

# Halos géochimiques associés aux gisements aurifères hydrothermaux – revue des processus

Damien Gaboury

**UQAC**

Université du Québec  
à Chicoutimi



**CONSOREM**

*Consortium de recherche  
en exploration minérale*

**14 février 2018**

**13 h**

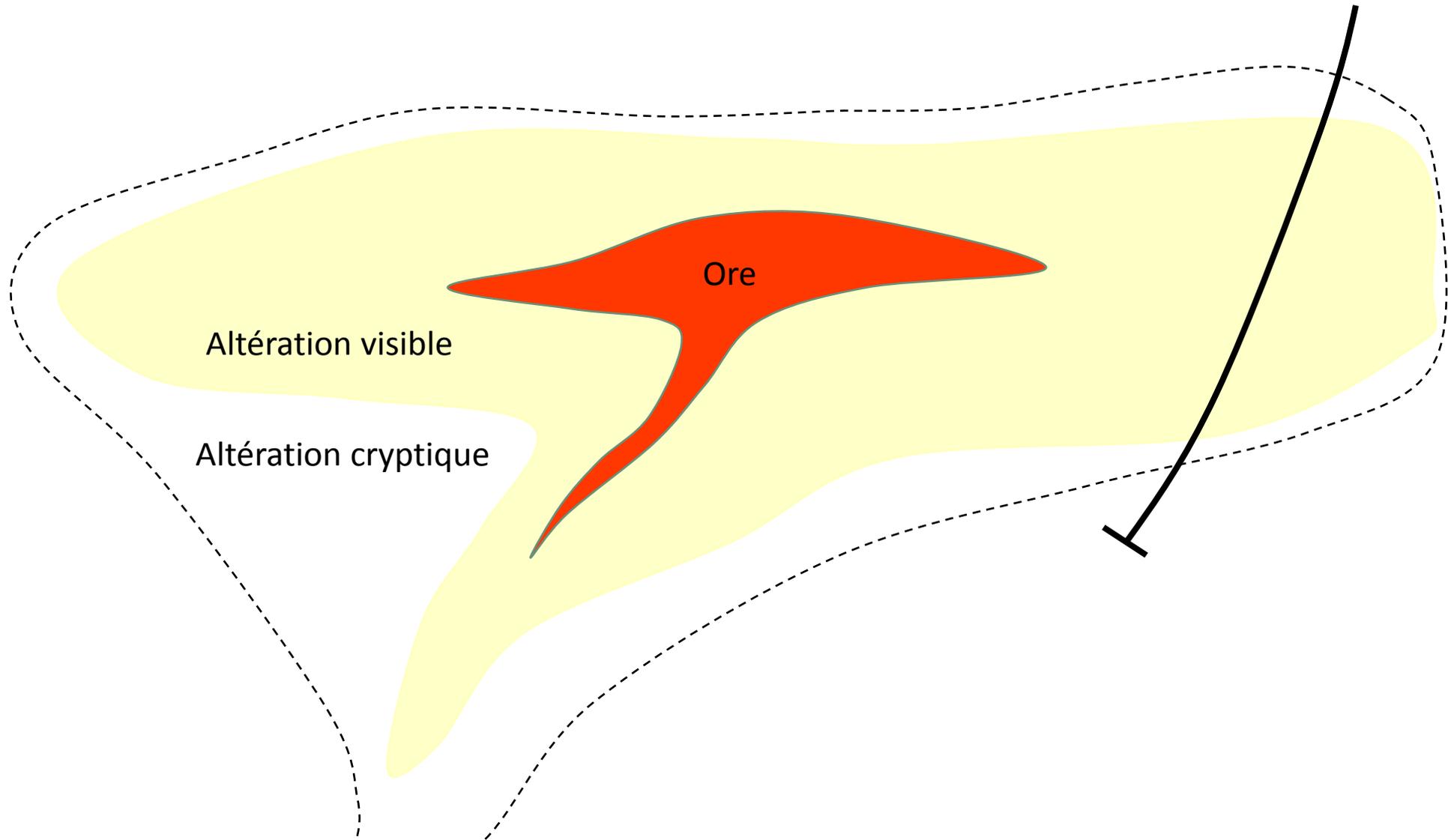
**Coeur des Sciences UQÀM**

Complexe des sciences Pierre-Dansereau - local CO-R700 (*La Chaufferie*),  
entrée extérieure - 201 Président Kennedy - Métro Place des Arts

**MINI-FORUM**

# Le schéma conceptuel

Halo géochimique – correspond zone d'altération visible et cryptique



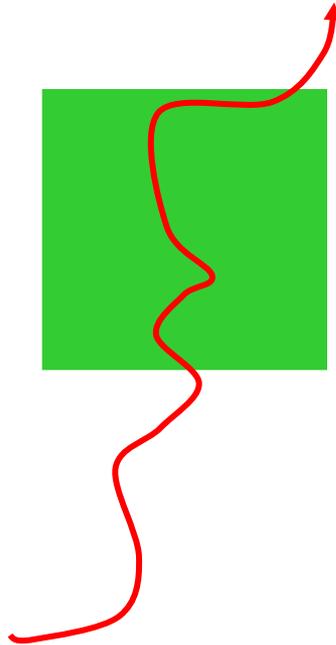
# Altérations hydrothermales

Transformations chimiques et minéralogiques suite à la réaction chimique entre un fluide et la roche

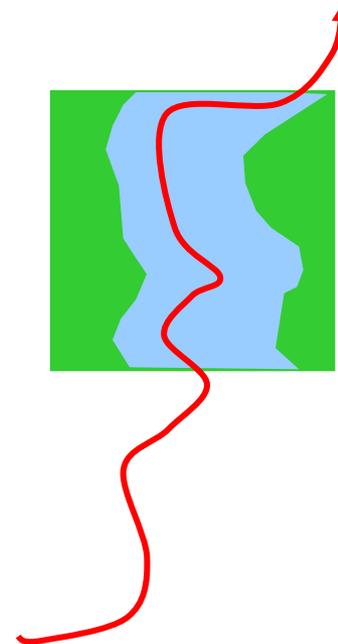
**Roche**



**Roche  
Fluide**



**Roche  
Fluide  
Temps**



# L'altération: résultat d'un déséquilibre chimique

C'est de la thermodynamique contrôlée par:

- 1) Le rapport eau-roche (W/R) - régime hydraulique - porosité
- 2) La composition de la roche
- 3) La composition du fluide (pH, liants,  $fO_2$ , la composition en ions)
- 4) La température du fluide (température des réactions)
- 5) La différence de température entre le fluide et la roche ( $\Delta T^\circ$ )
- 6) La source de l'or

Fluide:  $H_2O$  + Ions majeurs + Ions traces (métaux)

# Différents types de gisements Au hydrothermaux

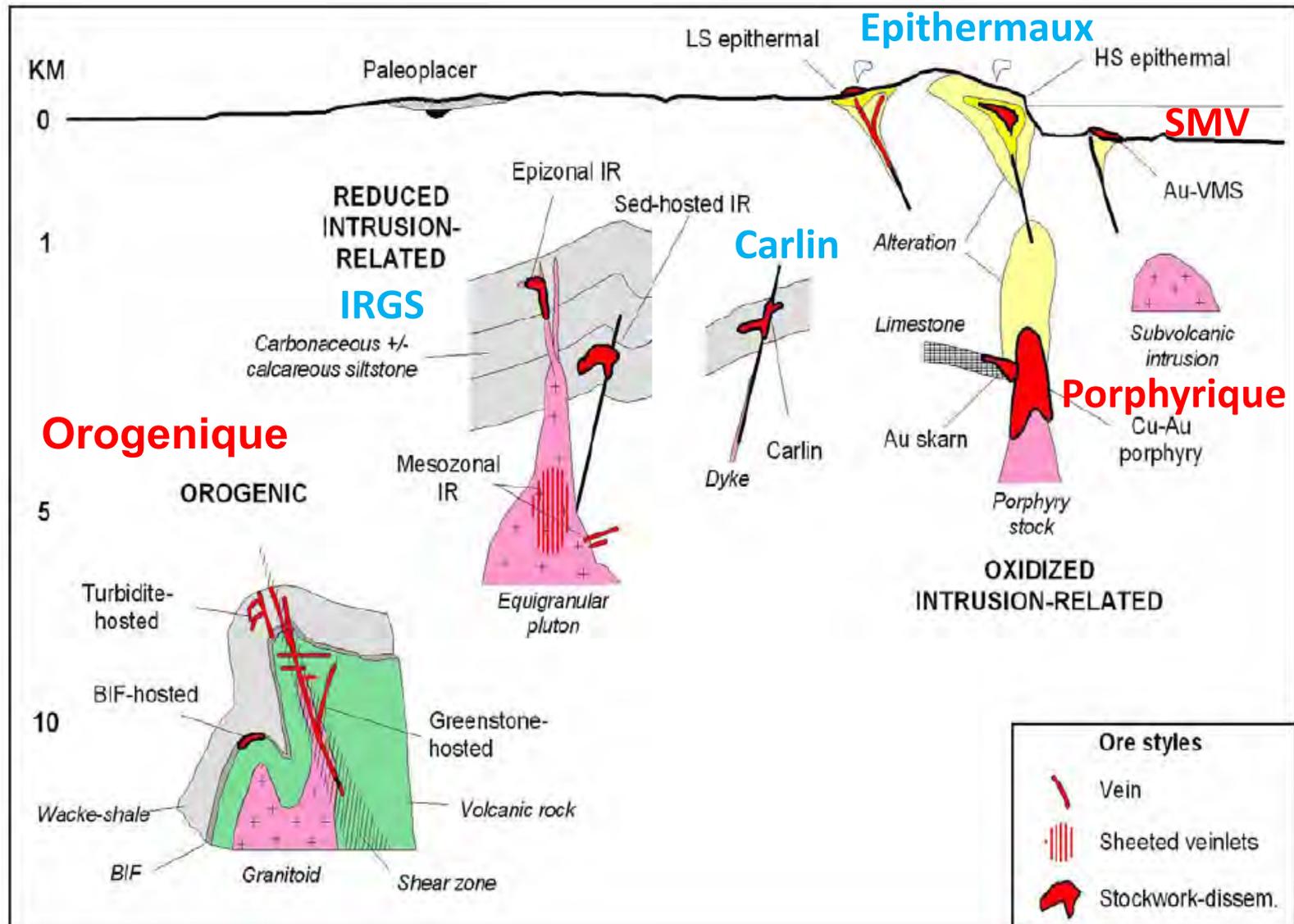
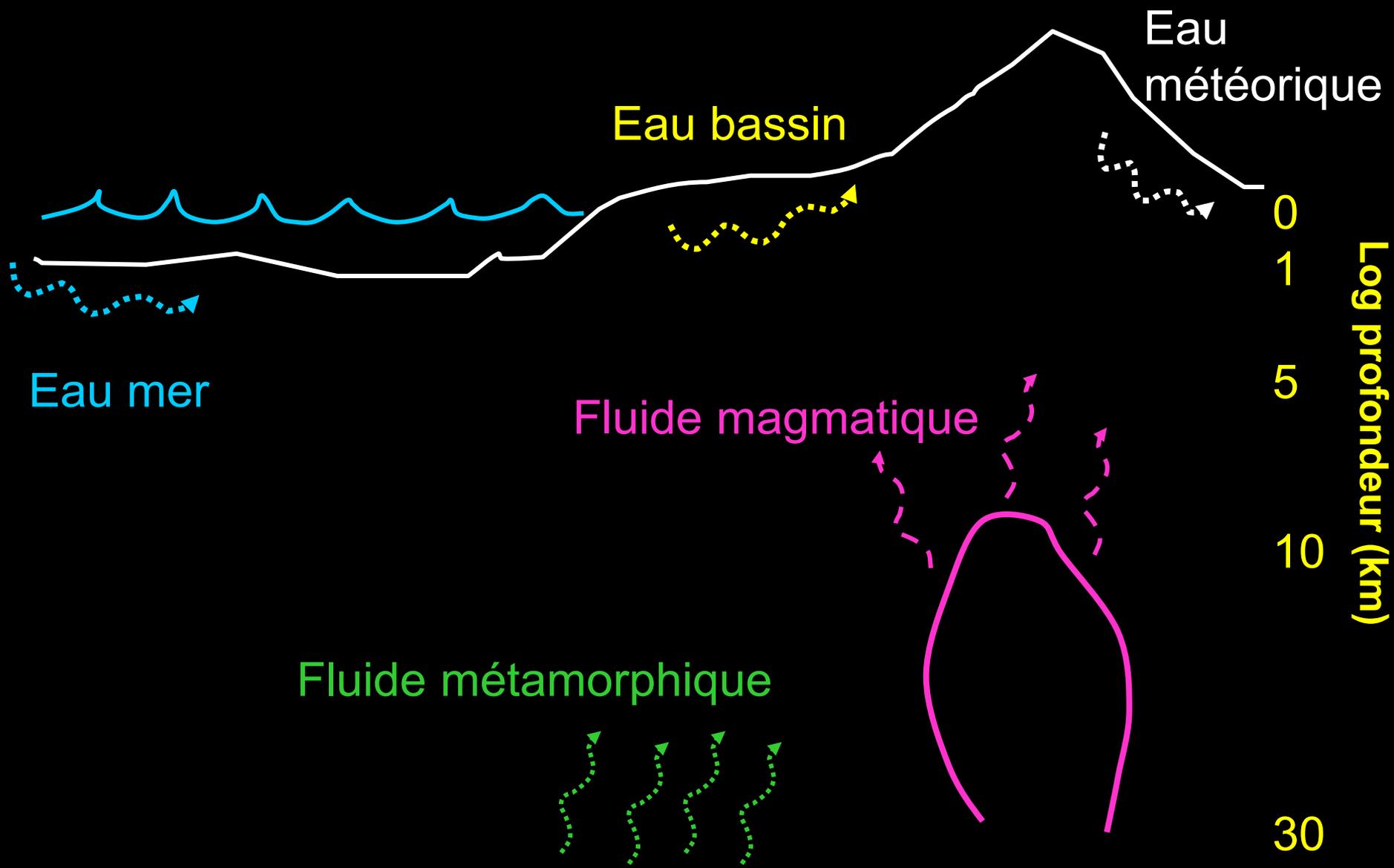
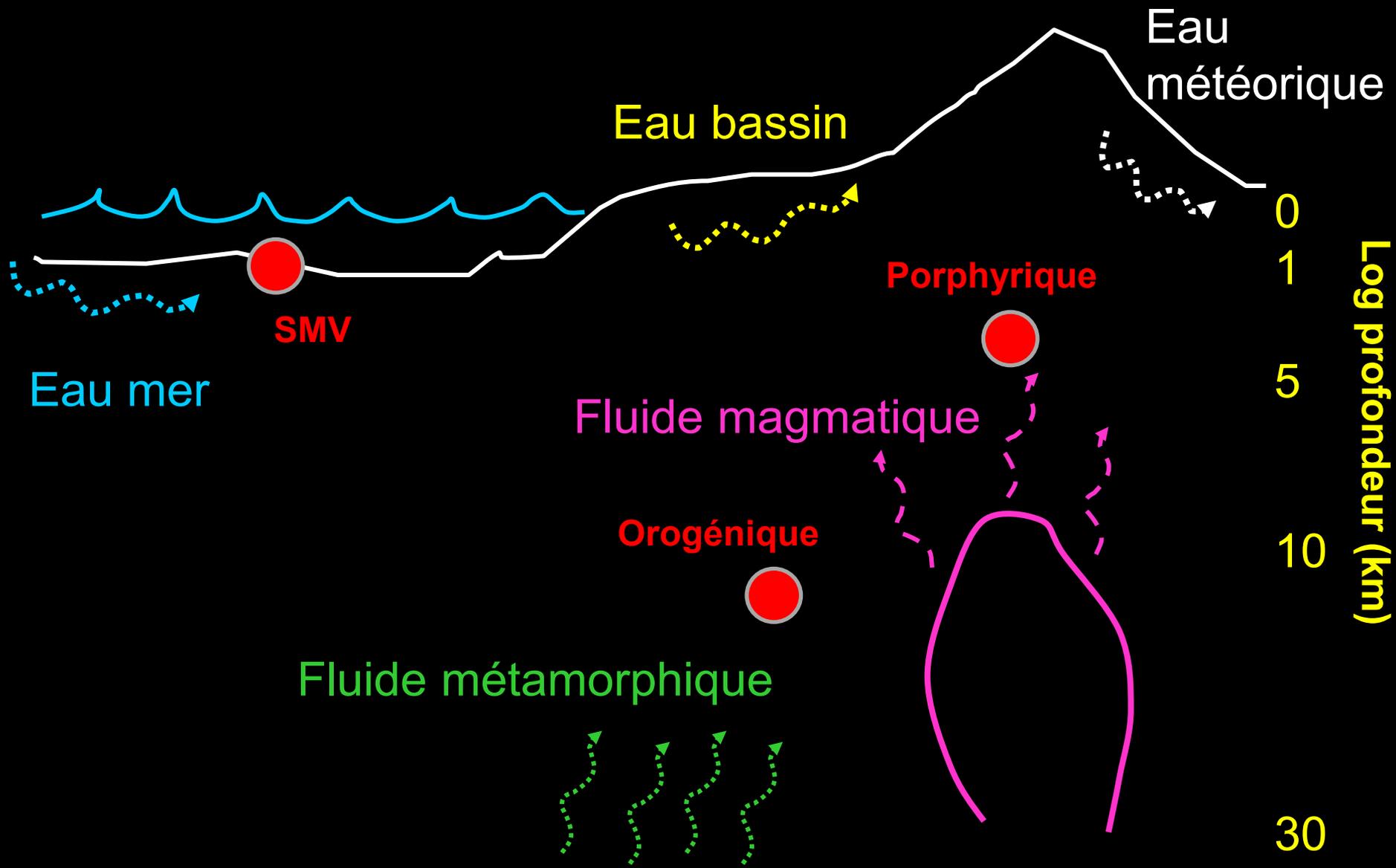


Figure 1: Schematic cross section showing the key geologic elements of the main gold systems and their crustal depths of emplacement. Note the logarithmic depth scale. Modified from Poulsen et al. (2000), and Robert (2004a).

