

# CHANTIER RGF - PYRÉNÉES

Pyrénées hercyniennes: déformation, thermicité, structuration, stratigraphie

Michel de Saint Blanquat (CNRS – GET) & Bryan Cochelin (ISTO)

04 juin 2019 - Pau

# plan

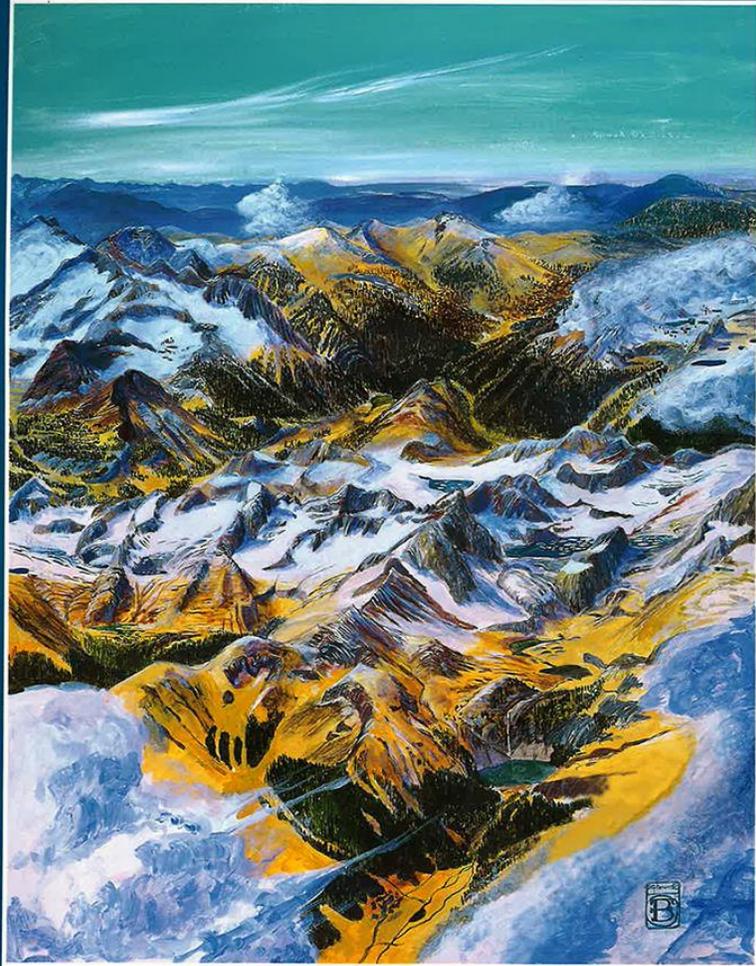
État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

Les travaux du chantier RGF-Pyrénées sur le cycle hercynien

- Sédimentologie – stratigraphie – paléo-environnement
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

# État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF



VOLUME 1

INTRODUCTION . GÉOPHYSIQUE . CYCLE HERCYNIEN



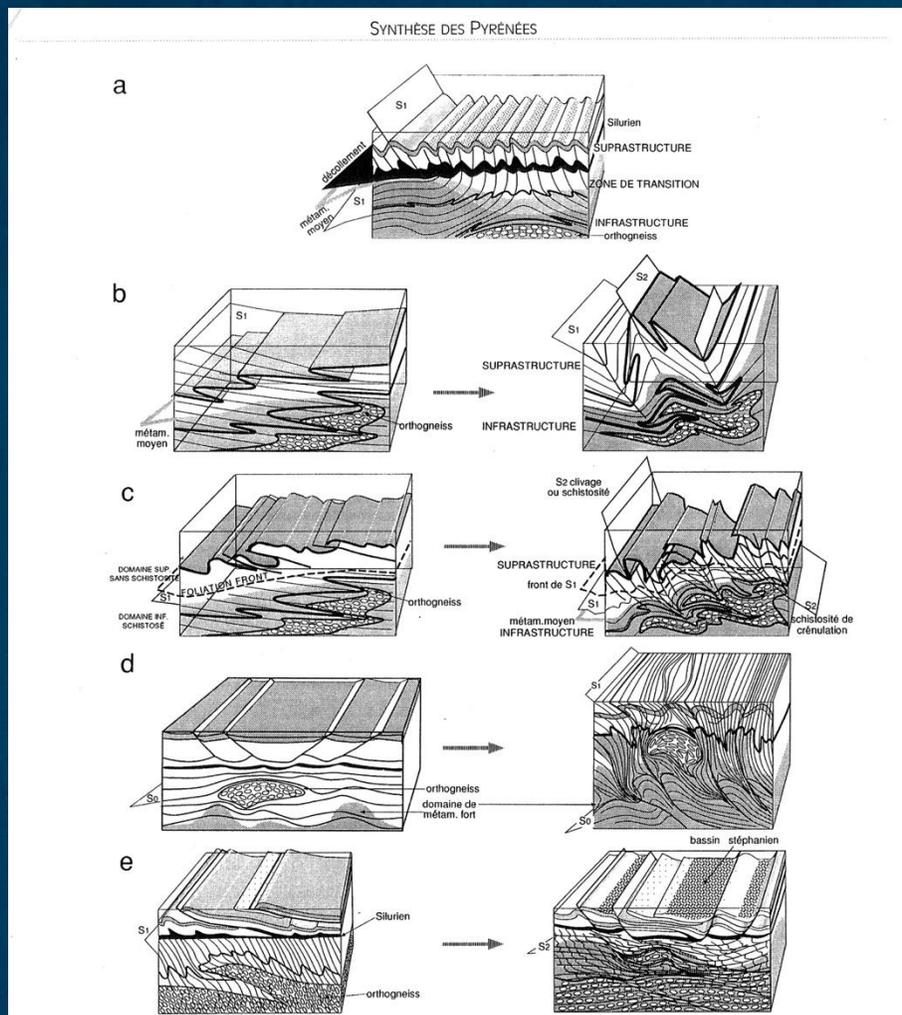
## État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

**Au commencement, il y avait le Grand Livre Bleu... (également appelé 'la Bible')**

(1996, une bonne 10<sup>aine</sup> d'années de travail)

« décrire les successions lithologiques du Paléozoïque des Pyrénées pour tenter s'en dégager la dynamique de sédimentation et présenter les caractères et l'évolution des grands phénomènes tectoniques, métamorphiques et magmatiques associés à l'orogénèse varisque. »

Autran et al., in Barnolas, Chiron, 1996



VOLUME 1

INTRODUCTION . GÉOPHYSIQUE . CYCLE HERCYNIE



# État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

Au commencement, il y avait le Grand Livre Bleu... (1996, une bonne 10<sup>aine</sup> d'années de travail)

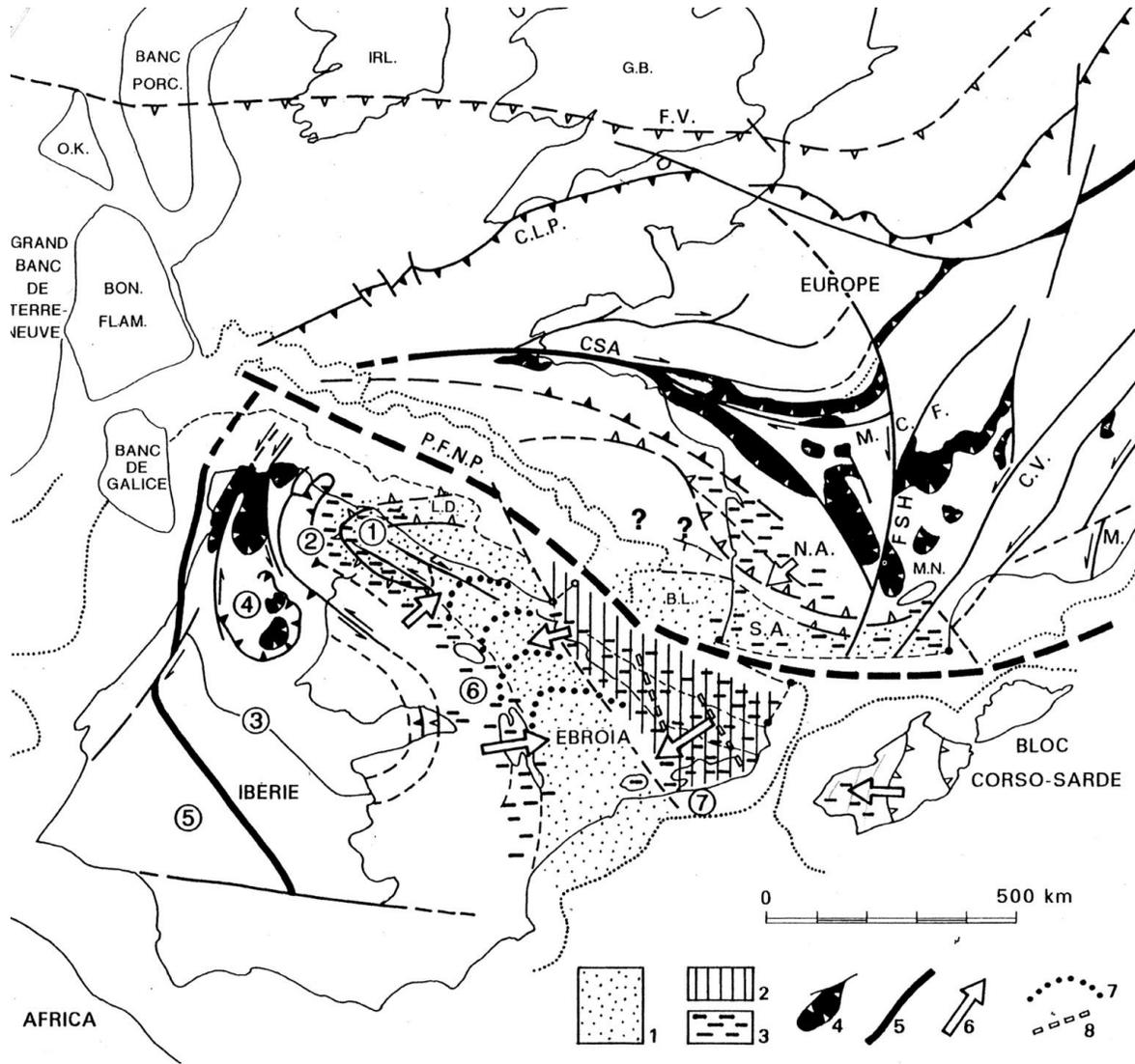
"chacune des approches stratigraphiques, sédimentologiques ou par grand processus, qui ont successivement présenté le point des connaissances dans les différents chapitres de ce mémoire, a déjà proposé ses propres conclusions, mais souvent sans relations suffisantes avec l'ensemble des faits acquis dans d'autres domaines thématiques".

« les étapes et les conditions dynamiques des déformations orogéniques dans cette zone externe de la chaîne varisque ne font toujours pas l'objet d'un consensus. »

Autran et al., in Barnolas, Chiron, 1996



# État des questions sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF



Intégration des 'différents domaines thématiques' ? Par exemple : relations surface (enregistrement sédimentaire) / profond ?

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

Le Permien ?

Singularité et place des Pyrénées dans l'orogène varisque ?

L'anté varisque ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque, varisque sur l'hyper-extension, hyper-extension sur la collision pyrénéenne etc... ?

