

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

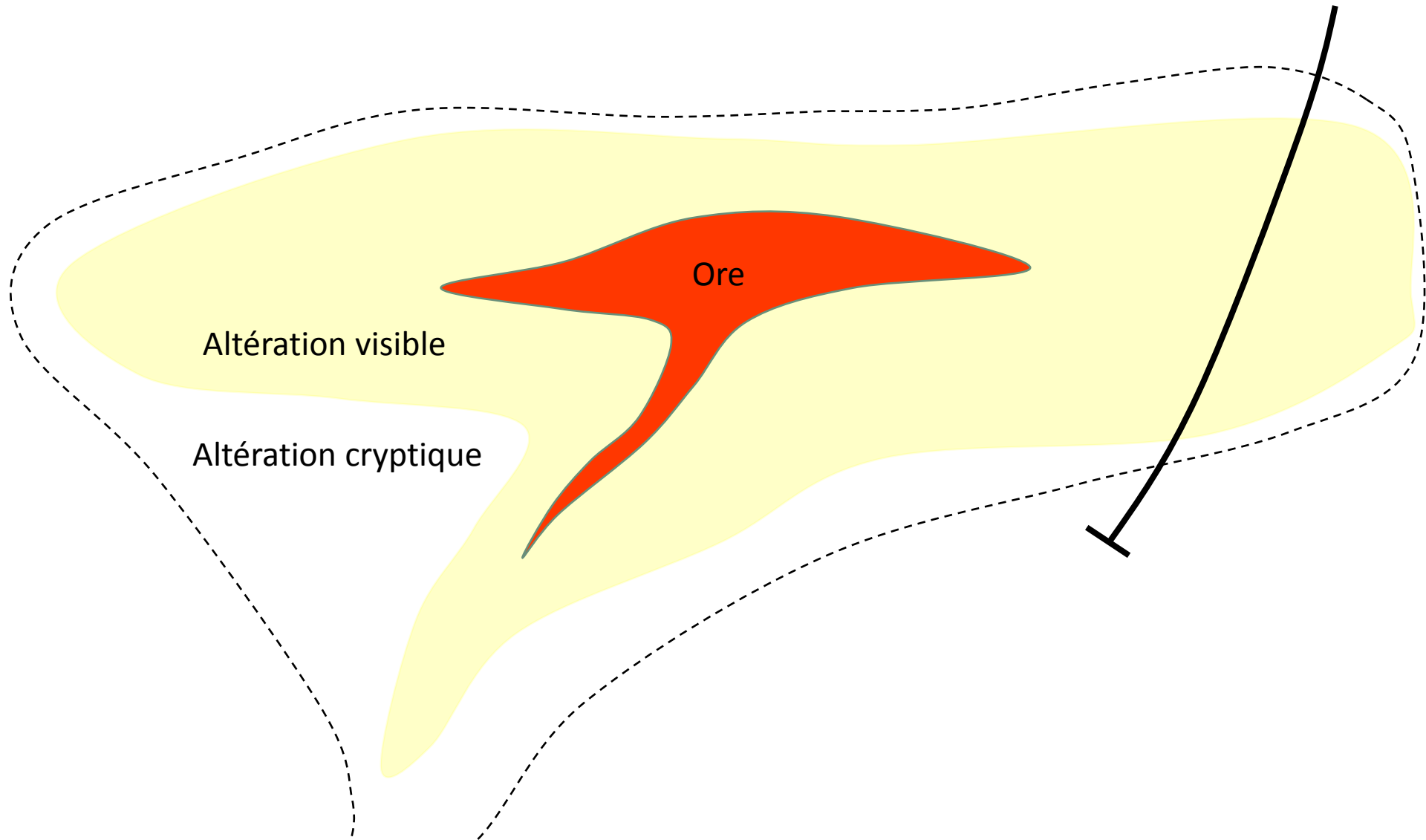
Coeur des Sciences UQÀM

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

MINI-FORUM

Le schéma conceptuel

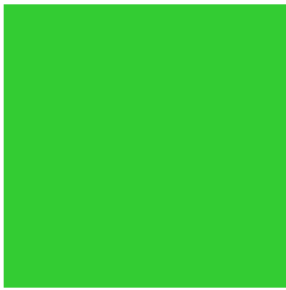
Halo géochimique – correspond zone d'altération visible et cryptique



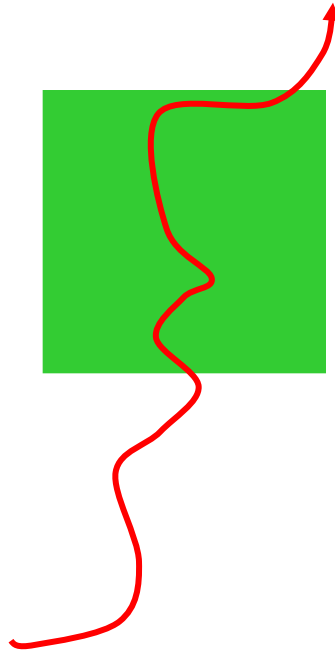
Altérations hydrothermales

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

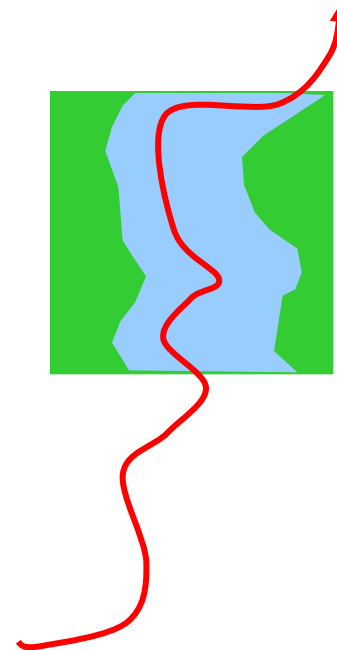
Roche



**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 (ΔT°)
- 6) La source de l'or

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

Différents types de gisements Au hydrothermaux

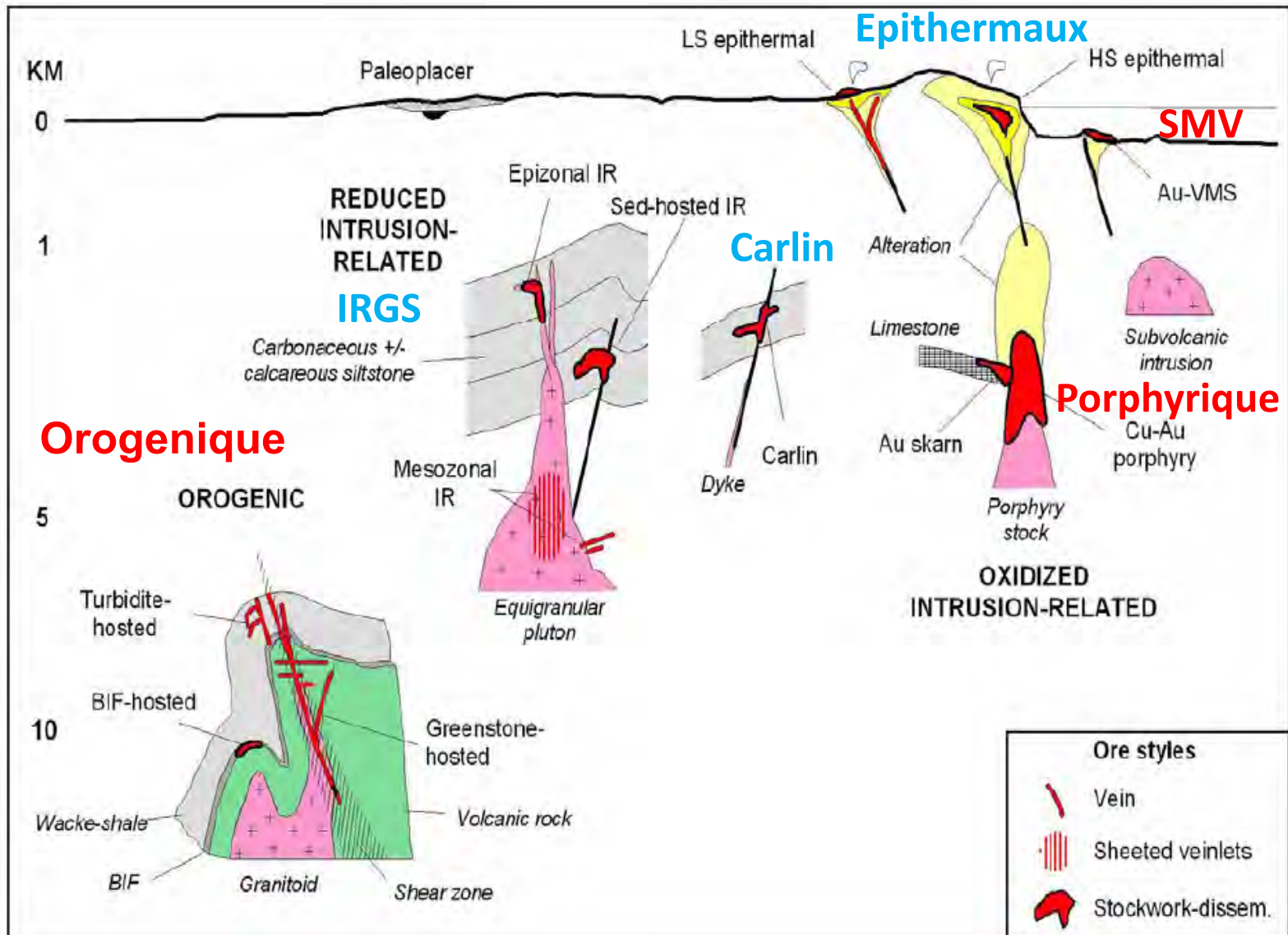
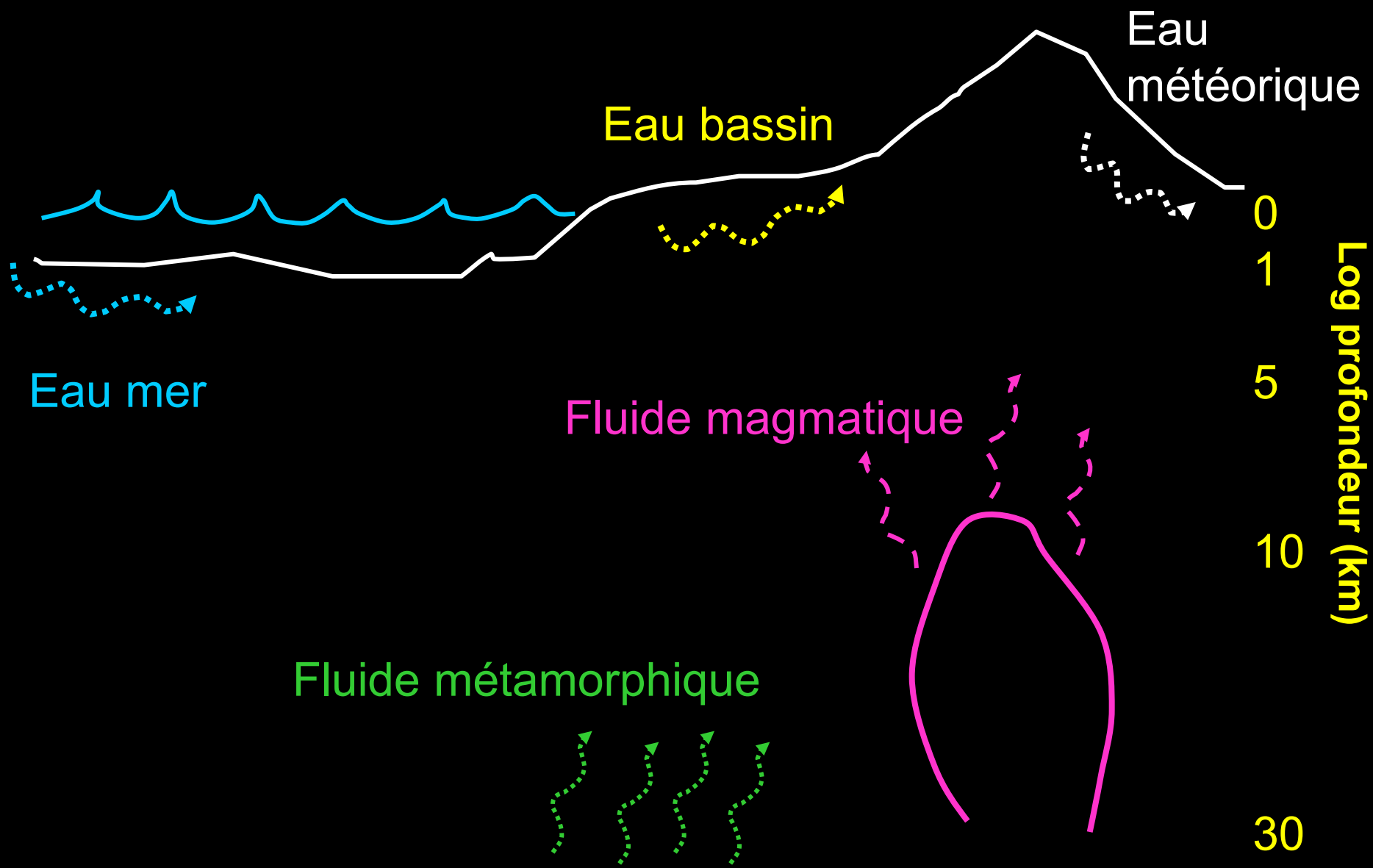
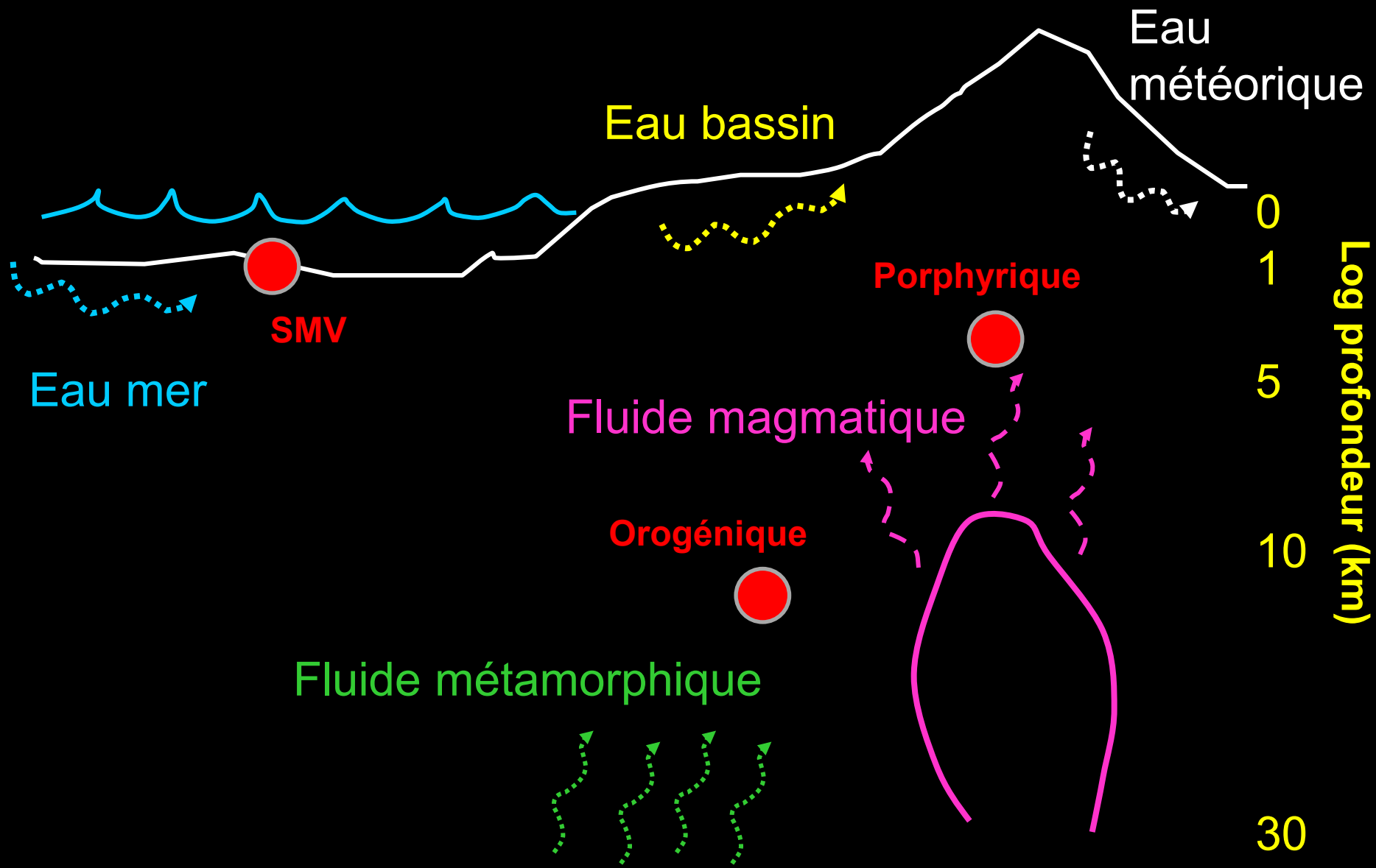


Figure 1: Schematic cross section showing the key geologic elements of the main gold systems and their crustal depths of emplacement. Note the logarithmic depth scale. Modified from Poulsen et al. (2000), and Robert (2004a).

