Reconstitution des chemins de circulations de fluides dans le réseau poreux d'un batholite granitique

Application au site géothermique de Soultz-sous-Forêts

Joachim PLACE

19 octobre 2010

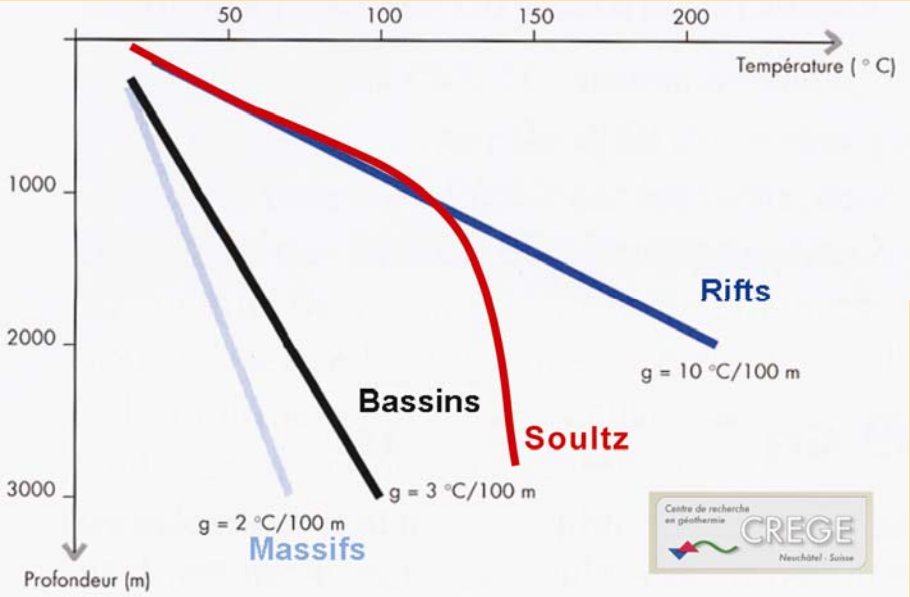
Directeurs de thèse :
Yves Géraud et Marc Diraison

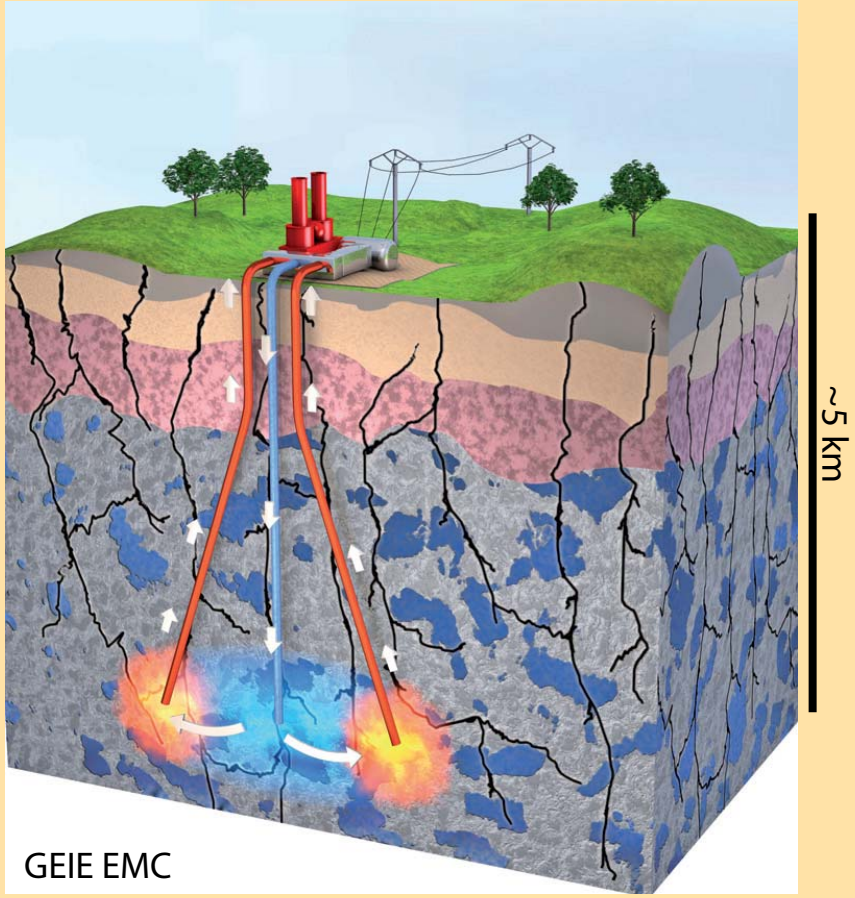
UNIVERSITÉ DE STRASBOURG

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

EIFER
European Institute for Energy Research

Géothermie profonde





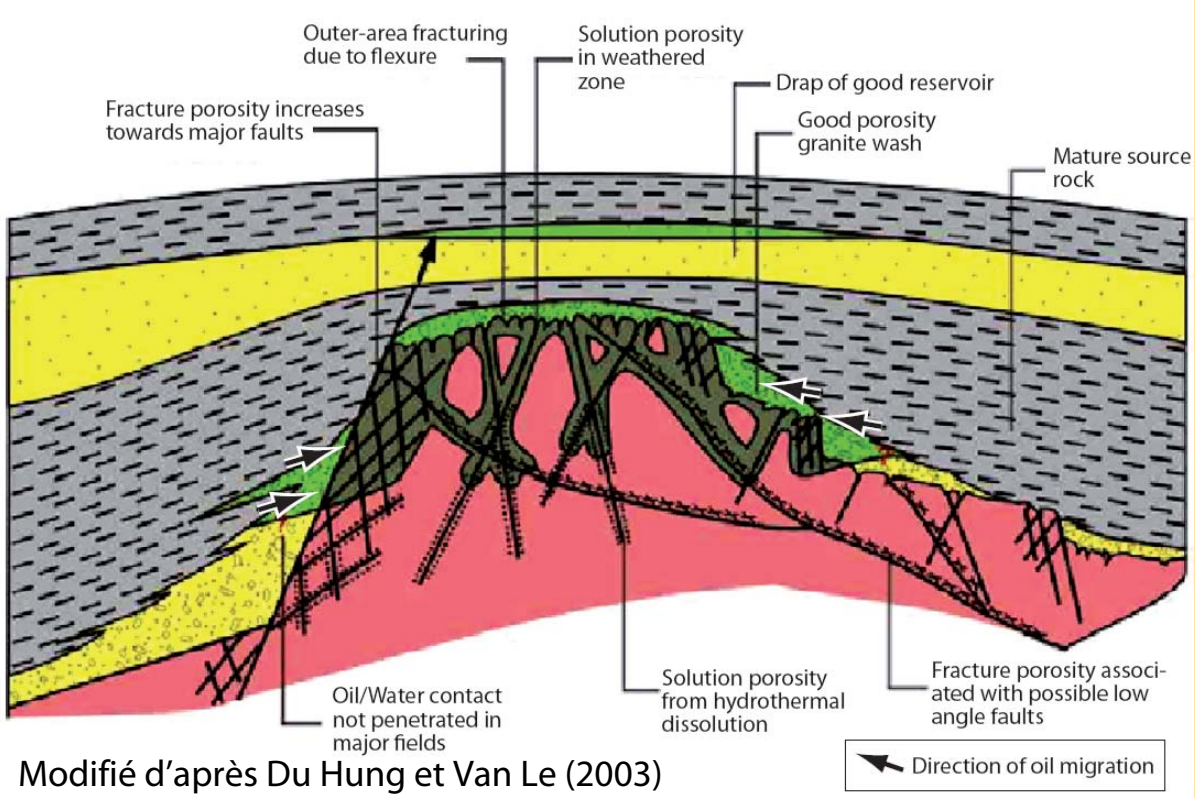
Circulations d'eau directement dans les formations

Besoin de connaitre les réseaux de circulation

À quoi ressemble un réservoir fracturé ?

hm - 10 km

hm - km

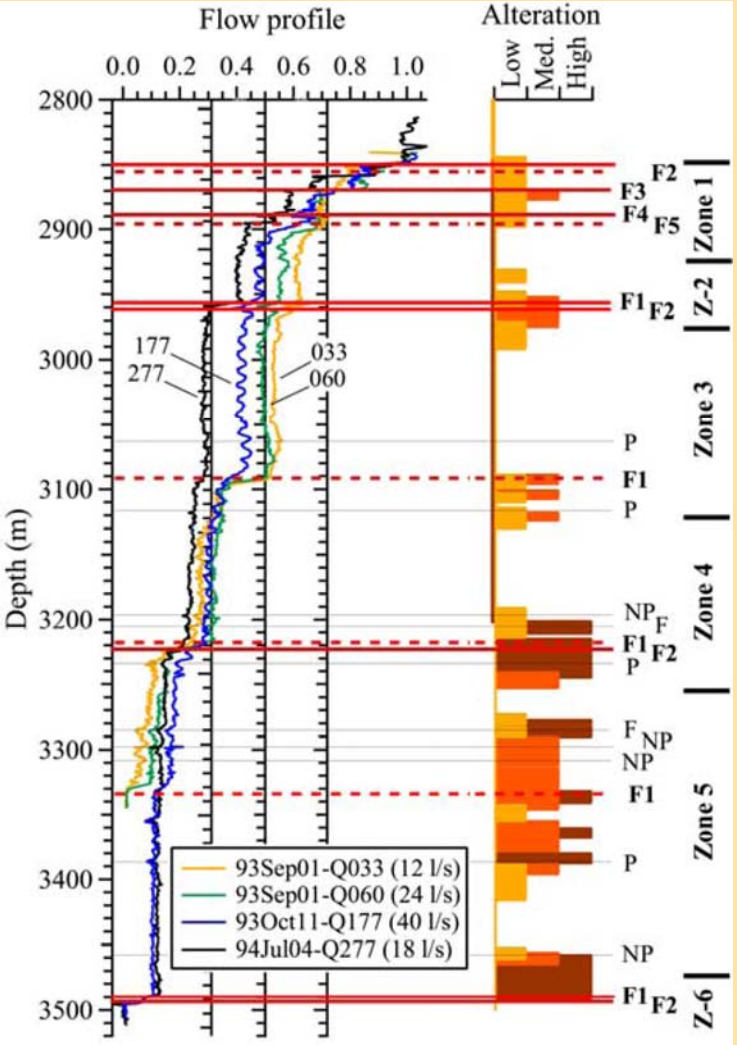


Modifié d'après Du Hung et Van Le (2003)

Propriétés de transfert du réservoir liées principalement à sa fracturation

Ressources en eau, hydrocarbures et chaleur

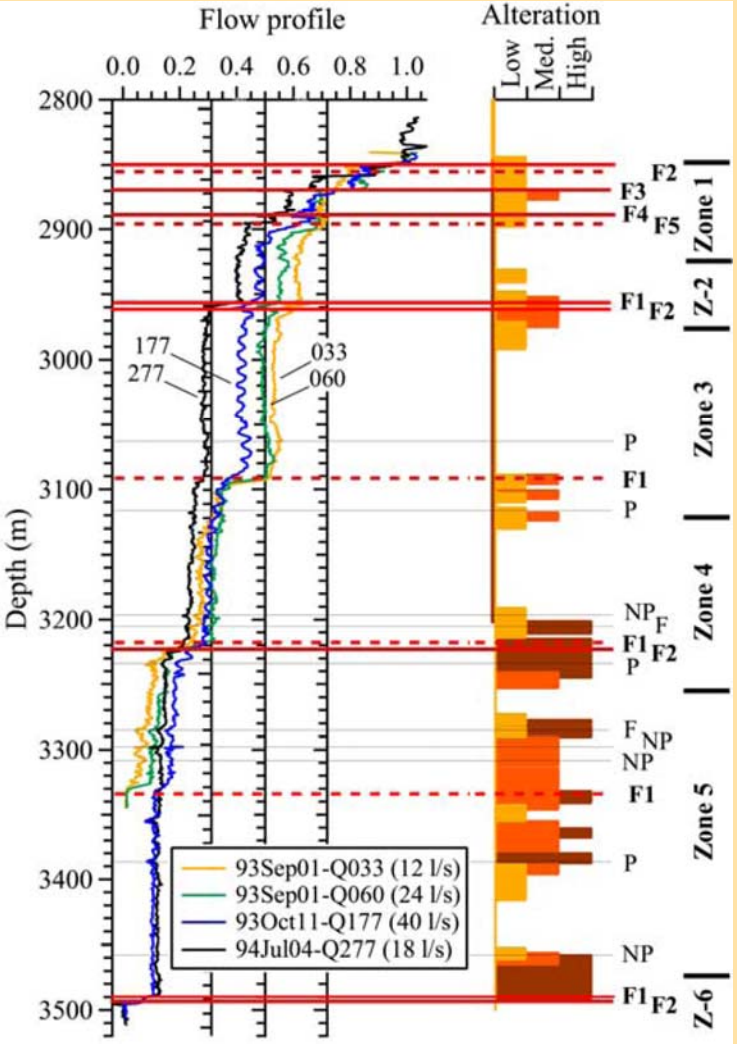
Comportement hydraulique : Exemple de Soultz-sous-Forêts



Modifié d'après Evans et al. (2005)

La circulation est localisée principalement dans des structures majeures

Comportement hydraulique : Exemple de Soultz-sous-Forêts



Modifié d'après Evans et al. (2005)

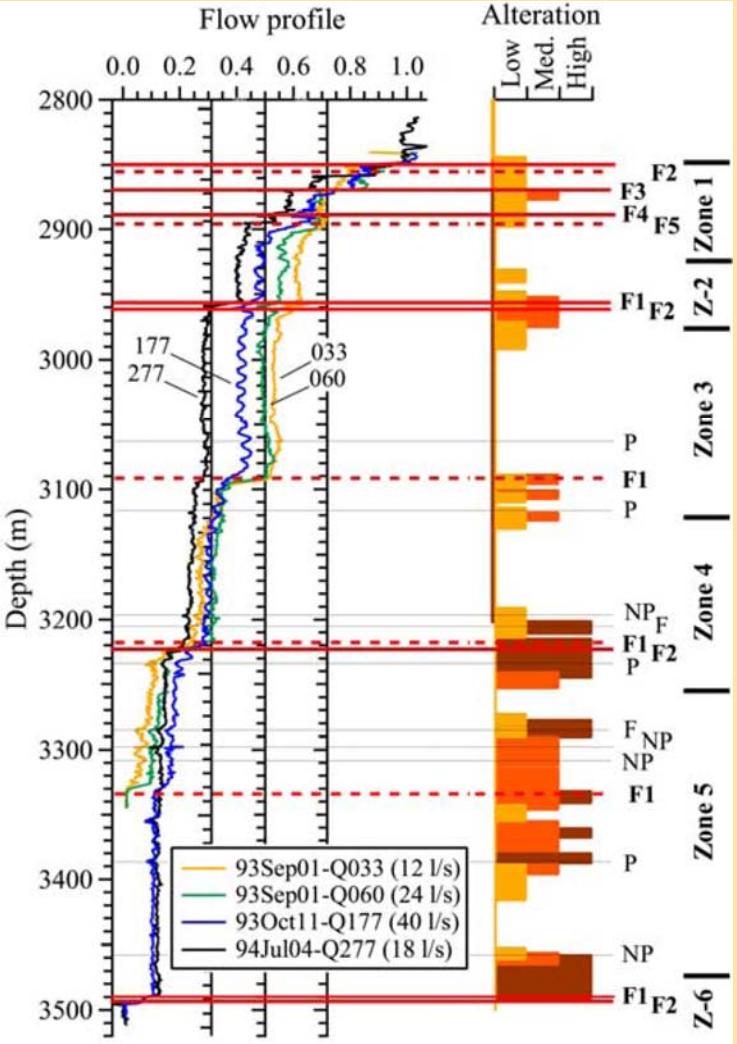
Transformations texturales et minéralogiques

Chaînes Côtières Catalanes

La circulation est localisée principalement dans des structures majeures

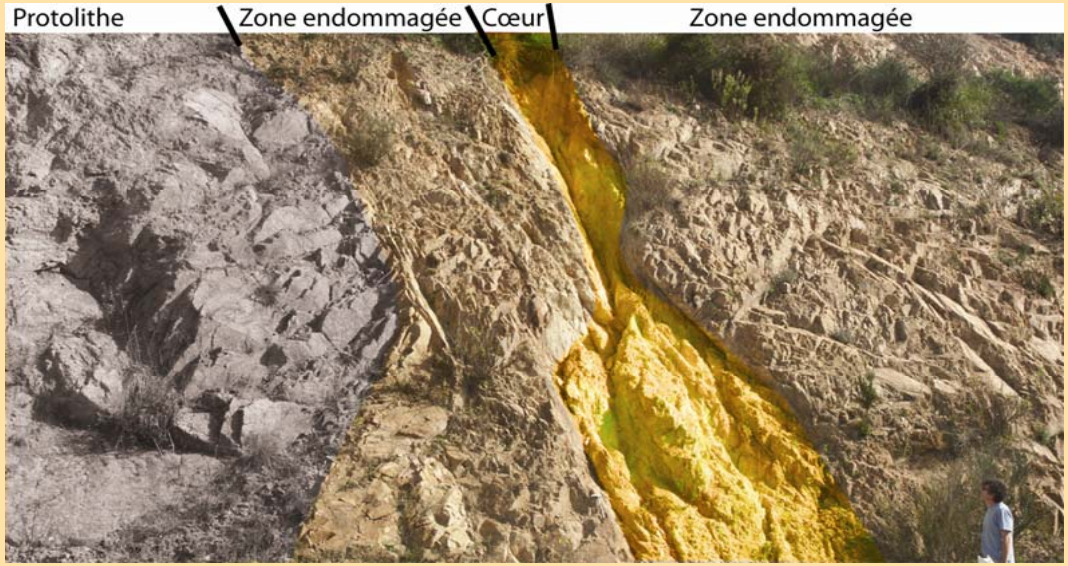
Quelle est la géométrie du réseau structural ?

Comportement hydraulique : Exemple de Soultz-sous-Forêts



Modifié d'après Evans et al. (2005)

Transformations texturales et minéralogiques



Chaînes Côtières Catalanes

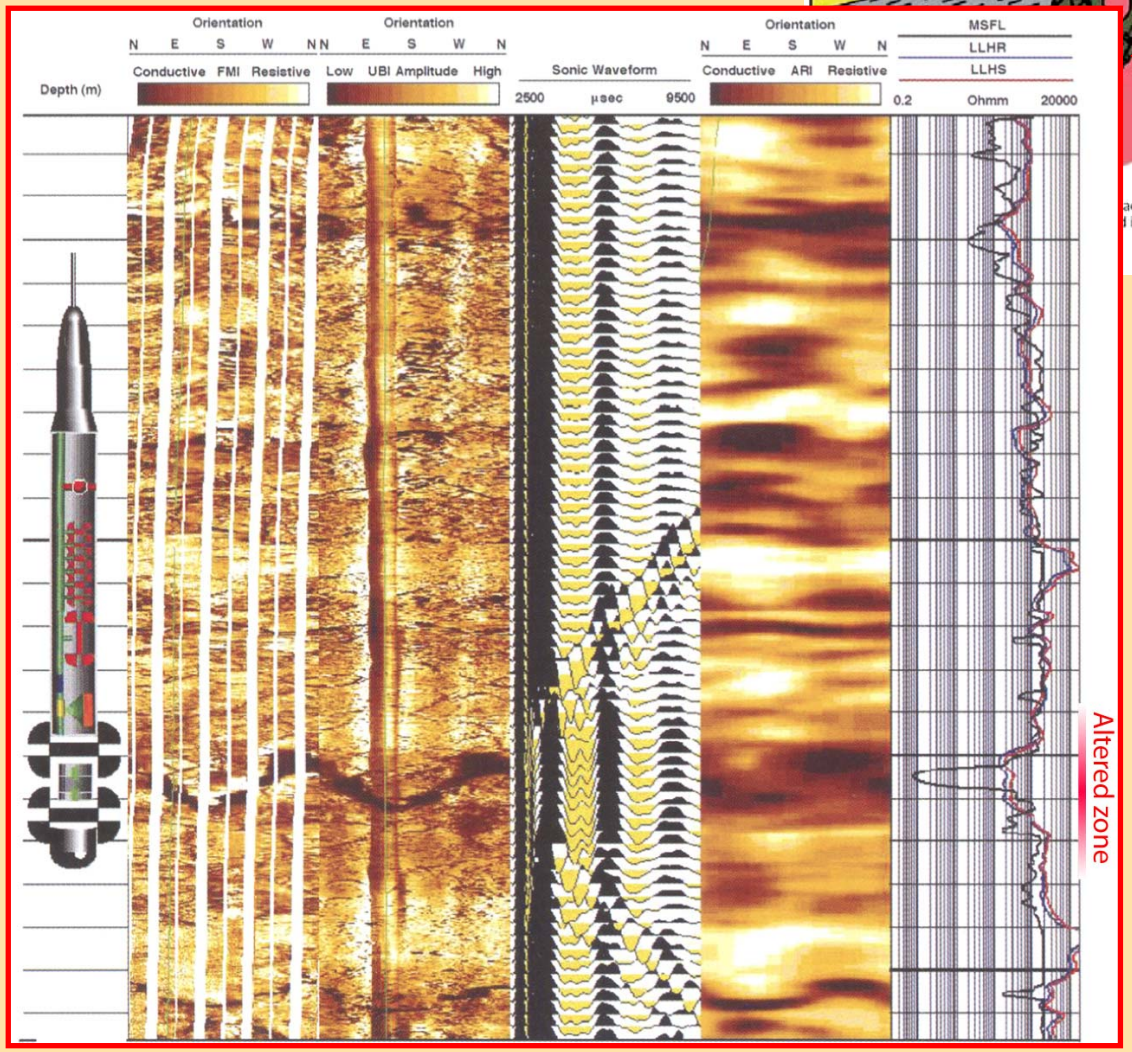
La circulation est localisée principalement dans des structures majeures

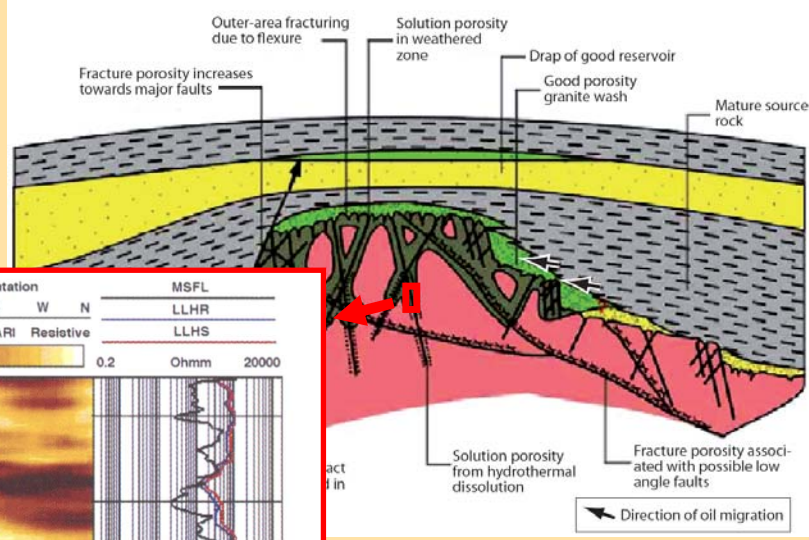
Quelle est la géométrie du réseau structural ?

Méthodes de caractérisation

Carottes

Mesures en puits



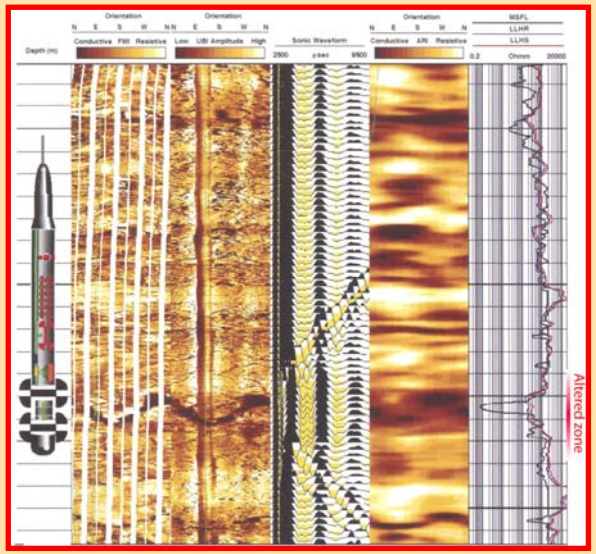


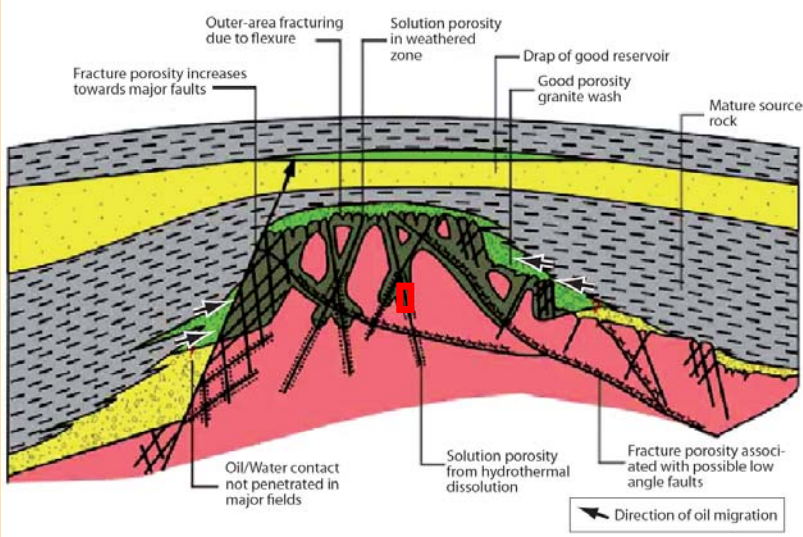
Luthi (2005)

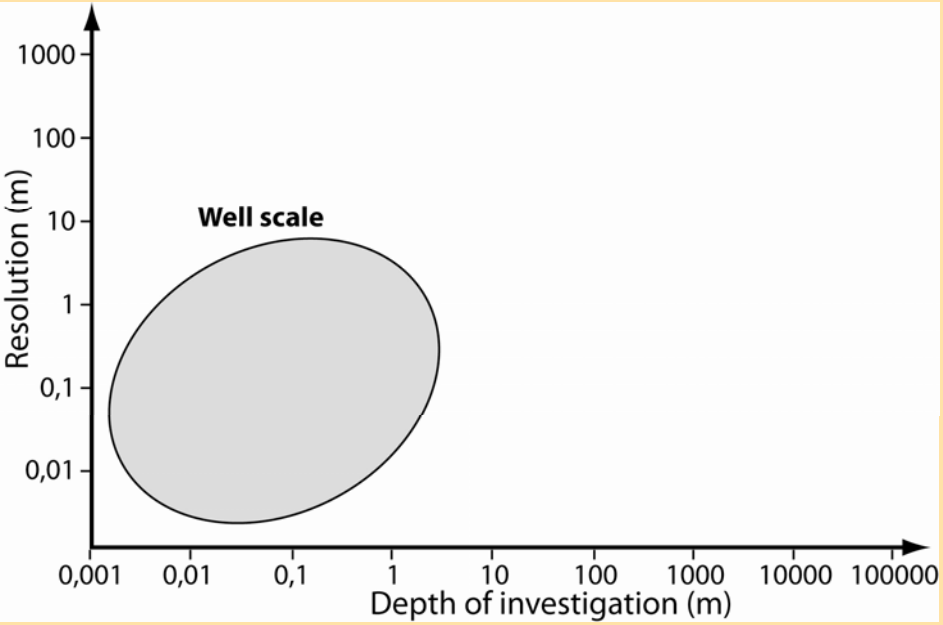
Méthodes de caractérisation

Carottes

Mesures en puits





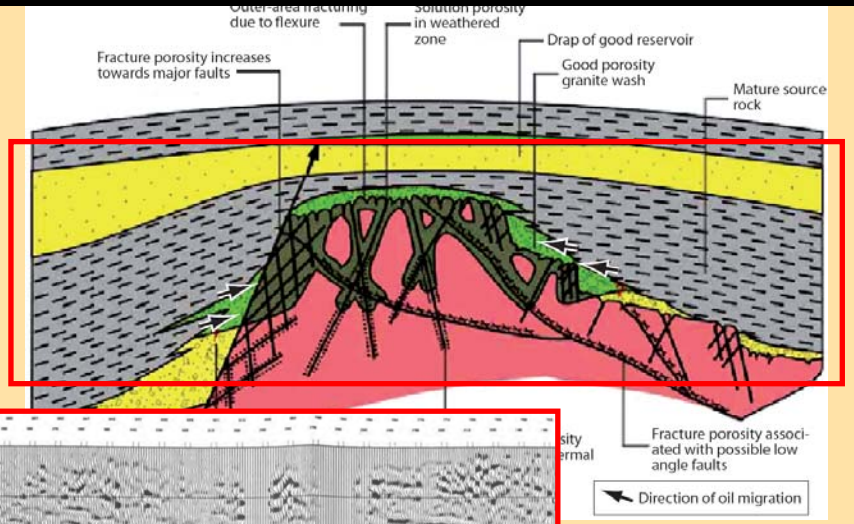


Modifié d'après Al Ali et al. (2009)

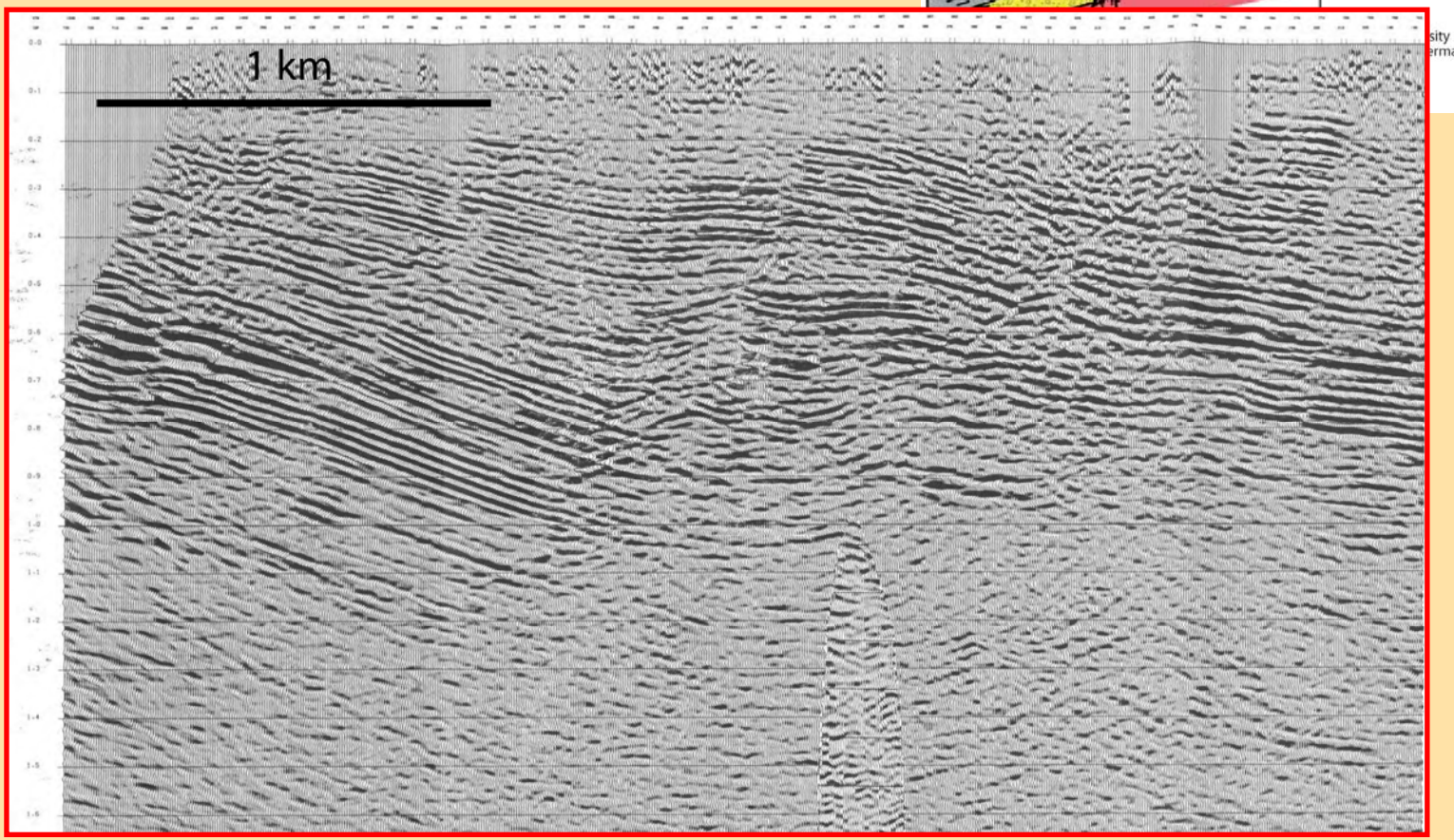
⊕ Résolution

⊖ Volume

Méthodes de caractérisation

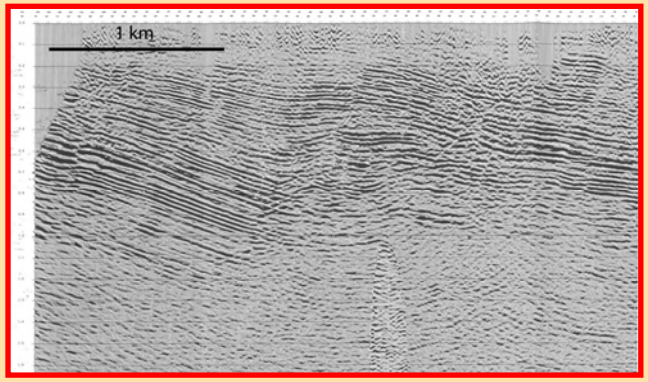


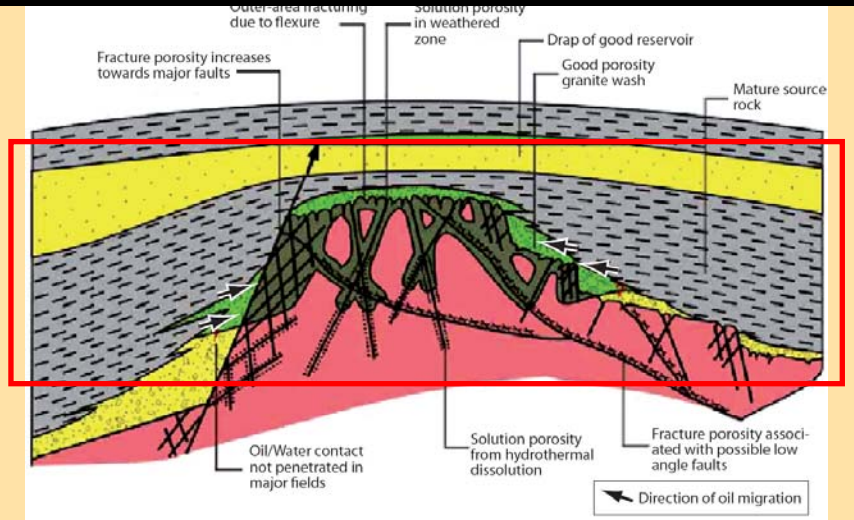
Sismique réflexion

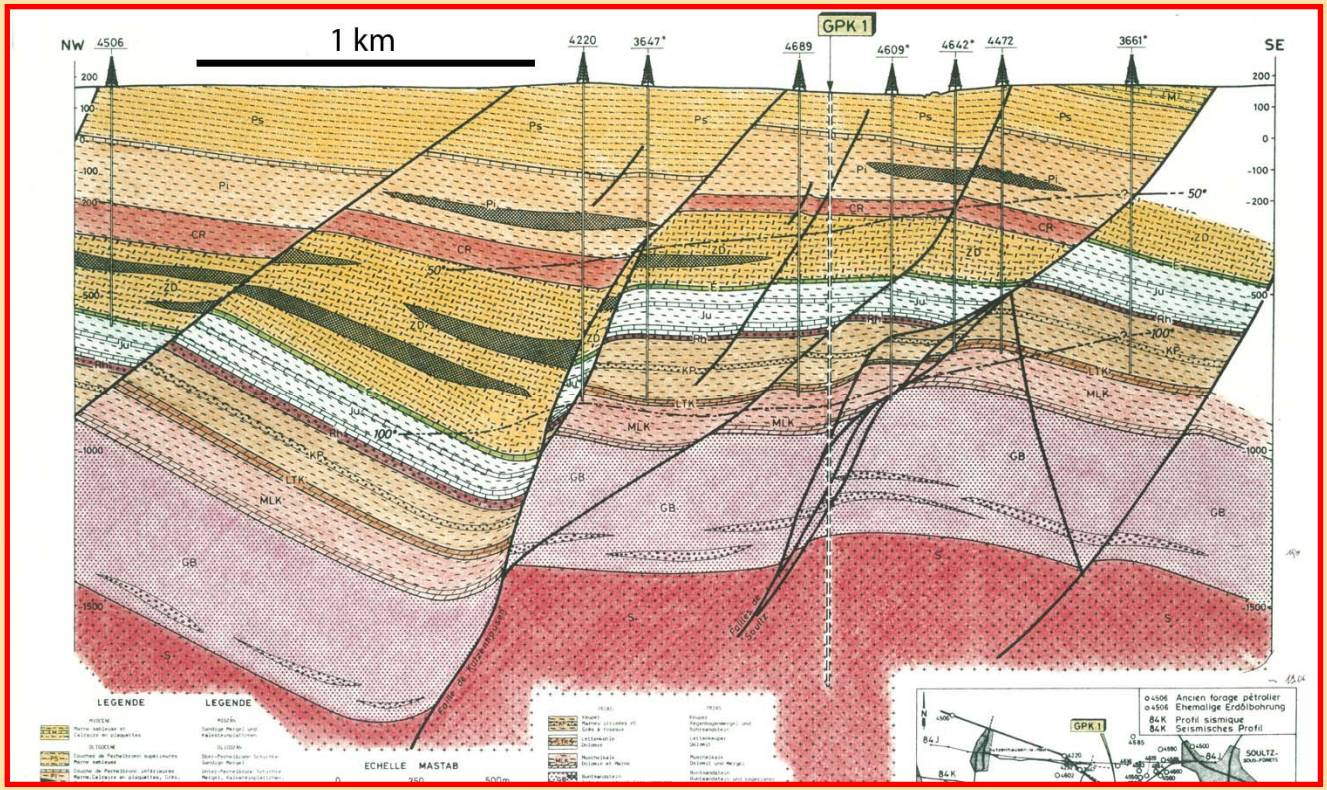


Cautru (1989)

