

## Le gisement de Salau

*le point sur une future ressource européenne en tungstène*

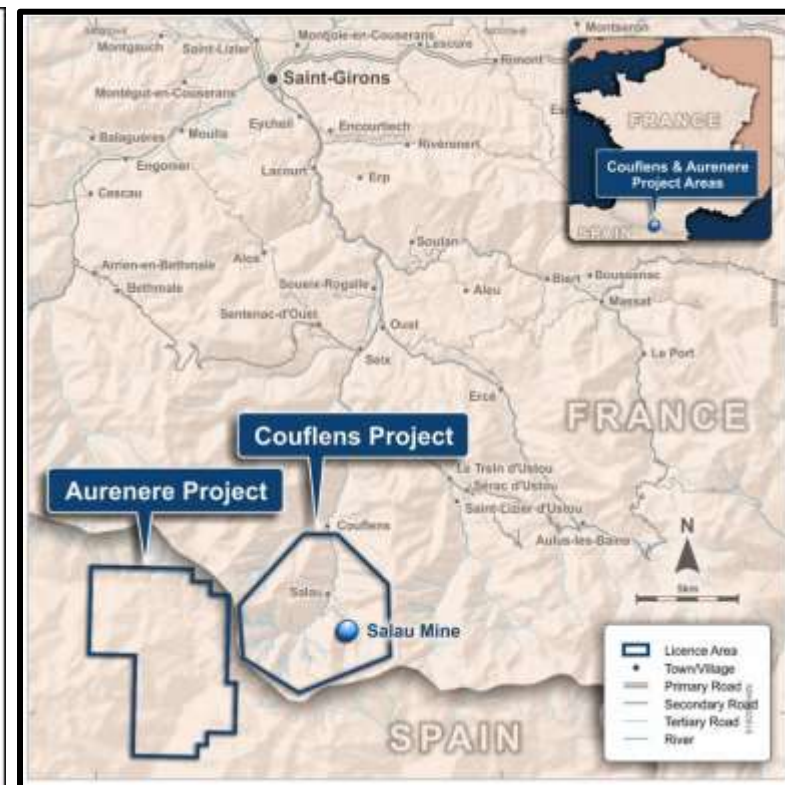
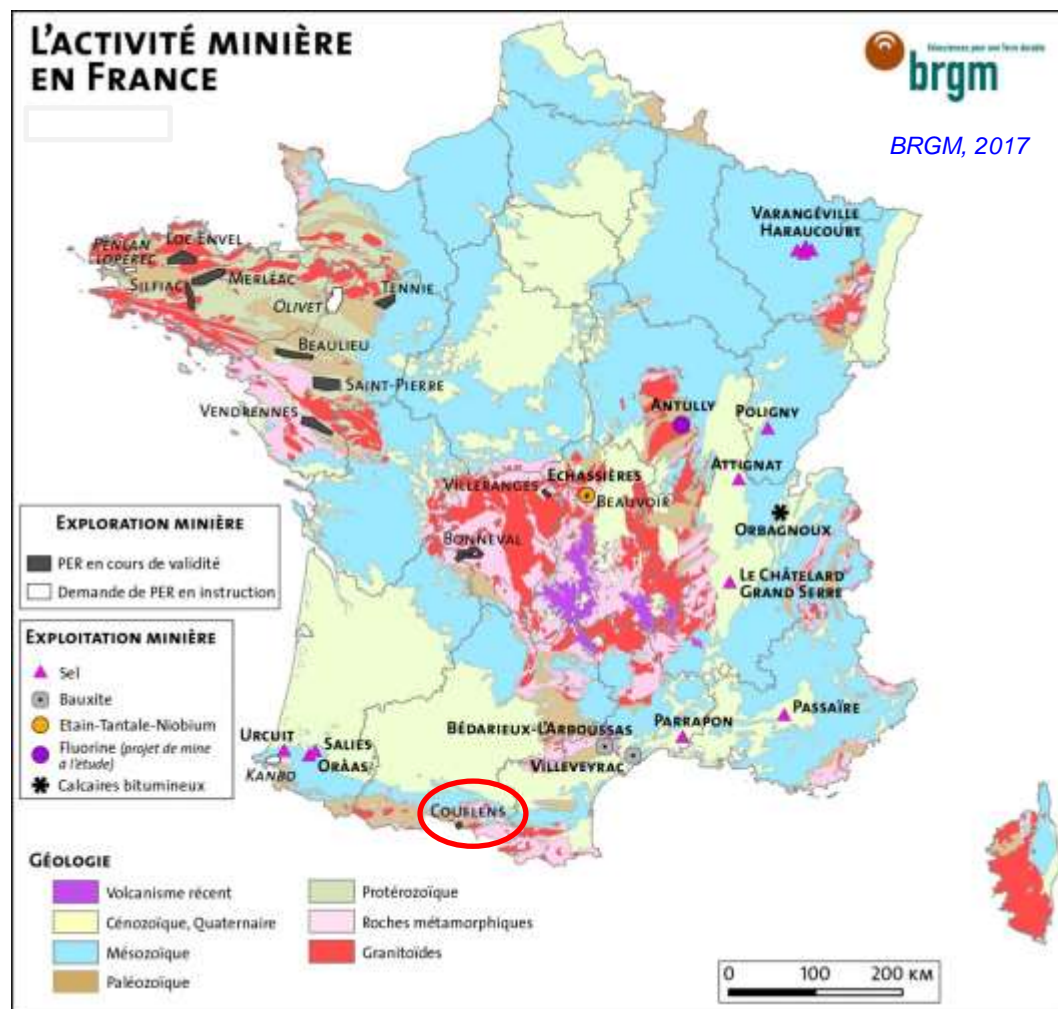


## Le PERM Couflens

- Février 2017 (JORF) : Octroi du Permis Exclusif de Recherches Minières



- En cours : Transfert du titre et acquisition d'Aurenère (Espagne)



Apollo Minerals, 2018



## Le PERM Couflens

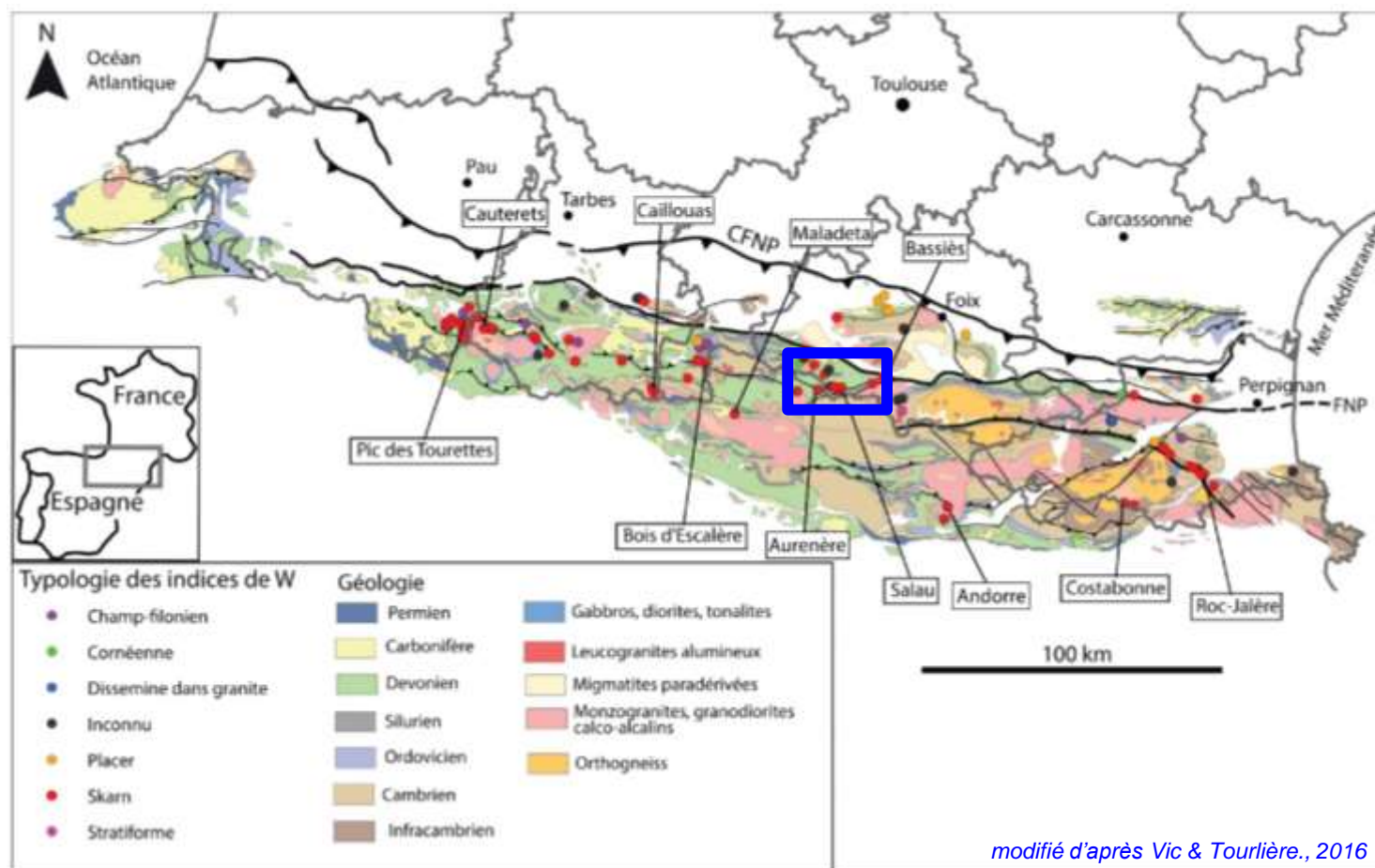
- 2016 : Pour Promouvoir l'Exploitation Responsable de la Mine de Salau
  - une association locale en faveur du projet (> 1 000 membres)



PPERMS, 2018

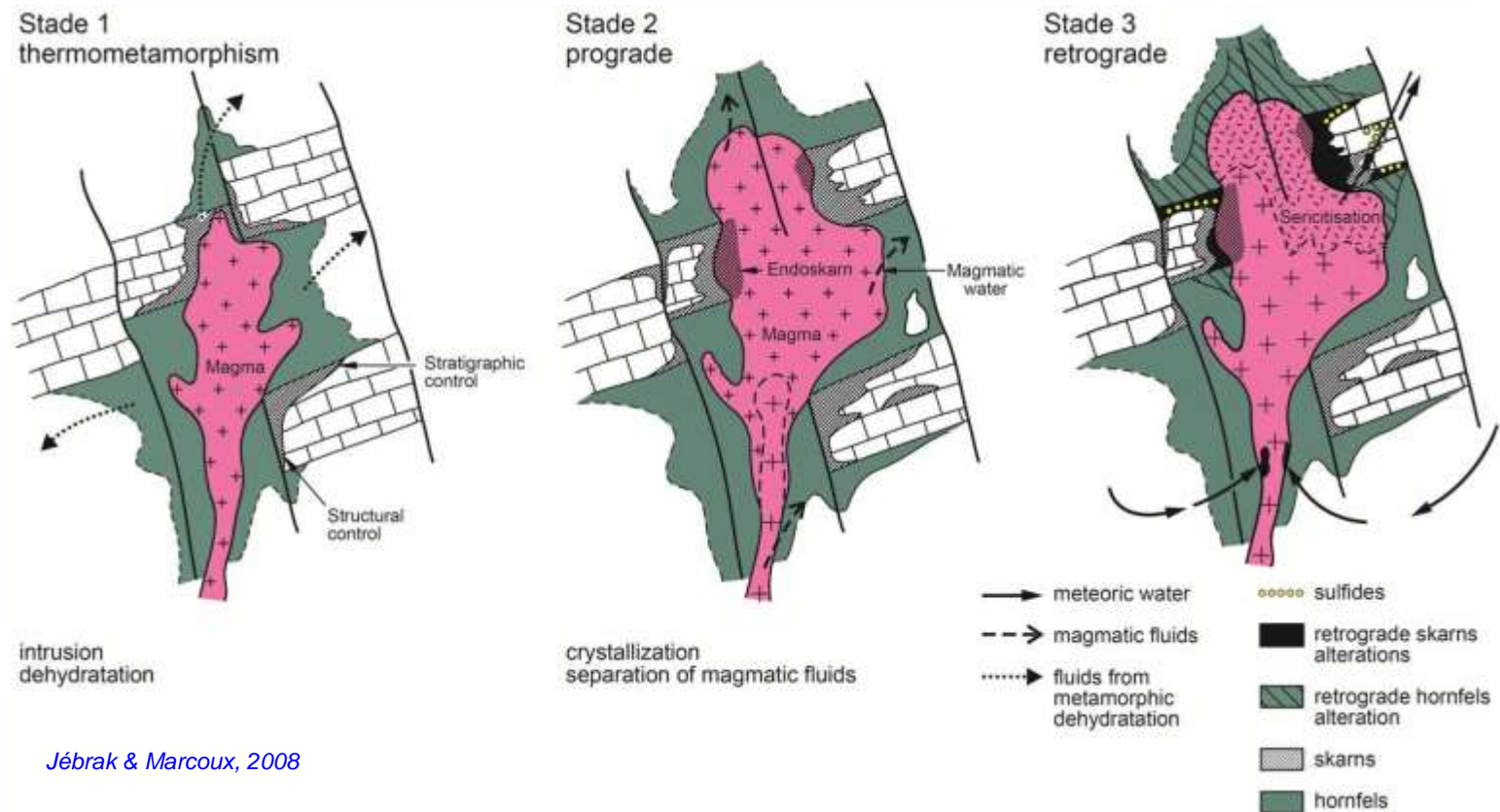
## Minéralisations

- W découvert relativement récemment dans les Pyrénées (Costabonne 1951)
- Skarns à scheelite au contact entre marbres et intrusions calco-alcalines
- Fort potentiel de découvertes



## Le gisement de Salau

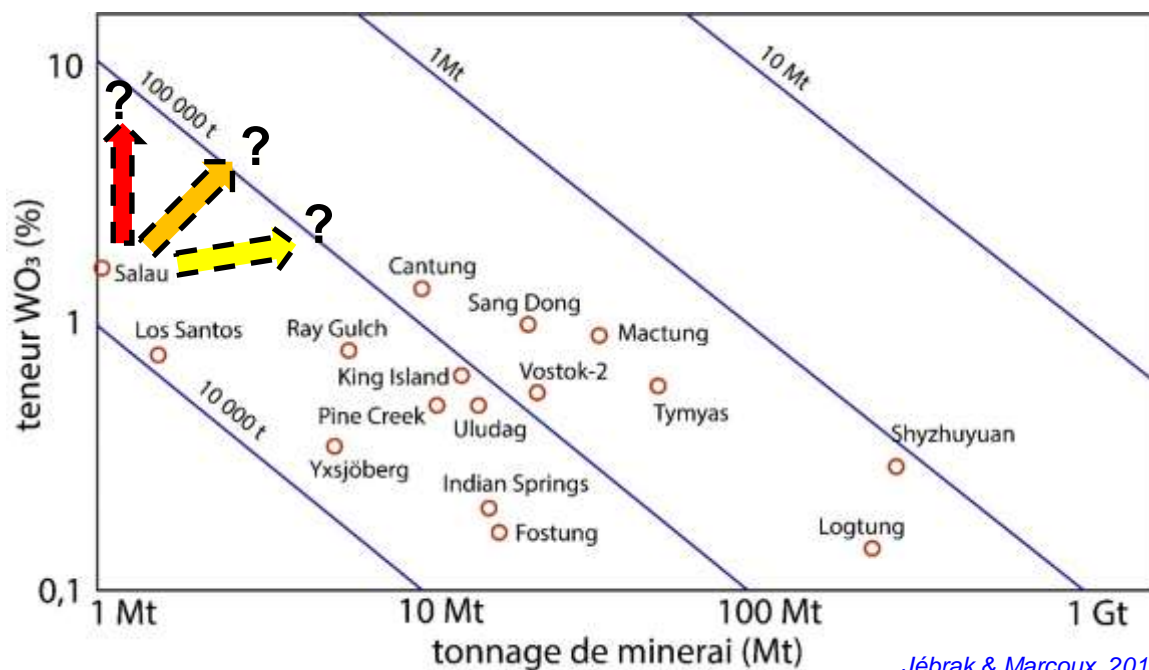
- **Le gisement de Salau**, la plus importante mine de tungstène français (**13 950 t WO<sub>3</sub>**) de 1970 à 1986
- **Skarn à scheelite** ([Fonteilles et al., 1989](#))
- **Un skarn est une roche**
  - dont la minéralogie est dominée par **des silicates calciques ou magnésiens**
  - **formée par métasomatisme** entre un intrusif et son encaissant carbonaté



## Le gisement de Salau

### Particularités

- Minerai exploité à une teneur moyenne de **1,2 à 2,5 %  $\text{WO}_3$**  (cut off 0,8 %  $\text{WO}_3$ )
- **Or** découvert dès 1964 (3 g/t) puis **en quantité importante** en 1986 (**5 à 10 g/t**)



Jébrak & Marcoux, 2015



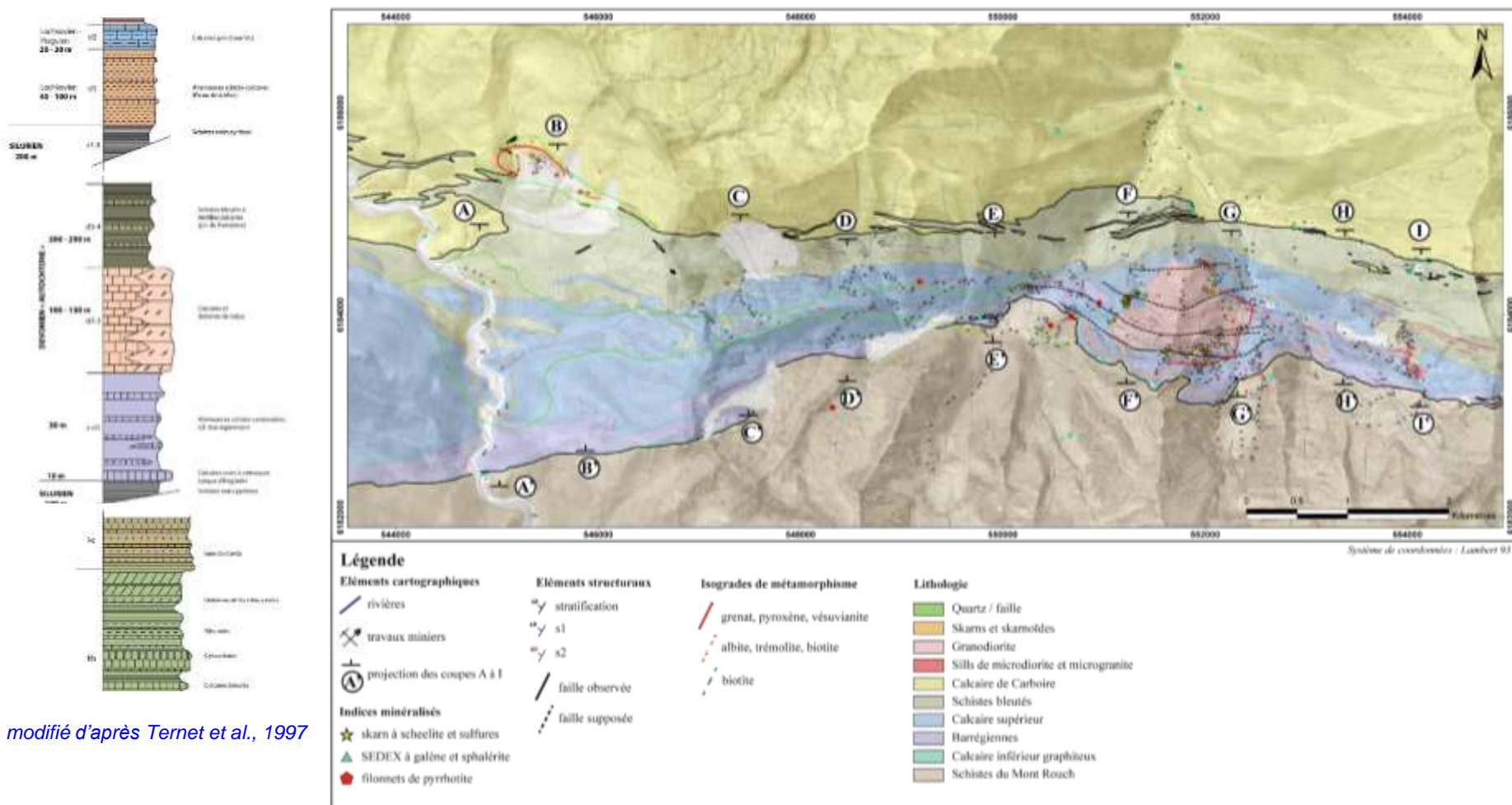


## *Travaux de terrain*



## Cartographie géologique

- Levé géologique au 1/10 000 de la zone d'étude (en complément du levé de [Derré, 1973](#))
- Plus de 1200 échantillons collectés