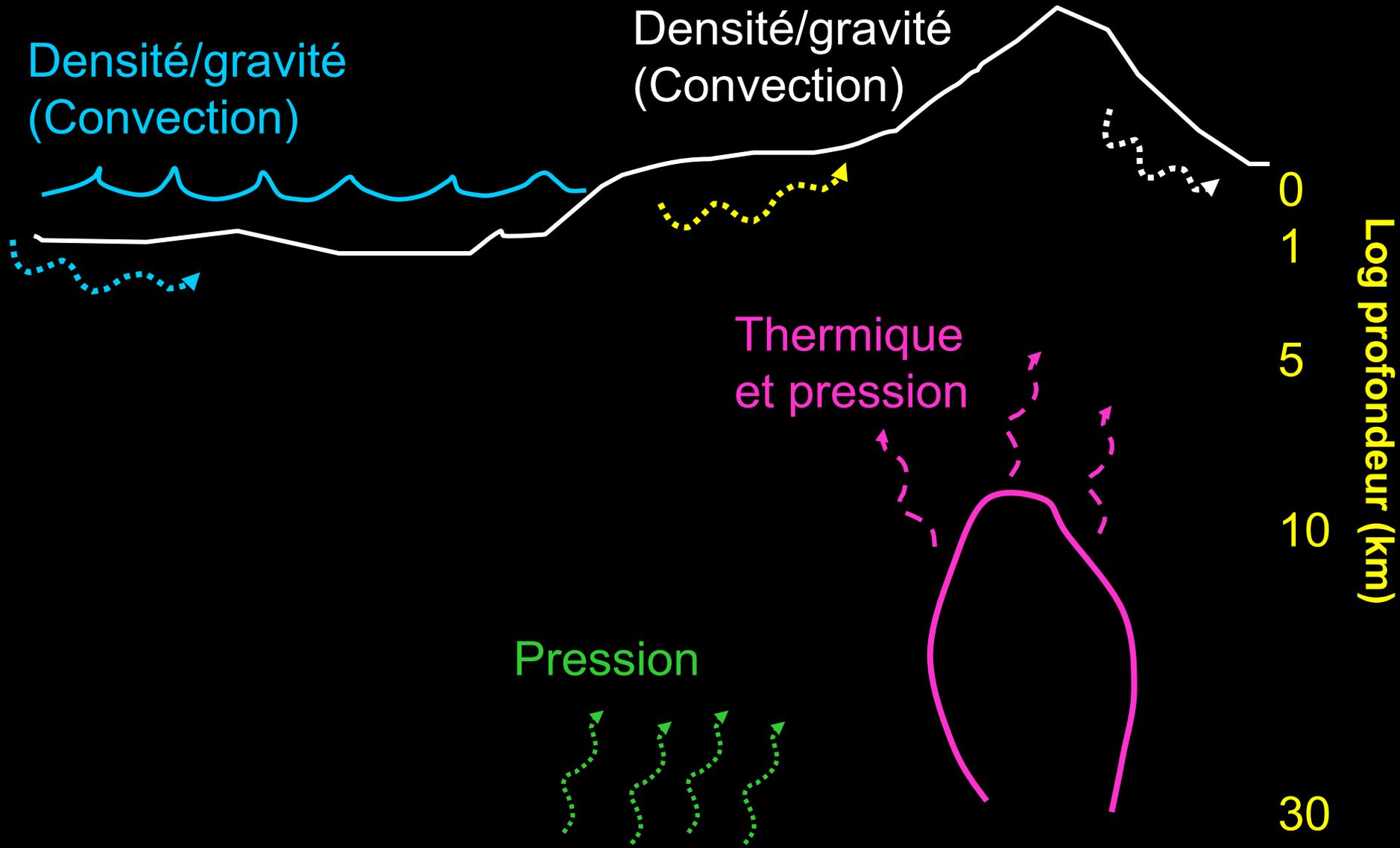
# Fluides en fonction de la profondeur



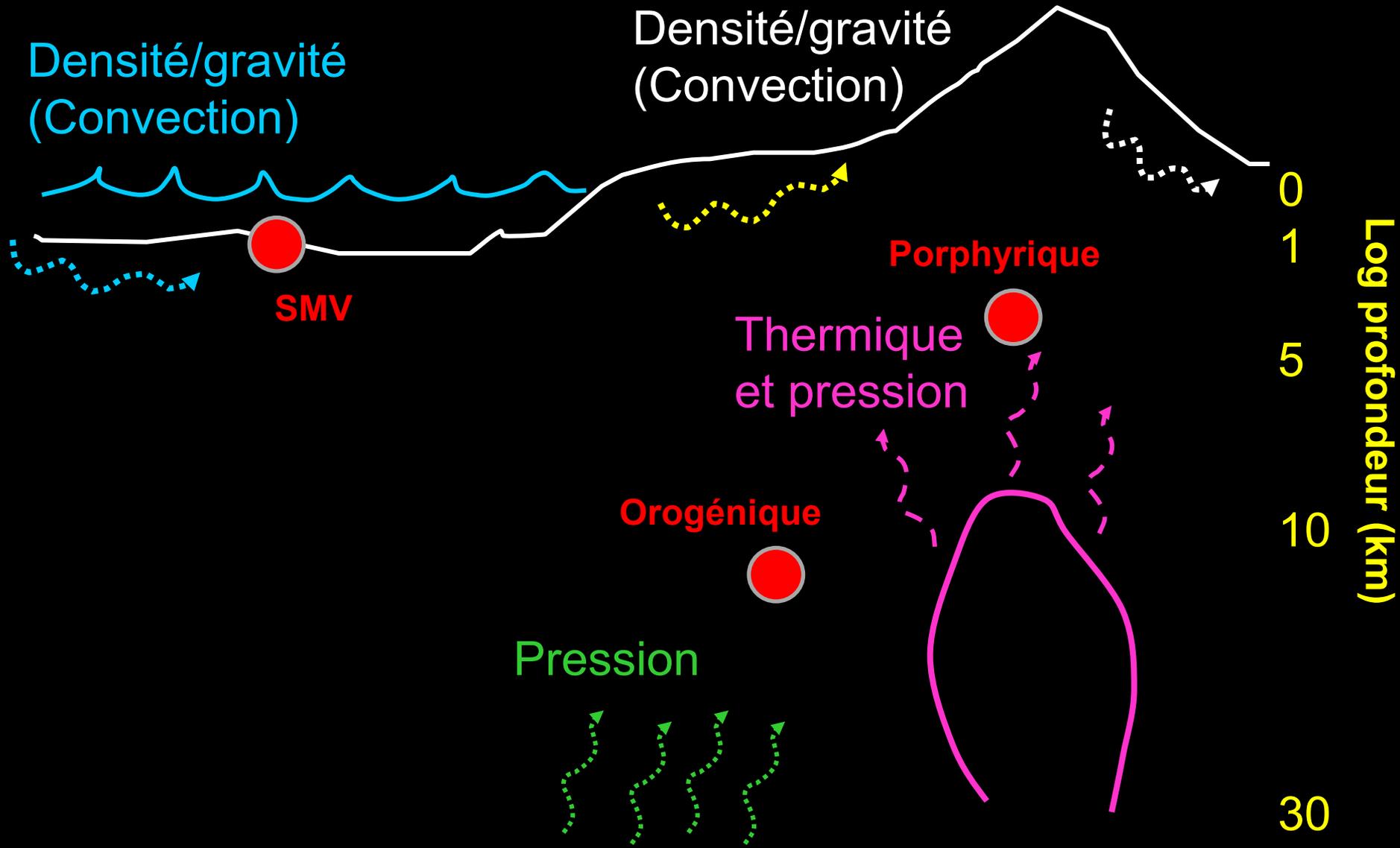
# Fluides en fonction de la profondeur



# Mécanismes de mise en mouvement des fluides – régime hydraulique

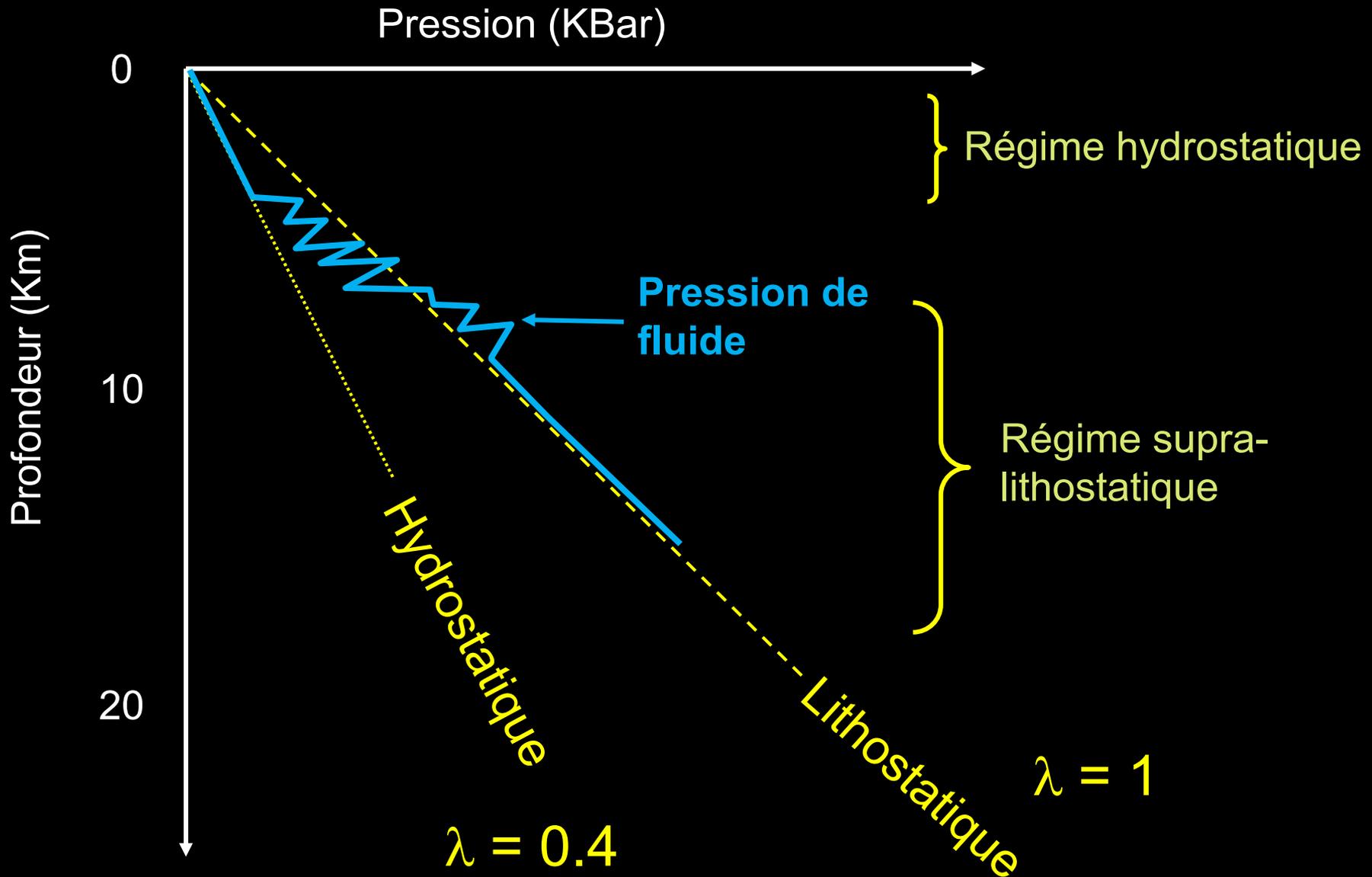


# Mécanismes de mise en mouvement des fluides

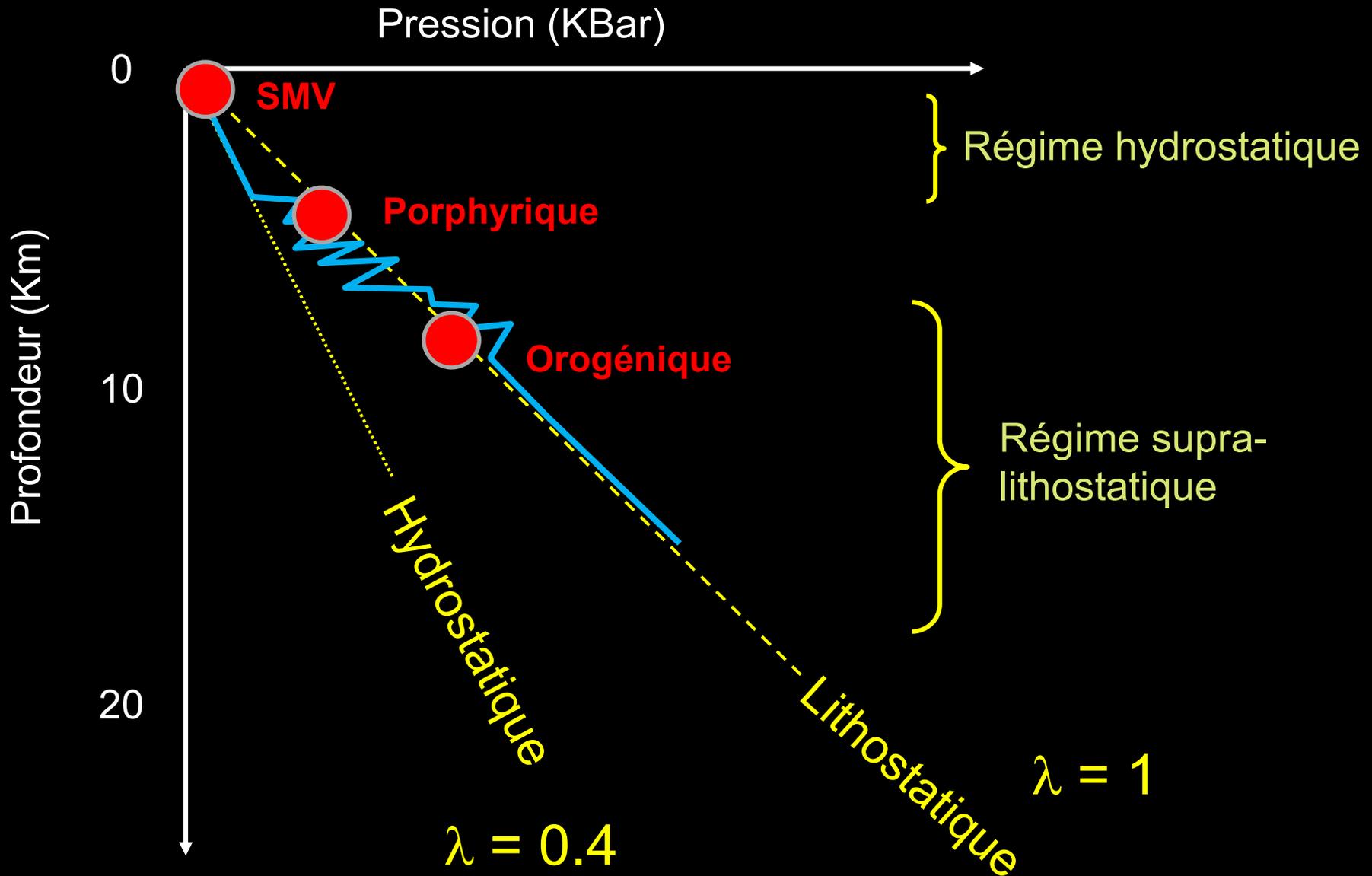


# Les regimes hydrauliques

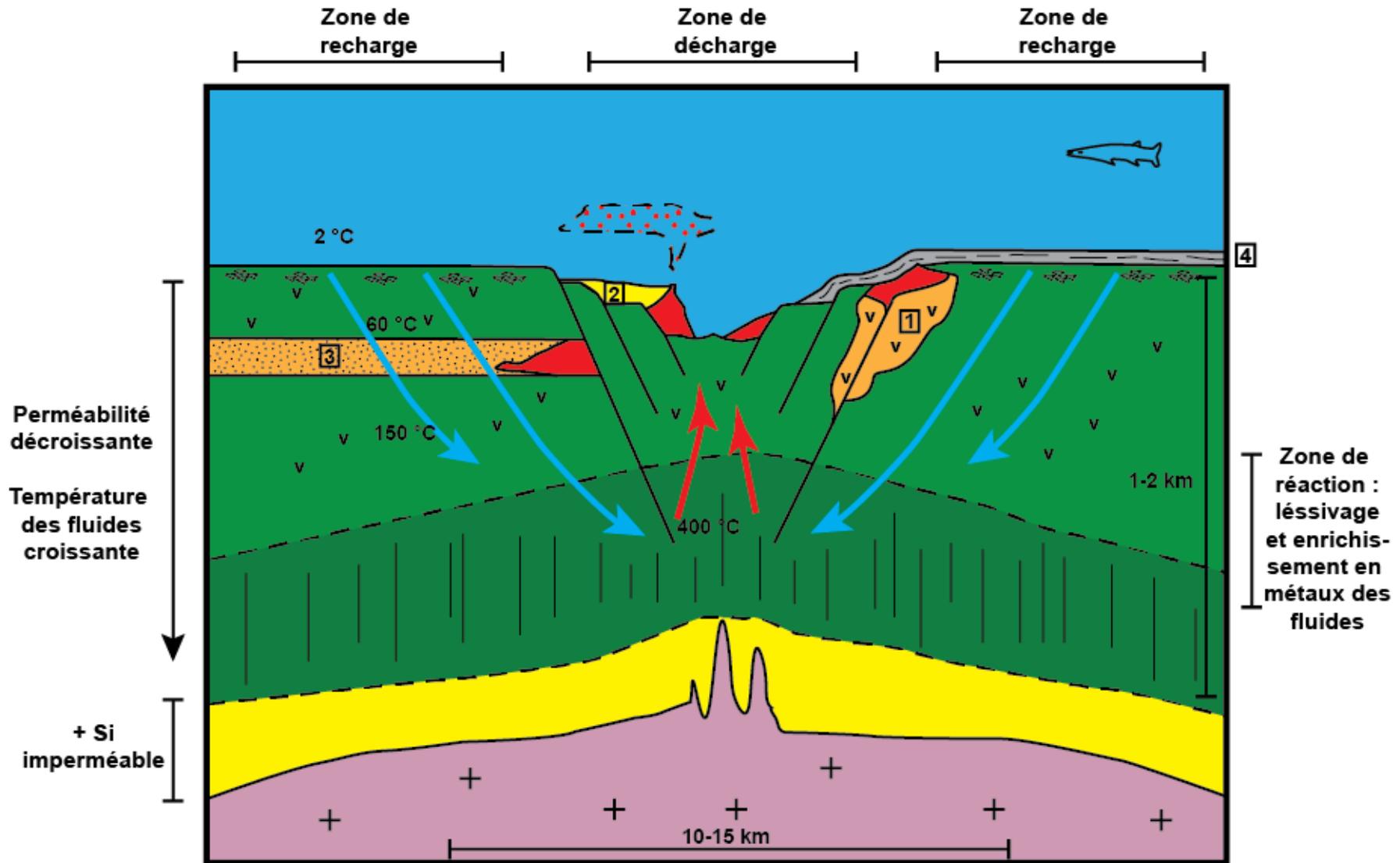
De façon générale, la porosité est une fonction décroissante de la profondeur