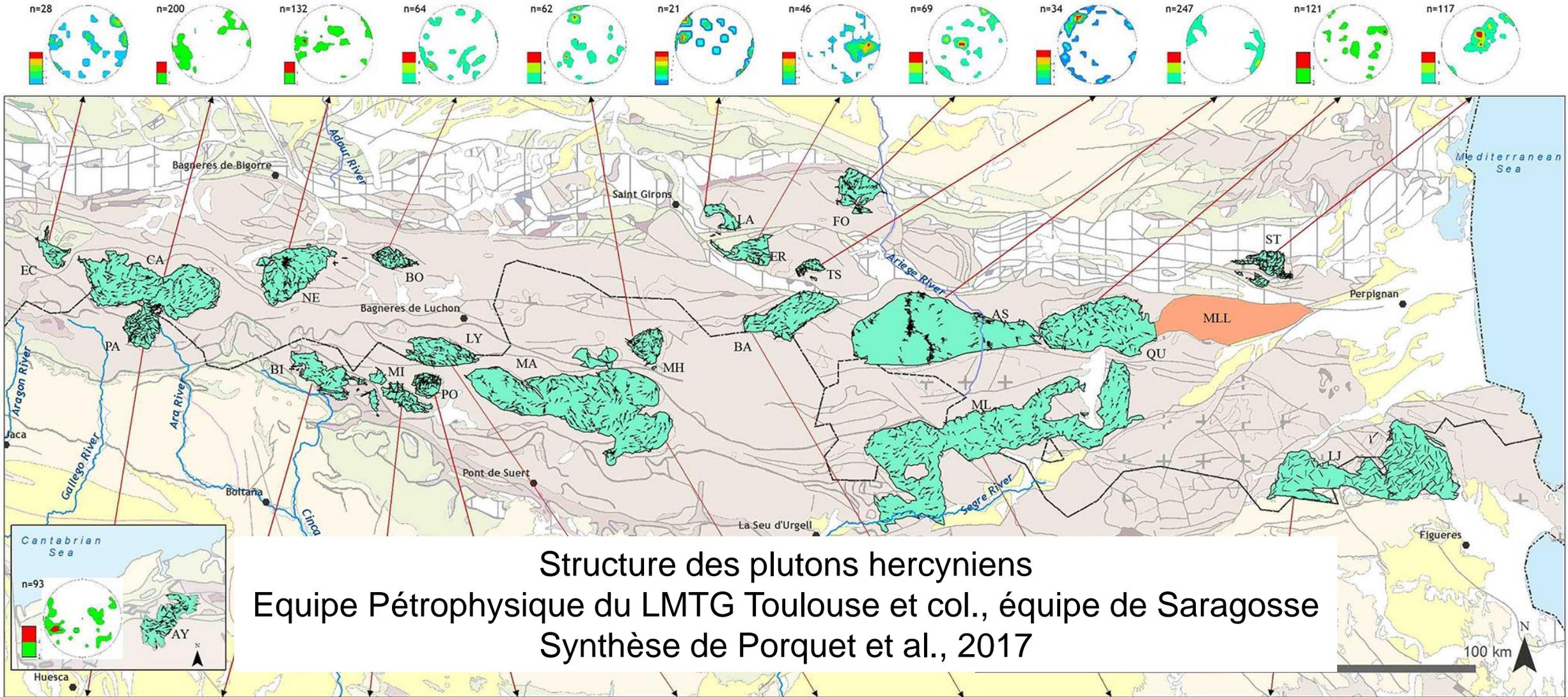
Reconstitution à la fin du Paléozoïque; Autran et al., in Barnolas, Chiron, 1996

# Travaux entre la Synthèse et le RGF...

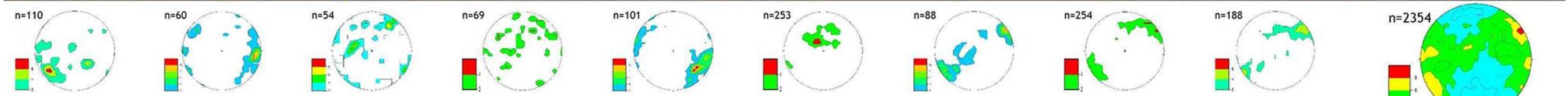
- Les équipes françaises (Toulouse : Denèle, Gleizes, Bouchez, Olivier...; Nancy : Laumonier, Barbey, Deloule...)
- Côté espagnol (Carreras, Druguet, Vilà, Aguilar, Garcia-Sansegundo...)
- Les anglo-saxons (Mezger, Roberts...)
- Le 50000<sup>ème</sup> du BRGM et travaux afférents
- ...

# Magnetic Lineation in Pyrenean Plutons

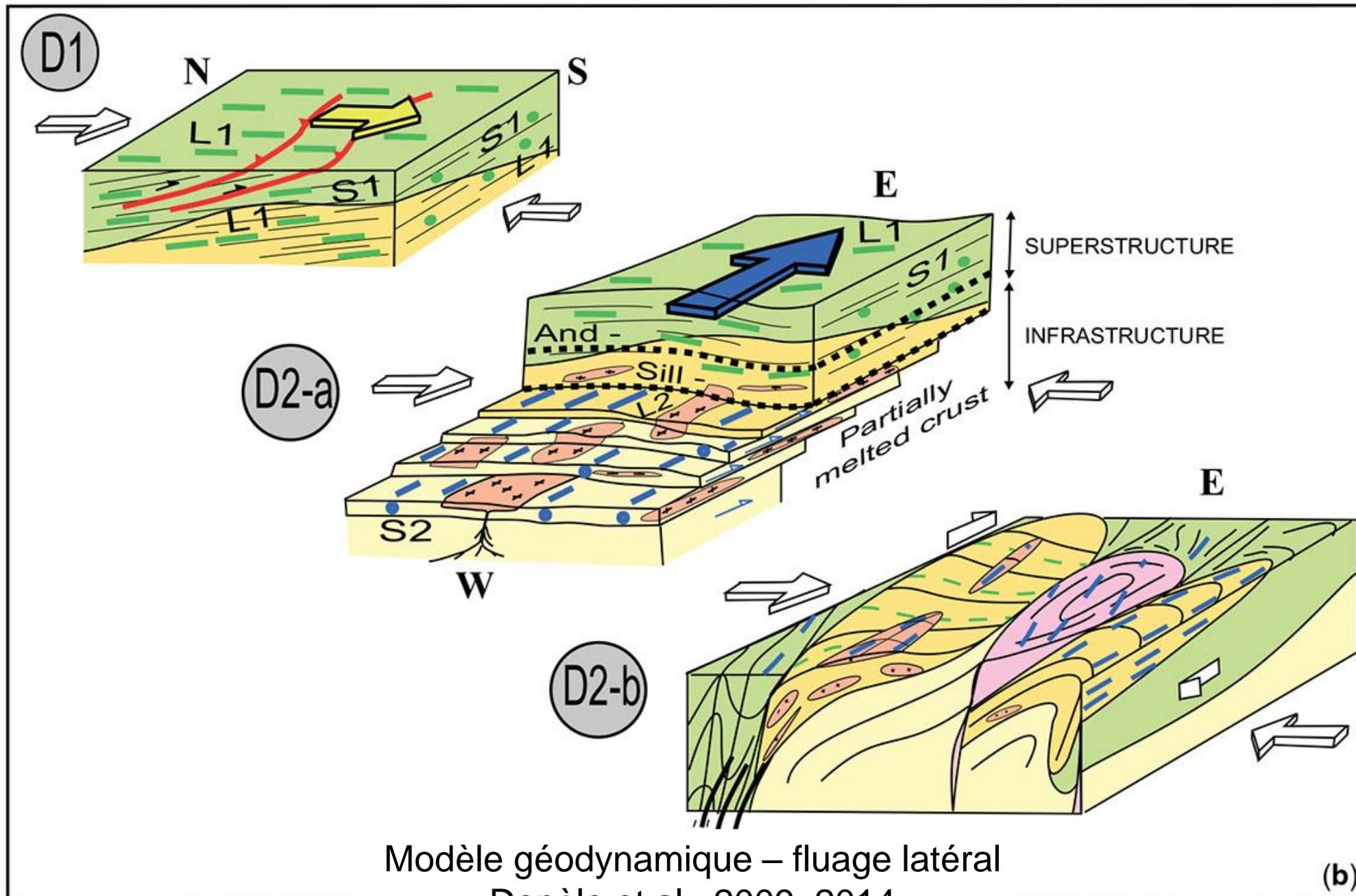
Authors: Manuel Porquet (UZ - mppardina@gmail.com), Emilio L. Pueyo (IGME - unaim@igme.es), Luis A. Longares (UZ - lalongar@unizar.es)



Structure des plutons hercyniens  
Equipe Pétrophysique du LMTG Toulouse et col., équipe de Saragosse  
Synthèse de Porquet et al., 2017



Background geologic map simplified from Barnolas et al. (2008) following the cartographic style by Choukroune and Seguret (1973) - Stereographic projection of magnetic lineation (site-means) for every granite pluton.



Modèle géodynamique – fluage latéral  
 Denèle et al., 2009, 2014

5 thèses, 13 M2

### **Pyrénées pré-varisques**

Thèses Padel 2017 : Biostratigraphie et paléogéographie de l'Ediacarien-Cambrien (pré-discordance sarde) des Pyrénées orientales.

M2 Lebon 2014 : Caractérisation des terrains de l'Ordovicien supérieur des Pyrénées.

### **Pyrénées varisques**

Thèses :

*Negrel : Vers une cartographie et une contrainte spatio-temporelle des bassins dévoniens des Pyrénées.*

Cochelin 2017 : Structure, champ de déformation et cinématique de la croûte varisque des Pyrénées : approche tridimensionnelle

Lemirre 2018 : Origine et développement de la thermicité dans les Pyrénées varisques, conséquences sur l'évolution du segment ouest-européen de l'orogène

Cugerone 2019 : Mobilité hydrothermale des métaux stratégiques (Ge, Ga, Cd, In) associés aux minéralisations Pb-Zn lors de l'histoire tectono-métamorphique hercynienne des Pyrénées.

Link 2019 : Les minéralisations aurifères : marqueurs des circulations de fluides crustaux au cours de l'évolution tardi-orogénique Varisque des Pyrénées

M2:

Rudmann 2014 : L'évolution spatiale et temporelle des faciès des Pyrénées centrales et occidentale du Eifélien au Frasnien (Dévonien).

Yao 2017 : Utilisation des zircons détritiques et du traçage Sm-Nd sur roche totale pour contraindre la répartition des sédiments dans le « bassin » Dévonien des Pyrénées.

Vanardois 2017 : Quelle est la contribution des événements varisques et alpins dans la structuration du massif de l'Agly ? Evidences cartographiques et géochronologiques des relations entre déformation, métamorphisme et magmatisme.

Cugerone 2016 : Place des métaux stratégiques au cours de l'histoire hercynienne des Pyrénées : l'exemple du dôme du Bosost (Haute Garonne)

Hoym de Marien 2016 : Le métamorphisme barrovien des Pyrénées orientales : réalité ou vœu pieux ? Exemple du massif du Canigou

Tournaire-Guille 2014 : Etude de la croissance crustale varisque dans un secteur des Pyrénées (Massif de l'Agly, Zone nord-pyrénéenne)

Expert 2014 : Mise en place des dômes migmatitiques dans les Pyrénées orientales. Etude du métamorphisme varisque de HT/BP et de son lien avec la structuration des dômes : exemple des Albères (Pyrénées Orientales).

Taillefer 2014 : Mécanismes de plissement associés à la mise en place des grandes nappes et plis couchés dans le prisme Pyrénéen : Impact de l'érosion-sédimentation et de l'héritage structural Hercynien.

Angrand 2014 : Caractérisations géométrique et cinématique des structures varisques (Carbonifère-Permien) de la Zone Axiale, Vallée des Nestes, Hautes-Pyrénées

### **Pyrénées tardi-post-varisques**

M2 Vines 2015 : Le magmatisme post-varisque de la chaîne pyrénéenne : Caractérisation des sources et datation.

M2 Chopin 2016 : Les bassins stéphano-permiens des Pyrénées: Evolution tectonique et sédimentaire - relation avec l'histoire tardi-varisque

# plan

## État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

## Le chantier RGF-Pyrénées : 5 thèses et 13 M2 sur l'anté-cycle alpin

- Sédimentologie - stratigraphie
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

## Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

5 thèses, 13 M2

### **Pyrénées pré-varisques**

Thèses Padel 2017 : Biostratigraphie et paléogéographie de l'Ediacarien-Cambrien (pré-discordance sarde) des Pyrénées orientales.

M2 Lebon 2014 : Caractérisation des terrains de l'Ordovicien supérieur des Pyrénées.