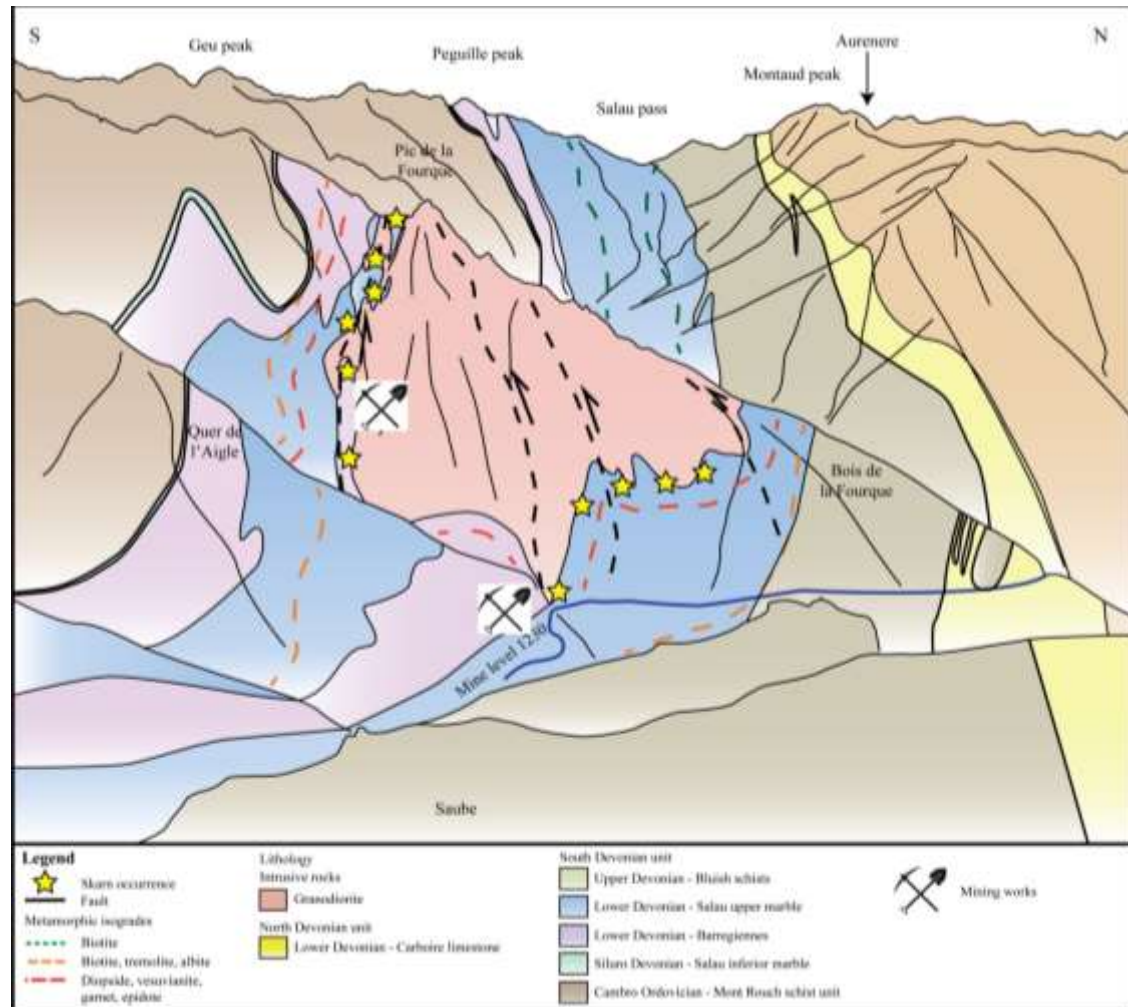


modifié d'après Ternet et al., 1997

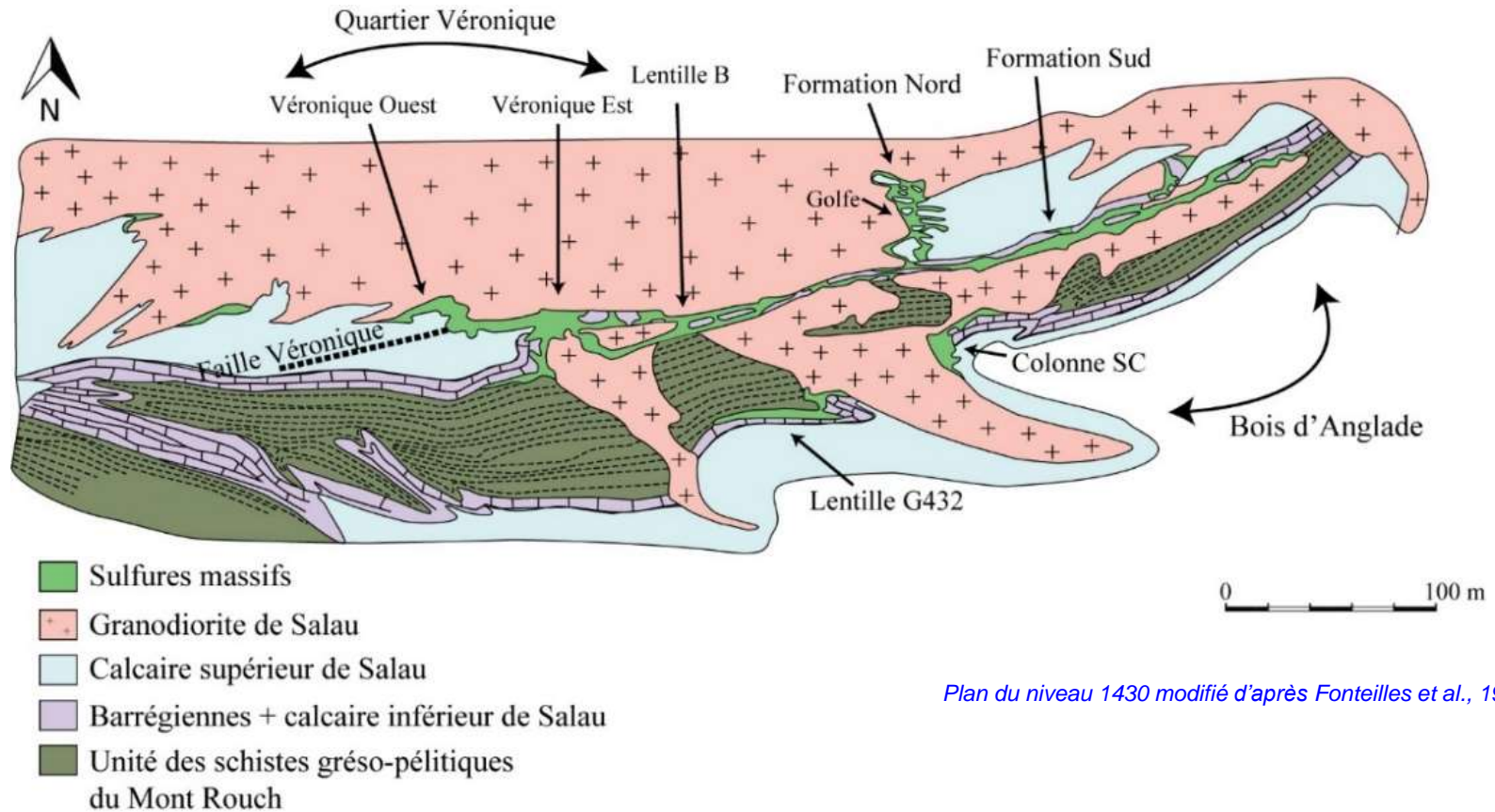


## Analyse des travaux miniers

- **Massif granodioritique** de la Fourque (1 km<sup>2</sup>)
- Premiers indices de **skarns à scheelite** découverts dans le « **ravin de la Fourque** » en 1960
- Autres indices connus tout autour du massif
- Contact intrusif – encaissant **très irrégulier**



## Analyse des travaux miniers



*Plan du niveau 1430 modifié d'après Fontelles et al., 1989*

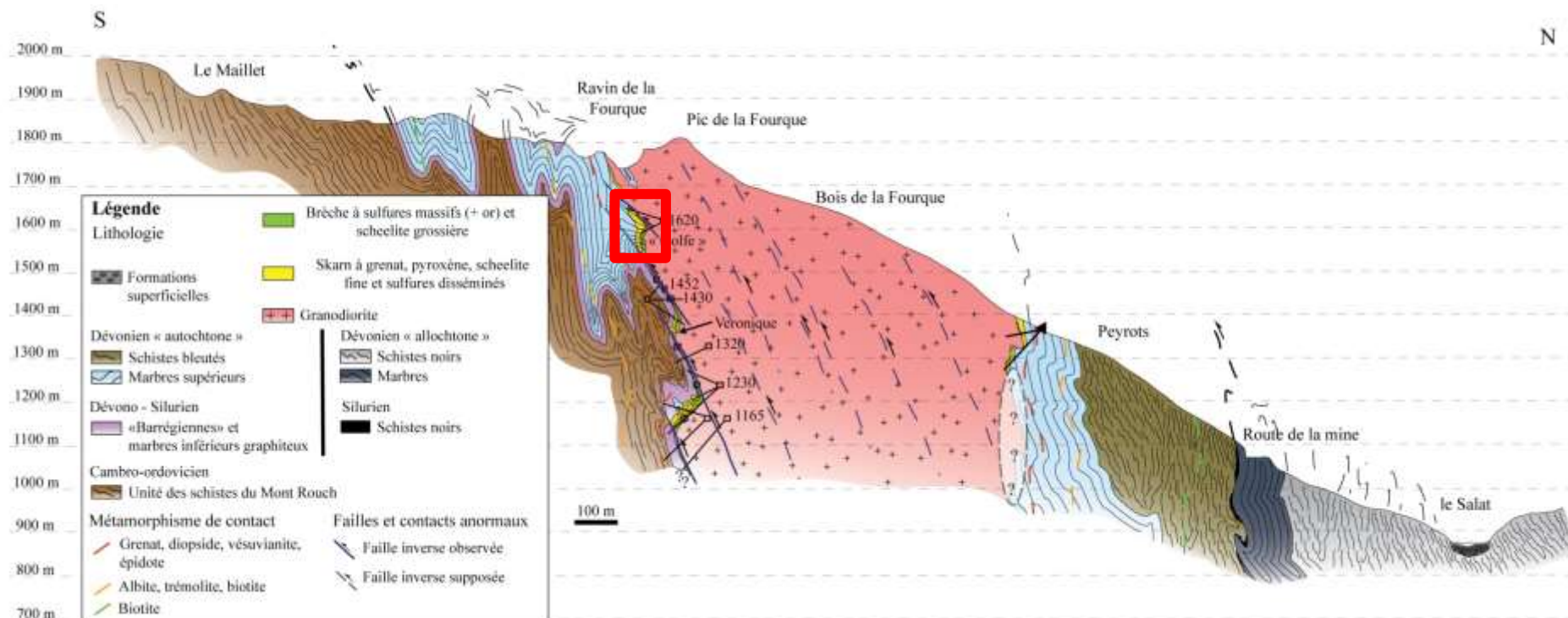
### ➤ Le Bois d'Anglade (1970 – 1978)

- Formation Nord
- Golfe
- Formation Sud
- Colonne SC

### ➤ Le quartier Véronique (1978 – 1986)



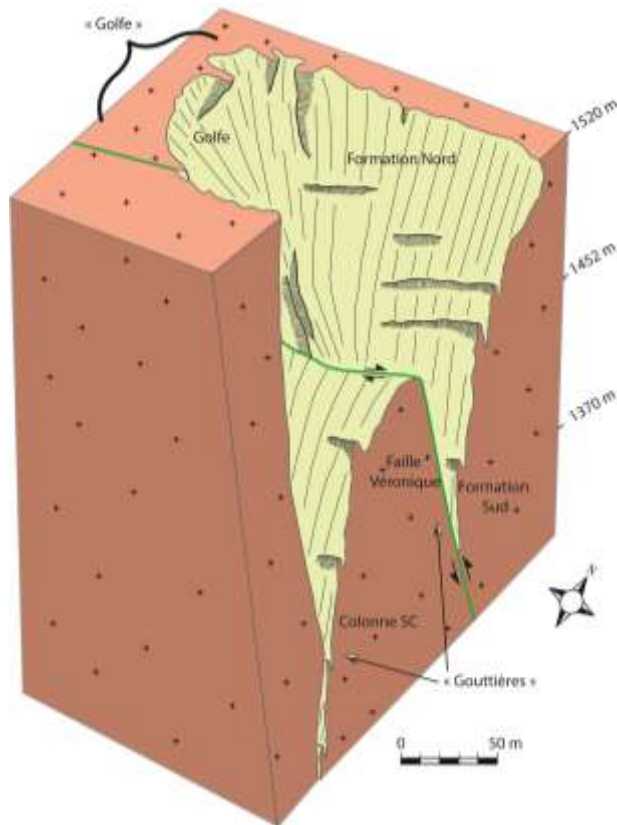
## Minéralisations



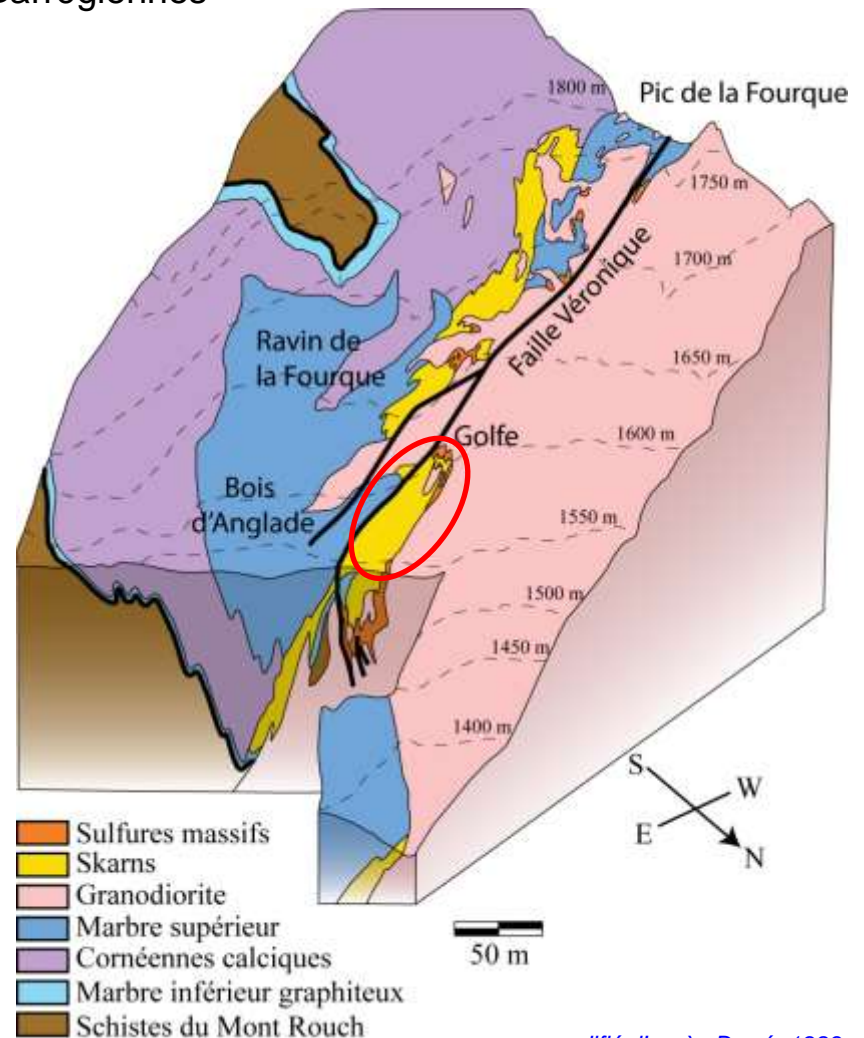
➤ **Le Bois d'Anglade – dépilage 1580 m**

## Le Bois d'Anglade

- **Golfe** formé au contact entre granodiorite et Barrégiennes
- **Skarns à silicates calciques et scheelite**
- Indices historiques du ravin de la Fourque



*modifié d'après croquis SMA*

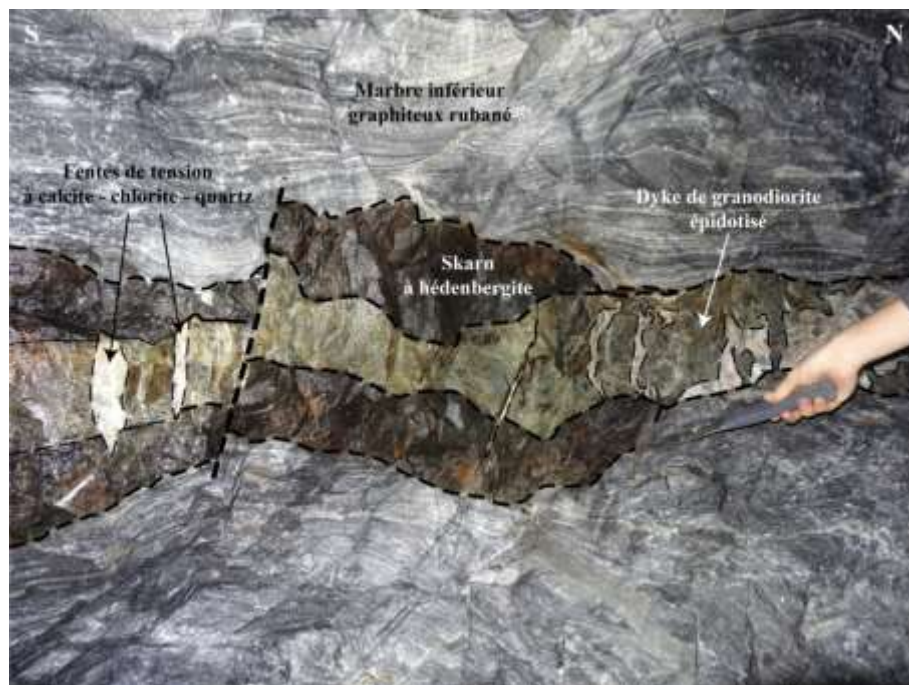


*modifié d'après Derré, 1983*



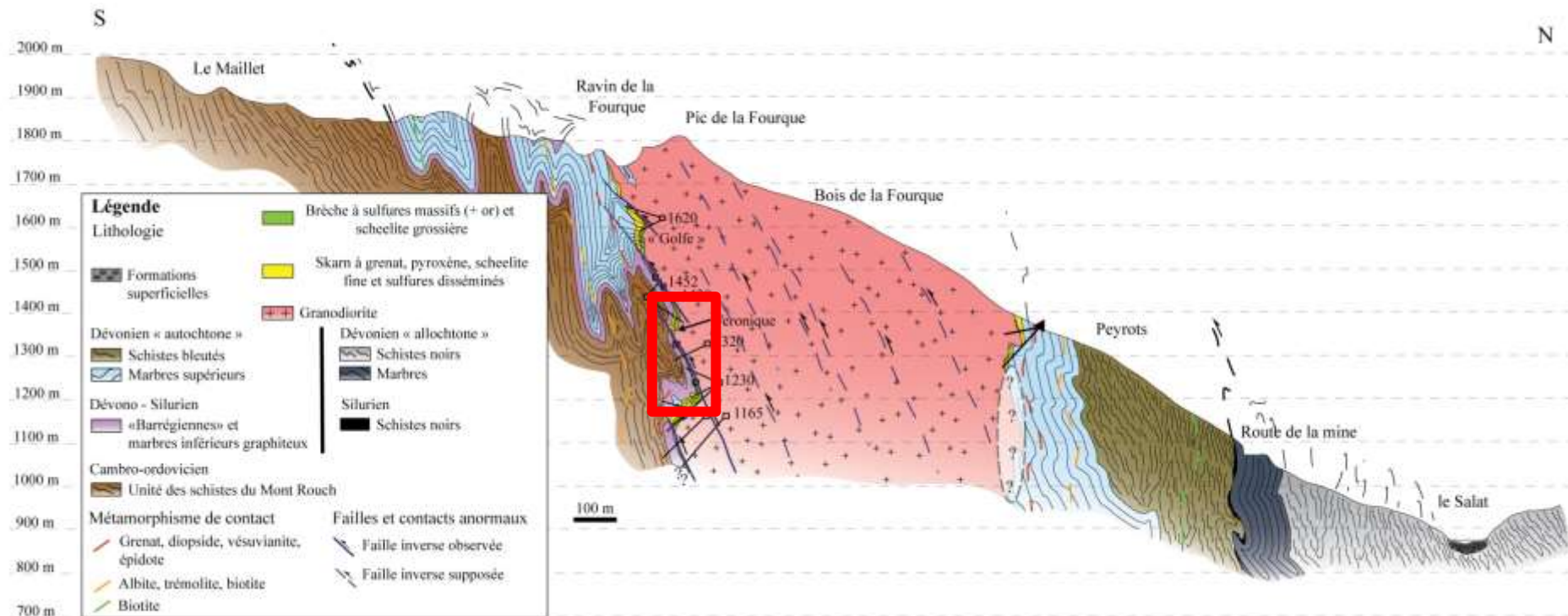
## *Le Bois d'Anglade*

- Skarns à silicates calciques, scheelite fine peu fréquente ( $< 0,5$  mm) et pyrrhotite disséminée
- Teneurs  $< 0,5$  %  $\text{WO}_3$  et  $< 0,1$  g/t d'or
- Type de skarn dépendant de la roche encaissante (calcaire ou Barrégienne)