Méthodes de caractérisation

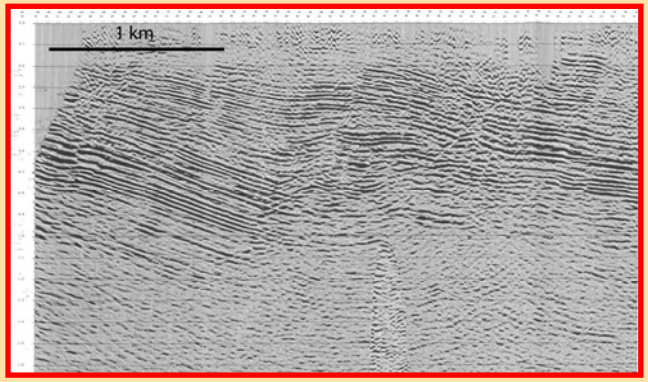


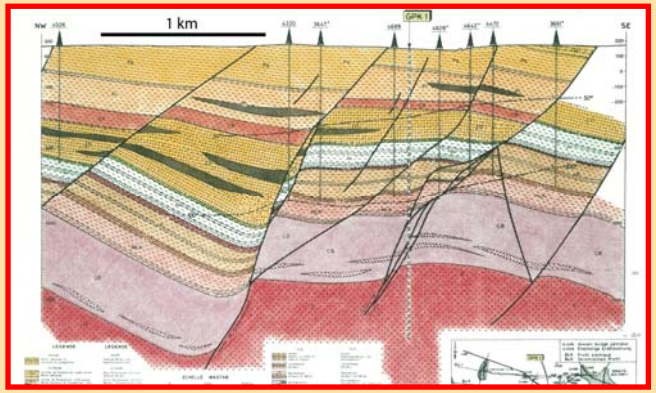




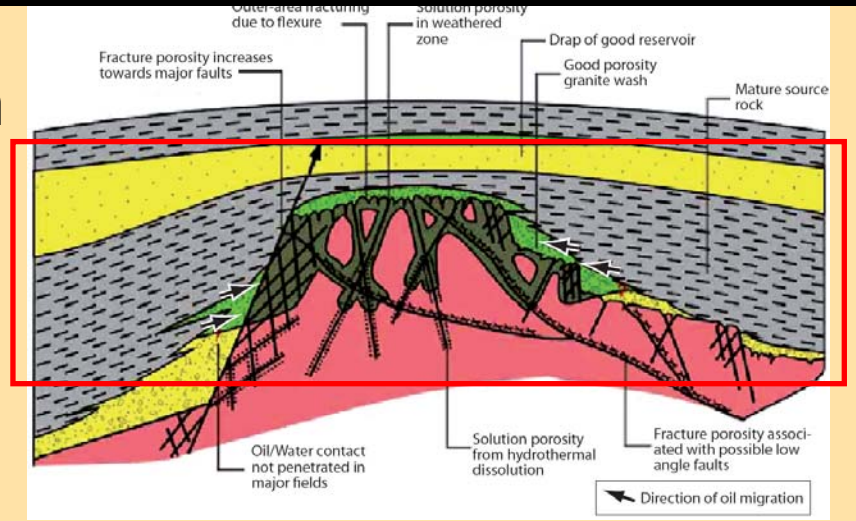
Cautru (1989)

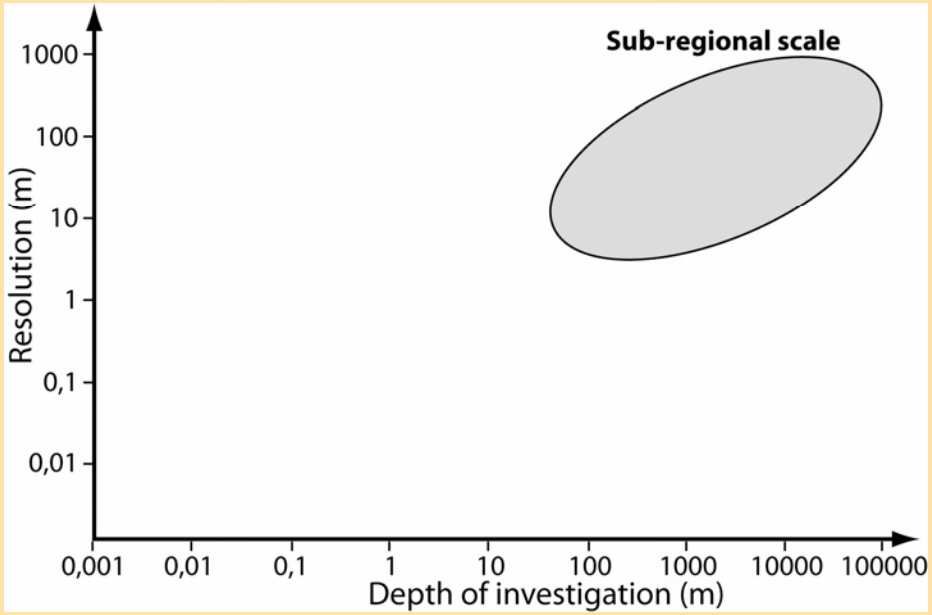
Méthodes de caractérisation



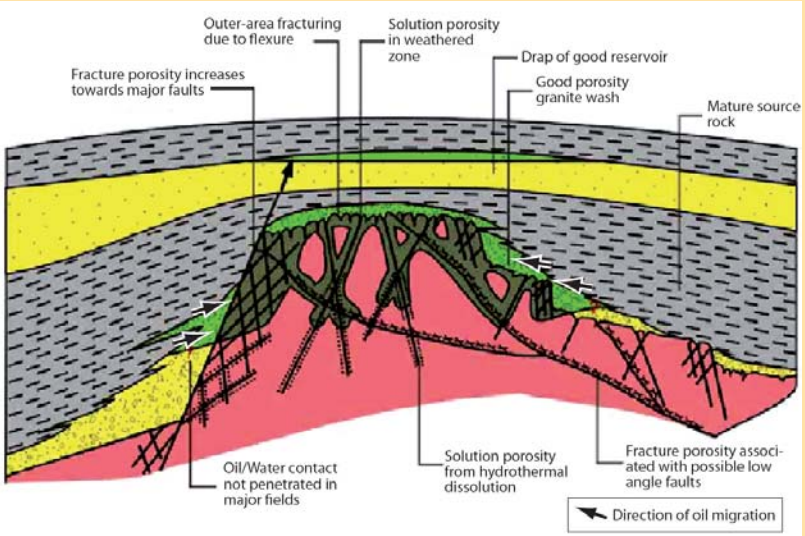


Cautru (1989)



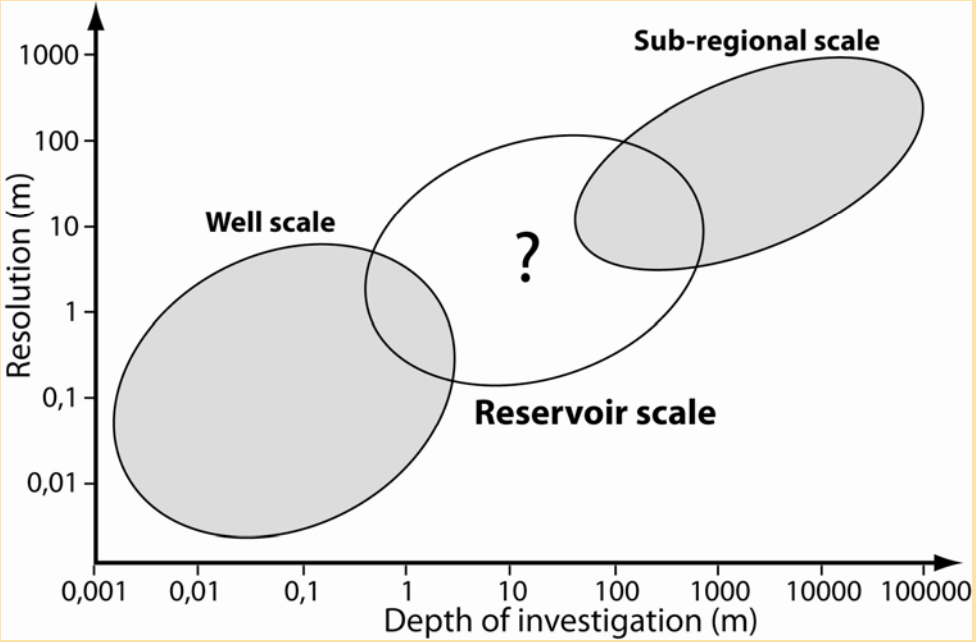


- ⊕ Volume
- ⊖ Résolution
- ⊖ Structures de fort pendage mal détectées

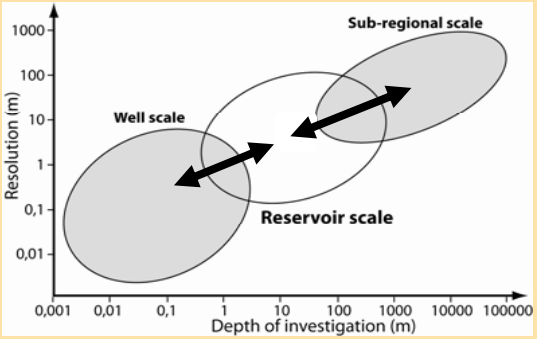


Comment caractériser le réseau structural qui contrôle la circulation de fluides notamment à l'échelle du réservoir ?

Exploitation et développement de méthodes caractérisant cette échelle

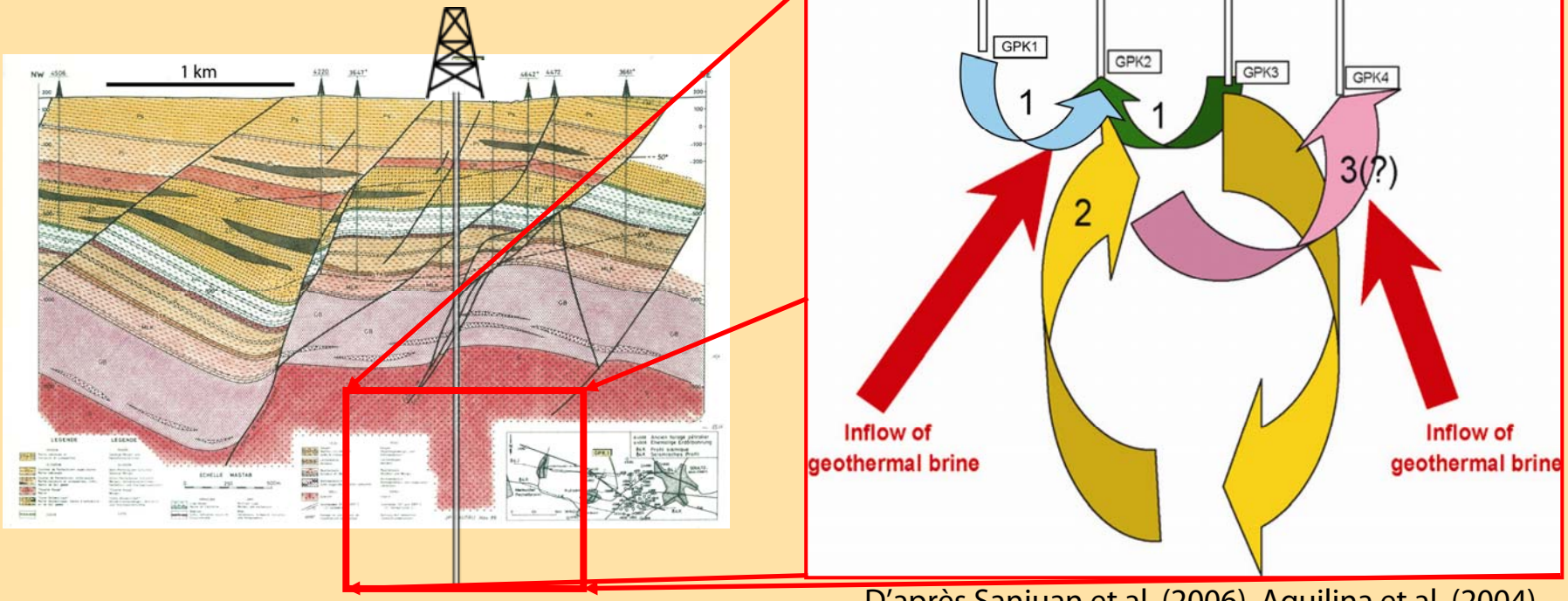


Les cas d'études



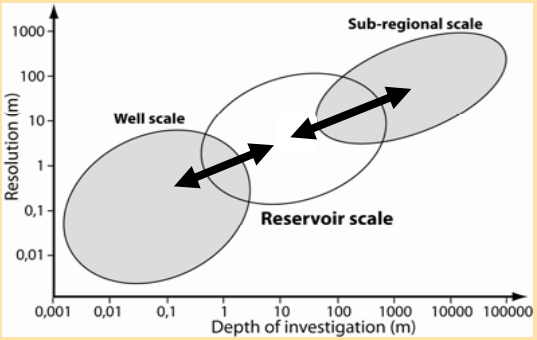
Un réservoir profond en exploitation :

Soultz-sous-Forêts



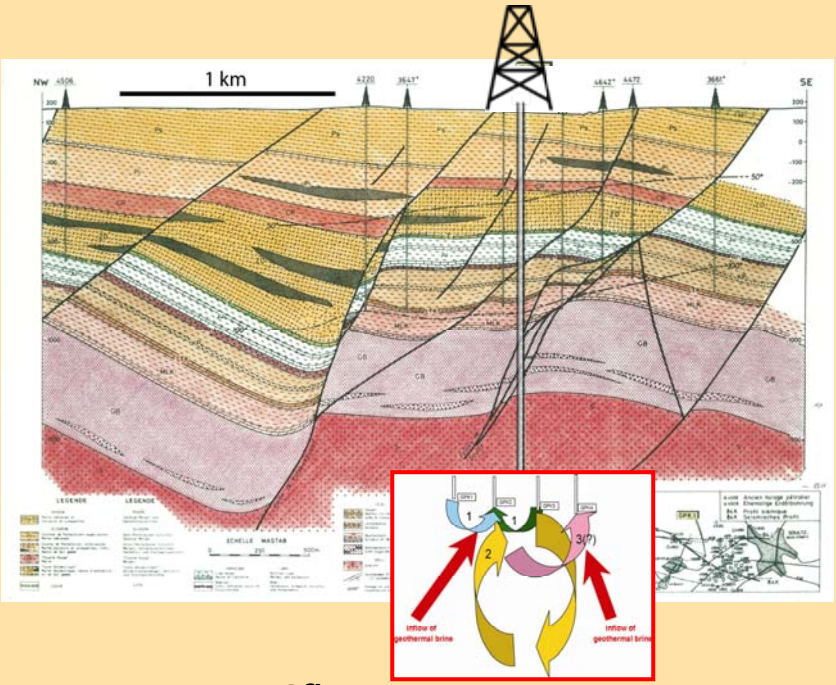
D'après Sanjuan et al. (2006), Aquilina et al. (2004)

Les cas d'études



Un réservoir profond en exploitation :

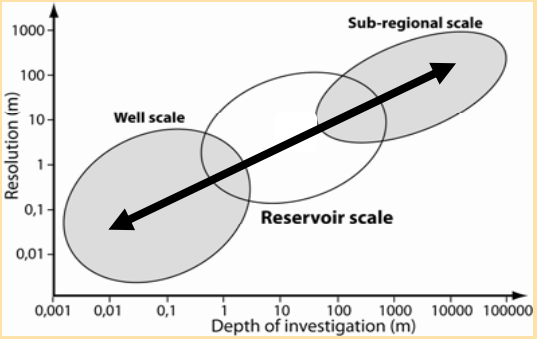
Soultz-sous-Forêts



Sismique réflexion

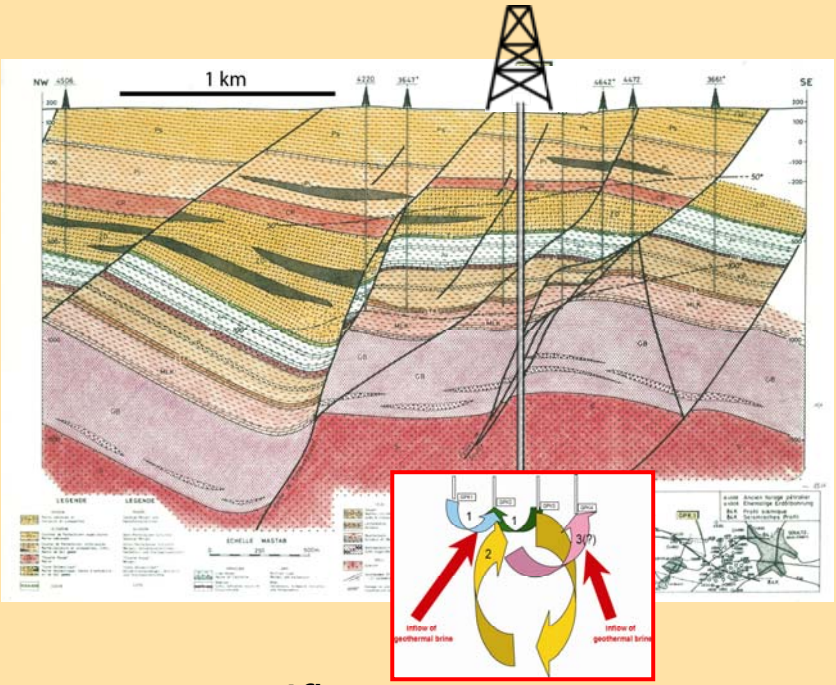
Sismique de puits, statistiques

Les cas d'études



Un réservoir profond en exploitation :

Soultz-sous-Forêts

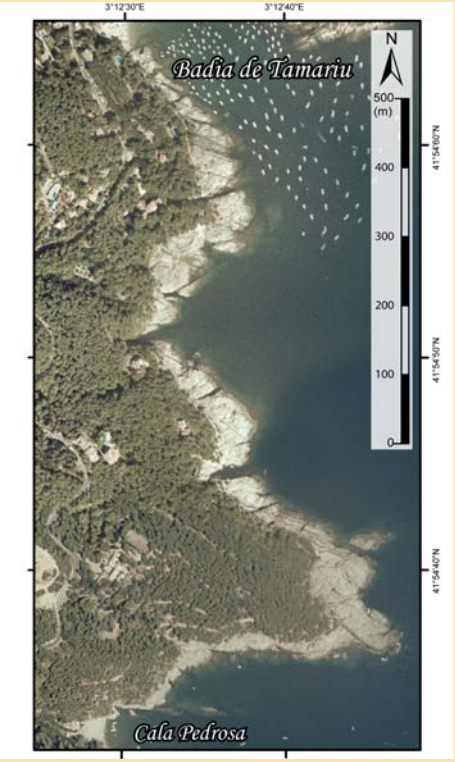


Sismique réflexion

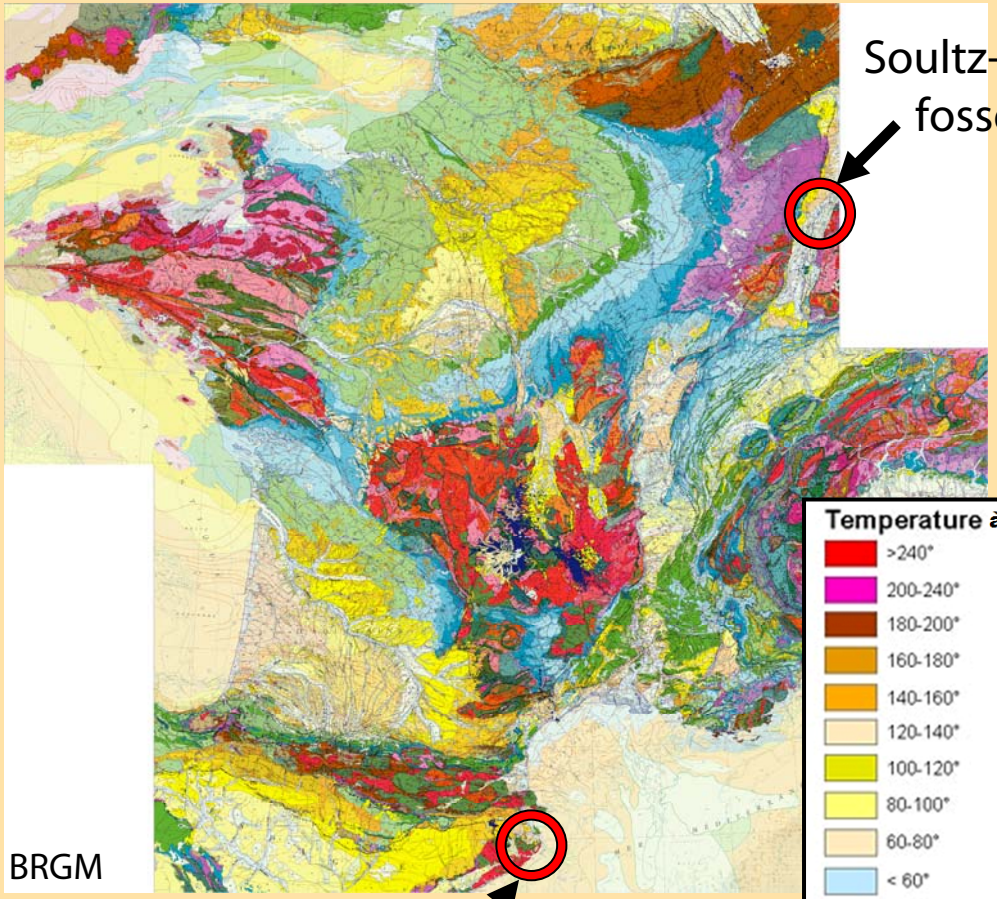
Sismique de puits, statistiques

Un analogue affleurant :

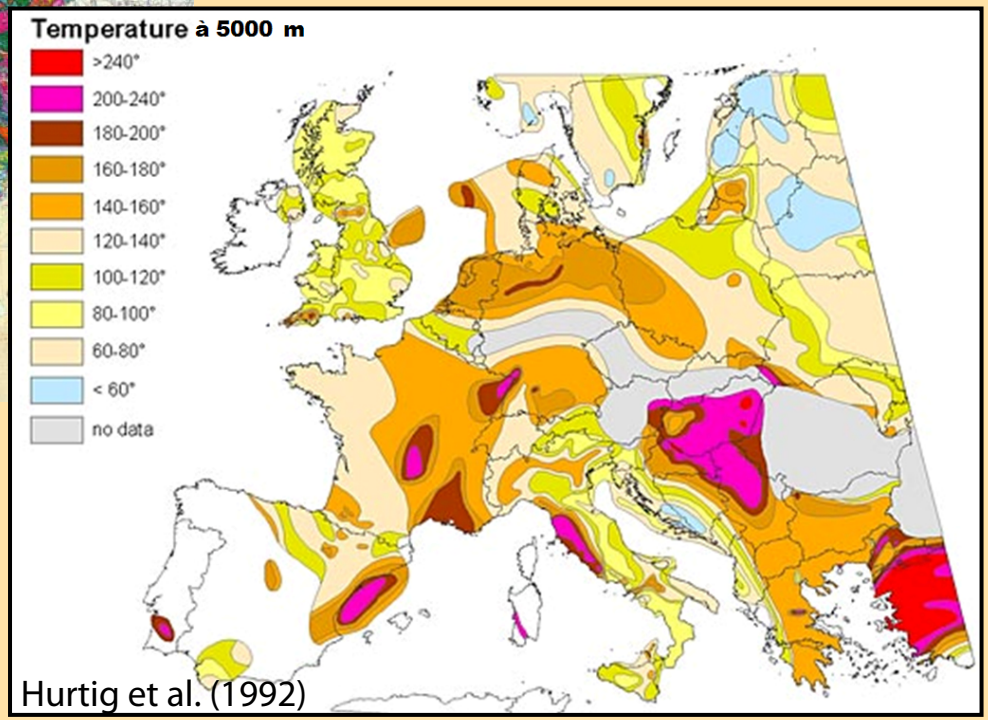
Tamariu



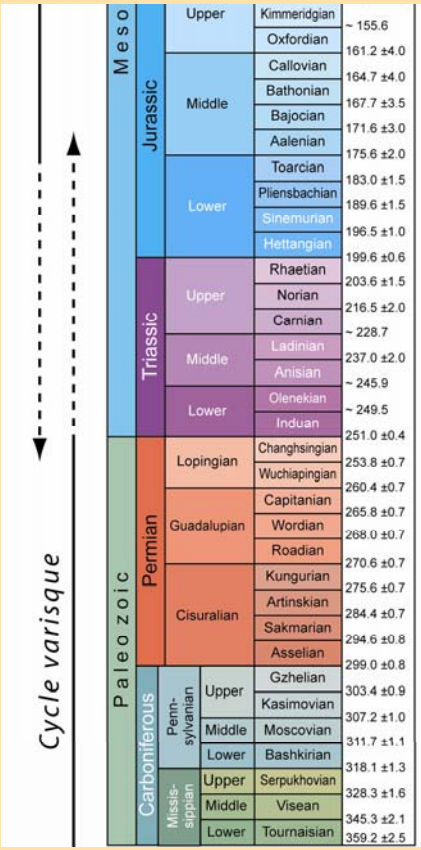
Statistiques



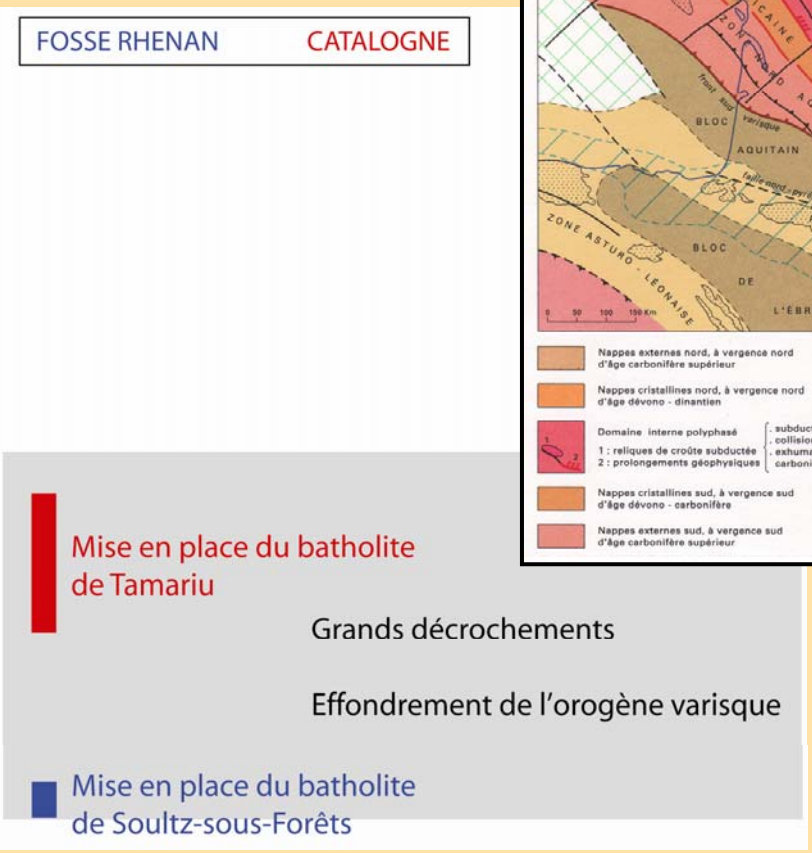
Anomalies thermiques localisées dans les fossés tertiaires

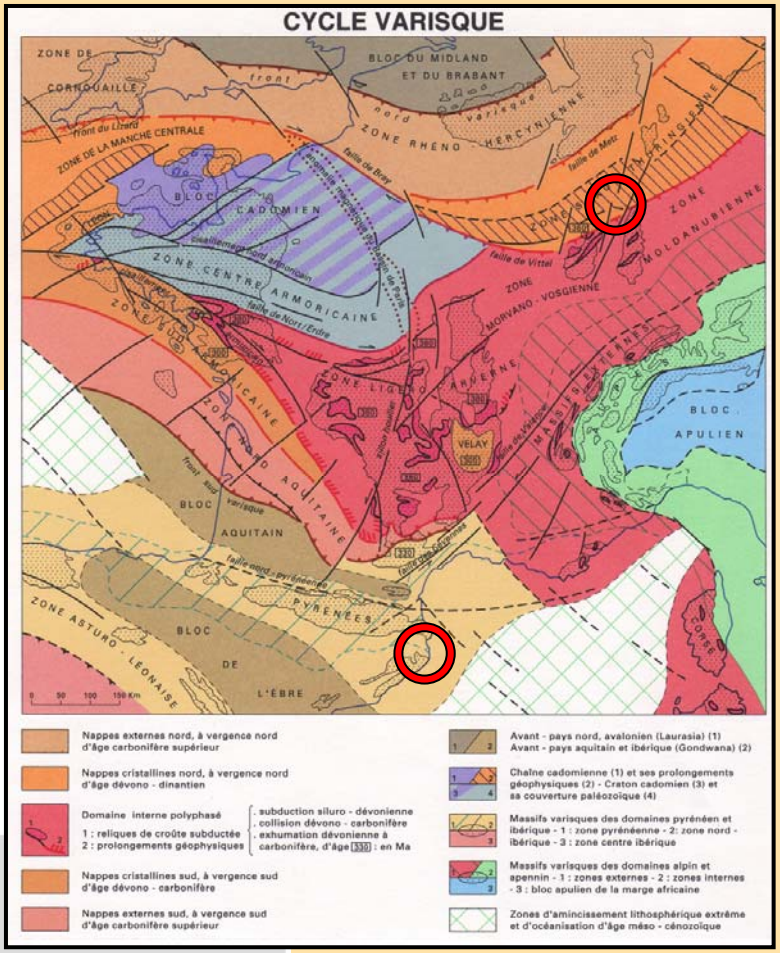


INTRODUCTION – **Cadre géologique**

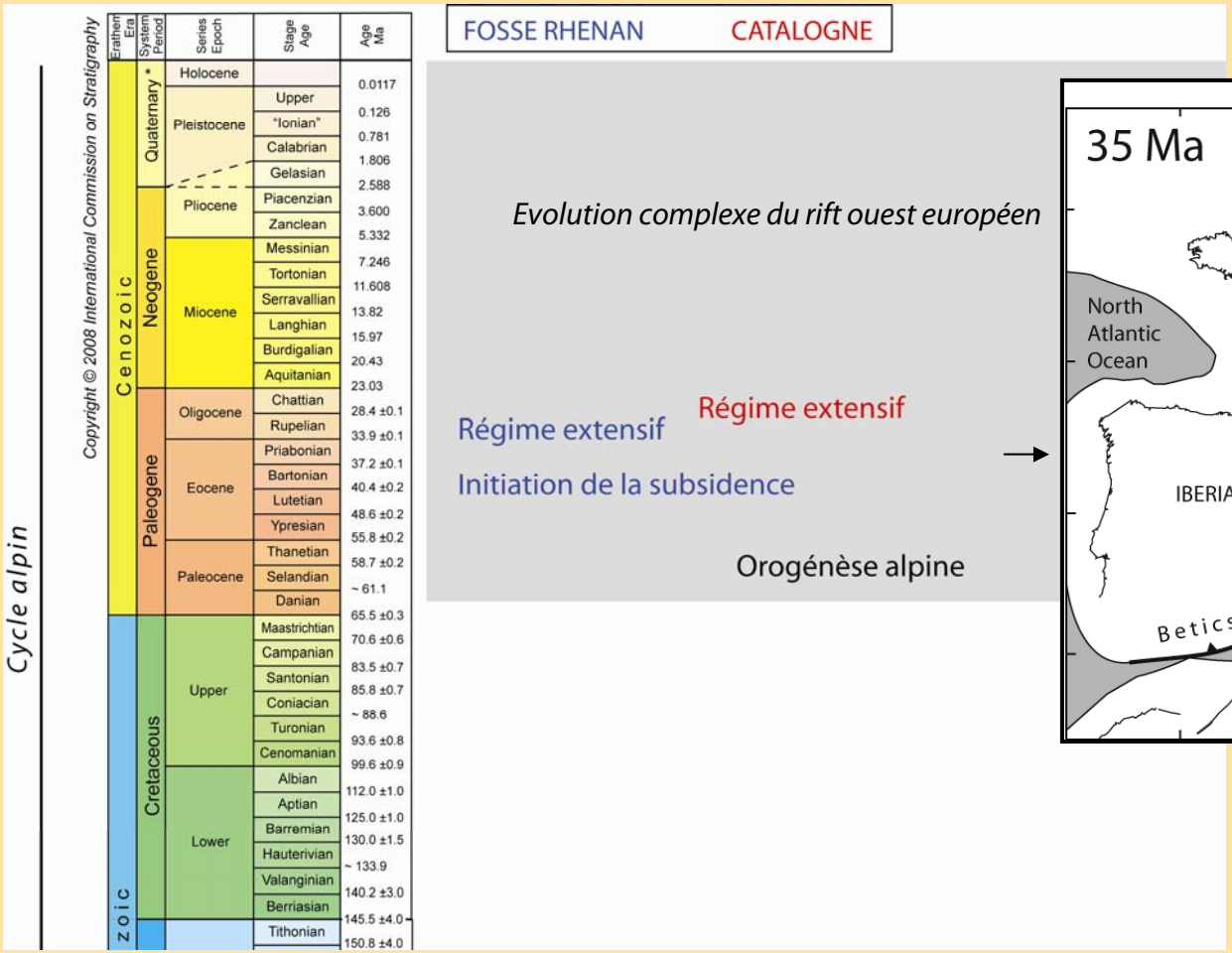


ICS





BRGM



Bourgeois et al. (2007)

