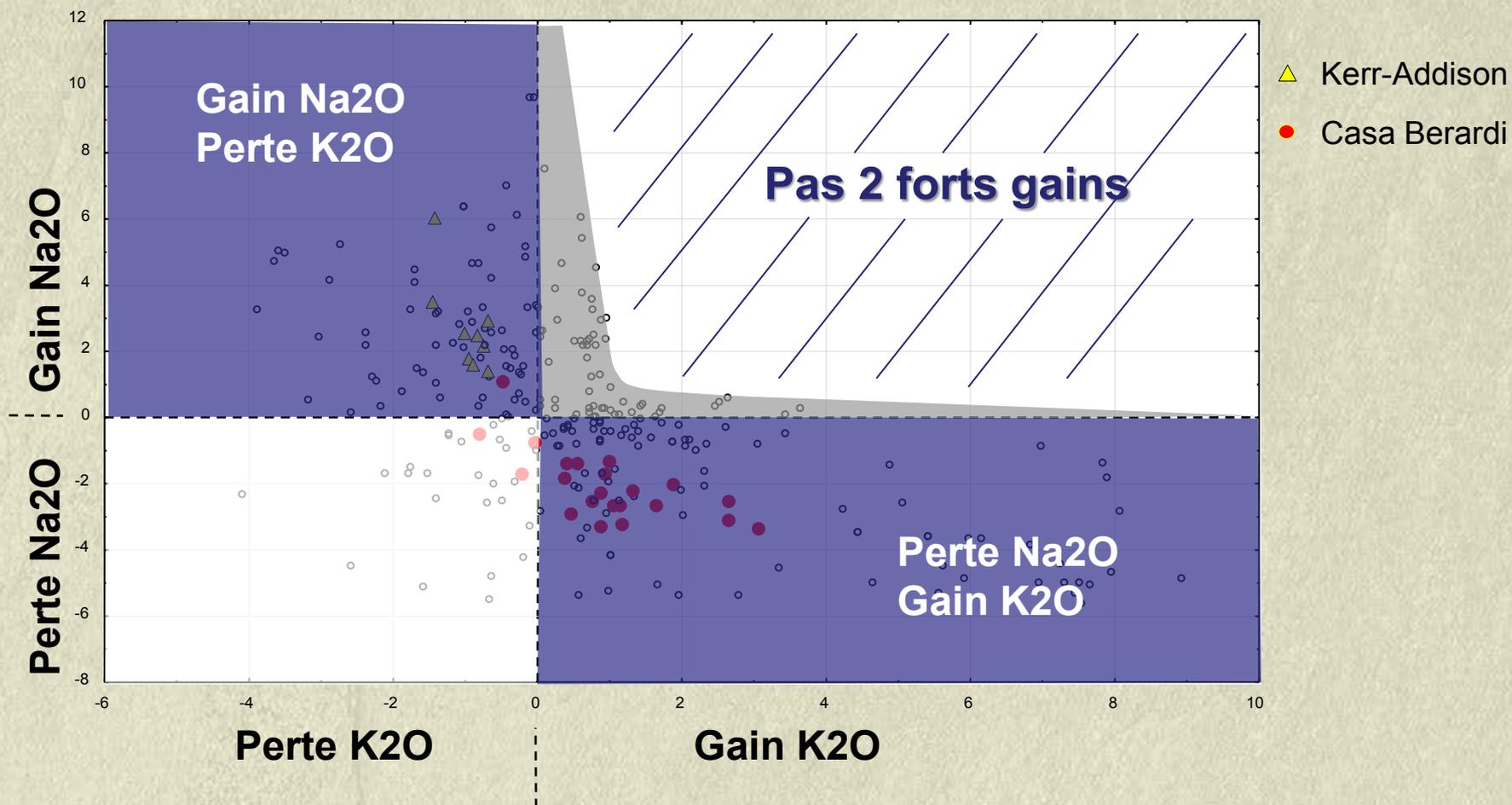
Analyse statistique multivariée des variables issues de bilan de masse avec modélisation de précurseurs



Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogenèse Au

Antagonisme entre les gains métasomatiques K₂O et Na₂O associés à l'or

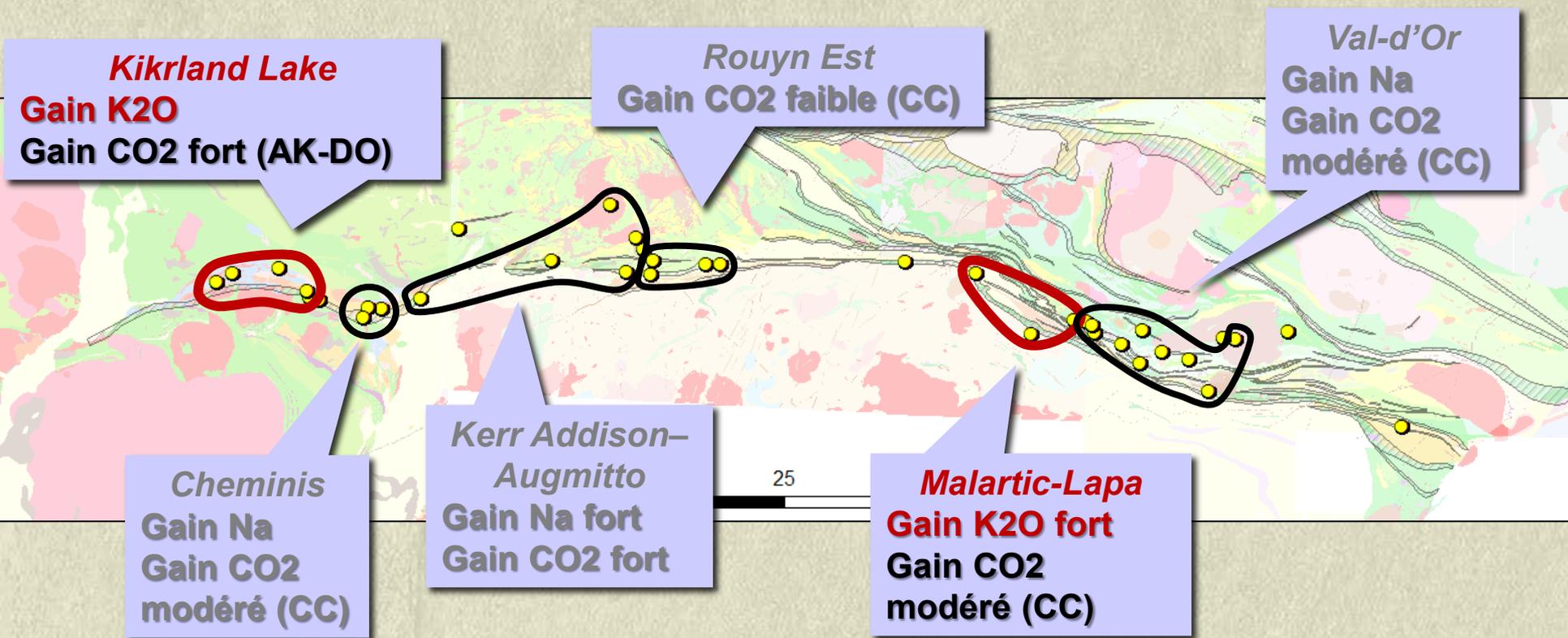
Population de 405 échantillons minéralisés (> 1 g/t) provenant de 57 gîtes Au en Abitibi



Gîtes à forte altération potassique dominante

D'après analyses lithogéochimiques

Compilation 8379 analyses lithogéochimiques dans 57 gîtes Au du Sud Abitibi
Gains/pertes métasomatiques dominantes obtenus par bilans de masse