# Les regimes hydrauliques

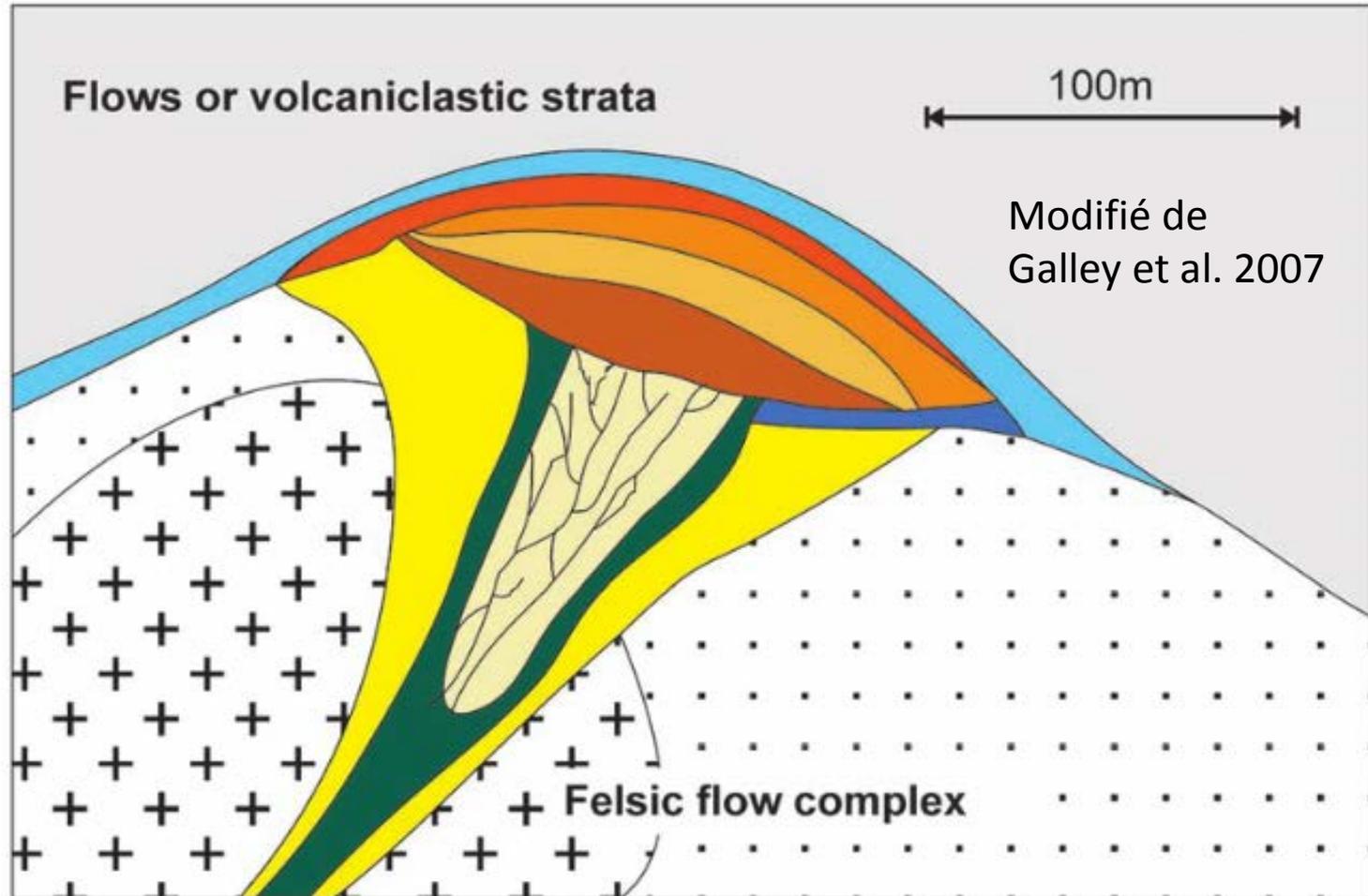


# Systeme hydrothermal SMV Modifié Franklin et al., 2005



- 1** Crypto-dôme de rhyolites    **2** Chert et/ou formation de fer    **3** Volcanoclastites perméables
- 4** Turbidites, shales, sédiments métallifères

# Zonalité classique des altérations hydrothermales



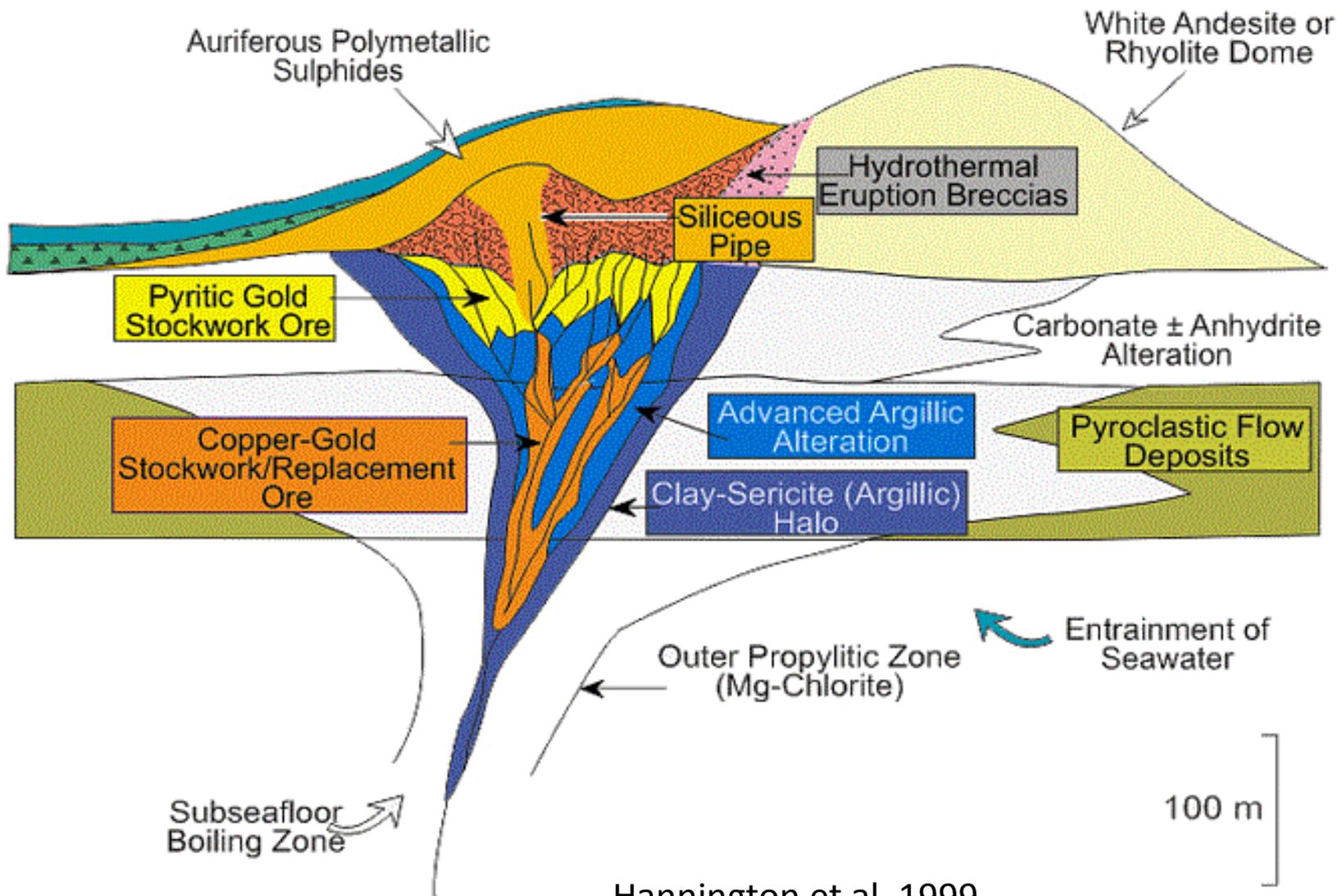
## Alteration

- Sericite-quartz
- Chlorite-sericite
- Quartz-chlorite

- Pyrite-spalerite-galena tetrahedrite-Ag-Au
- Pyrite-spalerite-galena
- Pyrite-spalerite-chancopyrite
- Chalcopryite-pyrrhotite-pyrite

- Barite(Au)
- Carbonate-gypsum
- Chalcopryite-pyrite veins

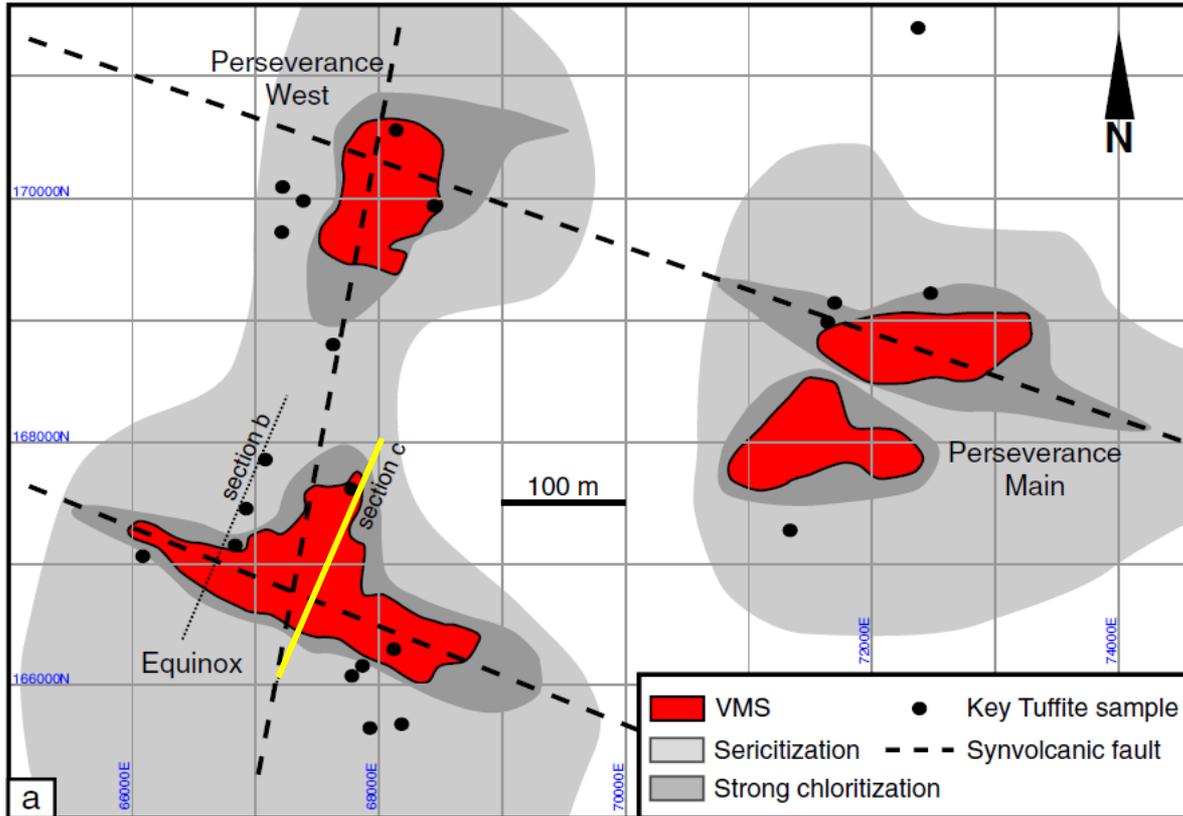
# SMV aurifère avec des altérations alumineuses



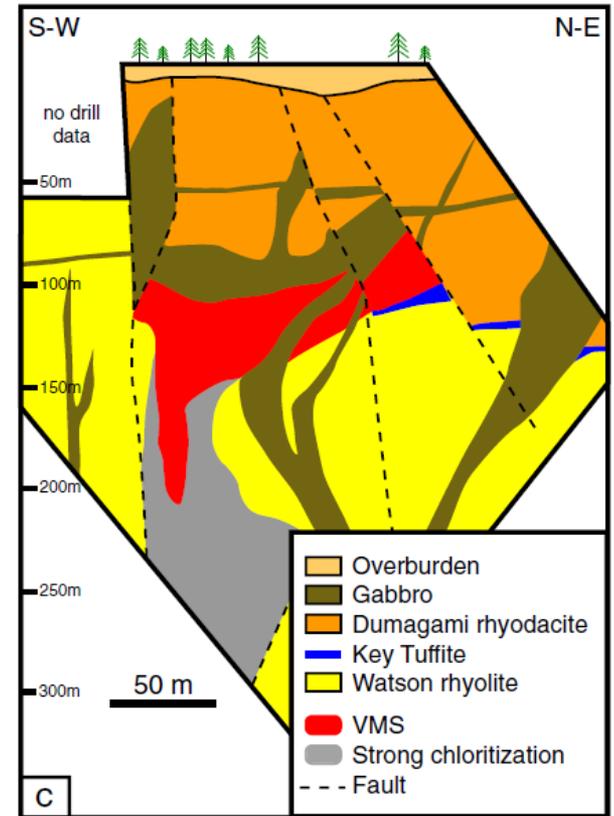
# Zonalité des altérations hydrothermales

## Cas de Persevérence, Matagami

Vue en plan



Vue en coupe (section C)





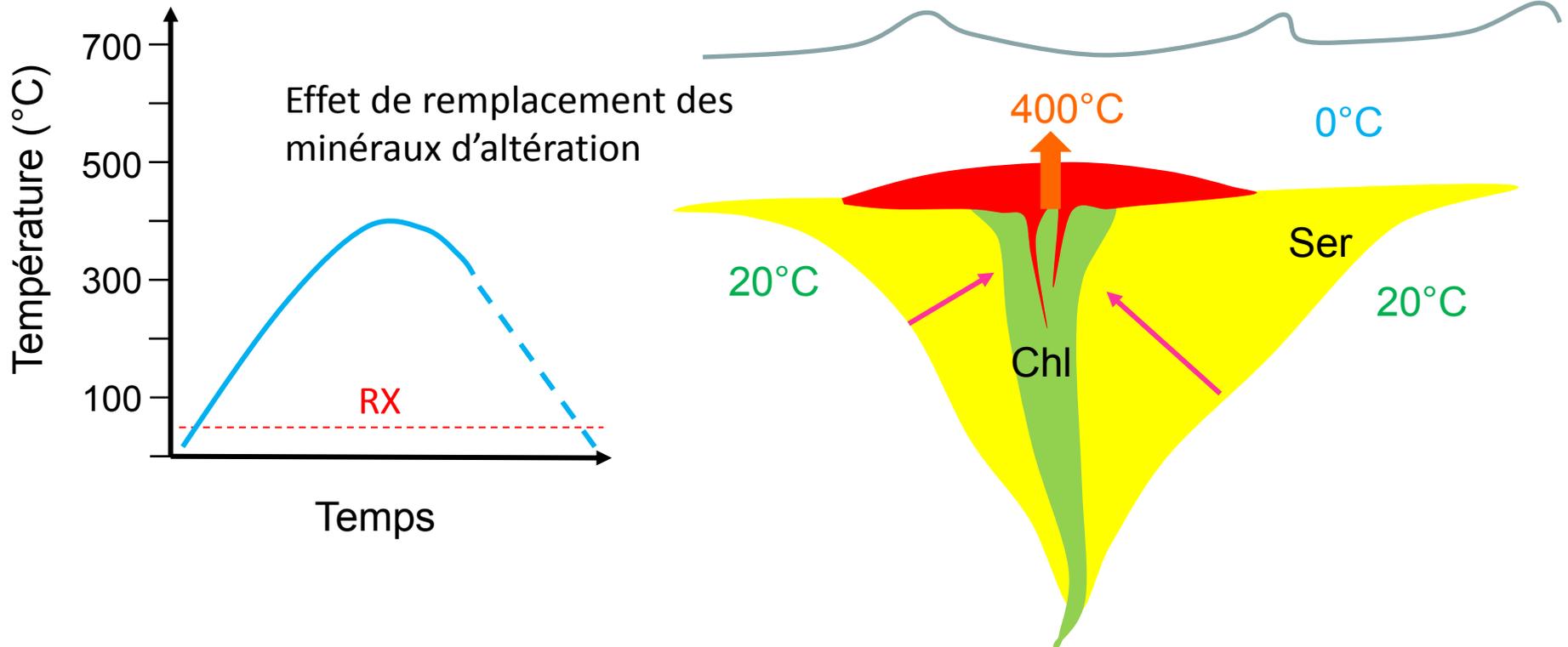
# Système SMV en résumé

Système évolutif en augmentation de température (20 à 400°C)