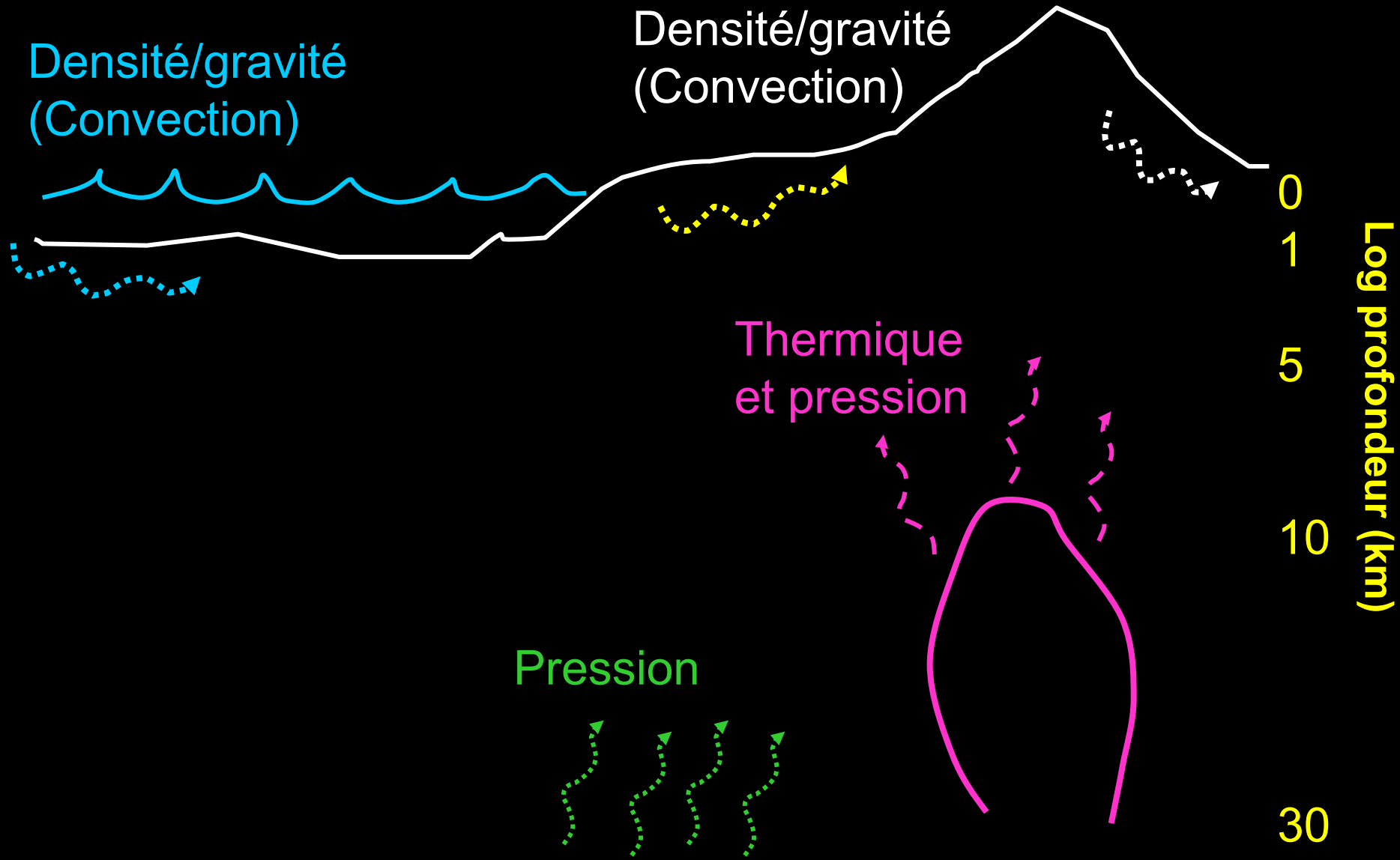
Fluides en fonction de la profondeur



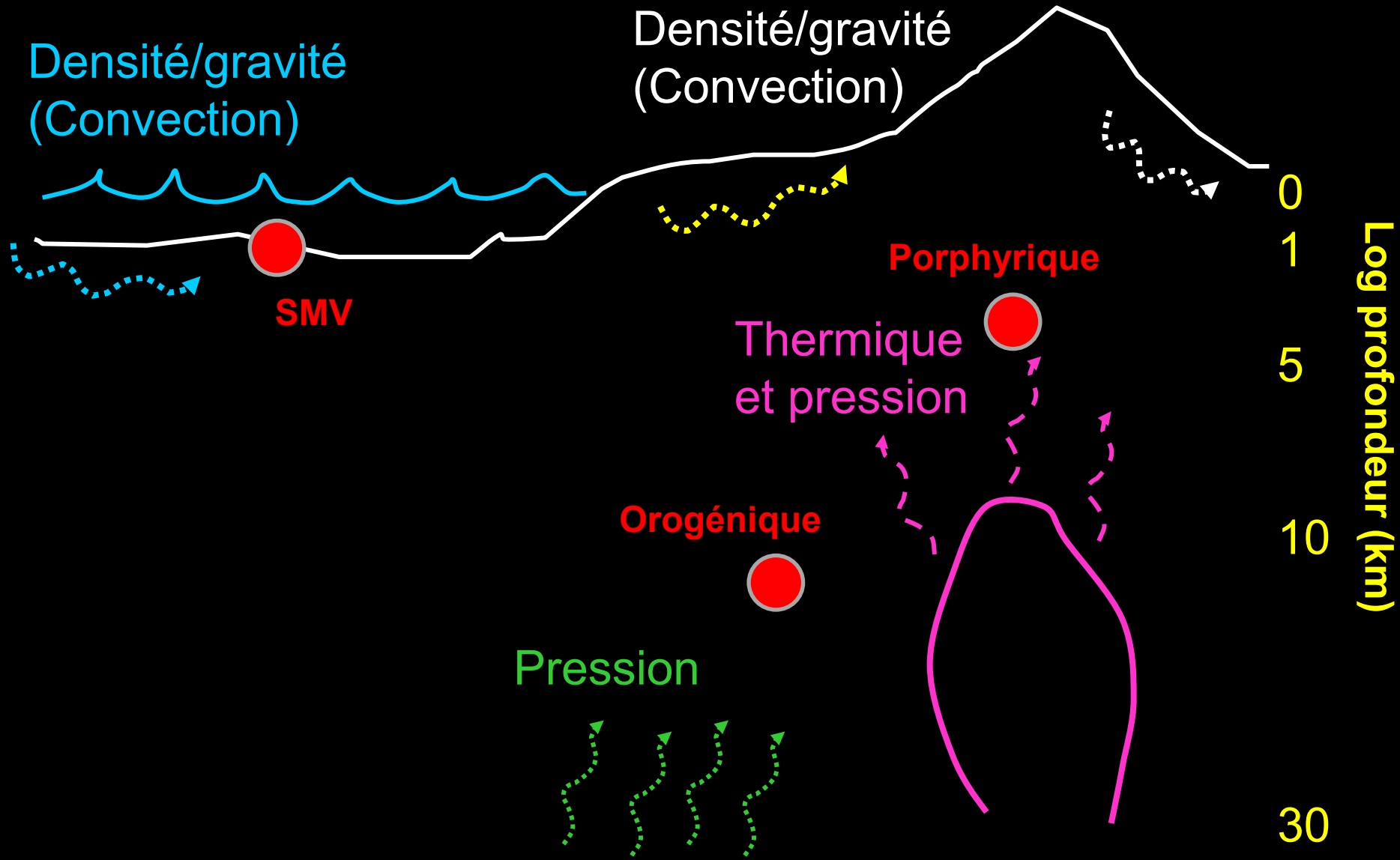
Fluides en fonction de la profondeur



Mécanismes de mise en mouvement des fluides – régime hydraulique

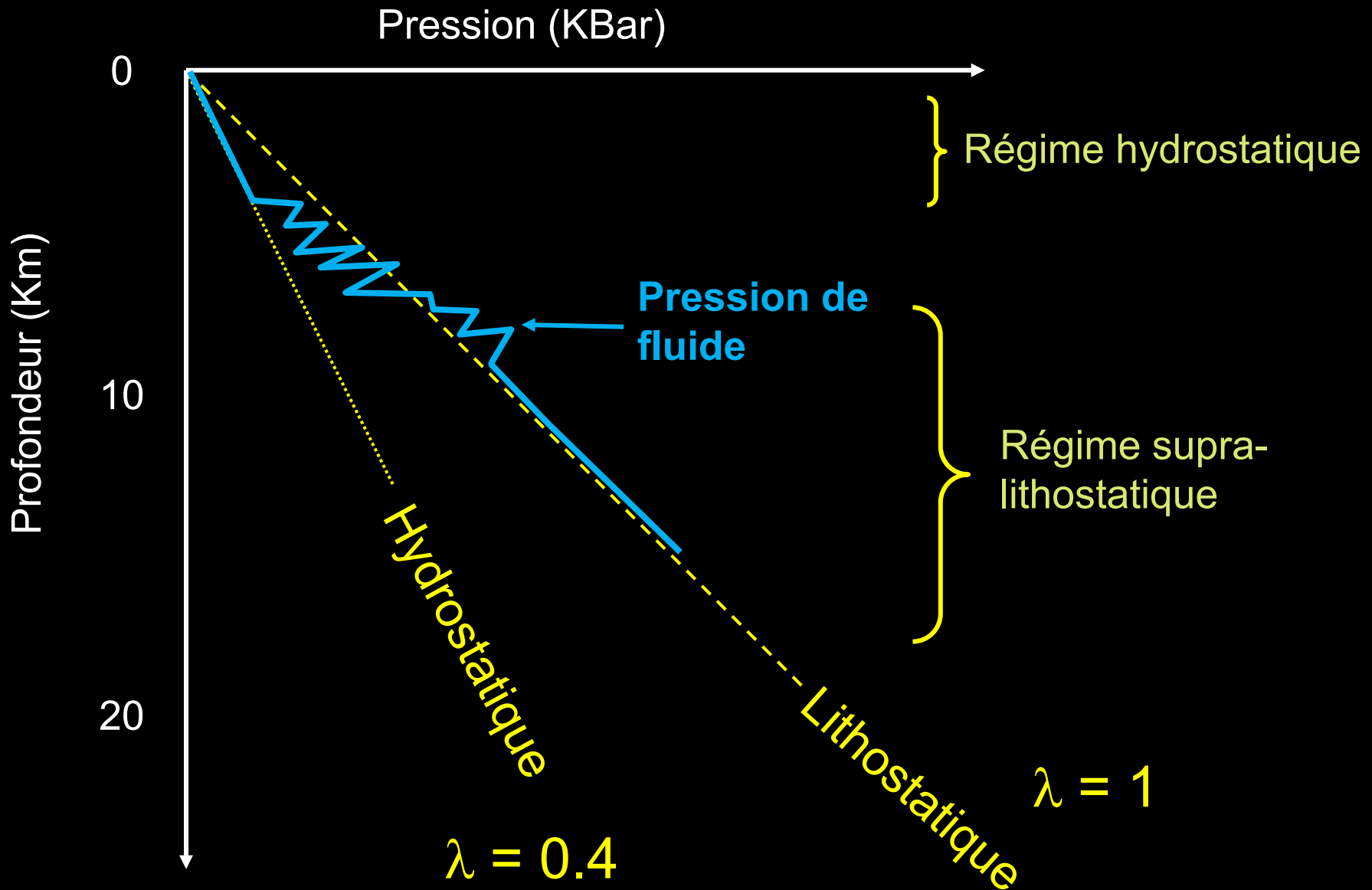


Mécanismes de mise en mouvement des fluides

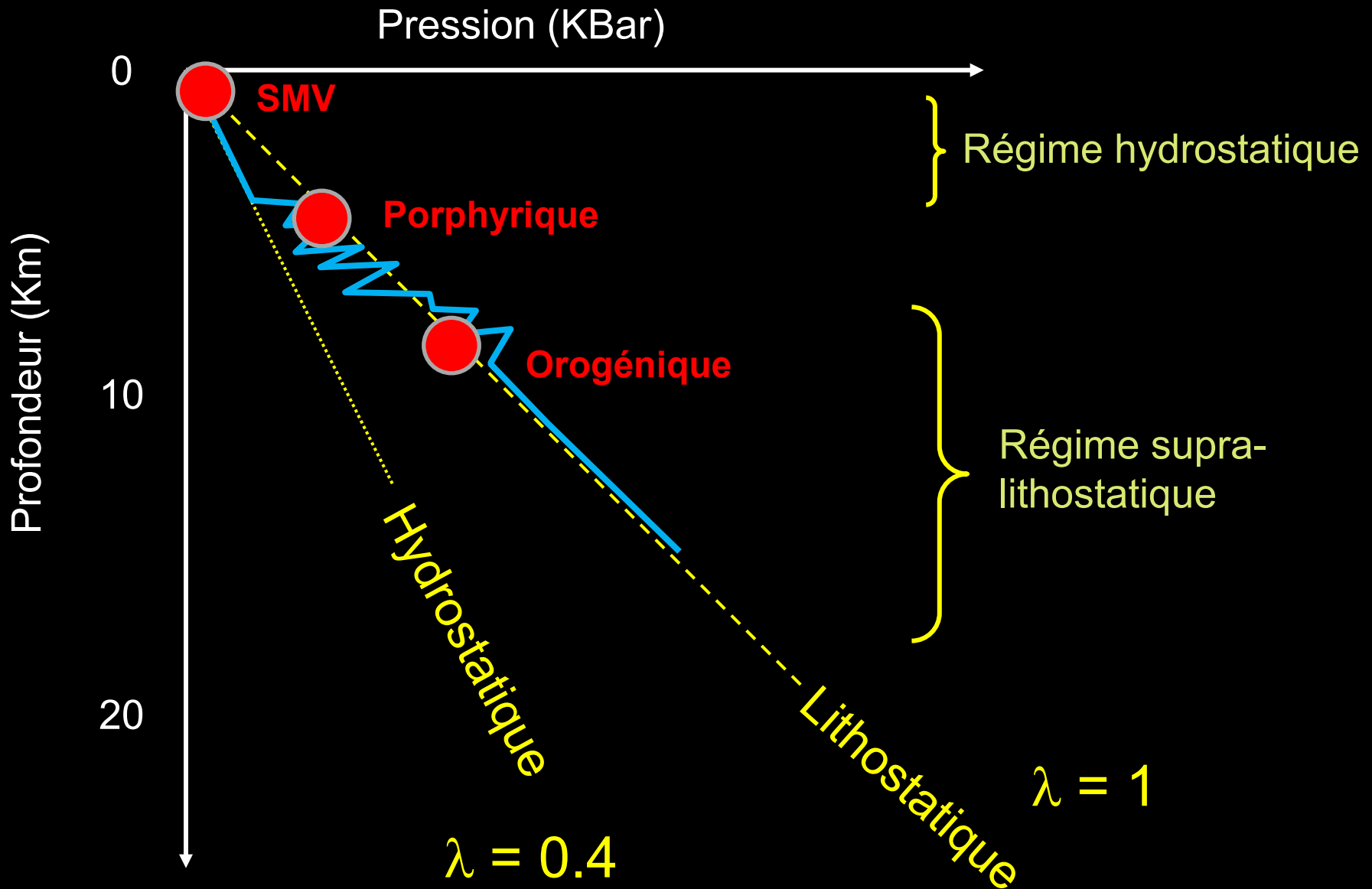


Les regimes hydrauliques

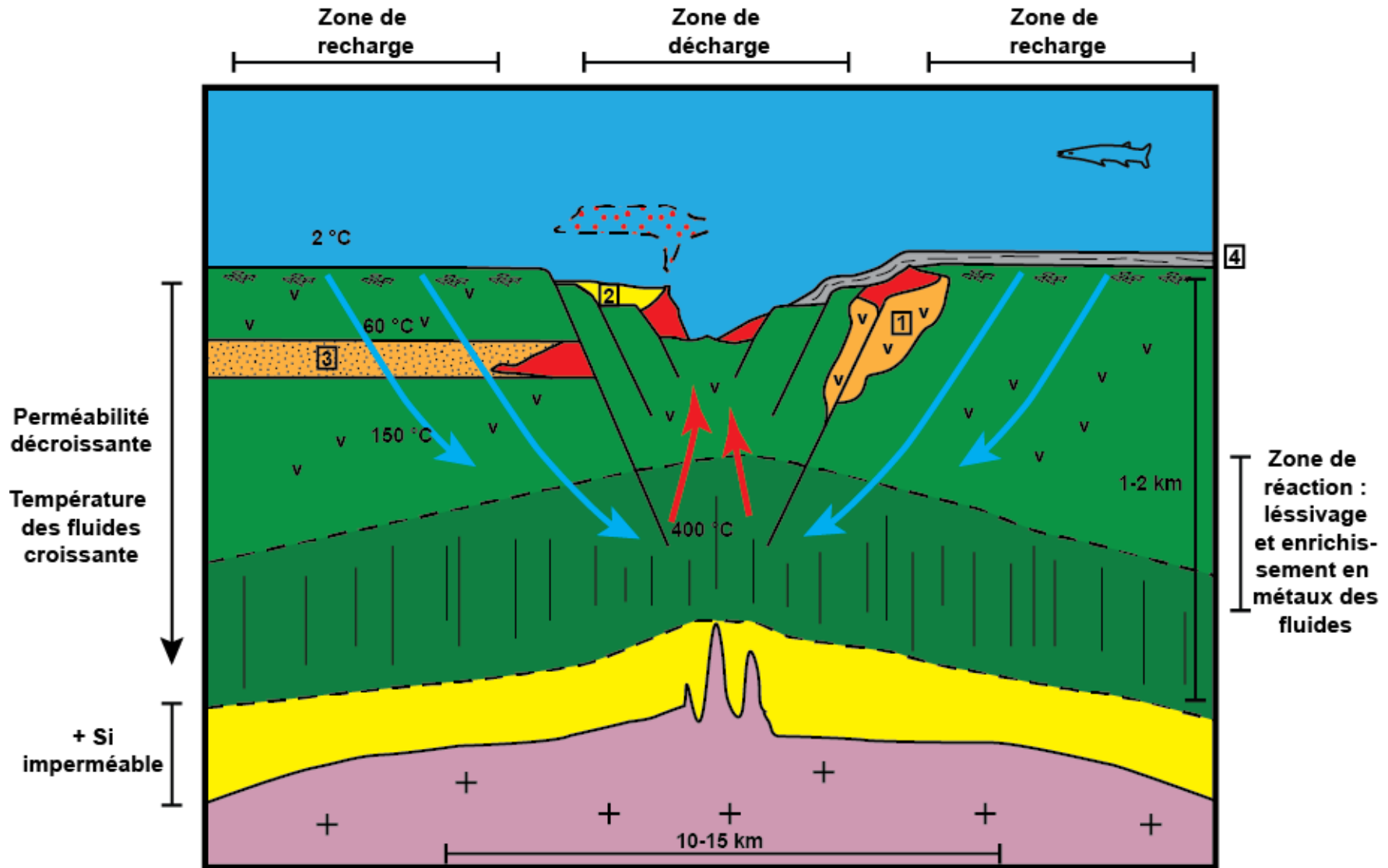
De façon générale, la porosité est une fonction décroissante de la profondeur