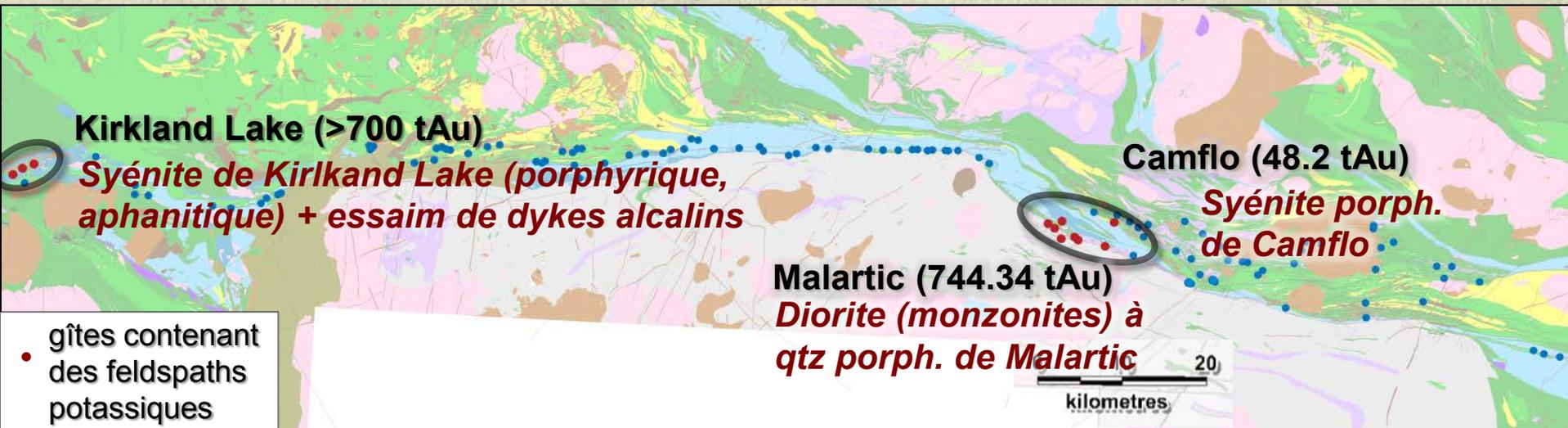


Gîtes à forte altération potassique dominante

D'après observations de terrain / carottes

Compilation 239 documents dans 104 gîtes Au du Sud Abitibi

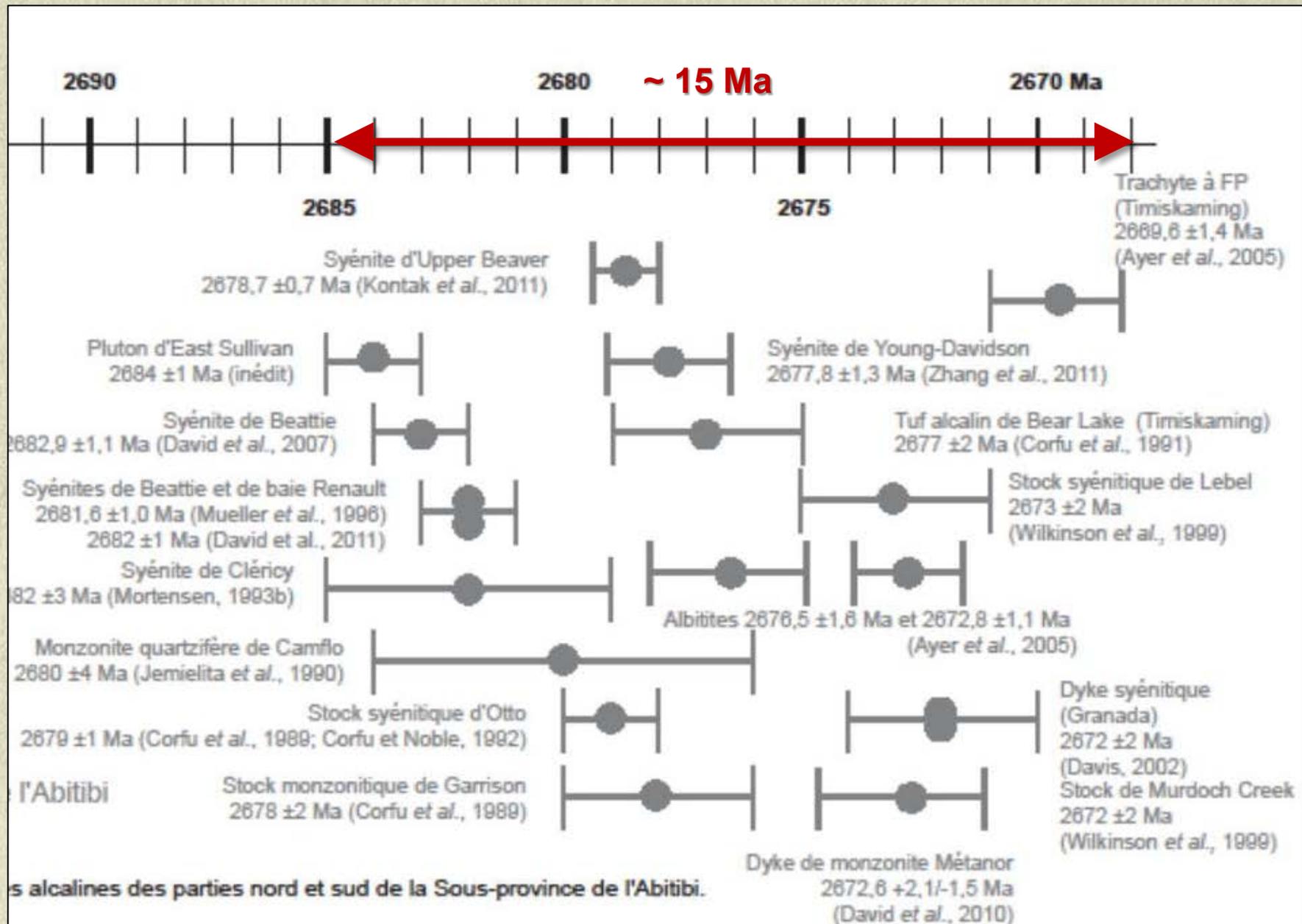
D'après compilation 230 documents sur 104 gîtes associés à la Faille Cadillac



- Malartic : feldspaths potassiques (microcline) abondants (corrélés avec la biotite)
→ Fort gain potassique métasomatique
- KirklandLake :
 - Feldspaths potassiques moins abondants qu'à Malartic
 - Altération potassique plus faible, davantage matérialisée par la séricite (Ispolatov et al, 2005)

→ Associé à des intrusions tardives, syn- à post-Temisaming, alcalines (excepté Malartic calco-alcalin ?)

Intrusions tardi-tectoniques alcalines (syénites, monzonites)



alcalines des parties nord et sud de la Sous-province de l'Abitibi.