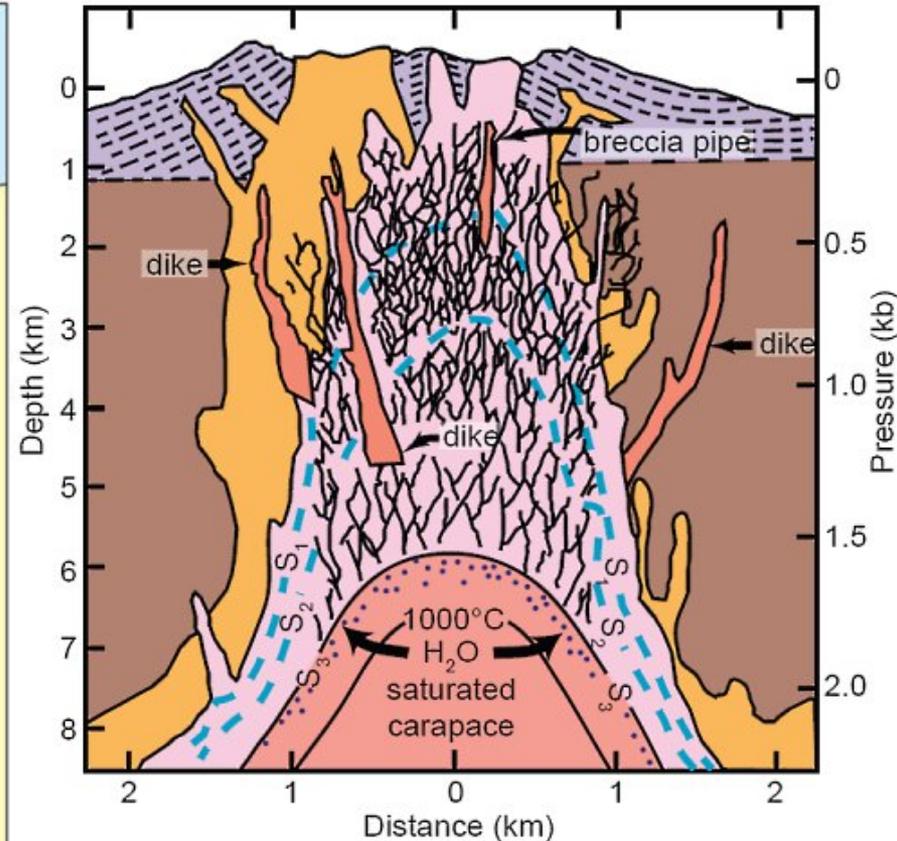
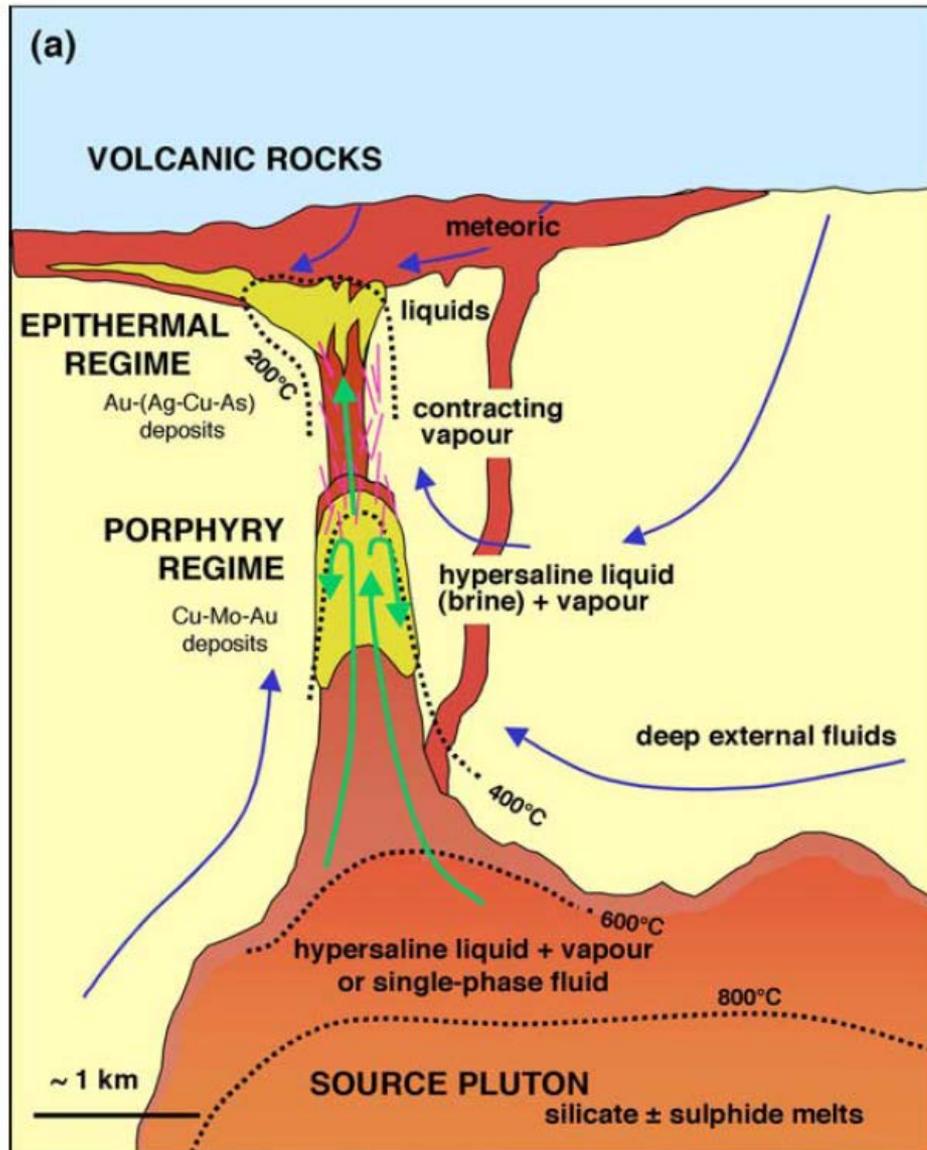
Système réactif, car  $\Delta T^\circ$  atteint jusqu'à 400°C

Large halo, car roches volcaniques poreuses, fracturation

Régime hydraulique hydrostatique (subsurface)

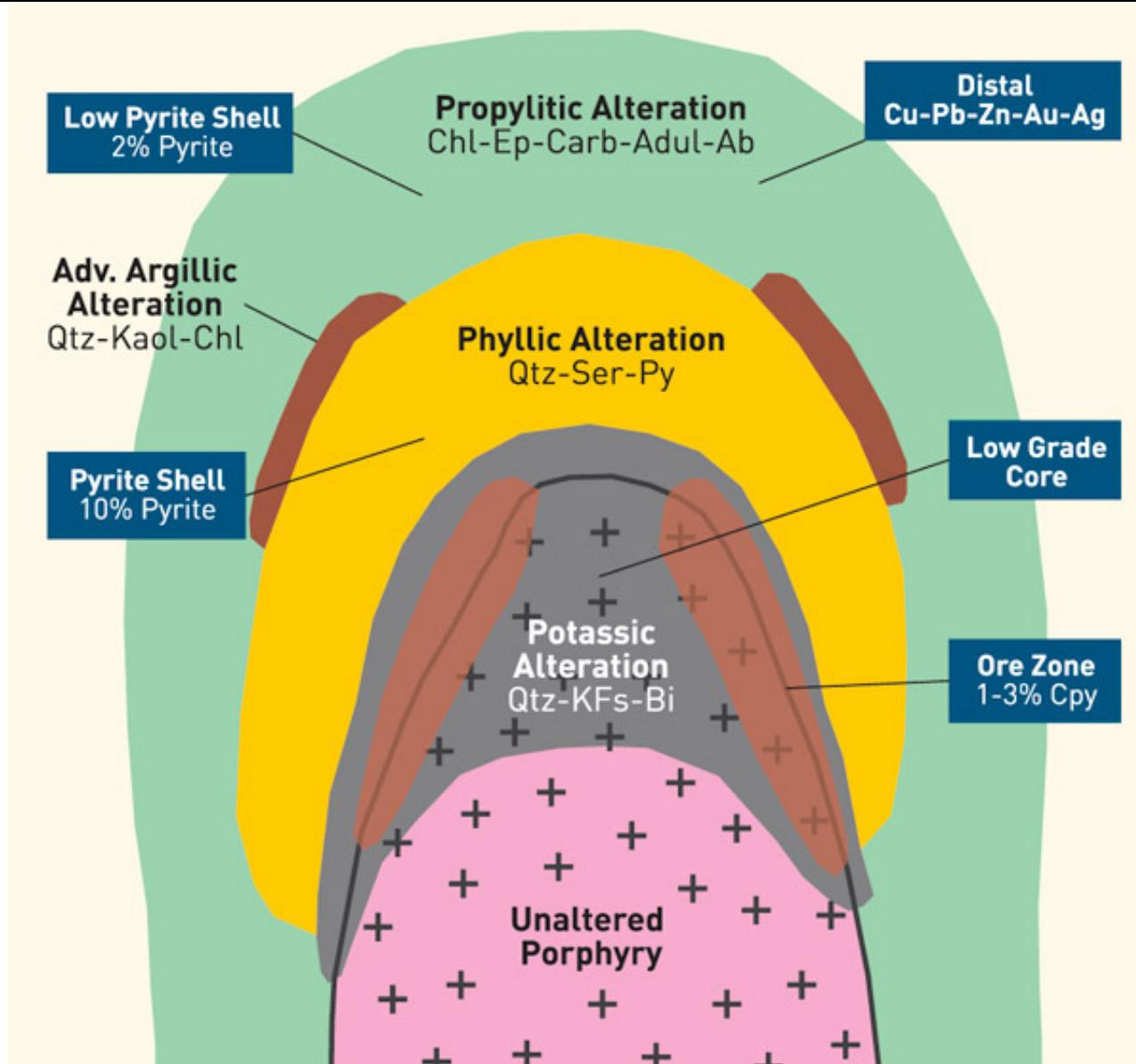


# Système porphyrique - modèle



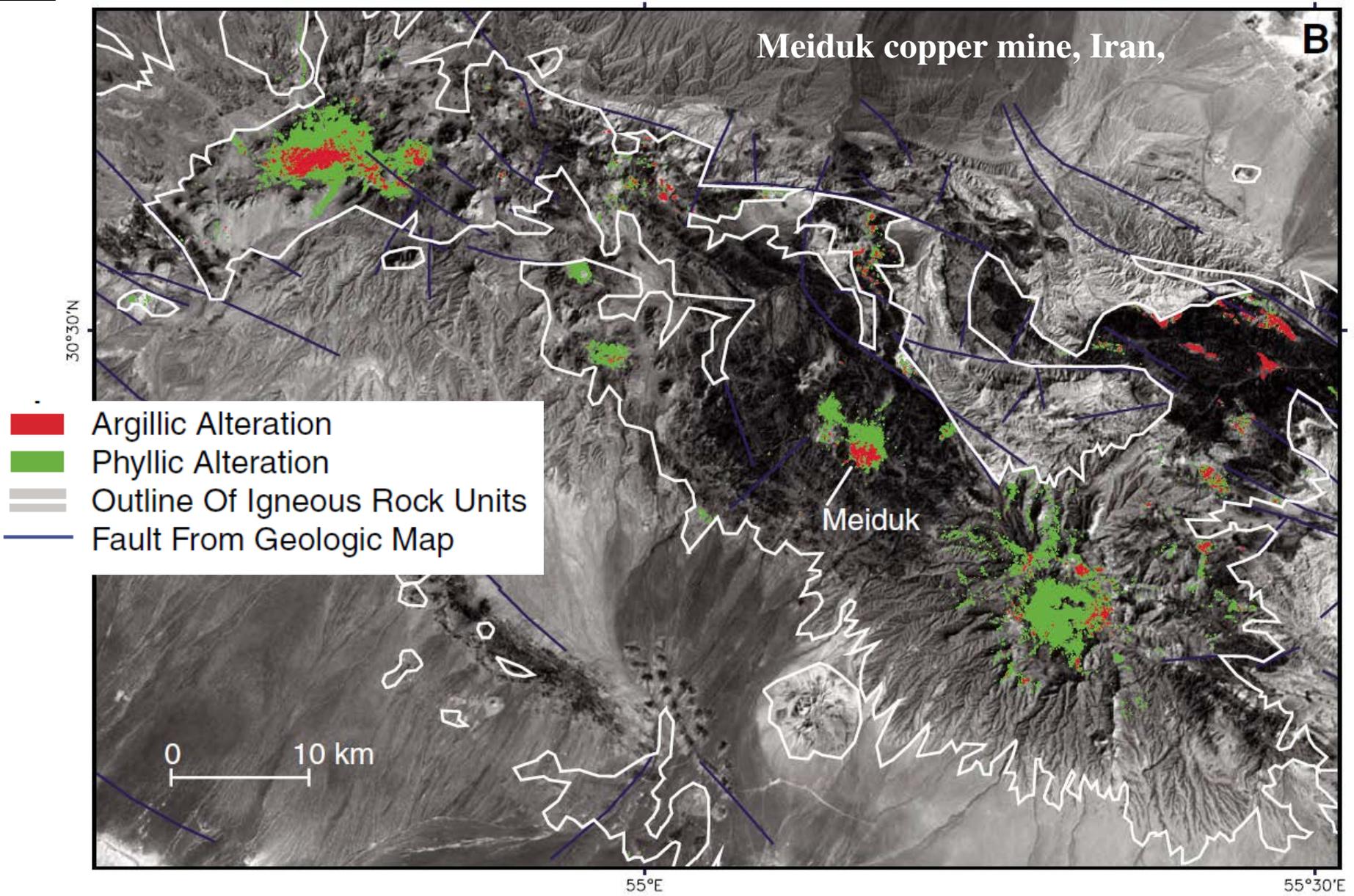
Modifié de Burnham, 1979,  
Geochemistry of hydrothermal ore  
deposits

# Halo d'altération hydrothermale

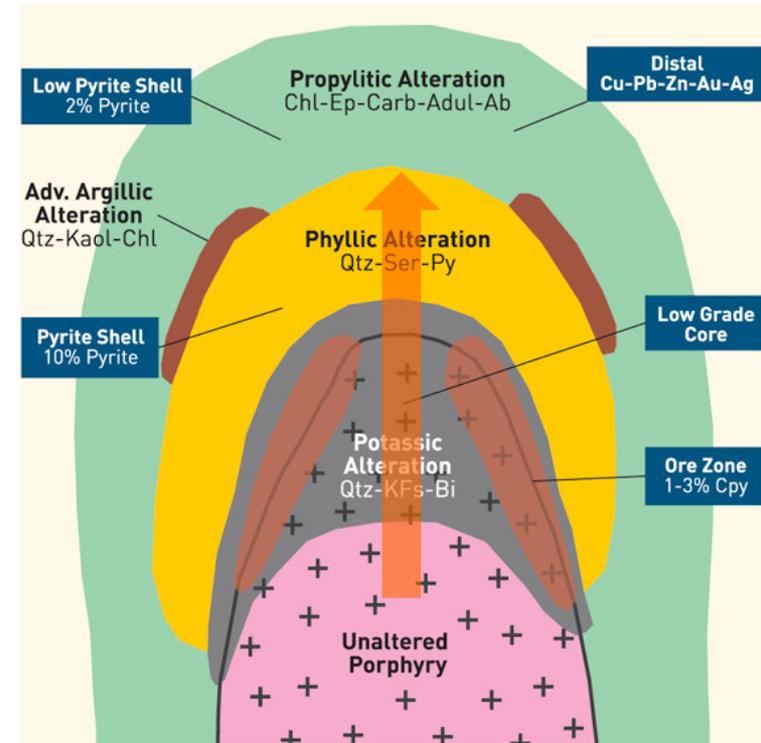
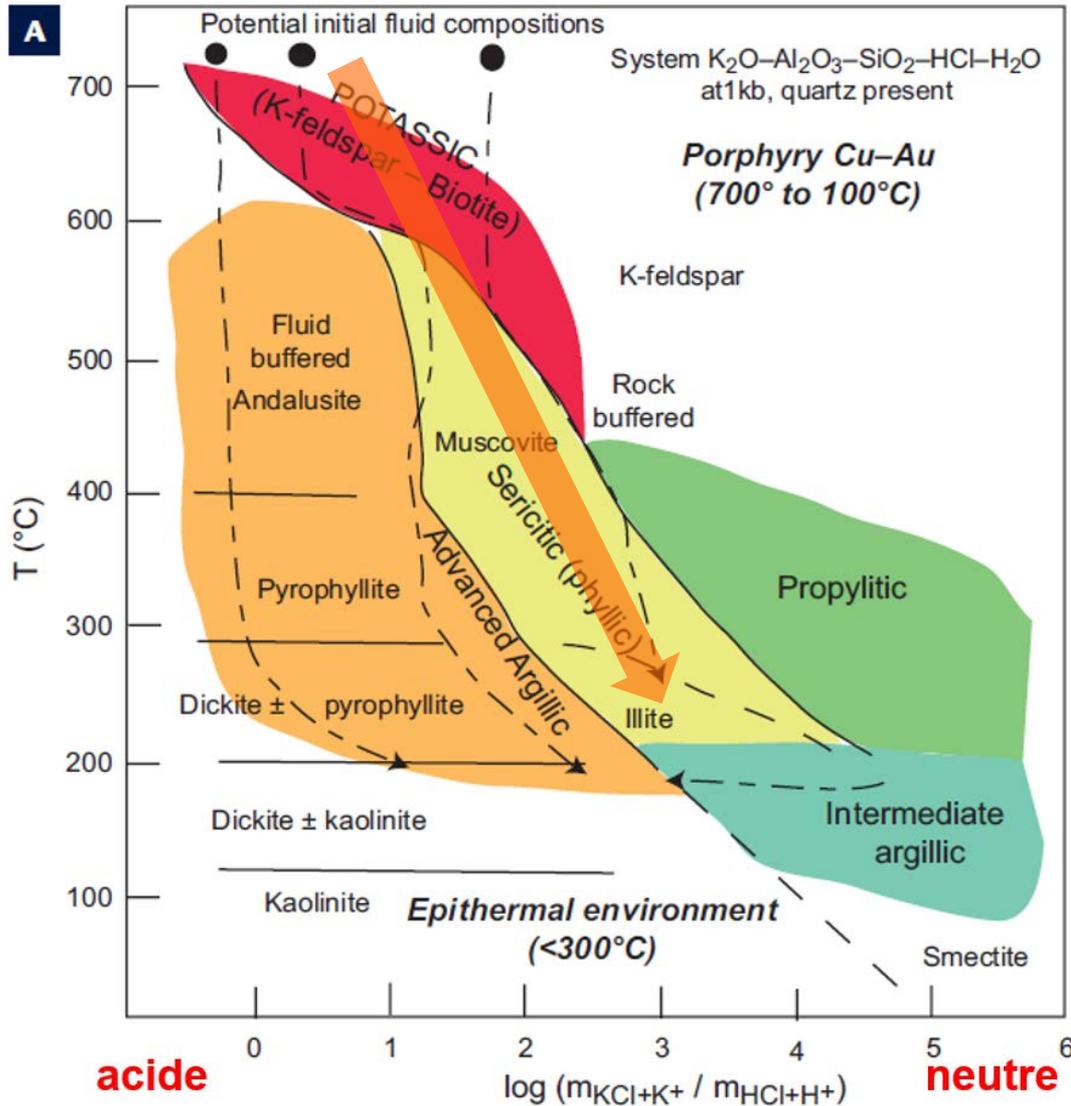