### **Pyrénées varisques**

Thèses :

*Negrel : Vers une cartographie et une contrainte spatio-temporelle des bassins dévoniens des Pyrénées.*

*Cochelin 2017 : Structure, champ de déformation et cinématique de la croûte varisque des Pyrénées : approche tridimensionnelle*

*Lemirre 2018 : Origine et développement de la thermicité dans les Pyrénées varisques, conséquences sur l'évolution du segment ouest-européen de l'orogène*

*Cugerone 2019 : Mobilité hydrothermale des métaux stratégiques (Ge, Ga, Cd, In) associés aux minéralisations Pb-Zn lors de l'histoire tectono-métamorphique hercynienne des Pyrénées.*

*Link 2019 : Les minéralisations aurifères : marqueurs des circulations de fluides crustaux au cours de l'évolution tardi-orogénique Varisque des Pyrénées*

M2:

*Rudmann 2014 : L'évolution spatiale et temporelle des faciès des Pyrénées centrales et occidentale du Eifelien au Frasnien (Dévonien).*

*Yao 2017 : Utilisation des zircons détritiques et du traçage Sm-Nd sur roche totale pour contraindre la répartition des sédiments dans le « bassin » Dévonien des Pyrénées.*

*Vanardois 2017 : Quelle est la contribution des événements varisques et alpins dans la structuration du massif de l'Agly ? Evidences cartographiques et géochronologiques des relations entre déformation, métamorphisme et magmatisme.*

*Cugerone 2016 : Place des métaux stratégiques au cours de l'histoire hercynienne des Pyrénées : l'exemple du dôme du Bosost (Haute Garonne)*

*Hoym de Marien 2016 : Le métamorphisme barrovien des Pyrénées orientales : réalité ou vœu pieux ? Exemple du massif du Canigou*

*Tournaire-Guille 2014 : Etude de la croissance crustale varisque dans un secteur des Pyrénées (Massif de l'Agly, Zone nord-pyrénéenne)*

*Expert 2014 : Mise en place des dômes migmatitiques dans les Pyrénées orientales. Etude du métamorphisme varisque de HT/BP et de son lien avec la structuration des dômes : exemple des Albères (Pyrénées Orientales).*

*Taillefer 2014 : Mécanismes de plissement associés à la mise en place des grandes nappes et plis couchés dans le prisme Pyrénéen : Impact de l'érosion-sédimentation et de l'héritage structural Hercynien.*

*Angrand 2014 : Caractérisations géométrique et cinématique des structures varisques (Carbonifère-Permien) de la Zone Axiale, Vallée des Nestes, Hautes-Pyrénées*

### **Pyrénées tardi-post-varisques**

*M2 Vines 2015 : Le magmatisme post-varisque de la chaîne pyrénéenne : Caractérisation des sources et datation.*

*M2 Chopin 2016 : Les bassins stéphano-permiens des Pyrénées: Evolution tectonique et sédimentaire - relation avec l'histoire tardi-varisque*

# plan

## État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

## Le chantier RGF-Pyrénées : 5 thèses et 13 M2 sur l'anté-cycle alpin

- Sédimentologie - stratigraphie
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

## Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

# plan

État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

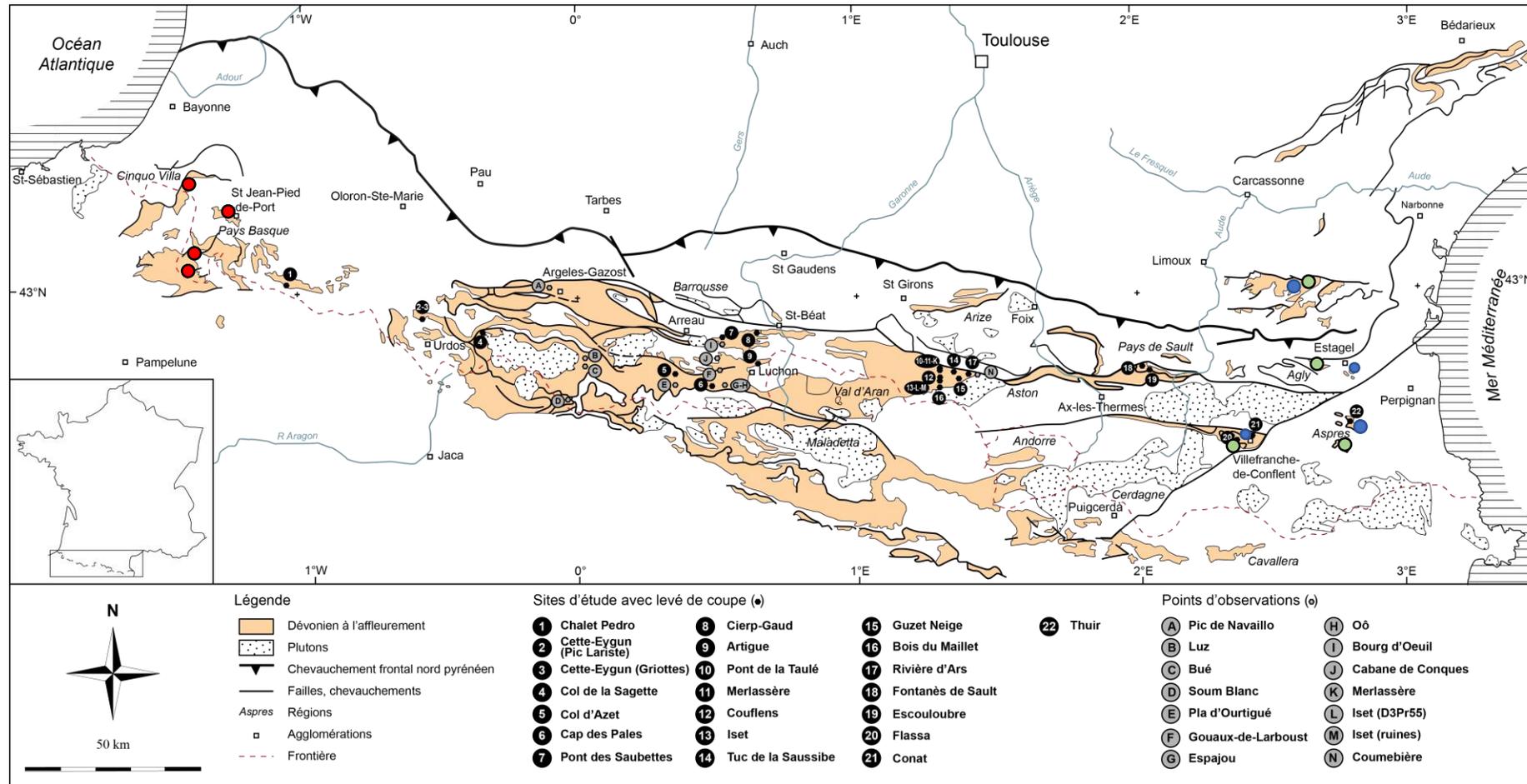
Le chantier RGF-Pyrénées

- Sédimentologie – stratigraphie – paléo-environnement
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

# Sédimentologie - stratigraphie

Cible : Faciès et évolution de bassin; Ordovicien supérieur et Dévonien



Travaux encadré par M. Aretz & E. Nardin :

- D Manon NÈGREL (2015-8) : *Evolution temporelle, géographique et environnementale du Dévonien des Pyrénées*
- M2 Alexis LEBON (2014) : *Caractérisation des terrains de l'Ordovicien supérieur des Pyrénées orientales*
- M2 Mathieu RUDMAN (2014) : *Evolution spatiale et temporelle des faciès des Pyrénées orientales de l'Eifélien au Frasnien (Dévonien)*
- M2 Serge YAO (2017) : *Le Dévonien du Pays Basque : Caractérisation paléoenvironnementale d'un système mixte (rampe ?) et ses variations spatio-temporelles (faciès, milieux des dépôts, et provenance des sédiments détritiques)*

## Pyrénées orientales et Mouthoumet

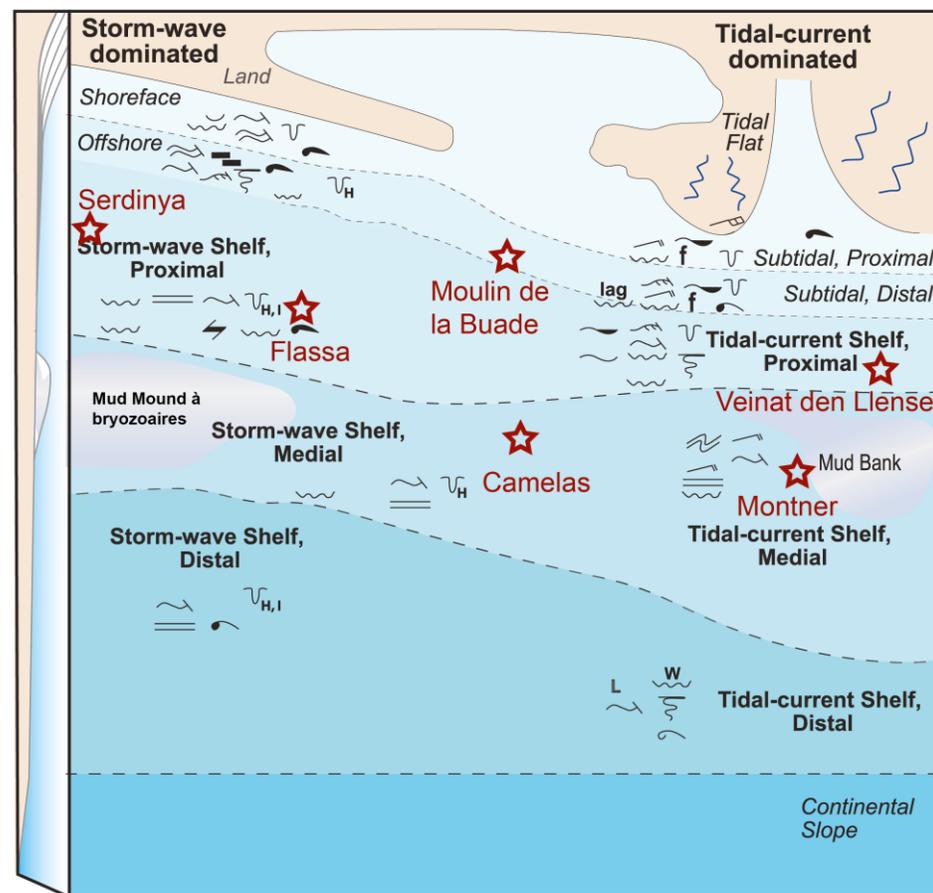
- **Dépôts de rampe mixte** dominée tempête pour le synclinal de Villefranche et dominée marée pour l'Agly, le Mouthoumet et les Aspres
- Enregistrement très localisé du volcanisme mi-ordovicien et de la **glaciation fini-ordovicienne**
- Forte hétérotopie des séries mais développement homogénéisé des carbonates d'eau froide (assemblage hétérozoaires)
- Faible calage stratigraphique et besoin de réétudier toute la pile sédimentaire pour entrevoir les paléotopographies et événements
- Quelques problèmes de cartographie...



Marbres katiens, Agly



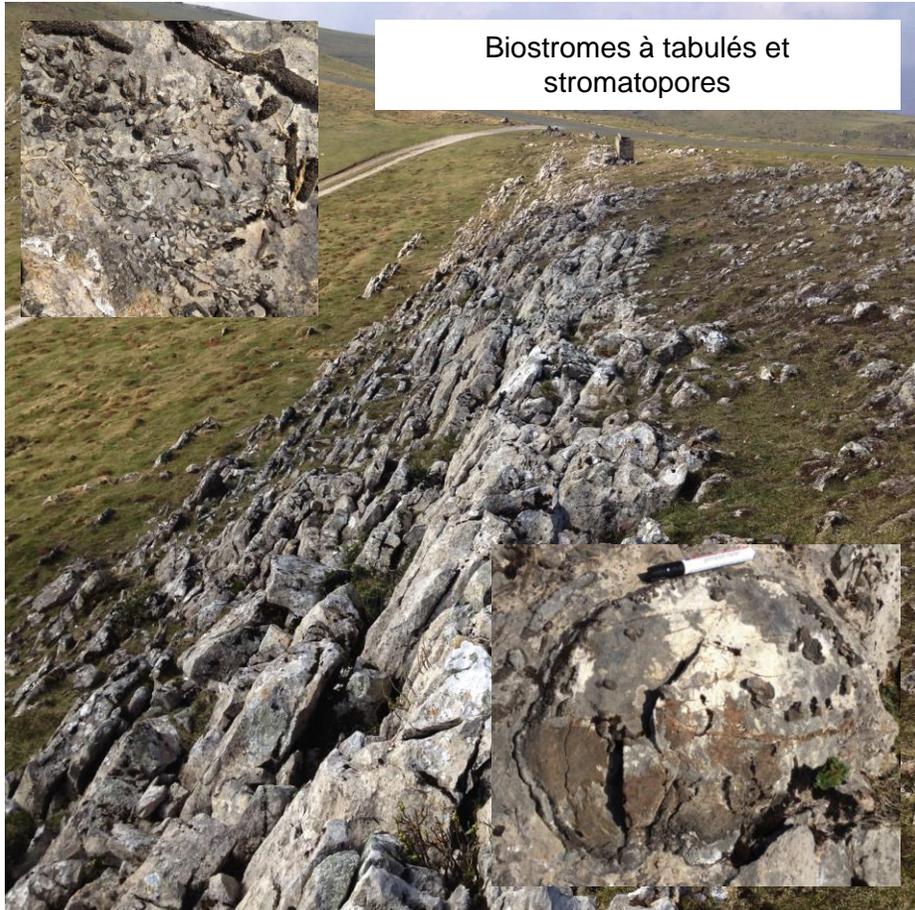
Schistes fossilifères sandbiens, Villefranche



# Les bioconstructions coralliennes du Dévonien

## Pays Basque

- au Dévonien inférieur (Emsien)
- **très rare en Europe; une première pour la France**
- des morphologies plates sur la plate-forme moyenne



# Sédimentologie - stratigraphie

## Corbières

- **Eifelien (Dév. moyen), et pas Carbonifère** comme cartographié !
- Du récifal entouré par de faciès profond : un ancien haut fond?