Goutier, 2013

Gîtes avec intrusions tardi-tectoniques alcalines (syénites, monzonites)

Évènement magmatique alcalin régional en Abitibi syn-Temiscaming

- **Très tardif** dans évolution tectonique régionale
- Post-raccourcissement principal N-S (plissement isoclinal et foliation penetrative)
- Syn-décrochement dextre ? (syn-cinématique)
- **Spatialement associé aux failles majeures** (Cadillac, Destor-Porcupine, Lamarck, Casa-Berardi)
- Souvent **aurifère** (surtout les petit stocks)
- **Empreinte secondaire dominante = fort gain K₂O** (mais non-systématique : Douay)
- **F** (syénite O'Brien : gîte Lac Bachelor, Fayol et Jébrak, 2017)
- **Empreinte primaire alcaline** (sanukitoïde ?)
- Mobilité de Zr, Y, P, REE (King et Kerrich 1987, Robert 2001, Jang ea. 2005,)



Veines à fluorite, Lac Bachelor

Fayol et Jébrak 2017

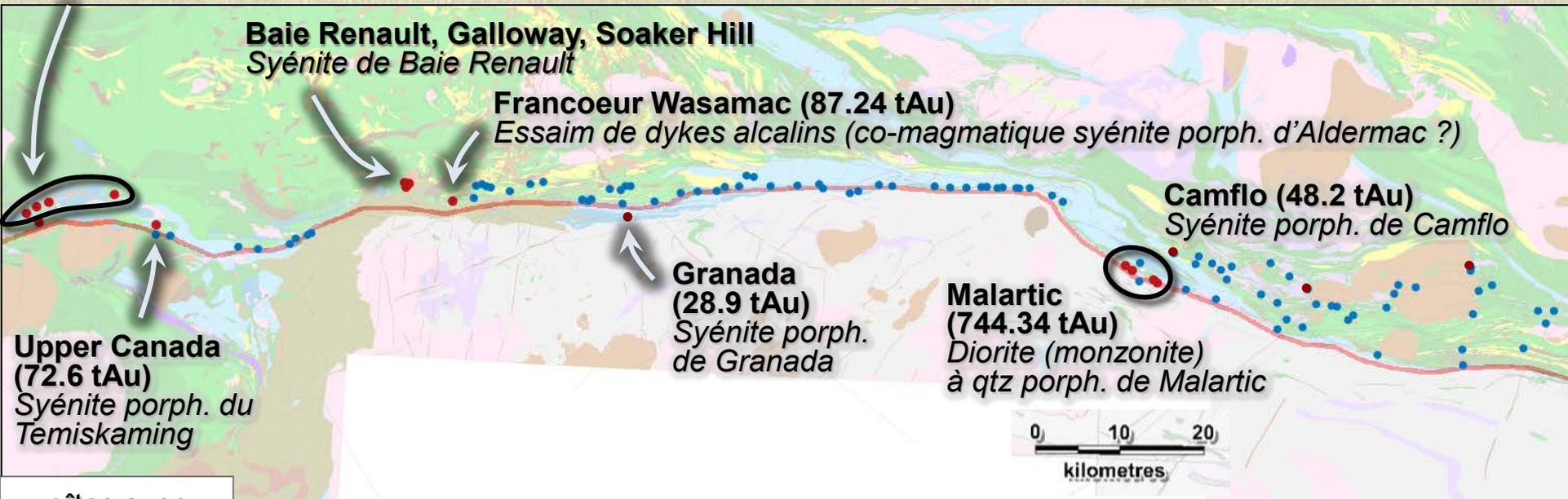
Gîtes avec intrusions tardi-tectoniques alcalines (syénites, monzonites)

D'après observations de terrain / carottes

Mo se concentre typiquement dans les fluides hydrothermaux magmatiques (très incompatible durant le fractionnement), et dans les sédiments

Kirkland Lake (>700 tAu)

Syénite de Kirkland Lake (porphyrique, aphanitique) + essaim de dykes alcalins



• gîtes avec Molybdénite

D'après compilation 230 documents sur 104 gîtes associés à la Faille Cadillac

→ Associé à des intrusions tardives, **syn- à post-Temiscaming, alcalines** (excepté Malartic calco-alcalin ?)

Gîtes avec intrusions tardi-tectoniques alcalines (syénites, monzonites)

D'après observations de terrain / carottes

Kirkland Lake (>700 tAu)

Syénite de Kirkland Lake (porphyrique, aphanitique) + essaim de dykes alcalins

Baie Renault, Galloway, Soaker Hill

Syénite de Baie Renault

D'après compilation 230 documents sur 104 gîtes associés à la Faille Cadillac



➔ **Non-associé à un type particulier de disposition de l'or**

Gîtes à listwanite et sulfurisation absente (stockwork)

Listwanite = facies carbonates – qtz – fuchsite (muscovite-Cr)

- Résulte du métasomatisme d'une roche ultramafique (290-340°C, 1-3kb) par un fluide riche en CO₂
- Carbonatation serpentine produit de la silice
- Pas de sulfures
- *Stockwork* : changement de volume



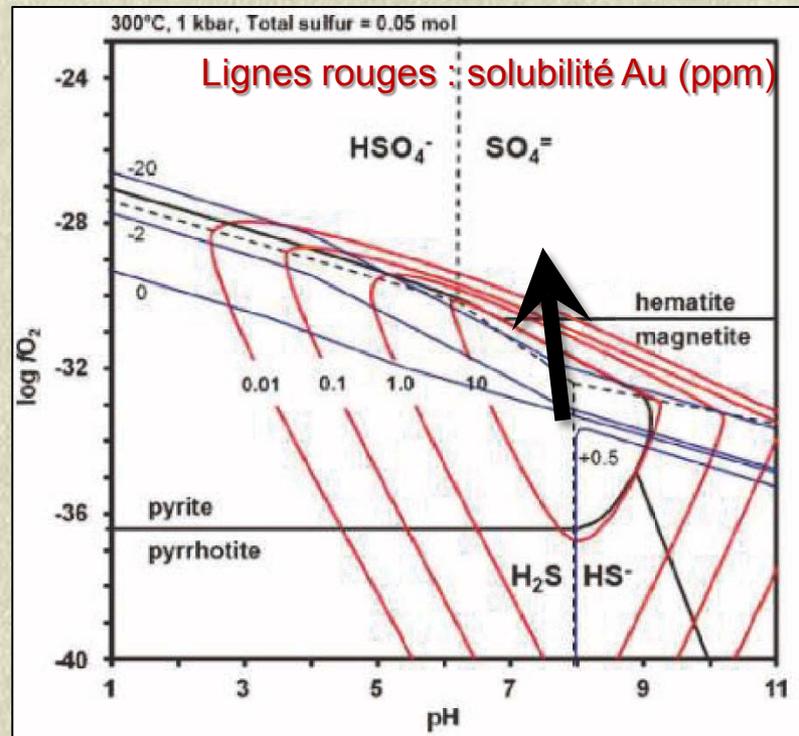
Piégeage physique de Au (plutôt que chimique) : précipitation Au déclenchée par chgt Pf

Mécanisme de précipitation Au par changement de Pf:

Dépressurisation = **séparation des phases** aux niveaux inférieurs (inclusions fluides à Kerr Addison, cf. Channer and Spooner, 1991), à 330°C

→ 1) augmentation drastique de la pression de fluide → **stockwork**

→ 2) déstabilisation Au(HS)₂⁻ et **précipitation Au** causée par partitionnement gaz réduits dans la phase vapeur et augmentation fO_2 dans phase liquide (Hodkiewicz et al., 2009)