Modifié de Lowell and Guilbert, 1970

# Halo d'altération hydrothermale - Hypersectral



# Les altérations hydrothermales et leur évolution



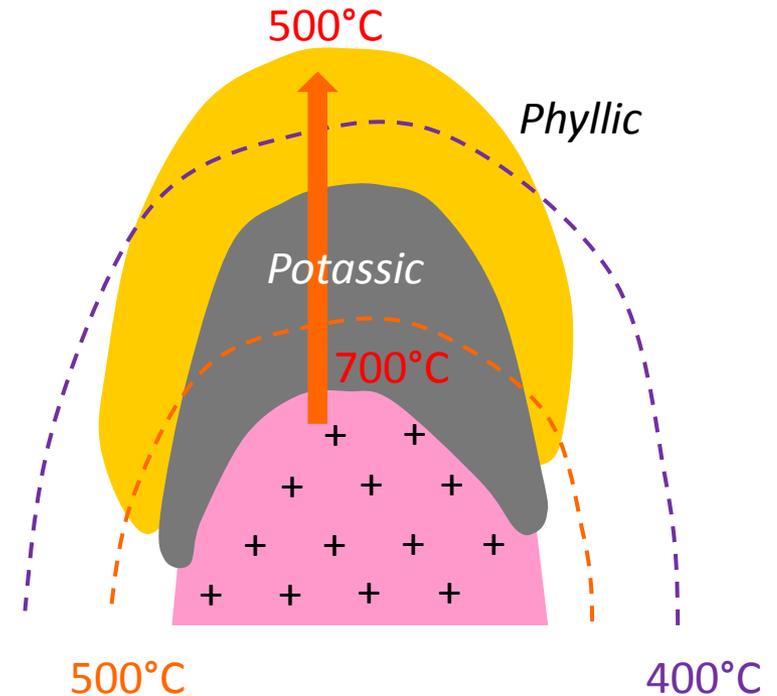
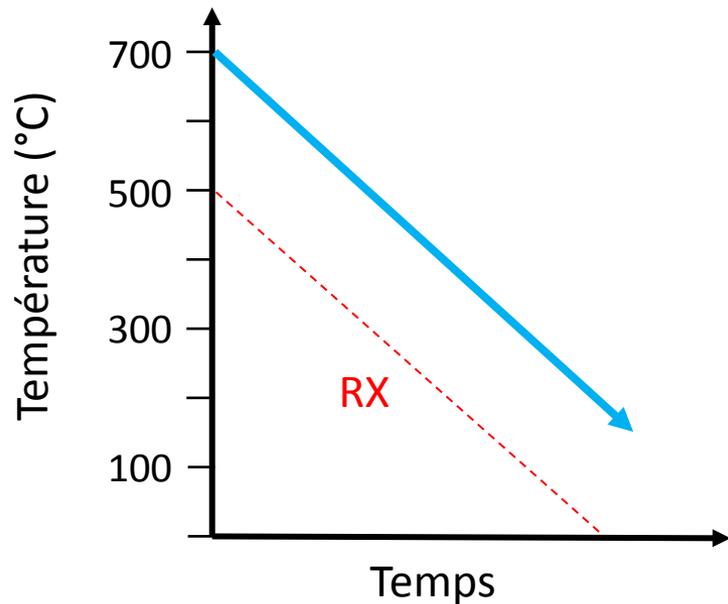
# Système porphyrique en résumé

Système évolutif en diminution de température (700 à 100° C) par réactions

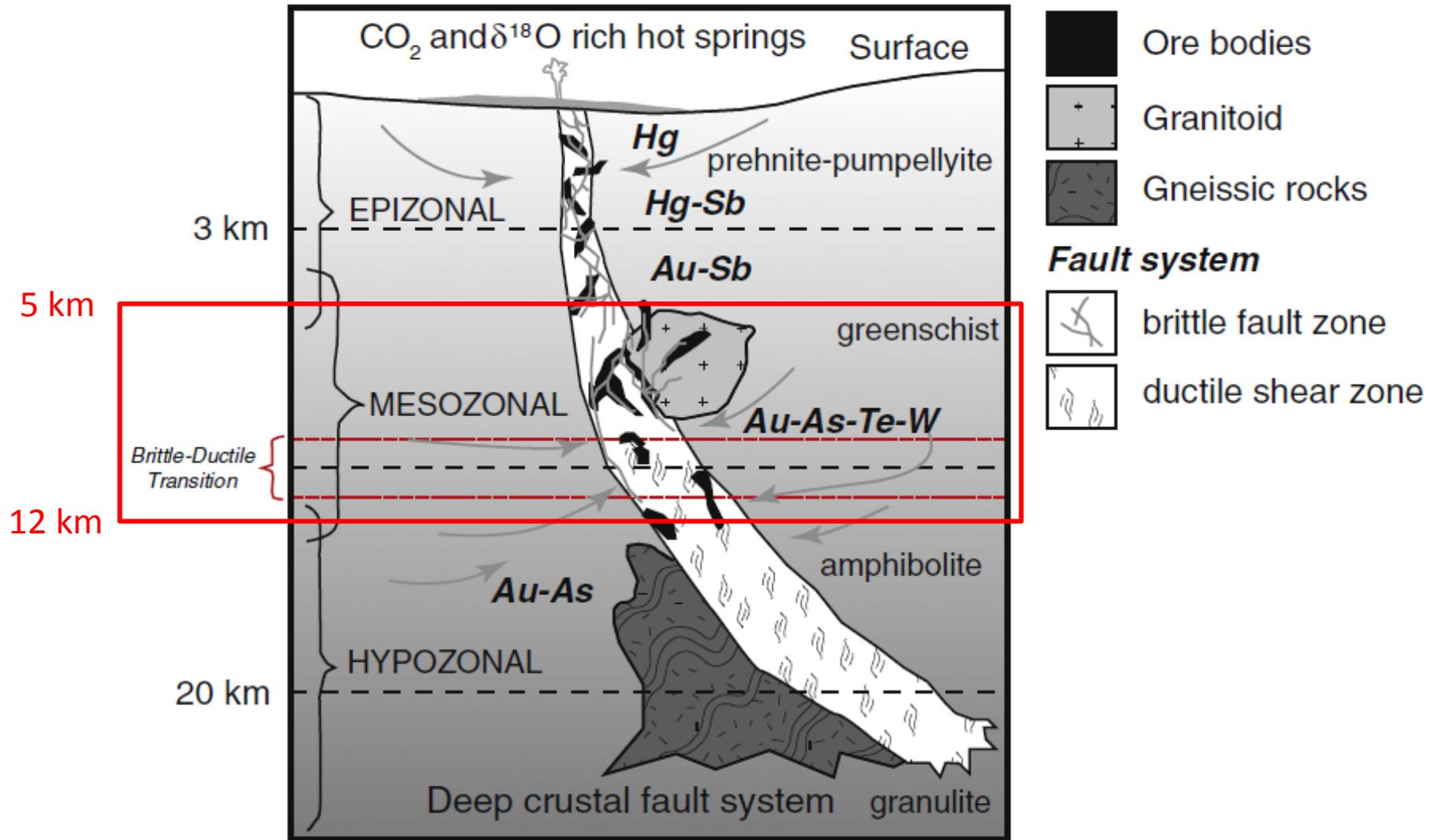
Système réactif, car  $\Delta T^\circ \sim 200^\circ \text{C}$

Large halo, car micro-fracturation et système diffus

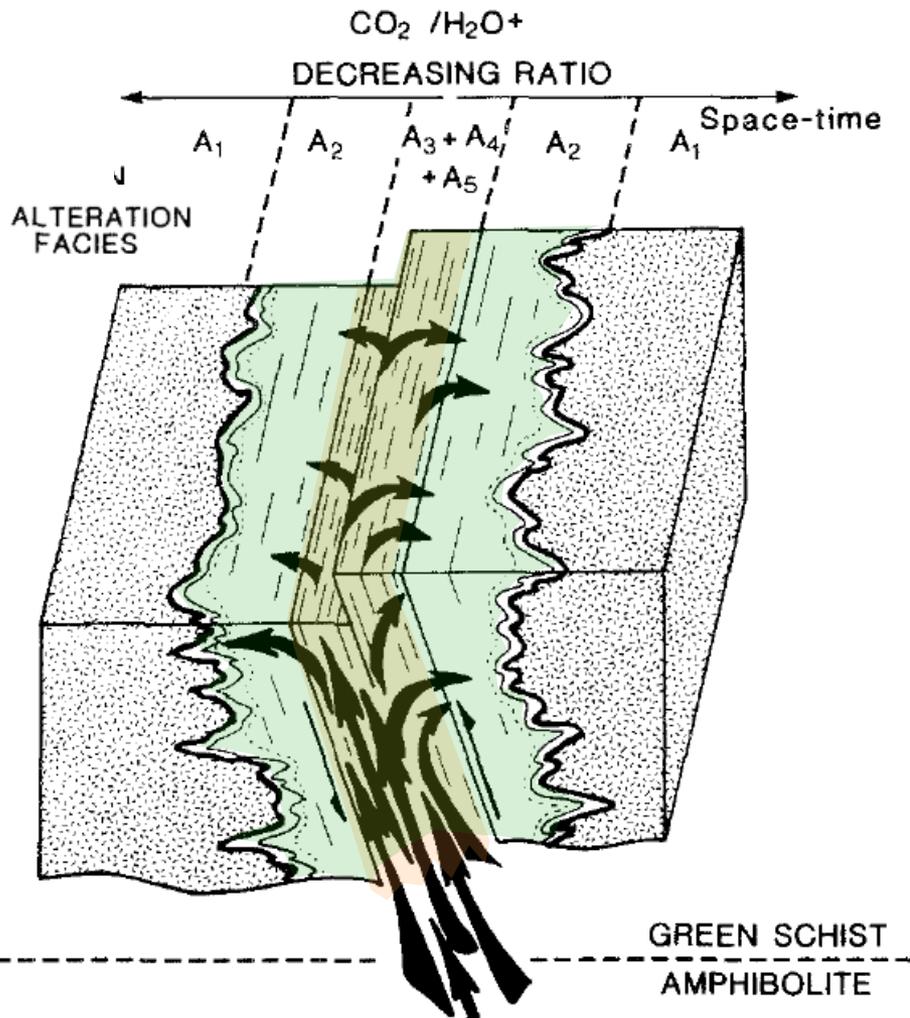
Régime hydraulique transitionnel (hydrostatique et lithostatique)



# Gisements Au orogéniques - *Le continuum révisé*



# Concept de diffusion chimique



Dubé et al., 1987: Min and Petro

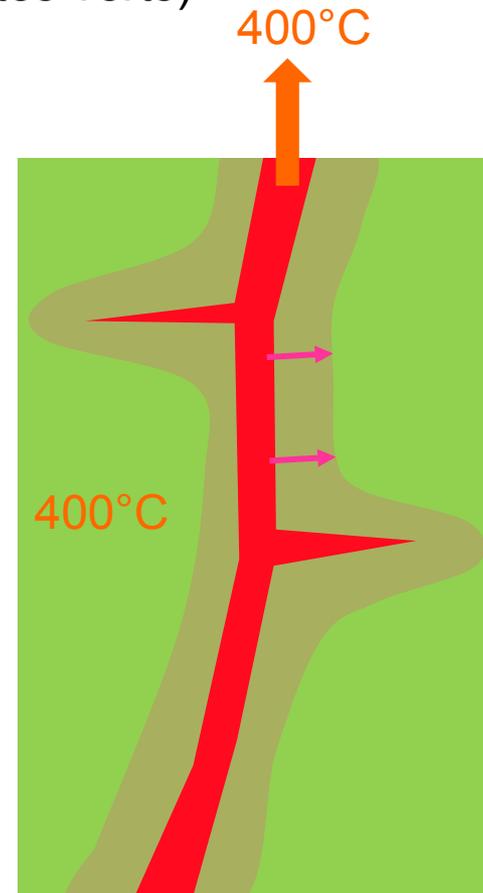
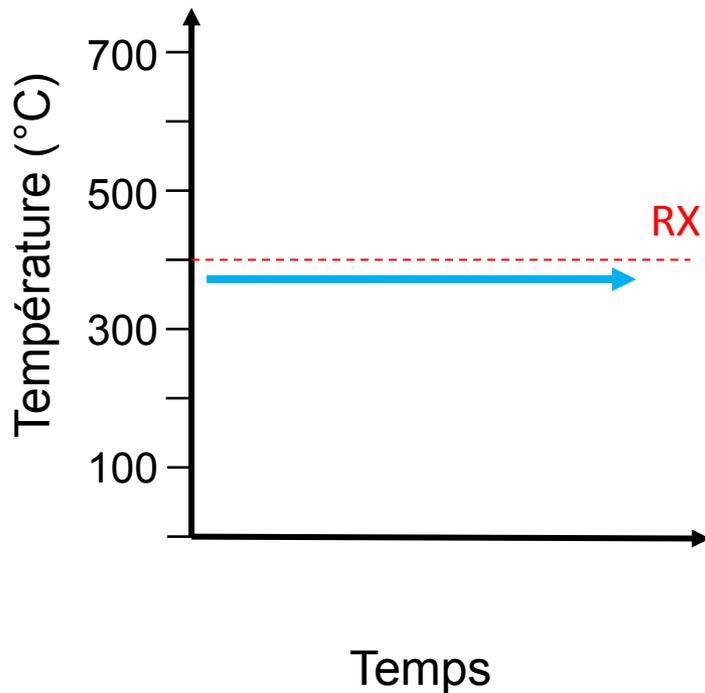
# Système orogénique en résumé

Système stable en température ( 300 à 450° C)

Système peu réactif, car  $\Delta T^\circ$  atteint  $\sim 0^\circ$  C

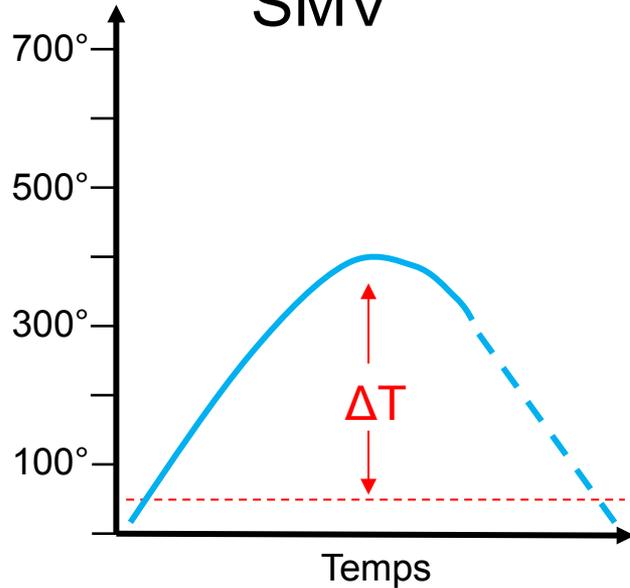
Très faible halo, car roches sont « ductiles » (schistes verts)

Régime hydraulique supralithostatique



# Résumé des processus et implications

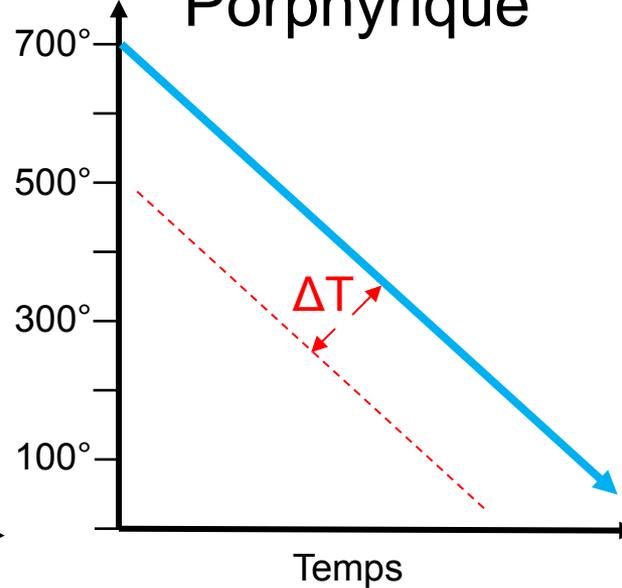
## SMV



### Très large halo

- Système prograde  $T^\circ$
- $\Delta T^\circ \sim 400^\circ \text{ C}$
- Perméabilité forte

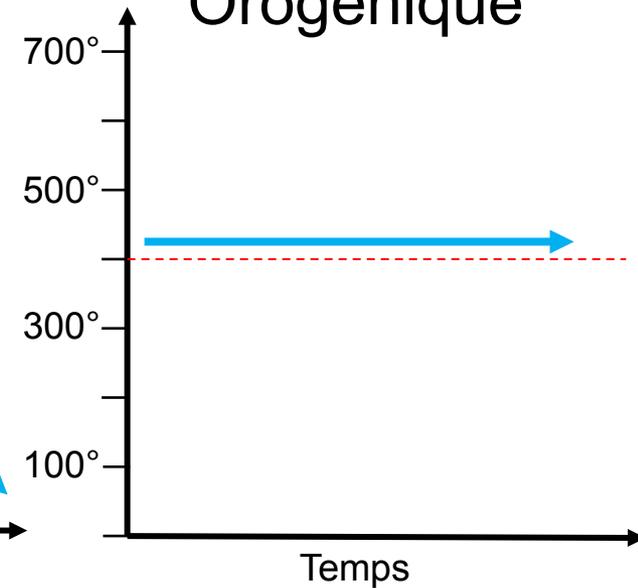
## Porphyrique



### Très large halo

- Système rétrograde  $T^\circ$
- $\Delta T^\circ \sim 200^\circ \text{ C}$
- Perméabilité moyenne

## Orogénique



### Très restreint

- Système stable  $T^\circ$
- $\Delta T^\circ \sim 0^\circ \text{ C}$
- Perméabilité faible

# Quels sont les métaux mobilisés par les systèmes

Porphyrique: **Cu Au** Ag As Sb Se Te Hg Co Sn Mn Bi Tl Ni Zn Pb **W Mo** Cs Li

SMV: **Cu Pb Zn Au** Ag As Sb Se Te Hg Co Sn Mn Bi Tl Ni In Cd Ga Ge

Orogenic gold: **Au** Ag As Sb Se Te Hg **W Mo** Ba Rb B

Beaucoup de similitudes entre SMV et Porphyrique

Pourquoi ces métaux ?