*Favosites* sp.



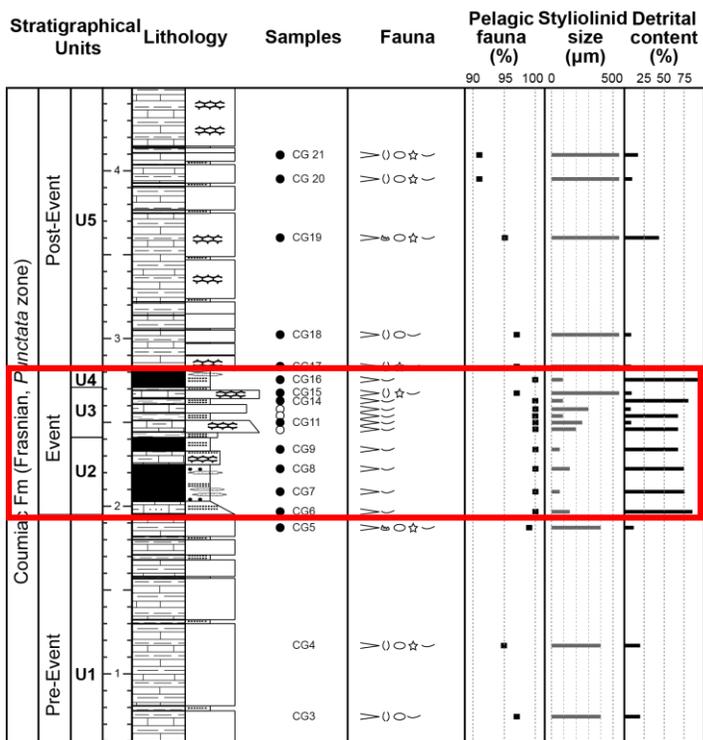
*Thamnopora* sp.



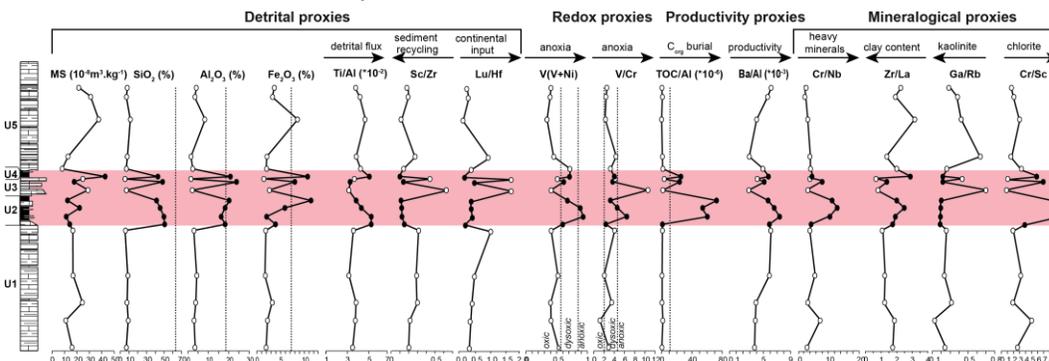
*Mesophyllum* sp.

- Trouvé pour la première fois dans les Pyrénées
- Horizon de schistes noirs dans un faciès carbonaté de rampe externe

➔ crise environnementale, extinction du benthos



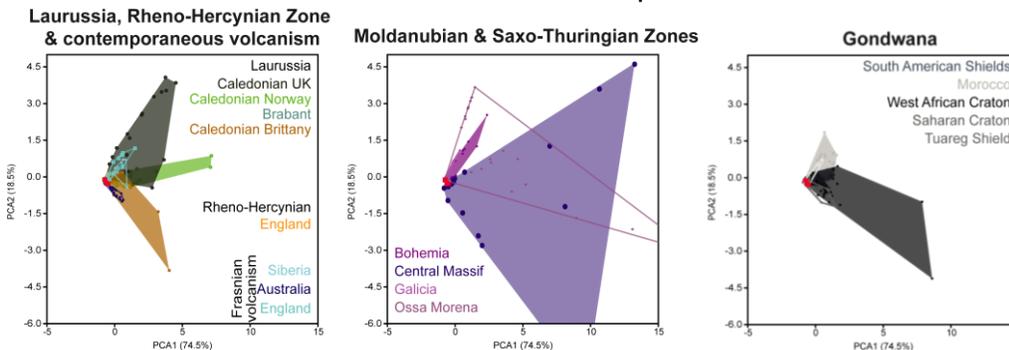
- Détritisme, productivité et condition redox



- Schistes noirs sans anoxie ni augmentation de bioproduktivité primaires
- Variation bathymétrique non significative
- Apport détritique plus important concomitant à un arrêt de la production carbonatée

⇒ Liens entre éruption sous-marine et chimie océanique

- Sources des sédiments détritiques



- Principales sources à signatures de roches ignées mixtes felsiques/mafiques
- Sources proches mais signature forte des calédonides baltes

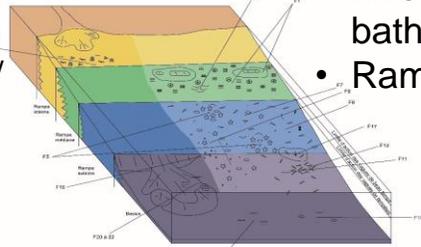
⇒ Terrane péri-gondwanienne en mer épicontinentale + relief sud-laurussien

- Changement lithologique brutal
- Disparition de la vie benthique et nanisme du pélagos

## Les reconstructions théoriques

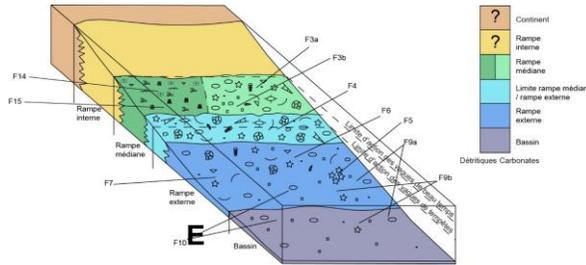
### Frasnien

- Plate-forme très hétérogène avec des différences de bathymétrie importantes
- Rampe mixte détritique / carbonatée

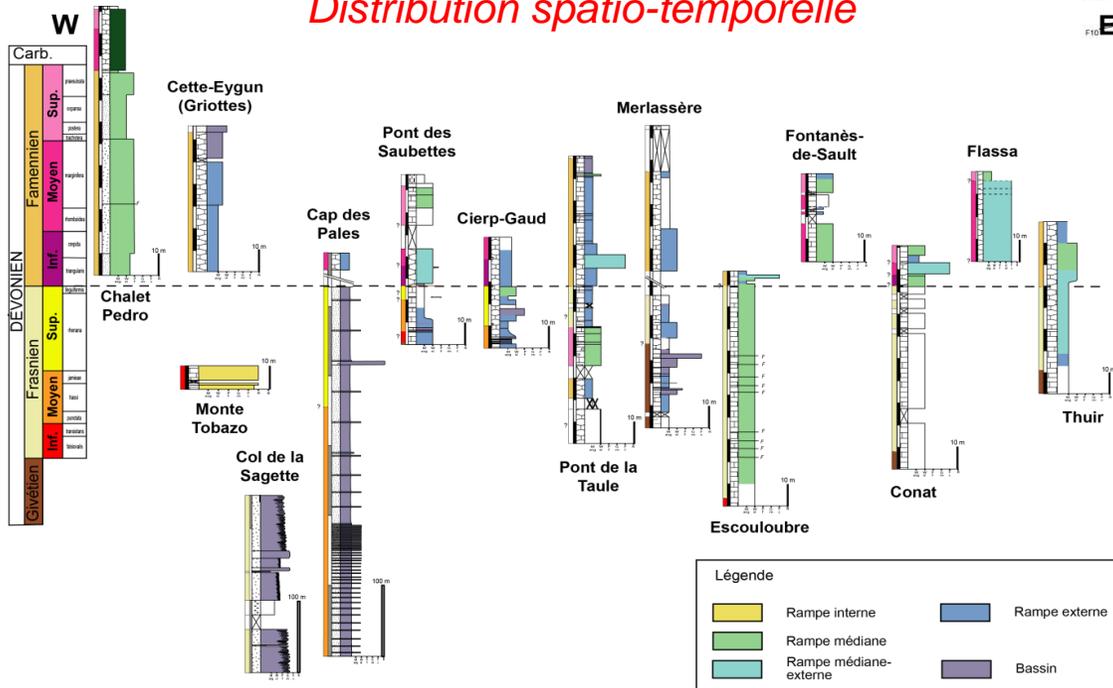


### Famennien

- Plate-forme plus homogène; nivellement des différences bathymétriques
- Rampe carbonatée, souvent distale



## Distribution spatio-temporelle



- Bassin pyrénéen comme partie d'un bassin beaucoup plus grand.
- Au Frasnien, Pyrénées: bassin sous-divisé en plusieurs compartiments avec développement des dépocentres locaux.
- Les faciès les plus profonds se trouvent au centre des Pyrénées et pas au NNE comme proposé antérieurement.
- Une tectonique extensive contrôle partiellement ces compartiments et la distribution de faciès (au Frasnien)
- Une forte hétérogénéité des faciès 'griotte' et de leurs équivalents plus profonds (Famennien inférieur)