Modifié de Hodkiewicz et al, 2009

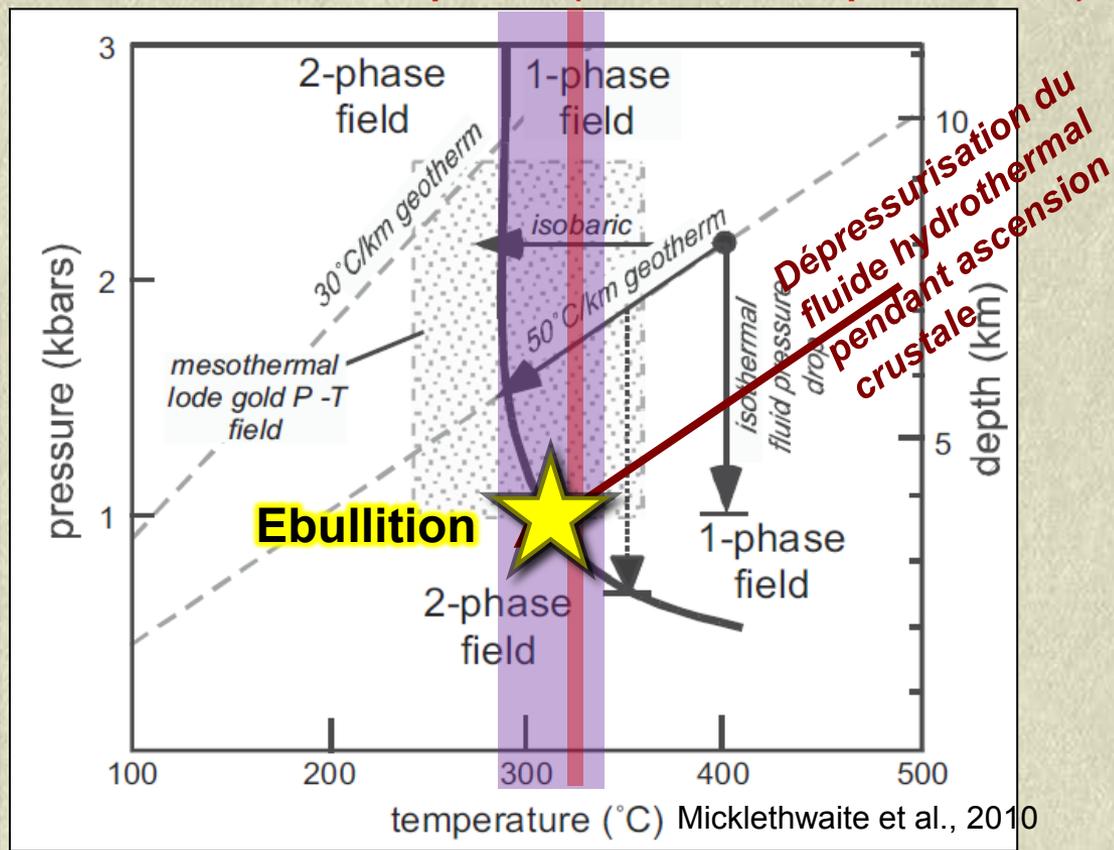
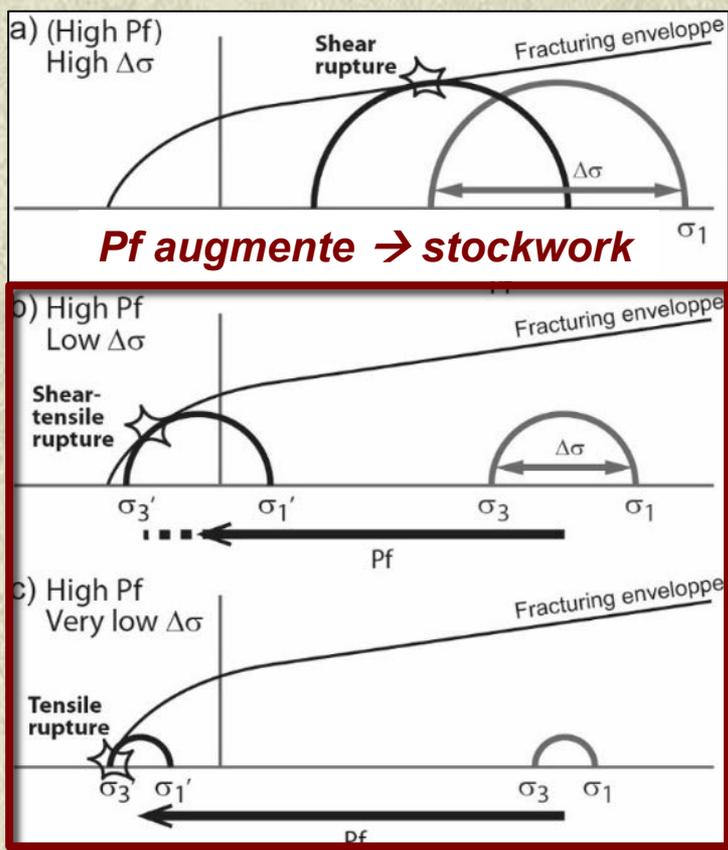
Gîtes à listwanite et sulfurisation absente (stockwork)

Listwanite = facies carbonates – qtz – fuchsité (muscovite-Cr)

- Résulte du métasomatisme d'une roche ultramafique (290-340°C, 1-3kb) par un fluide riche en CO₂
- Carbonatation serpentine produit de la silice
- Pas de sulfures
- *Stockwork* : changement de volume

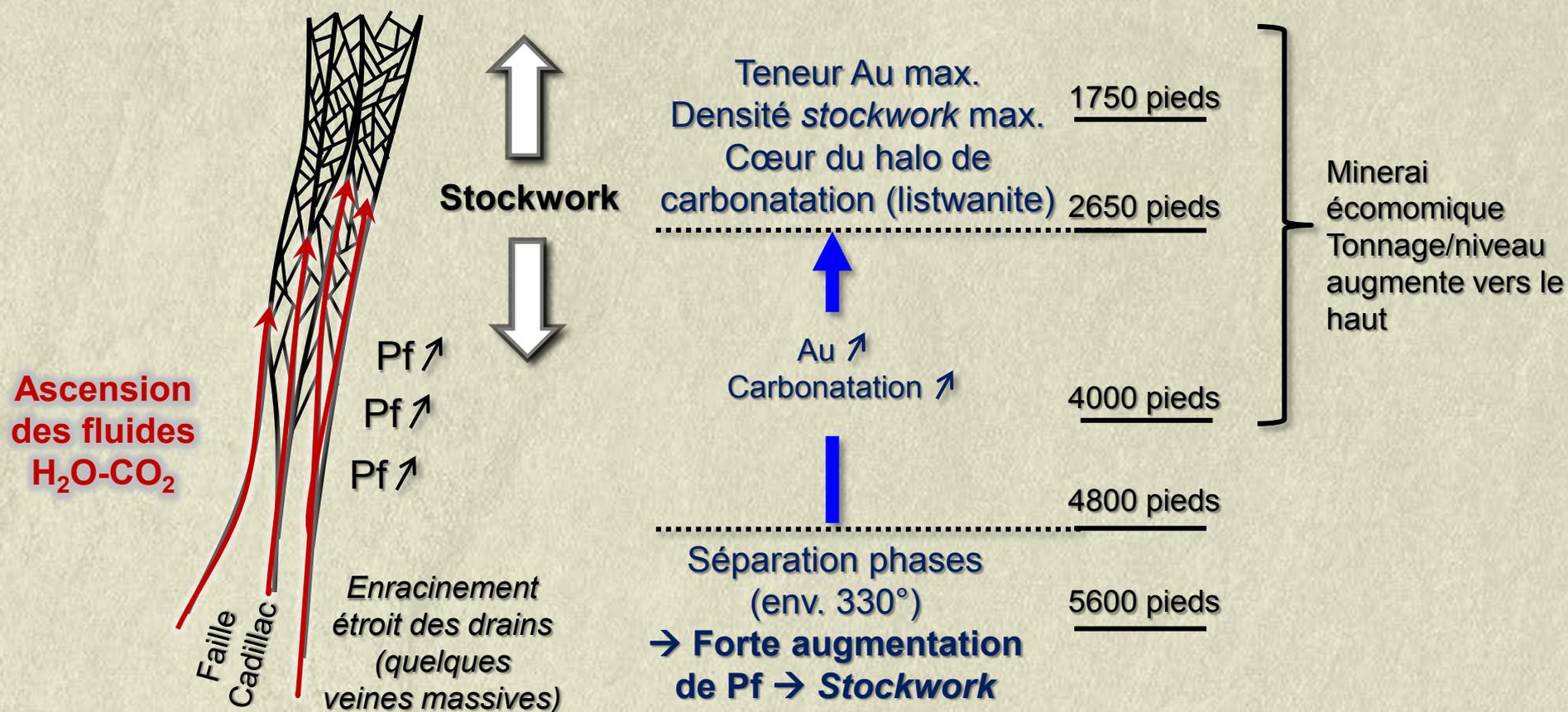
Fenêtre de T pour hydrothermalisme listwanite