Les regimes hydrauliques

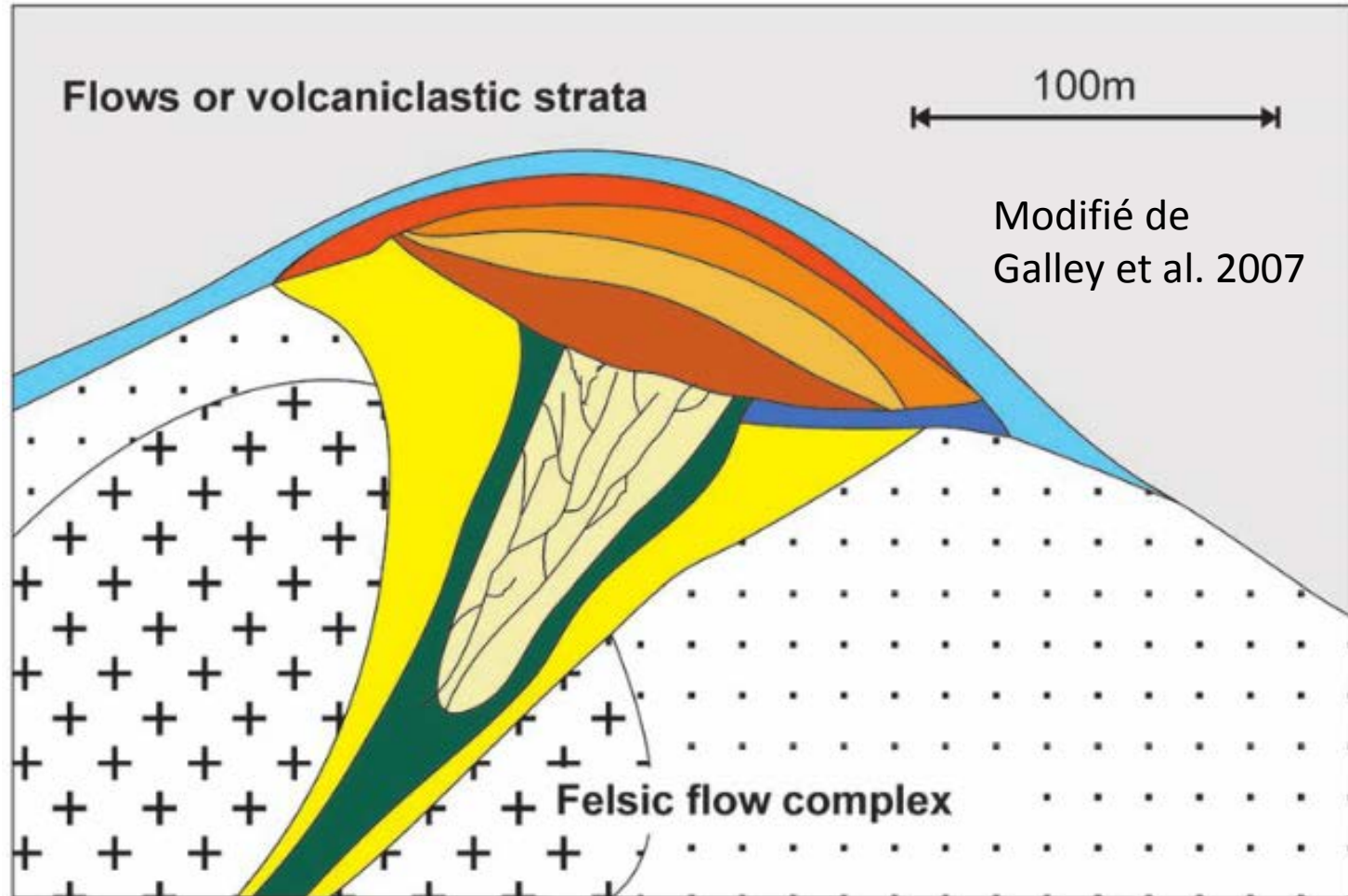


Systeme hydrothermal SMV Modifié Franklin et al., 2005



- 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



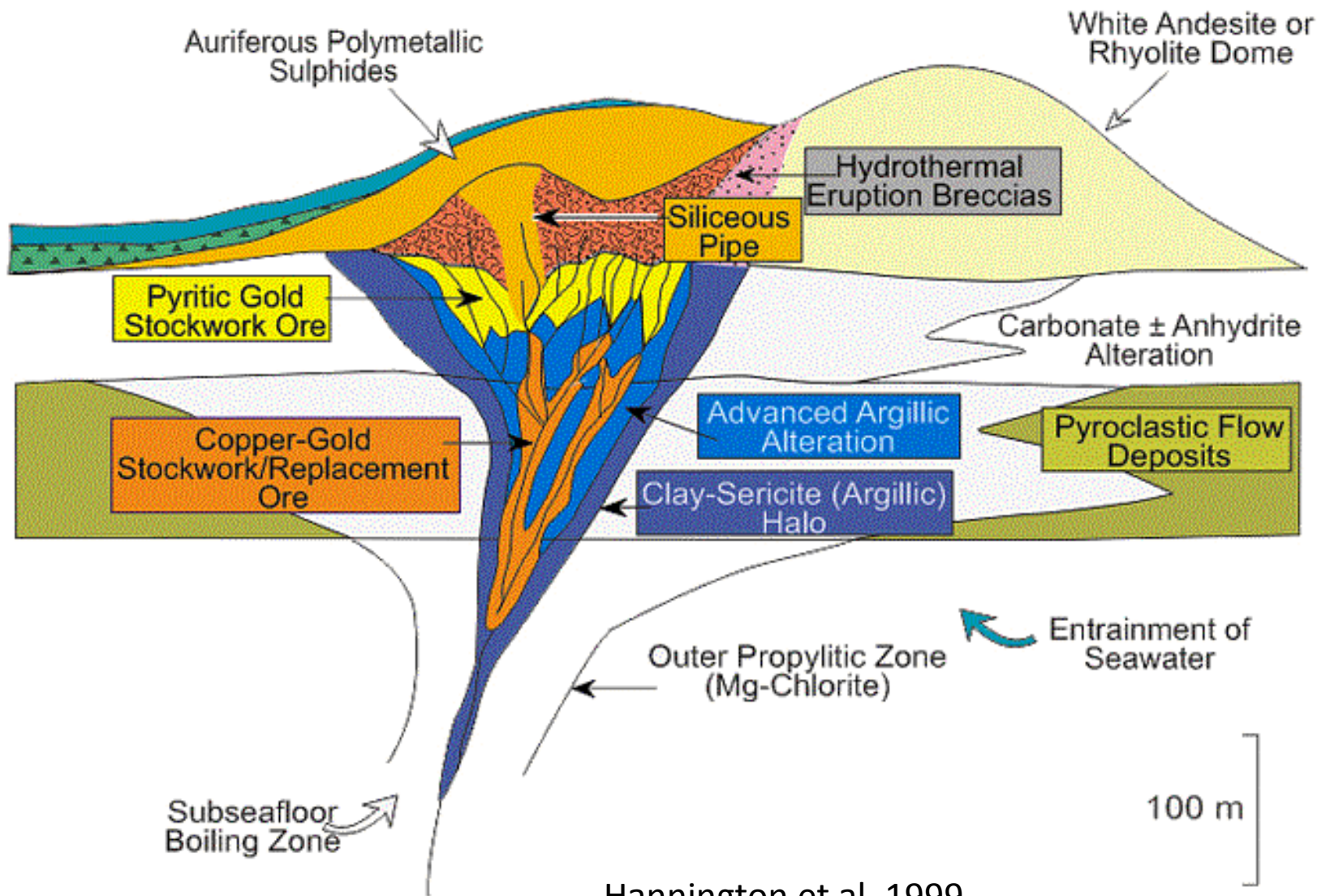
Alteration

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

- Pyrite-spalerite-galena tetrahedrite-Ag-Au
- Pyrite-spalerite-galena
- Pyrite-spalerite-chalcoppyrite
- Chalcoppyrite-pyrrhotite-pyrite

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

SMV aurifère avec des altérations alumineuses

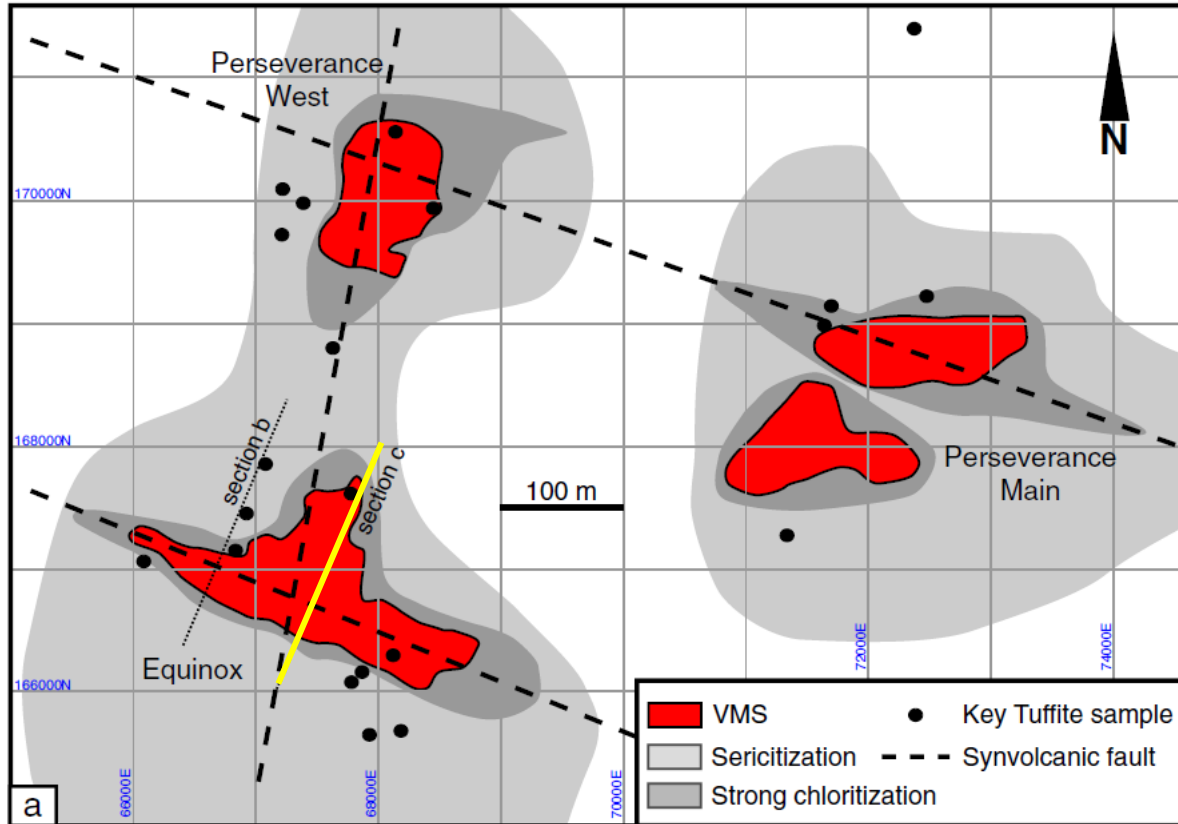


Hannington et al. 1999

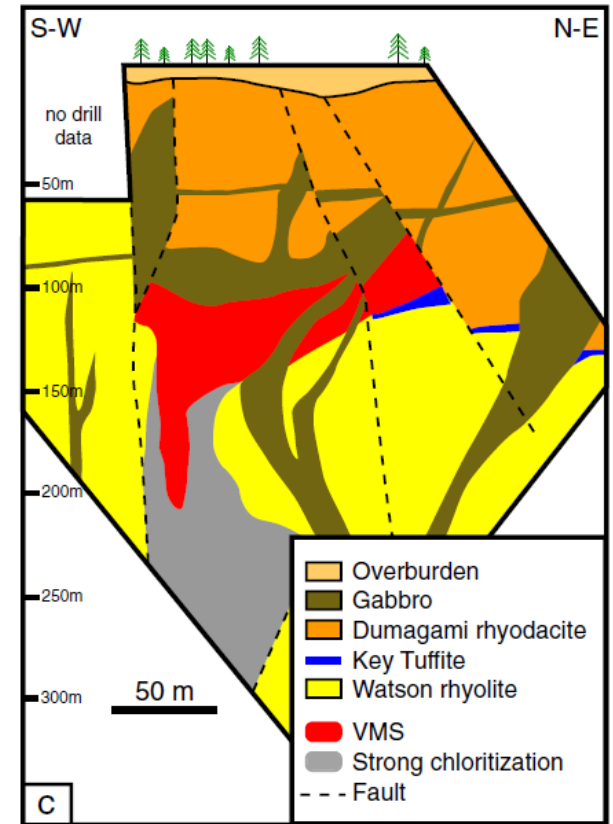
Zonalité des altérations hydrothermales

Cas de Persevérence, Matagami

Vue en plan



Vue en coupe (section C)



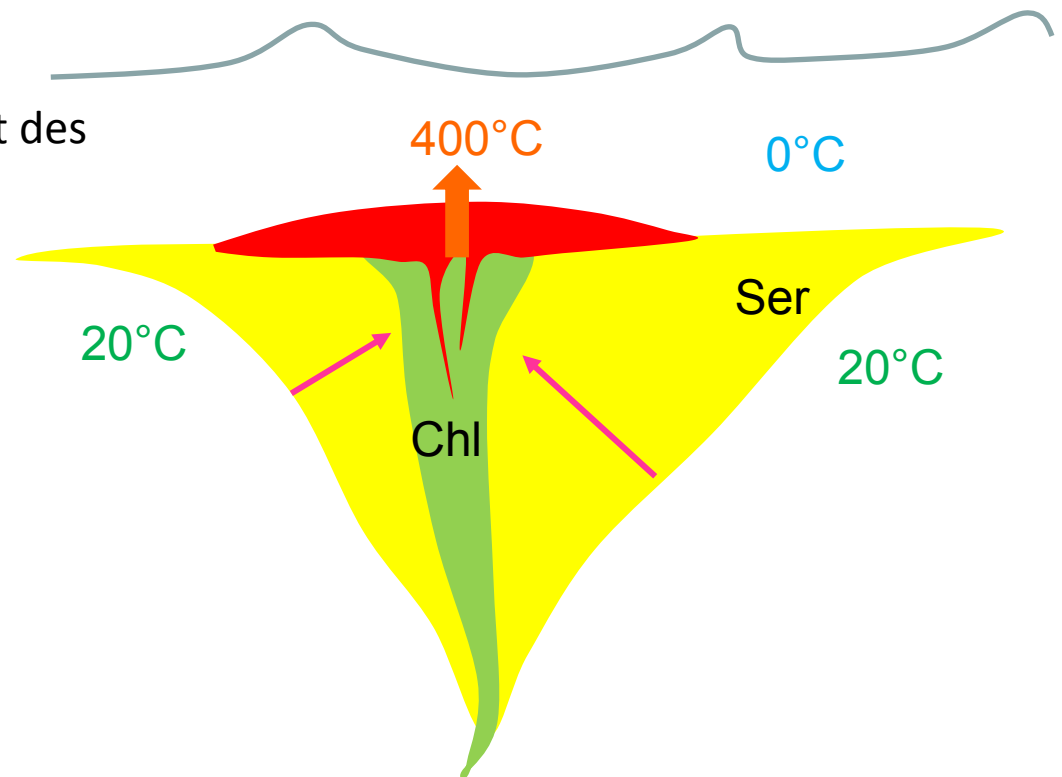
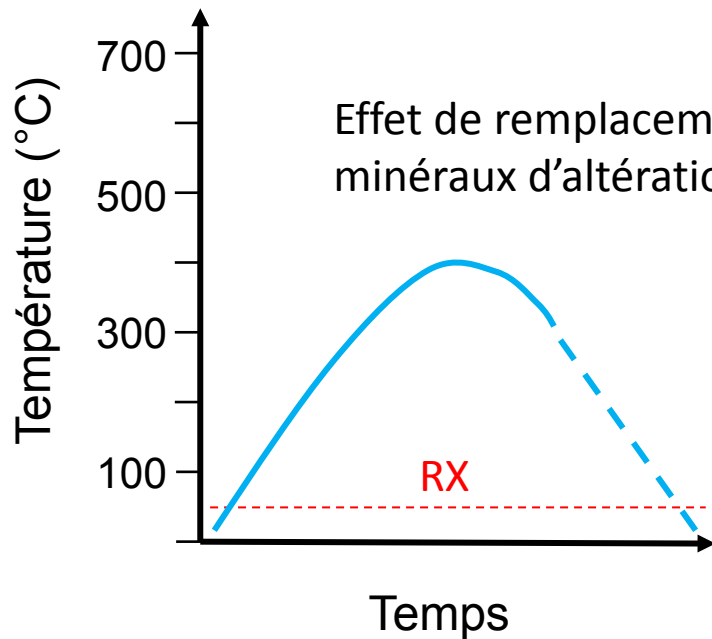
Système SMV en résumé