# plan

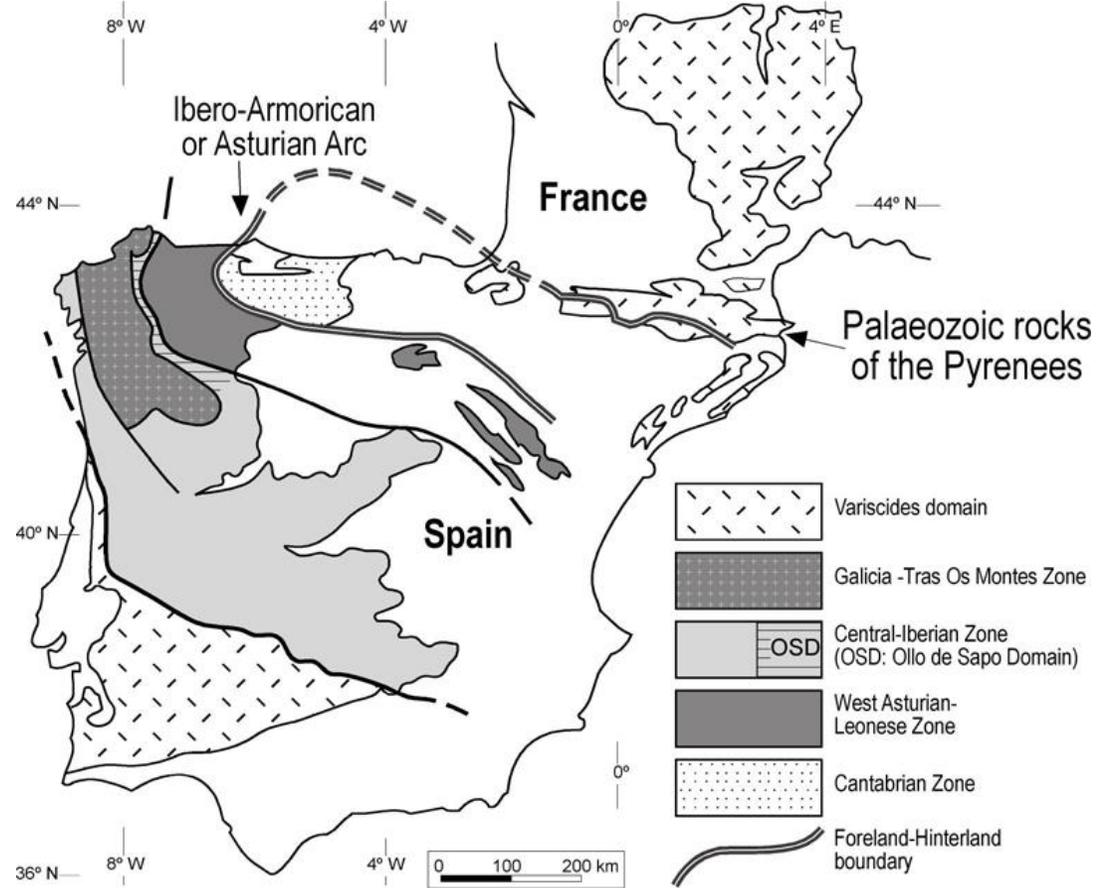
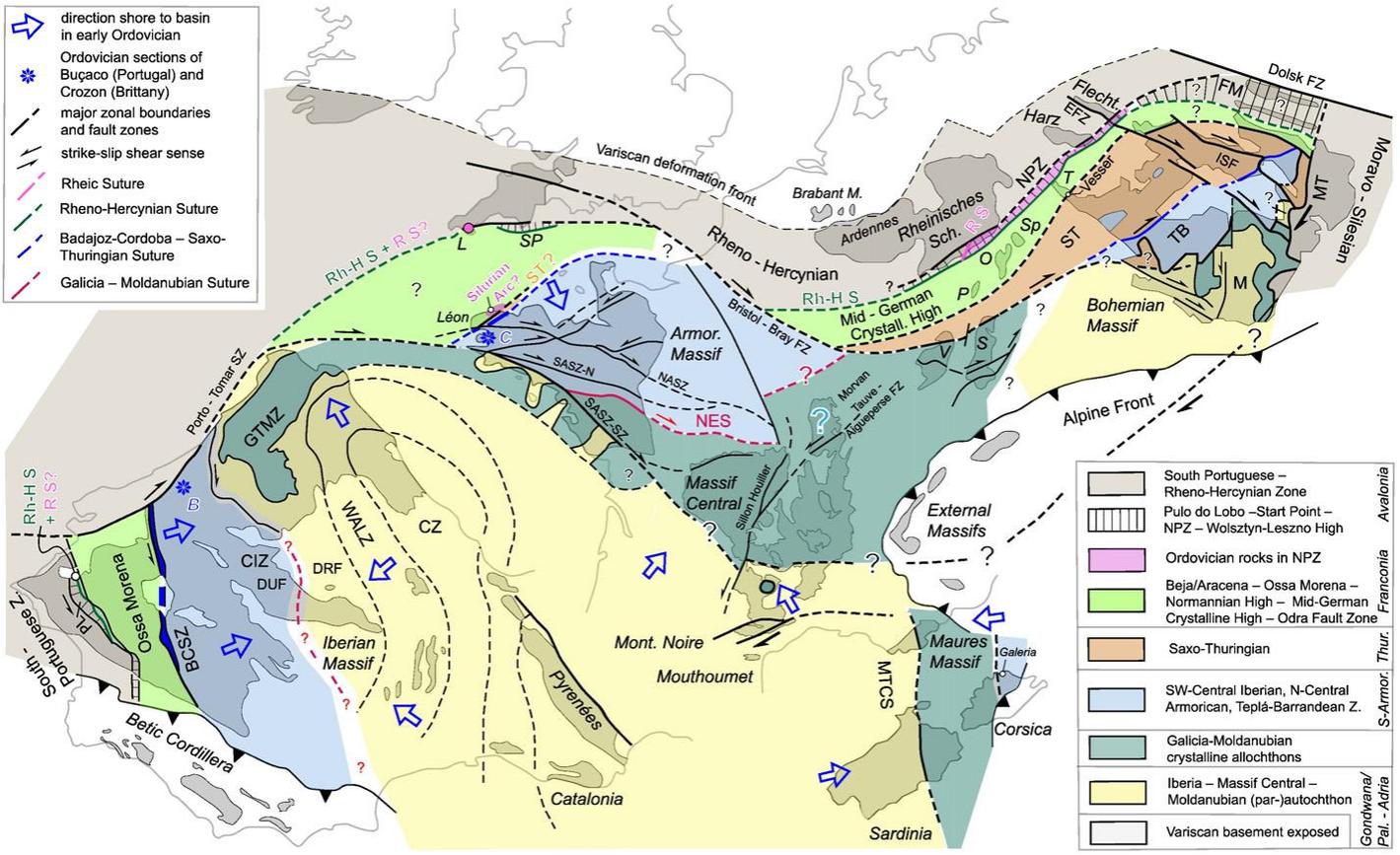
État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

**Le chantier RGF-Pyrénées**

- Sédimentologie – stratigraphie – paléo-environnement
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

# Position in the Variscan belt



Franke, 2014

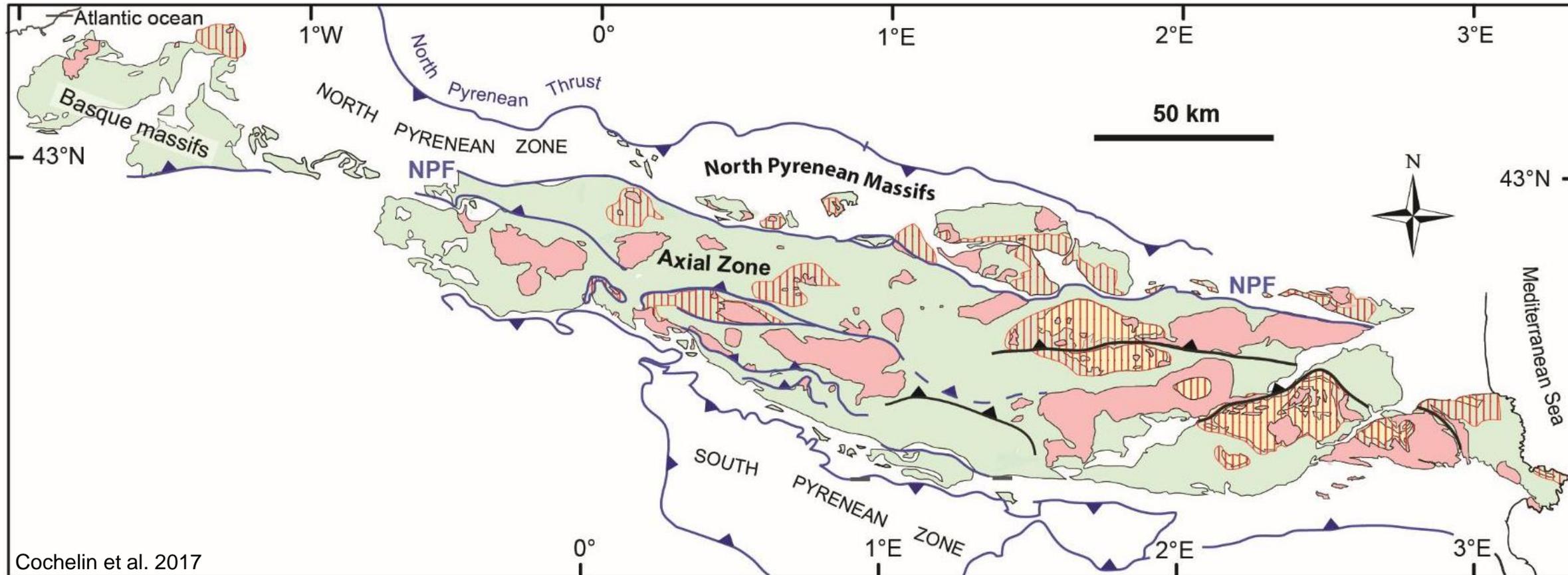
García-Sansegundo et al., 2011

Foreland? Hinterland? Unknown?

Why the position of the Pyrenees in the belt is still unclear?  
 → Displacement of the Iberian plate during the Mesozoic and....

Some specificities

# Specificities of the Pyrenees

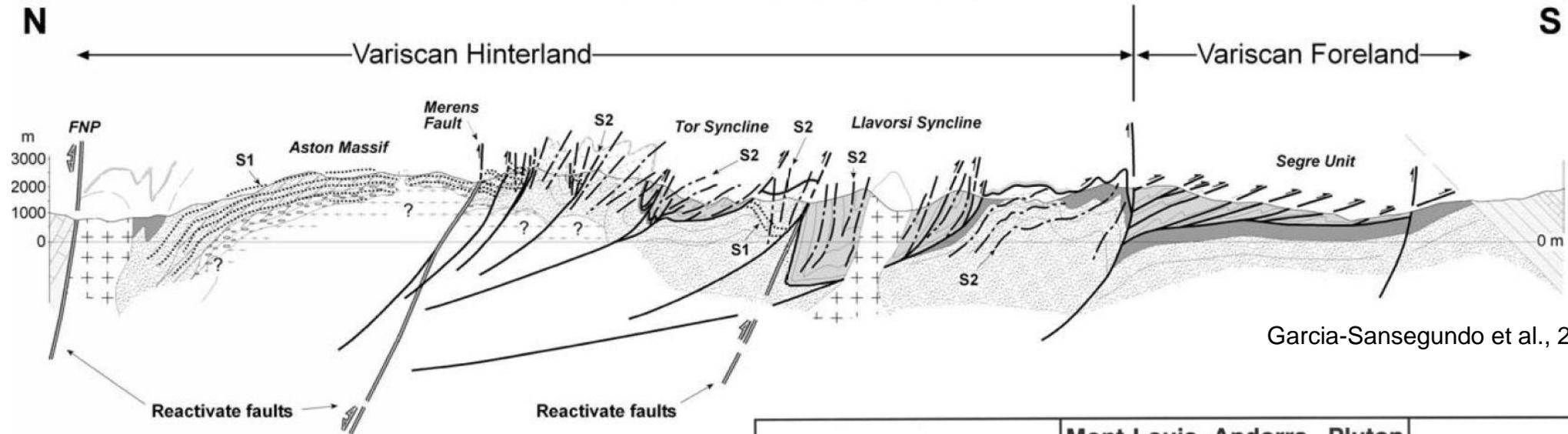


Widespread magmatism and HT/LP metamorphism between 310 and 290 Ma

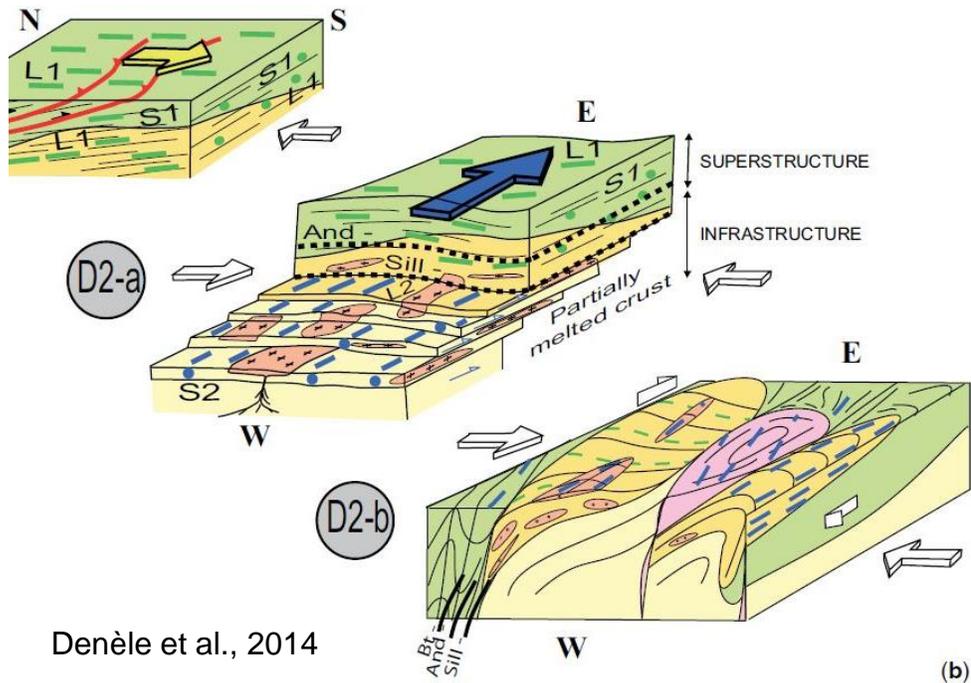
Late Carboniferous Flysch deposits

Contractional (Axial Zone) VS Extensional deformations (NPM)?