T 2 phases (Channer and Spooner, 1991)



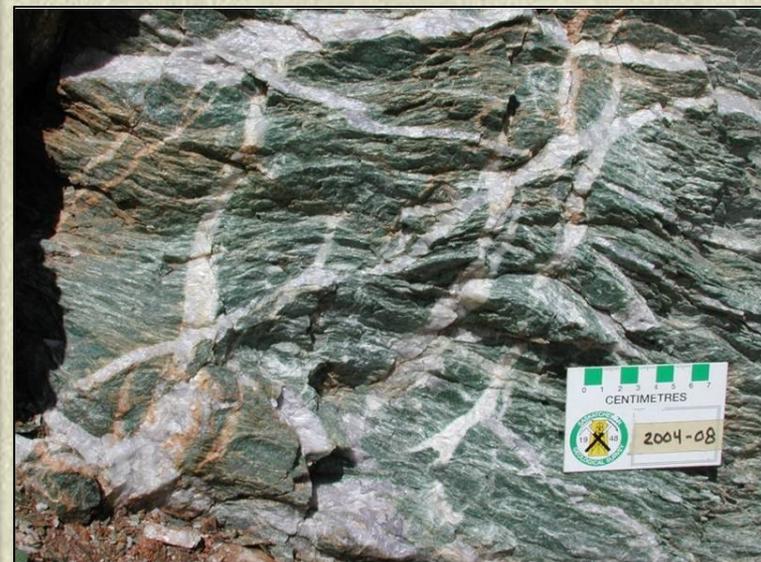
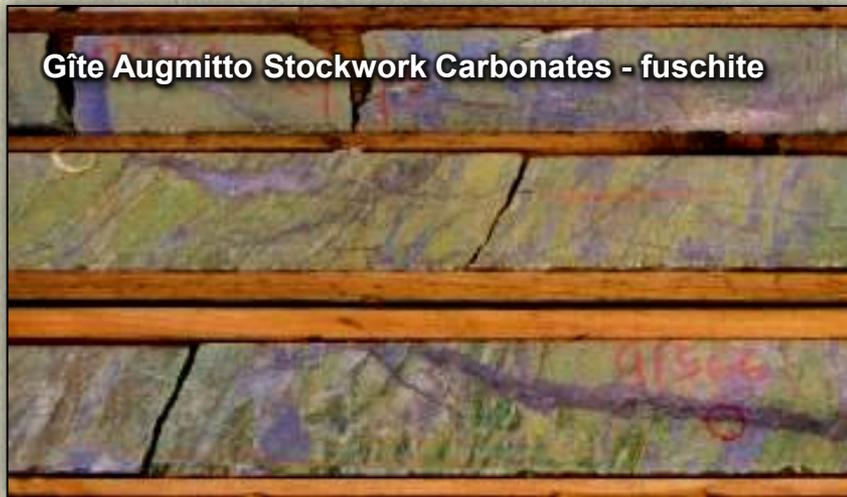
Gîtes à listwanite et sulfurisation absente (stockwork)

Modèle génétique : exemple gîte de Kerr Addison (Smith et al., 1993)



*Système non-pulsatif (en général 2 ou 3 stockworks superposés) ?
Flux hydrothermal continu*

Gîtes à listwanite et sulfurisation absente (stockwork)



Autres gîtes avec stockworks dans le Sud de l'Abitibi



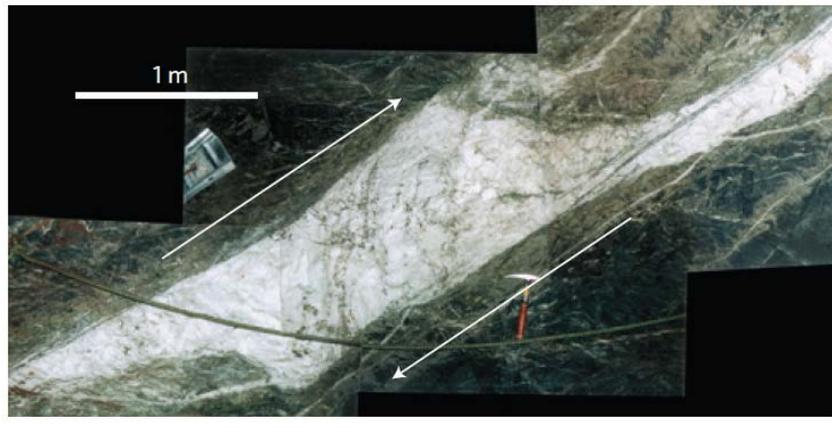
Gîtes à veines et faible sulfurisation

Archétype « Or filonien » (Sigma-Lamaque)

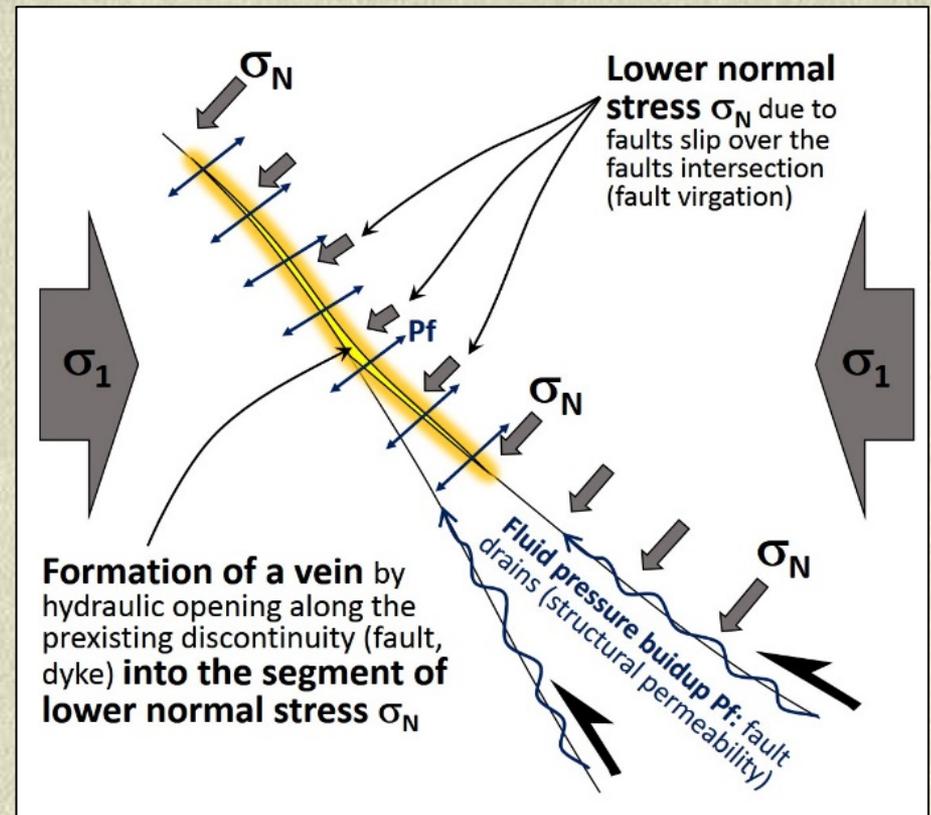
- Au porté par veines ± massives de différentes natures : veines de tension, *fault-fill veins*
- Dans failles subsidiaires à un une faille majeure transcrustal
- **Empreinte secondaire en éléments majeure est très restreinte (typiquement < 5 m)**
- **Qtz-Carb ± albite ± tourmaline ± séricite**
- Empreinte secondaire en éléments trace...