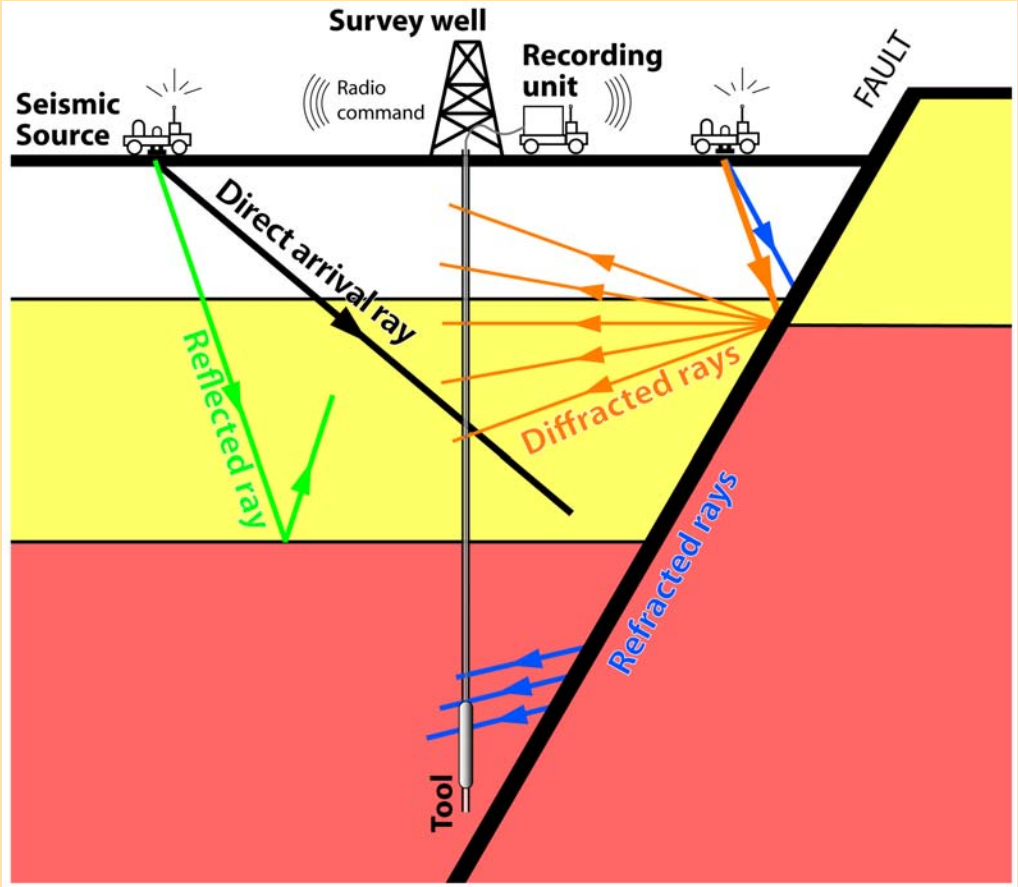
ICS

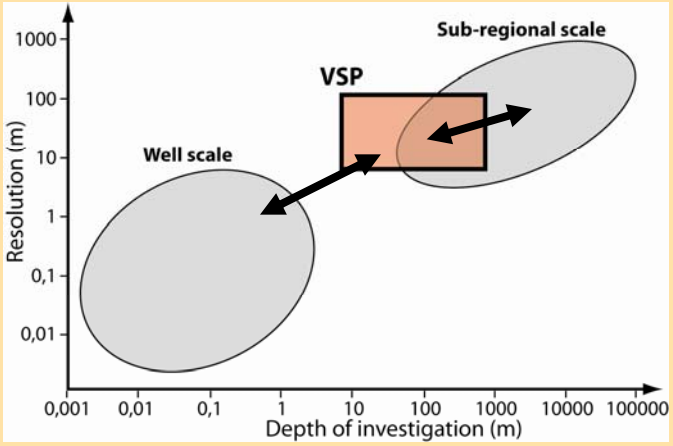
Batholites varisques
affectés par le développement du rift ouest européen } **Batholites analogues**

Etude d'un réservoir en fonctionnement

L'exemple de
Soultz-sous-Forêts

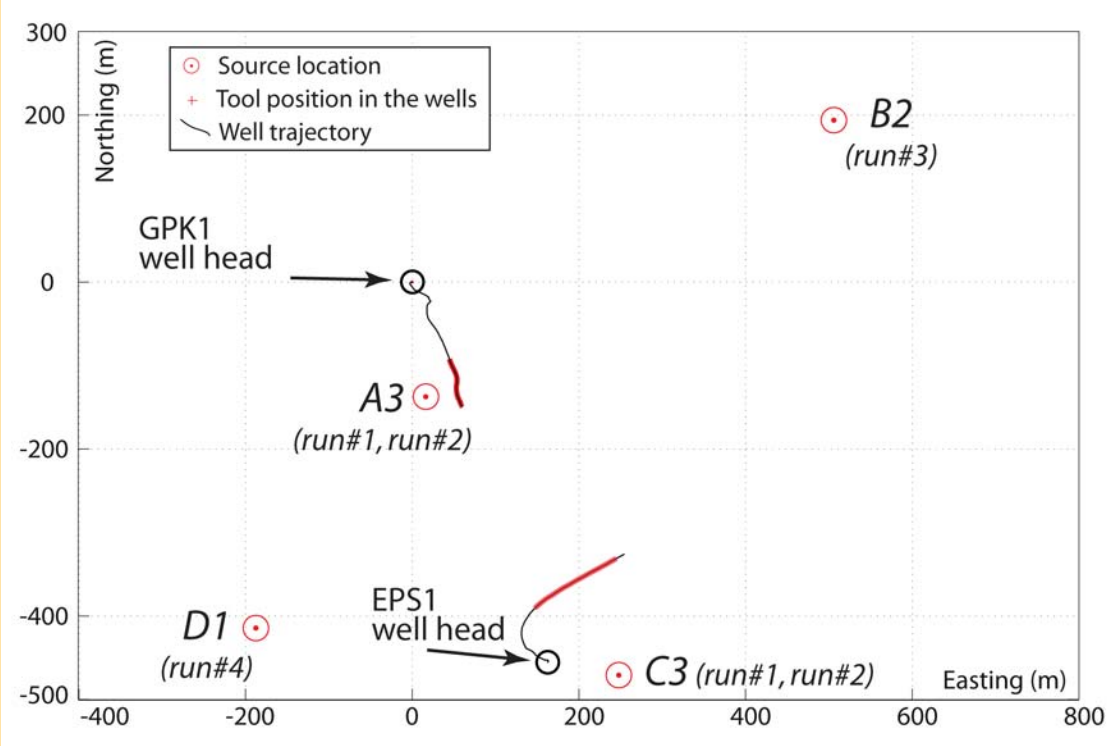
Vertical Seismic Profiling





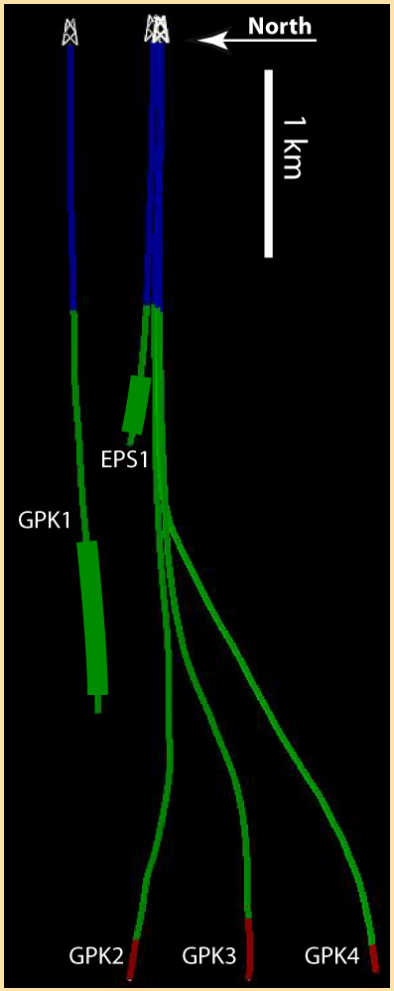
- Echelle d'investigation
- Proximité des structures => imagerie directe

Données disponibles



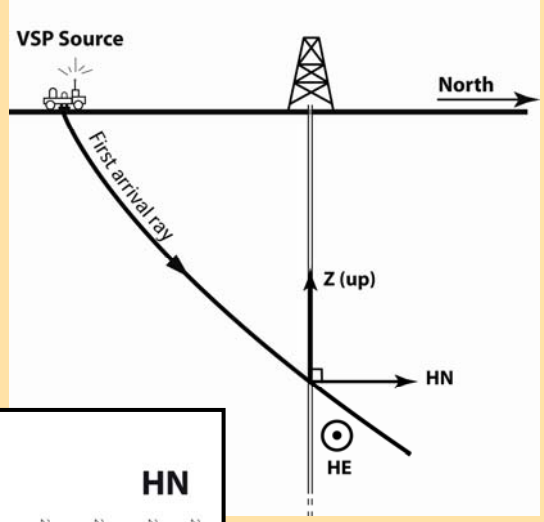
Acquisition en 1993

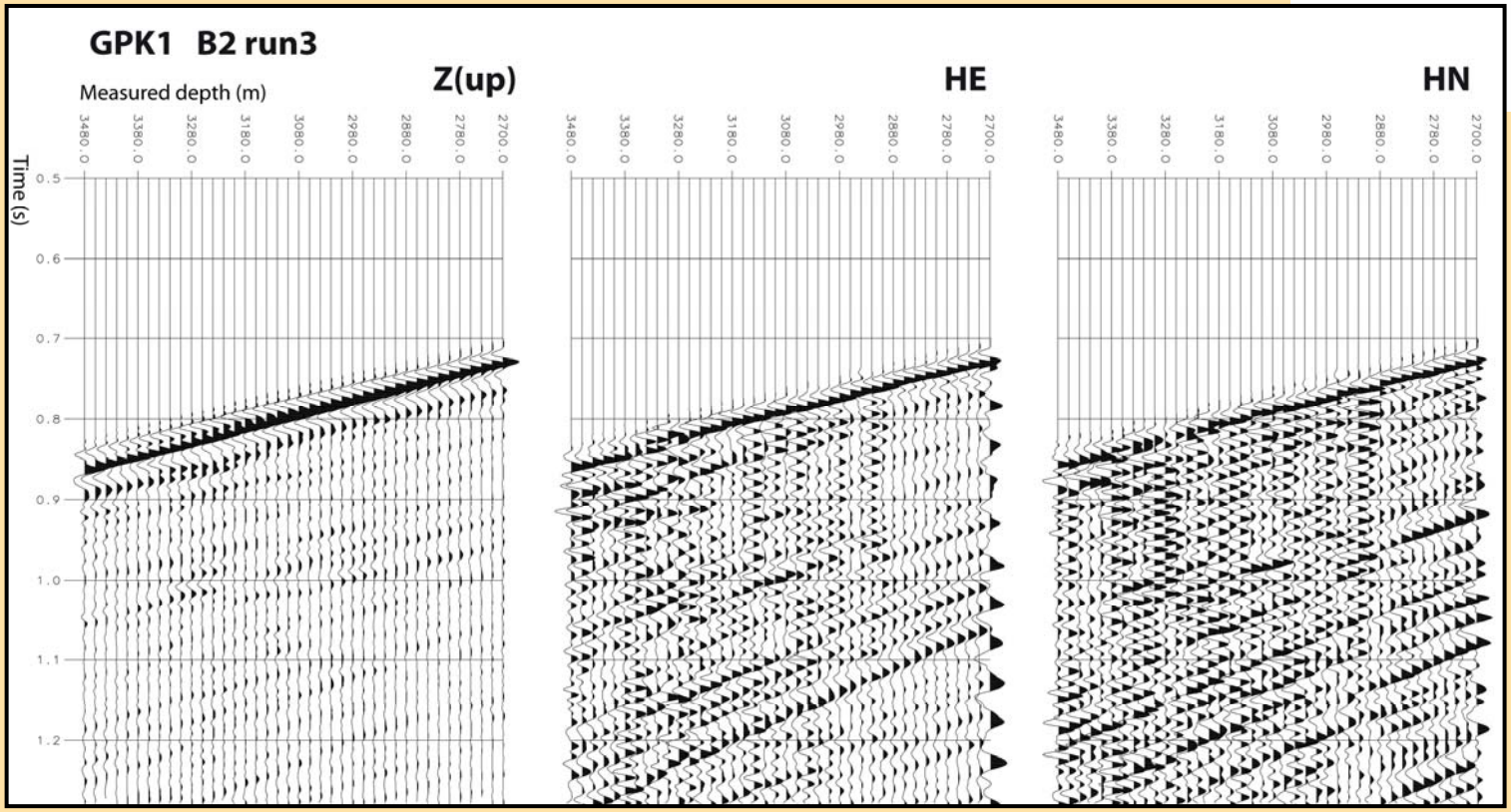
- 2 puits (GPK1, EPS1)
- 4 sources d'ondes P



Données disponibles

Enregistrements suivant 3 composantes, ré-orientées par prétraitement





Traitement des données

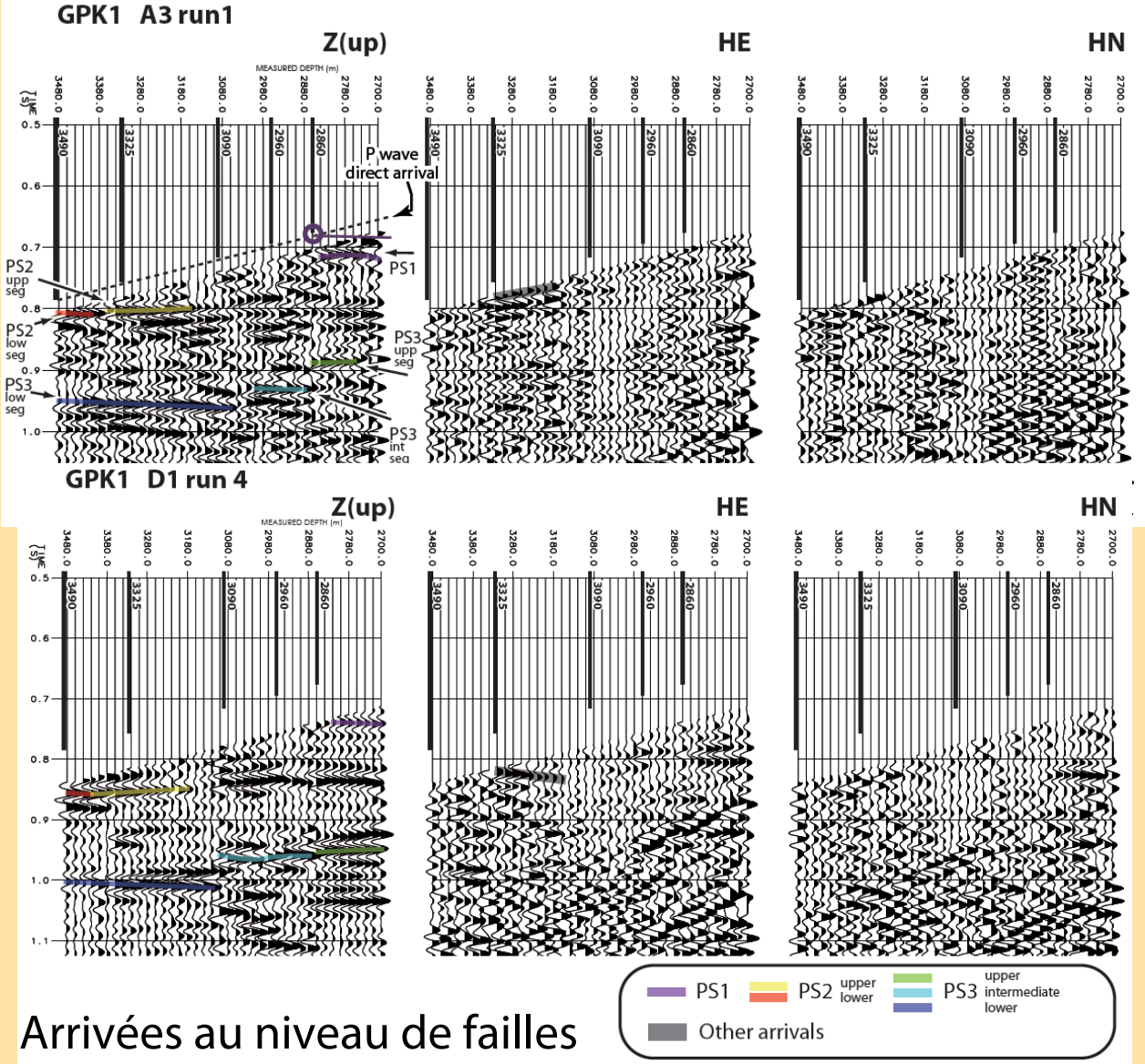
Application par VSfusion

Traitement isotrope

1. Séparation des champs d'ondes montant et descendant

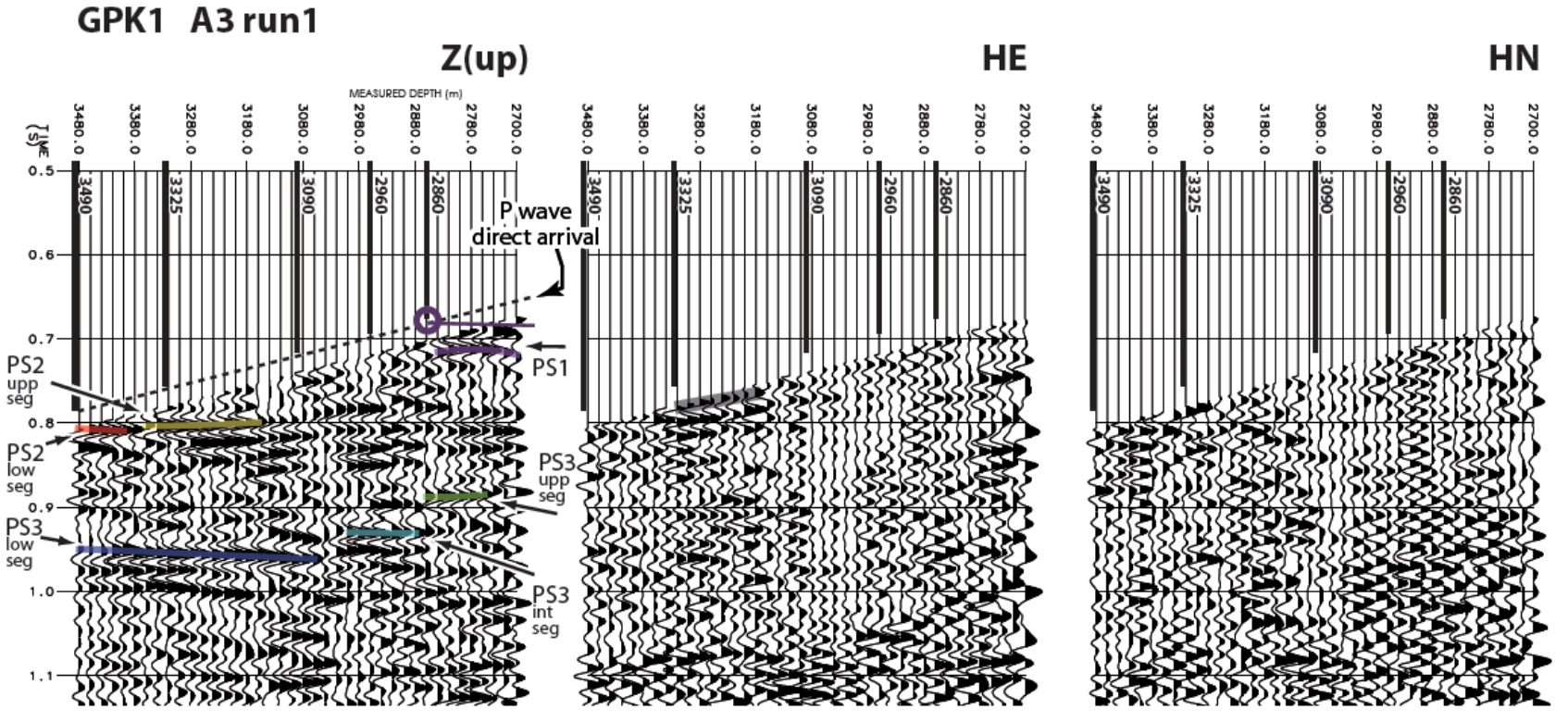
2. Déconvolution du champ d'ondes montant par l'arrivée P directe

Traitement des données



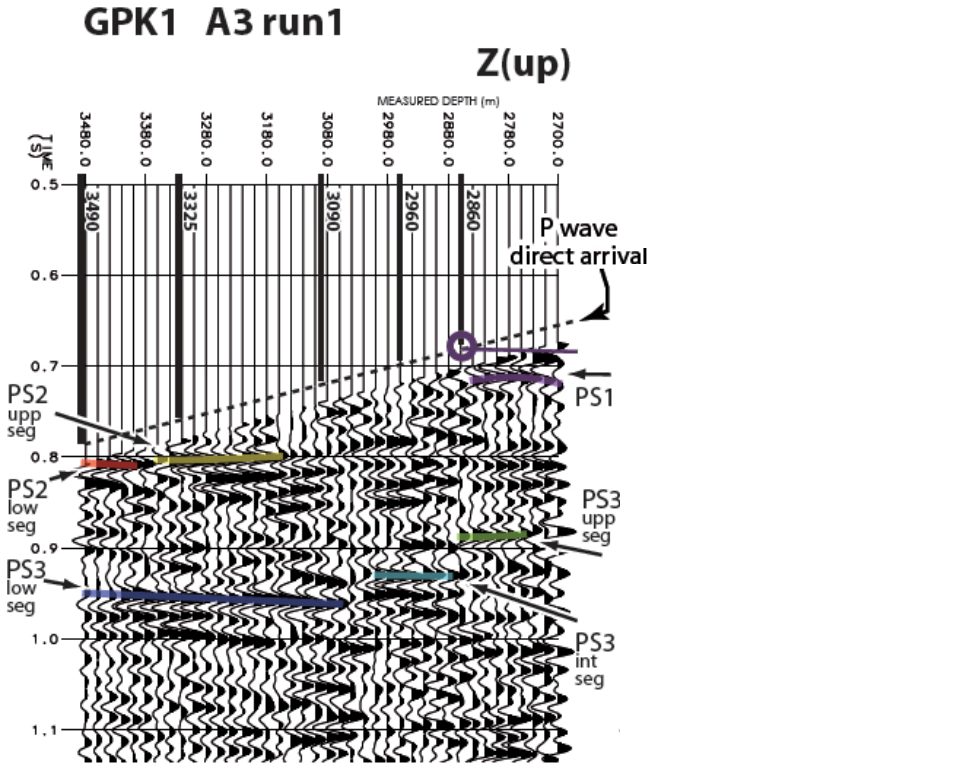
Arrivées au niveau de failles

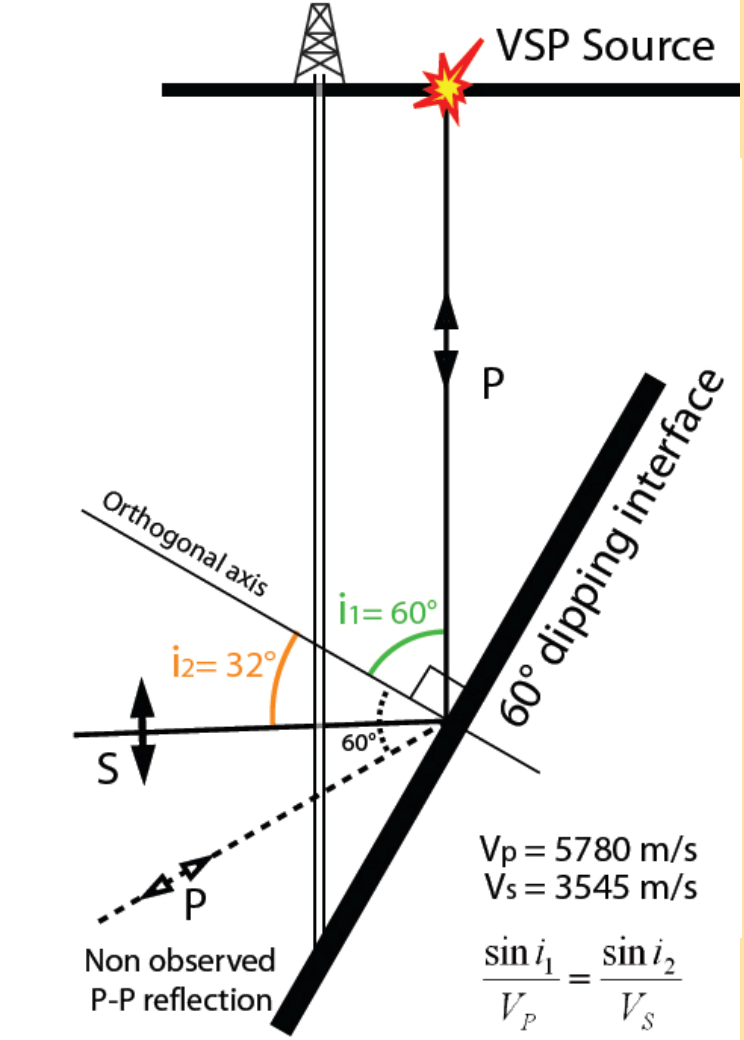
Interprétation



Polarisation verticale

Interprétation

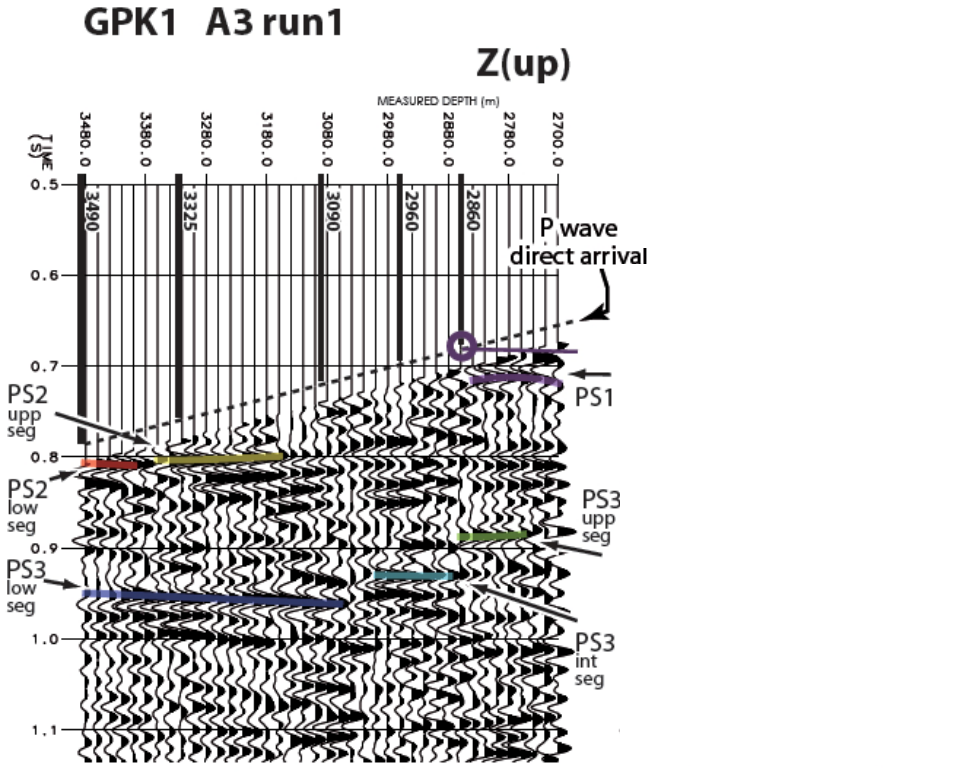


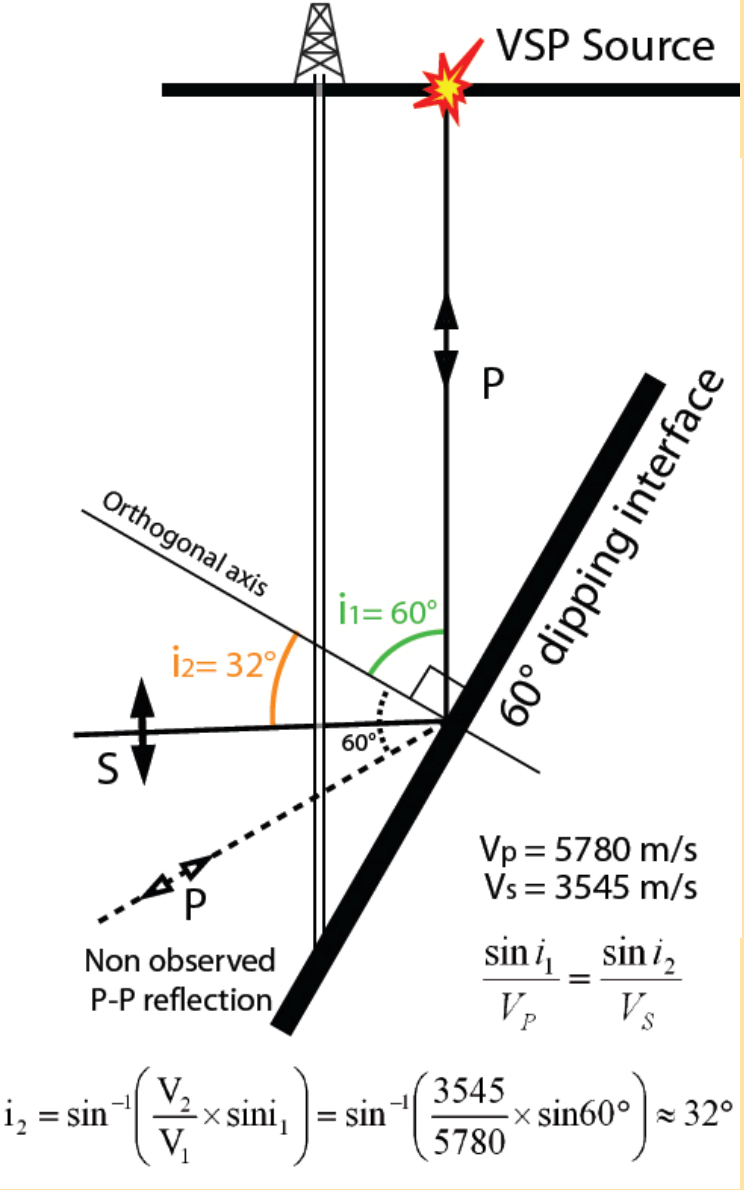


$$\frac{\sin i_1}{V_P} = \frac{\sin i_2}{V_S}$$

$$i_2 = \sin^{-1}\left(\frac{V_2}{V_1} \times \sin i_1\right) = \sin^{-1}\left(\frac{3545}{5780} \times \sin 60°\right) \approx 32°$$