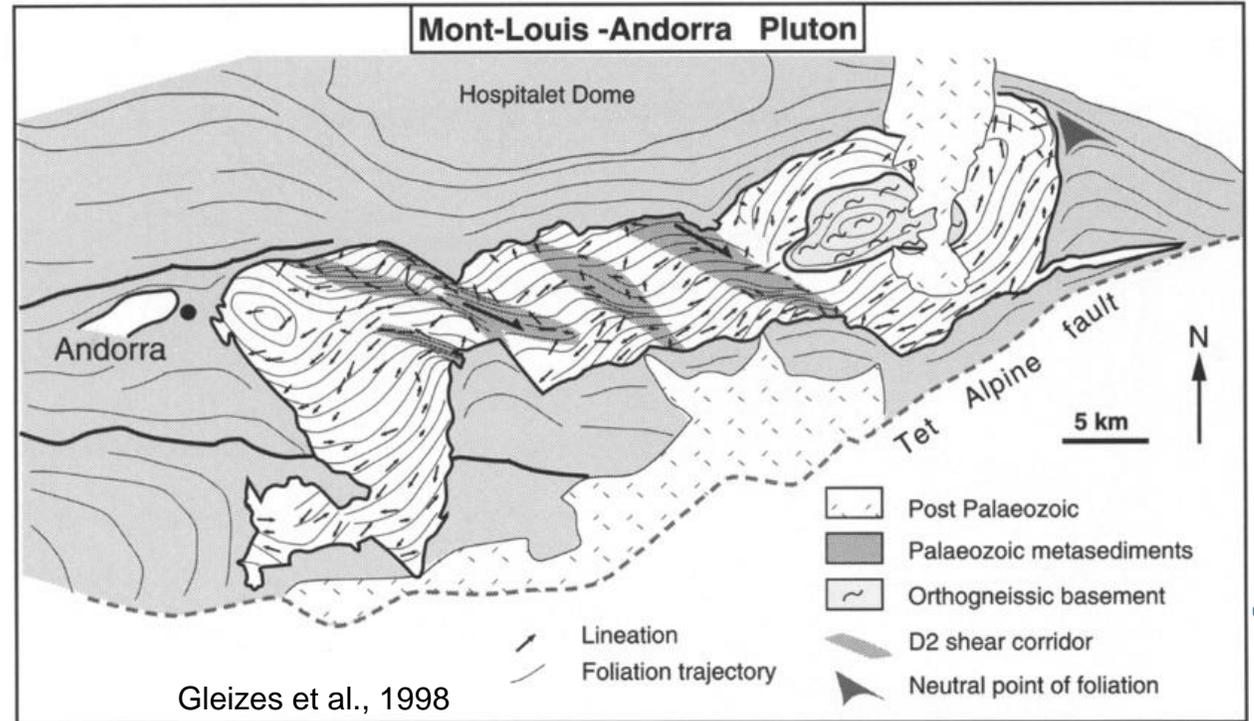
# Deformation patterns in the Axial Zone



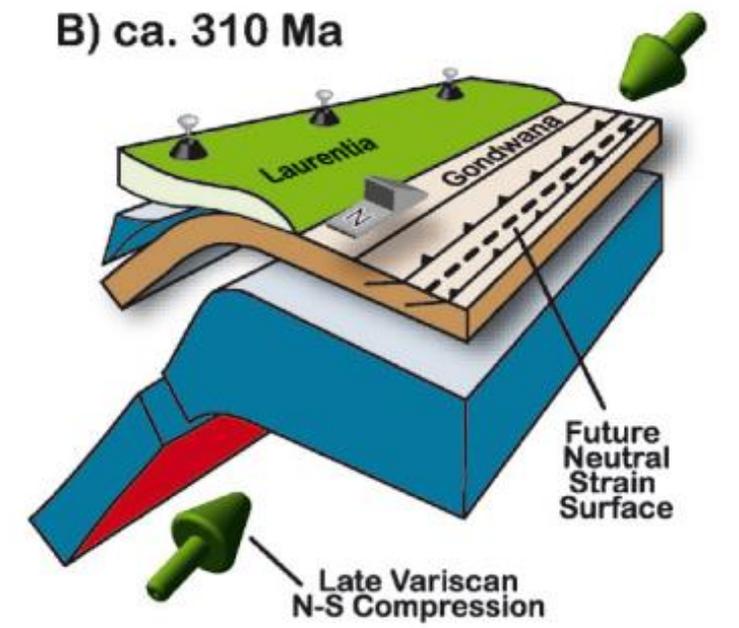
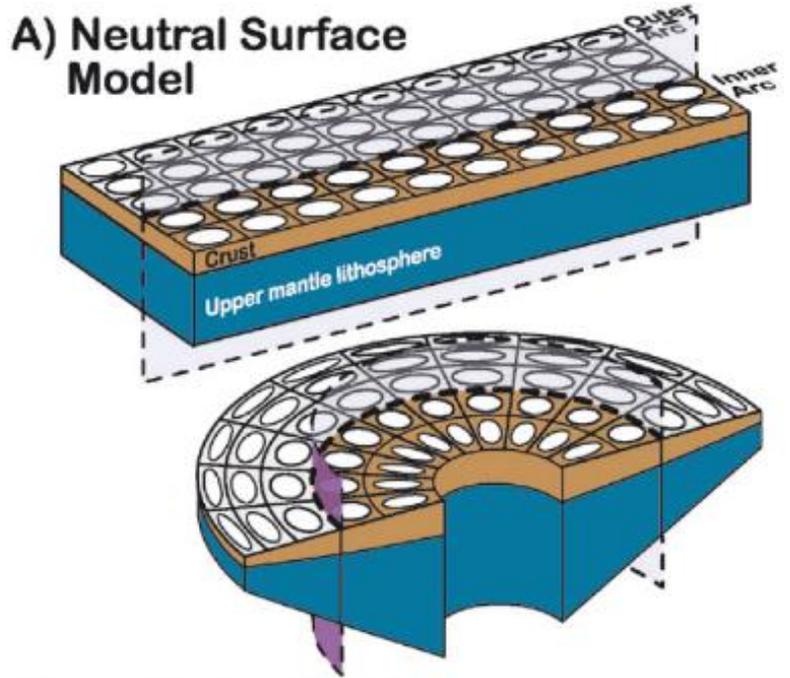
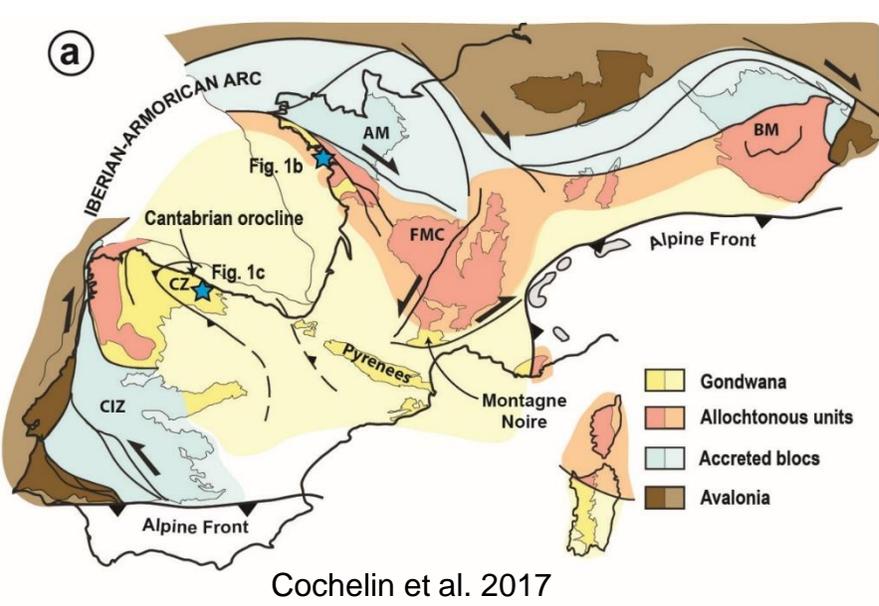
Garcia-Sanseguno et al., 2011



Denèle et al., 2014

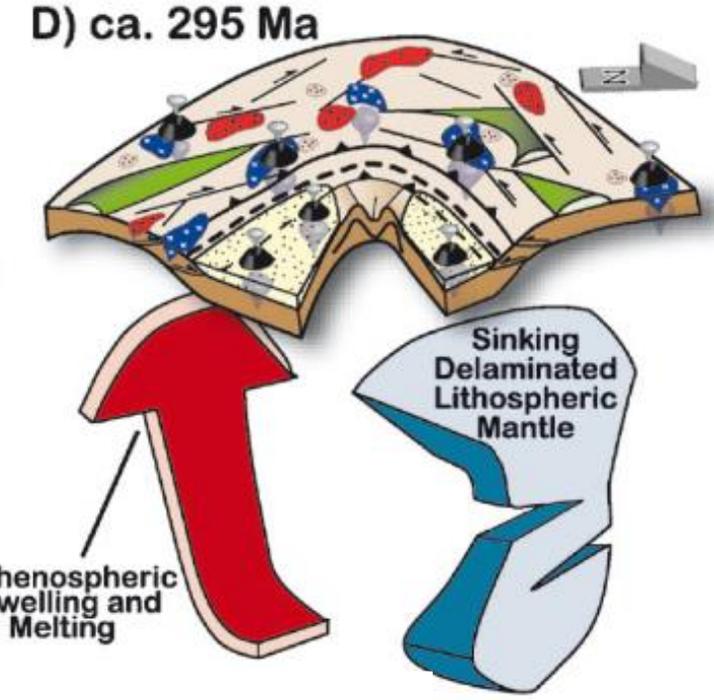
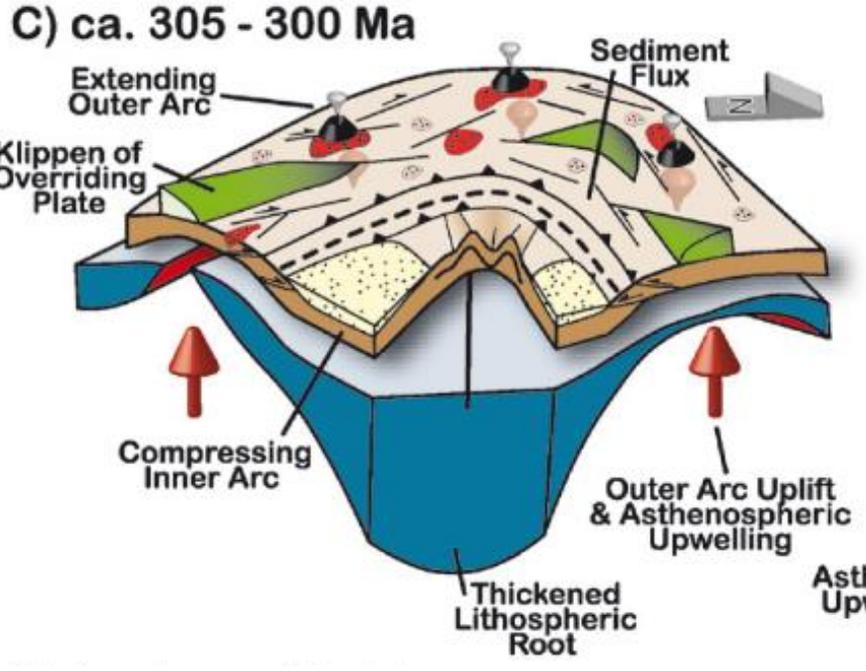


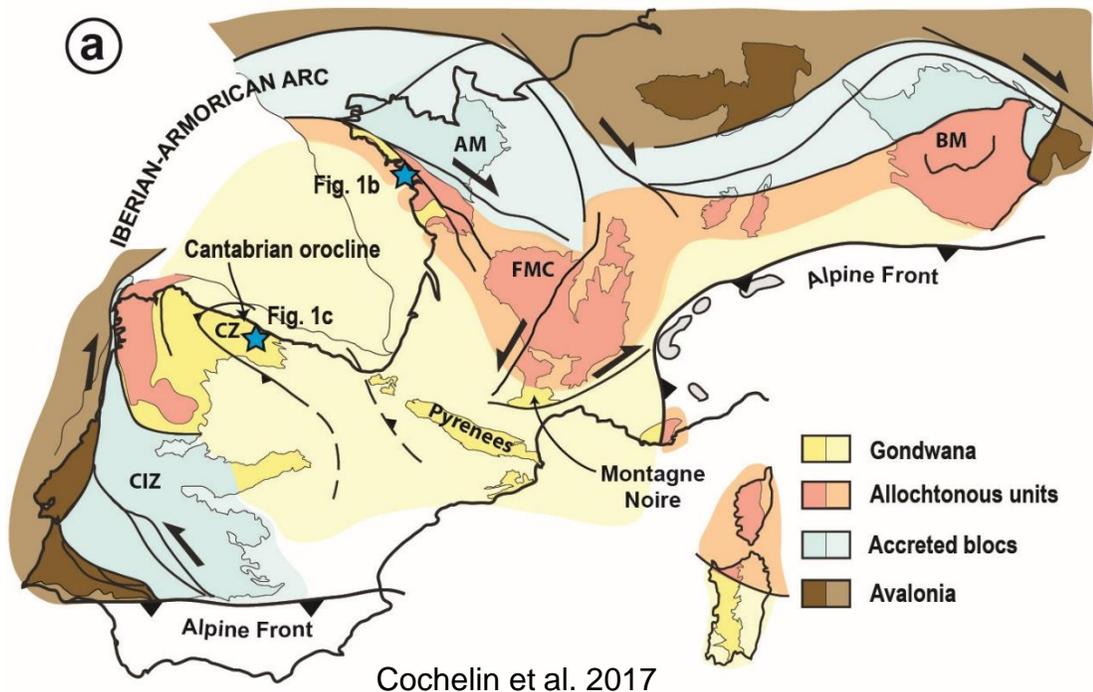
Gleizes et al., 1998



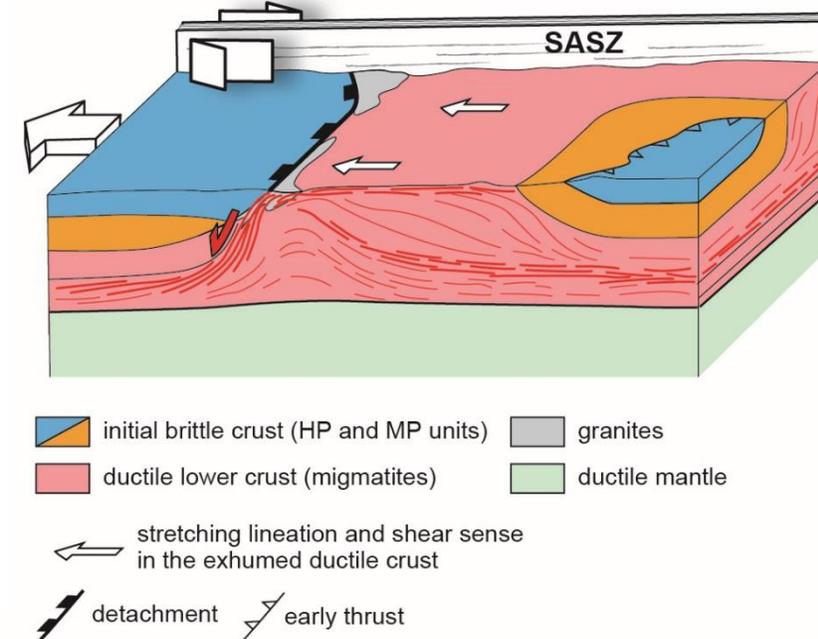
Deformation in the Pyrenees:

Link with late/post orogenic oroclinal bending?! (Denèle et al., 2014)

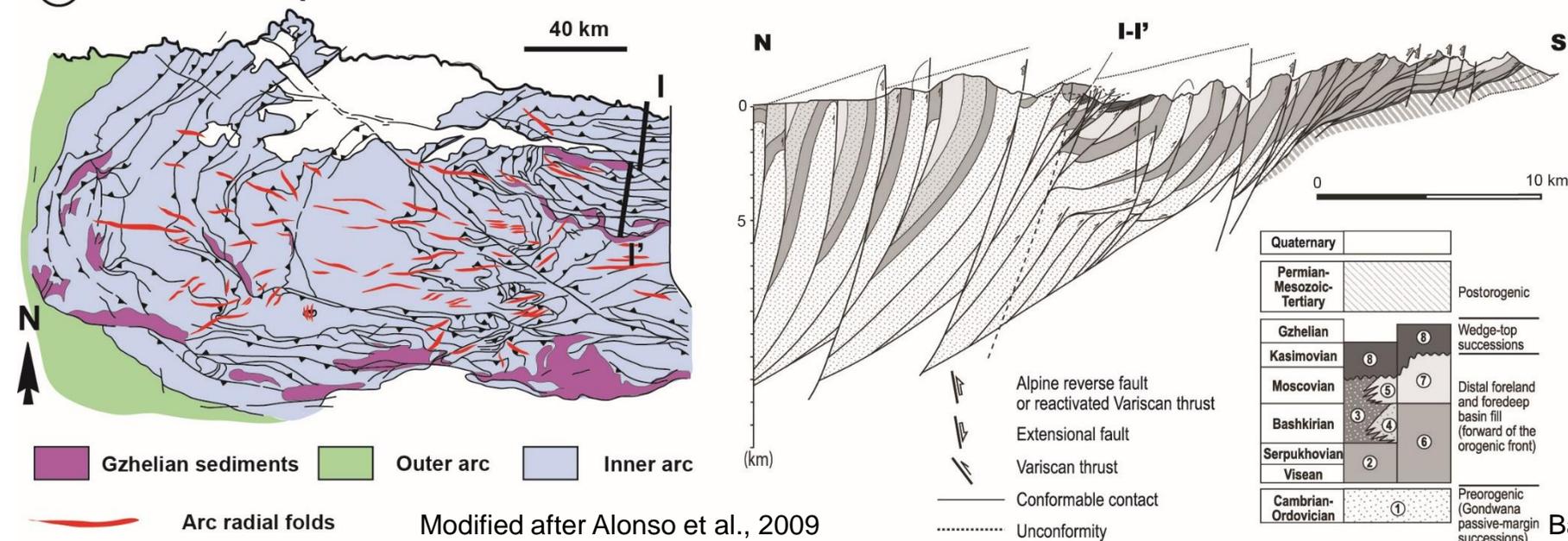




**(b) Deformation patterns in the outer arc**  
Interpretation for South Brittany (Gapais et al., 2015)



**(c) Deformation patterns in the inner arc: the Cantabrian Zone**



Strike-slip and extension

VS

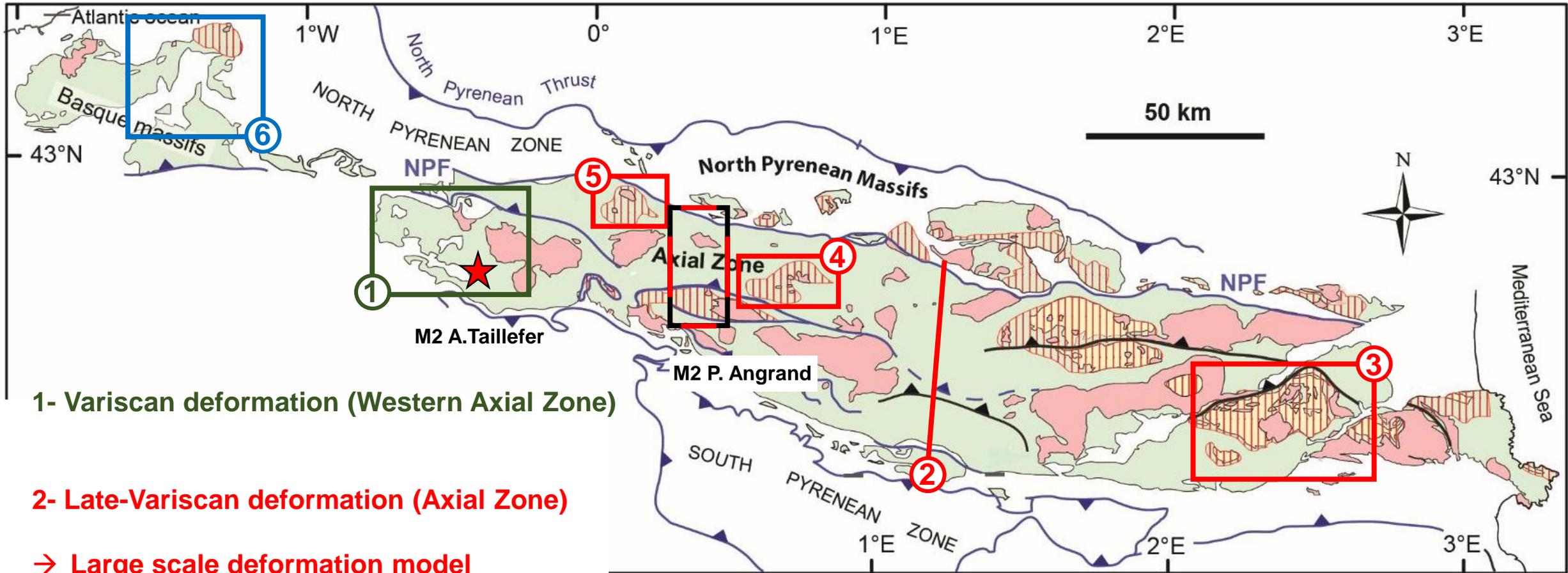
Compression  
(Thrusting and folding)



Bahamonde et al., 2007

Quaternary		
Permian-Mesozoic-Tertiary		Postorogenic
Gzhelian	8	Wedge-top successions
Kasimovian	8	
Moscovian	5	Distal foreland and foredeep basin fill (forward of the orogenic front)
Bashkirian	3	
Serpukhovian	4	
Visean	2	
Cambrian-Ordovician	1	Preorogenic (Gondwana passive-margin successions)

# Aim of the presentation



3- Post-orogenic deformation (Basque Massifs = North Pyrenean Massifs)