Piégeage Au « physique » contrôlé par dilatation des veines (chute P_f) lors des ruptures sismiques de la faille majeure

Mise en place **incrémentale** des gîtes (1000iers de ruptures...)



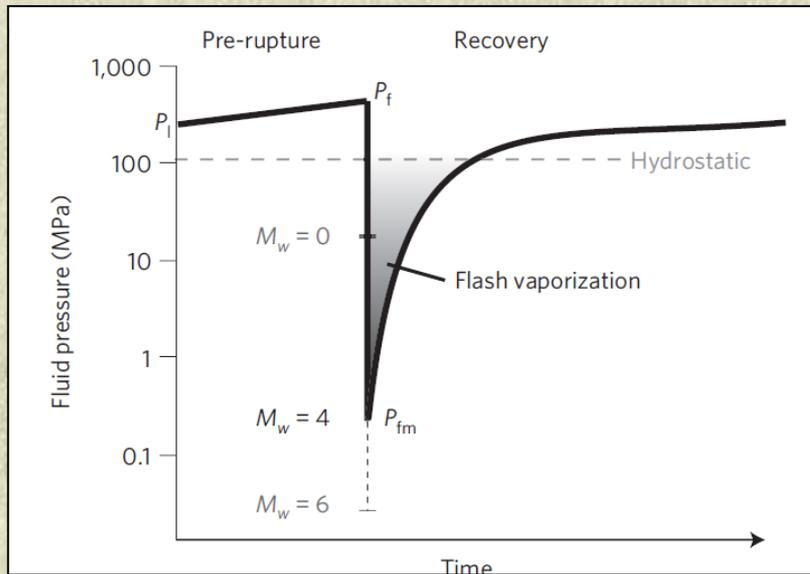
Kambalda (Australie) Weatherley et Henley (2013)



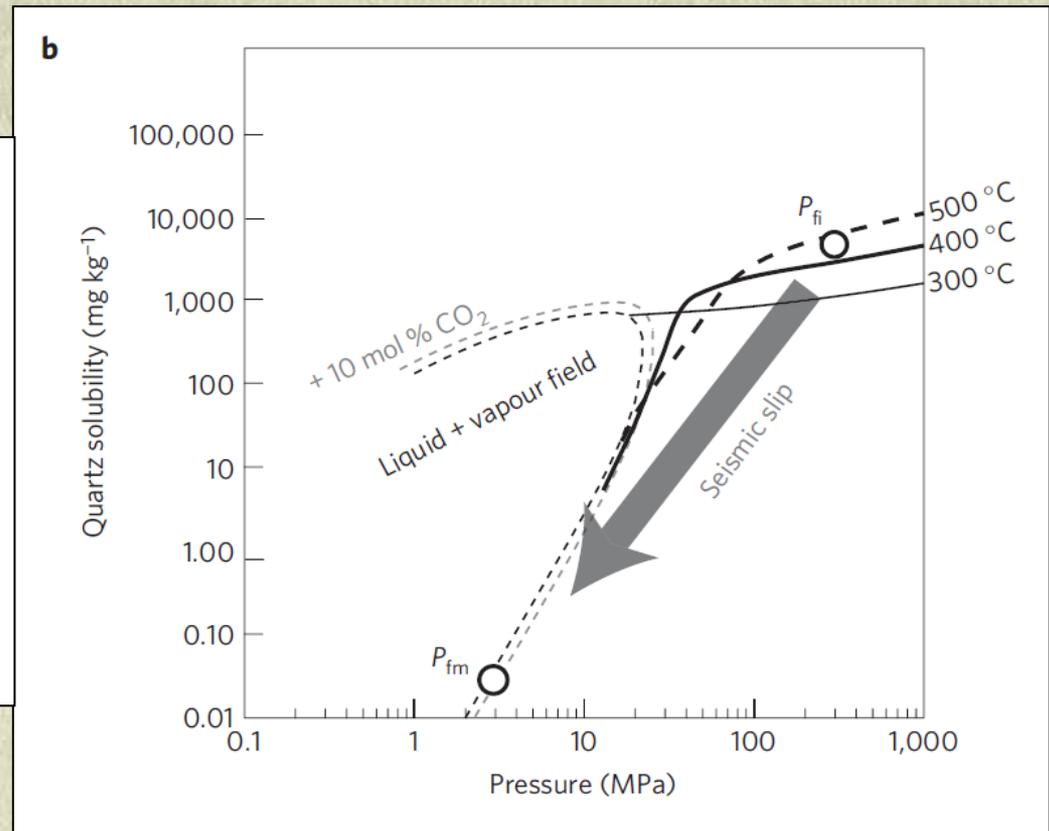
Gîtes à veines massives et faible sulfurisation

Modele génétique *flash vaporization* (Weatherley et Henley,, 2013)

Chute Pf → chute solubilité SiO₂ + métaux



Weatherley et
Henley (2013)