Interprétation





Profil profondeur - **temps**

distance au puits

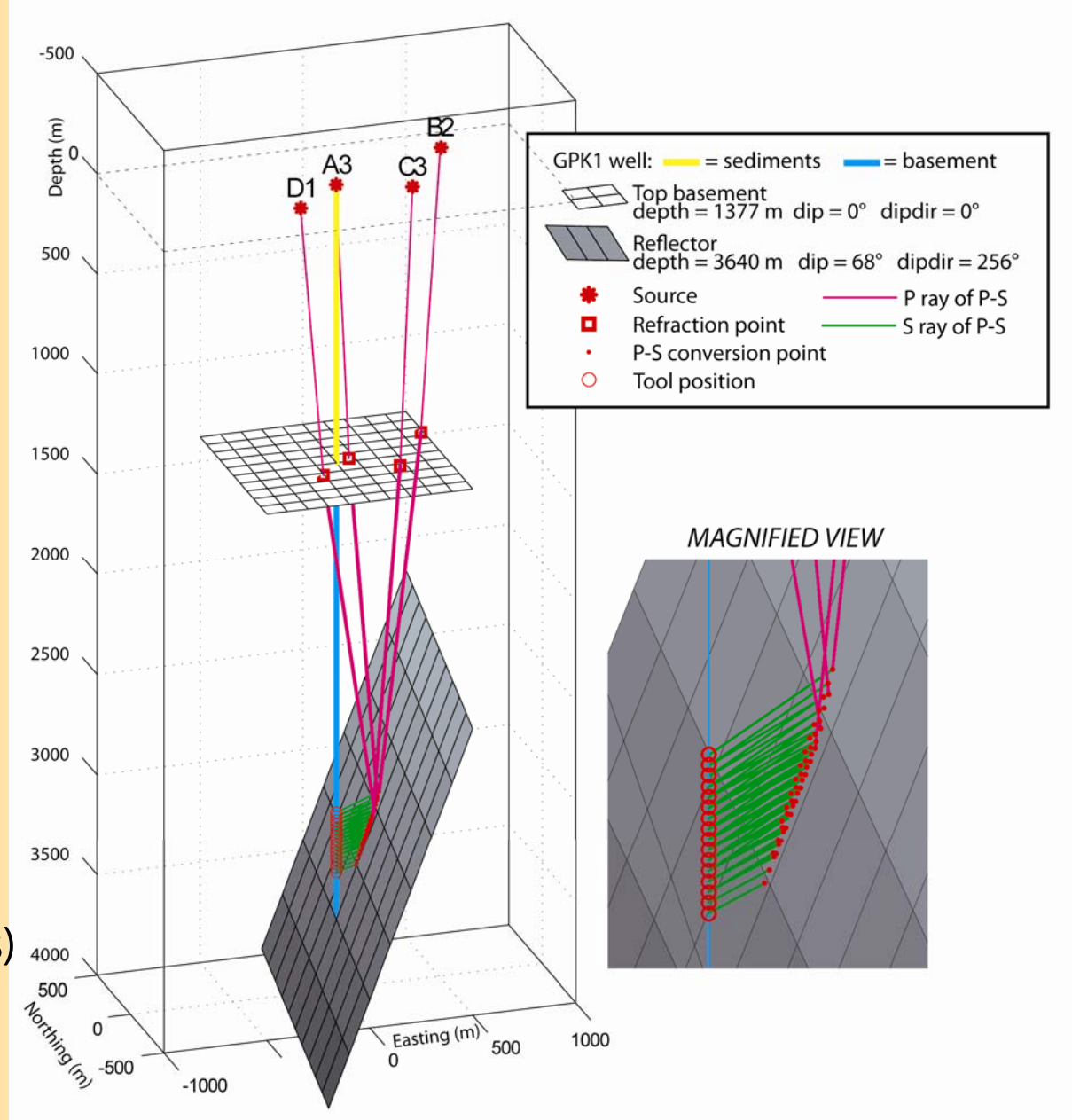
Cartographie 3D

- Modèle de vitesse
- Réflecteur plan
- 4 sources
- 2 puits

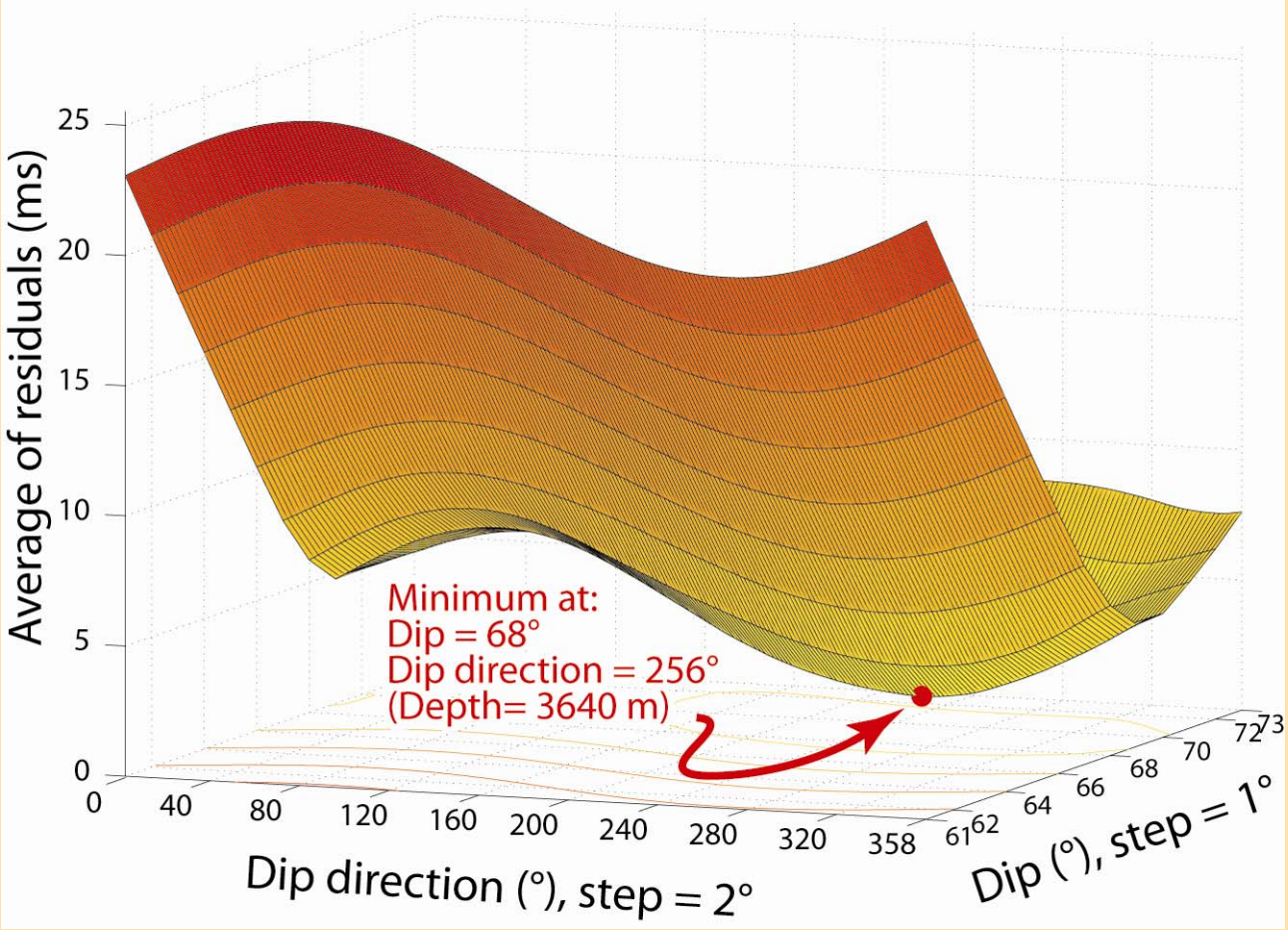
Calculs de temps de trajet :

Itérations dans un large domaine d'orientation pour le réflecteur fictif

Comparaison des temps calculés et observés (**résidus**)

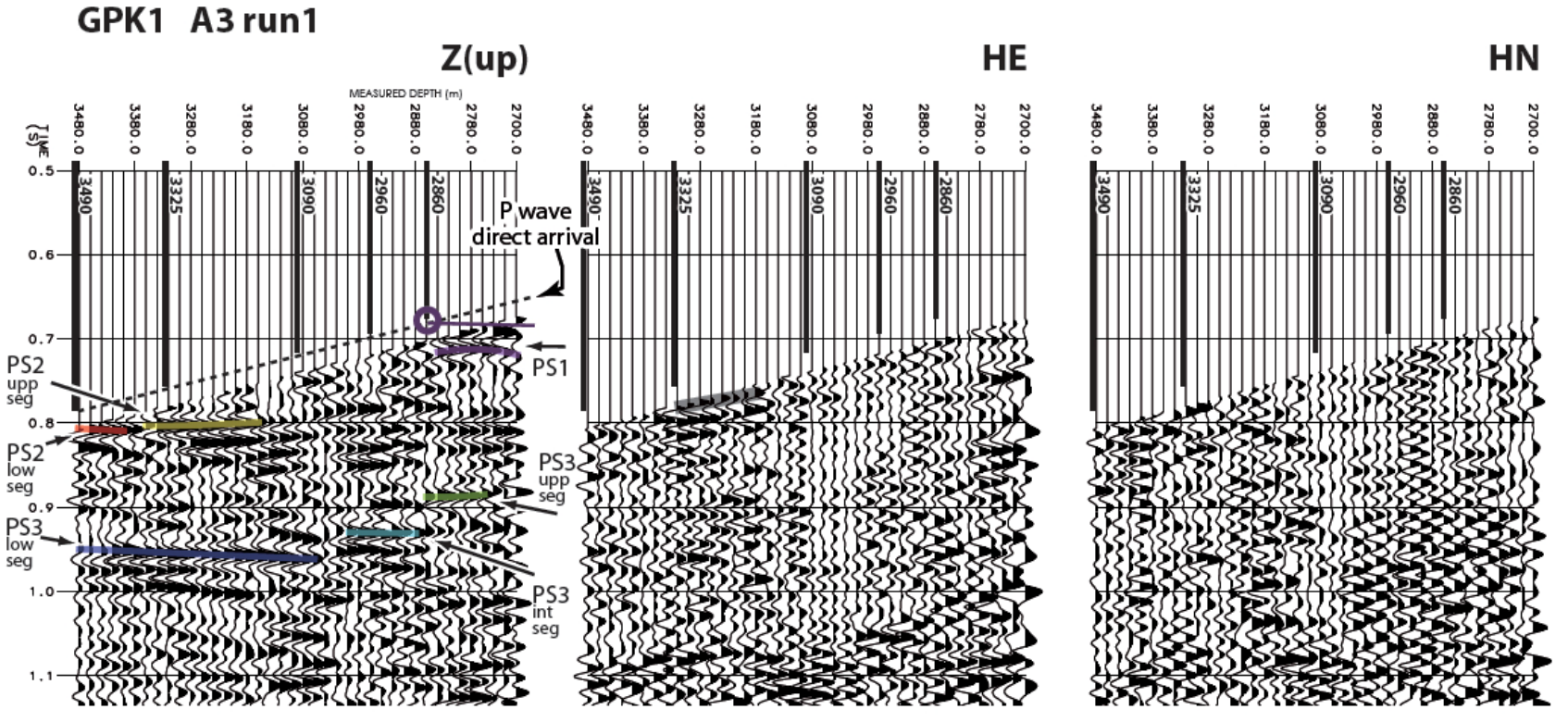


Cartographie 3D

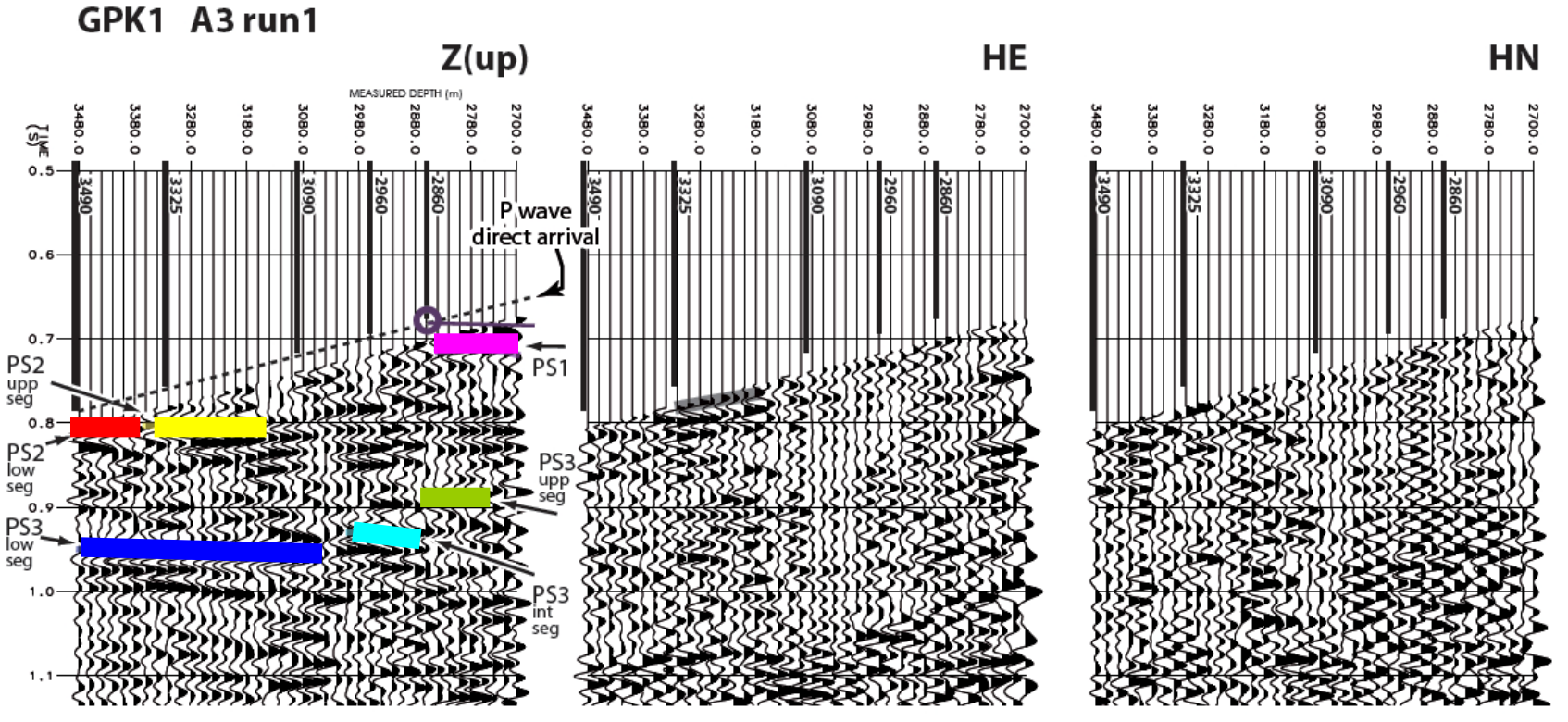


Le résidu minimal indique l'orientation la plus représentative dans le modèle de vitesse considéré.

Cartographie 3D



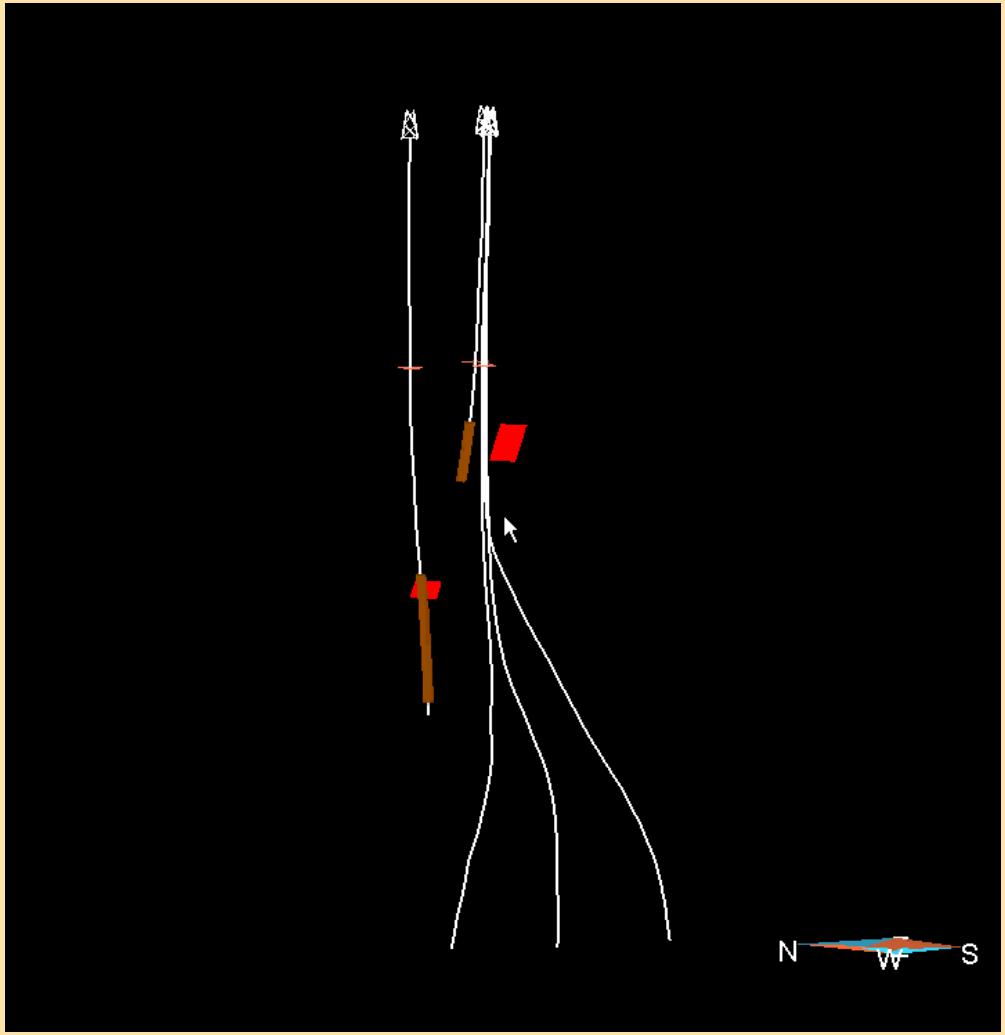
Cartographie 3D



Cartographie 3D

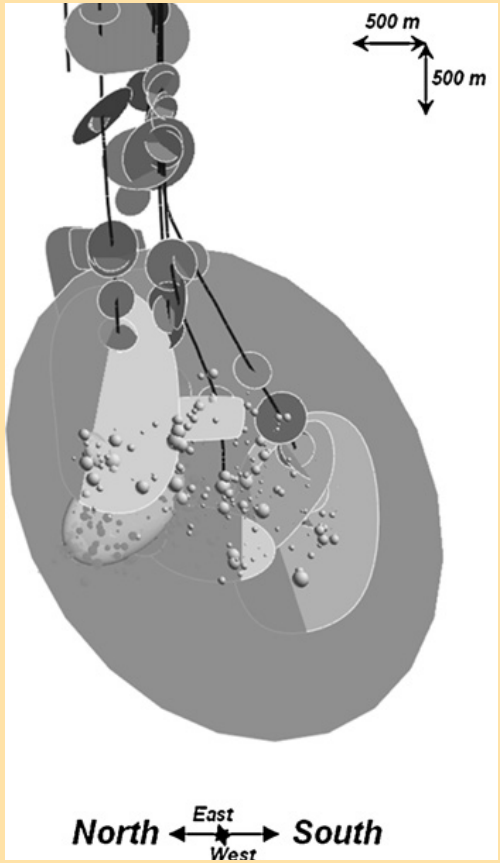
Représentation sous gOcad®

Structures reliées sur la base d'arguments structuraux et hydrauliques

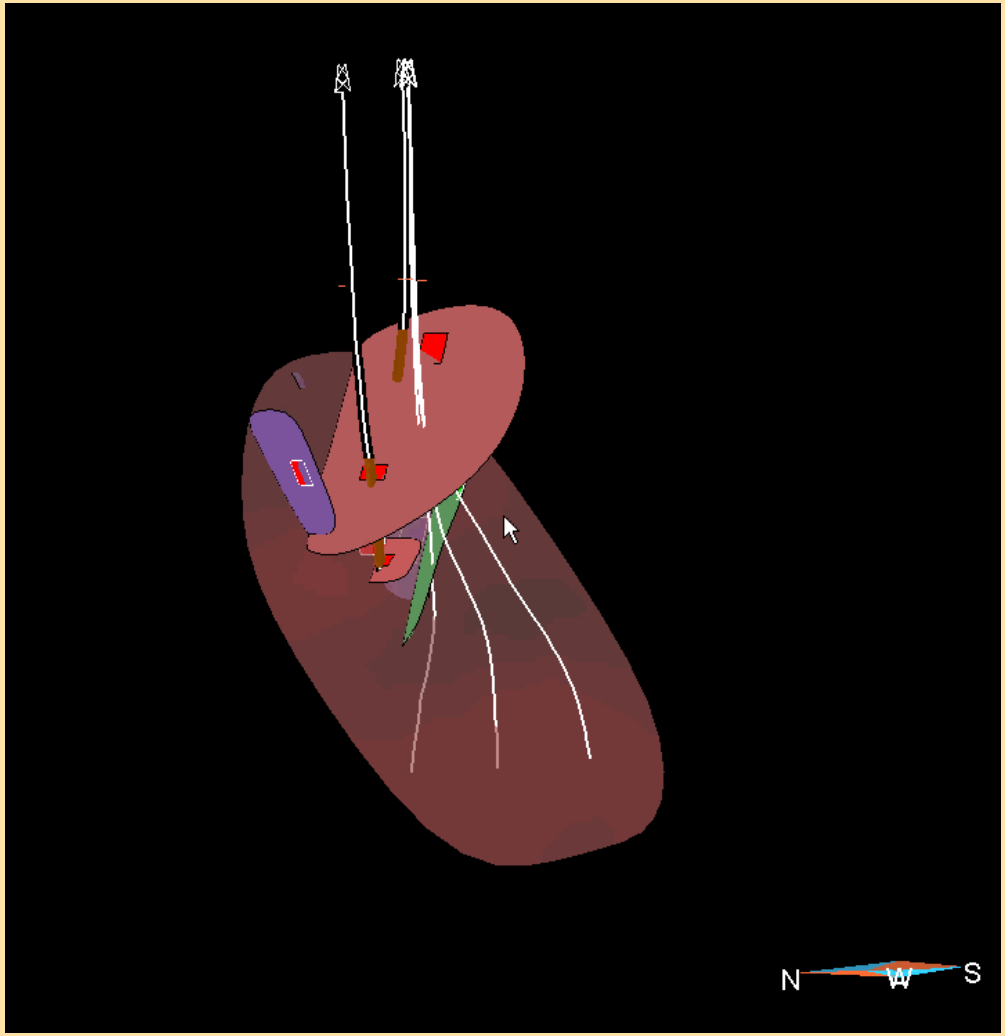


Cartographie 3D

Intégration des structures dans le modèle préexistant



Sausse et al. (2010)

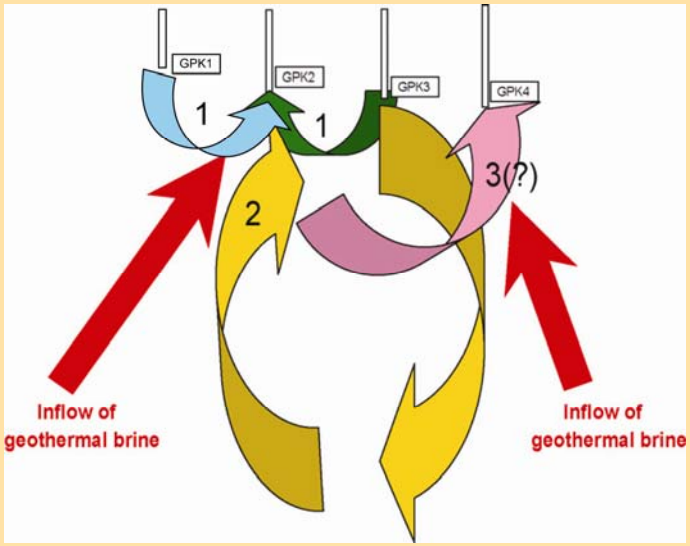


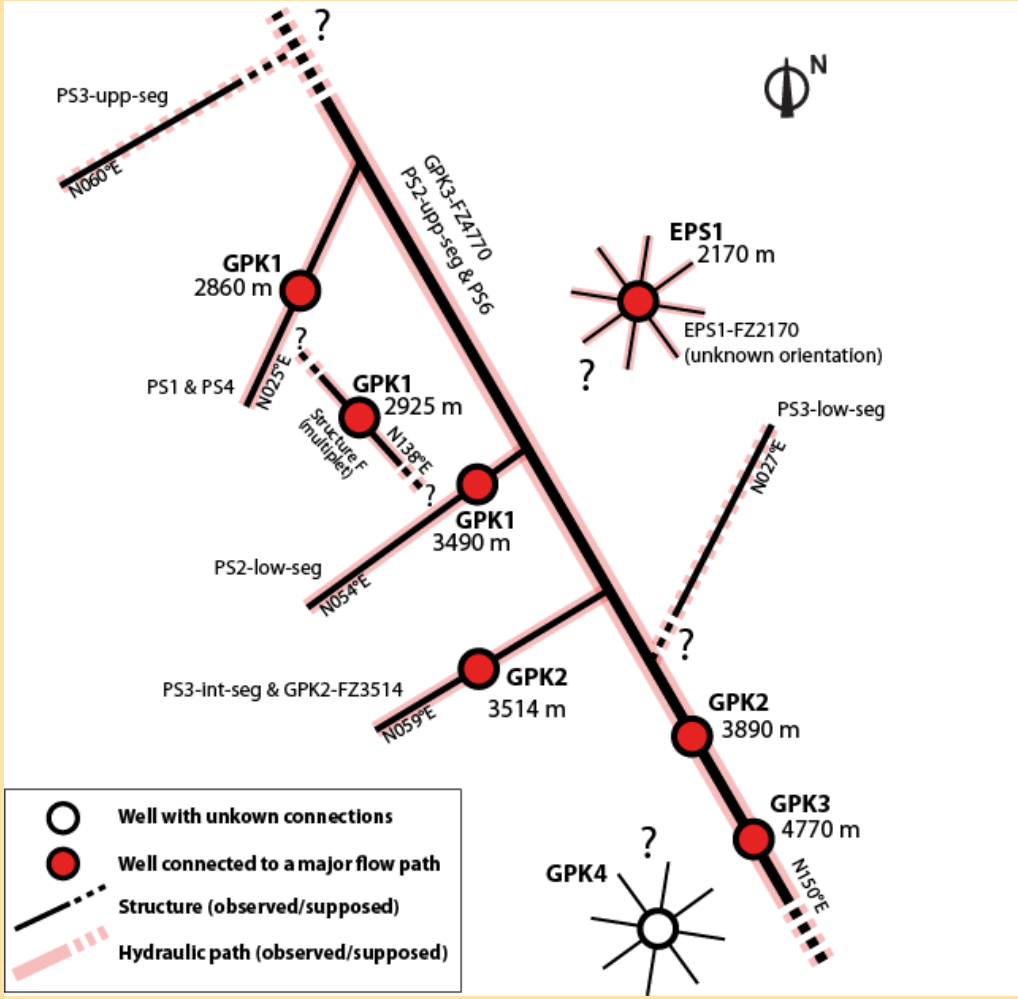
Une faille kilométrique est identifiée

Connexions hydrauliques

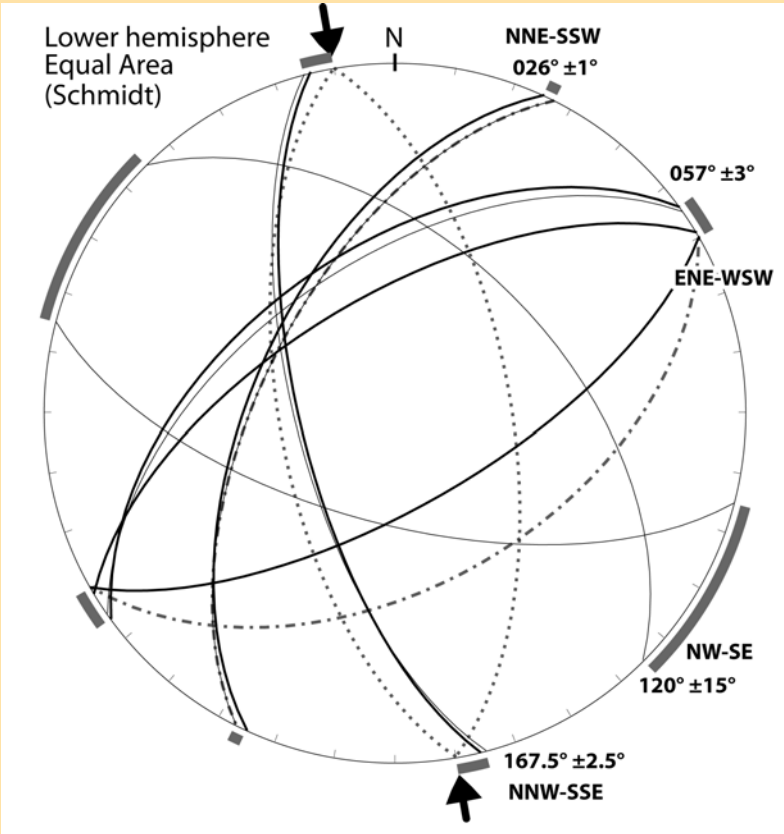
Résultats structuraux
Tests de traçage

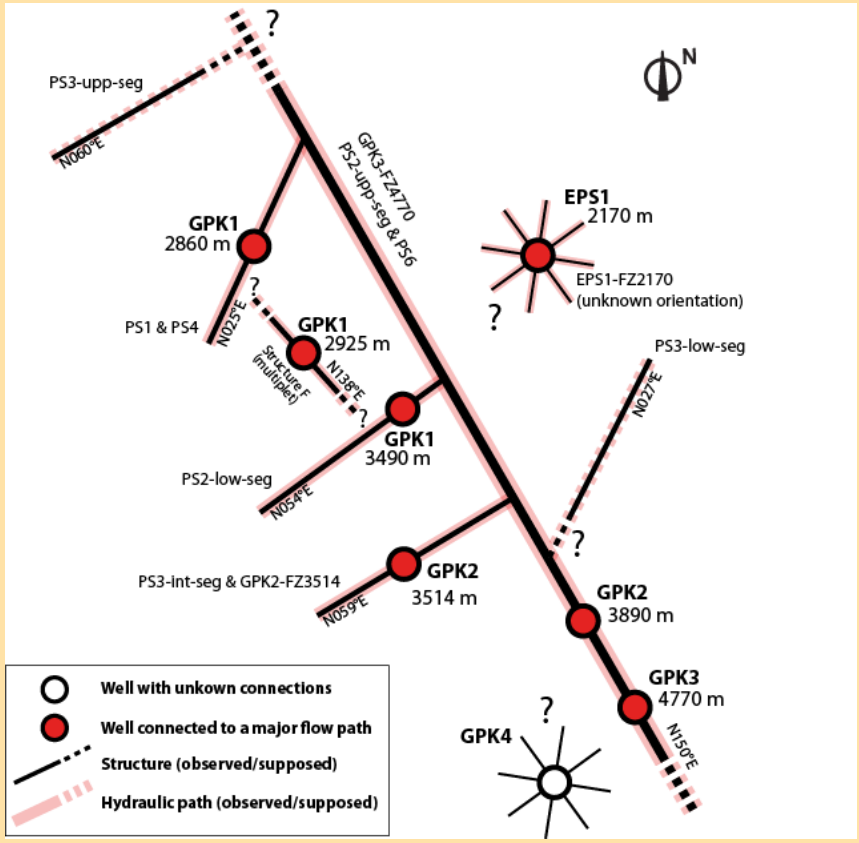
Schéma conceptuel utile
à la gestion du réservoir





Connexions hydrauliques

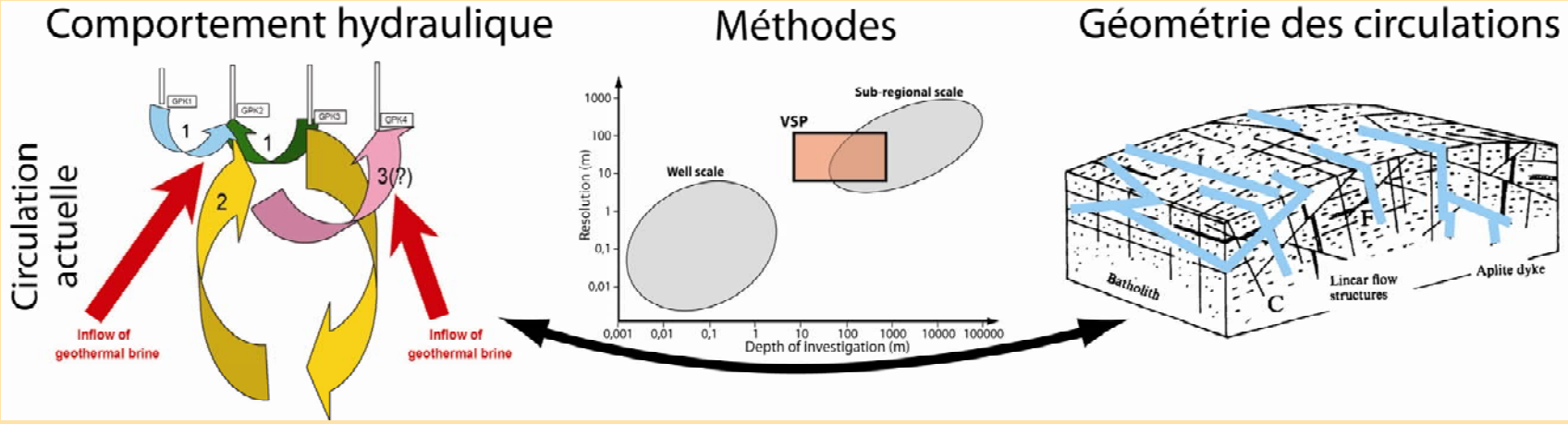


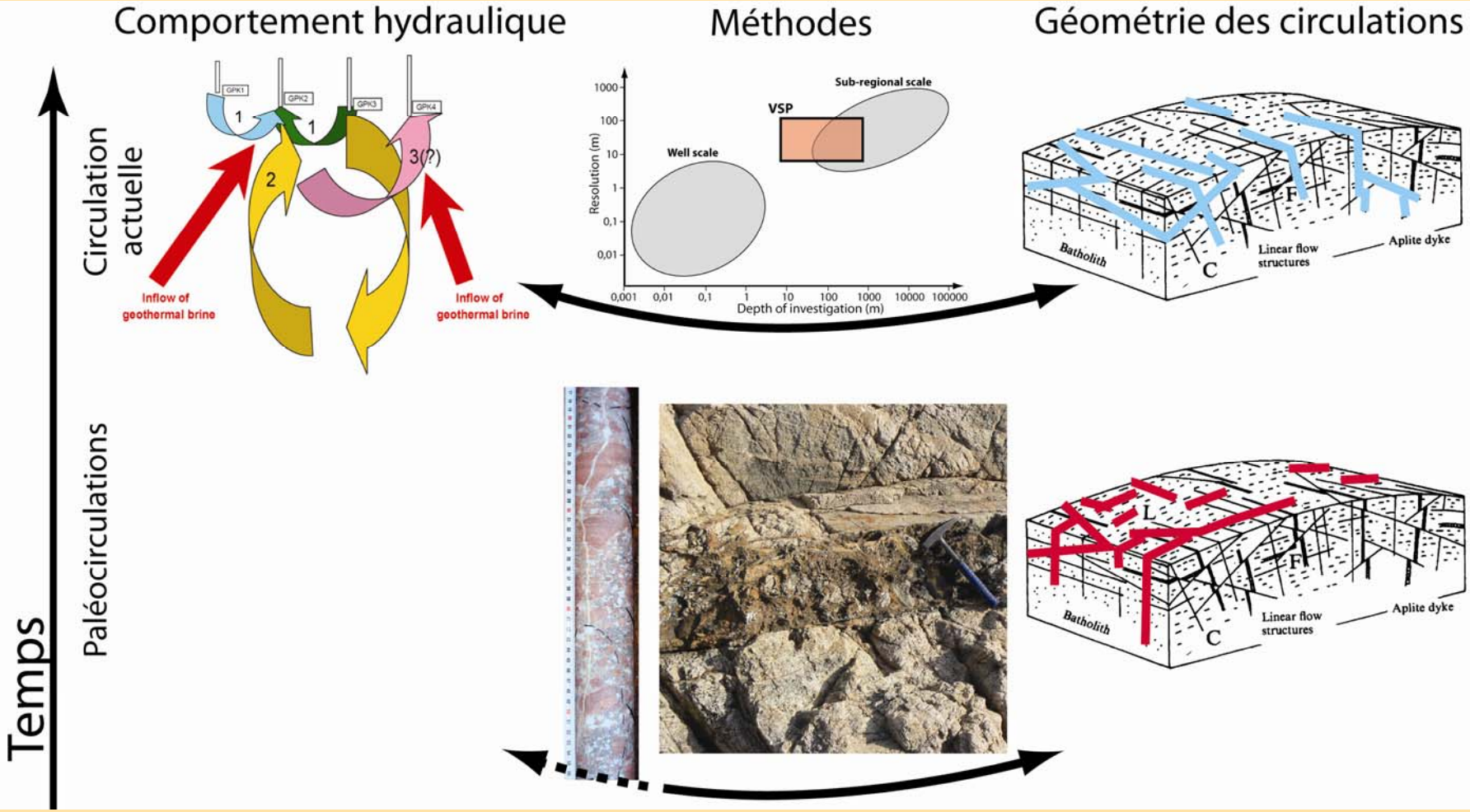


Contribution des héritages varisque et oligocène au drainage

Edel et Schulmann (2009), Edel et al. (2007), Ziegler (1986)

BILAN – Démarche



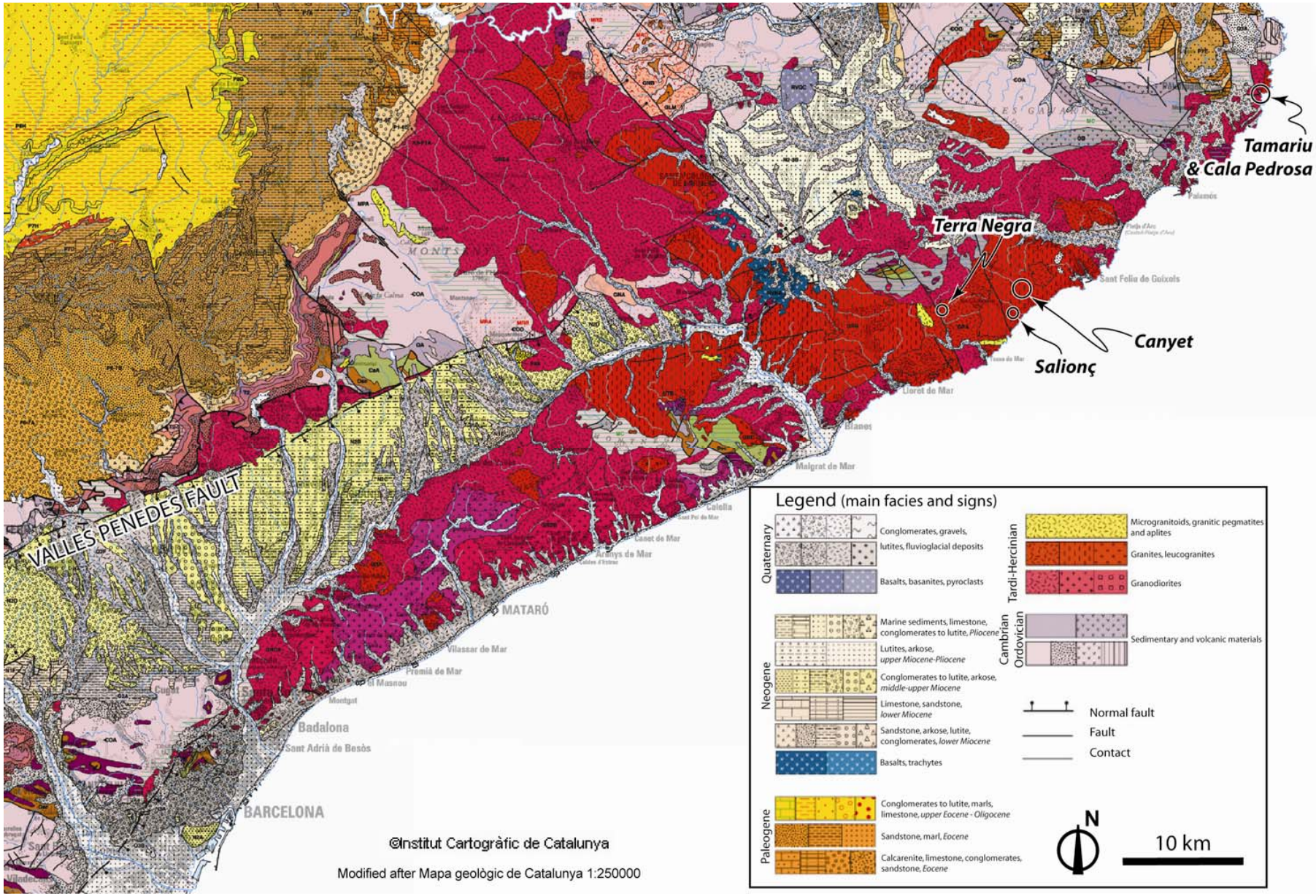


Quelles peuvent être les distributions des chemins de circulation au sein d'un massif granitique facturé ?