5 cm

## Minéralisations

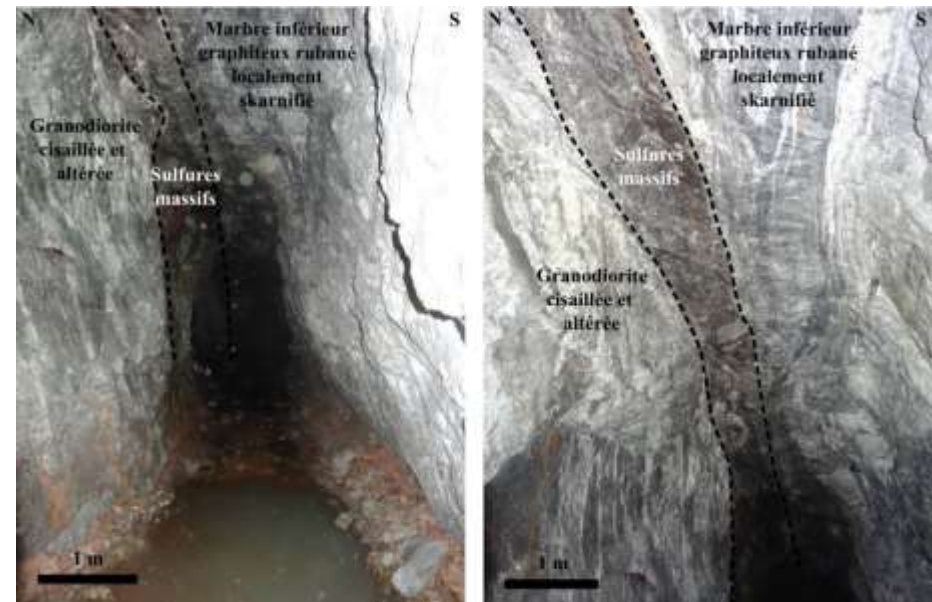
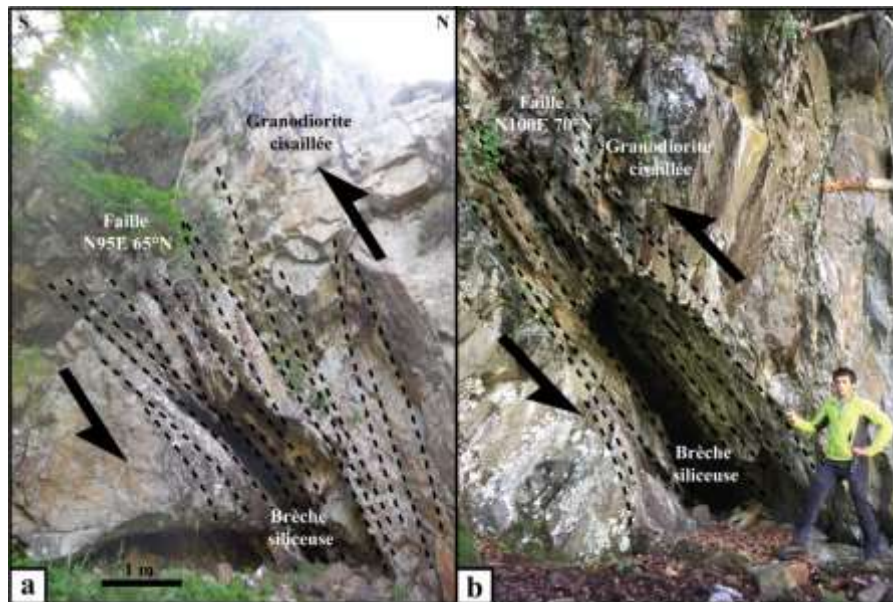
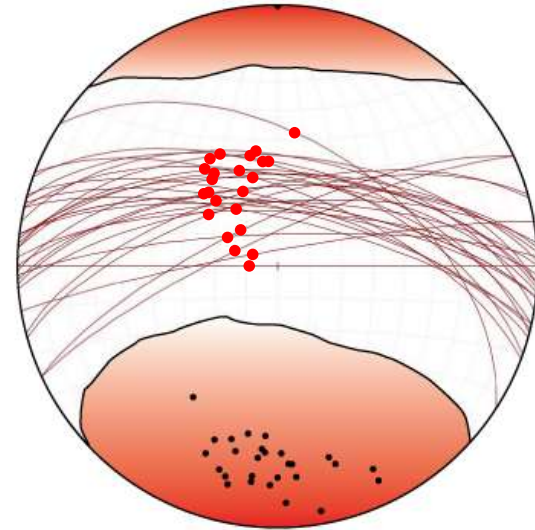


➤ **Le quartier Véronique** – *niveaux 1430 à 1230*



## Le quartier Véronique

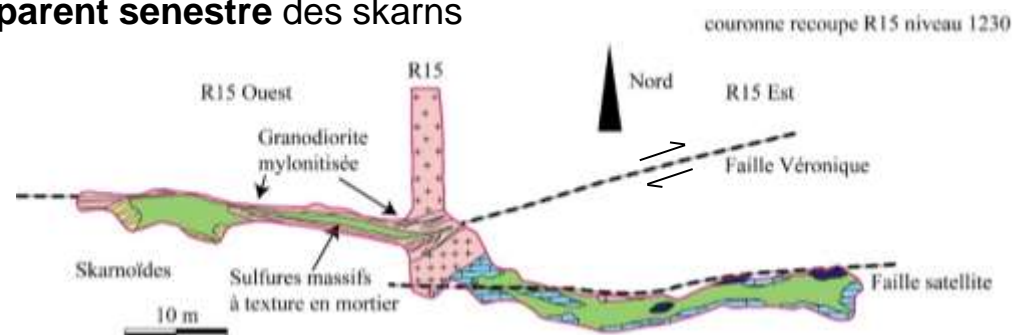
- **Couloir faillé plurimétrique E-W 70°N** affectant toute la bordure Sud du massif de la Fourque
- **Brèche quartzeuse** cimentée par **des sulfures massifs (pyrrhotite dominante) et de la scheelite grossière (> 1 mm)** au contact avec l'encaissant carbonaté



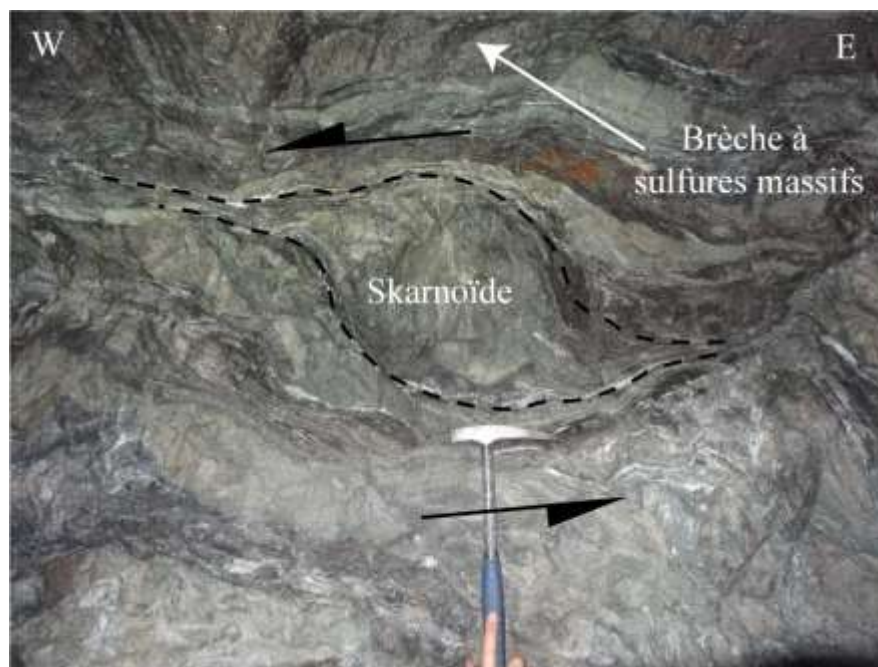
## La faille Véronique

### Critères cinématiques et chronologie relative

- Observations en couronne : **cisaillement apparent senestre** des skarns
  - Remis en carte → **cisaillement dextre**



*modifié d'après Derré et al., 2014*

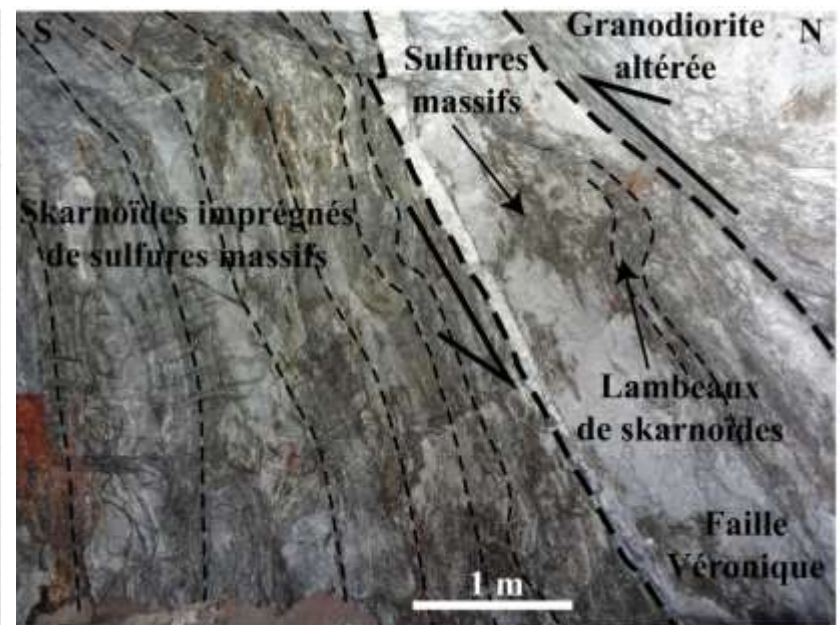
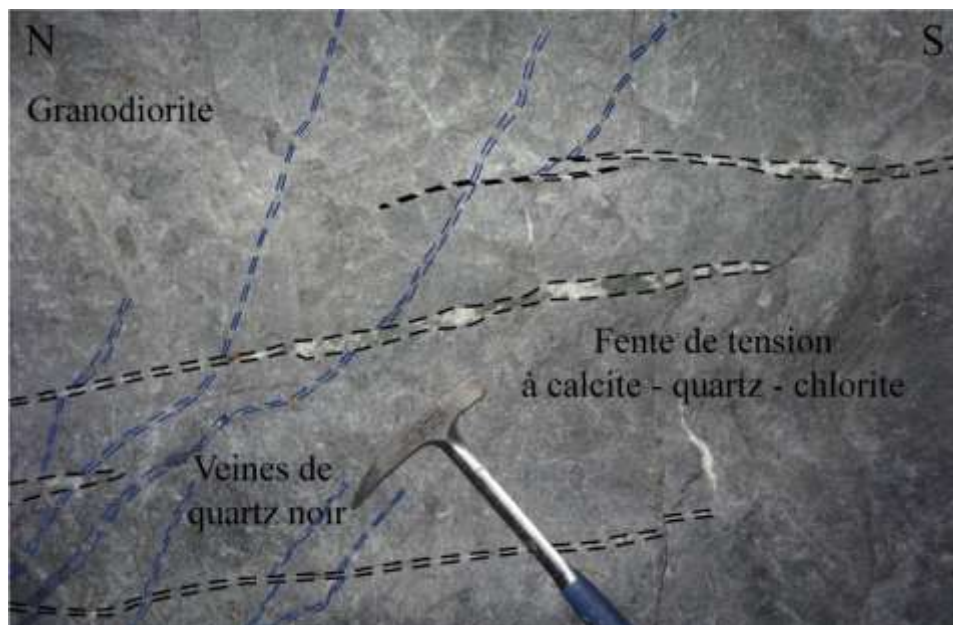




## La faille Véronique

*Critères cinématiques et chronologie relative*

- Observations en paroi : **cisaillement inverse des skarns**
  - **bandes de cisaillement inverses** dans la granodiorite
- **Fentes de tension sub-horizontales** dans la granodiorite
  - jeu inverse et étirement sub-vertical de la faille Véronique





## *La faille Véronique*

### *Minéralisations*

- **Morphologie filonienne** généralement sous forme **bréchique**
  - **Clastes** décimétriques à métriques (granodiorite, marbres, skarns)
  - **Ciment de sulfures massifs** (po, cp, asp, sp, gn) et de **scheelite grenue abondante** (> 1 mm)
- **Teneurs** > 1 %  $\text{WO}_3$  et 5 - 10 g/t d'or
- **Altération chloriteuse** de l'encaissant très développée



## La faille Véronique

### Minéralisations

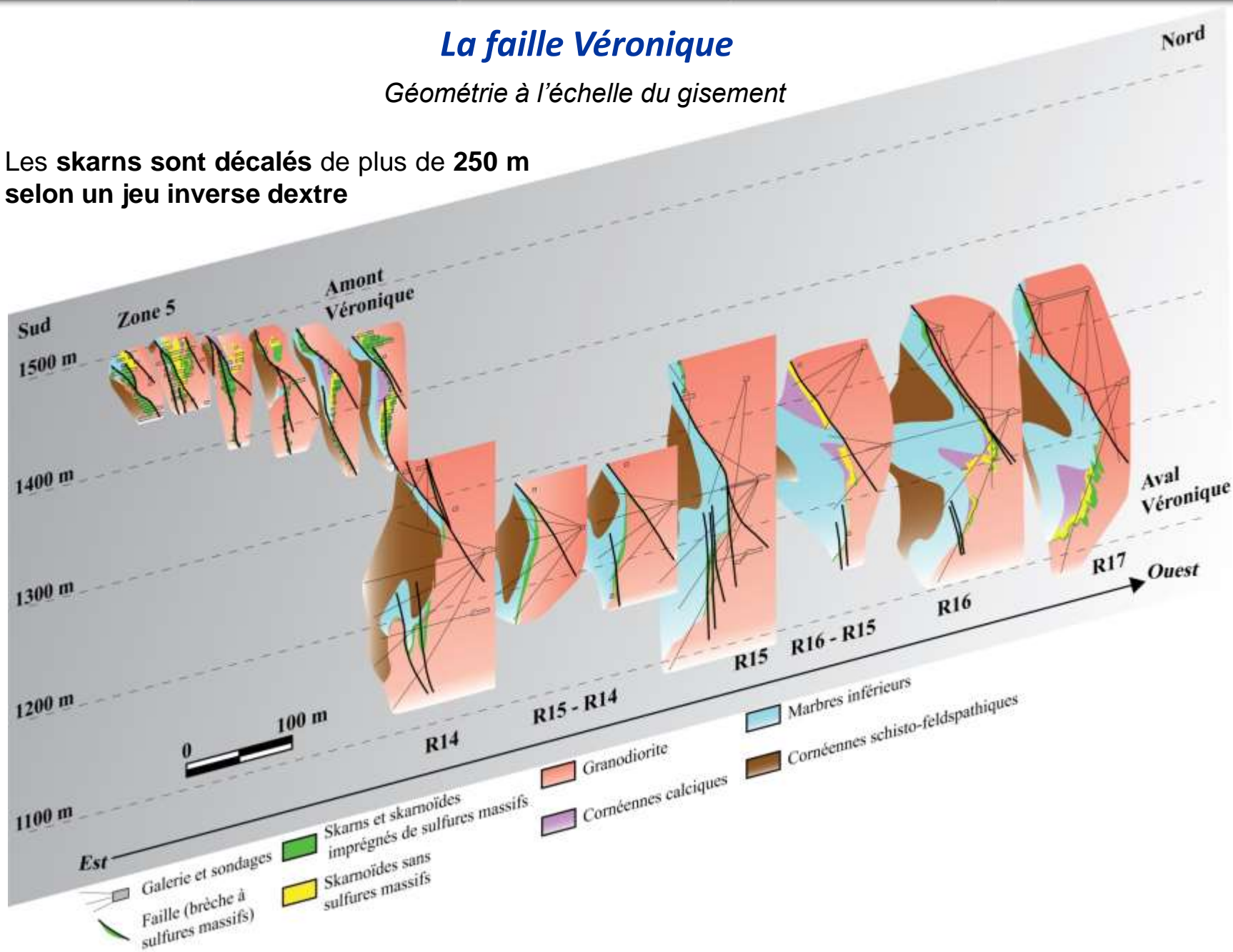
- **Morphologie filonienne** généralement sous forme **bréchique**
  - **Clastes** décimétriques à métriques (granodiorite, marbres, skarns)
  - **Ciment de sulfures massifs** (po, cp, asp, sp, gn) et de **scheelite grenue abondante** (> 1 mm)
- **Teneurs** > 1 %  $\text{WO}_3$  et 5 - 10 g/t d'or
- **Altération chloriteuse** de l'encaissant très développée



## La faille Véronique

Géométrie à l'échelle du gisement

- Les skarns sont décalés de plus de 250 m selon un jeu inverse dextre





## Evolution de la faille Véronique à distance de l'intrusion

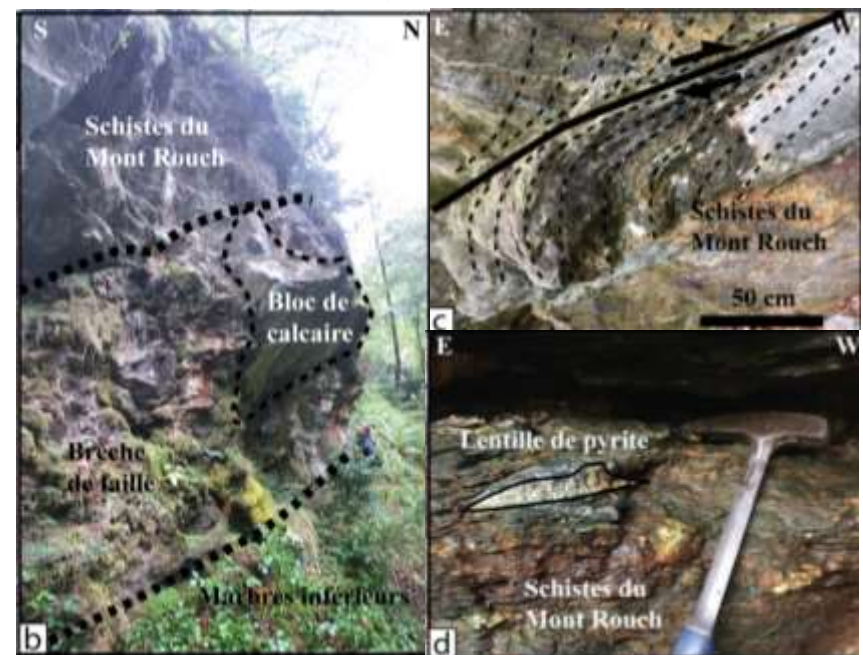
- **Faille plurimétrique** au contact schistes ordoviciens – calcaires inférieurs
- **Brèche N100°E sub-verticale dextre inverse** à blocs métriques de calcaires et schistes pyriteux
- **Aucune minéralisation observée**



Vallée de la Pallaresa (10 km à l'ouest de la Fourque)