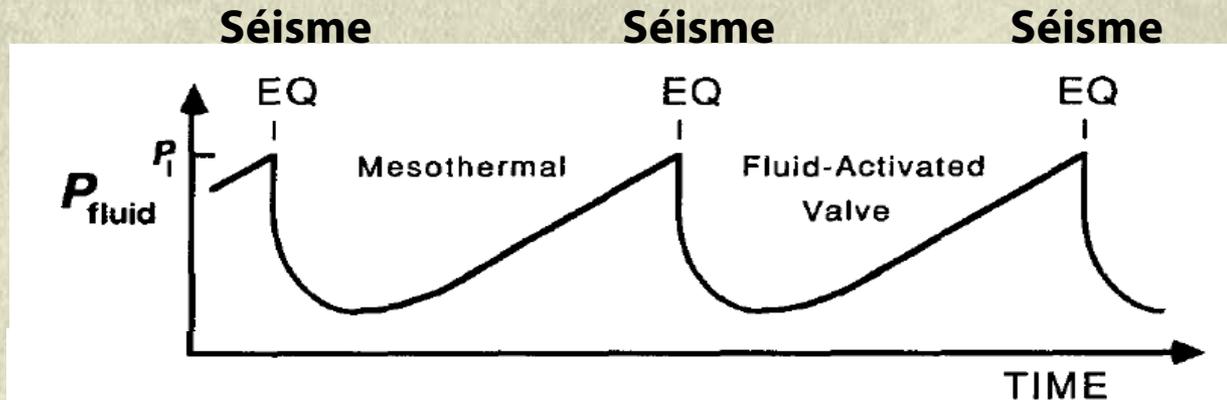
Flux hydrothermal pulsatif

Gîtes à veines massives et faible sulfurisation

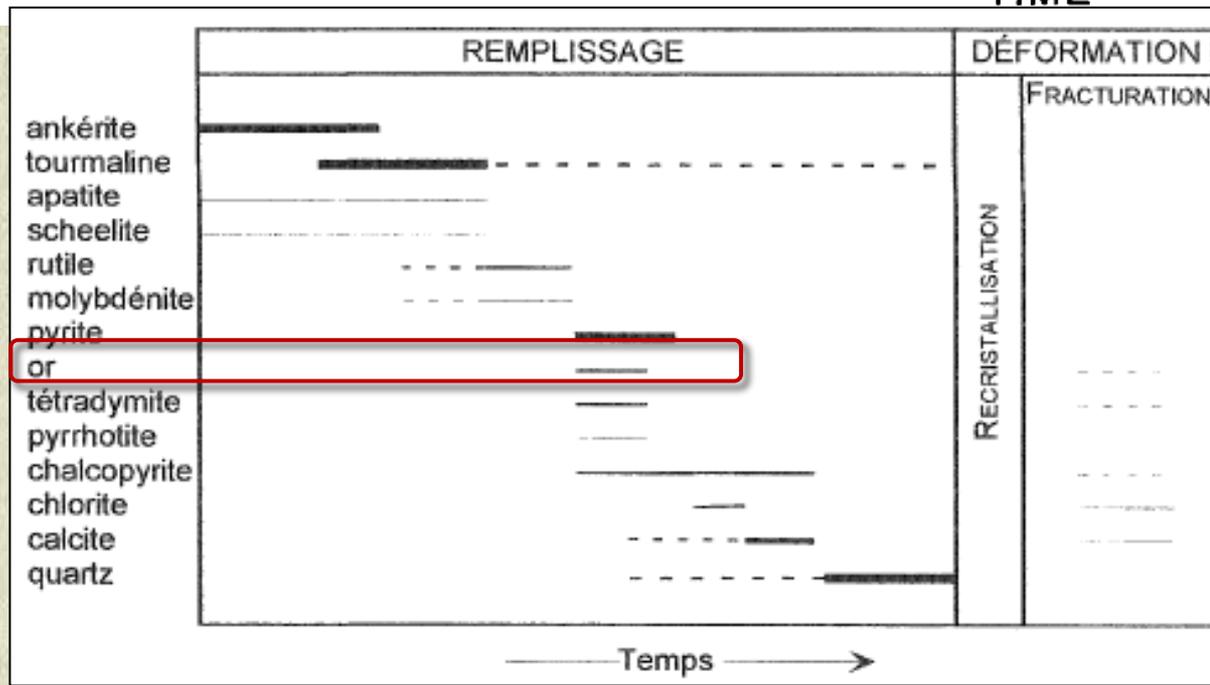
Modele génétique *flash vaporization* (Weatherley et Henley,, 2013)

Fluctuations Pf avec cycle sismique

→ Remplissage cyclique des veines, **veines rubannées**, *crack-seal*



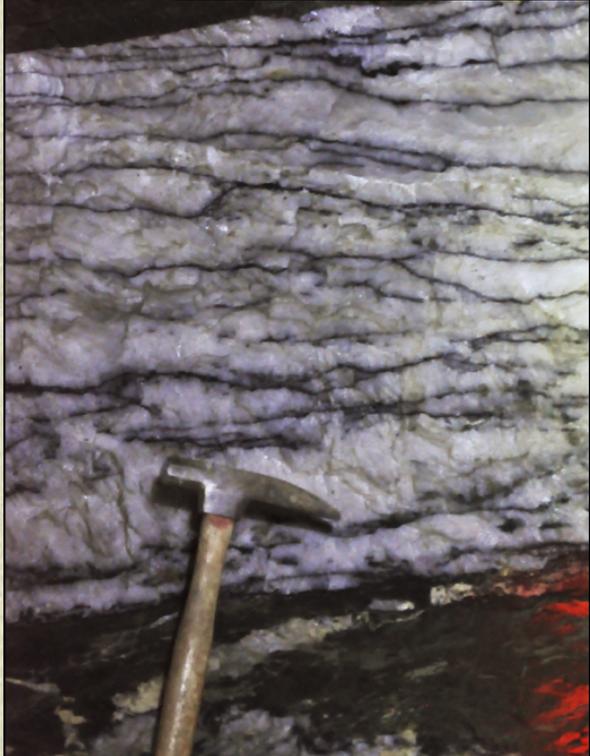
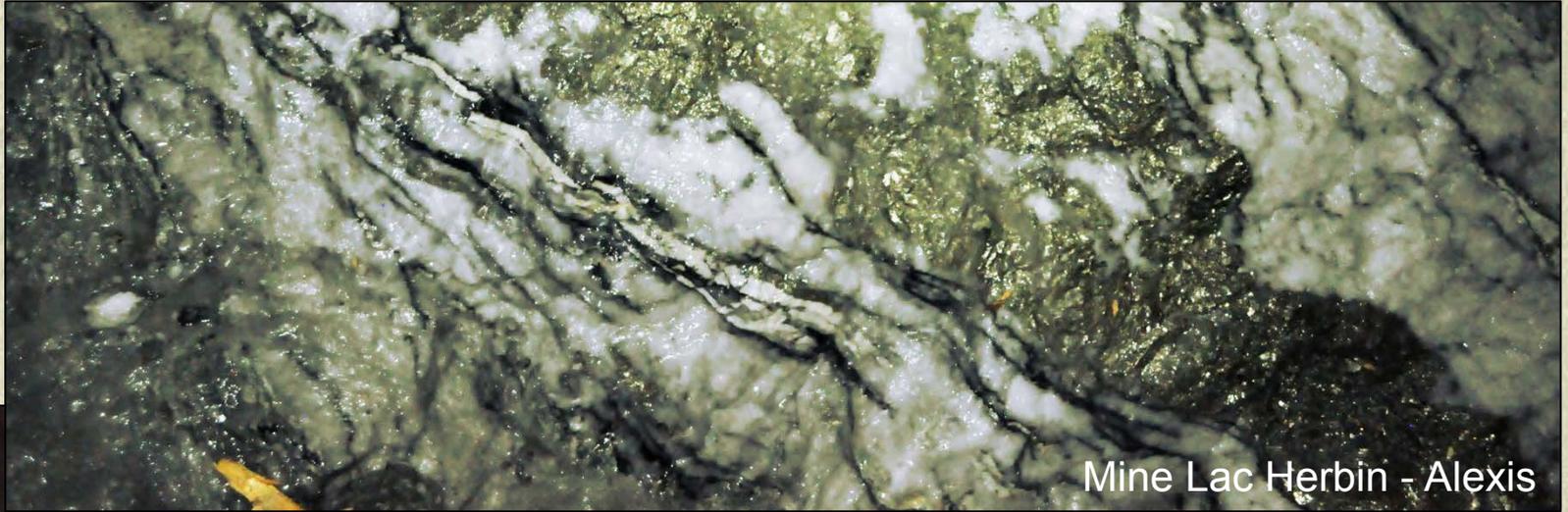
Sibson et al. (1988)



Exemple de séquence de cristallisation, pour chaque incrément sismique (chaque « ruban »)

Gîte Beaufor, Roussy, 2003

Gîtes à veines massives et faible sulfurisation



Mine Beaufor

Gîtes à forte sulfurisation et absence de veines

- **Au lié à de la pyrite fine disséminée** (max 10-15%) et aux épontes de veines et veinules de quartz – carbonates peu denses
- Zones aurifères reliées à **encaissant ferrifère**, pas d'enveloppe basse teneur (limites discrètes, pas de halo aurifère)
- **Empreinte dominée par sulfurisation et très forte silicification**
- Minerai à quartz – chlorite – carbonates – séricite ± albite
- Au quantitativement intimement lié à la pyrite