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

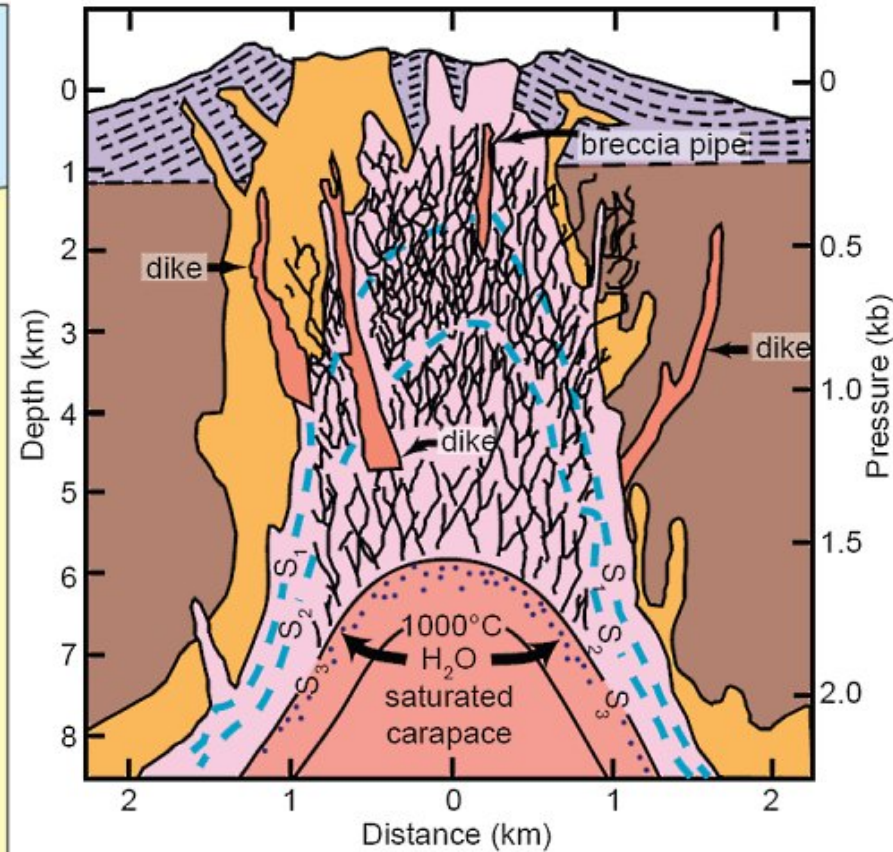
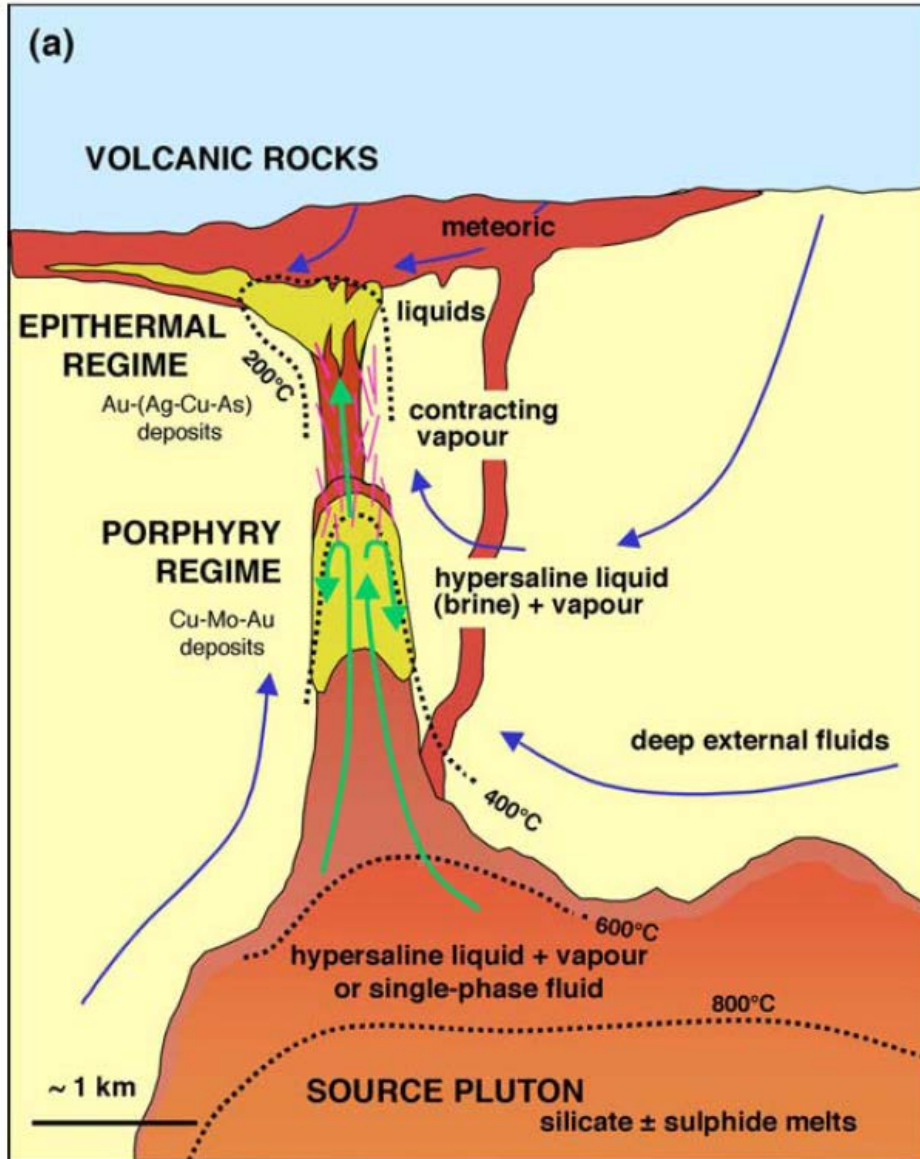
Système réactif, car ΔT° atteint jusqu'à 400°C

Large halo, car roches volcaniques poreuses, fracturation

Régime hydraulique hydrostatique (subsurface)

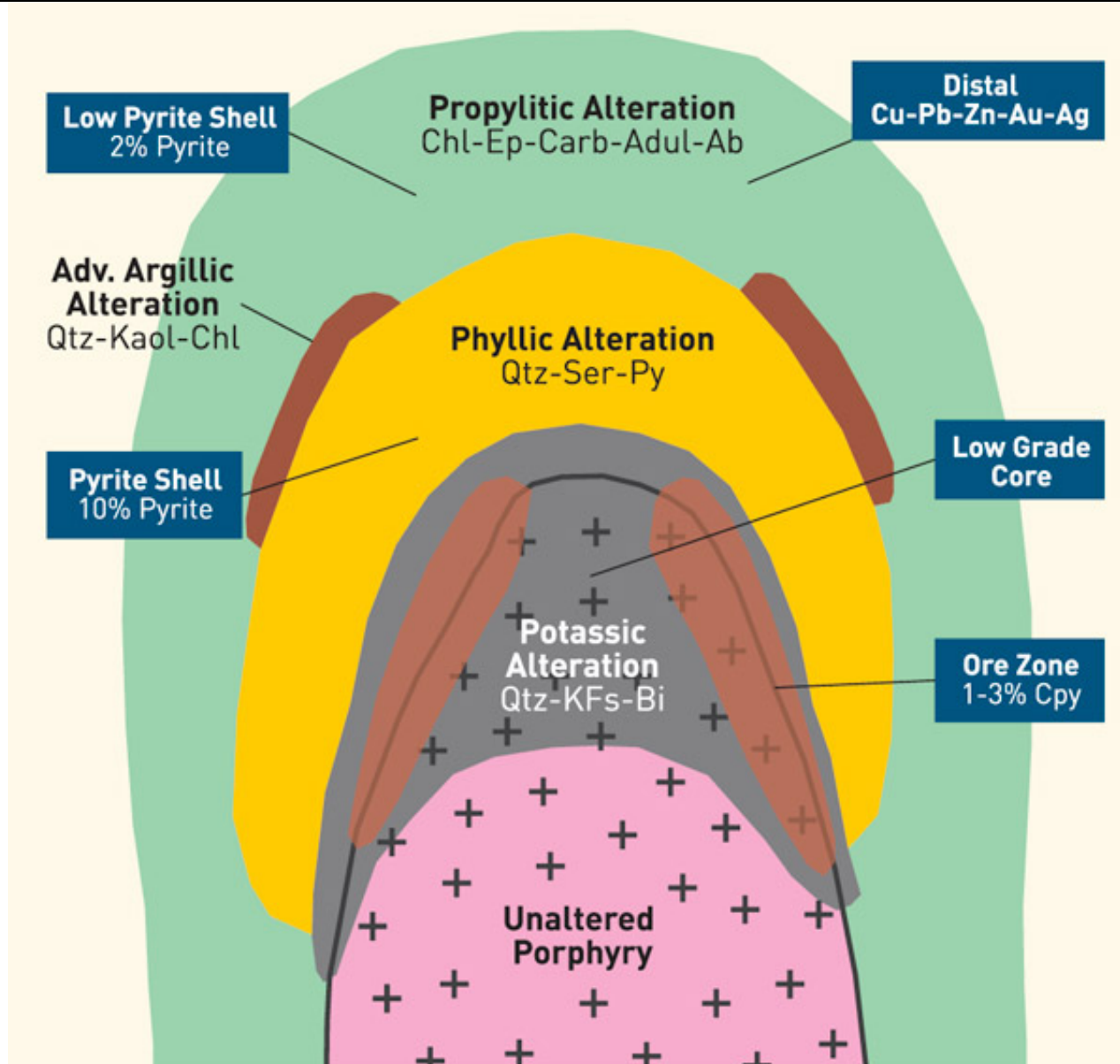


Système porphyrique - modèle



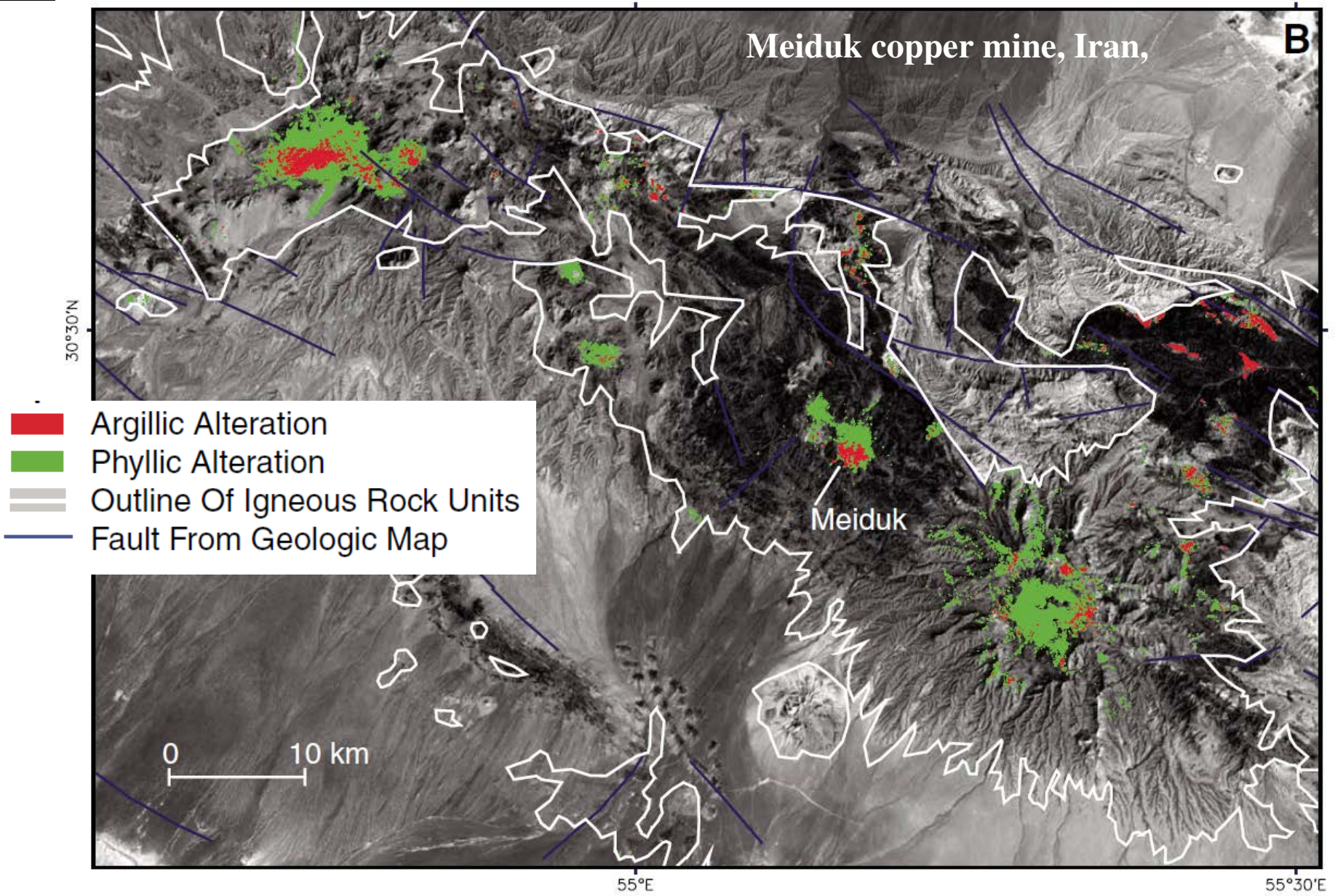
Modifié de Burnham, 1979,
Geochemistry of hydrothermal ore
deposits

Halo d'altération hydrothermale

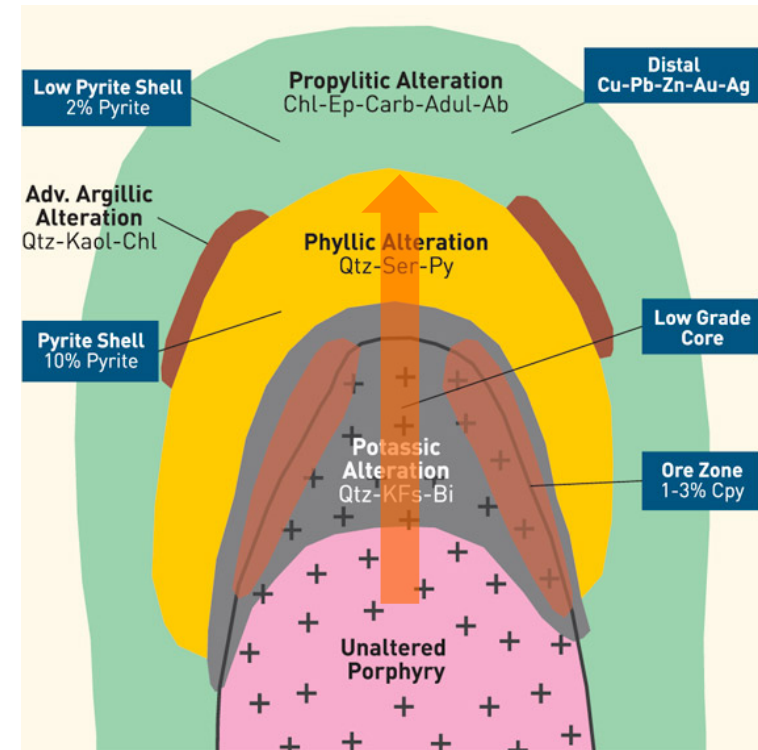
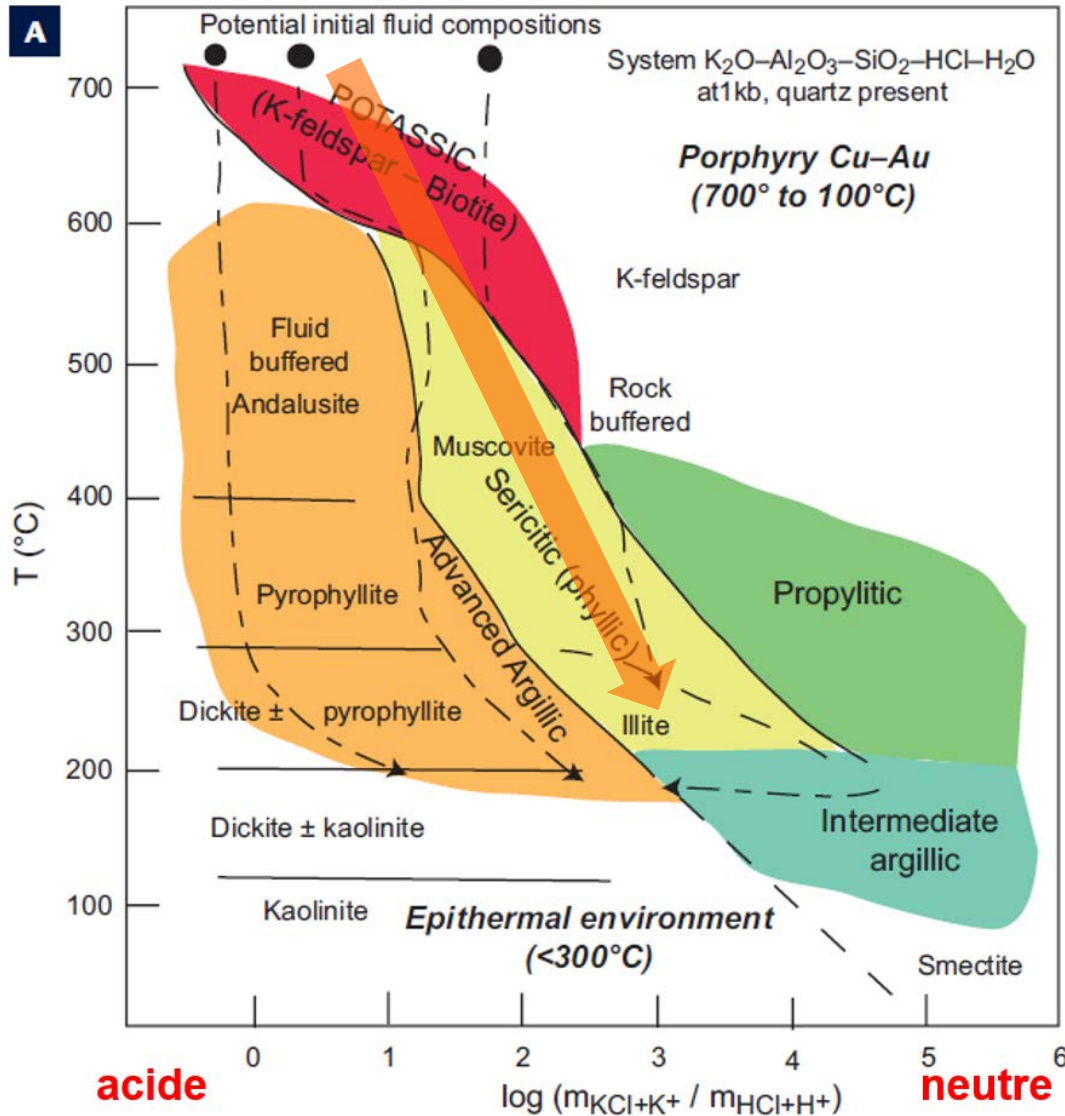