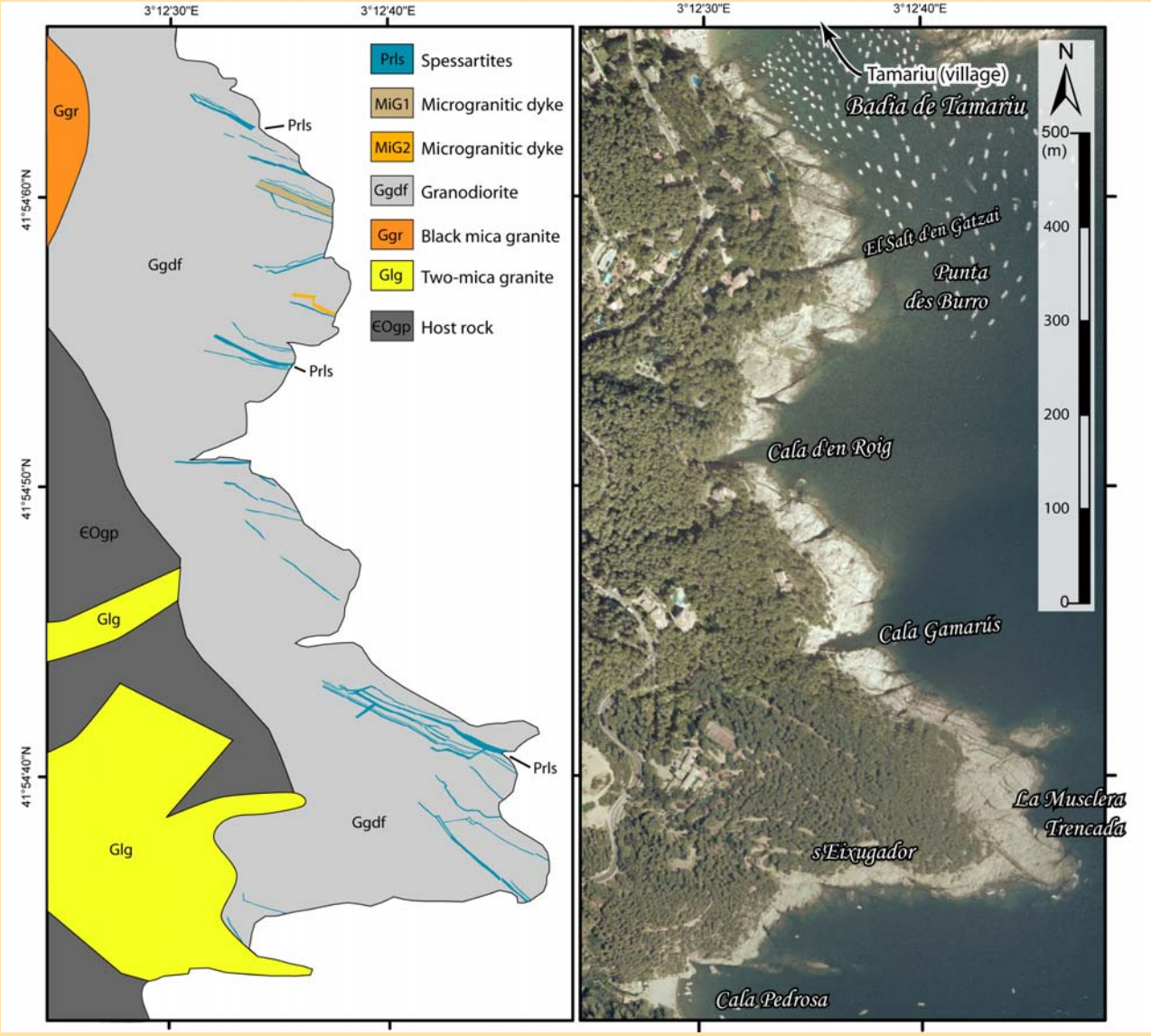
Etude d’un réservoir fossile à l’affleurement

L’exemple de Tamariu

TAMARIU – **Présentation de l'affleurement**



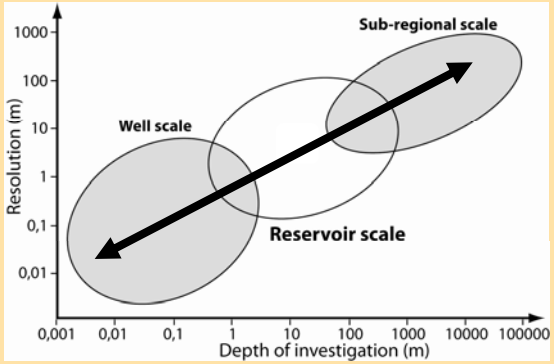
TAMARIU – **Présentation de l'affleurement**



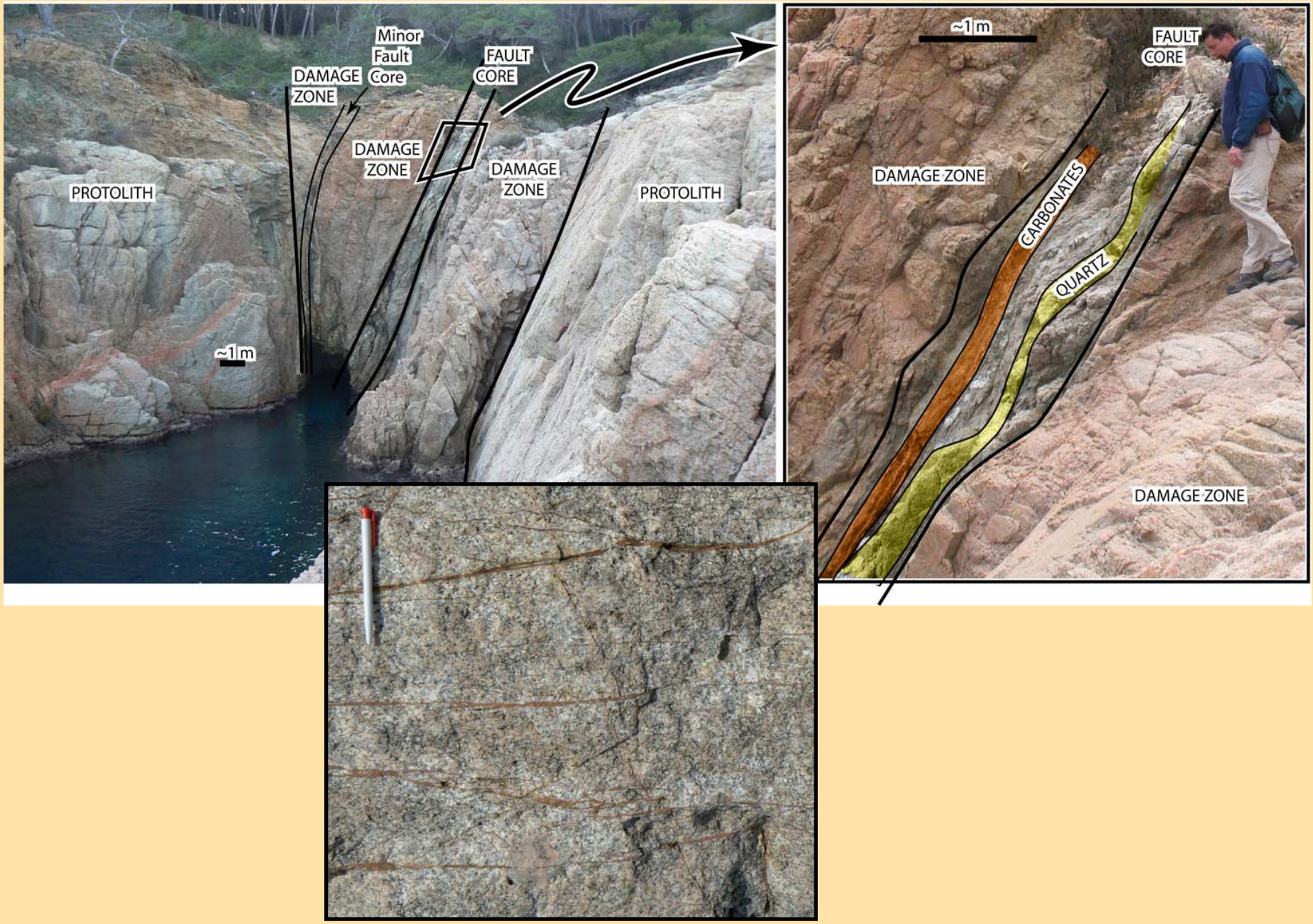
Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC)

Dimensions du même ordre de grandeur qu'un réservoir de type Soultz-sous-Forêts

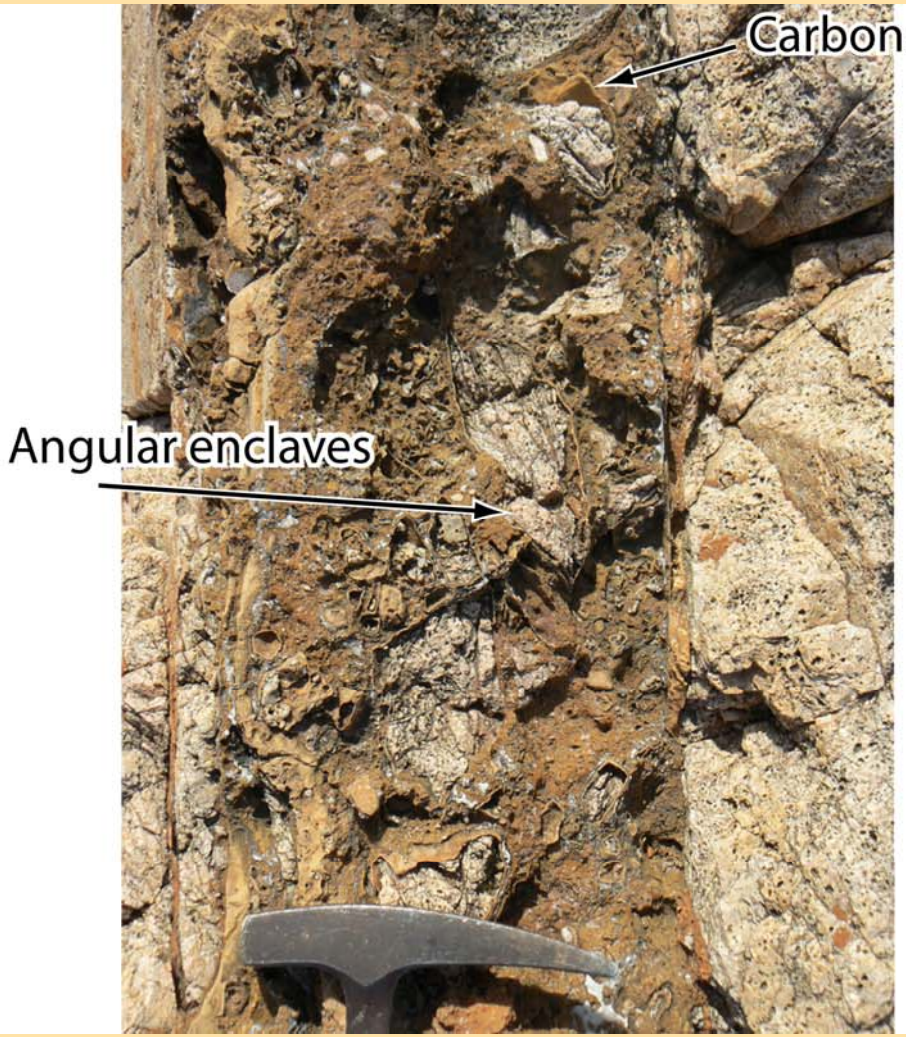
Continuité des échelles de caractérisation

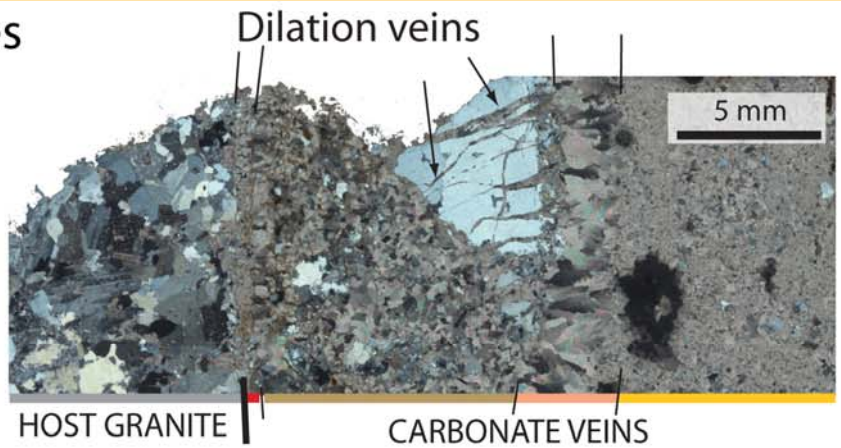


TAMARIU – **Marqueur de circulation**



TAMARIU – *Marqueur de circulation*





- Ciments de composition exotique
- Veines de dilatation
- Enclaves et clastes angulaires

➡ **Brèches d'implosion** (Sibson 1986)

➡ **Formation à plus de 500 m de profondeur**

Marqueur de circulation

Terres rares

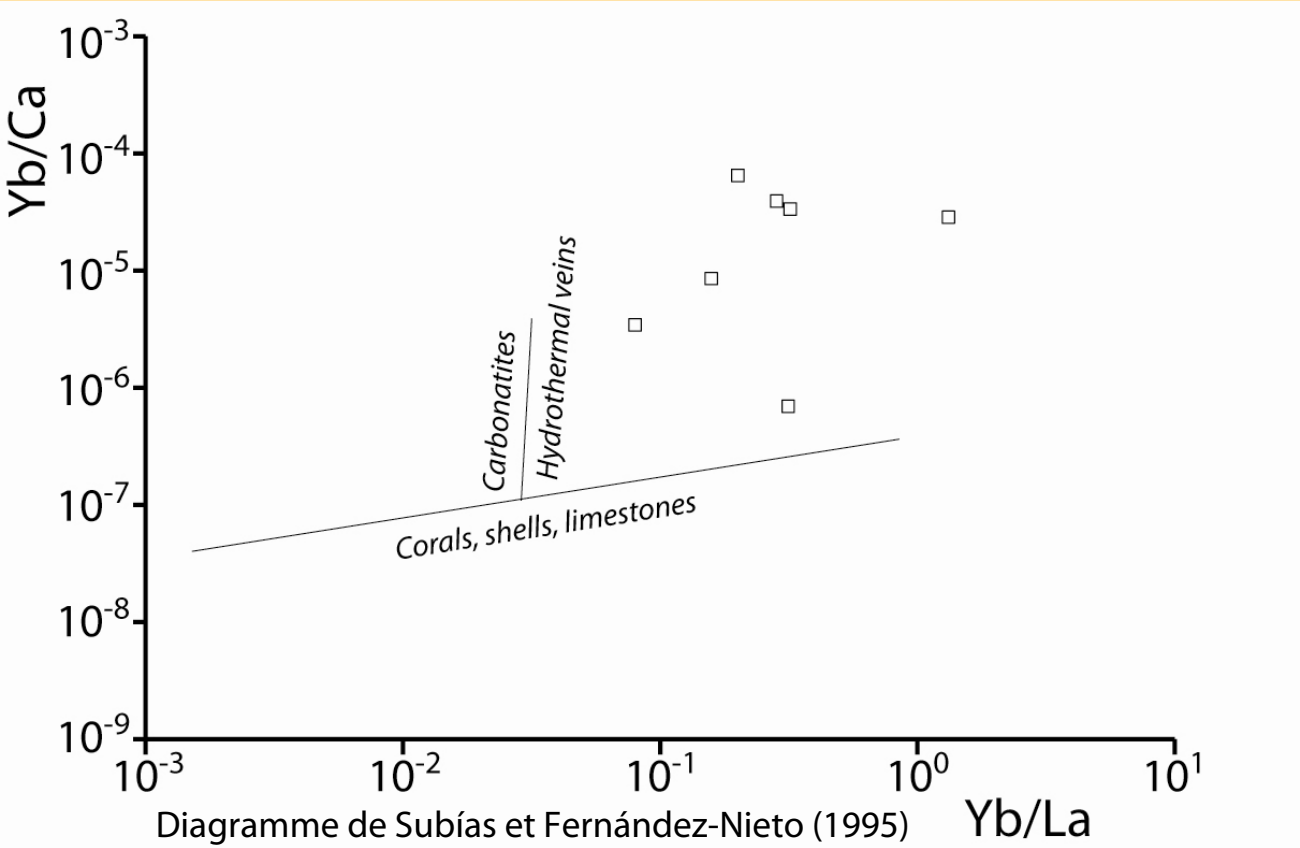


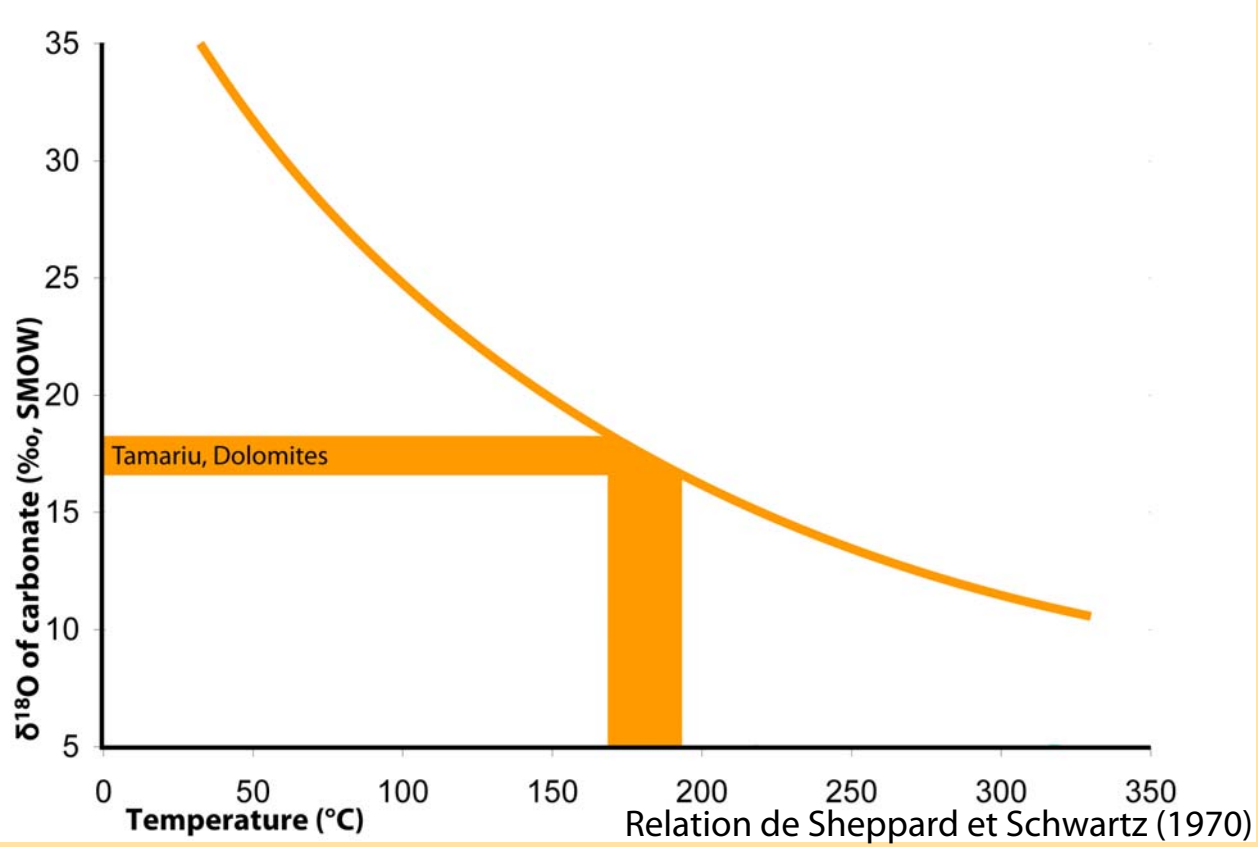
Diagramme de Subías et Fernández-Nieto (1995)

➡ **Conditions hydrothermales**

Formation à plus de 500 m de profondeur

Marqueur de circulation

Isotopes de l'oxygène



Relation de Sheppard et Schwartz (1970)

Cristallisation entre 170°C et 190°C

Conditions hydrothermales

Formation à plus de 500 m de profondeur

Marqueur de circulation

Marqueur de circulation précipité dans des conditions similaires à celles d'un réservoir géothermique

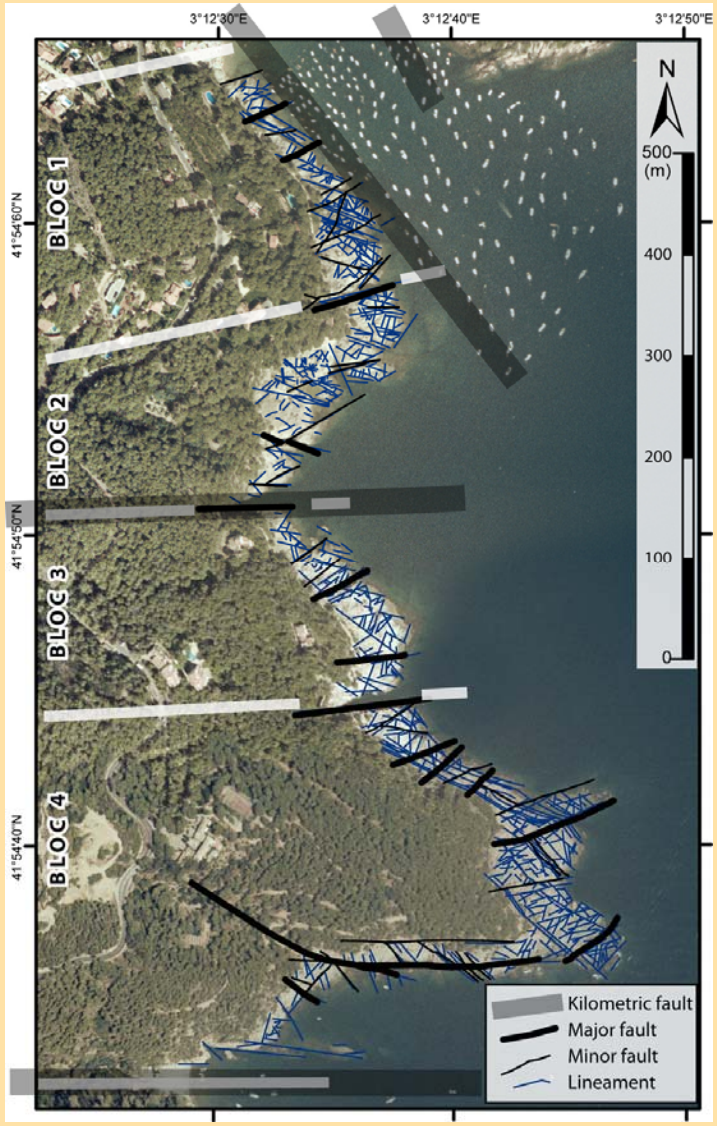
Réservoir fossile

Cristallisation entre 170°C et 190°C
Conditions hydrothermales
Formation à plus de 500 m de profondeur

Quelle est la distribution de ce marqueur de circulation?

Où est-il localisé dans le réseau structural ?

Structuration



- Telédétection (MNT, orthophotos)
- Reconnaissance de terrain

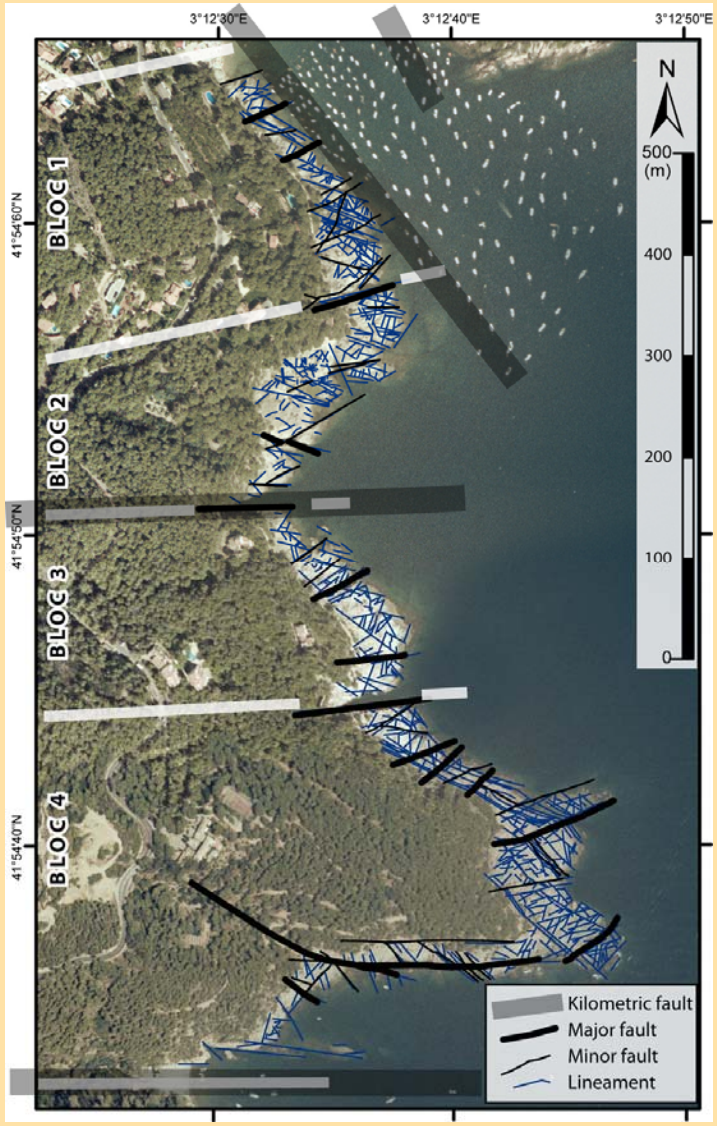
Objets distingués :

- Linéaments (MNT)
- Failles majeures
- Failles mineures
- Linéaments (orthophotos)

Analyse des orientations

Analyse des espacements

Structuration



- Telédétection (MNT, orthophotos)
- Reconnaissance de terrain

Objets distingués :

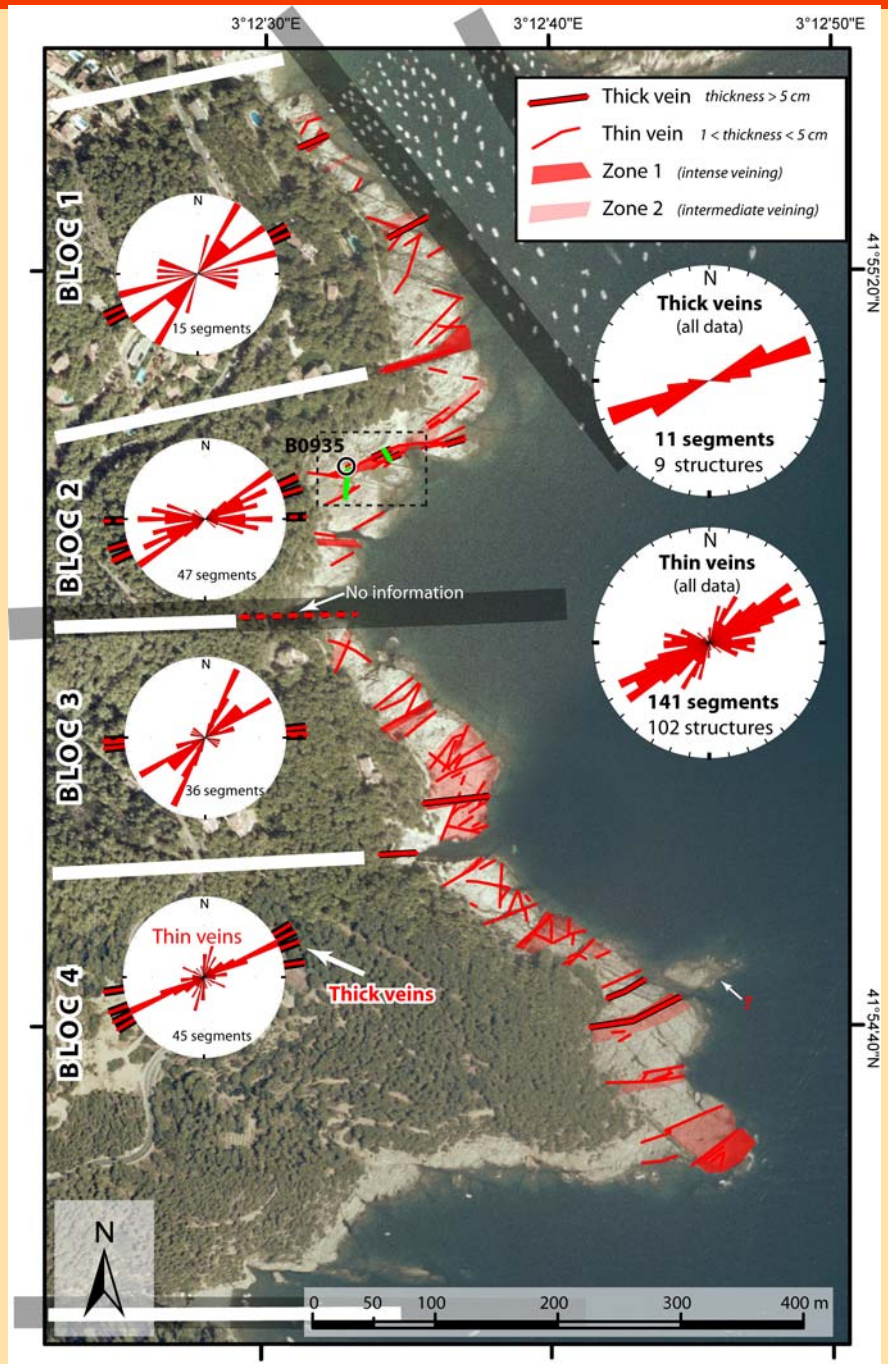
- Linéaments (MNT)
- Failles majeures
- Failles mineures
- Linéaments (orthophotos)