# Métaux mobilisés dans les halos, fonction des liants

**Table 3** Ligands occurring in hydrothermal ore solutions

Hydroxide	$\text{OH}^-$
Halide ions	$\text{F}^-$ , $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$ , $\text{I}^-$
Sulfur species	$\text{HS}^-$ , $\text{S}_n^-$ , $\text{S}_n\text{S}^{2-}$ , $\text{SO}_3^{2-}$ , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ , $\text{SO}_4^{2-}$
Ammonia (ammine)	$\text{NH}_3$
Oxyanions	$\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{PO}_4^{3-}$ , $\text{AsO}_3^{3-}$ , $\text{SbO}_3^{3-}$ , $\text{MoO}_4^{2-}$ , $\text{WO}_4^{2-}$ , $\text{SiO}_4^{4-}$
Thioanions	$\text{AsS}_3^{3-}$ , $\text{SbS}_3^{3-}$ , $\text{MoS}_4^{2-}$ , $\text{WS}_4^{2-}$
Carboxylates	$\text{CH}_3\text{COO}^-$ (acetate), $\text{C}_2\text{H}_5\text{COO}^-$ (propionate), $\text{CH}_2(\text{COO})_2^{2-}$ (malonate), $(\text{COO})_2^{2-}$ (oxalate)
Miscellaneous ligands of possible interest	$\text{HTe}^-$ , $\text{Te}_2^{2-}$ , $\text{CN}^-$ , $\text{SCN}^-$

# Liants, température et fugacité d'oxygène

1.5 mol NaCl + 0.5 mol KCl

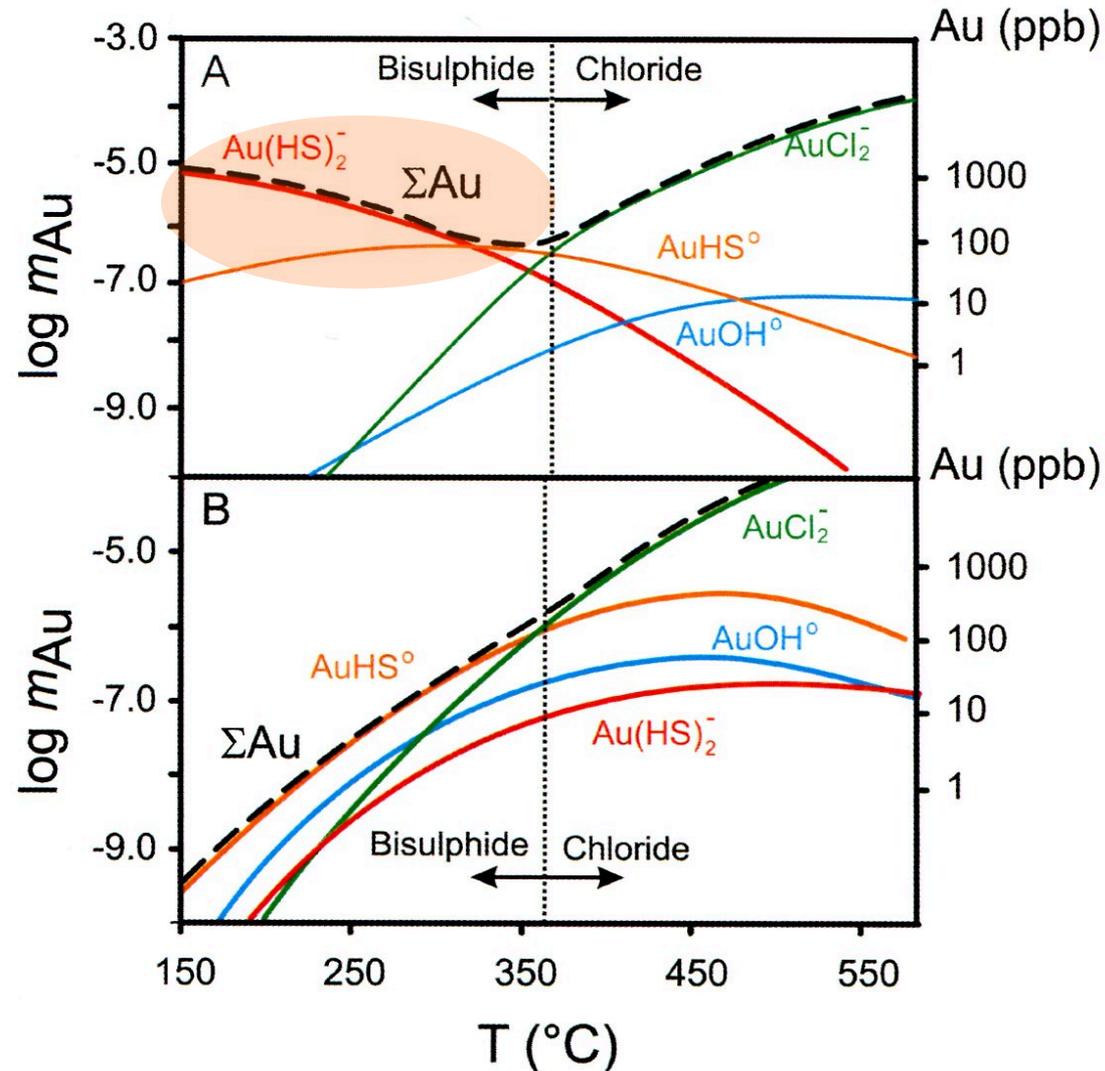
Complexes pour Au (1 kbar) 4 km

$fS_2$  et  $fO_2$  tamponnés par:

Assemblage  
Magnétite-Hématite

Assemblage  
Pyrite-Pyrrhotite-Magnétite

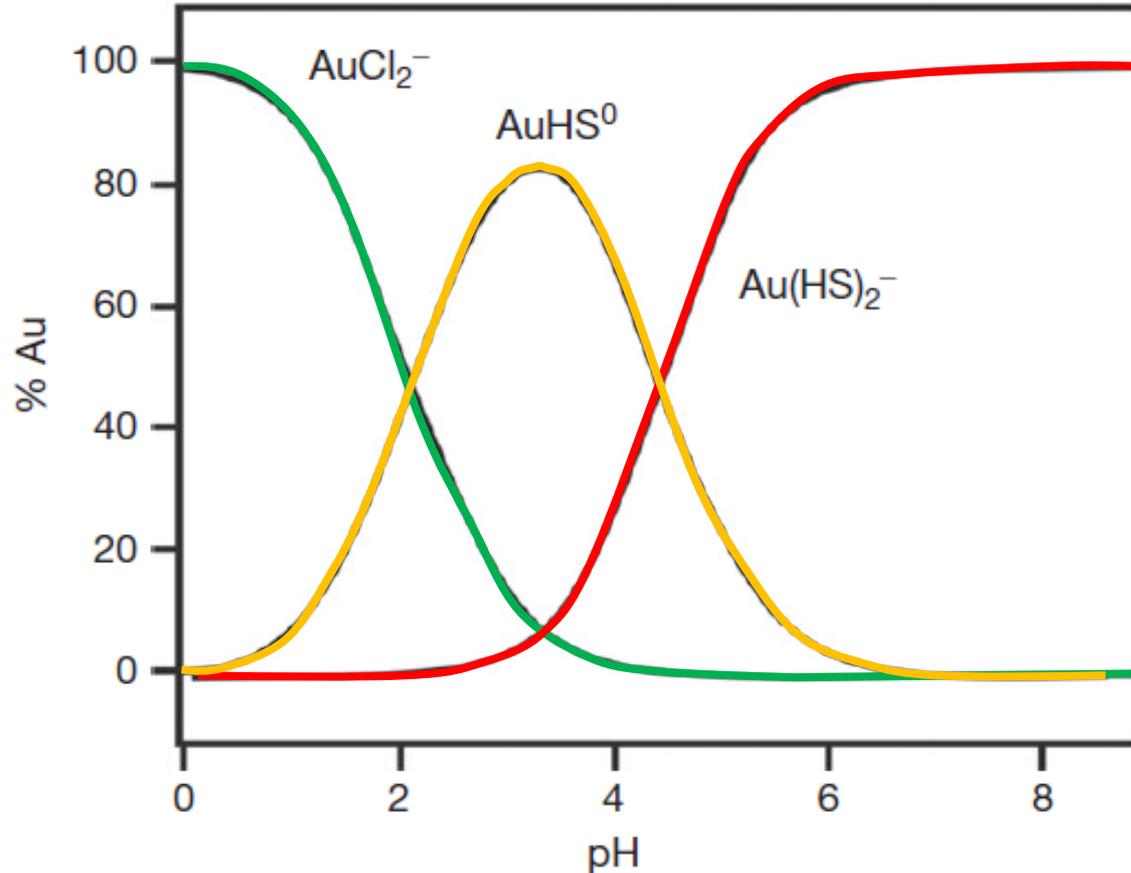
**Liant Au  $Cl^-$  et  $HS^-$**



# Liants et pH

400° C and 500 bar

0.5 mol de  $\text{H}_2\text{S}$  +  $\text{HS}^-$  0.5 mol de  $\text{Cl}^-$



Seward et al., 2014

Porphyrique



SMV



Orogénique



# Liants: classification de Lewis

Hard metals	intermediate	Soft metals
Li <sup>+</sup> Na <sup>+</sup> K <sup>+</sup> Rb <sup>+</sup> Cs <sup>+</sup>	Zn <sup>2+</sup> Cu <sup>2+</sup> Fe <sup>2+</sup> Pb <sup>2+</sup>	Au <sup>+</sup> Ag <sup>+</sup> Tl <sup>+</sup> Cu <sup>+</sup>
Be <sup>2+</sup> Sr <sup>2+</sup> Ba <sup>2+</sup> Ca <sup>2+</sup> Mg <sup>2+</sup>	Co <sup>2+</sup> Ni <sup>2+</sup> Fe <sup>2+</sup> Os <sup>2+</sup>	Hg <sup>2+</sup> Cd <sup>2+</sup> Sn <sup>2+</sup>
Ce <sup>4+</sup> Sn <sup>4+</sup> Mo <sup>4+</sup> W <sup>4+</sup> V <sup>4+</sup> Mn <sup>4+</sup>		Au <sup>3+</sup> Tl <sup>3+</sup>
As <sup>5+</sup> Sb <sup>5+</sup> U <sup>6+</sup>		
Hard ligands	intermediate	Soft ligands
NH <sub>3</sub> OH <sup>-</sup> F <sup>-</sup> NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> HCO <sub>3</sub> <sup>3-</sup> CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Cl <sup>-</sup> Br <sup>-</sup> SO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	HS <sup>-</sup> I <sup>-</sup> CN <sup>-</sup> H <sub>2</sub> S S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> <sup>2-</sup>

« Hard » forme des liaisons ioniques (éléments lithophiles)

« Soft » forme des liaisons covalentes (éléments chalcophiles)

Dans la nature, Cl<sup>-</sup> plus important suivi de HS<sup>-</sup>

# Quels sont les métaux mobilisés par les systèmes

Porphyry: **Cu Au** Ag As Sb Se Te Hg Co Sn Mn Bi Tl Ni Zn Pb W Mo Cs Li

Cl<sup>-</sup>

SMV: **Cu Pb Zn Au** Ag As Sb Se Te Hg Co Sn Mn Bi Tl Ni In Cd Ga Ge

Cl<sup>-</sup>

Orogenic gold: **Au** Ag As Sb Se Te Hg W Mo Ba Rb B

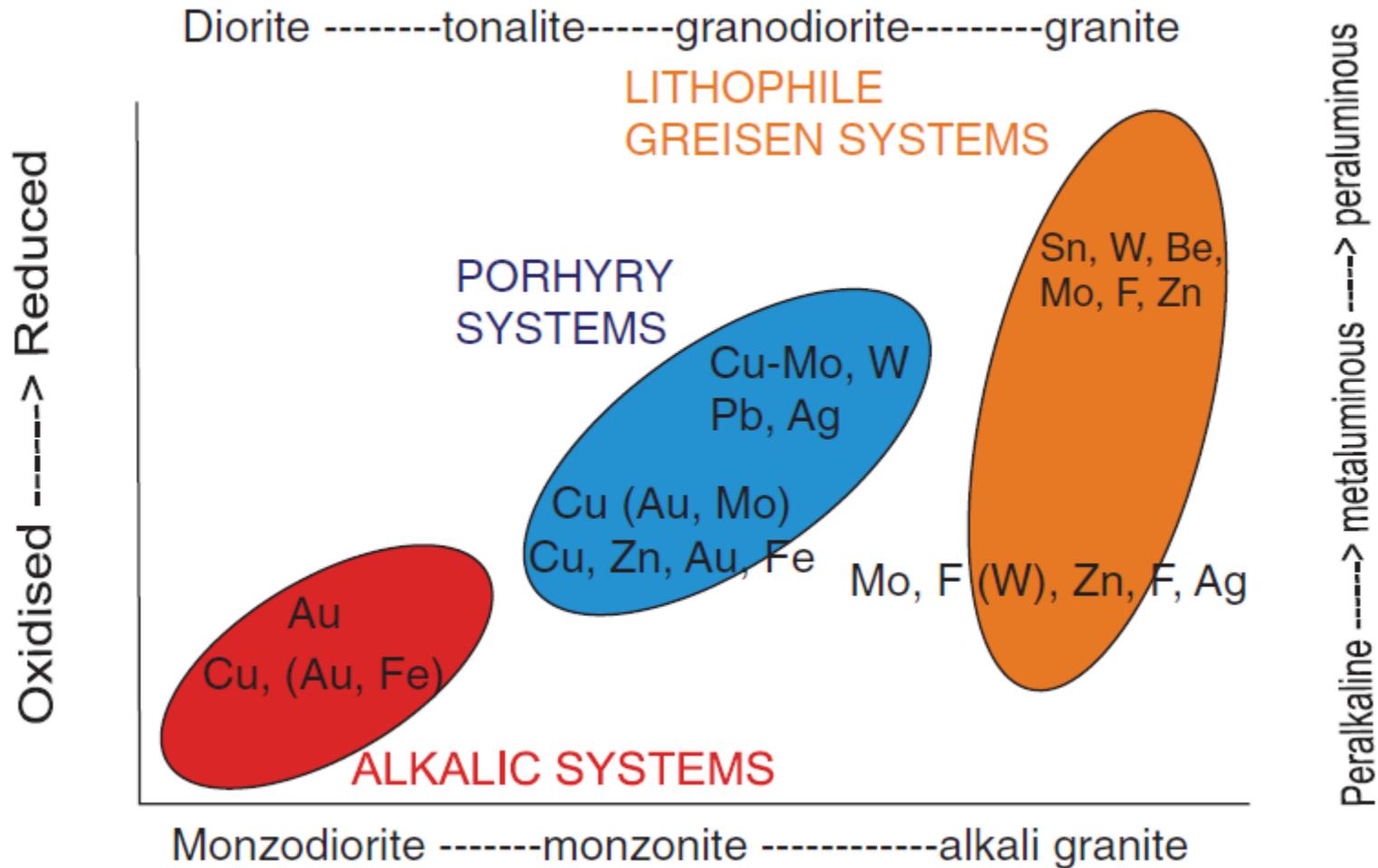
HS<sup>-</sup>

Expliqué en grande partie par les liants

Mais la source de l'or est importante

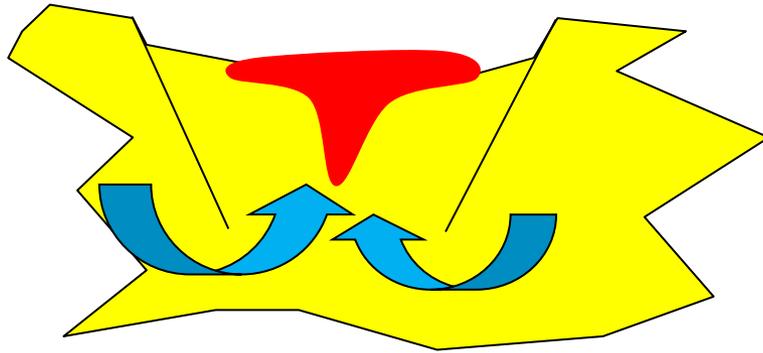
# PORPHYRIQUE: Source magmatique des métaux