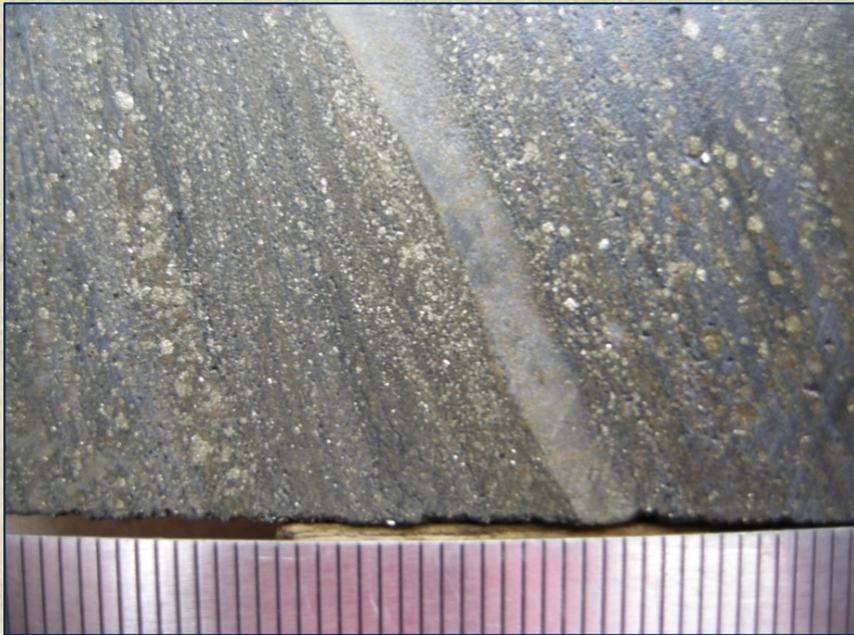


Photo B. Lafrance – gîte Cheminis



Photo Ispolatov et al, 2005 – gîte Anoki Main Zone

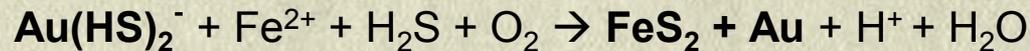
Sulfurisation, pas ou peu de veines (pas chgt Pf) → piégeage « chimique » de Au

Mécanisme de précipitation de Au

- Contrôle stratigraphique des zones aurifères
- Au en inclusions dans la pyrite co-génétique

Sulfurisation = remplacement de mx ferrifères → diminue fS_2 fluide → déstabilisation $Au(HS)_2^-$ et précipitation Au

Coprécipitation de pyrite et or :



Albitisation = baisse de pH dans fluide (Kishida et Kerrich, 1984 ; Couture et Pilote, 1993) → déstabilisation $Au(HS)_2^-$ et précipitation Au

séricite → albite + H^+

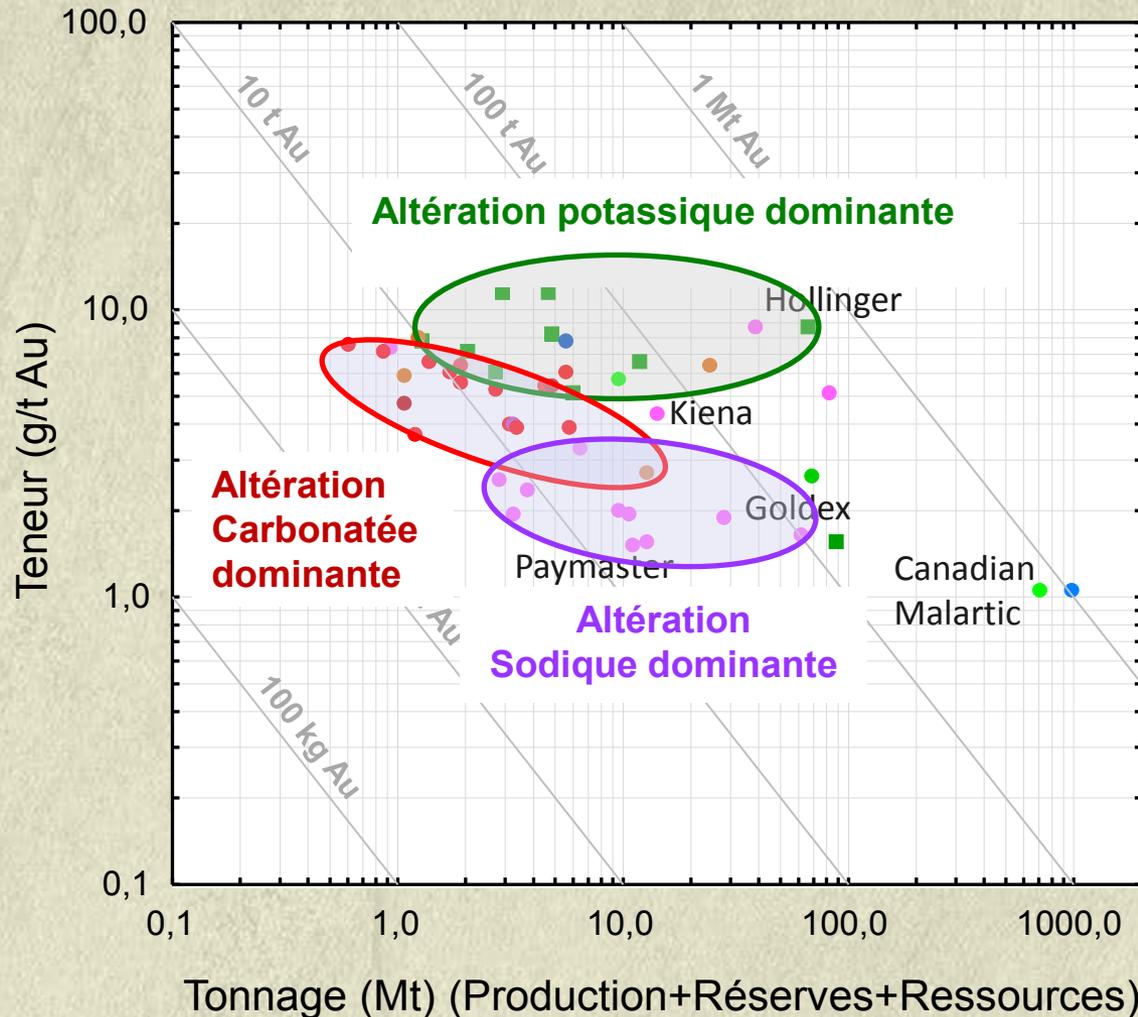
Conclusions

- Empreinte hydrothermale majeure est **très hétérogène à l'échelle régionale**
- **Homogène à l'échelle locale** : *champs hydrothermaux*
- Reflète des **contrôles locaux** : **perméabilité structurale**, état de contraintes effectives (Pf), lithologie encaissante, **mécanisme de précipitation aurifère**
- Reflète existence de **plusieurs systèmes hydrothermaux dissociés** dans le temps et l'espace : bagage géochimique des fluides, régime pulsatif vs flux hydrothermal continu

Merci de votre attention

Empreinte hydrothermale régionale liée à métallogénèse Au

Champs des gisements (échantillons > 1g/t Au)



Altérations proximales dominantes (descriptions de 56 gîtes en Abitibi) :

- Albite
- Albite-Hématite
- Biotite
- Biotite-fK
- Carbonates
- Carbonates-Albite
- Carbonates-Chlorite
- Carbonates-Séricite
- fK
- fK-Albite
- Séricite