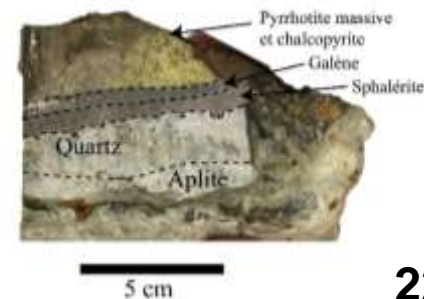
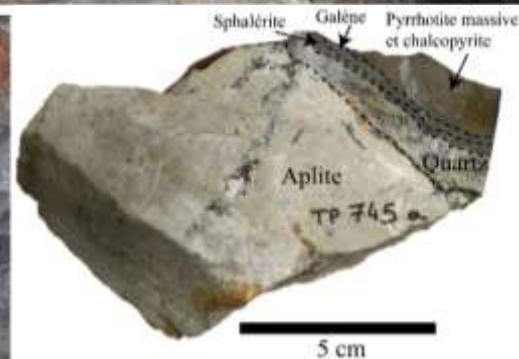
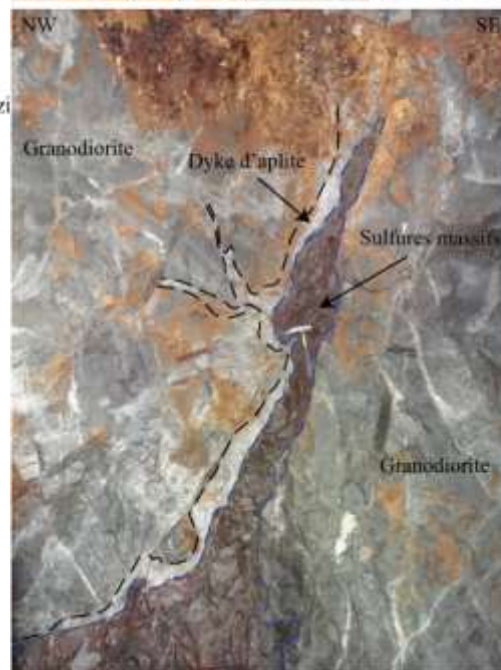
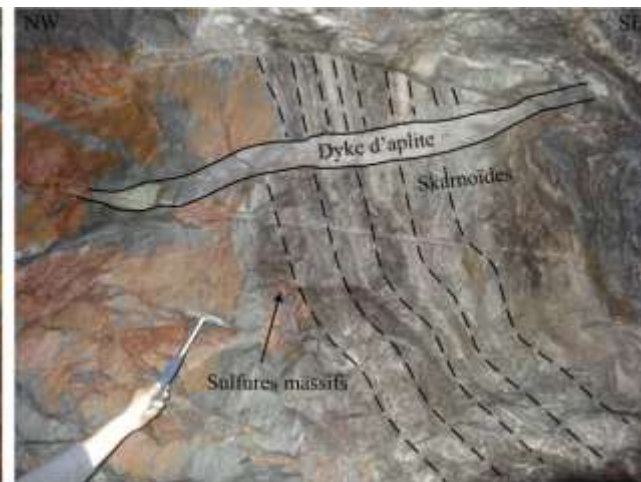
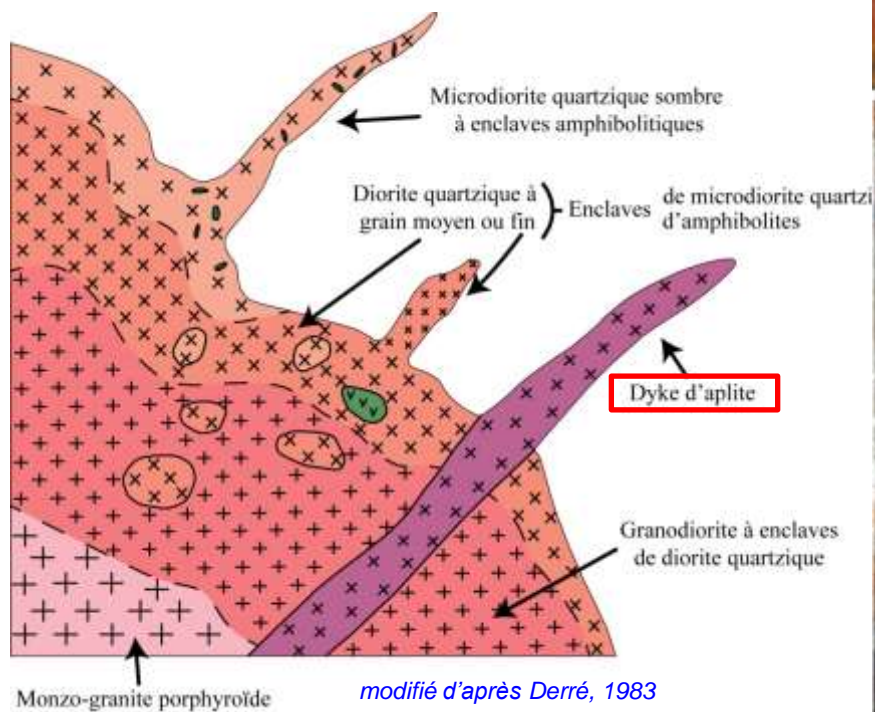


Ravin de Plagnau Long (2 km à l'ouest de la Fourque)



## Un magmatisme polyphasé

- Le massif de la Fourque présente **différents faciès intrusifs**
  - **des dykes d'aplite tardifs et sécants sur tous les autres faciès**

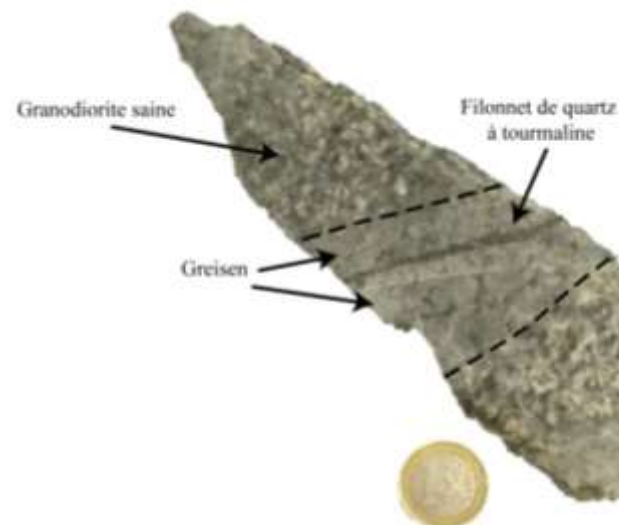
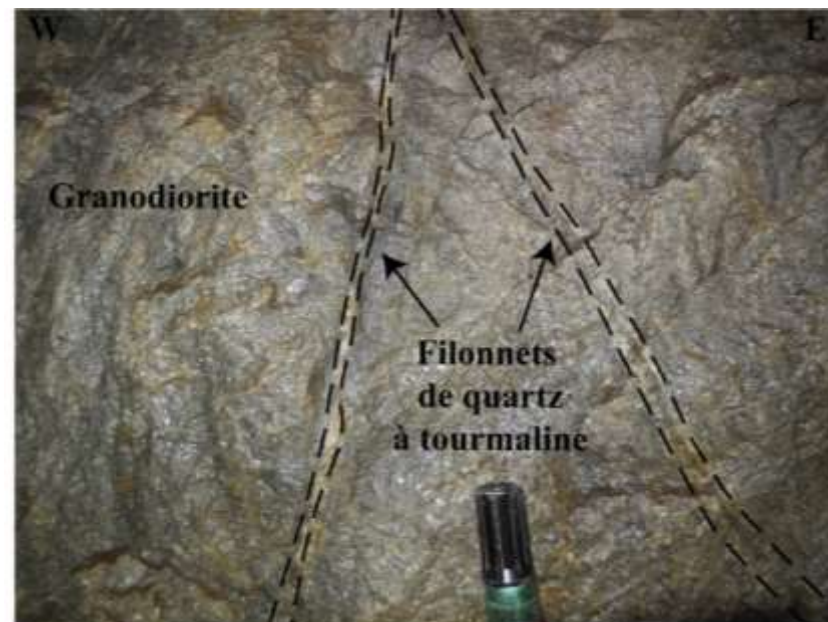
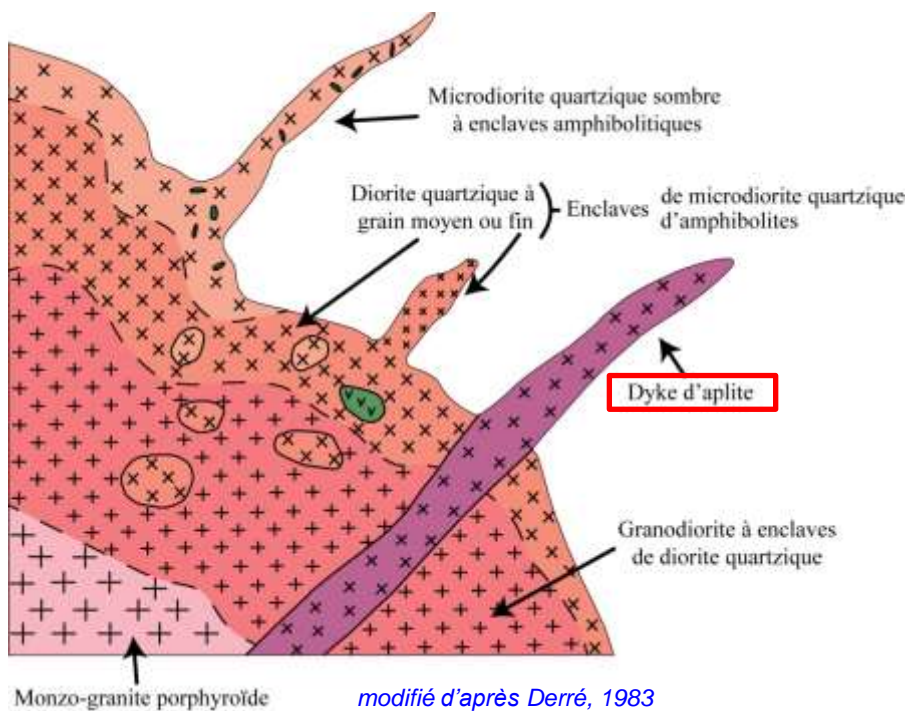




## Un magmatisme polyphasé

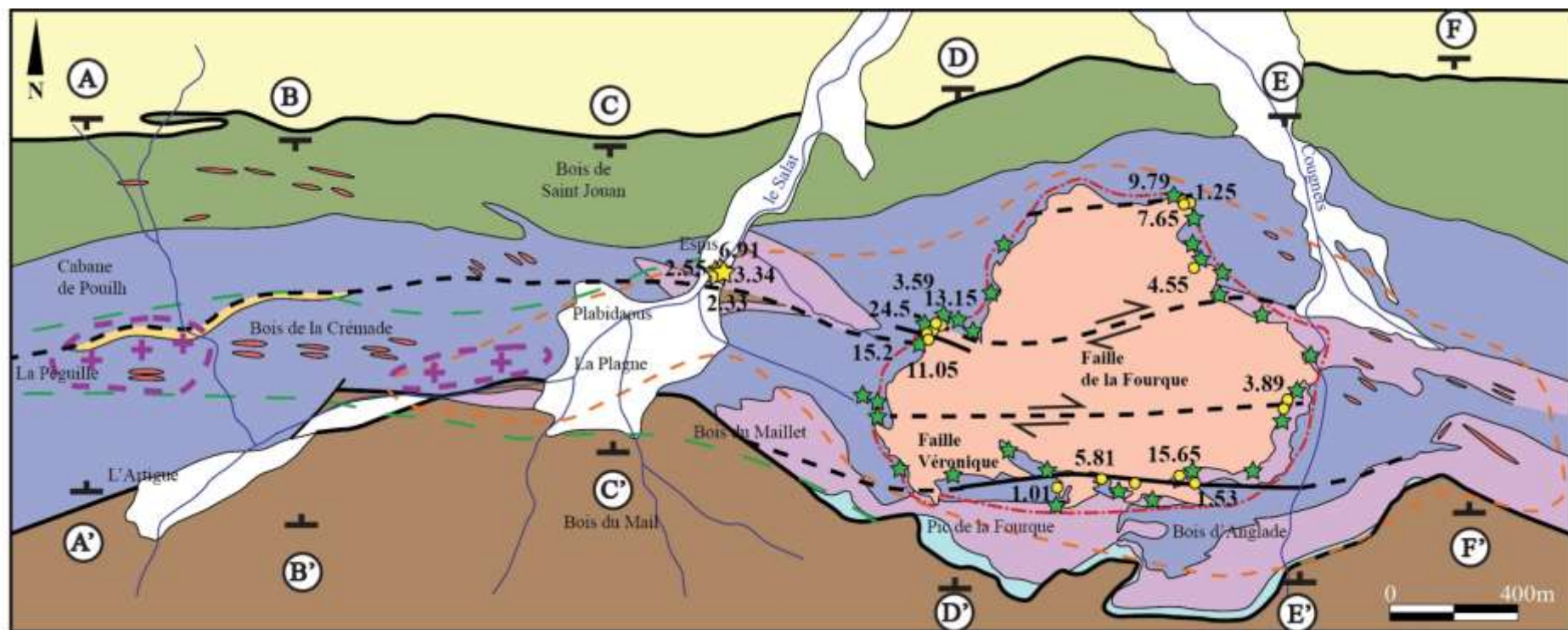
- Le massif de la Fourque présente **différents faciès intrusifs**

- des **filonnets de quartz à tourmaline**





## En dehors du secteur de la mine



### Légende

- |  |  |                             |                               |
|--|--|-----------------------------|-------------------------------|
| — Failles                                | ★ Indices de skarn à scheelite                     | □ Formations superficielles | ■ Schistes bleutés            |
| - - - Isograde biotite                   | ● Analyses or (ppm) dans les sulfures massifs      | ■ Granodiorite              | ■ Calcaire supérieur de Salau |
| - - - Isograde albite - épidote          | ★ Analyses or (ppm) dans les veines à arsénopyrite | ■ Sill de microgranite      | ■ Barrégiennes                |
| - - - Isograde grenat - diopside         | ■ Schistes tachetés (anorthite)                    | ■ Calcaire de Carboire      | ■ Calcaire inférieur de Salau |
| + + + Intrusion sub-affleurante supposée |  |                             | ■ Schistes du Mont Rouch      |

## *Non pas un, mais deux types de minéralisations*

**< 0,5 % WO<sub>3</sub>   < 0,1 g/t or**

Skarn à hédénbergite, scheelite fine  
et pyrrhotite disséminée



**Granodiorite de la Fourque**

**Autour du massif**

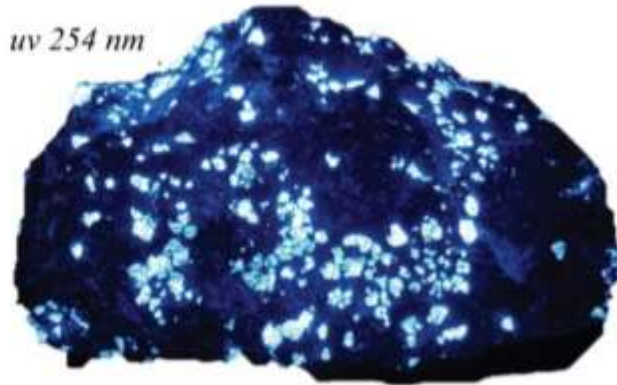
**> 1 % WO<sub>3</sub>   5 – 10 g/t or**

Brèche de marbre inférieur skarnifié cimenté  
par des sulfures massifs et de la scheelite  
grossière abondante

*lumière  
naturelle*



*uv 254 nm*

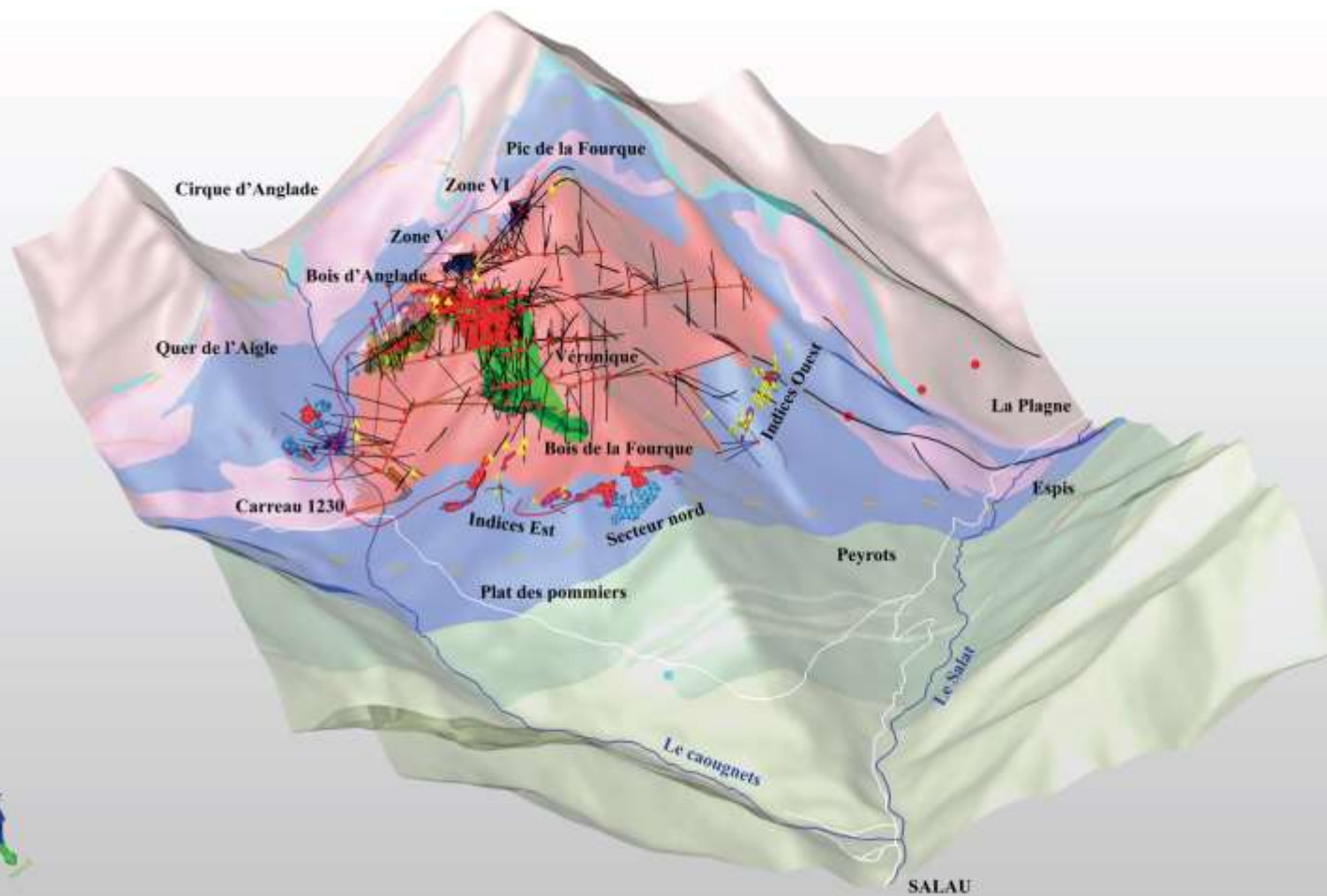


5 cm

**Intrusion évoluée (filons aplitiques)**

**Limité aux zones faillées E-W**

## Modélisation 3D

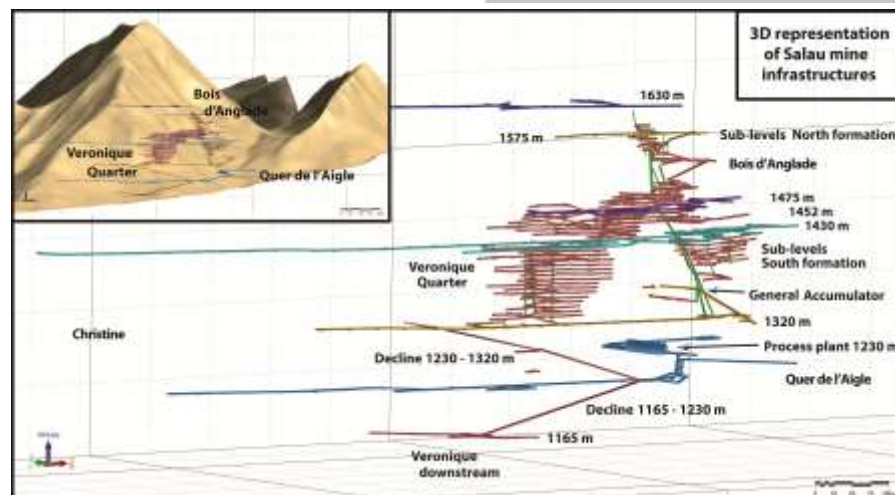
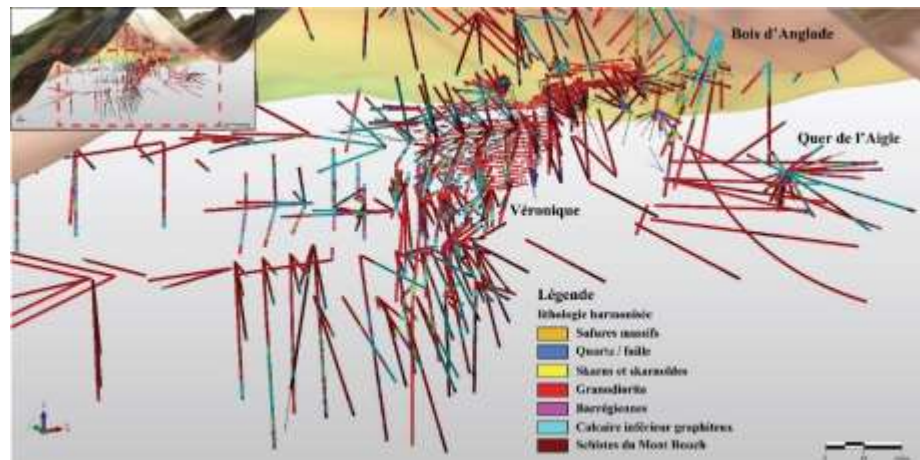
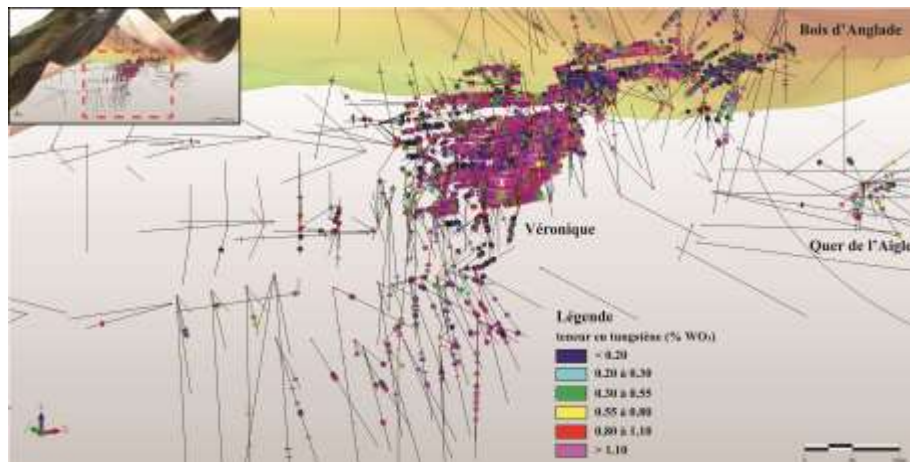