Métaux traces fonction de la composition des intrusions



# SMV: Lessivage des roches volcaniques

Riche en Zn

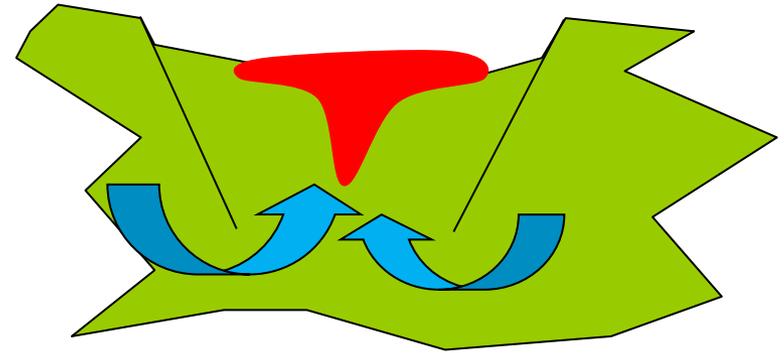


Roches felsiques

Exemple de Matagami

Au ---

Riche en Cu



Roches mafiques

Ophiolite Chypre

Au +++

# Au et Ag dans contextes géodynamiques actuels

## Geochemistry of massive sulphides in various tectonic settings

Petersen et Hein: 2014

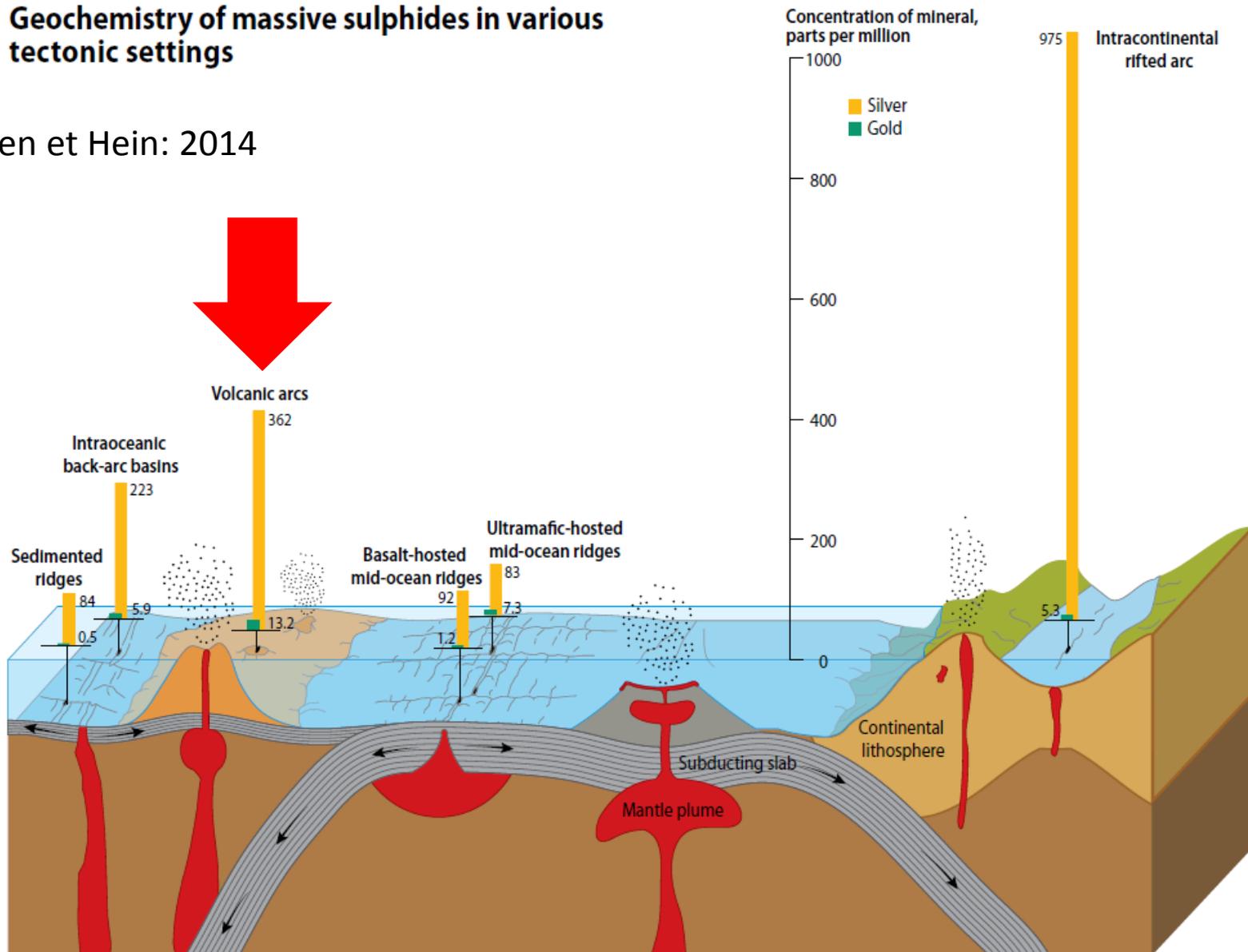
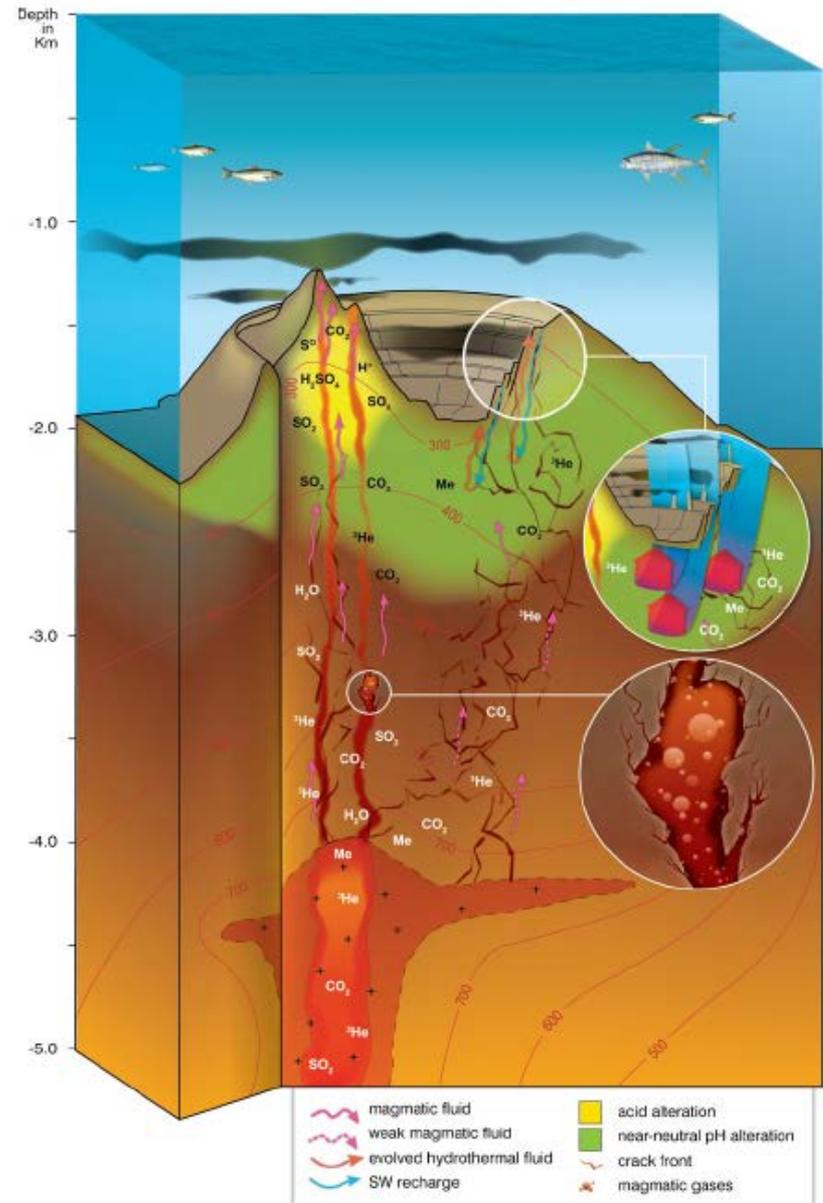
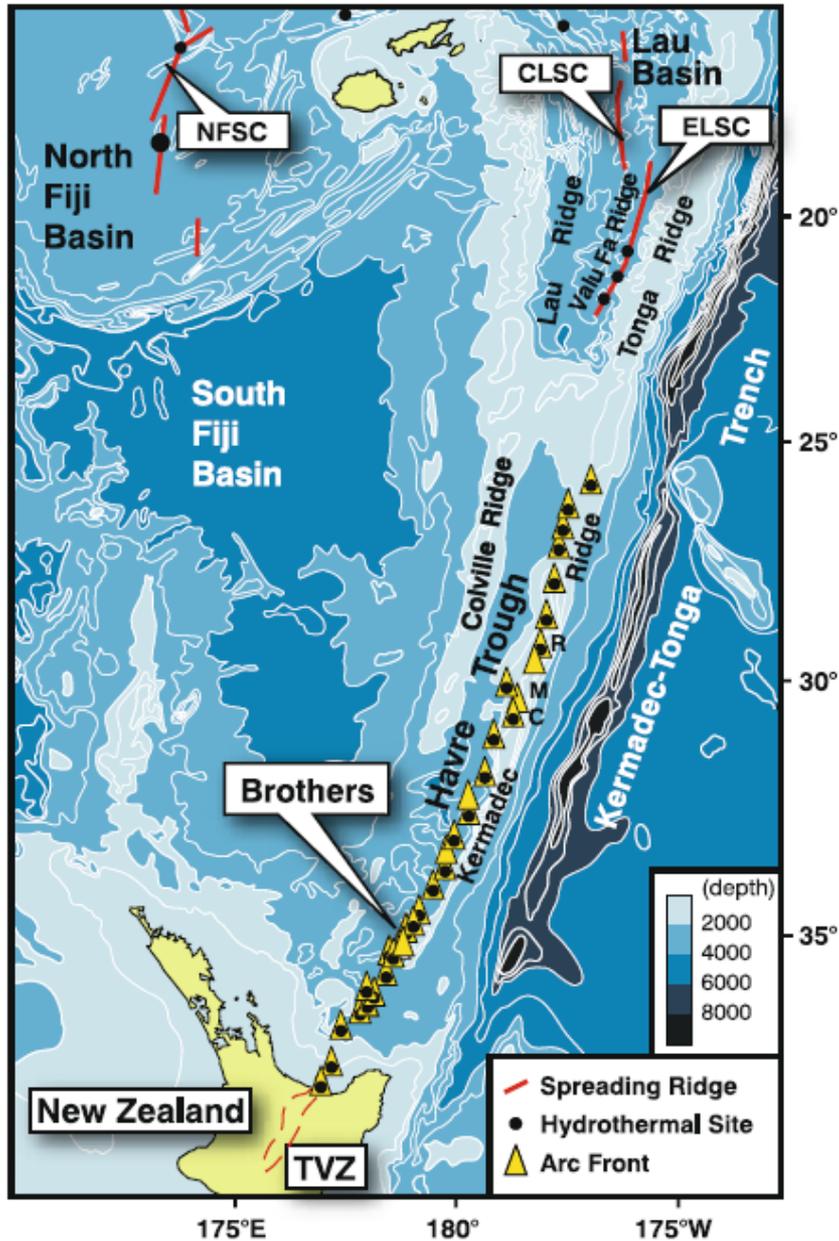
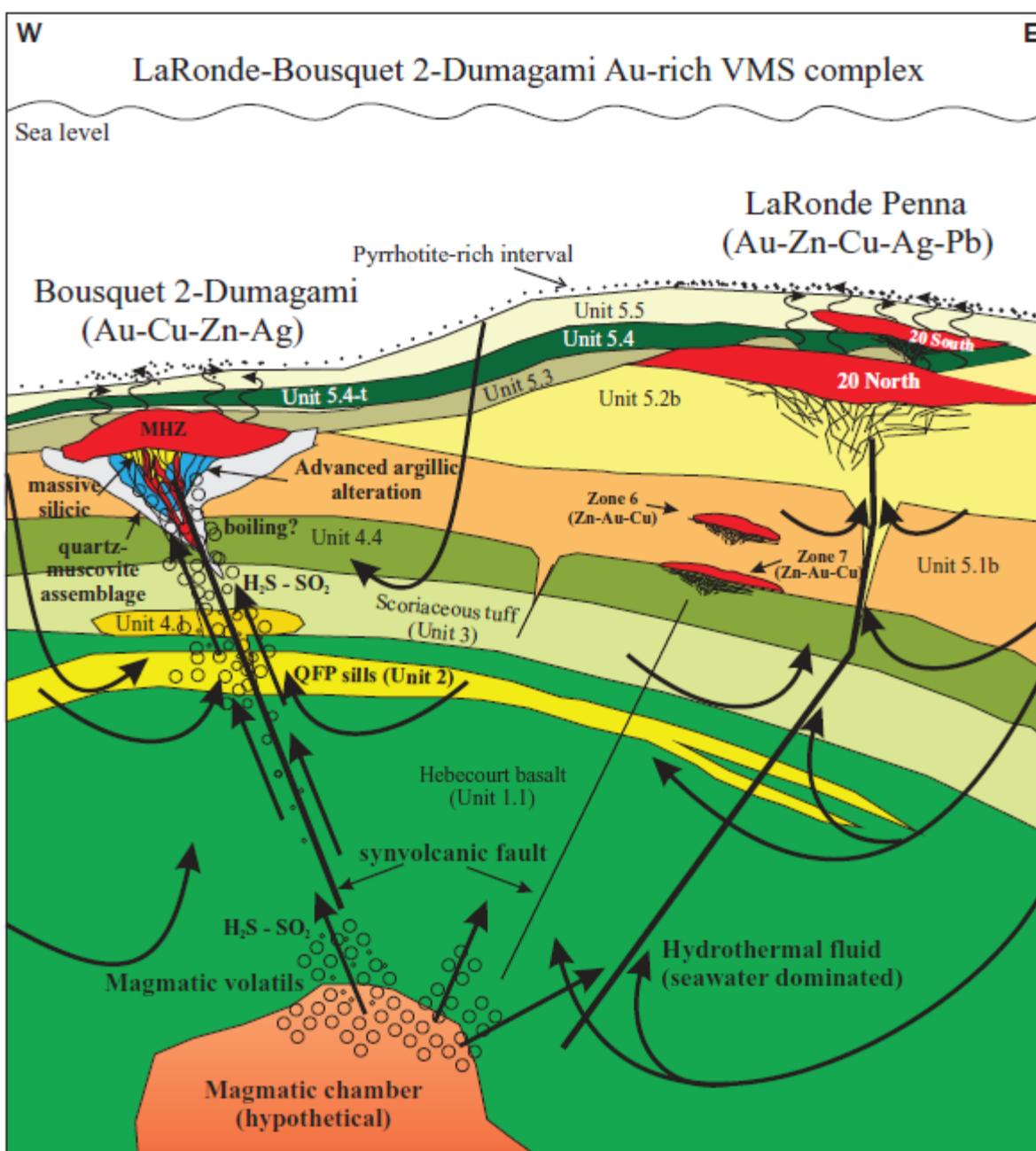


Figure 6. Concentrations of gold and silver in sea-floor massive sulphides formed in different geological settings (Source: GEOMAR)