Analyse des orientations

➡ **Analyse des espacements**

- Affleurement

- Remplissages épais : 5 cm < …
- Remplissages fins : 1 < … < 5 cm



- Affleurement

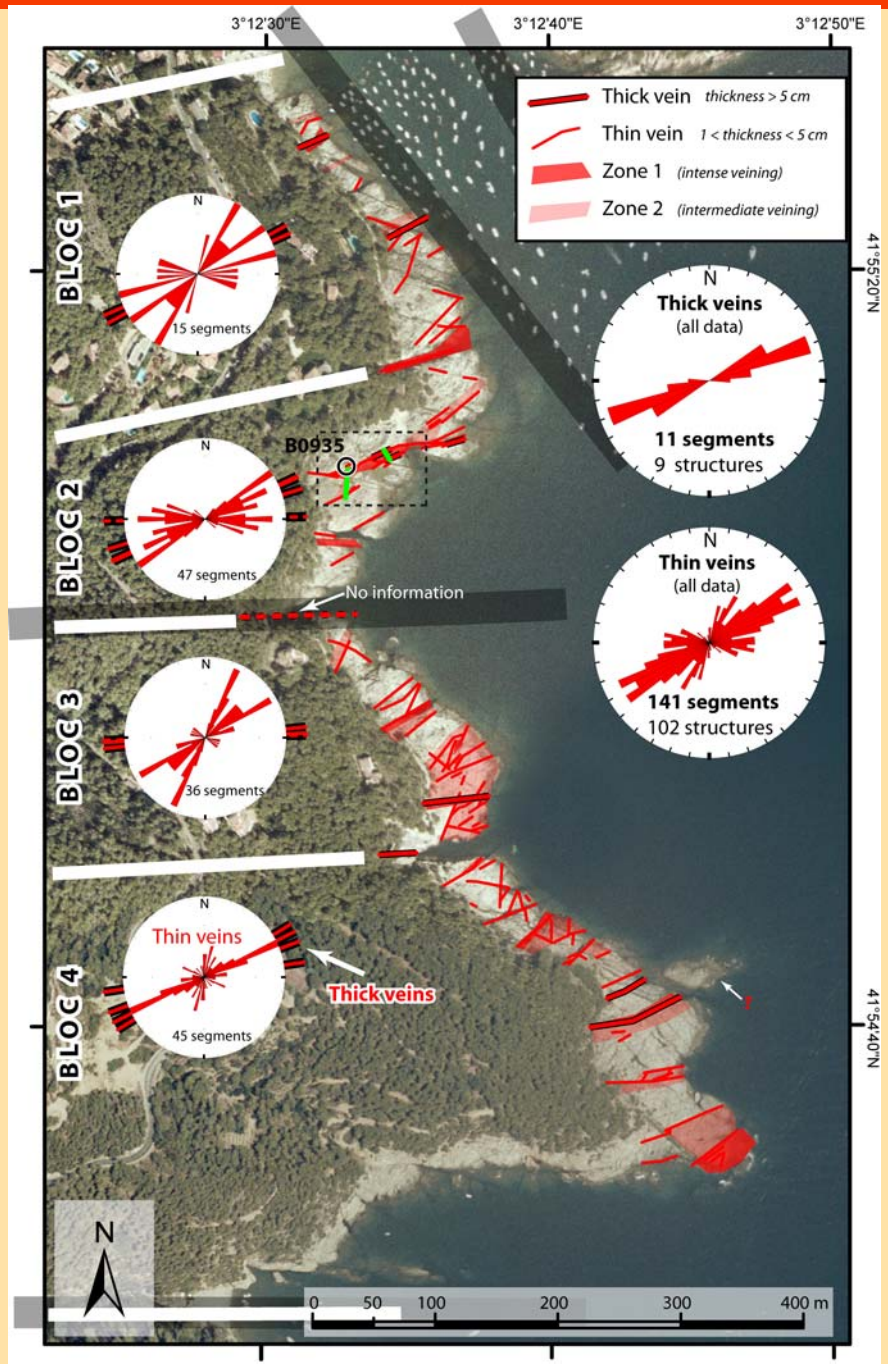
- Remplissages épais : 5 cm < …
- Remplissages fins : 1 < … < 5 cm

- Zones 1 : 1% ≤ Φ
- Zones 2 : 0,1% ≤ Φ < 1%
- Zones 3 : Φ < 0,1%

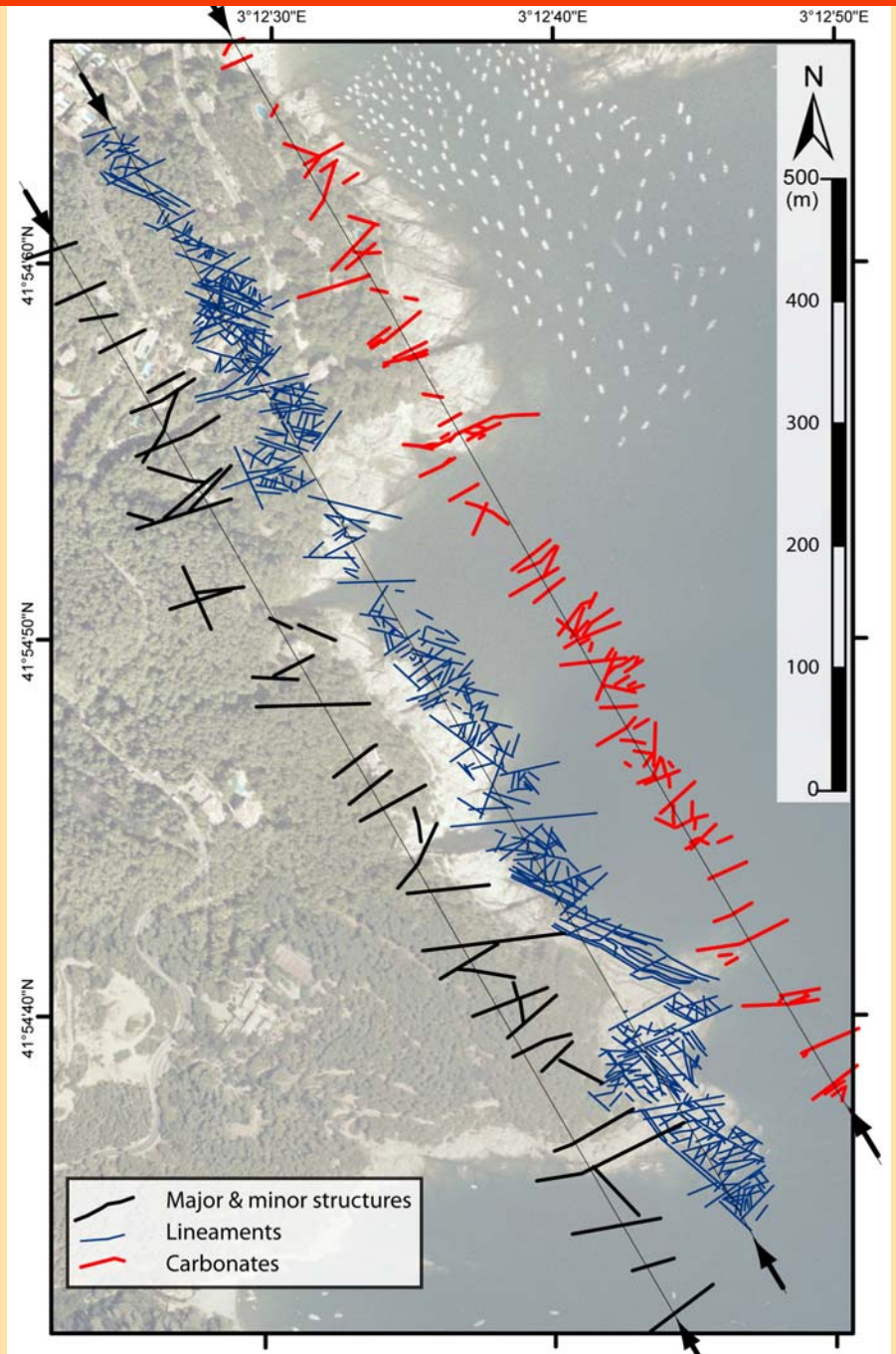
Φ : porosité de fracture (%)

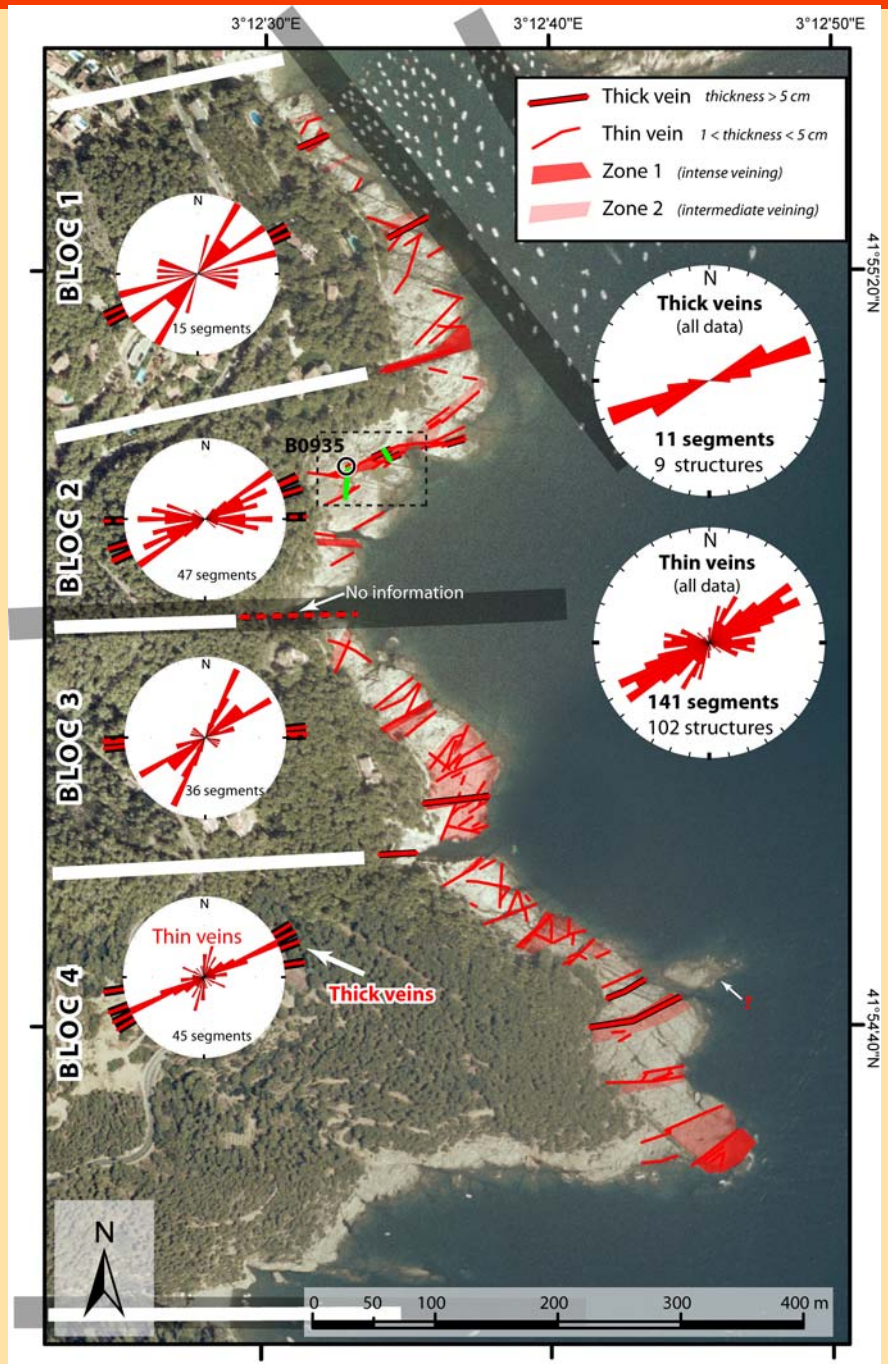
Φ = 100 x (volume de veines / volume considéré)

Φ = 100 x (longueur cumulée veines / longueur profil)

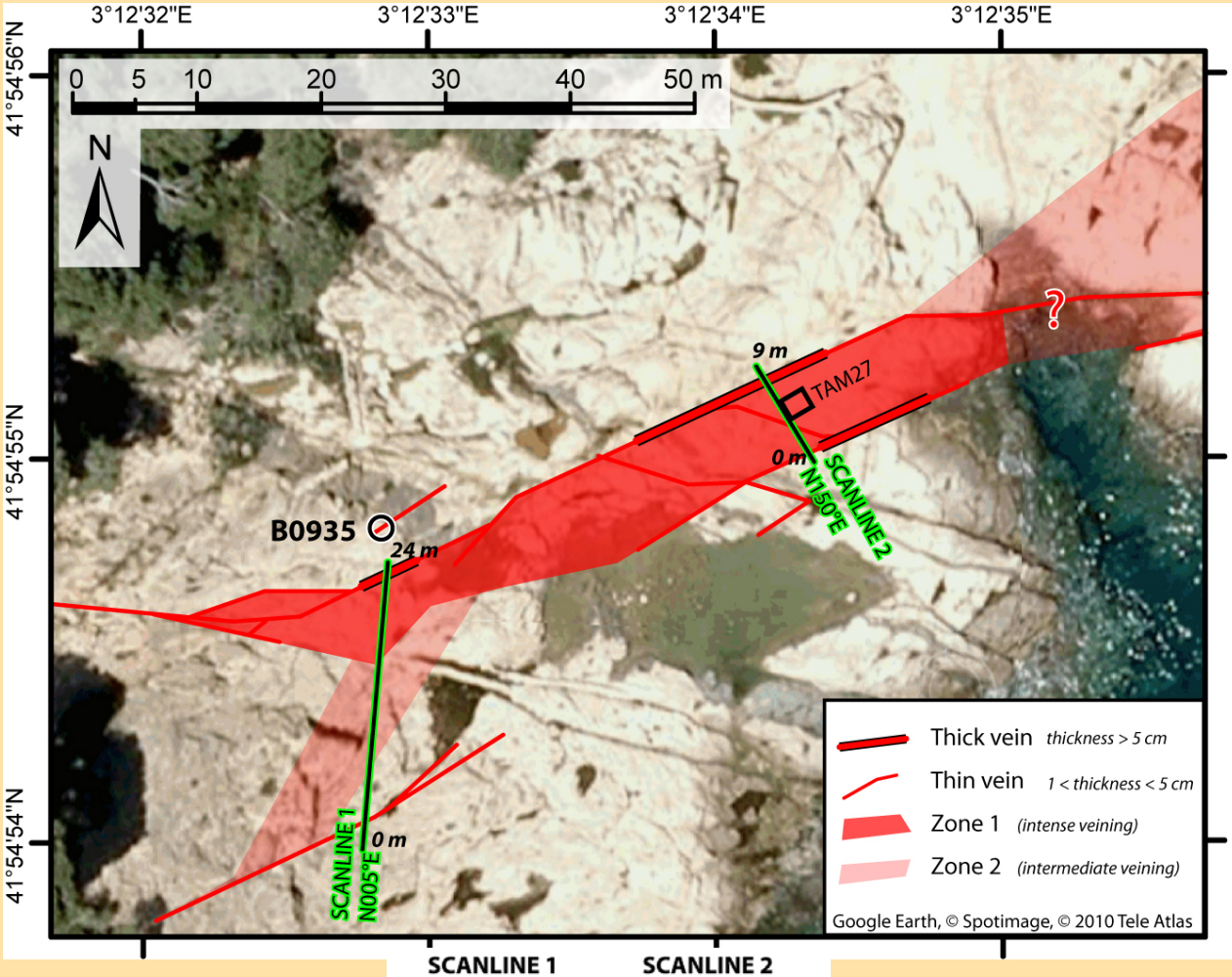


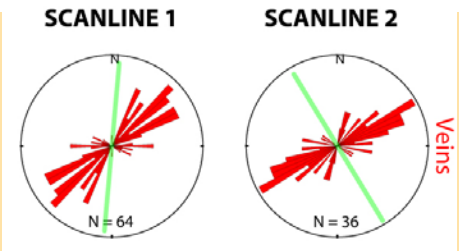
TAMARIU – **Distribution du marqueur de circulation**



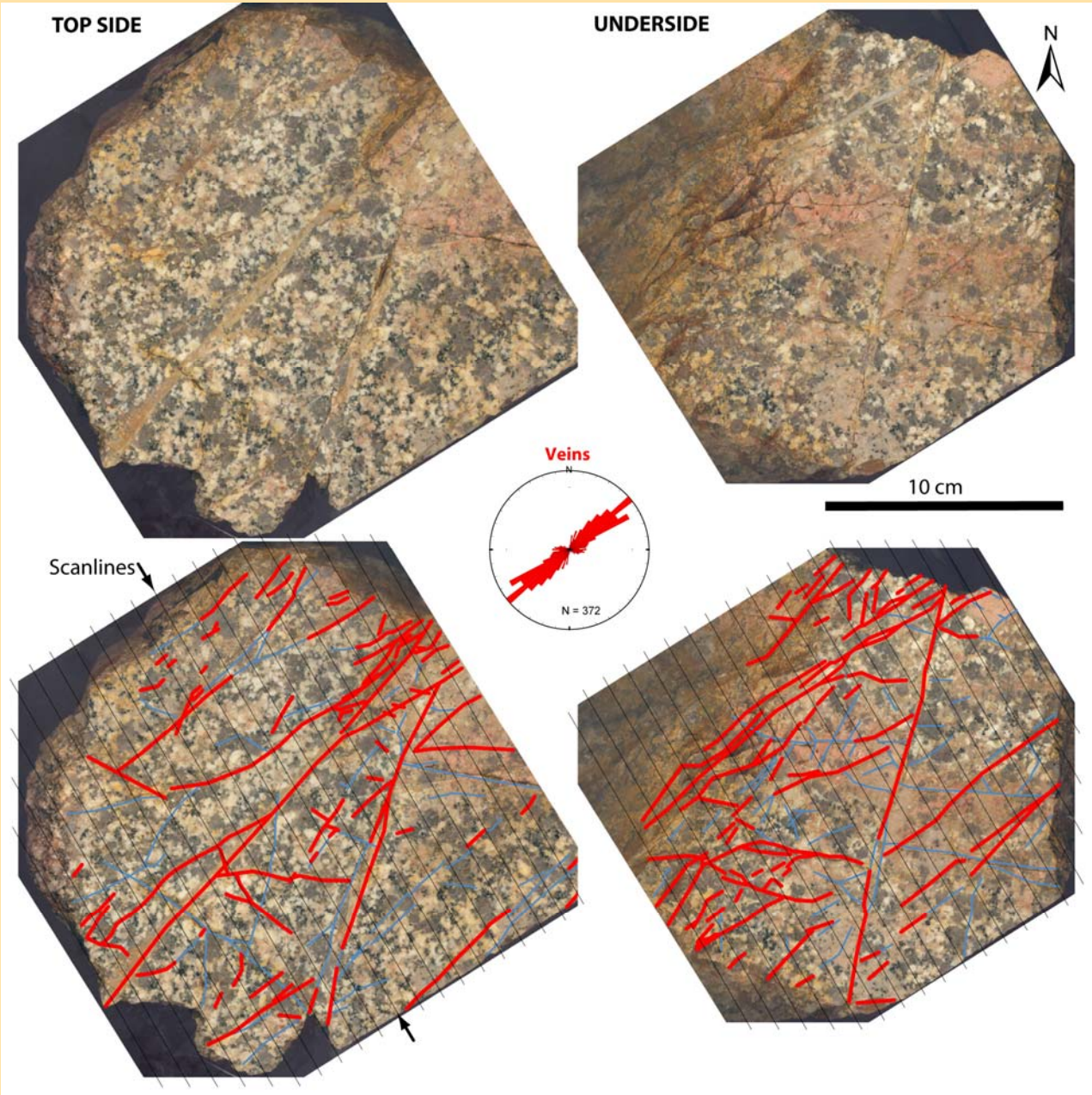


- Couloir de circulation

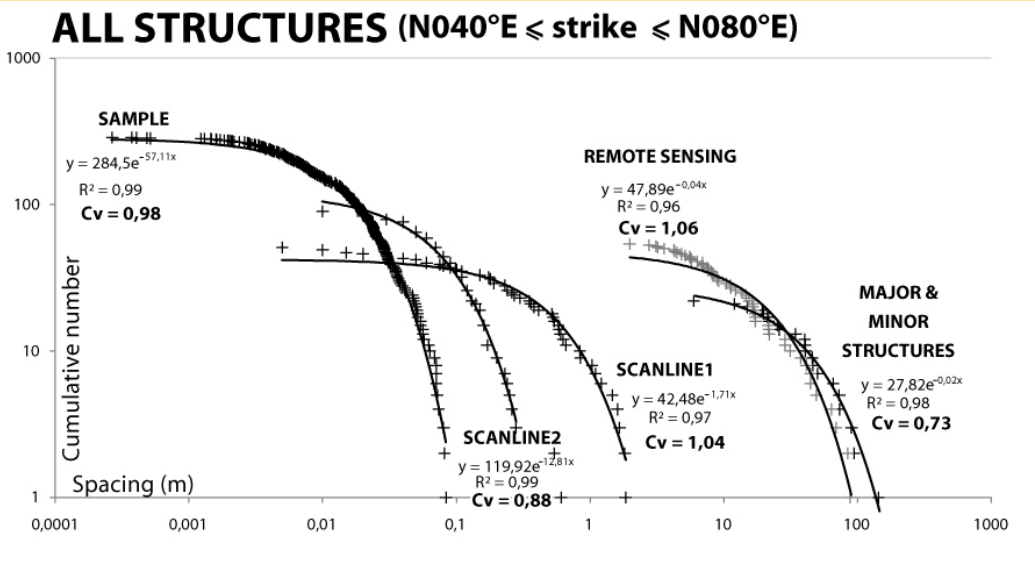


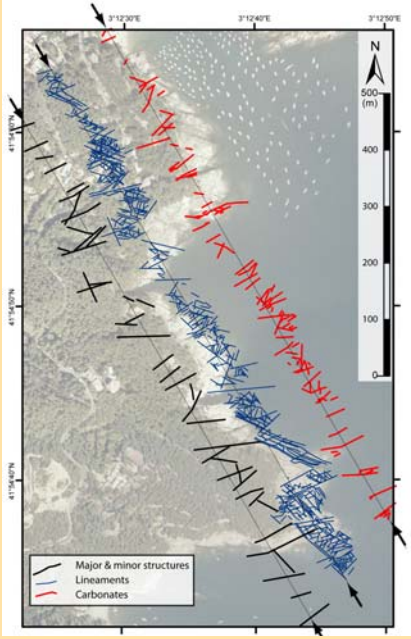


- Echantillon



Analyse des espacements

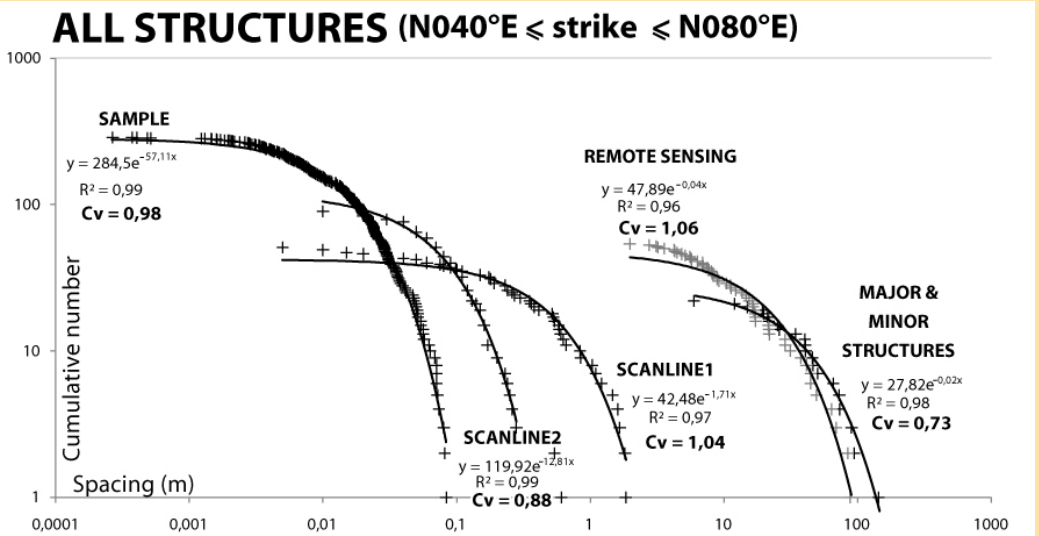


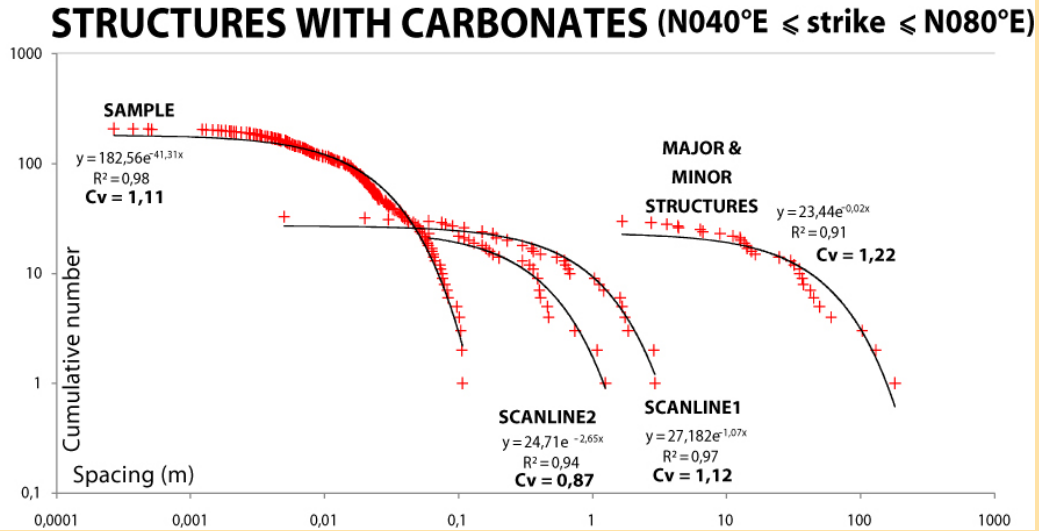


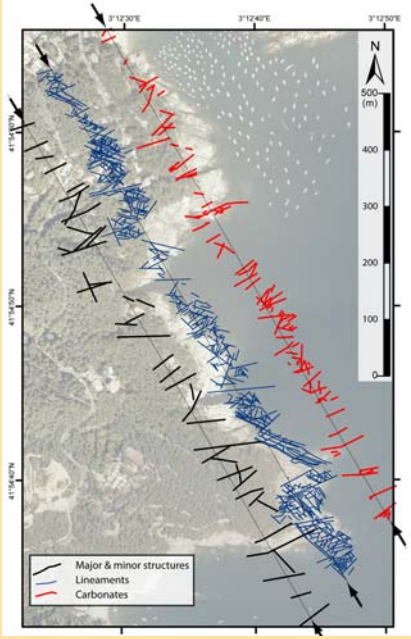
Lois exponentielles à exposant négatif : distributions aléatoires

⇒ Localisation de la déformation sur le réseau primaire (McCaffrey et al., 2003)

Analyse des espacements

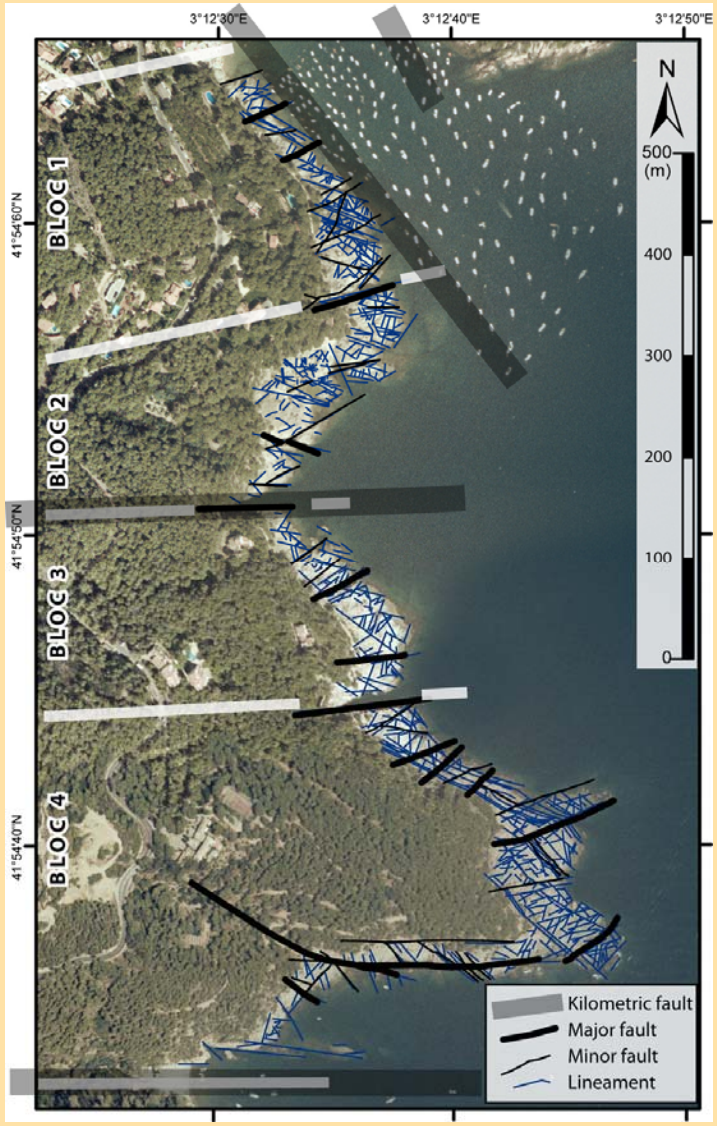


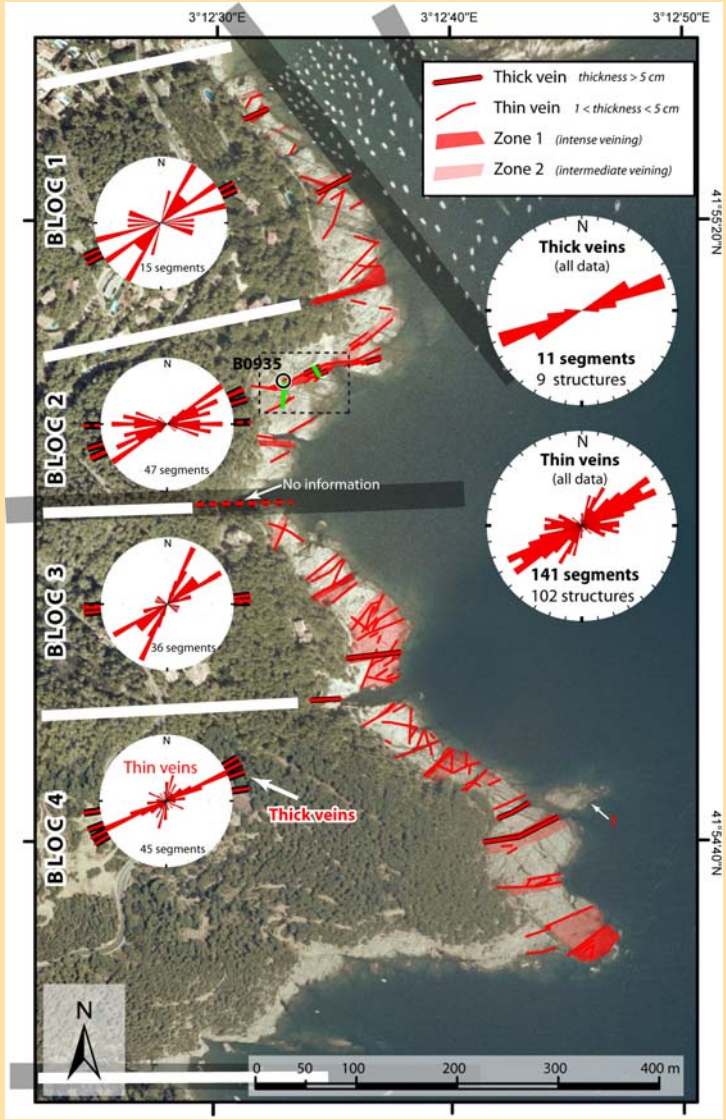




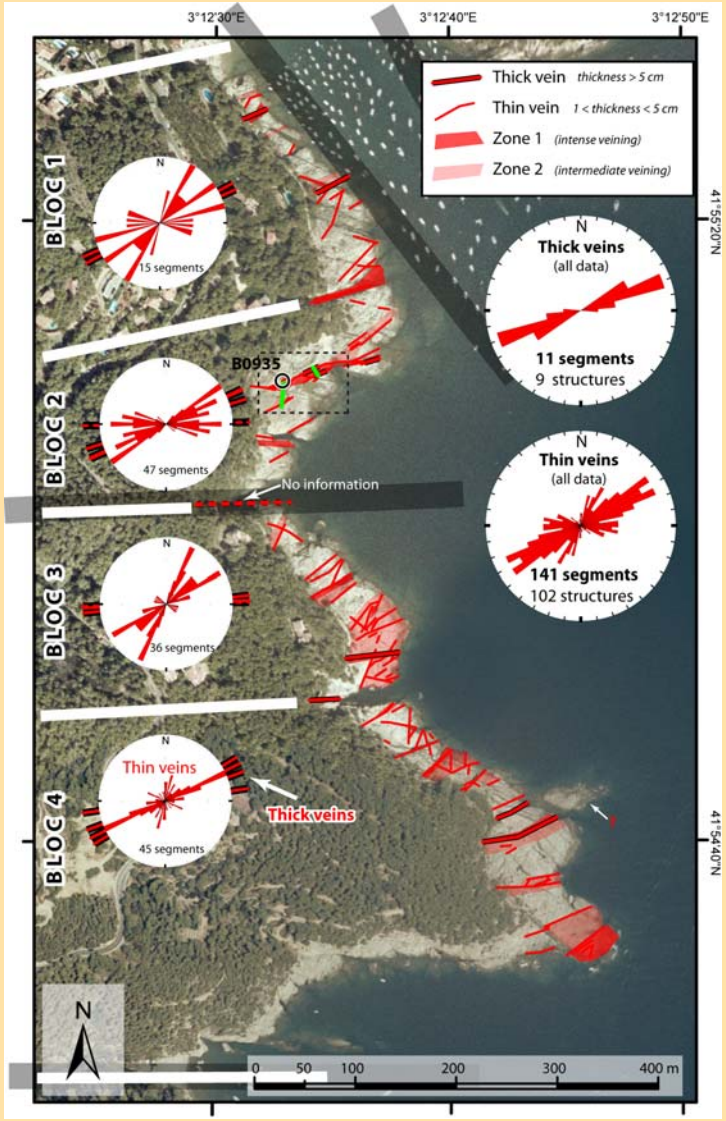
Lois exponentielles à exposant négatif : distribution aléatoire des marqueurs de circulation