## Modélisation 3D

### Création de la base de données

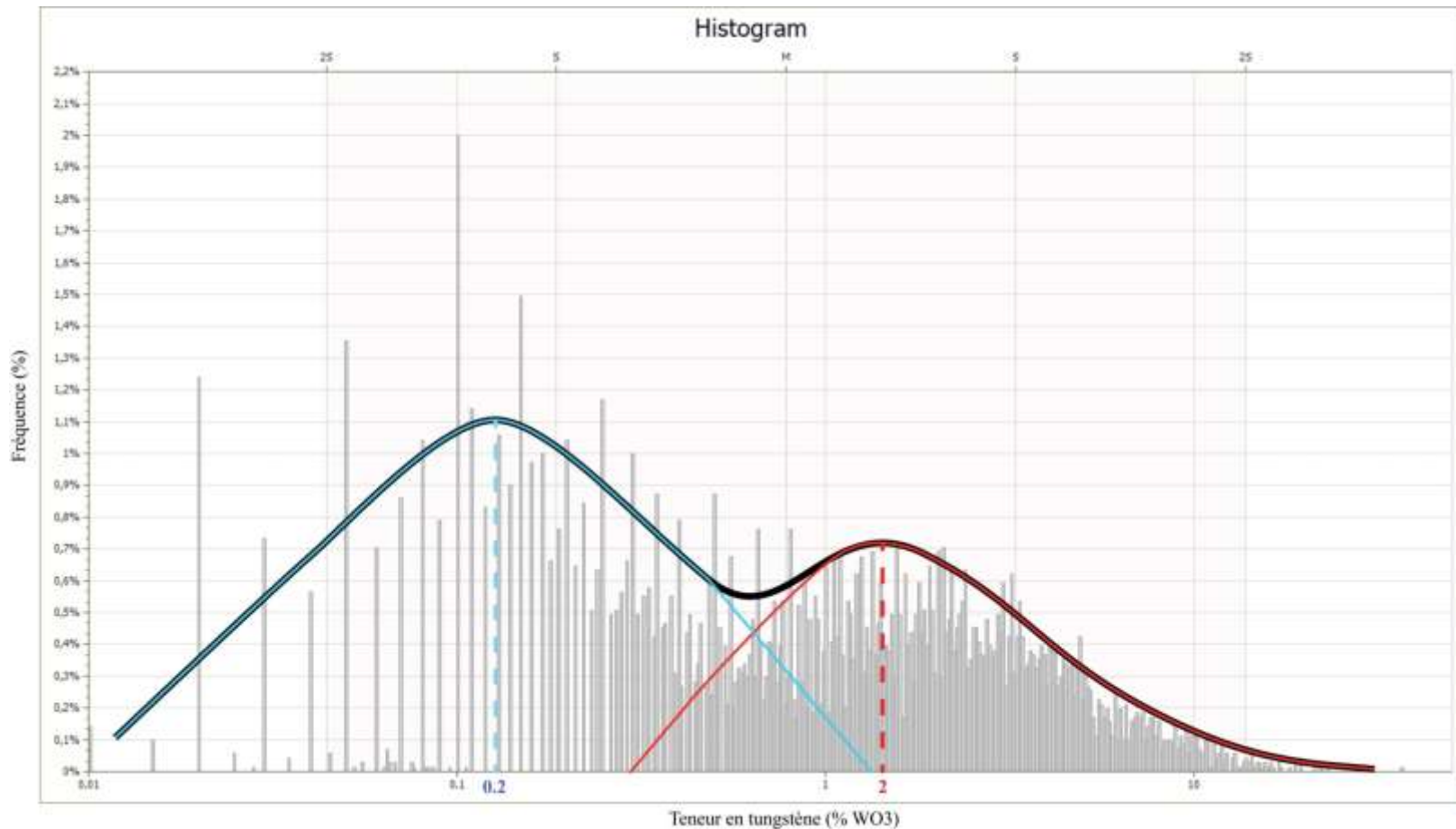
- Intégration de **> 1000** sondages historiques (DD + RC) et **> 2000** rainurages (> 75 km linéaires)
- Digitalisation et modélisation de **> 20 km** de travaux miniers (galeries, recoupes, puits)



## Modélisation 3D

### *Histogramme des teneurs en tungstène*

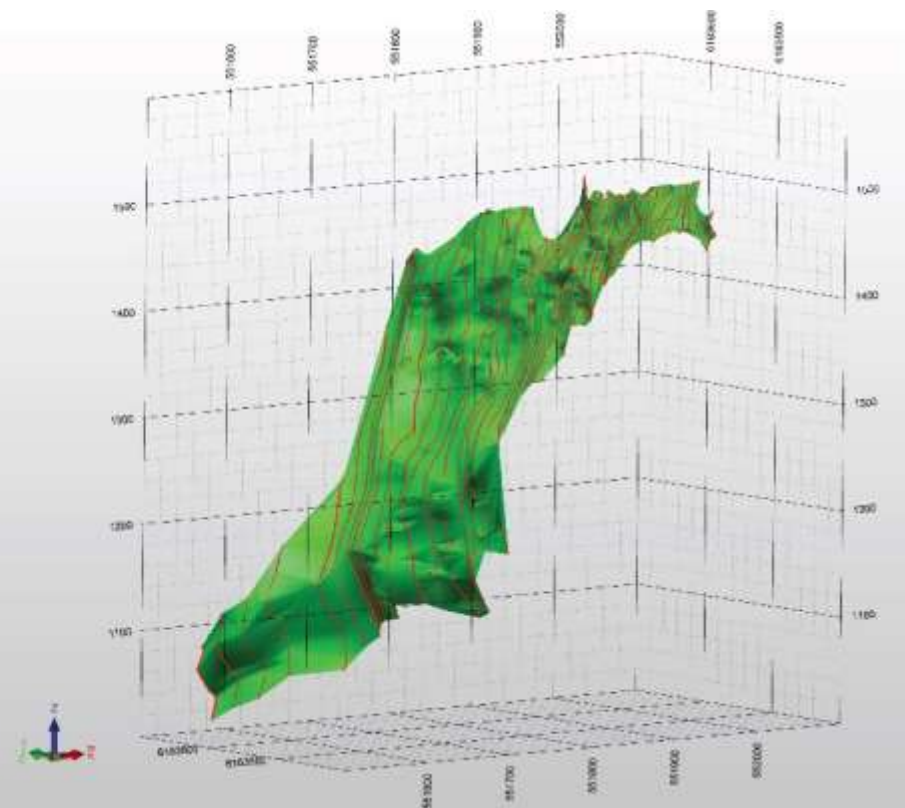
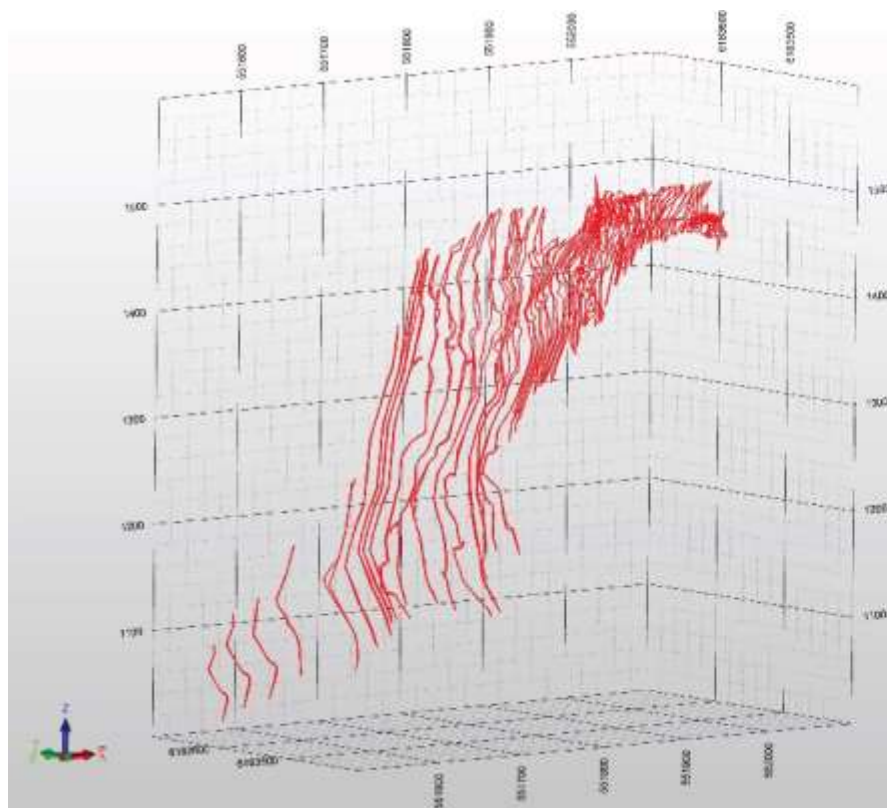
- 7400 analyses historiques
- Distribution bimodale :
  - teneurs centrées autour de **0,2 et 2 % WO<sub>3</sub>** (skarn et brèche filonienne à sulfures massifs)



## Modélisation 3D

### Modélisation des corps minéralisés

- Création de **coupes séries à haute résolution** (10 m d'intervalle) à partir de la géologie et des analyses
- Quartier Véronique → 57 coupes séries

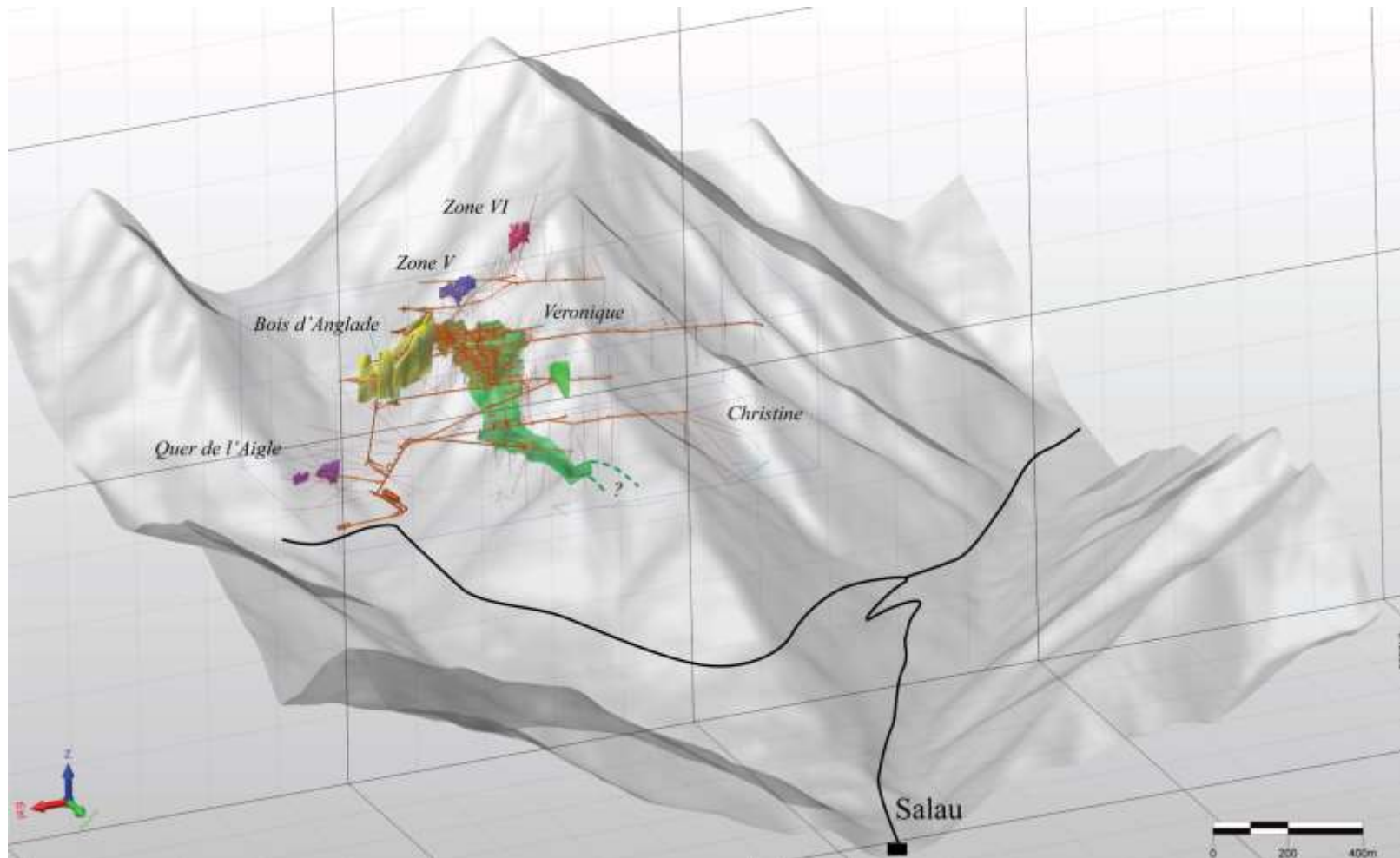




## Modélisation 3D

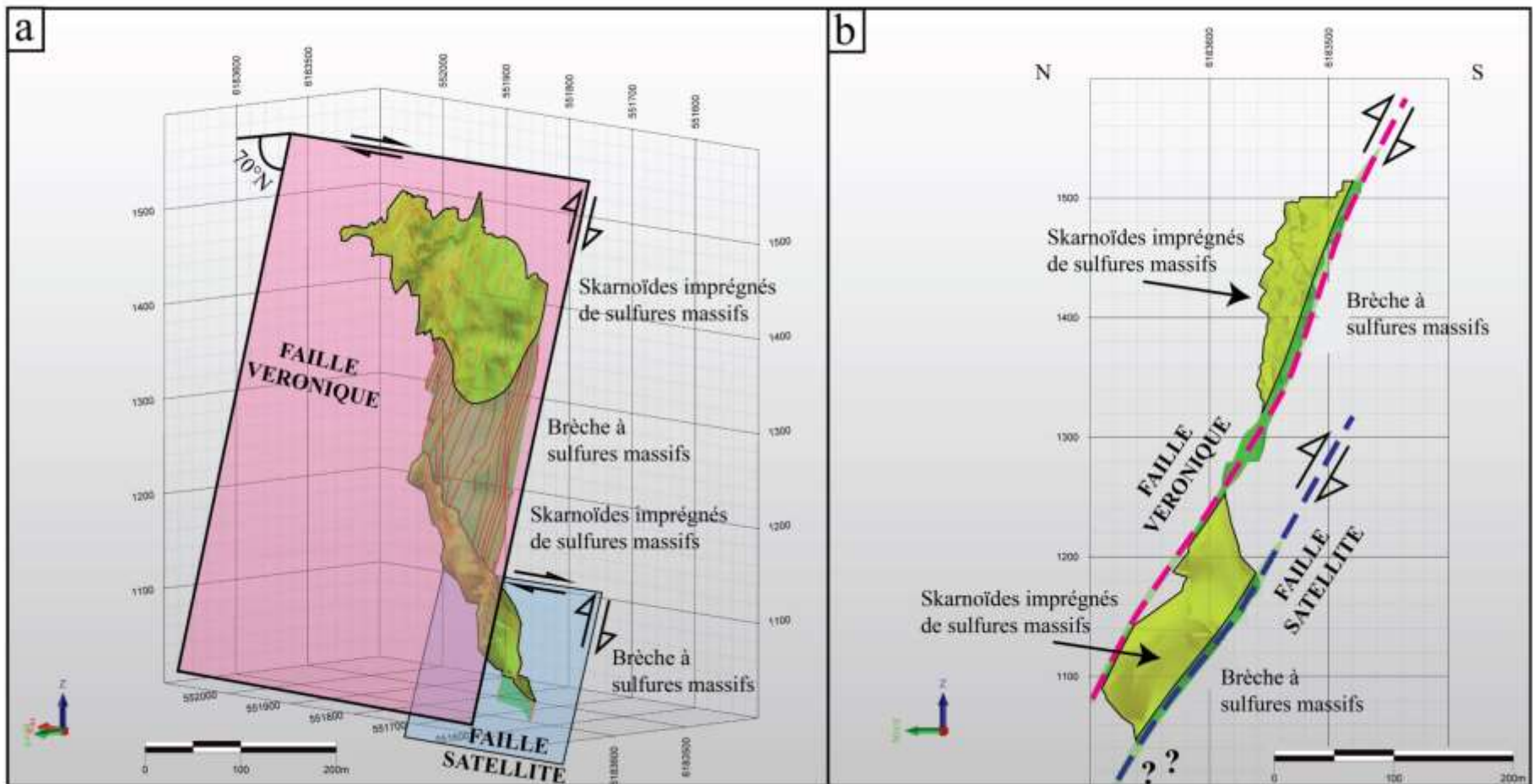
### Modélisation des corps minéralisés

- 5 corps minéralisés modélisés : Bois d'Anglade, Quer de l'Aigle, Véronique, Zone V, Zone VI



## Modélisation 3D

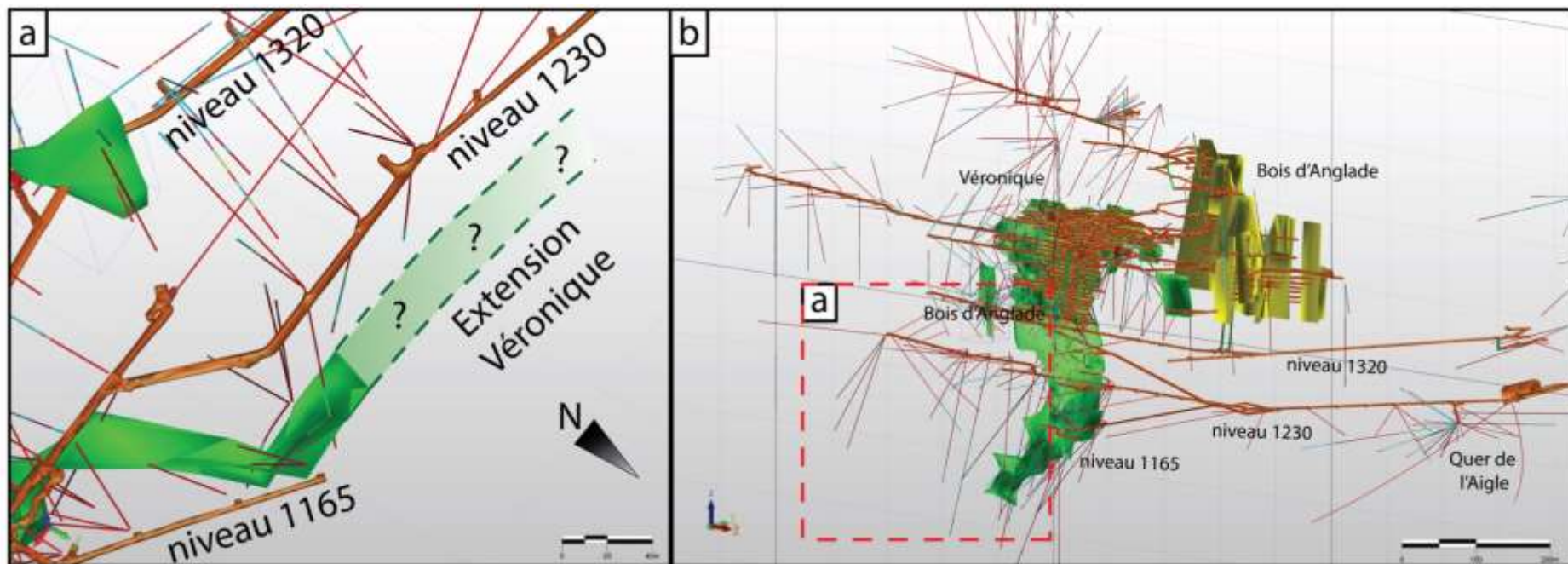
- A l'échelle du quartier Véronique, un jeu inverse dextre d'environ 200 à 250 m et présence d'une faille satellite (même cinématique que Véronique)
- Les minéralisations doivent être recherchées **en aval vers l'ouest**



## Modélisation 3D

### Modélisation de l'extension de Véronique

- **Aval pendage de la faille manqué** (sondages réalisés vers le sud)
- L'extension de Véronique est à rechercher vers le NW