# Volcanisme d'arc sous-marin: Au

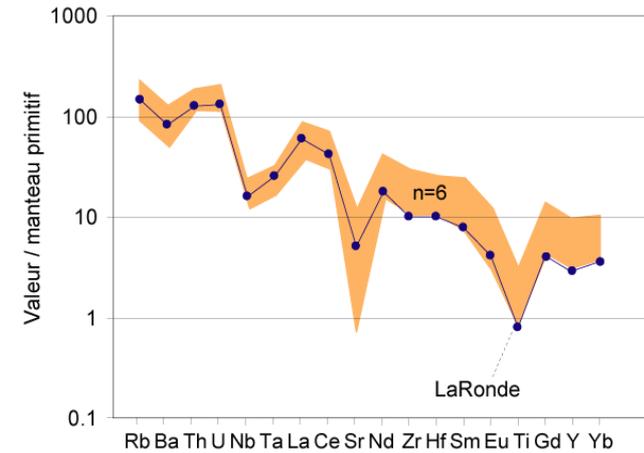


# Pourquoi Au ?



Dubé et al., 2014: Econ Geol

## Fl: calco-alkaline

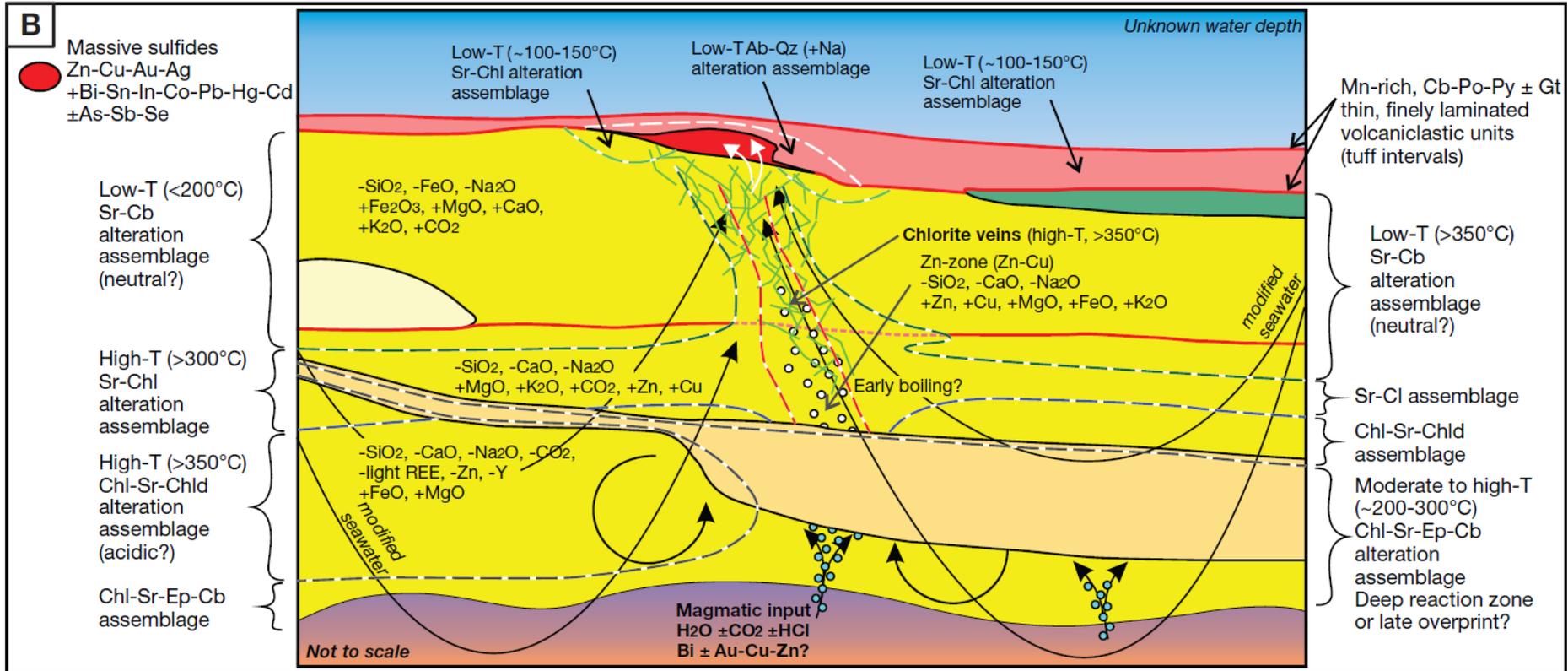


Gaboury et Pearson, 2008: Econ Geol

# Si Au magmatique: métaux granophiles

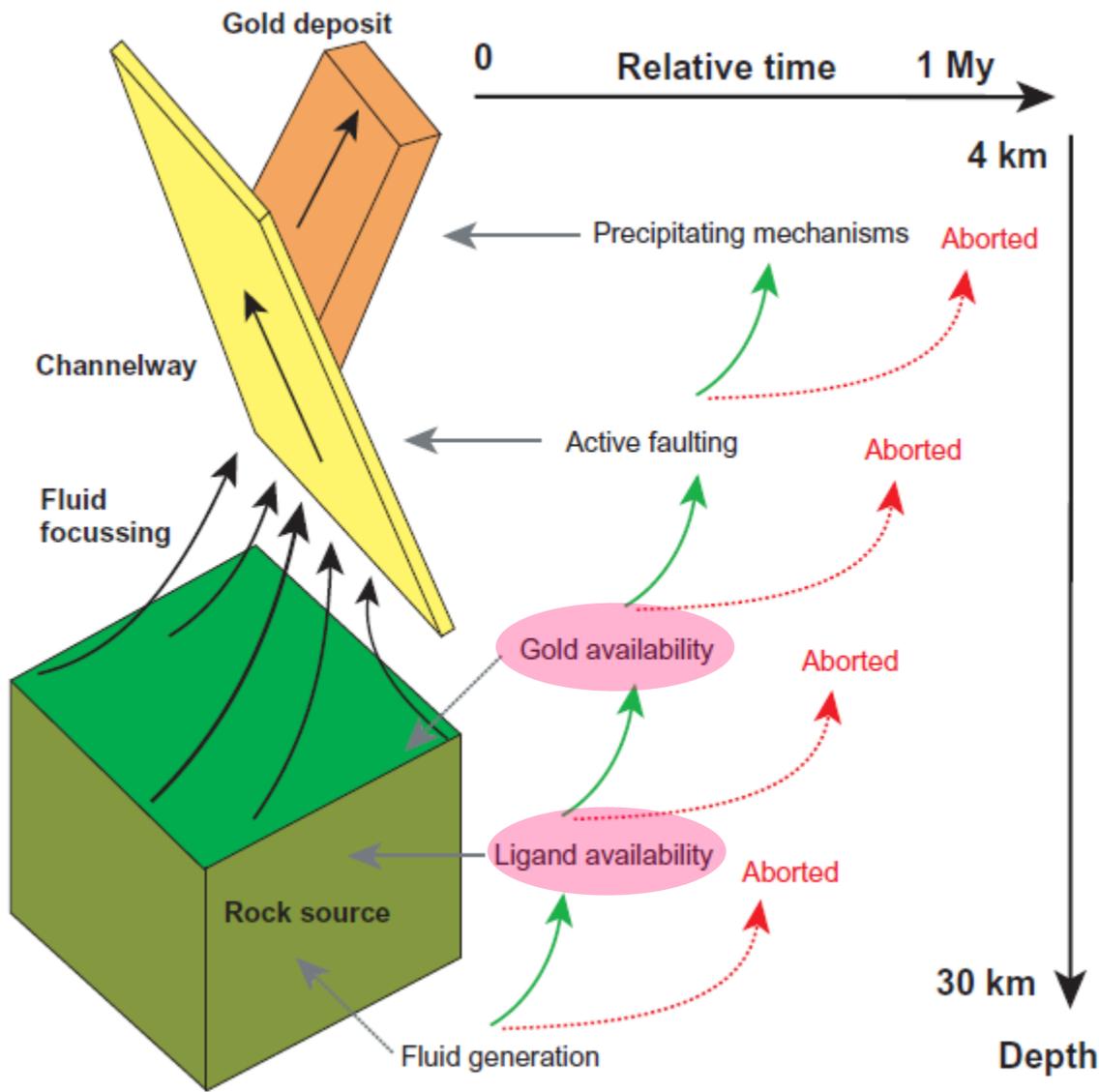
Sn, W, Bi, Te, Mo avec  $\pm$  altération alumineuse

## Mine Lemoine, Chibougamau

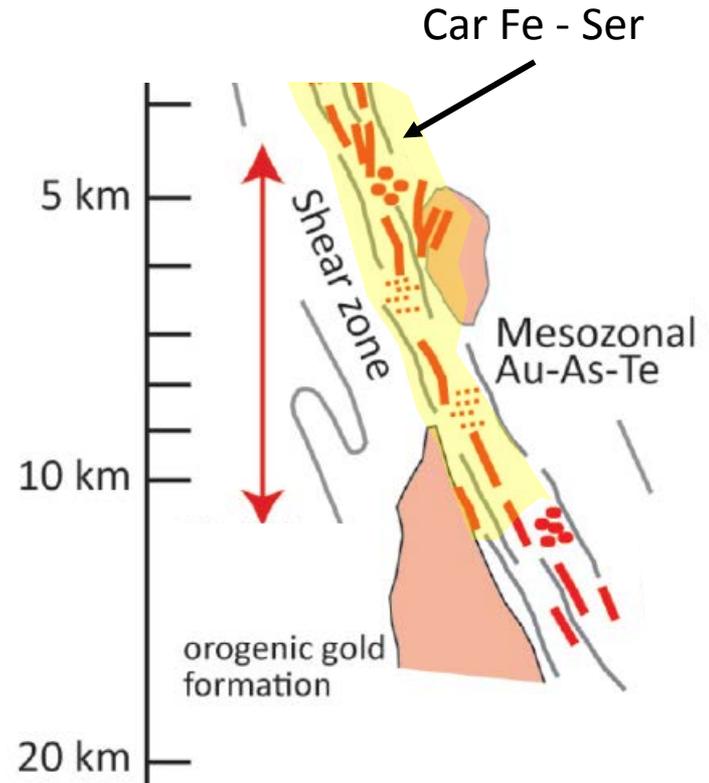


Mercier-Langevin et al., 2014: Mineralium Deposita

# Orogénique: sources Au variées (?)

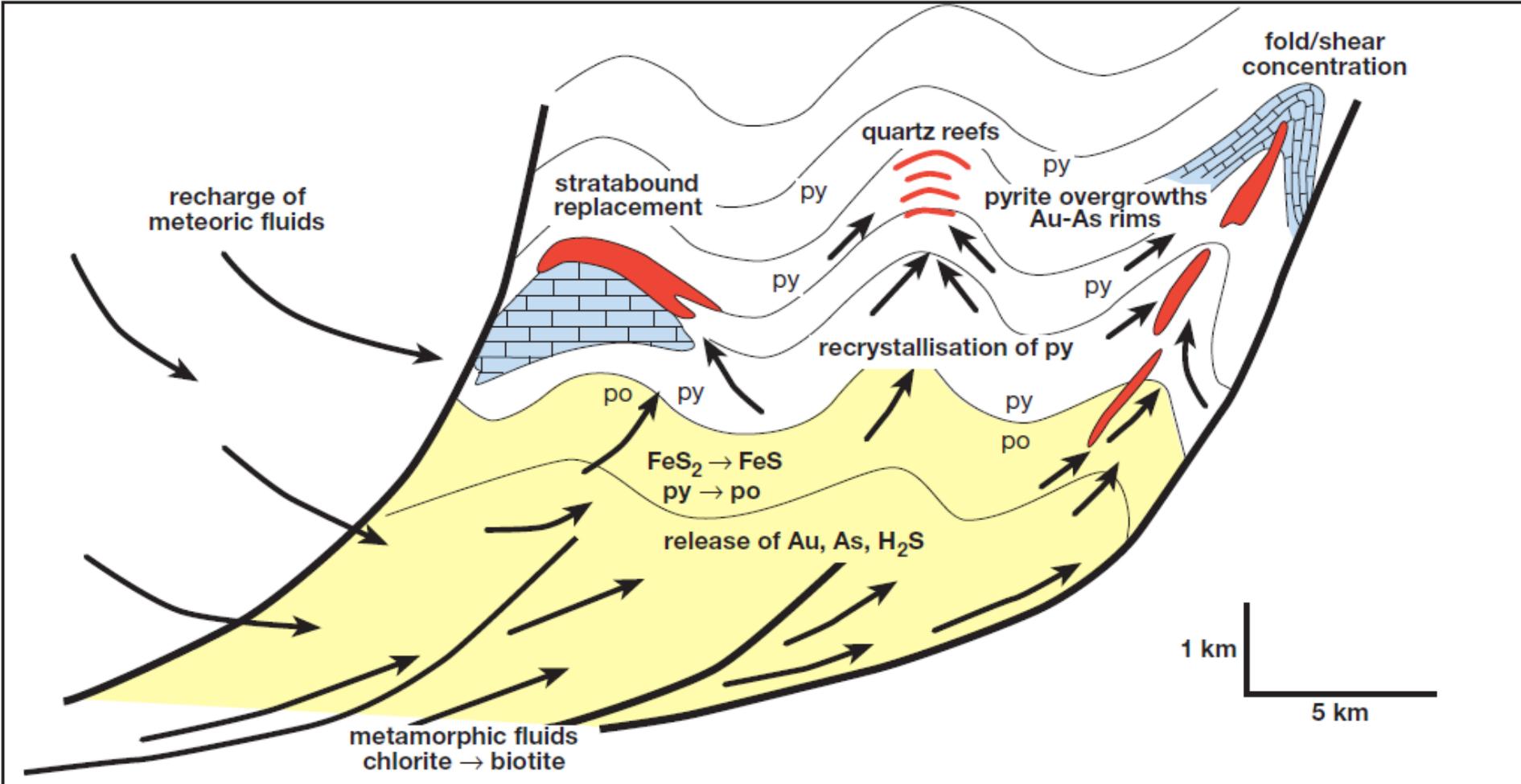


## Implication: altération sans Au

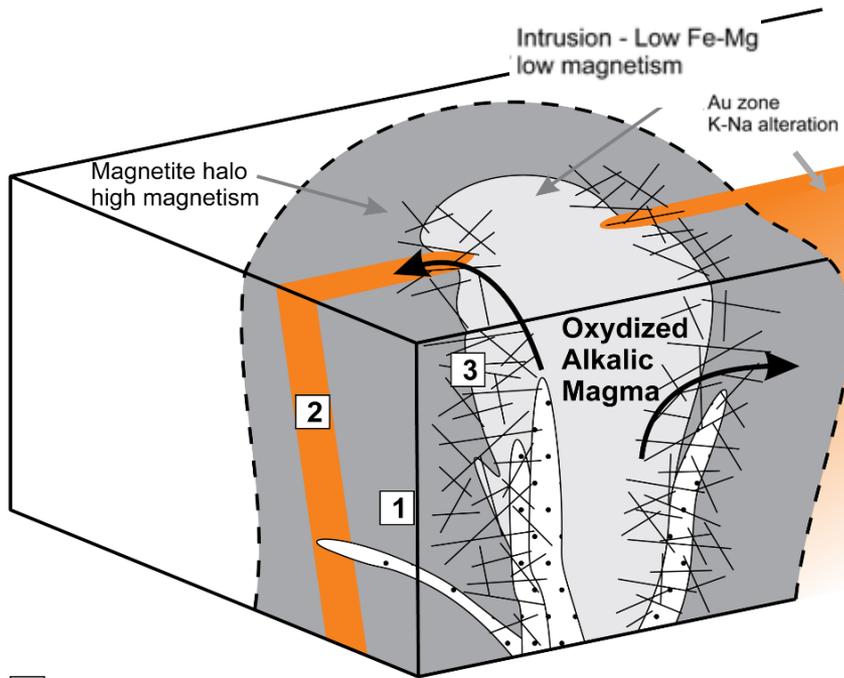


# Modèle métamorphique de Large

Au, As, S: Relachés des sédiments riches en MO  
lors de la conversion Py-Po



# Apport magmatique Au et métaux



- 1 Magnetite halo
- 2 Fluids circulate through preexisting faults  
Potassic metasomatism and oxidation (Mt→Hm)
- 3 Stockwork Qtz-FI-Py-(Au)

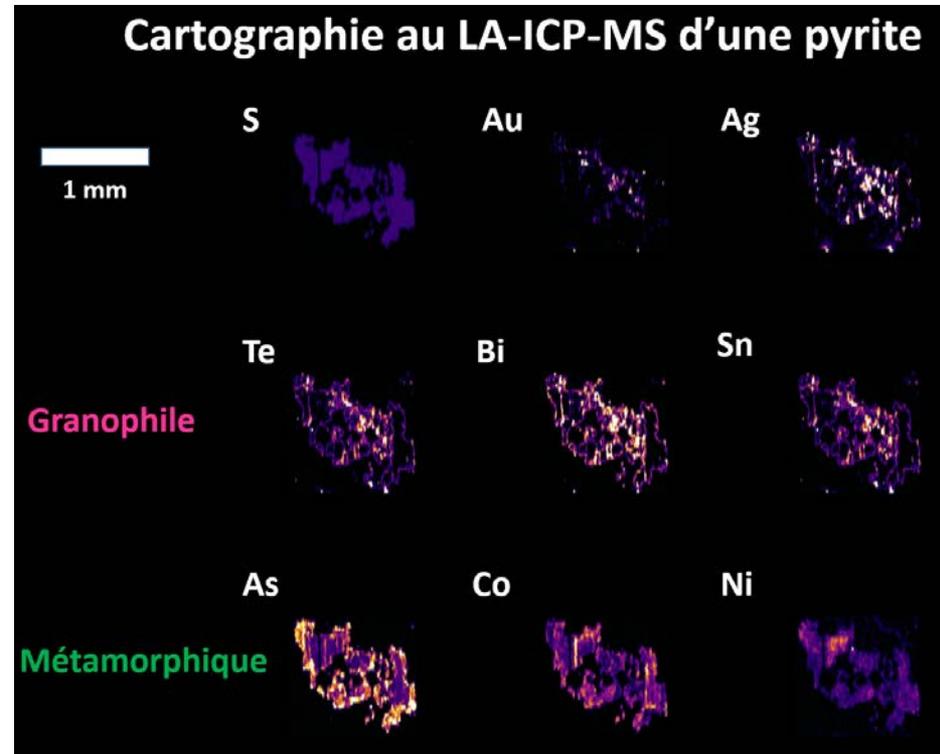
 Dikes, aplites

 Fluids: F, Na, K, Au, Py

Fayol et Jébrak 2017: Econ Geol

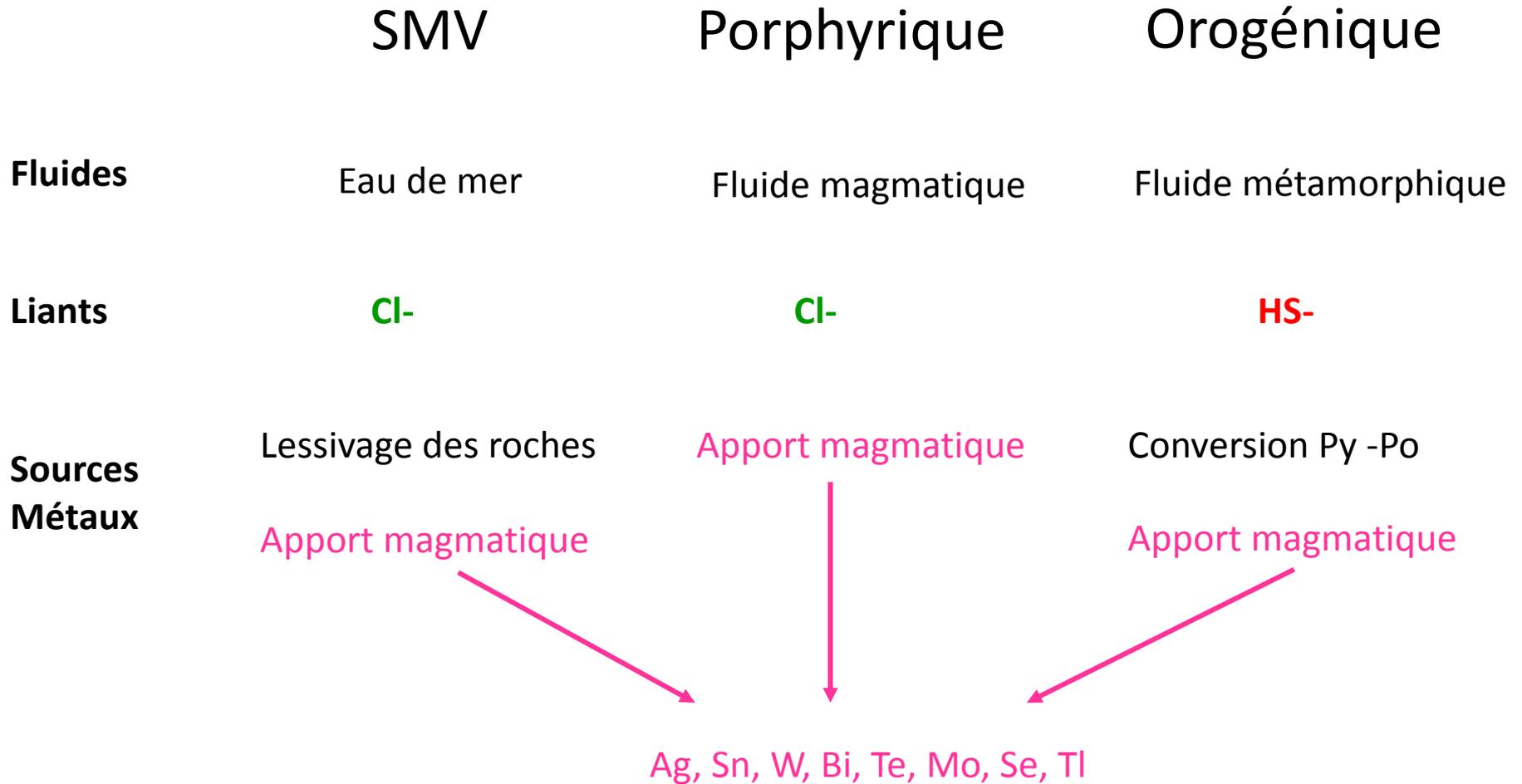
## Apport de métaux granophile

Sn, W, Bi, Te, Mo, Se, Tl



Gaboury, Non publié, Projet Dolodau  
Syénite aurifère

# Mobilisation hydrothermale des métaux



# En conclusion

Halo géochimique – influencé principalement par:

Profondeur de formation des minéralisations – régime hydraulique – perméabilité – W/R

Déséquilibre chimique – compo fluides et roches –  $\Delta T^\circ$

Métaux en solution – liants – sources Au et métaux – température des fluides