Analyse des espacements





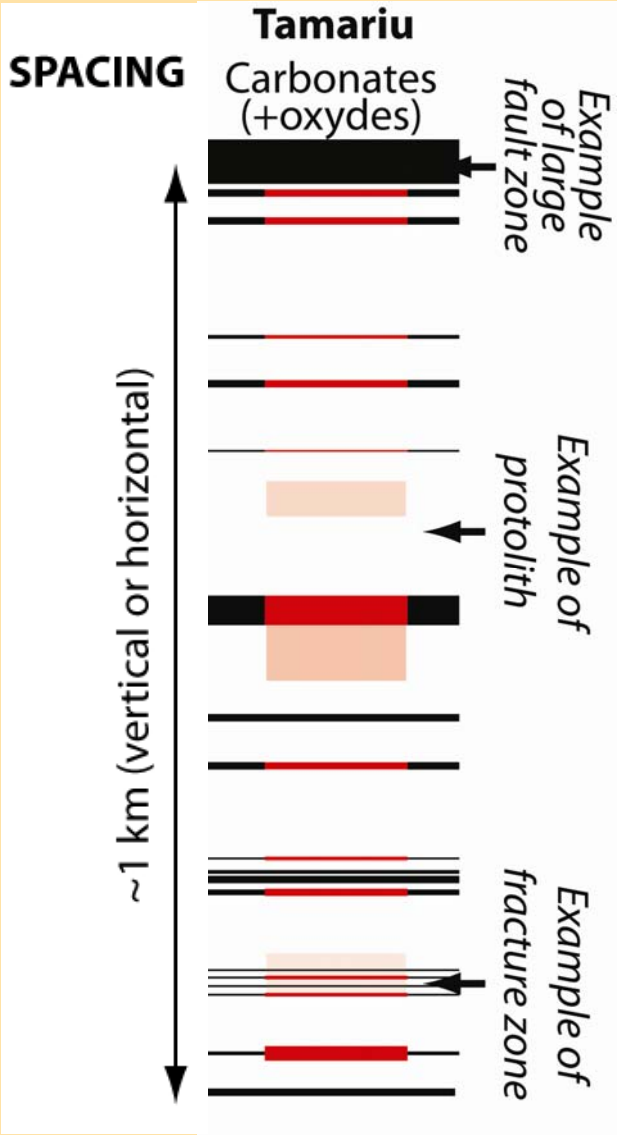
Contrôle structural du drainage



Distribution aléatoire des structures
Distribution aléatoire des marqueurs

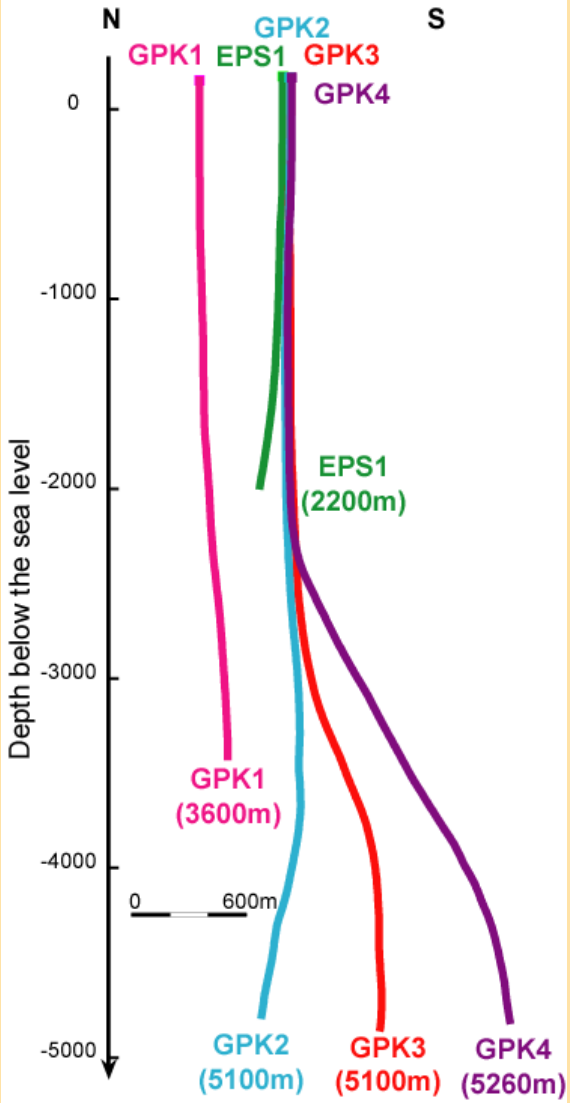
Indépendance de la localisation des marqueurs par rapport à la hiérarchie des structures

Profil schématique

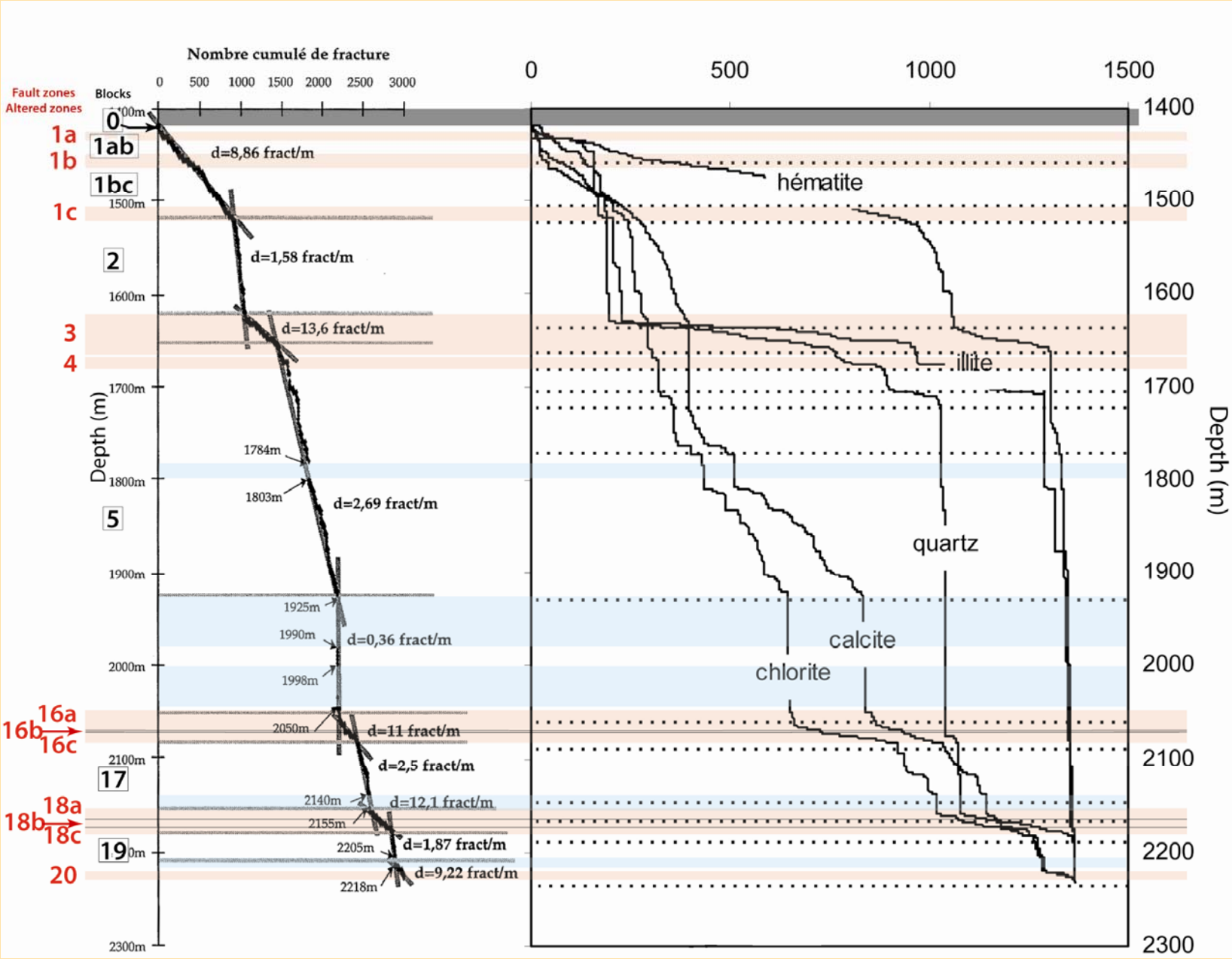


Carottes issues du puits EPS1, 800 m

(Genter et Traineau, 1996)

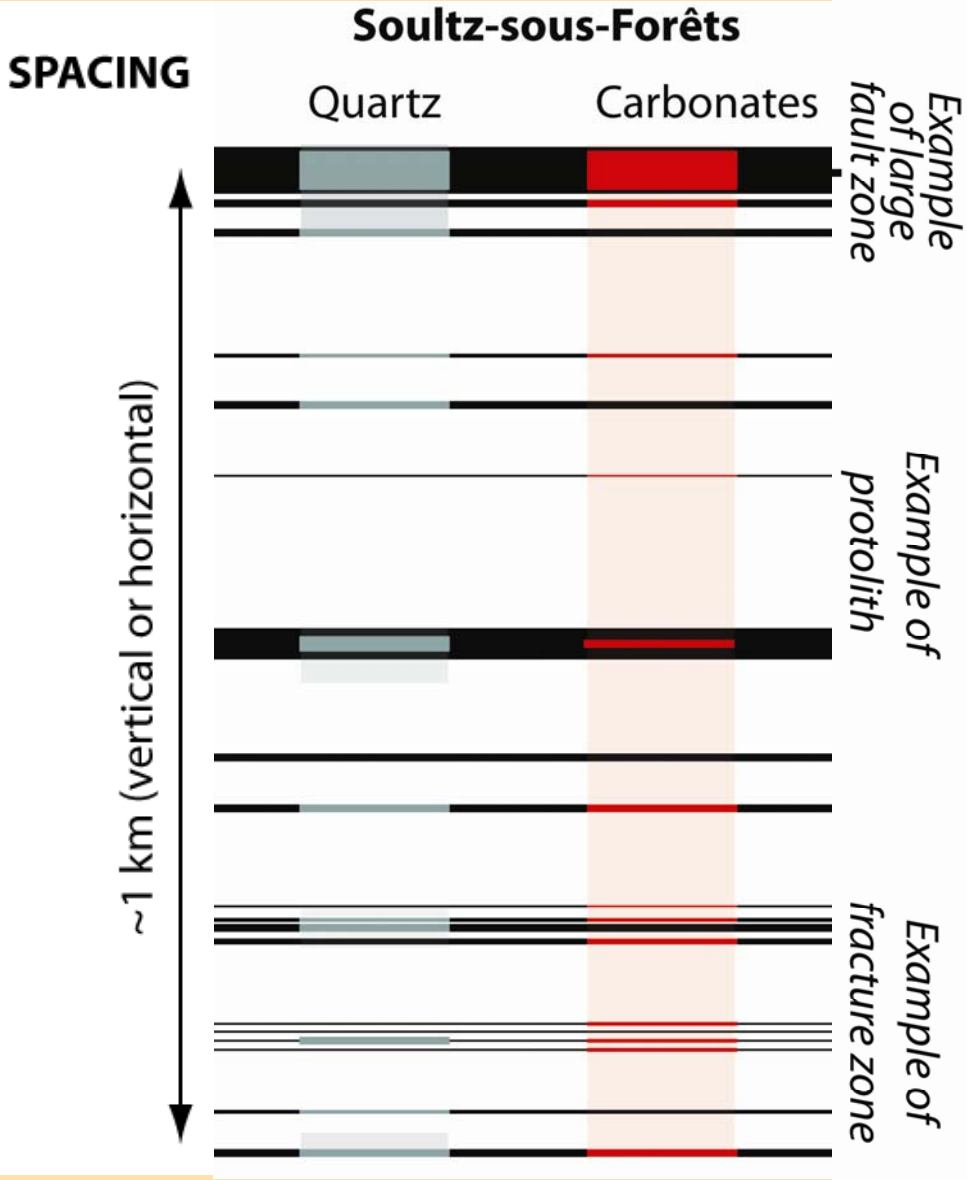


SOULTZ-SOUS-FORETS – **Marqueurs de circulation**



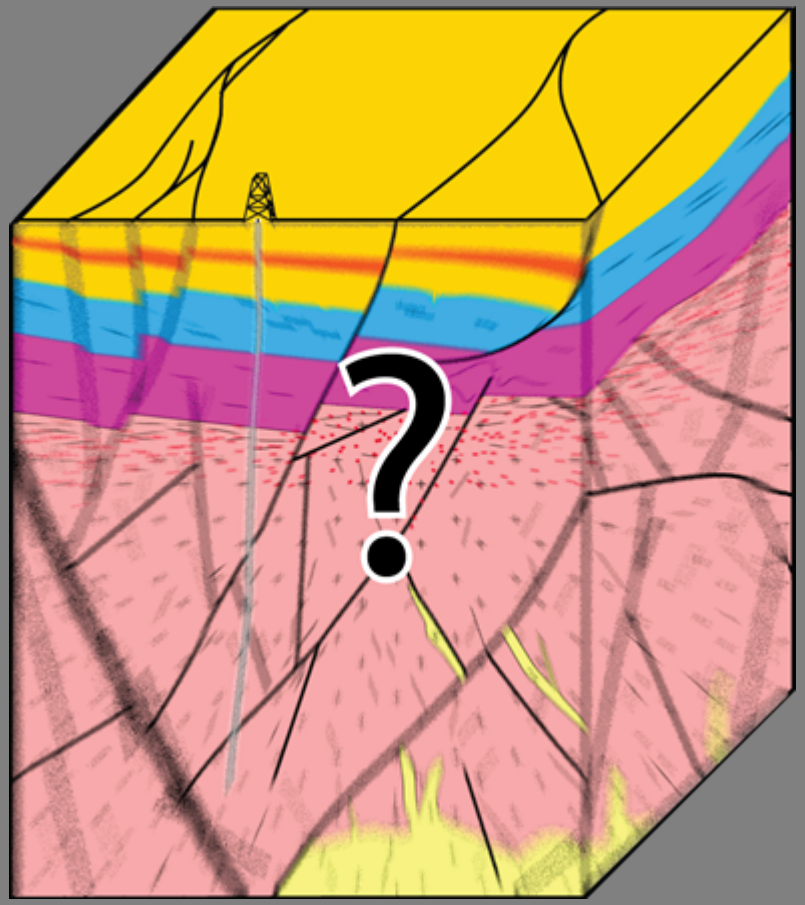
Compilé d'après Dezayes (1995), Sausse et al. (1998)

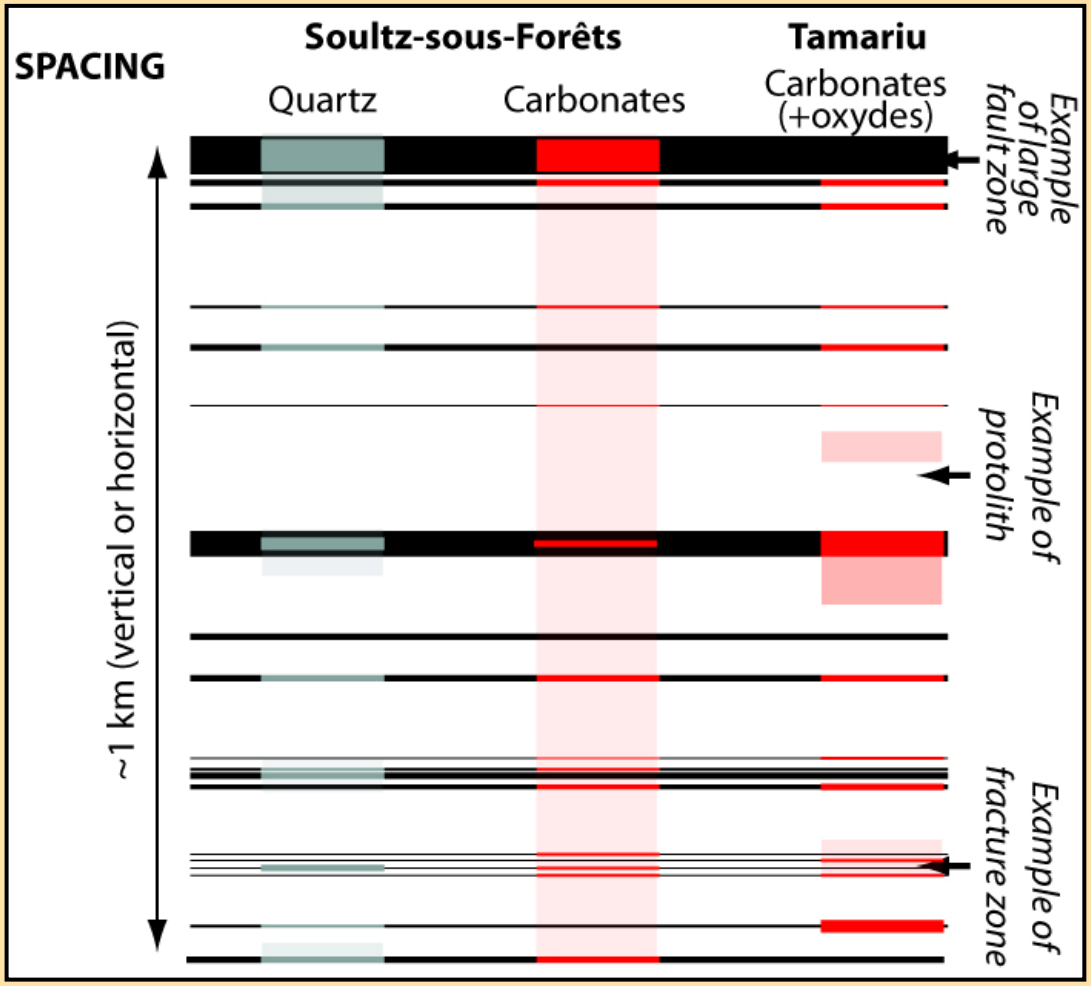
Contrôle structural du drainage



Identification de plusieurs réseaux de paléo-drainage

Discussion





Différentes distributions du drainage, montrant différentes relations entre :

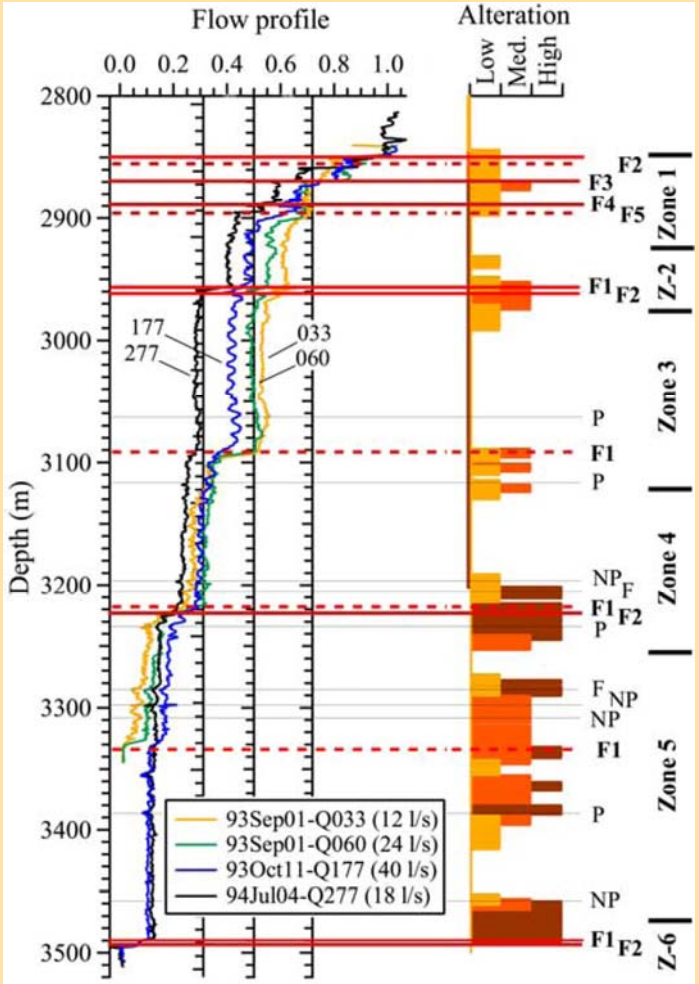
la localisation des marqueurs

et

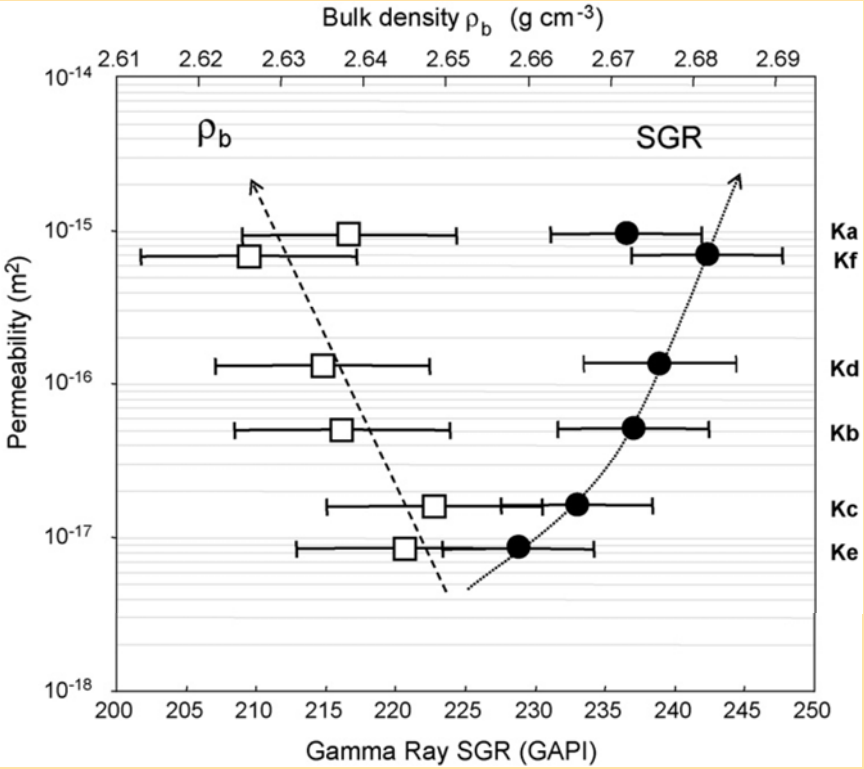
la localisation des structures

Réseaux denses dans le protolithe

Avant stimulation

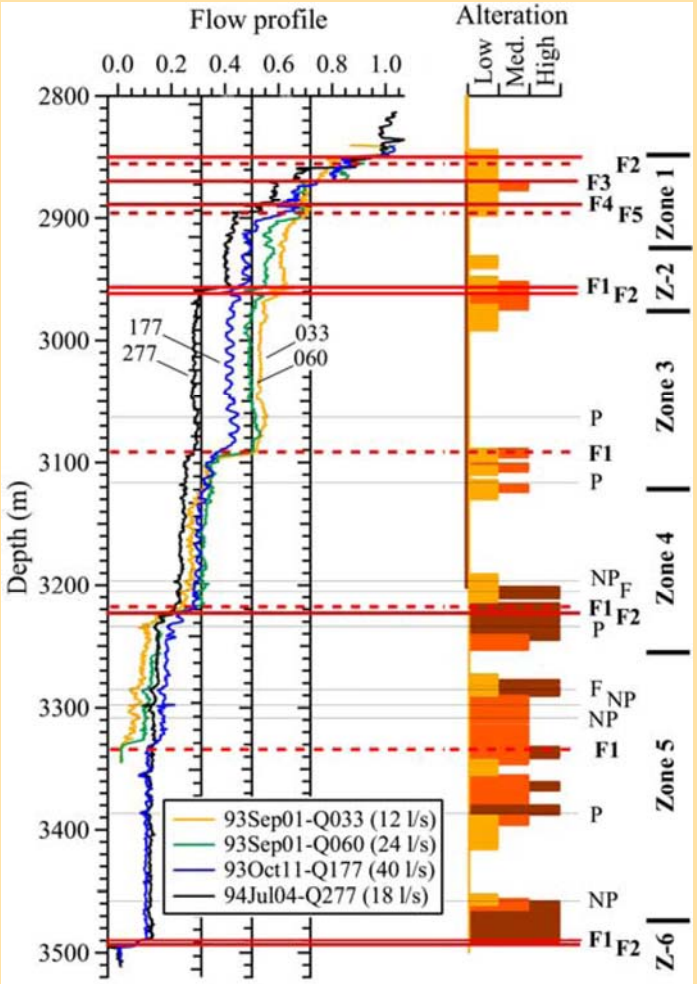


Modifié d'après Evans et al. (2005)

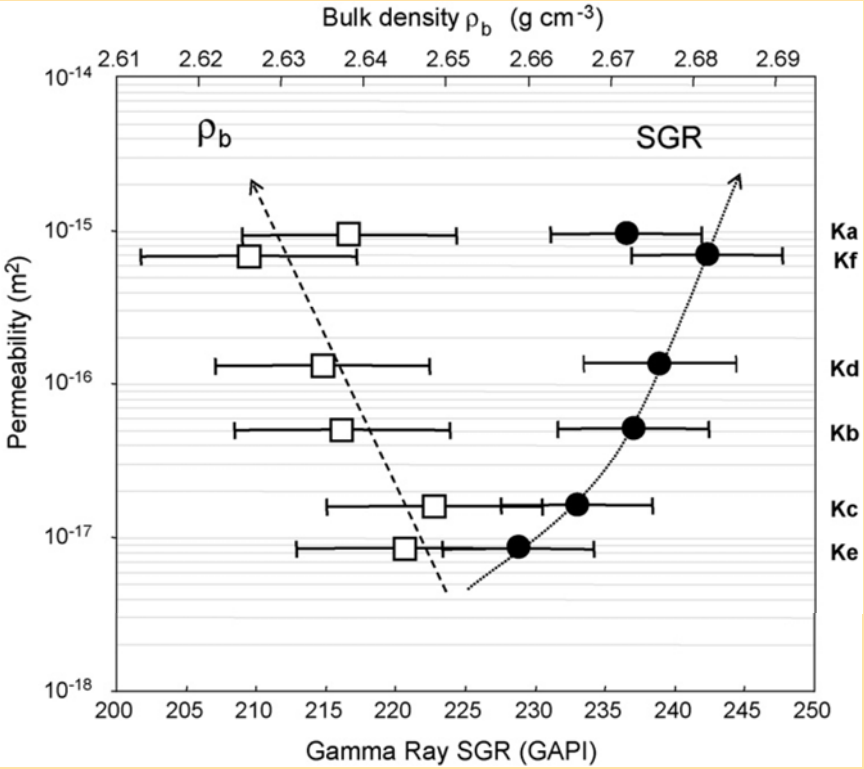


Sausse et al. (2006)

Avant stimulation



Modifié d'après Evans et al. (2005)

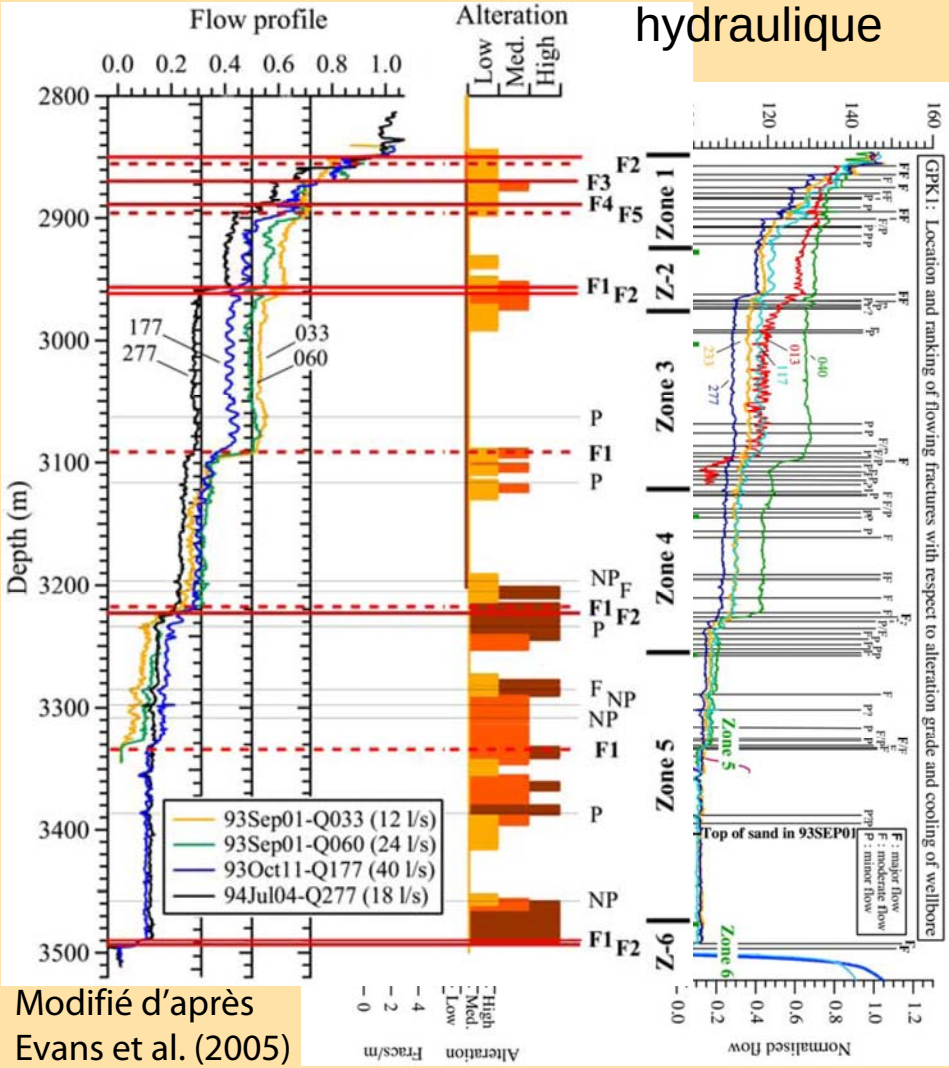


Sausse et al. (2006)

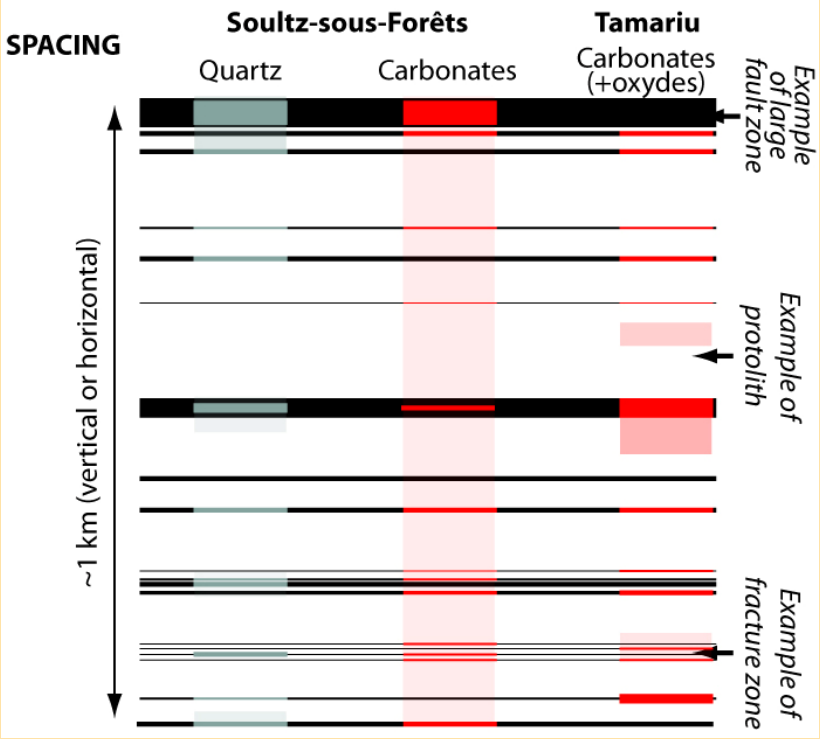
DISCUSSION – **Distribution du drainage**

Avant stimulation

Après stimulation hydraulique



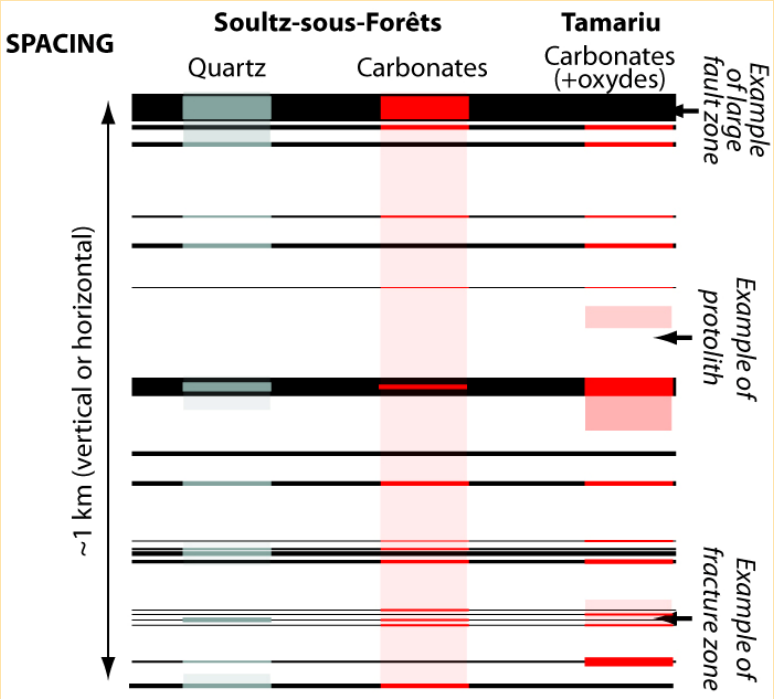
Modifié d'après Evans et al. (2005)

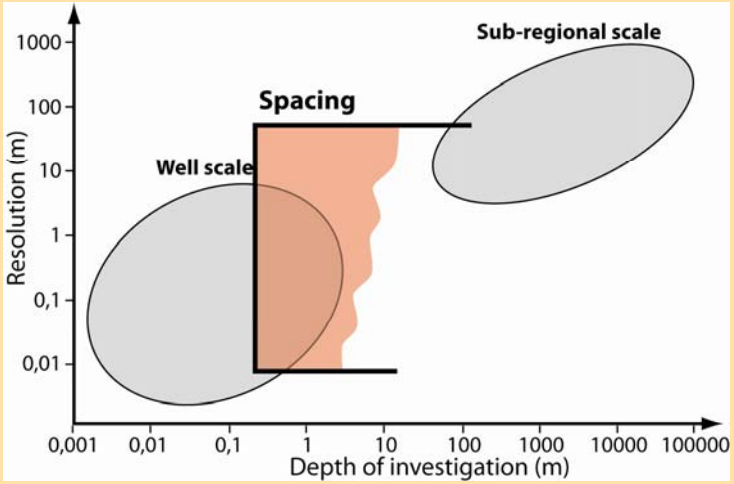


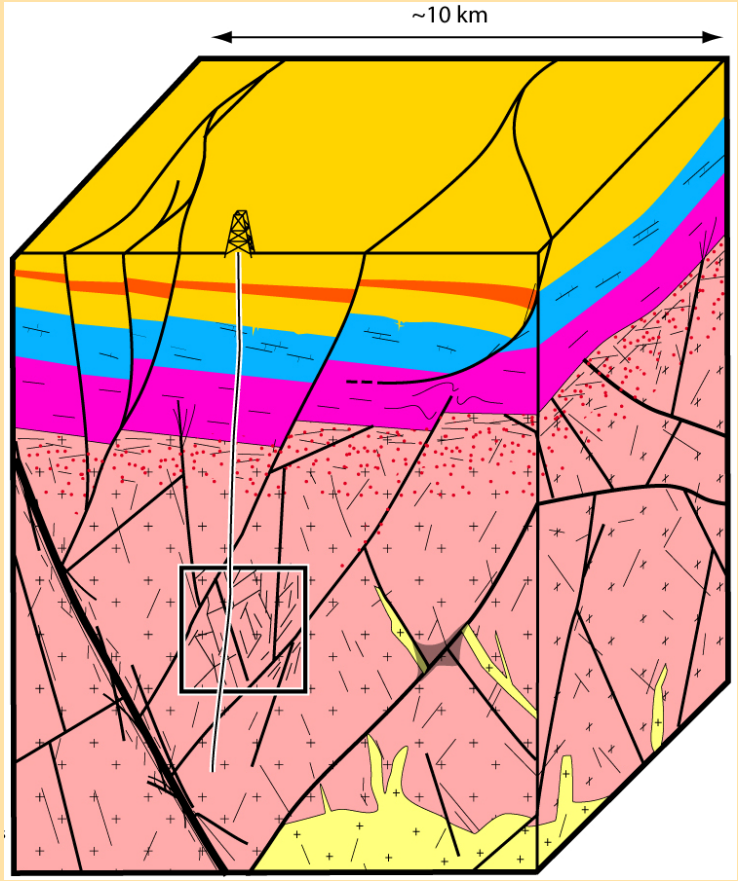
Nombre de fractures perméables multiplié par100