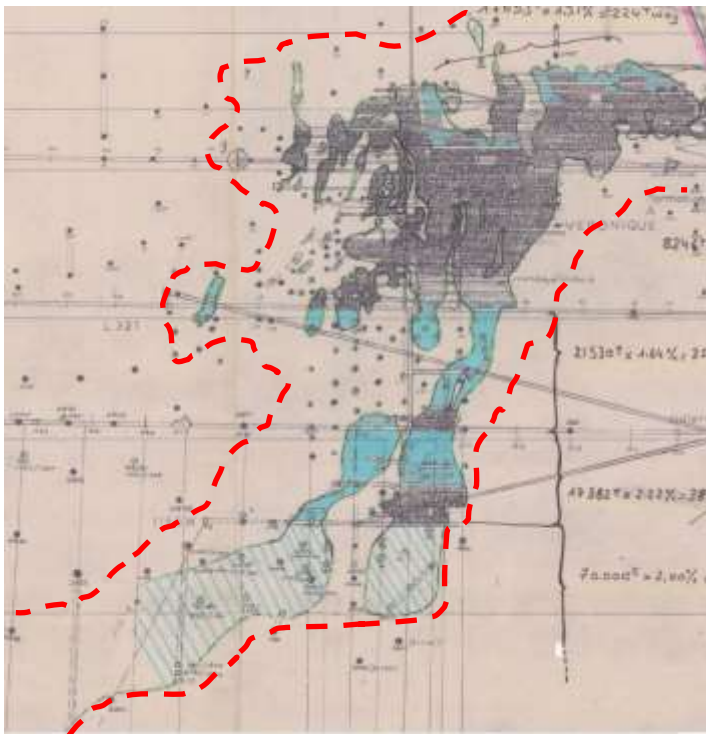




## Modélisation 3D

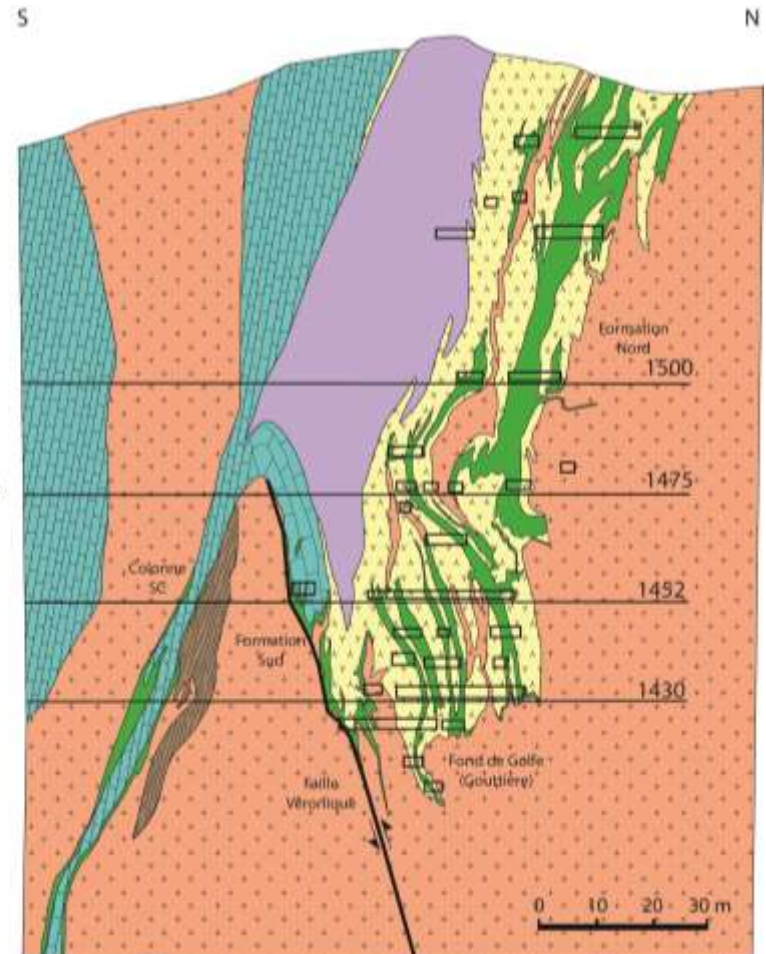
### Ressources

- **25 000 t WO<sub>3</sub>** nécessaires pour envisager une nouvelle exploitation
- Réserves historiques ≈ **2 860 t WO<sub>3</sub>** → **cut off de 0,8 % WO<sub>3</sub>** et **puissance minéralisée > 1,8 m**
- **Calcul réactualisé en cours (cut off 0,3 % WO<sub>3</sub>)**



#### Légende

- Marbre inférieur graphiteux
- Cornéennes calciques
- Skarnoides (skarn « pauvre »)
- Skarn à pyrrhotite massive (skarn « riche »)
- Cornéennes silico - alumineuses
- Granodiorite
- Faille Véronique
- Galeries principales





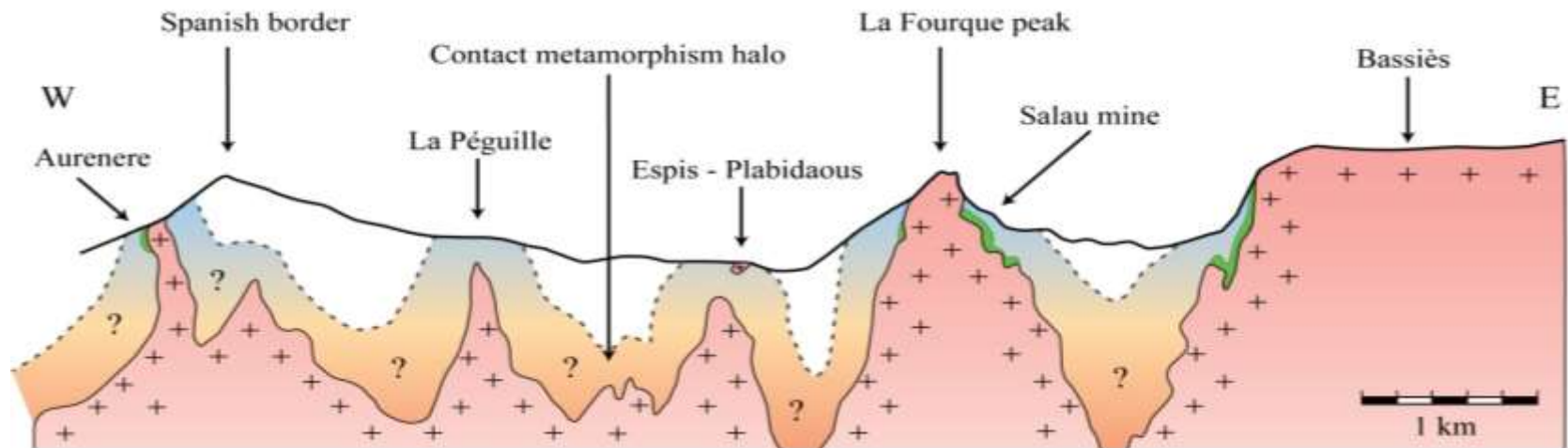
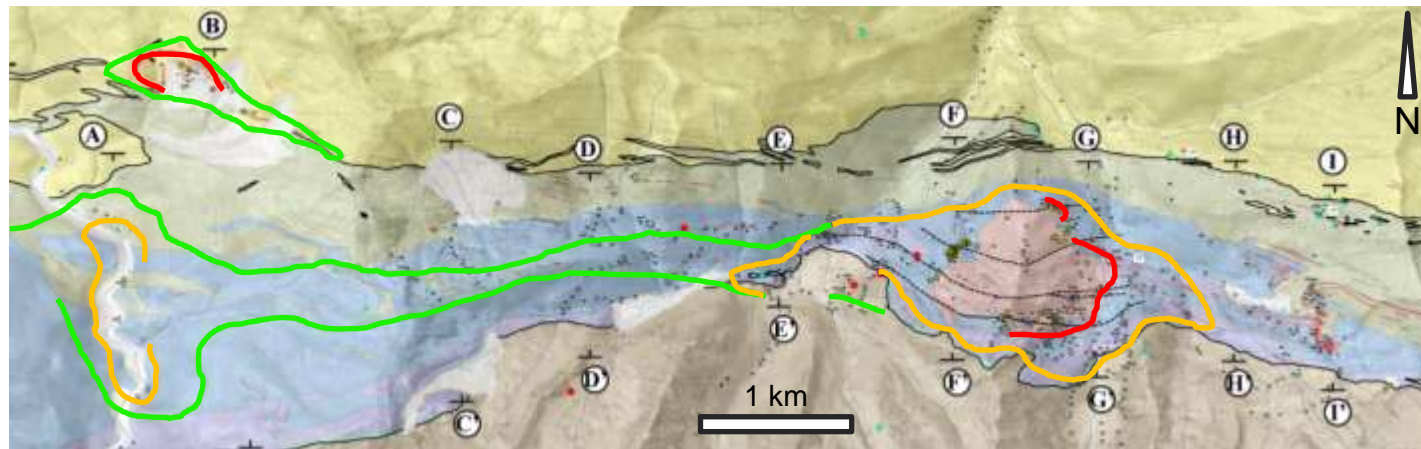
*La méthode RSCM en tant qu'outil  
thermométrique pour l'exploration minière*





## Hypothèse de départ

- **Géométrie** des corps magmatiques entre Salau et Aurenère ?



*modifié d'après Michard & Bouquet, 1986*

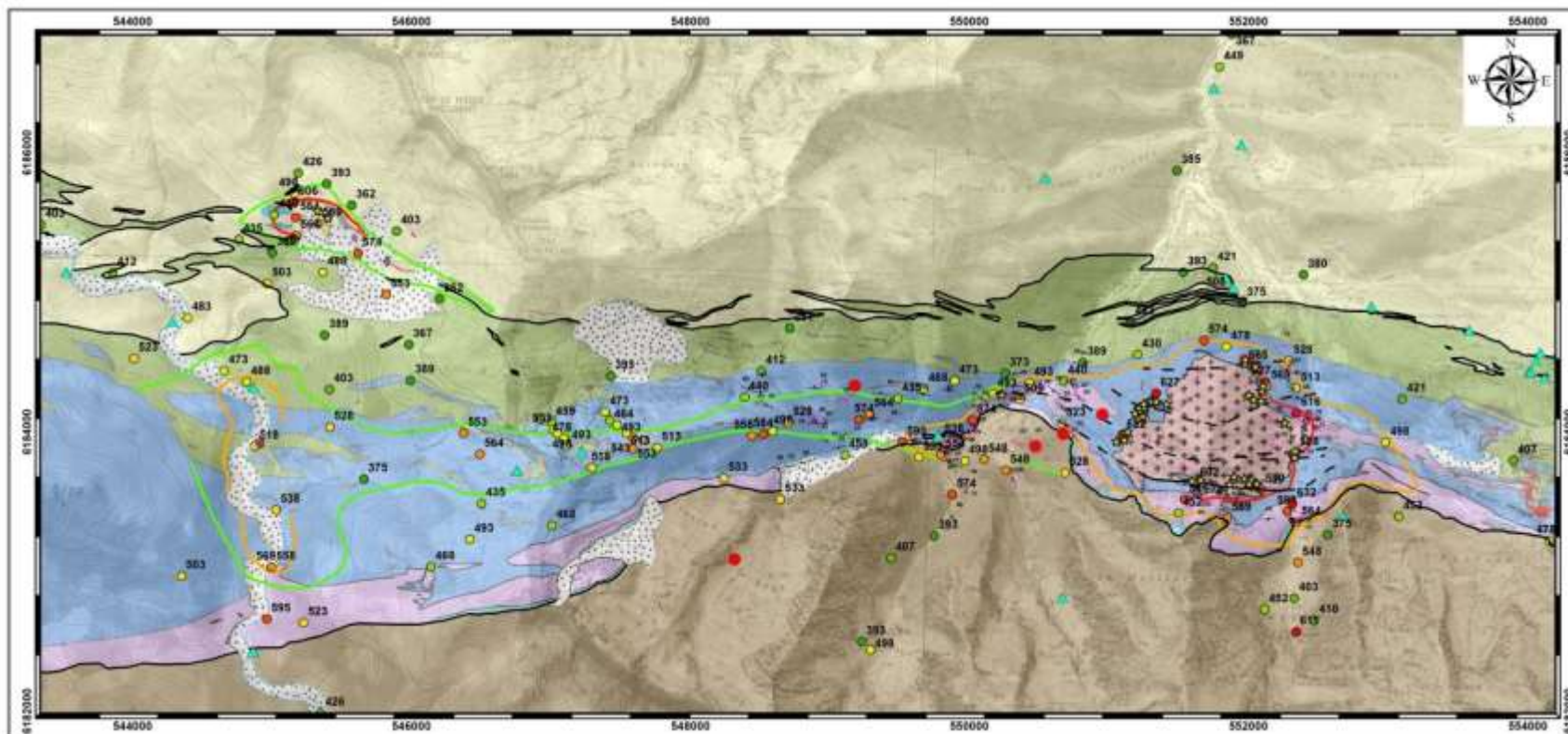


## Echantillonnage

Coll. R. Augier



### ➤ 140 échantillons riches en matière organique collectés



#### Legend

##### RSCM temperatures (°C)

- < 400
- 400 - 430
- 430 - 470
- 470 - 500
- 500 - 540
- 540 - 570
- 570 - 600
- 600 - 665

##### Mineralized occurrences

- ◆ Arsenopyrite
- Pyrrhotite
- ▲ Galena, sphalerite, pyrite
- ★ Scheelite, pyrrhotite

##### Structures

- Early Silurian thrust
- Thrust fault
- Veronique fault
- ↓ s1
- ↓ s2
- Contact metamorphism halo
  - Biotite
  - Biotite, tremolite, albite
  - Diopside, vesuvianite, garnet, epidote

##### Lithology

- Superficial formations
- Skarn
- Granodiorite
- Microdiorite dykes

##### North Devonian unit

- Lower Devonian
- Carboire limestone

- Silurian black shales

- Cambro-ordovician schists unit

##### South Devonian unit

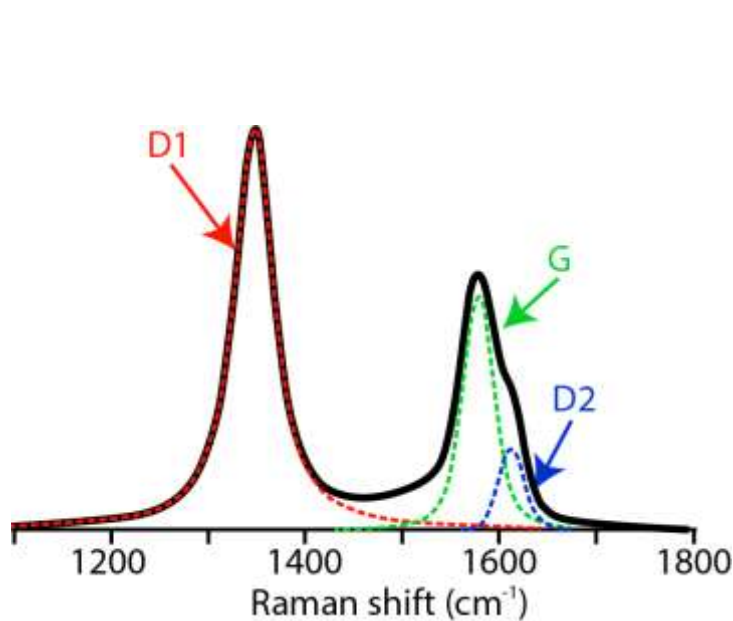
- Upper Devonian Bluish schists
- Lower Devonian Upper marbles
- Lower Devonian Barregiennes
- Siluro-Devonian Lower graphitic marbles



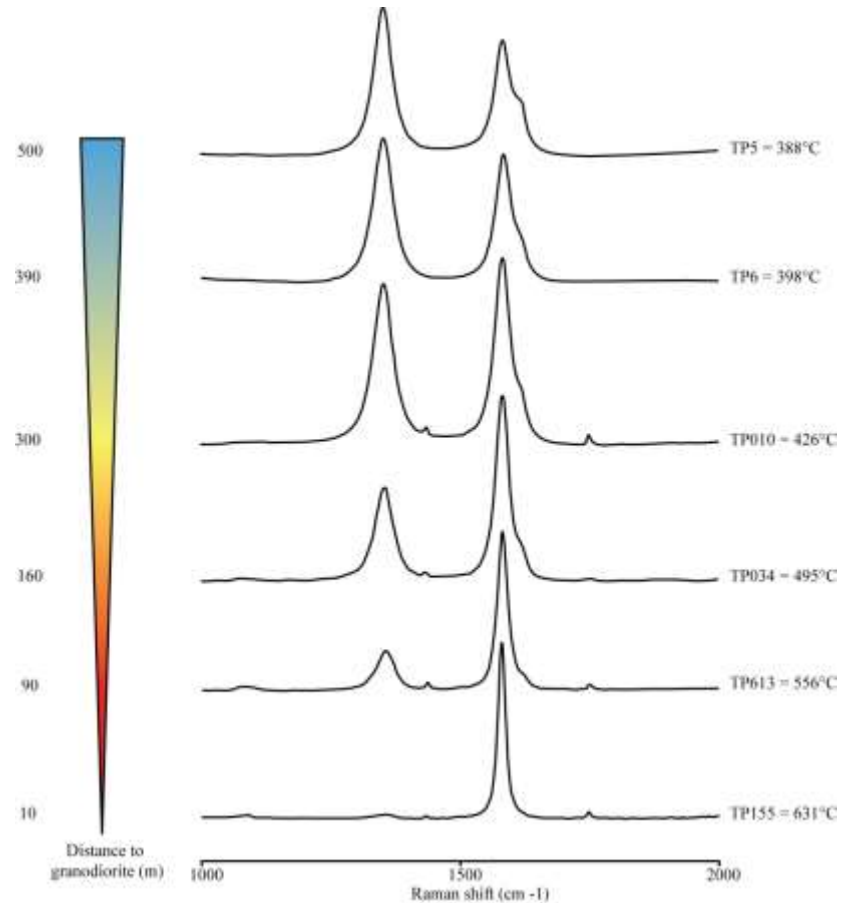
Coordinate system : Lambert 93  
Units : Meters

## Estimation des Tmax

- Raman Spectra of Carbonaceous Matter (RSCM) → Tmax subie par une roche (irréversible)
- Estimation de Tmax basée sur **un rapport d'intégrales** entre différents pics
- **140 échantillons** avec une gamme de températures : **393 – 665°C** (calibration [Aoya et al., 2010](#))

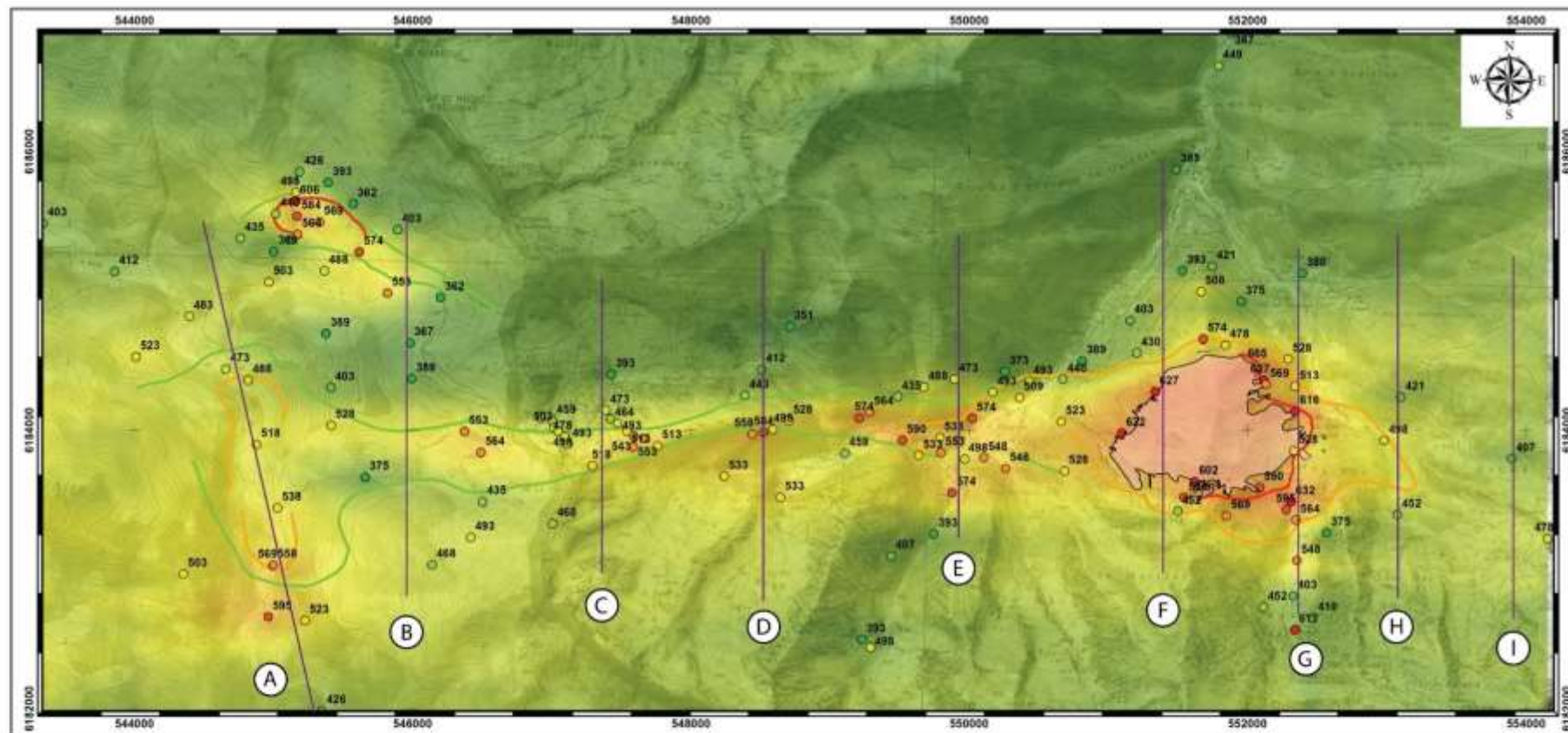


d'après Aoya et al., 2010



# Carte de paléotempératures

## Variographie et krigeage ordinaire



### RSCM temperature (°C)

- < 400
- 400 - 430
- 430 - 470
- 470 - 500
- 500 - 540
- 540 - 570
- 570 - 600
- 600 - 665