Modifié de Lowell and Guilbert, 1970

Halo d'altération hydrothermale - Hypersectral



Les altérations hydrothermales et leur évolution



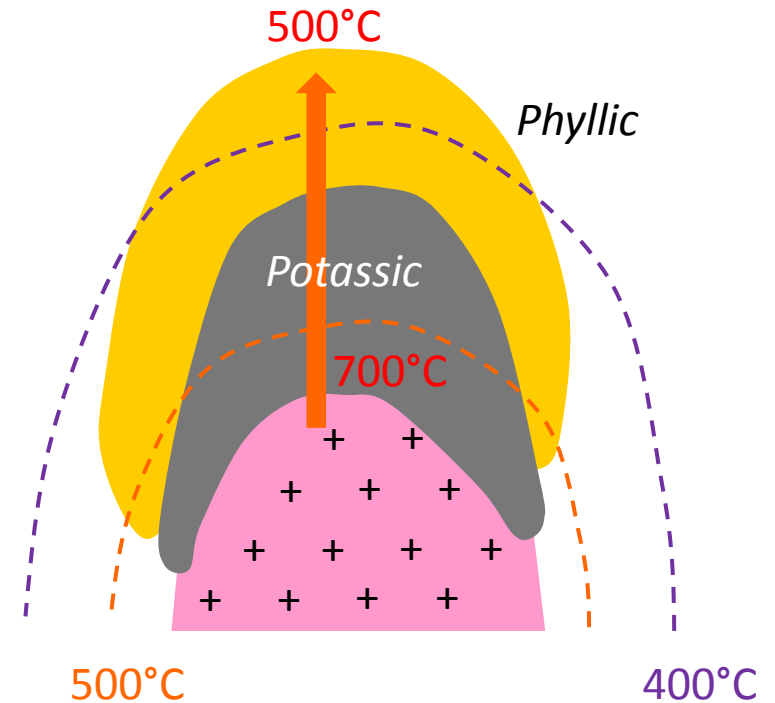
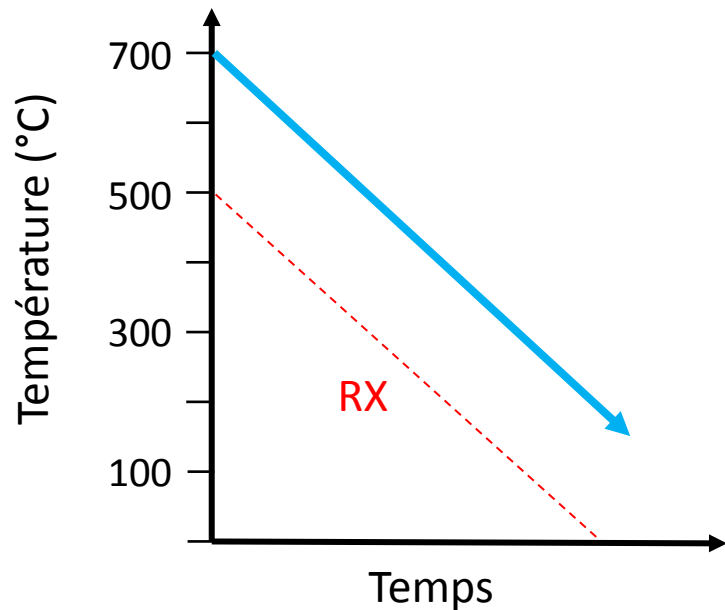
Système porphyrique en résumé

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

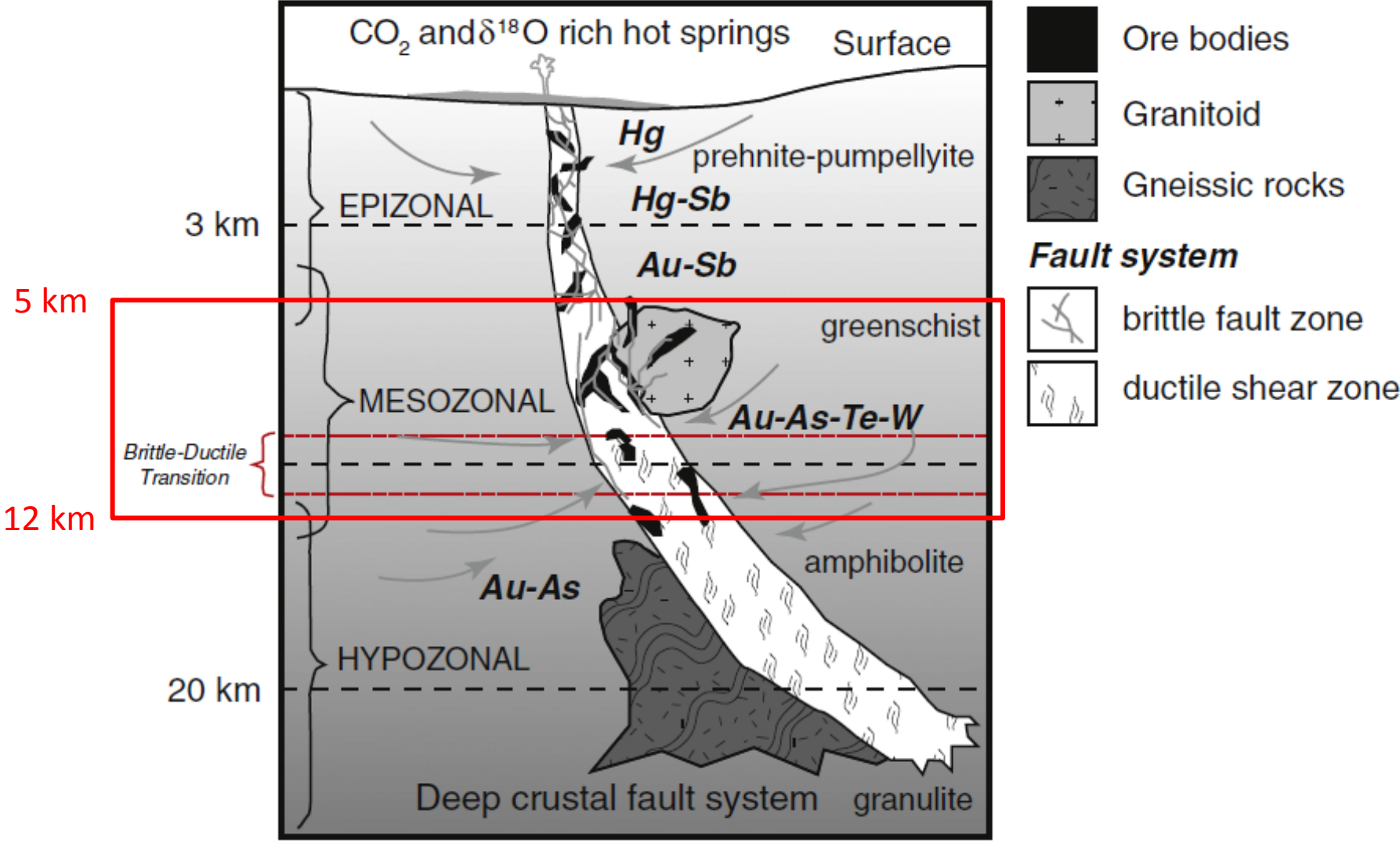
Système réactif, car $\Delta T^\circ \sim 200^\circ \text{C}$

Large halo, car micro-fracturation et système diffus

Régime hydraulique transitionnel (hydrostatique et lithostatique)

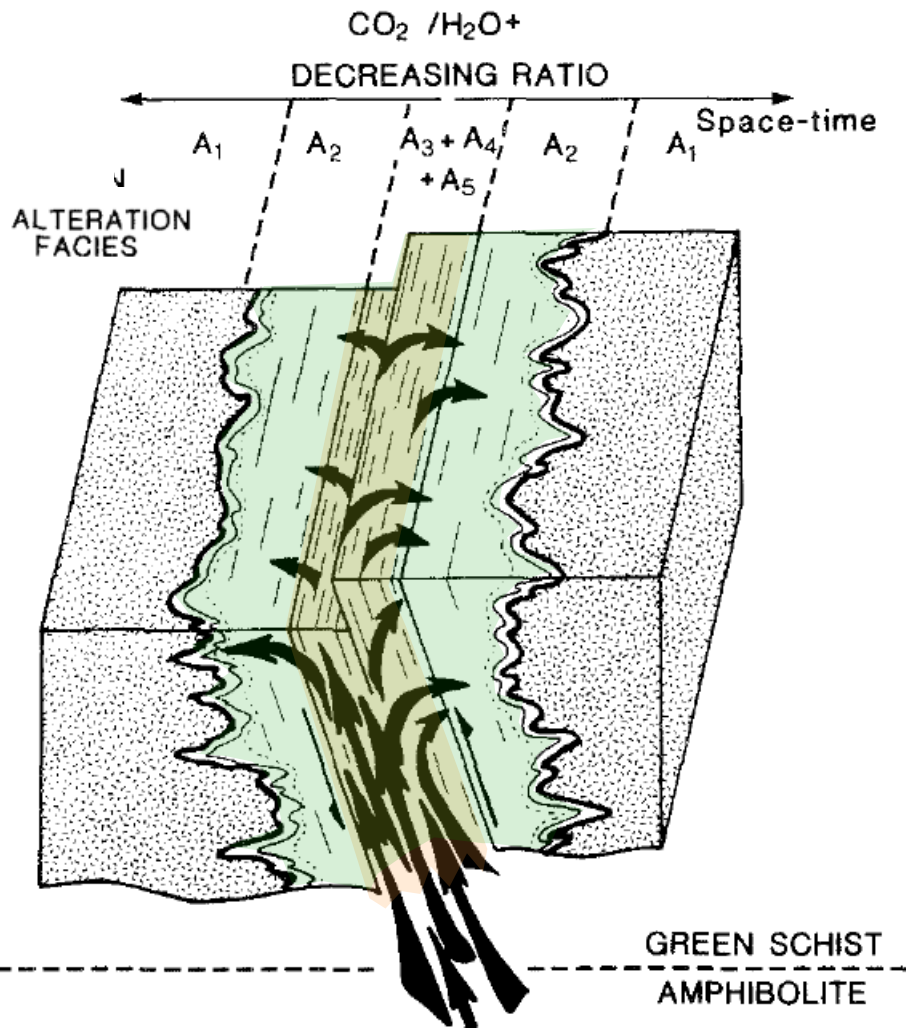


Gisements Au orogéniques - *Le continuum révisé*



Goldfarb et Groves, 2015, Lithos

Concept de diffusion chimique



Dubé et al., 1987: Min and Petro

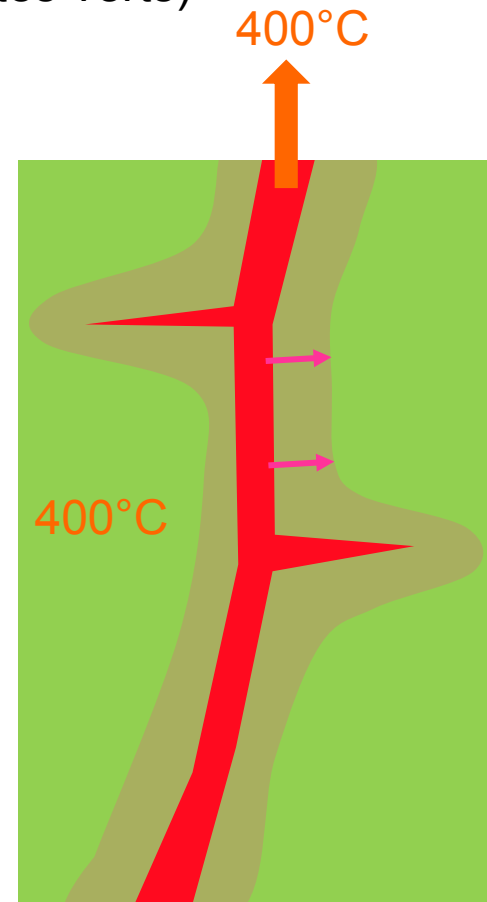
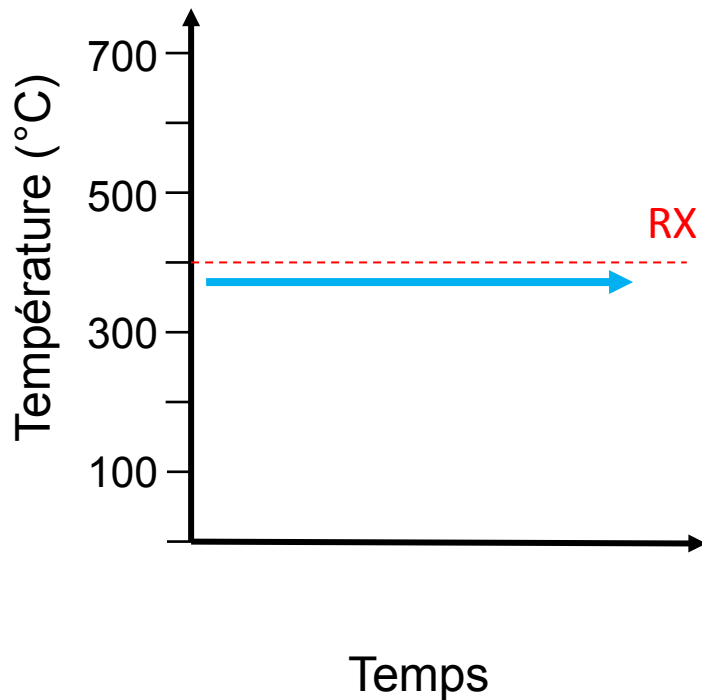
Système orogénique en résumé

Système stable en température (300 à 450° C)

Système peu réactif, car ΔT° atteint $\sim 0^\circ$ C

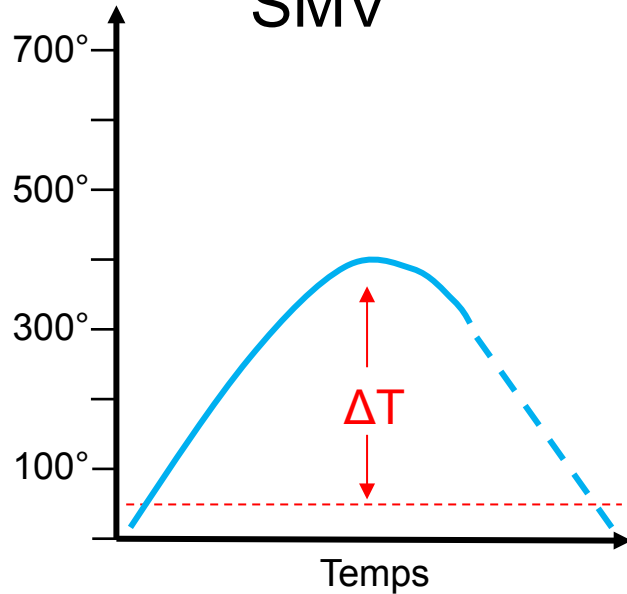
Très faible halo, car roches sont « ductiles » (schistes verts)