- Effet de la surpression de fluides
- Réactivation de réseaux naturels

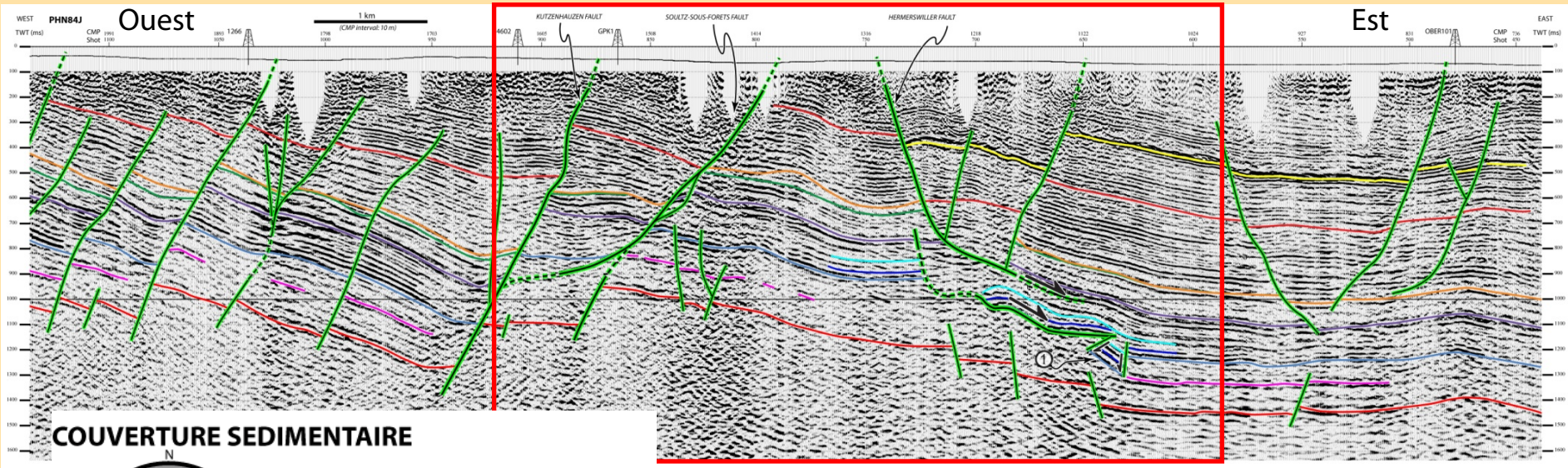
Espacement


SPACING
Soultz-sous-Forêts
Tamariu
Quartz
Carbonates
Carbonates (+oxydes)
~1 km (vertical or horizontal)
Example of large fault zone
Example of protolith
Example of fracture zone


Sub-regional scale
Spacing
Well scale
Resolution (m)
1000
100
10
1
0,1
0,01
0,001
0,01
0,1
1
10
100
1000
10000
100000
Depth of investigation (m)


~10 km

Orientation

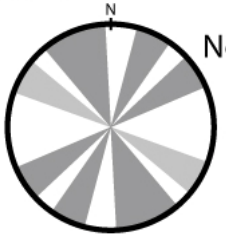


COUVERTURE SEDIMENTAIRE

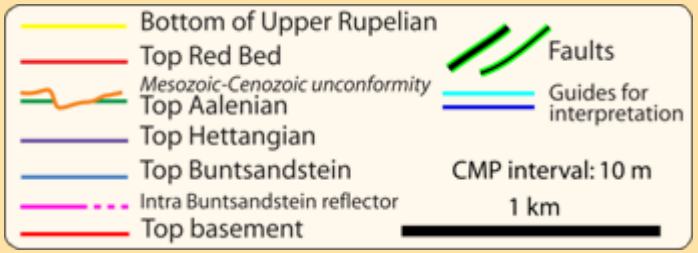
Failles normales
(extension oligocene)

Activité en
transpression et
transtension

SOCLE

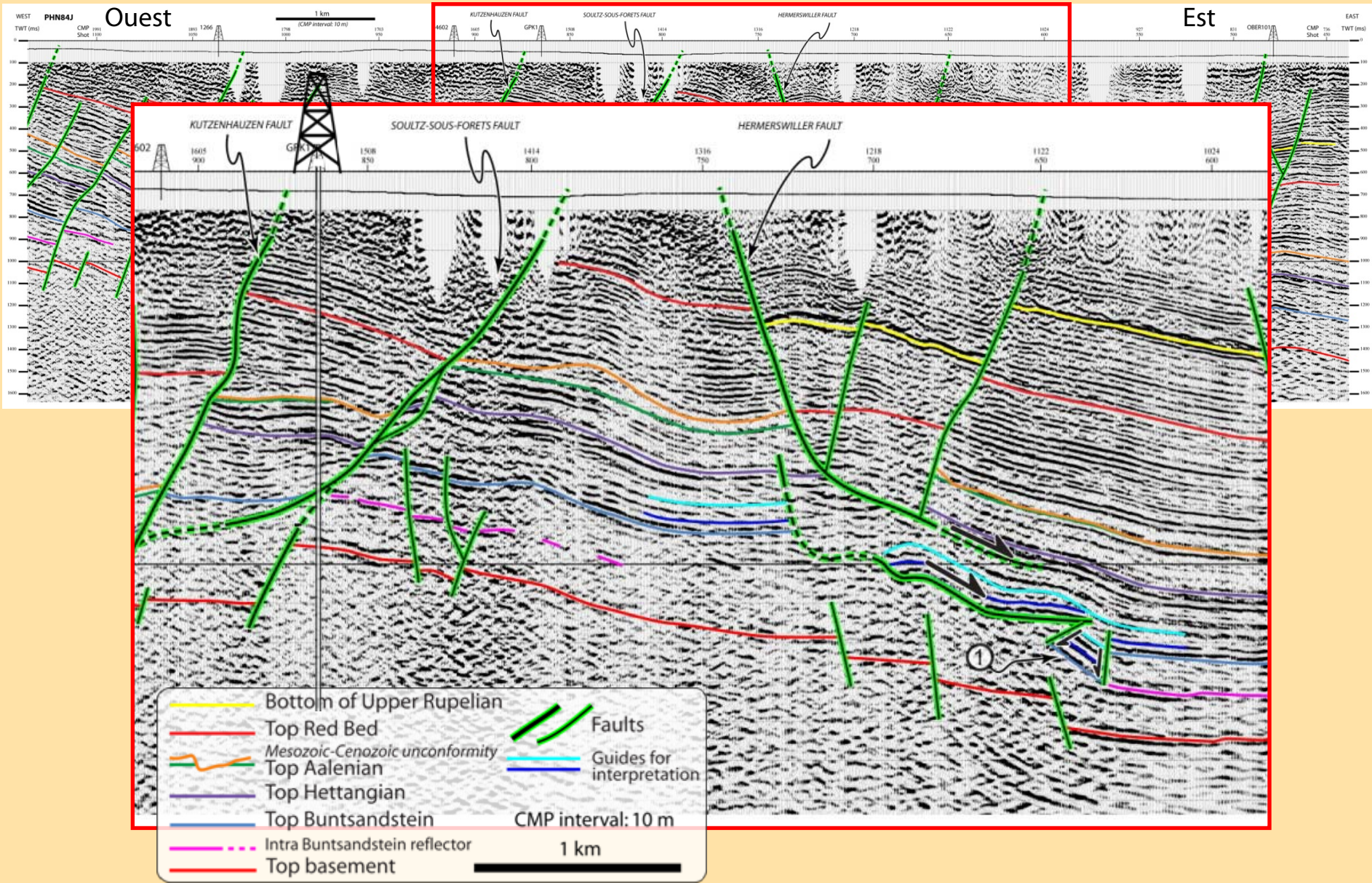


Nombreuses directions structurales
du fait des différents
épisodes de déformation

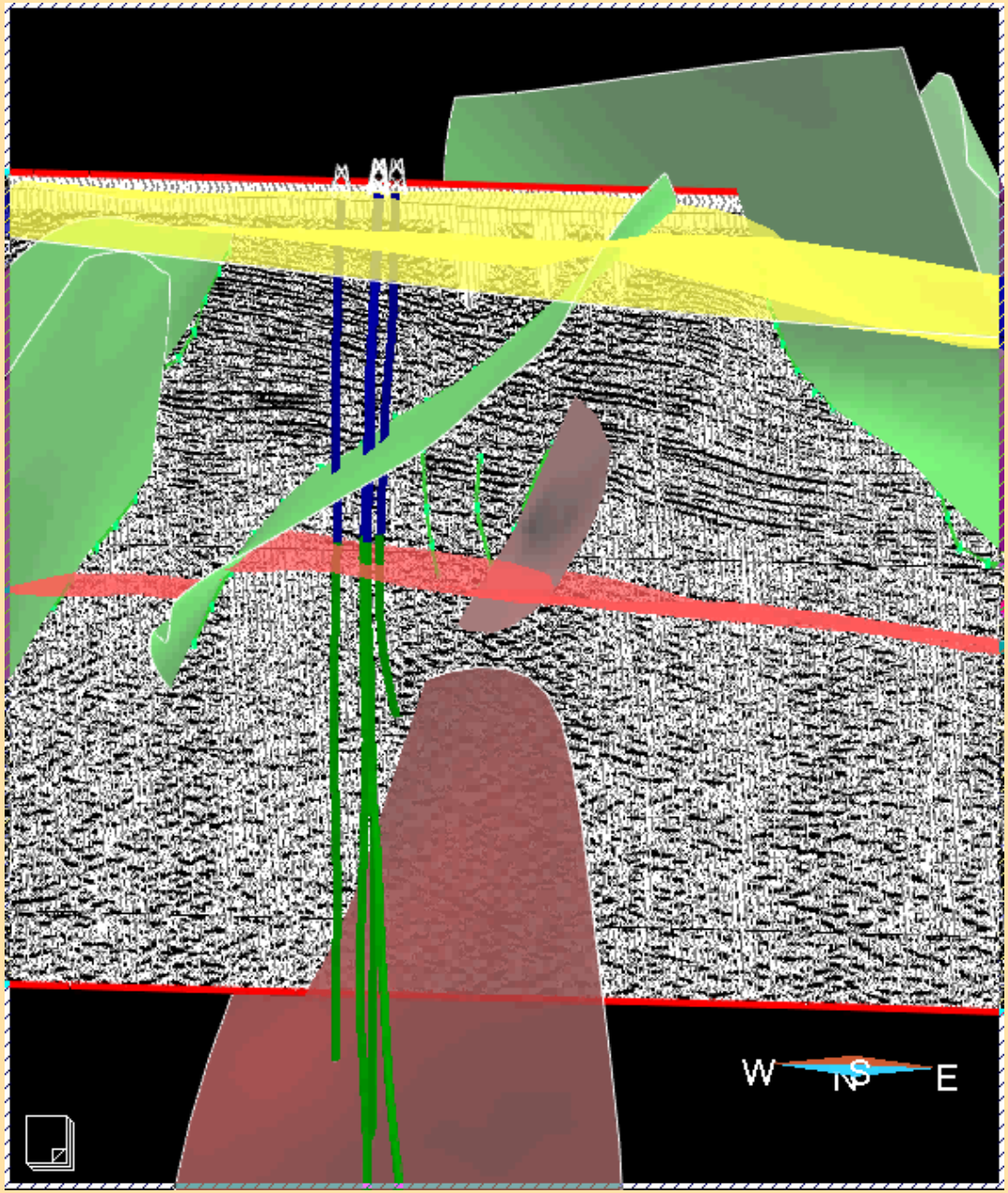


Ouest

Orientation

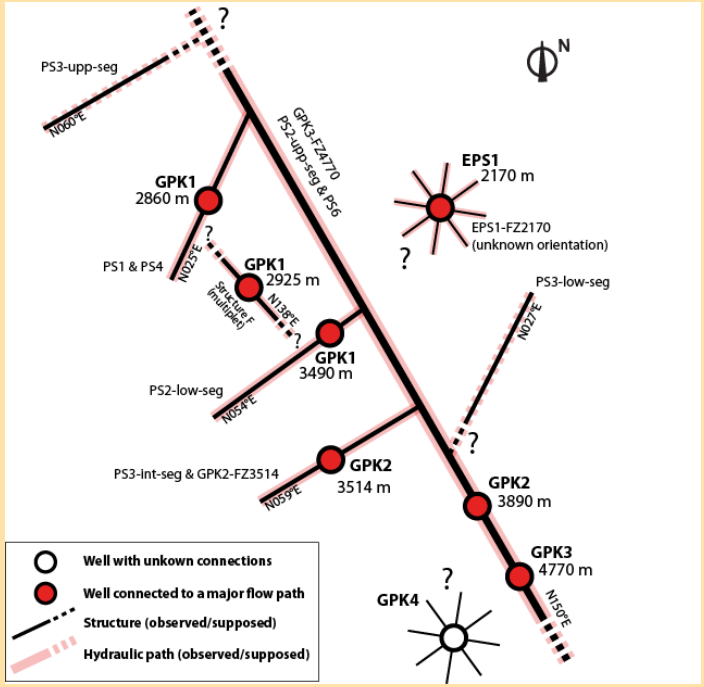


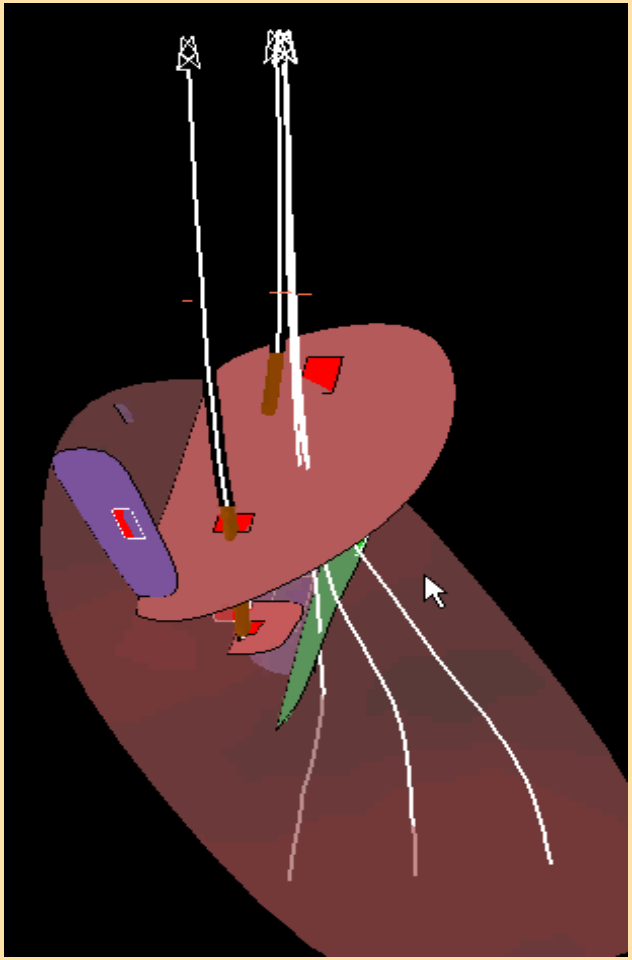
Orientation



CONCLUSION – **Méthodologie**

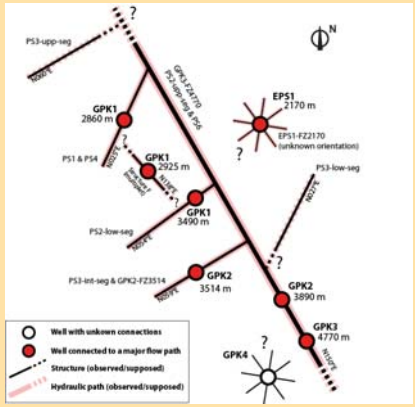
Les méthodes de caractérisation sont complémentaires. L'association de leurs résultats est essentielle pour élaborer un modèle de réservoir le plus réaliste possible.

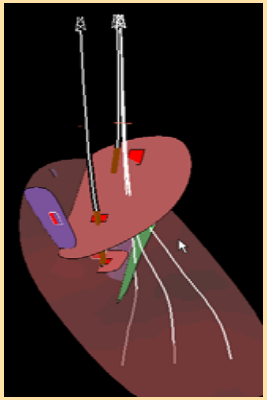




CONCLUSION – **Méthodologie**

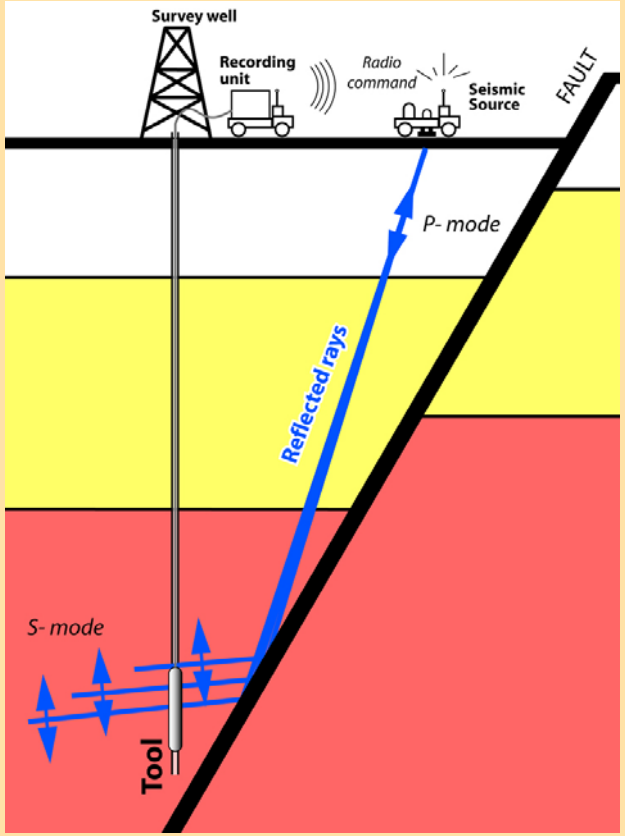
Les méthodes de caractérisation sont complémentaires. L'association de leurs résultats est essentielle pour élaborer un modèle de réservoir le plus réaliste possible.





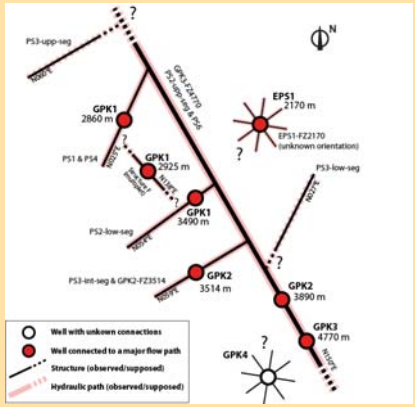
Sismique de puits :
Adaptation du VSP aux milieux cristallins, pour l'imagerie de failles de fort pendage.

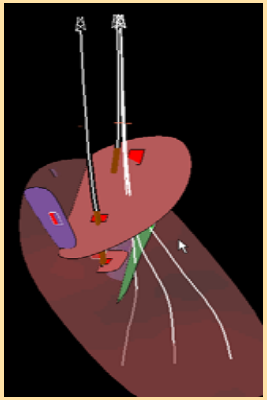
- arrivées « exotiques »



CONCLUSION – **Méthodologie**

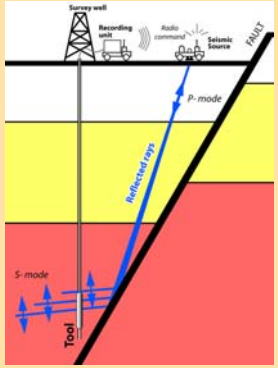
Les méthodes de caractérisation sont complémentaires. L'association de leurs résultats est essentielle pour élaborer un modèle de réservoir le plus réaliste possible.

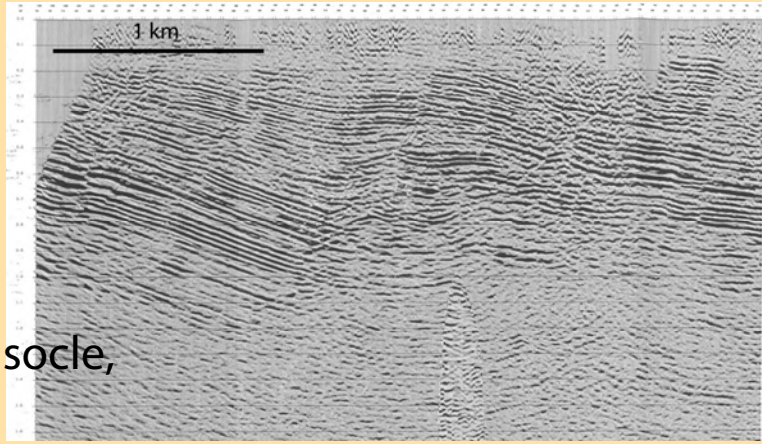




Sismique de puits :
Adaptation du VSP aux milieux cristallins, pour l'imagerie de failles de fort pendage.

- arrivées « exotiques »



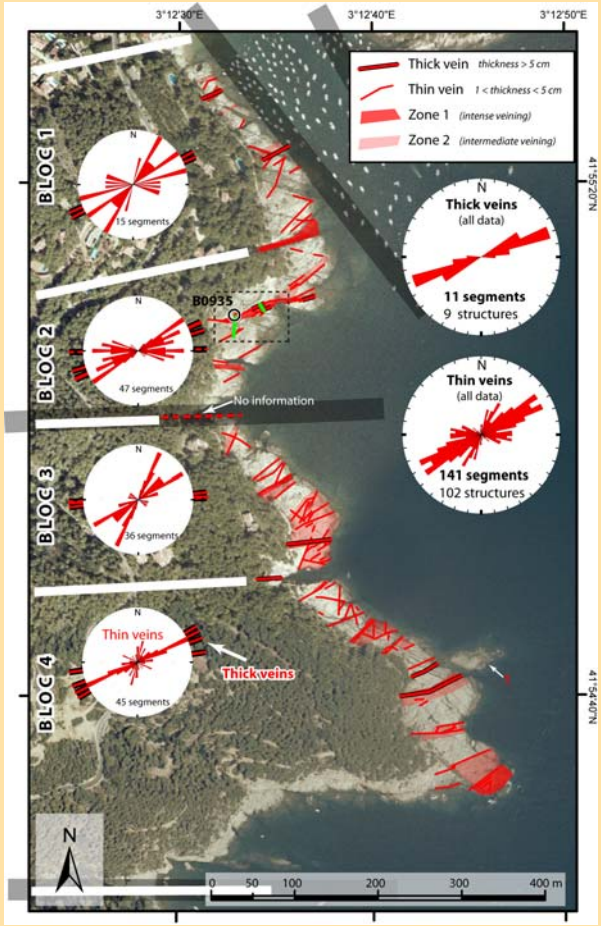


Sismique réflexion :
Validité restreinte au domaine sédimentaire, du fait :

- de la rareté de réflecteurs de faible pendage dans le socle,
- des paramètres d'acquisition et de traitement.

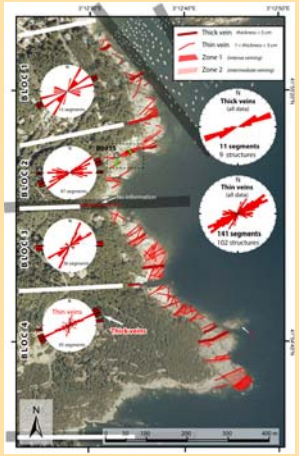
CONCLUSION – **Méthodologie**

Les marqueurs de circulation informent sur la distribution de réseaux de paléocirculations.

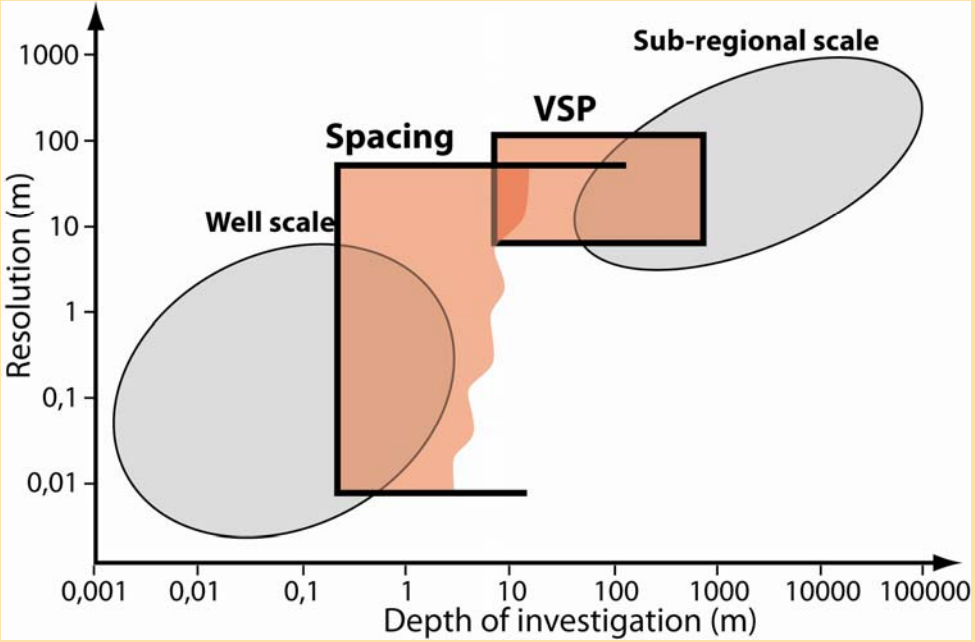


CONCLUSION – **Méthodologie**

Les marqueurs de circulation informent sur la distribution de réseaux de paléocirculations.

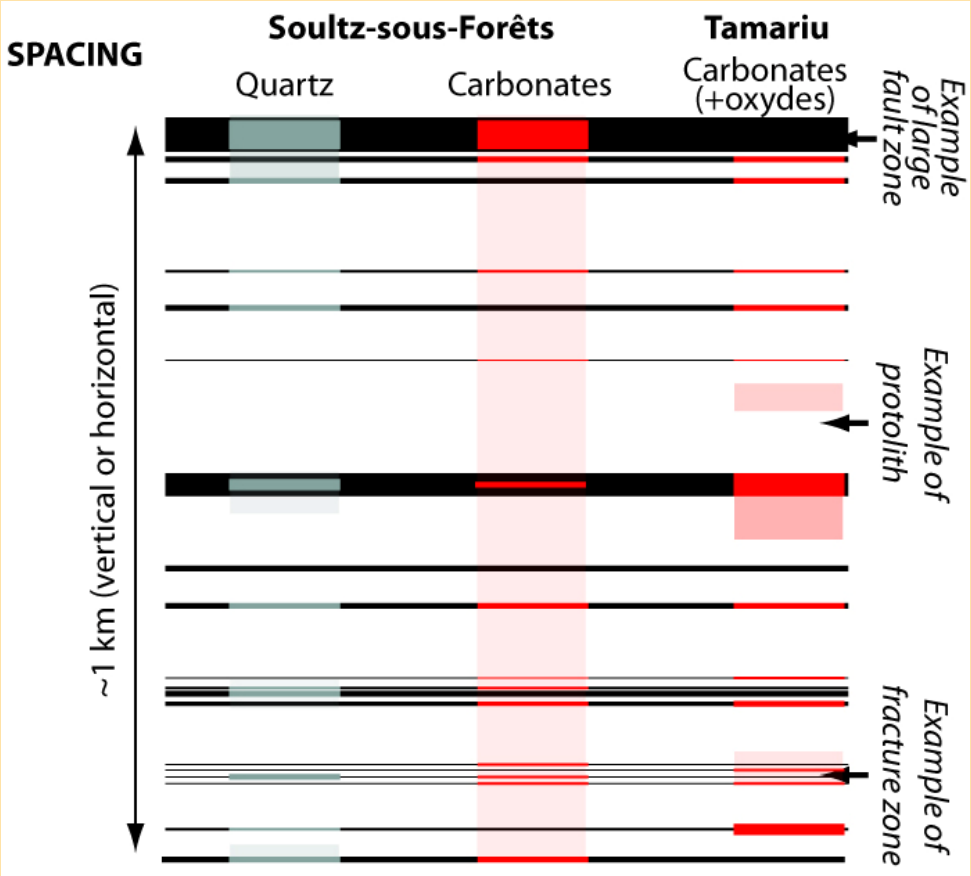


La sismique de puits et les méthodes statistiques permettent de caractériser la structuration à l'échelle du réservoir.



Soultz-sous-Forêts et Tamariu

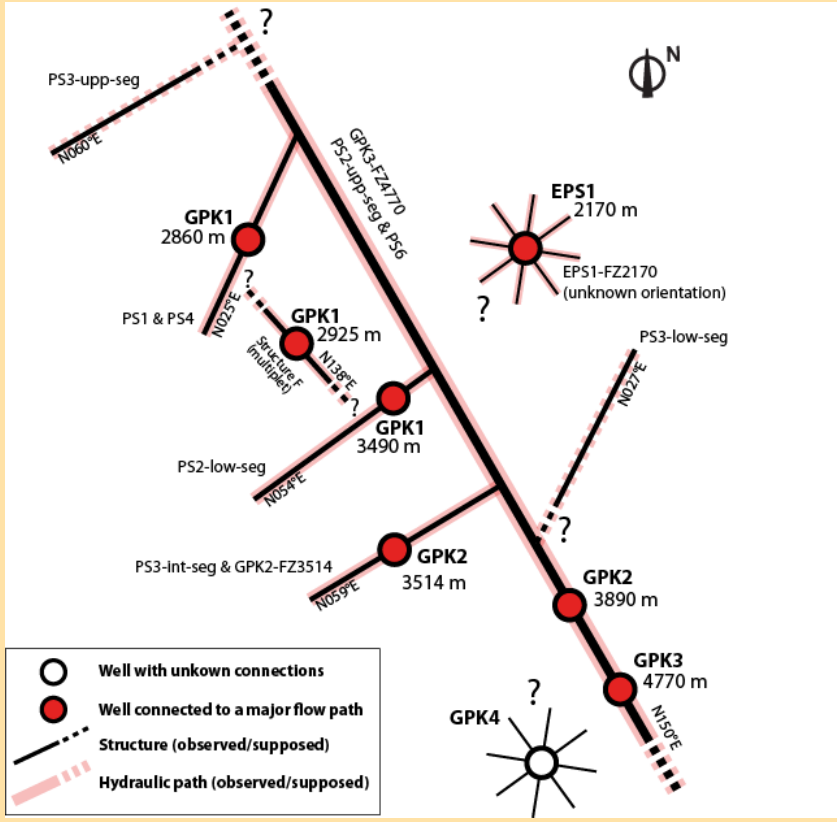
Différentes distributions de drains ont été identifiées. Les différences sont exprimées sur la base de la relation entre la localisation des structures et la distribution des marqueurs de circulation.



CONCLUSION – **Principaux résultats**

Soultz-sous-Forêts

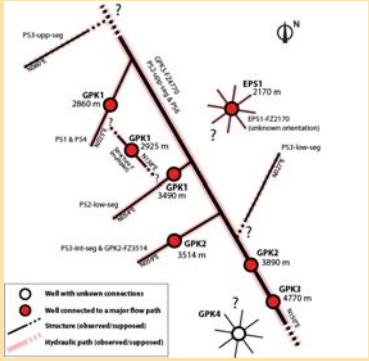
L'héritage varisque contribue aux circulations dans le socle.



CONCLUSION – **Principaux résultats**

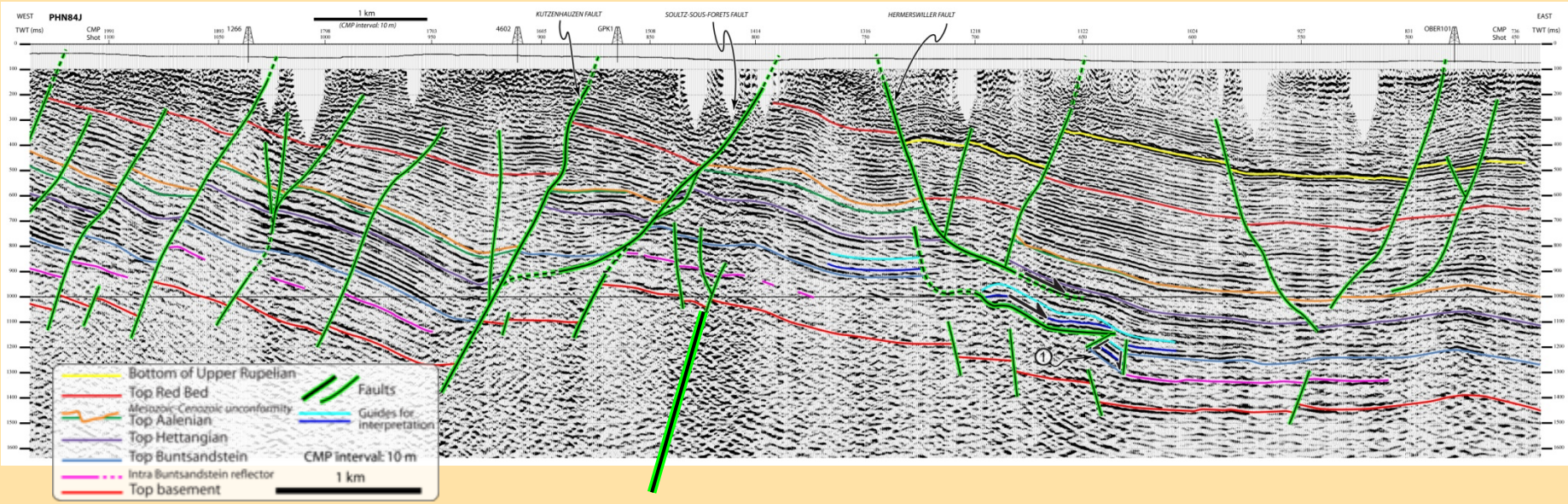
Soultz-sous-Forêts

L'héritage varisque contribue aux circulations dans le socle.



Une faille de dimensions kilométriques et d'orientation N150°E contrôle fortement la circulation au sein du socle. Elle n'est que très faiblement exprimée dans la couverture sédimentaire.

Des décollements découplent les réseaux structuraux de la couverture sédimentaire et du socle.



-> Ces résultats sont fondamentaux pour de futures explorations et caractérisations.

Merci…

E. Le Garzic, G. Herquel, J.B. Edel, M. Bano, F. Gauthier-Lafaye, P. Stille, R. Boutin, G. Morvan, F. Huber (Université de Strasbourg)

C. Naville (IFP), M. Cox (VSfusion), K.J. Sandmayer (SSS)

J. Sausse (Nancy Université), A. Genter (GEIE EMC)

C. Dezayes, I. Thinon (BRGM)