### Metamorphism isograds

- Biotite
- Biotite, tremolite, albite
- Diopside, idocrase, garnet, epidote

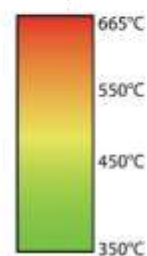
### Lithology

- Salau granodiorite

### Cross sections (fig. 6)

- N-S traces

### Interpolated raman temperature

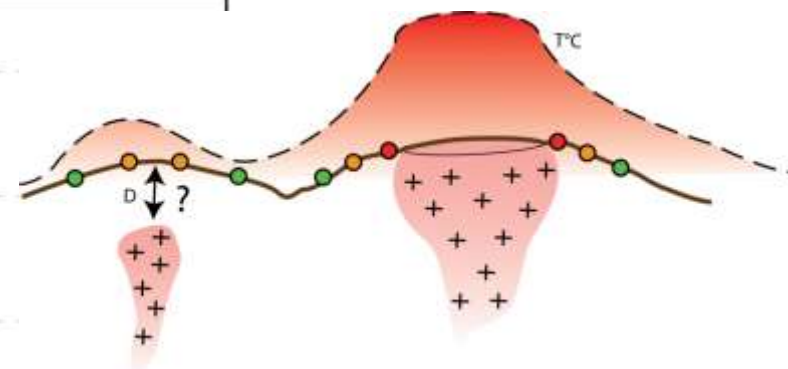
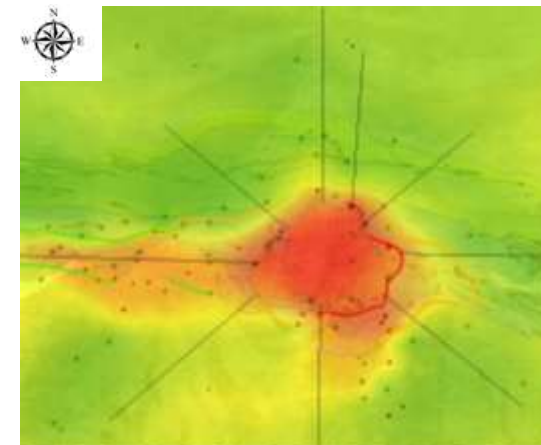
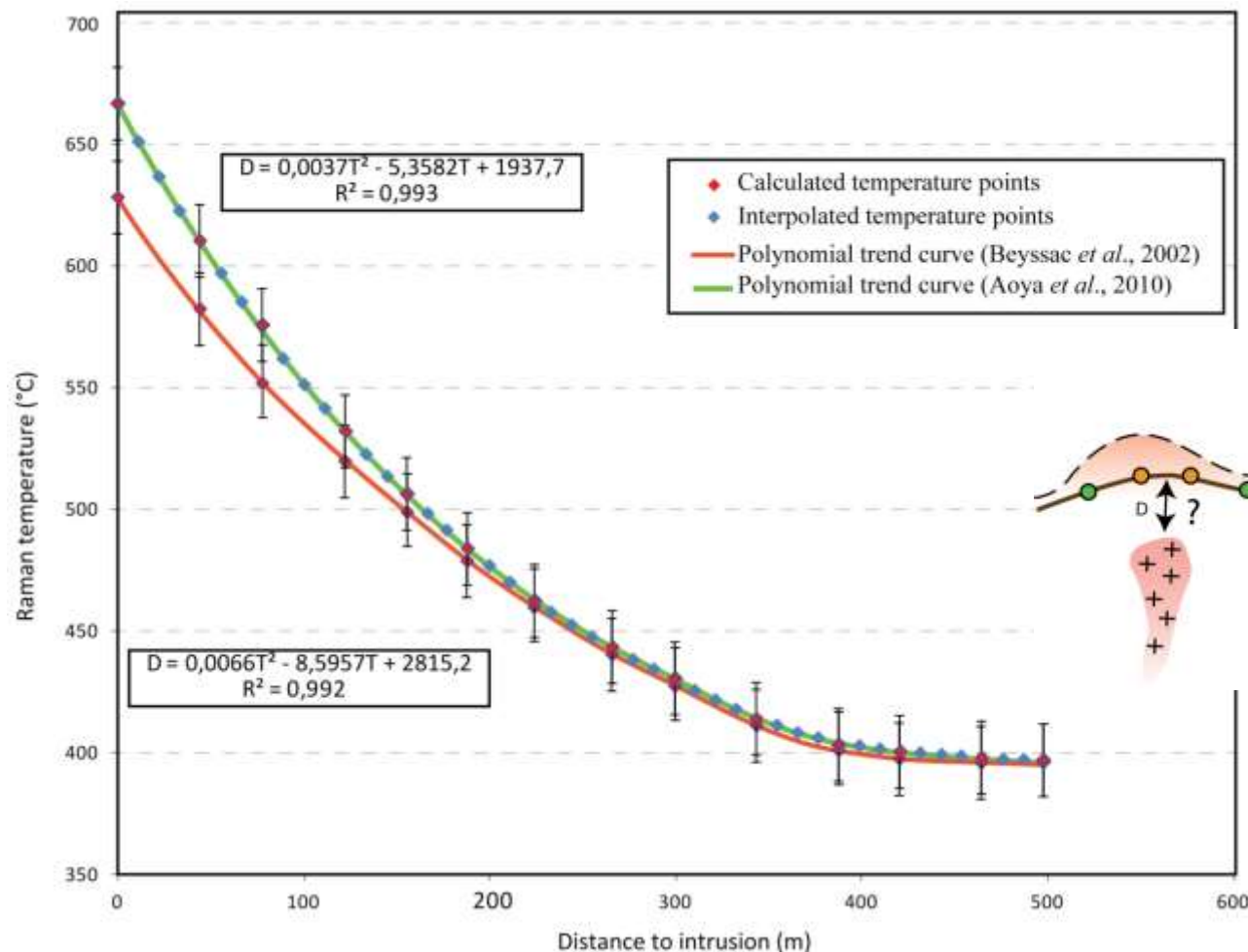


Coordinate system : Lambert 93  
Units : Meters



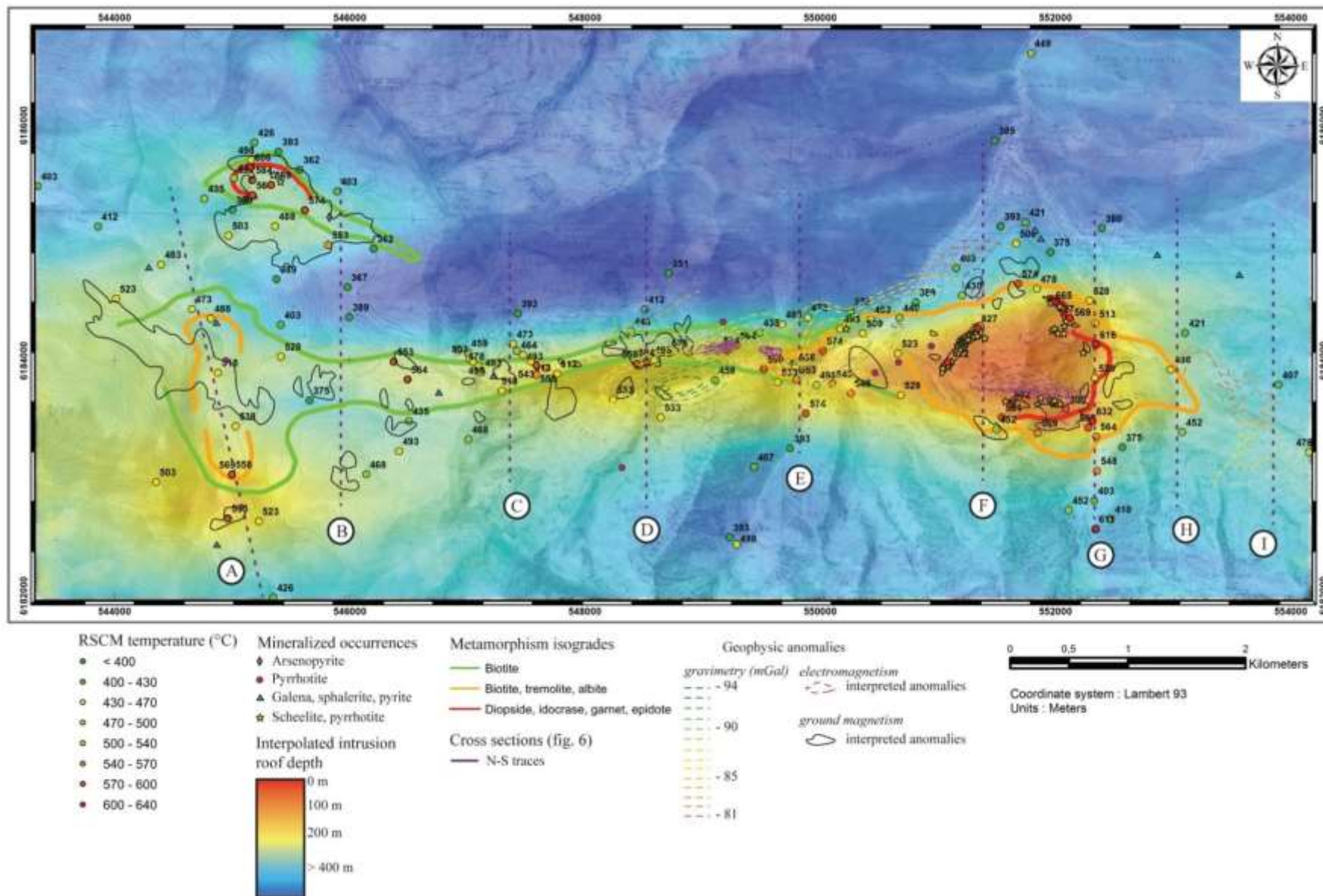
## Température vs « distance à l'intrusion »

- Approximation par une équation polynomiale ( $R^2 = 0,99$ )
- Cohérent avec les résultats par modélisation numérique (Comsol)



# Carte de « distance à l'intrusion »

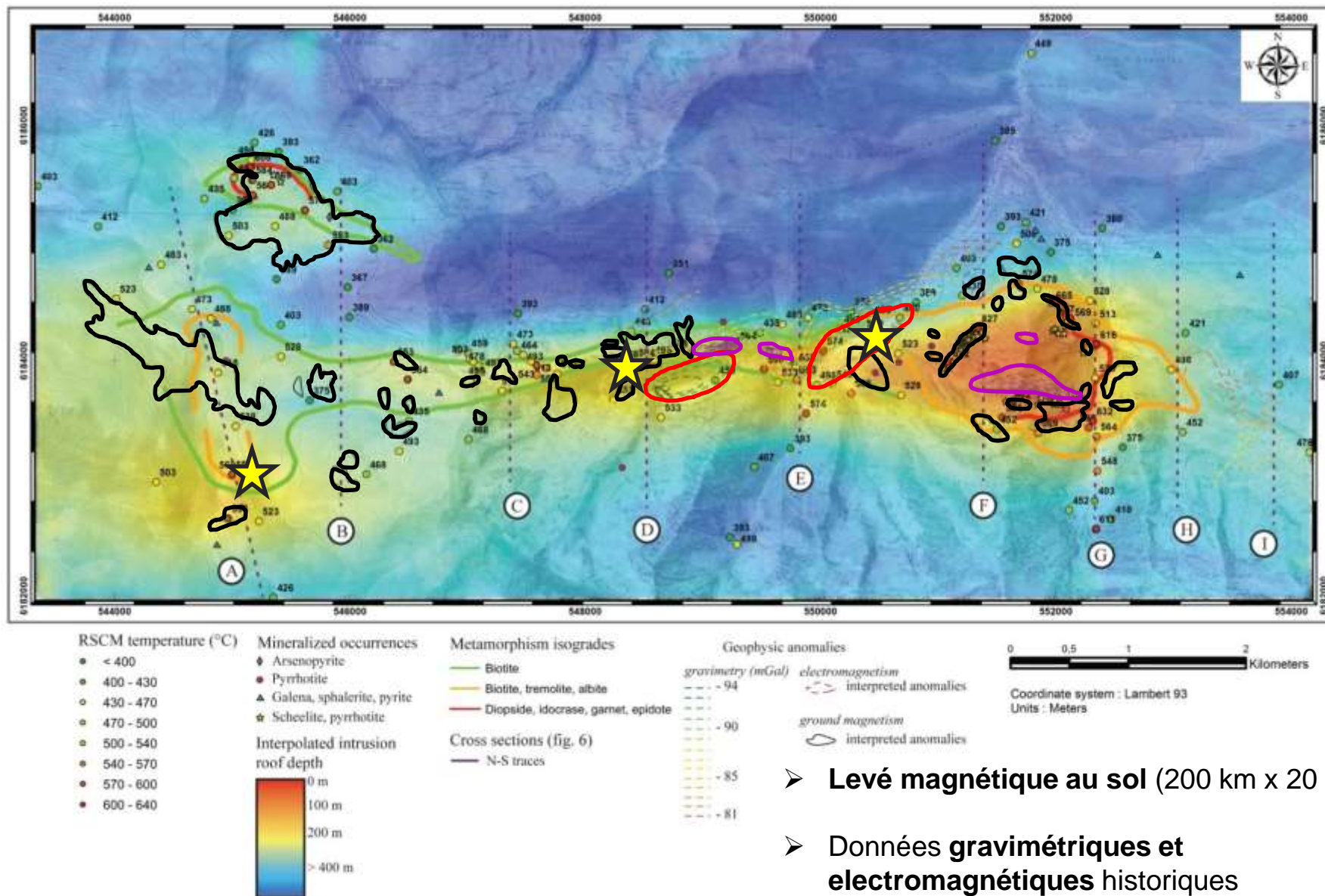
Coll. R. Augier

 Institut des Sciences de la Terre d'Orléans  
**ISTO**




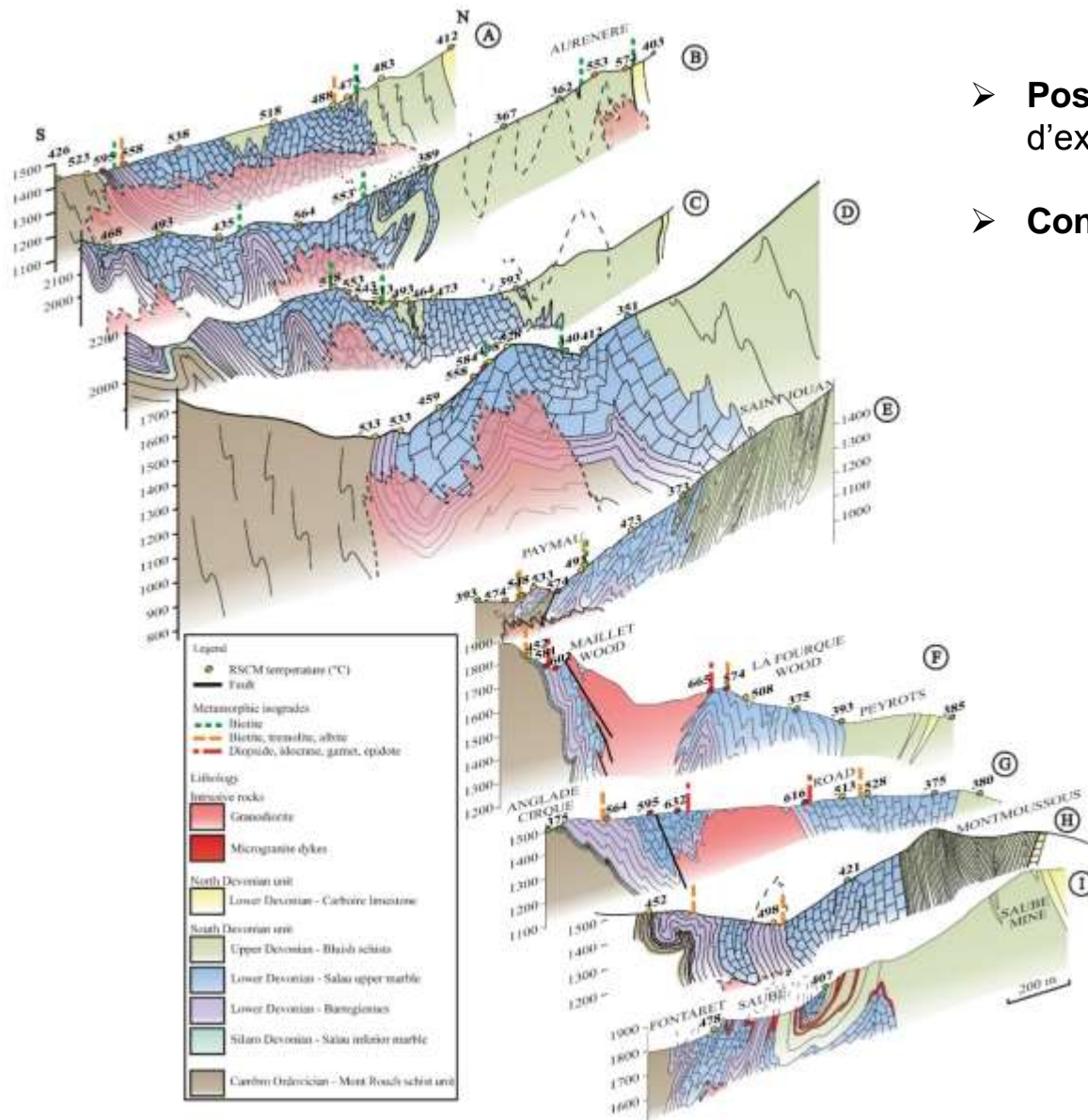
### Carte de « distance à l'intrusion »

### Corrélation / validation avec les données géophysiques





## Coupes sérieées de « distance à l'intrusion »



- **Positionnement direct** des travaux d'exploration (sondages, tranchées...)
- **Contrôle des résultats** dès que possible



## *Synthèse*

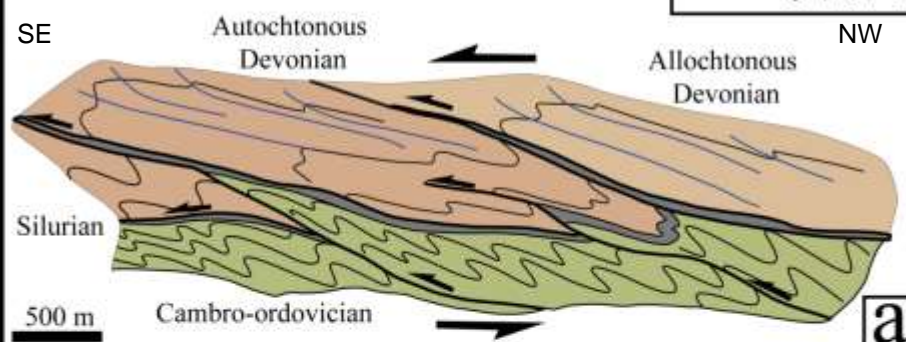


## Modèle génétique

À l'échelle du gisement de Salau

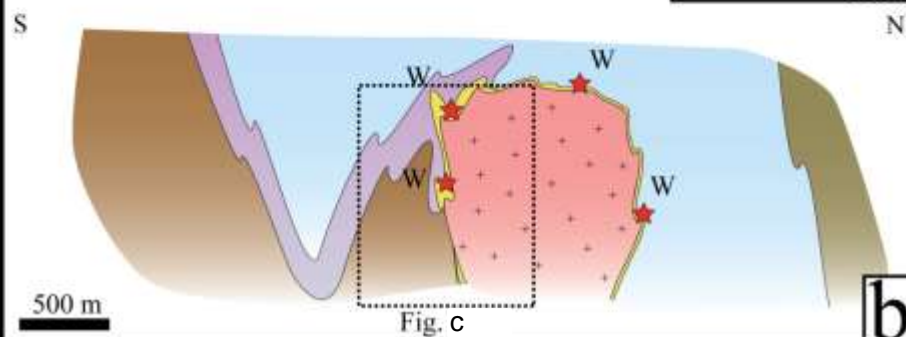
D1 320 Ma

Plis couchés P1 N30°E  
Chevauchements E-W top SE



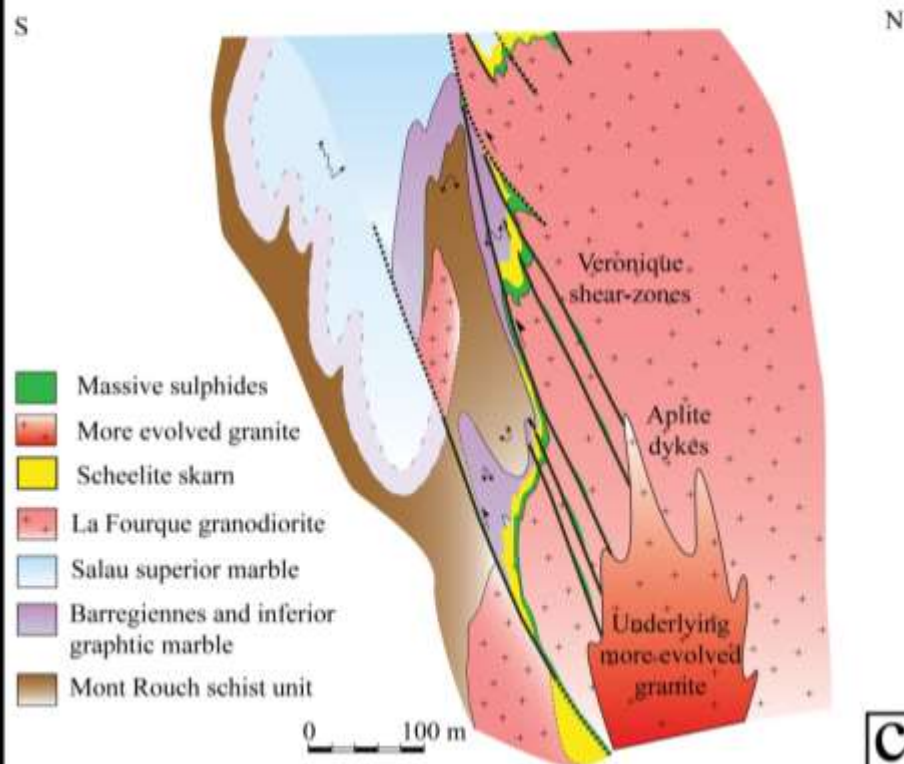
D2 295 Ma

Plis sub-verticaux P2 N110°E  
Intrusion granodioritique  
**Formation des skarns**