Régime hydraulique supralithostatique

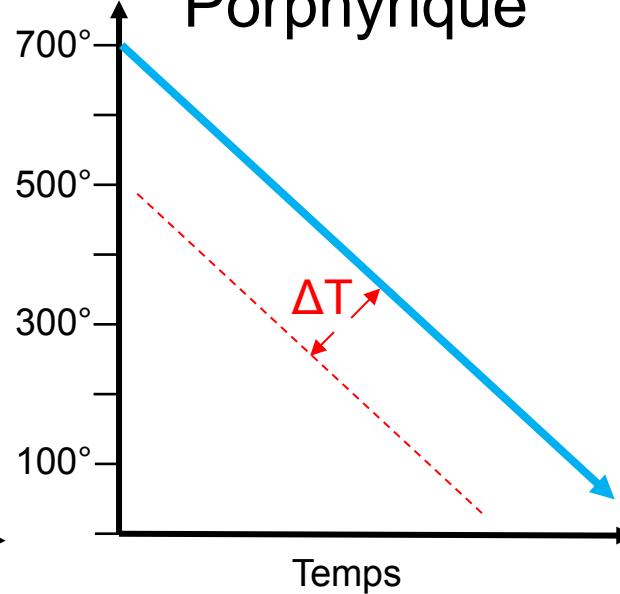


Résumé des processus et implications

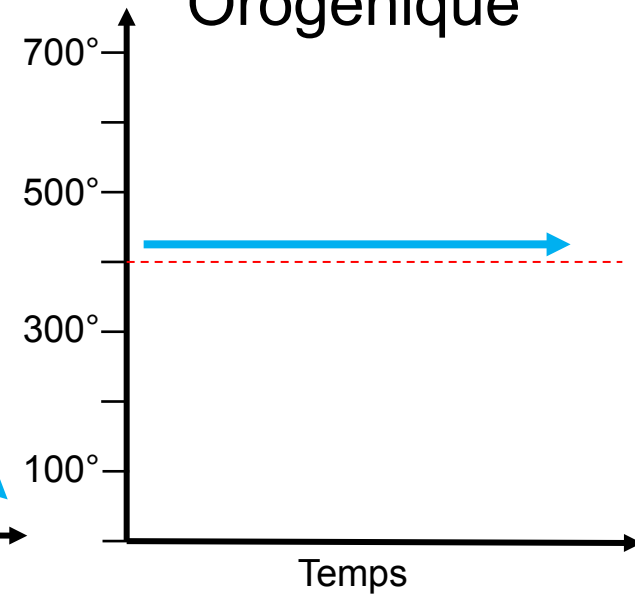
SMV



Porphyrique



Orogénique



Très large halo

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

Très large halo

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

Très restreint

- Système stable T°
- $\Delta T^\circ \sim 0^\circ \text{ C}$
- 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	OH^-
Halide ions	F^- , Cl^- , Br^- , I^-
Sulfur species	HS^- , S_n^- , S_nS^{2-} , SO_3^{2-} , $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$, SO_4^{2-}
Ammonia (ammine)	NH_3
Oxyanions	CO_3^{2-} , PO_4^{3-} , AsO_3^{3-} , SbO_3^{3-} , MoO_4^{2-} , WO_4^{2-} , SiO_4^{4-}
Thioanions	AsS_3^{3-} , SbS_3^{3-} , MoS_4^{2-} , WS_4^{2-}
Carboxylates	CH_3COO^- (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	HTe^- , Te_2^{2-} , CN^- , SCN^-

Liants, température et fugacité d'oxygène

1.5 mol NaCl + 0.5 mol KCl

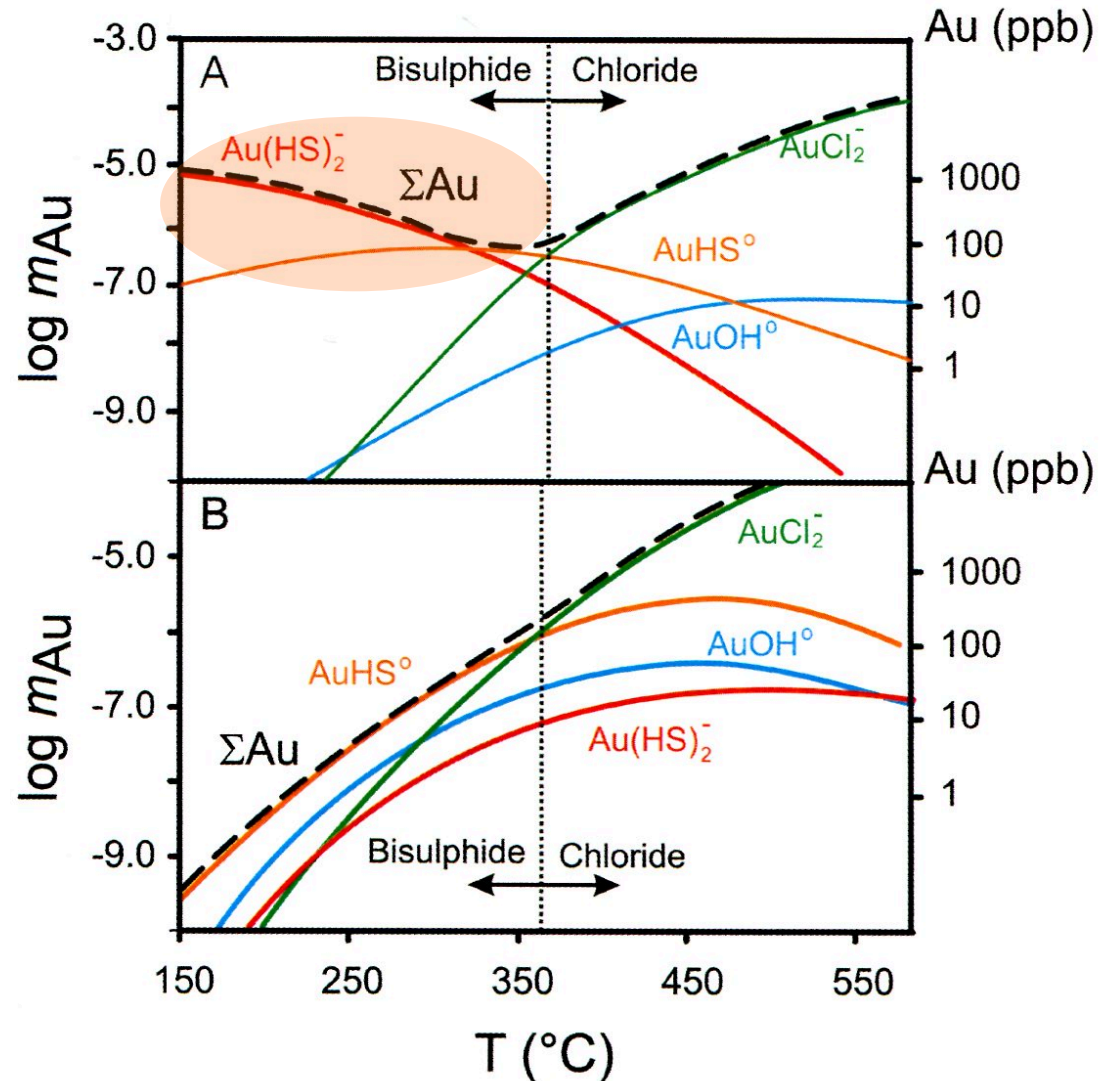
Complexes pour Au (1 kbar) 4 km

fS_2 et fO_2 tamponnés par:

Assemblage
Magnétite-Hématite

Assemblage
Pyrite-Pyrrhotite-Magnétite

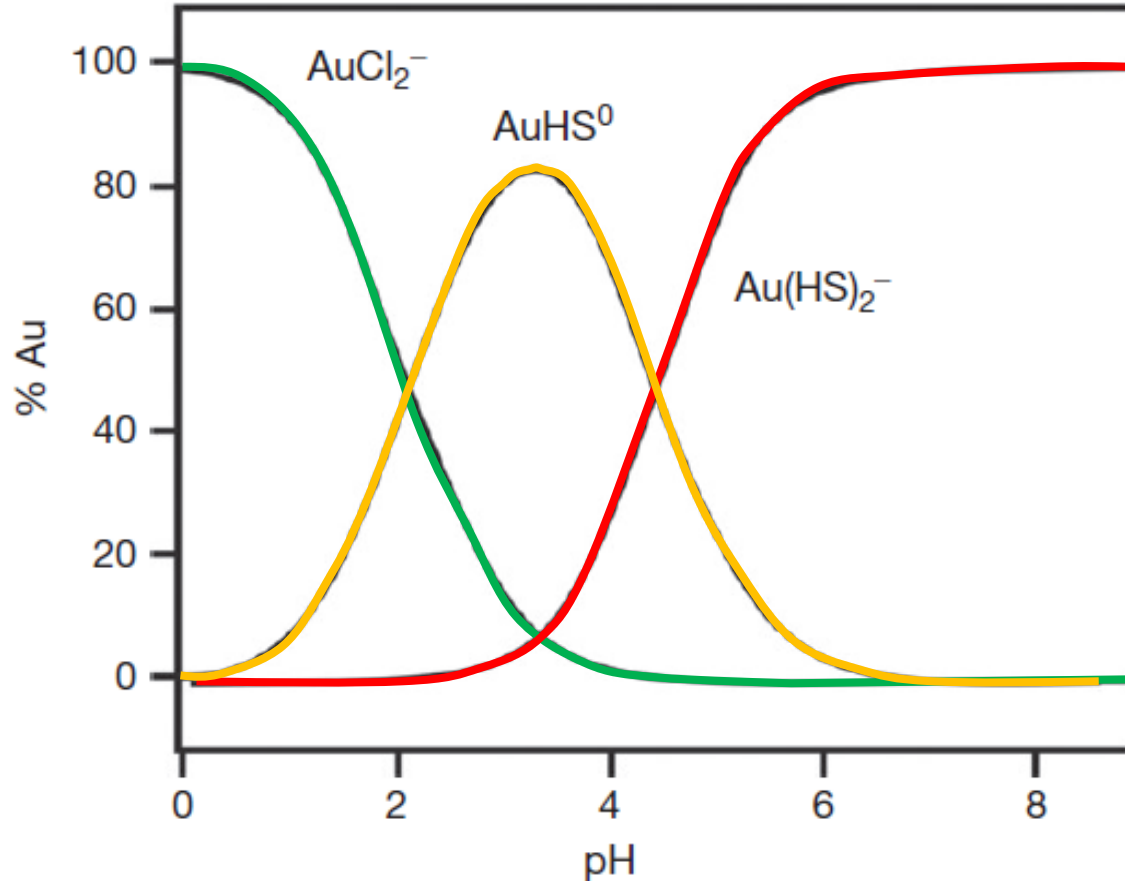
Liant Au Cl^- et HS^-



Liants et pH

400° C and 500 bar

0.5 mol de H_2S + HS^- 0.5 mol de Cl^-



Seward et al., 2014

Porphyrique



SMV



Orogénique



Liants: classification de Lewis

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

« Hard » forme des liaisons ioniques (éléments lithophiles)

« Soft » forme des liaisons covalentes (éléments chalcophiles)

Dans la nature, Cl⁻ plus important suivi de HS⁻

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⁻

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

Cl⁻

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

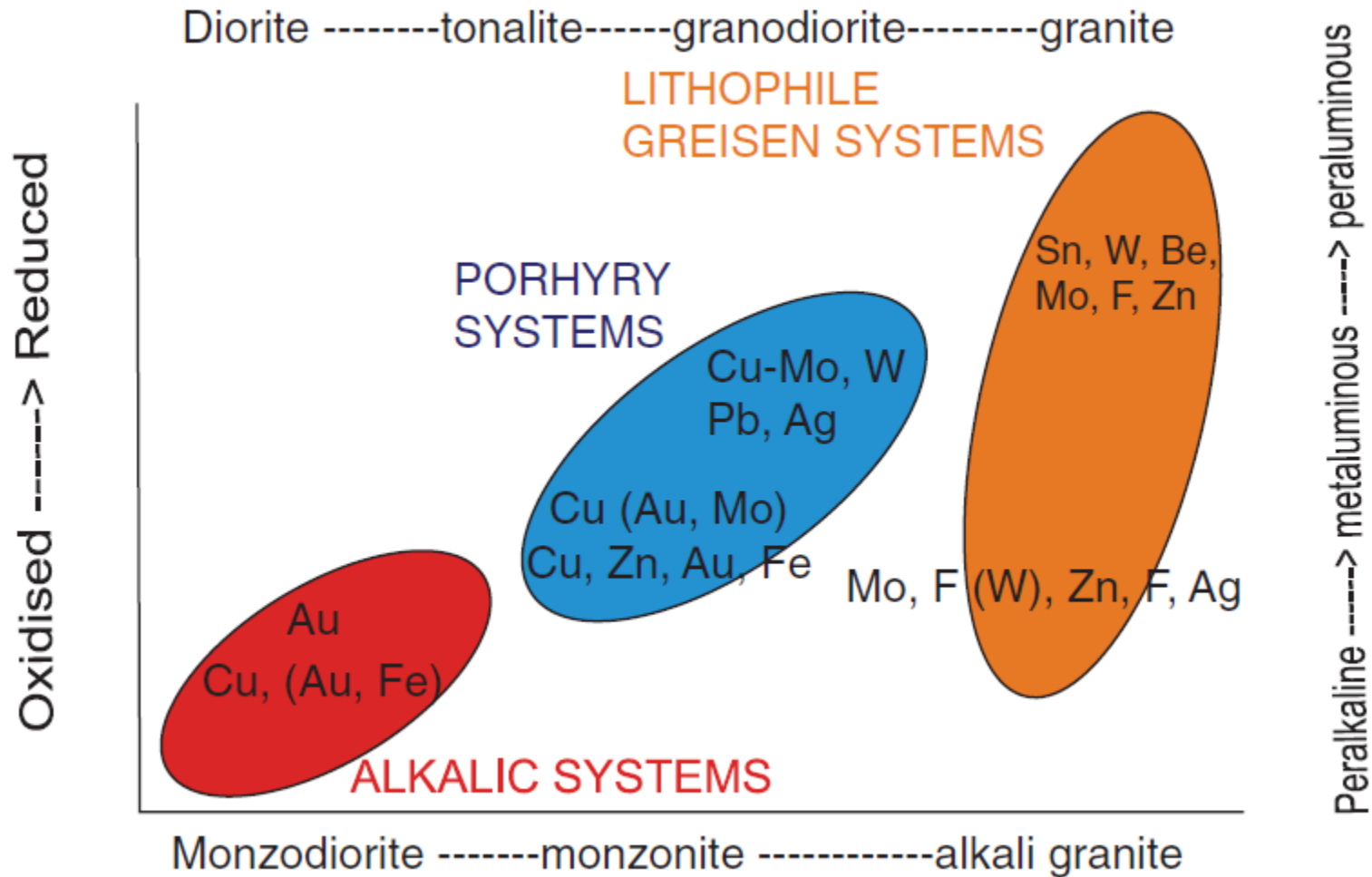
HS⁻

Expliqué en grande partie par les liants

Mais la source de l'or est importante

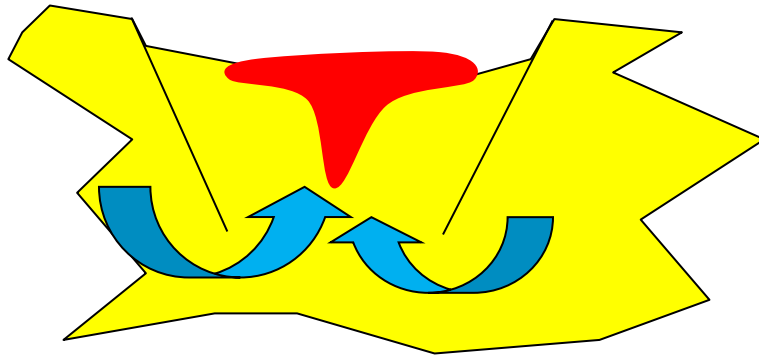
PORPHYRIQUE: Source magmatique des métaux