D3 289 Ma

Failles inverses dextres E-W 70°N  
Intrusion évoluée (aplite)  
**Formation des brèches à sulfures massifs  
scheelite abondante et or**



- Massive sulphides
- More evolved granite
- Scheelite skarn
- La Fourque granodiorite
- Salau superior marble
- Barregiennes and inferior graphitic marble
- Mont Rouch schist unit

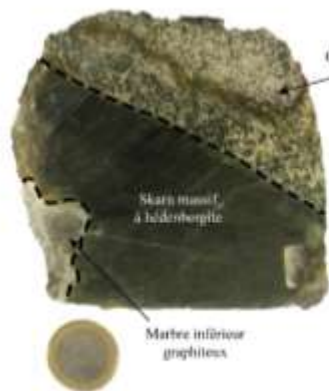
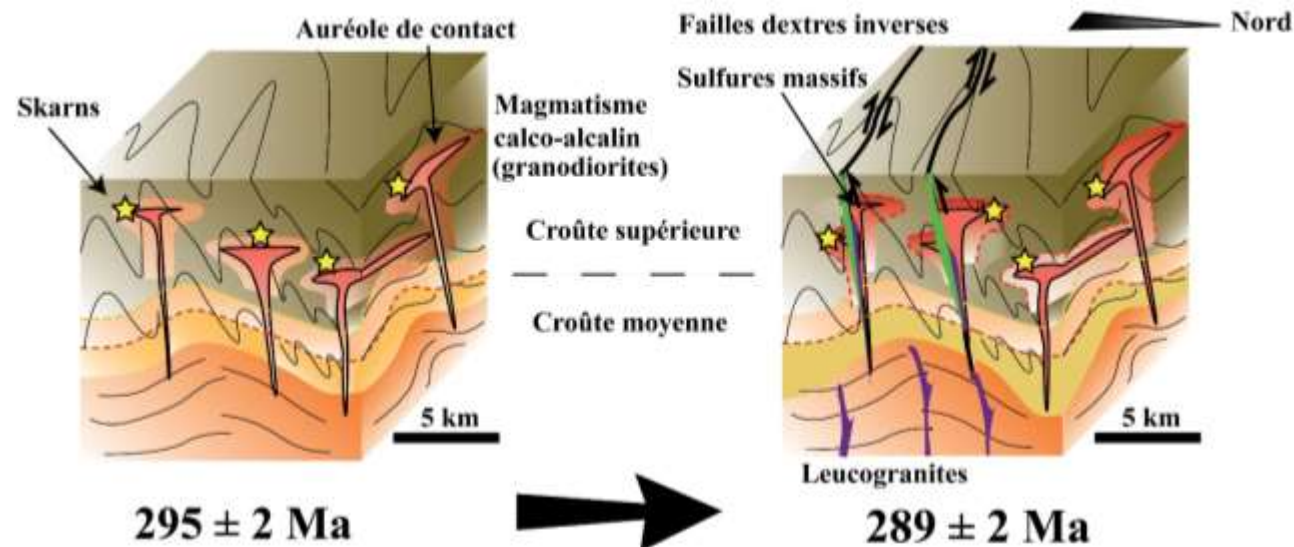


## Modèle génétique

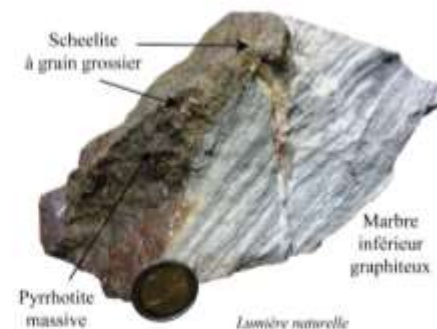
À l'échelle de la zone axiale

- Evolution de la différenciation d'un même système magmatique depuis des termes intermédiaires (**granodiorite**) jusqu'à des termes évolués (**aprites**)

- **Relation spatiale étroite** entre ces différentes intrusions

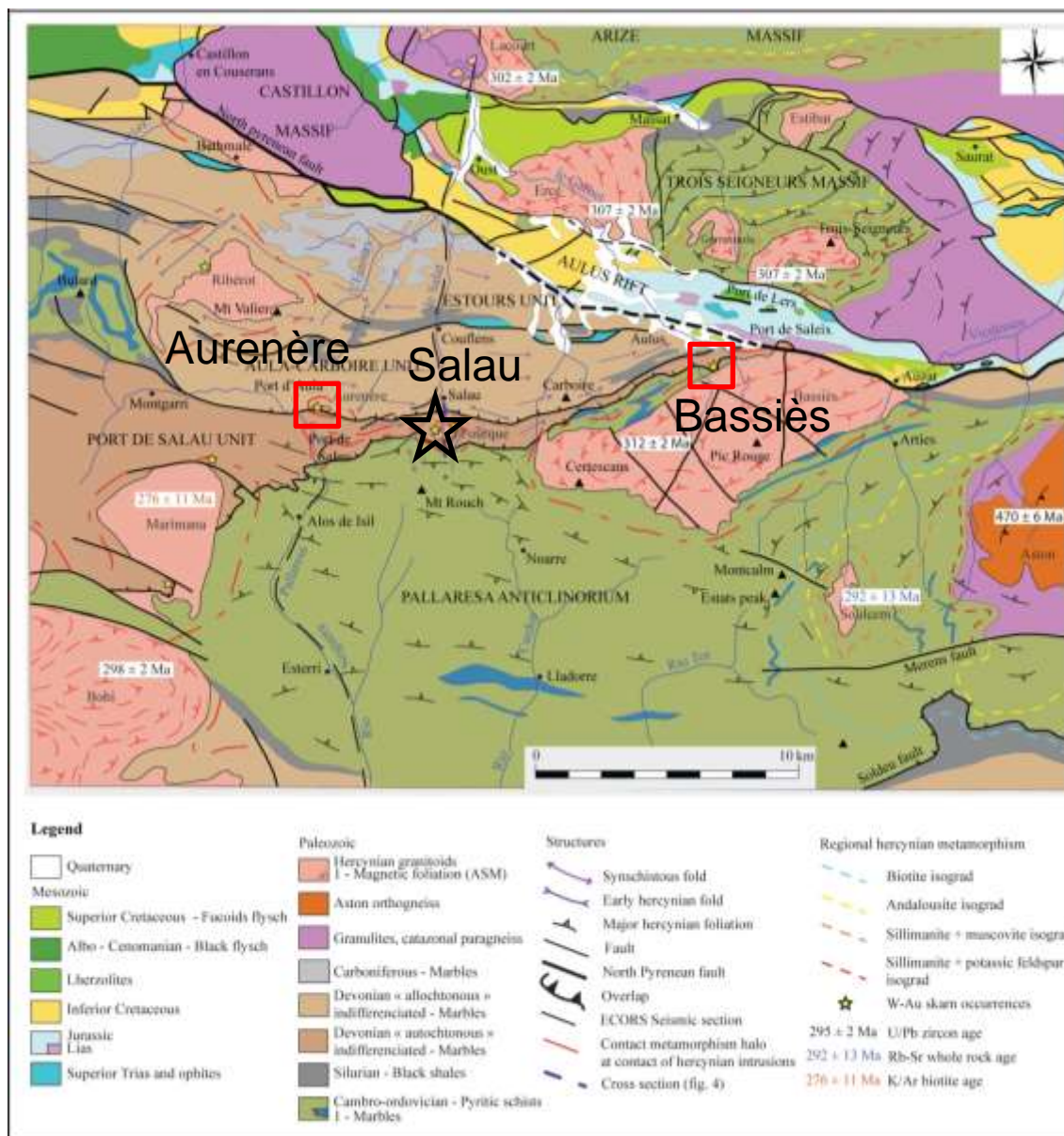


Skarn à silicates calcaïques, scheelite fine et sulfures disséminés



Sulfures massifs, scheelite grossière et or

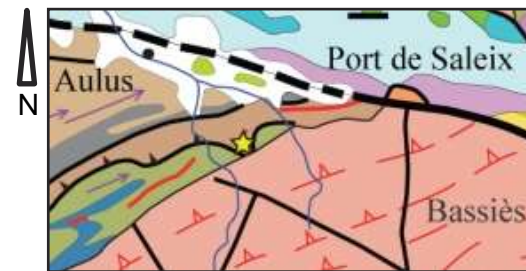
## Validité à l'échelle régionale ?



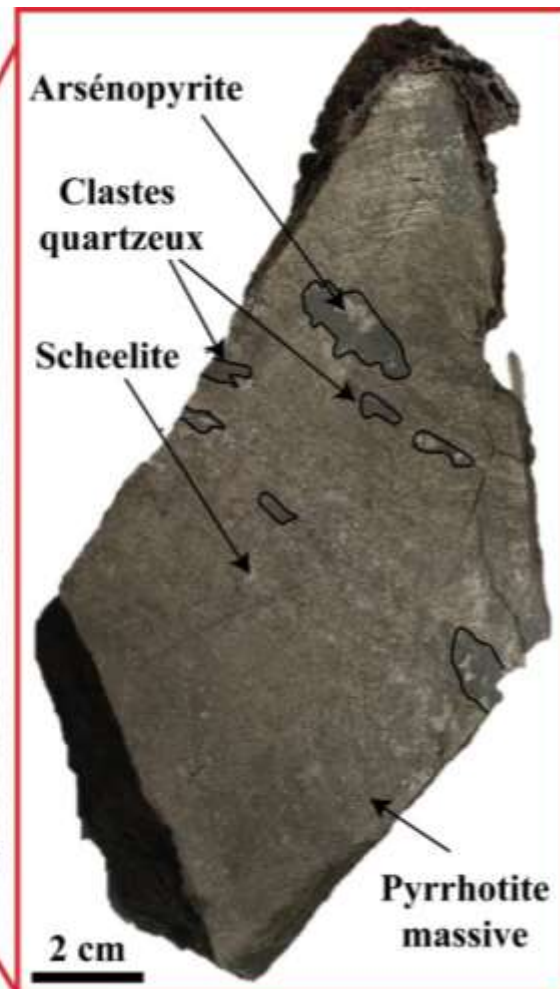
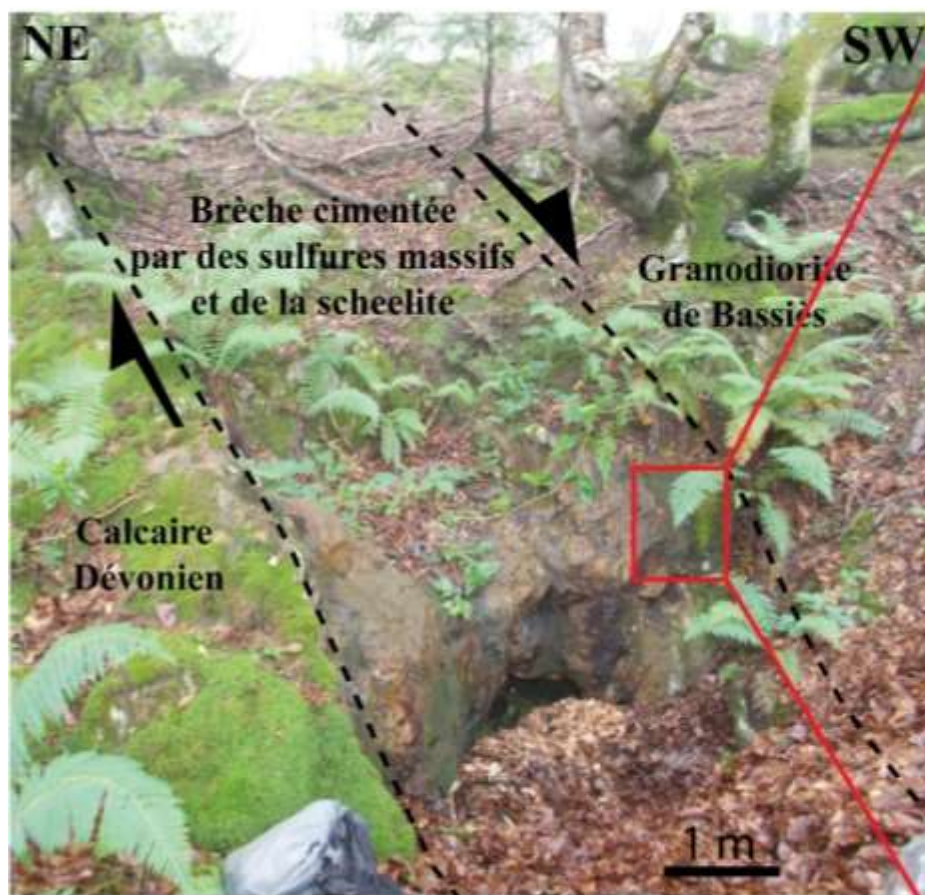


## Bassiès

- **Faïlle** régionale N80°E 80°N au contact granodiorite – marbres dévoniens
- **Brèche à sulfures massifs** (1,2 %  $\text{WO}_3$  – 3 g/t or)

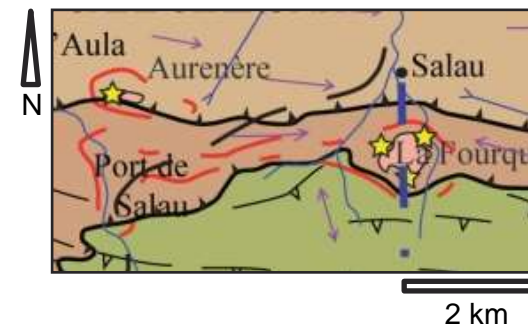
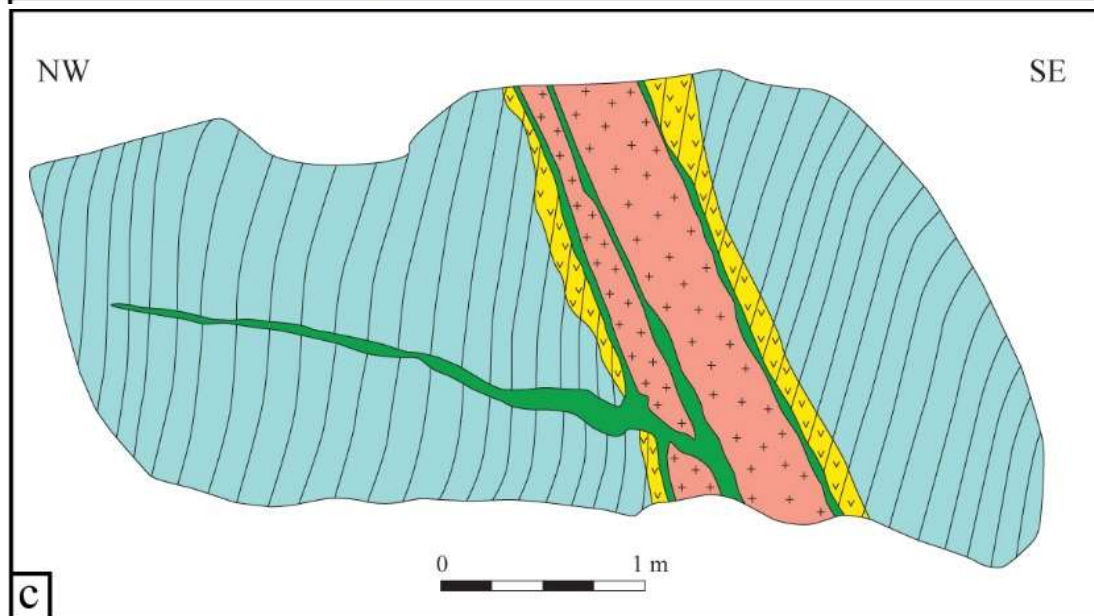


2 km





## Aurenère

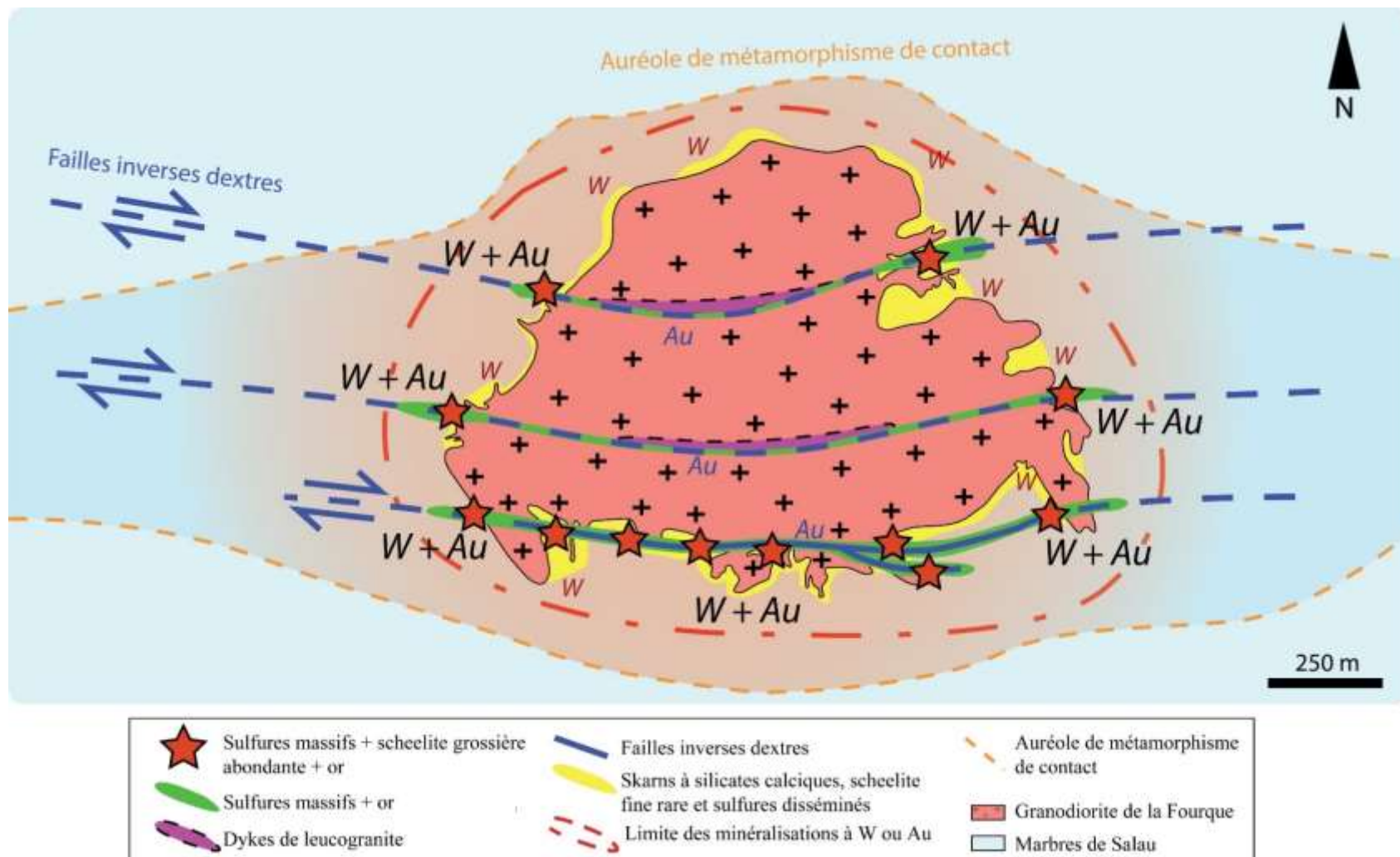


- **Skarn** à silicates calciques et scheelite fine **bréchifié** et **cimenté** par des **sulfures massifs**
- 70 échantillons ; moyenne de :
  - **0,8 %  $WO_3$**
  - **7 g/t or**

## Modèle génétique

### Synthèse

- Triple contrôle : failles régionales - intrusion - encaissant







***Merci de votre attention***