Métaux traces fonction de la composition des intrusions



SMV: Lessivage des roches volcaniques

Riche en Zn

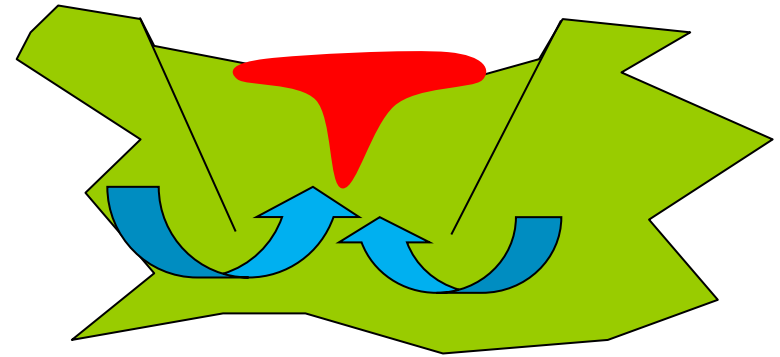


Roches felsiques

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

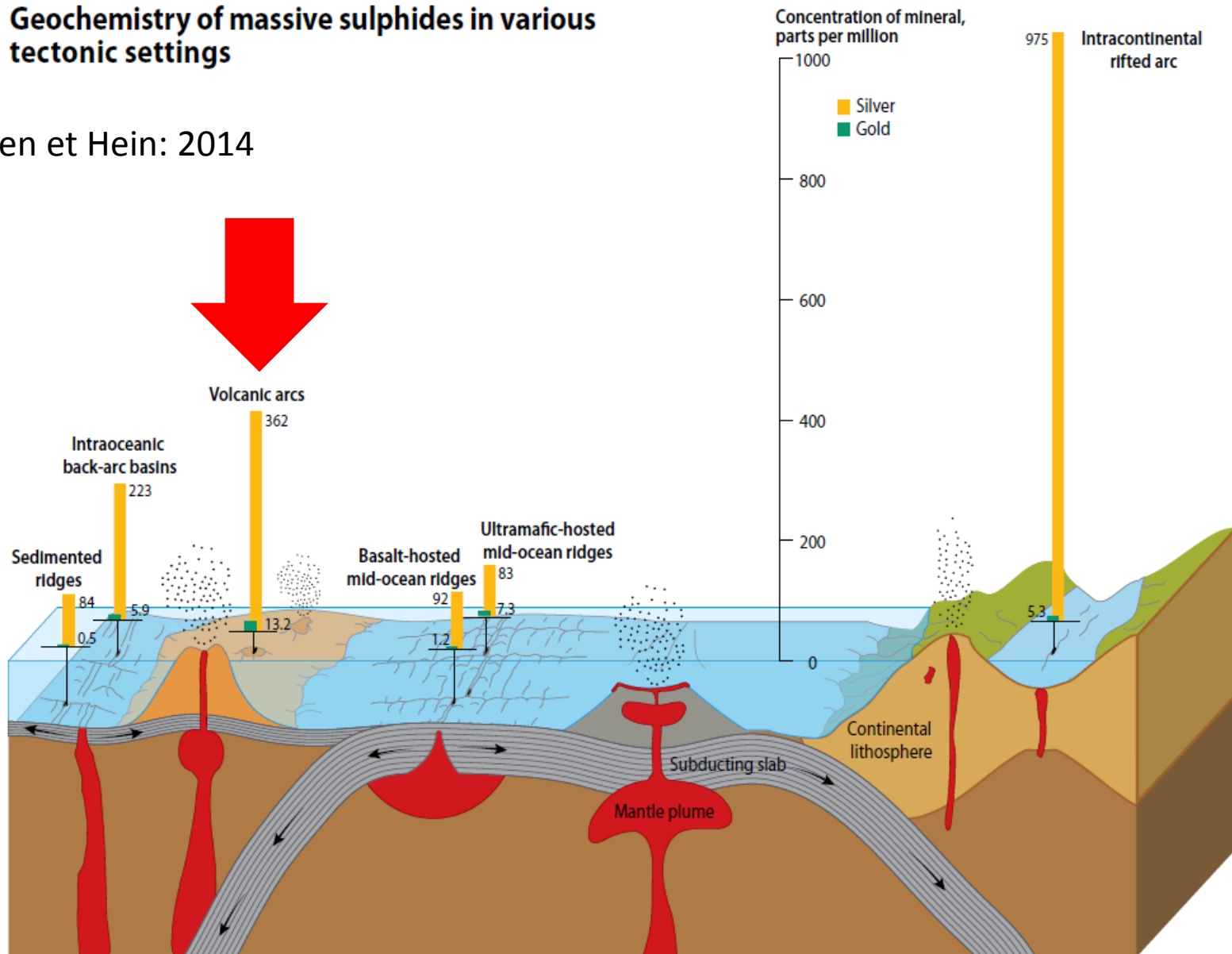
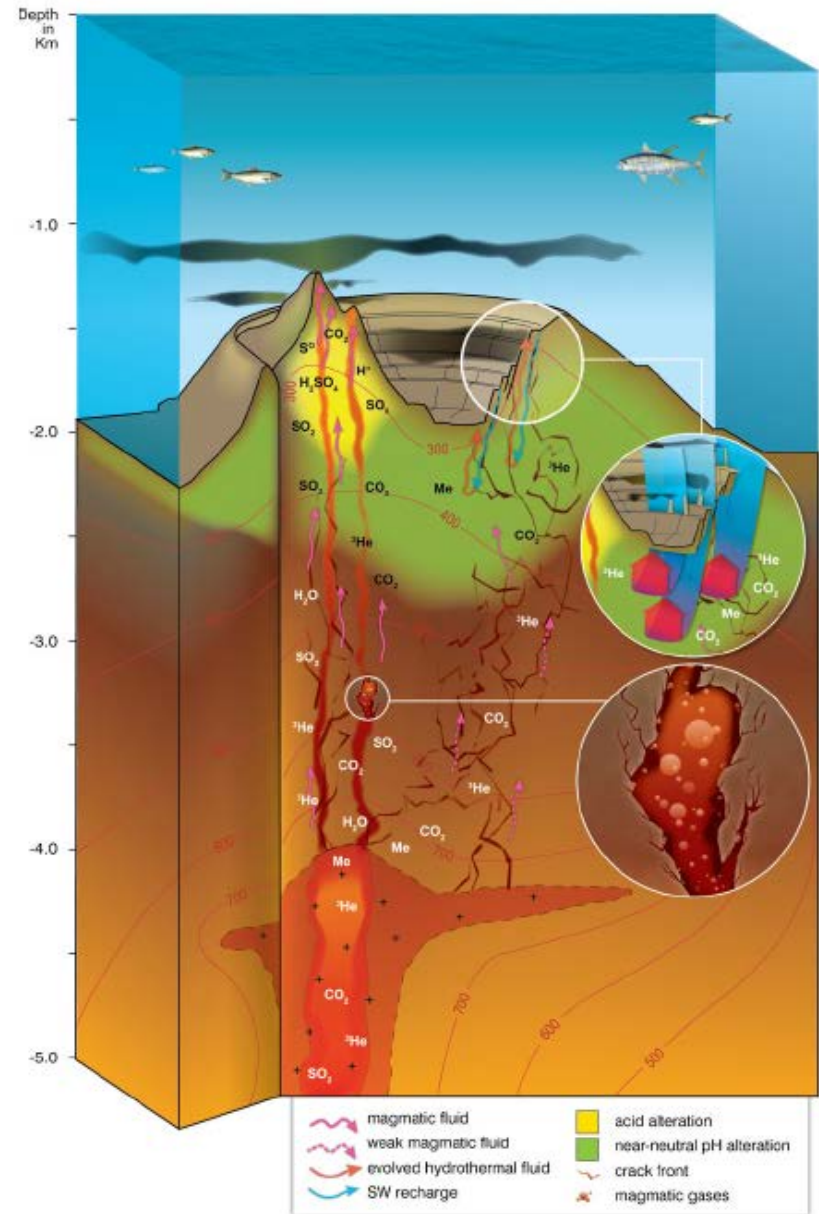
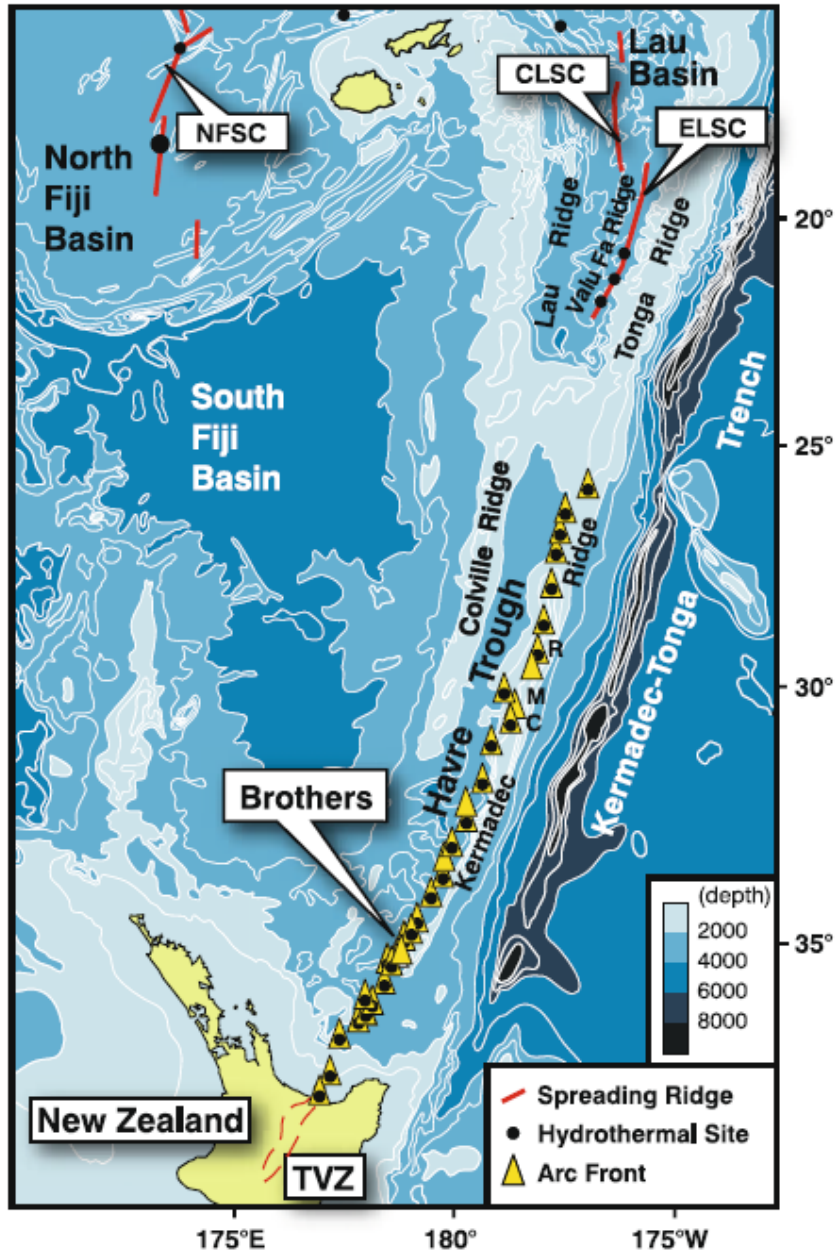
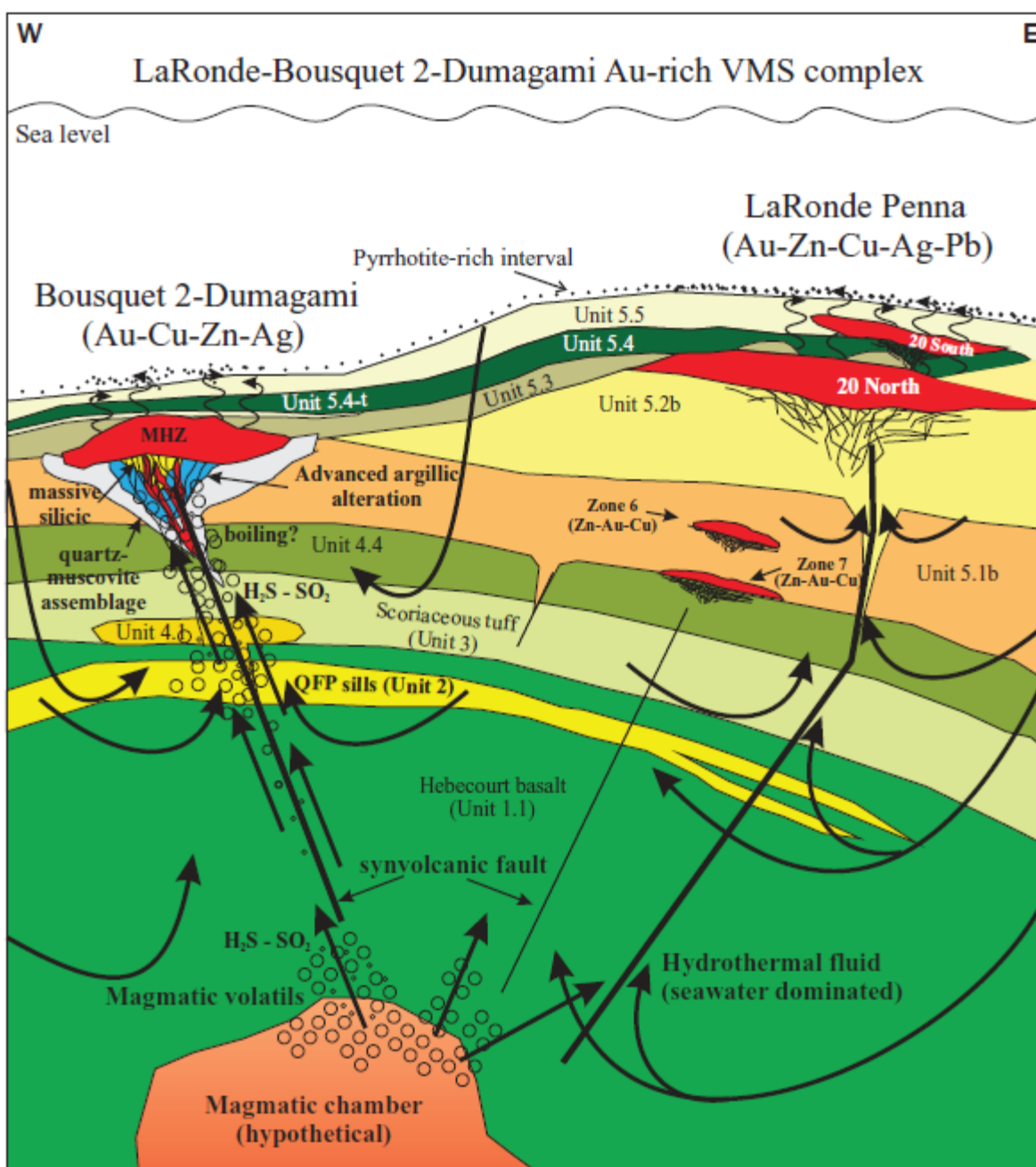


Figure 6. Concentrations of gold and silver in sea-floor massive sulphides formed in different geological settings (Source: GEOMAR)

Volcanisme d'arc sous-marin: Au

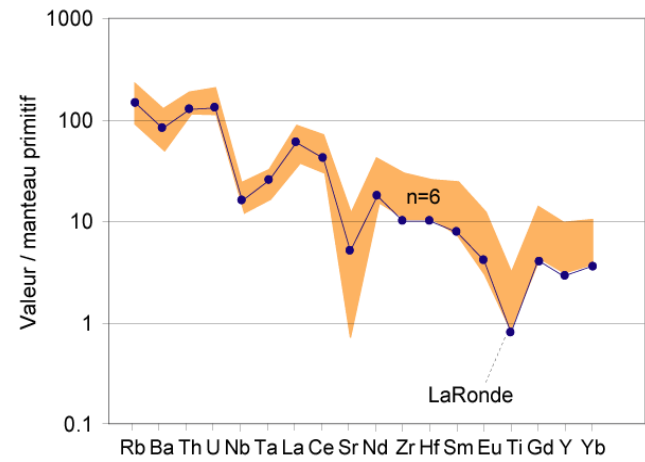


Pourquoi Au ?



Dubé et al., 2014: Econ Geol

Fl: calco-alkaline

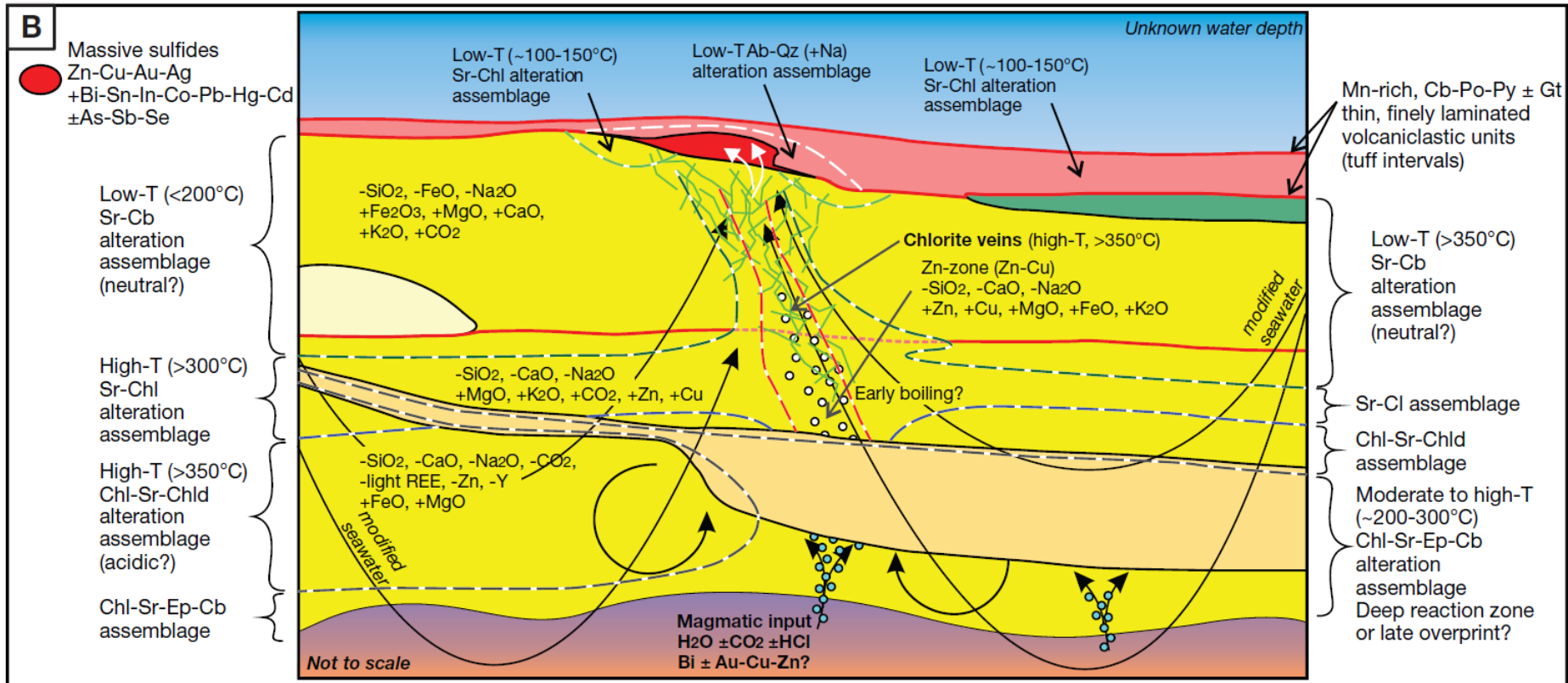


Gaboury et Pearson, 2008: Econ Geol

Si Au magmatique: métaux granophiles

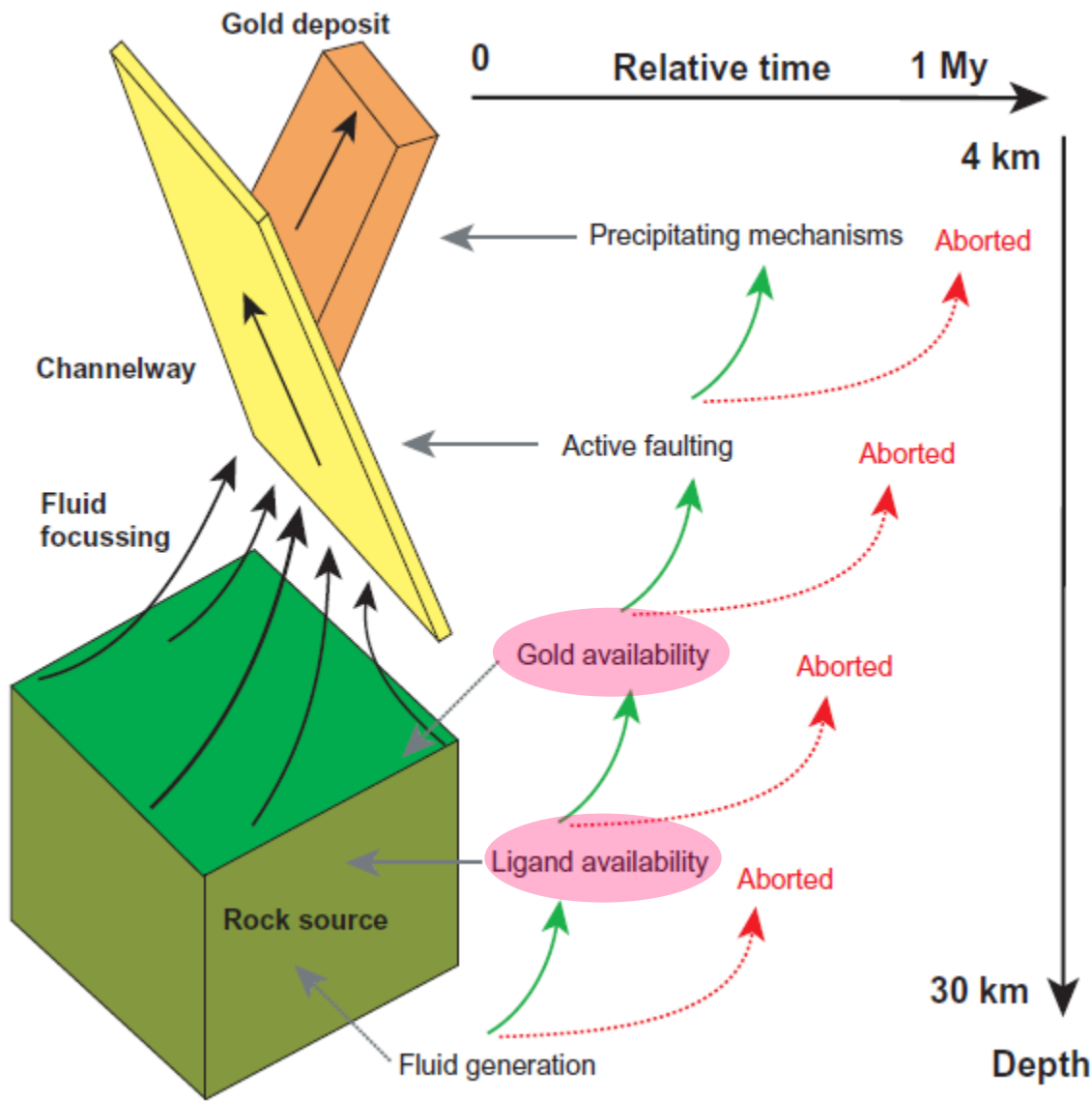
Sn, W, Bi, Te, Mo avec \pm altération alumineuse

Mine Lemoine, Chibougamau

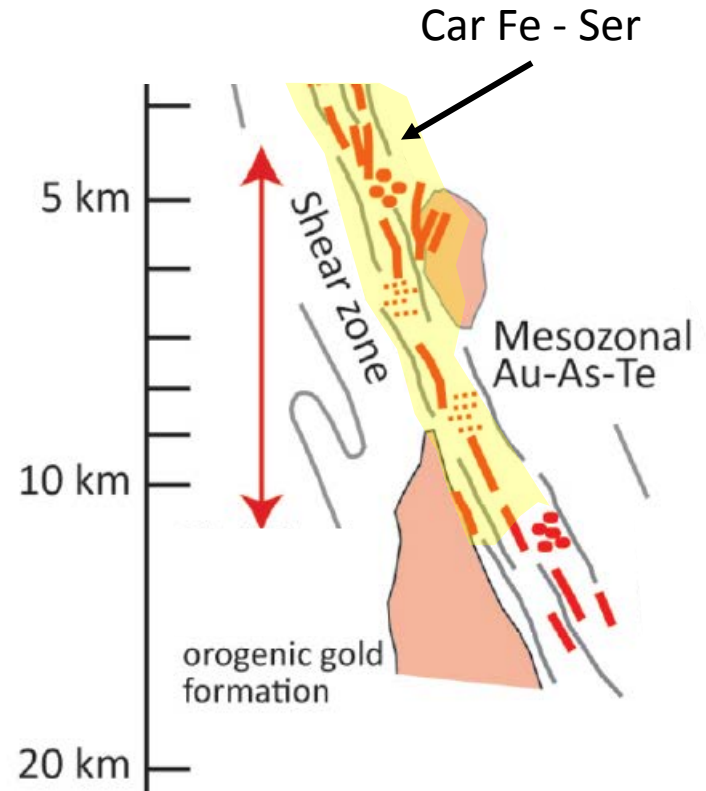


Mercier-Langevin et al., 2014: Mineralium Deposita

Orogénique: sources Au variées (?)

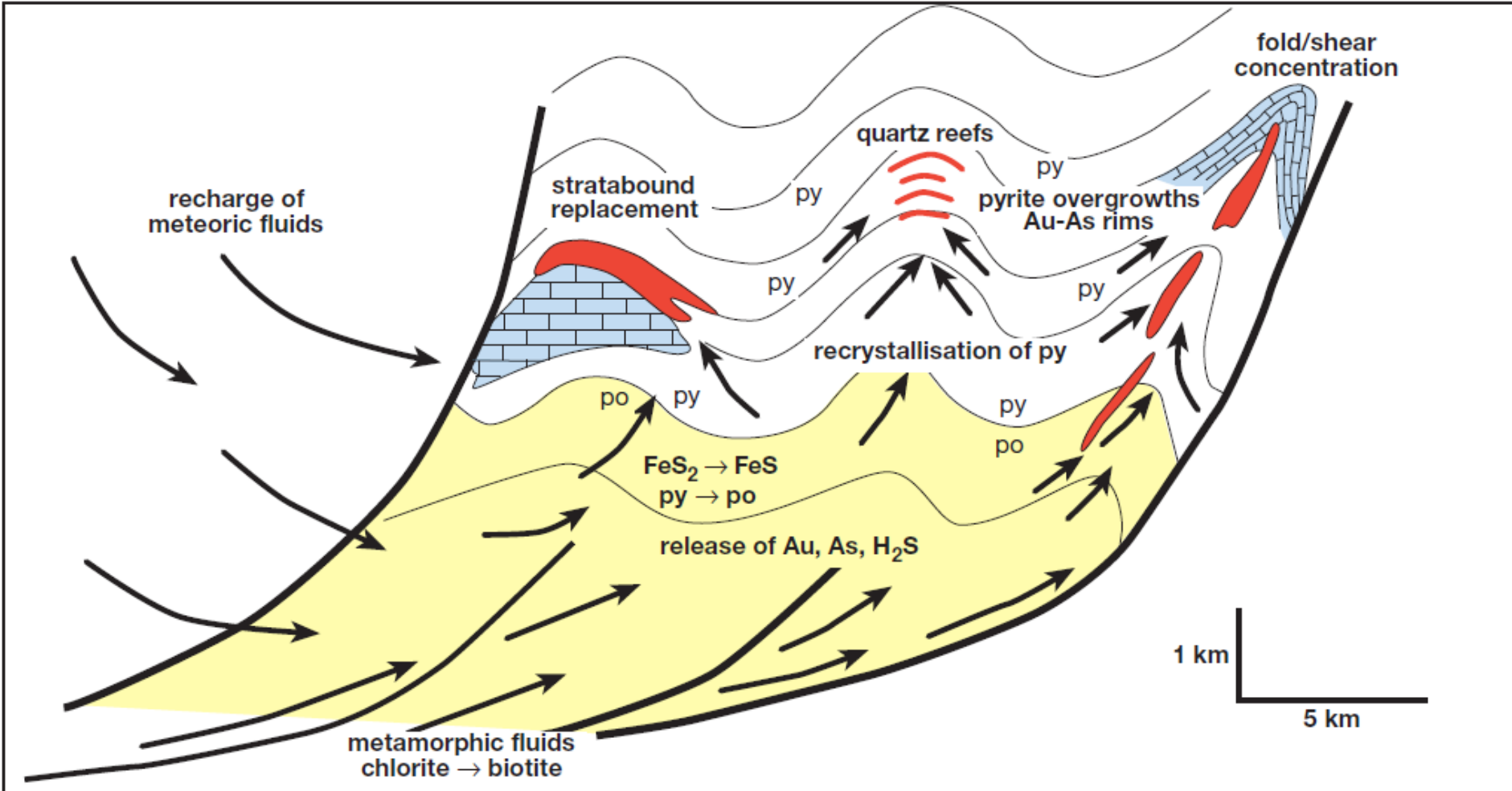


Implication: altération sans Au

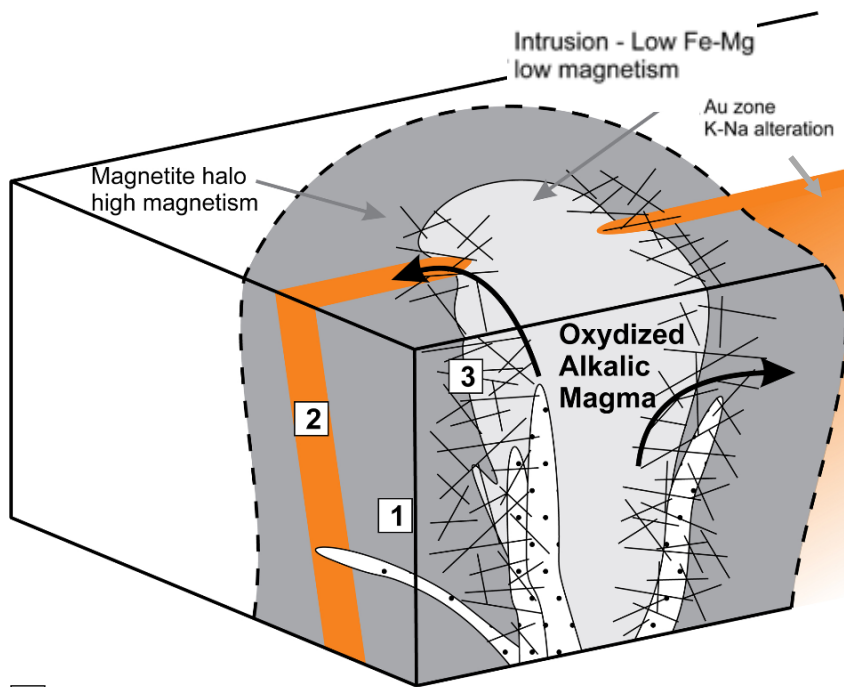


Modèle métamorphique de Large

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)

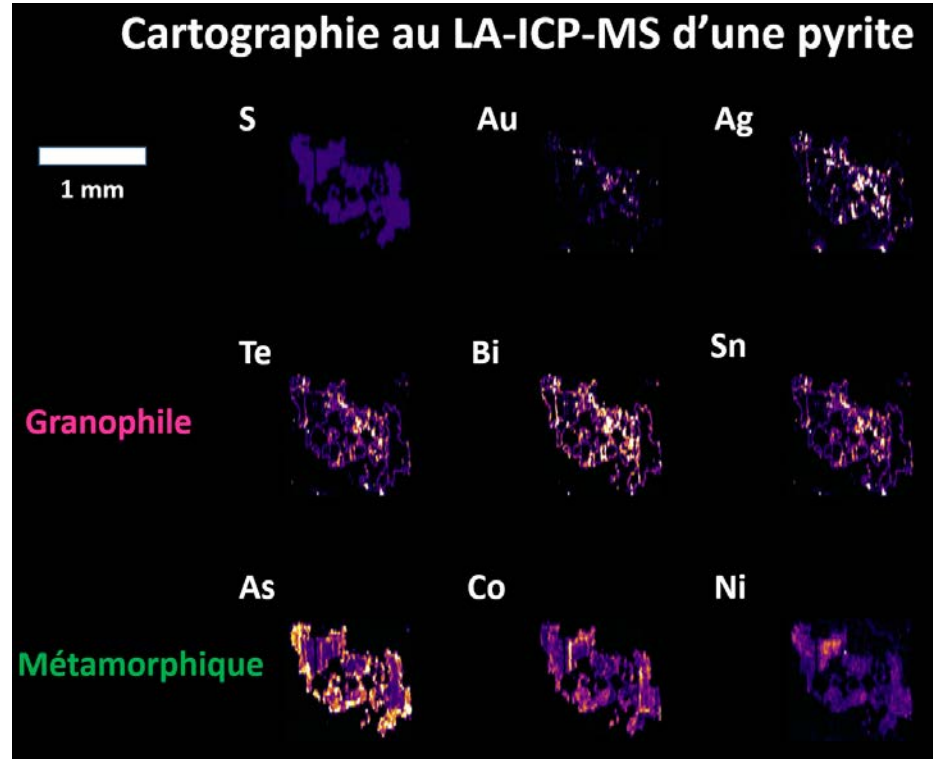
 Dikes, aplites

 Fluids: F, Na, K, Au, Py

Apport de métaux granophile

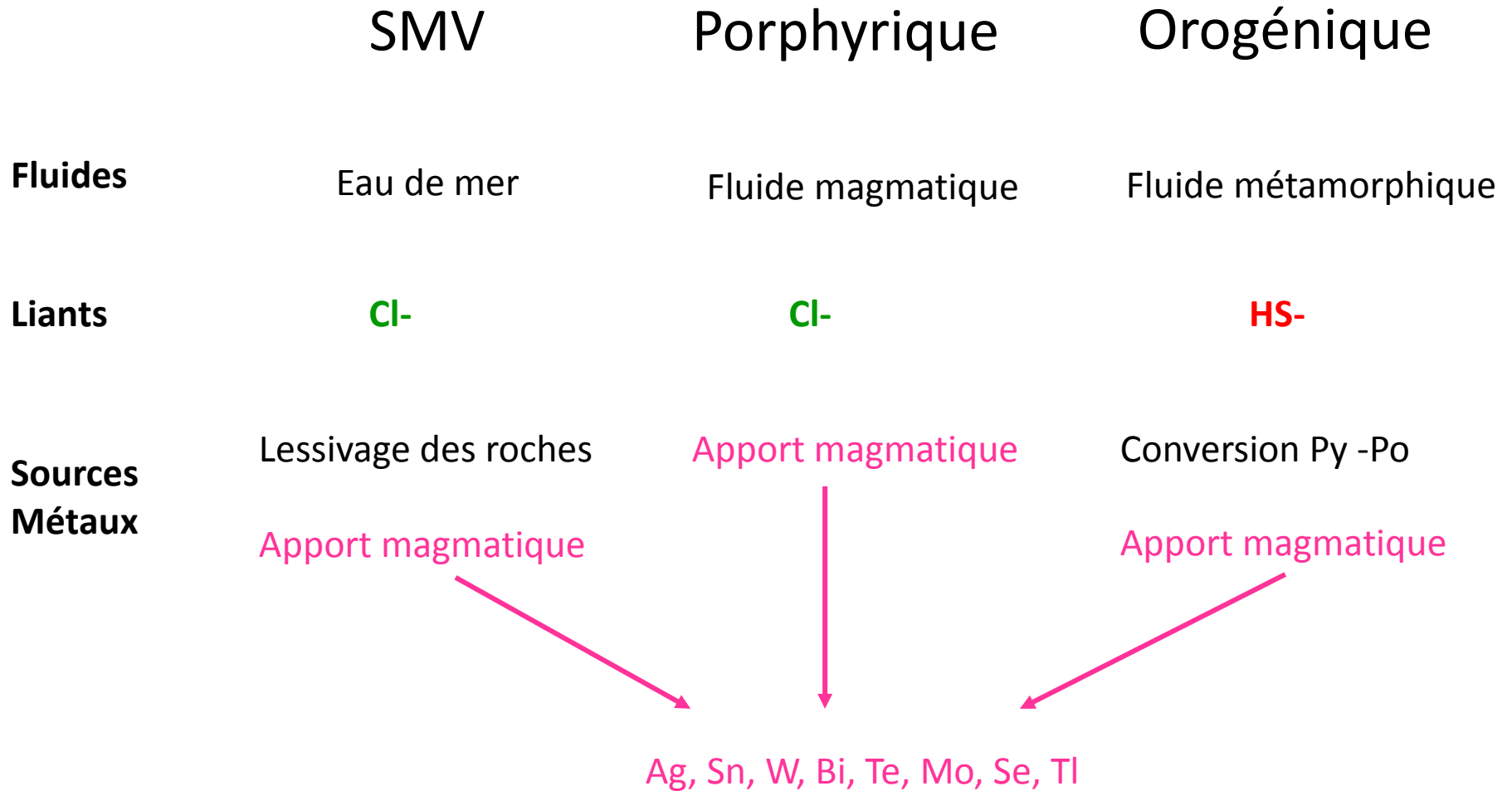
Sn, W, Bi, Te, Mo, Se, Tl

Cartographie au LA-ICP-MS d'une pyrite



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 – ΔT°

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