# 1 - Variscan deformation (D1)

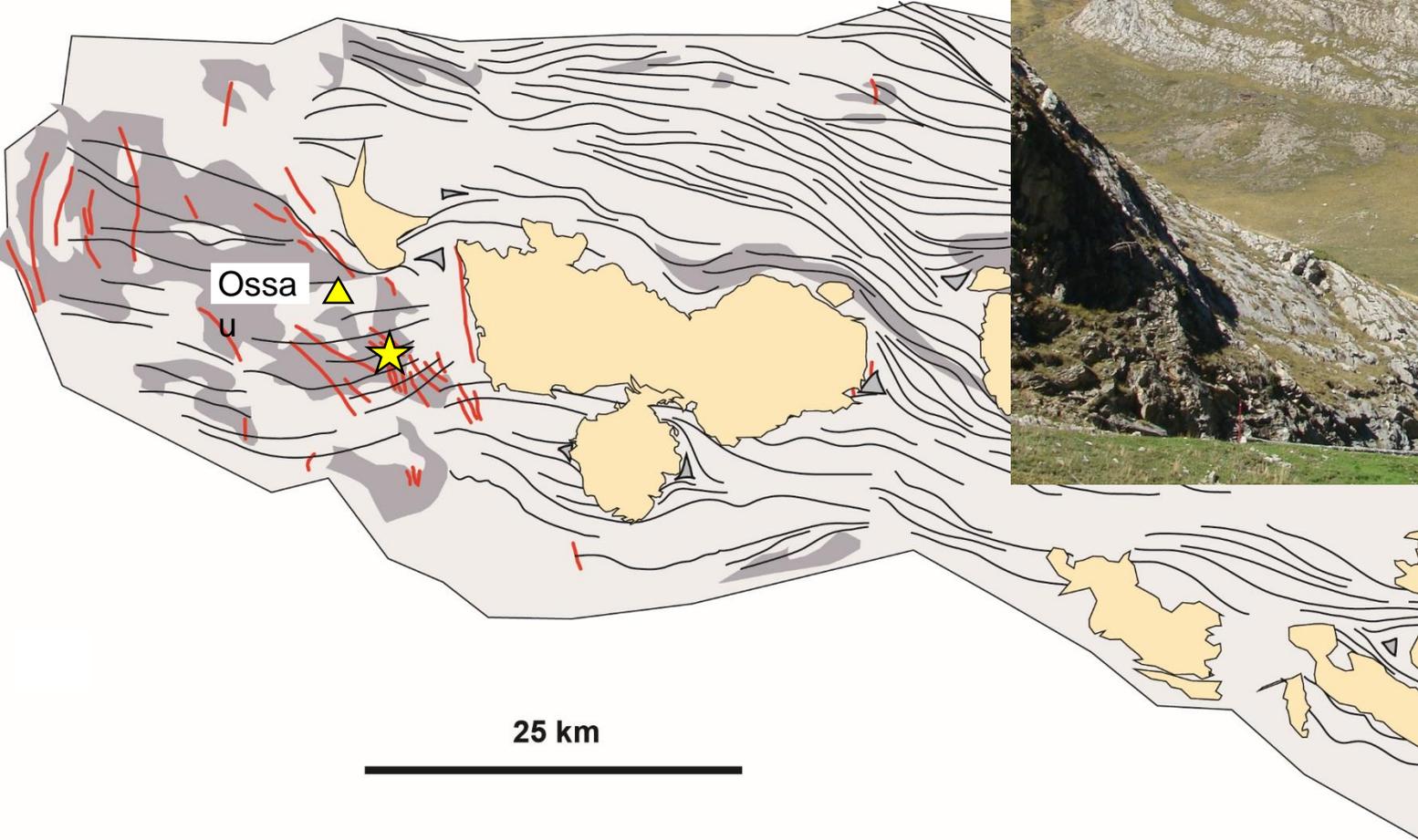


# Variscan deformation (D1)

Plis du Moustardé, vallée d'Ossau



○ Lourdes



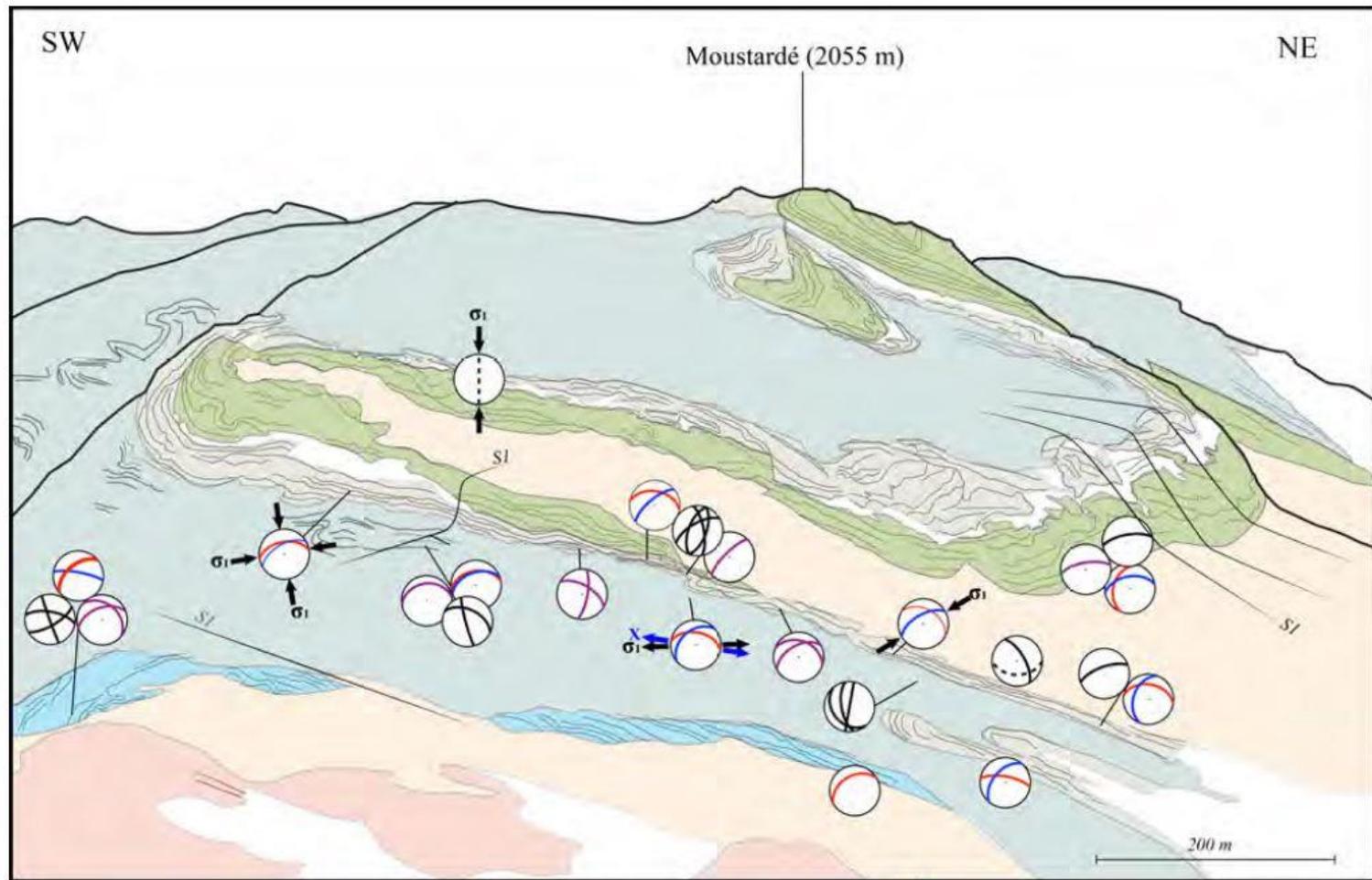
Fold interferences:

- Regional folds (N100°E)
- Early folds (N-S à NW-SE)

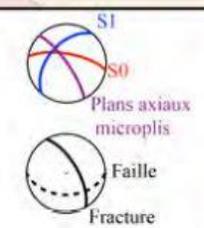
# Structural analysis of the recumbent folds

Les mécanismes de déformation associés à la mise en place des plis couchés kilométriques Hercyniens dans les Pyrénées : modèles analogiques, et étude de terrain.

Audrey Taillefer



- Schistes et grès du Culm (Namuro-Westphalien)
- Calcaires à griottes (Eif - Fam)
- Calcaires amygdalaires (Namurien)
- Pérites et grès (Frasnien)
- Calcaire à joints + calcaires massifs (Fam-Tour)
- Calcaires massifs (Frasnien)



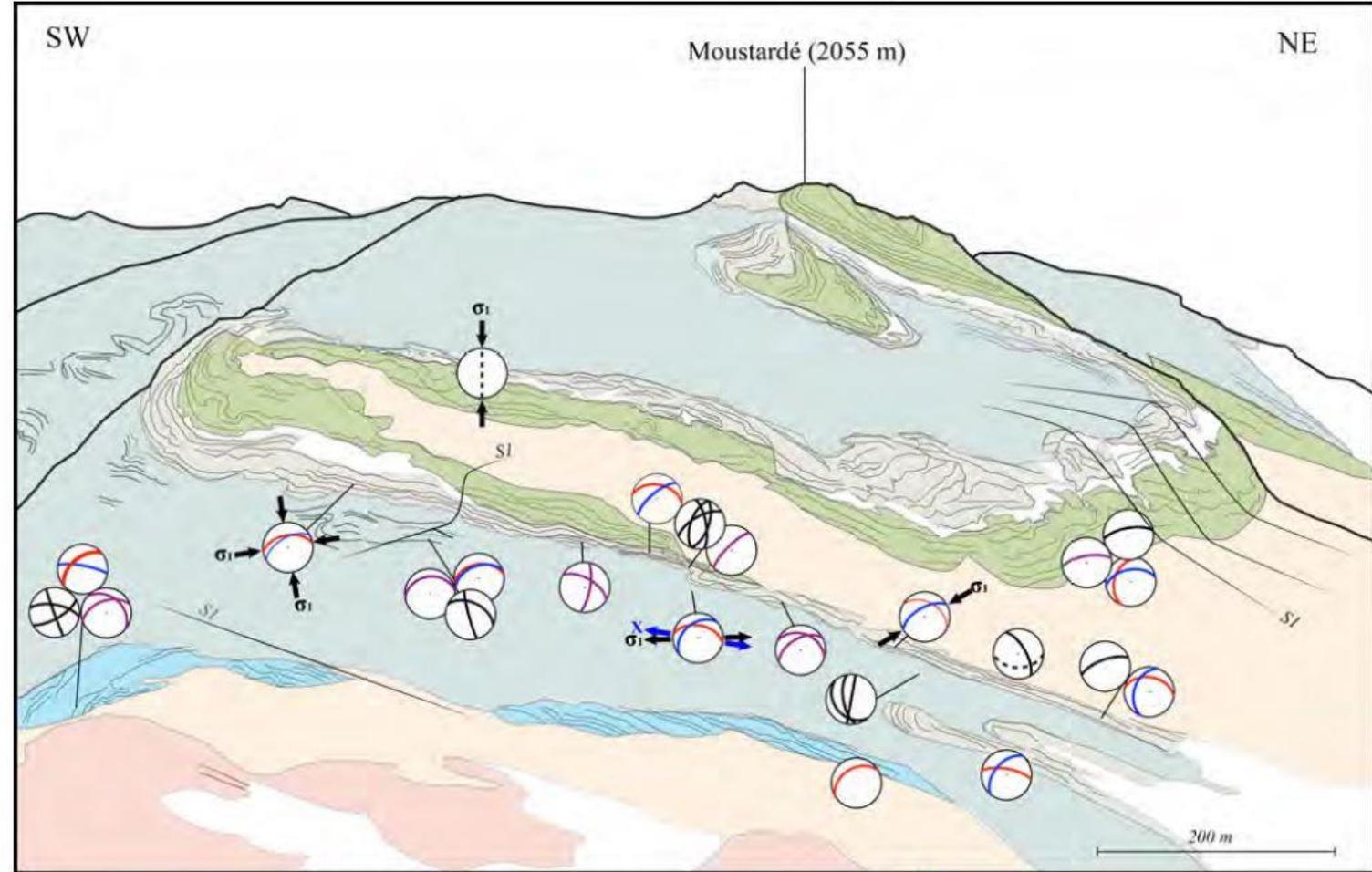
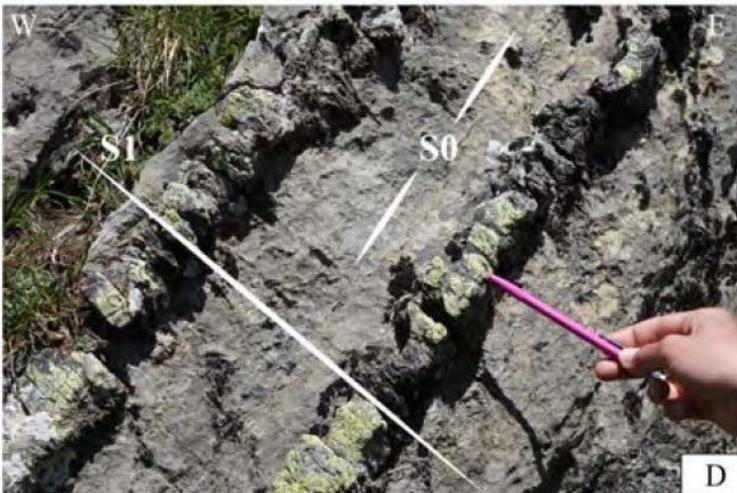
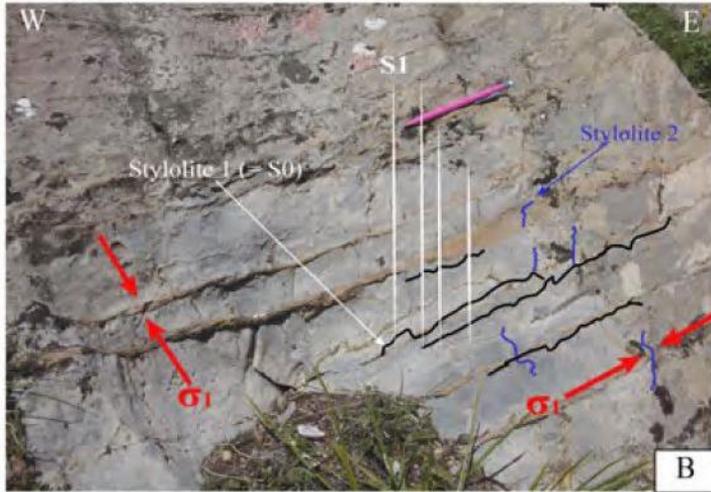
$\sigma_1$  Direction de la contrainte principale quand observée sur le terrain

$X$  Direction de l'étiement quand observé sur le terrain

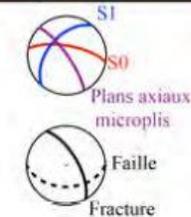
# Structural analysis of the recumbent folds

Les mécanismes de déformation associés à la mise en place des plis couchés kilométriques Hercyniens dans les Pyrénées : modèles analogiques, et étude de terrain.

Audrey Taillefer



- Schistes et grès du Culm (Namuro-Westphalien)
- Calcaires à griottes (Eif - Fam)
- Calcaires amygdalaires (Namurien)
- Pérites et grès (Frasnien)
- Calcaire à joints + calcaires massifs (Fam-Tour)
- Calcaires massifs (Frasnien)



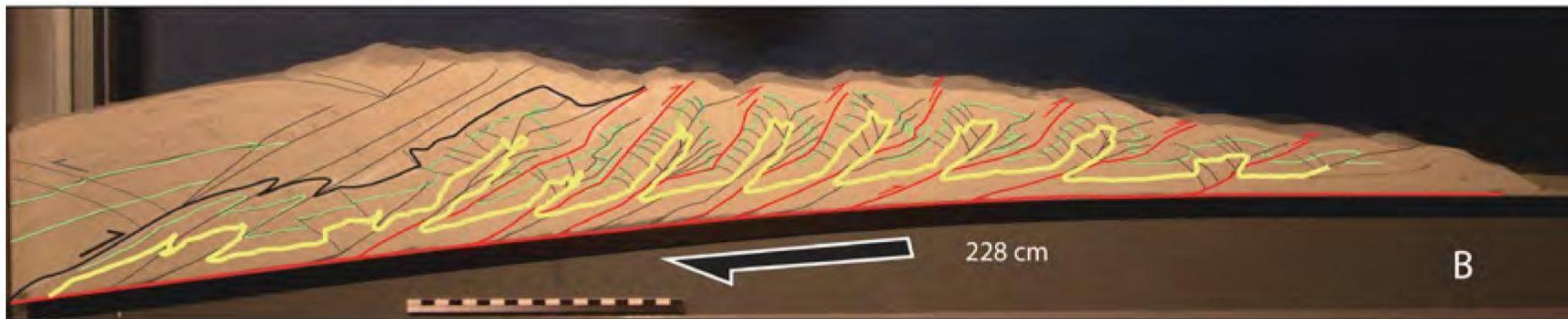
$\sigma_1$  Direction de la contrainte principale quand observée sur le terrain

$X$  Direction de l'étiement quand observé sur le terrain

# Analogue models

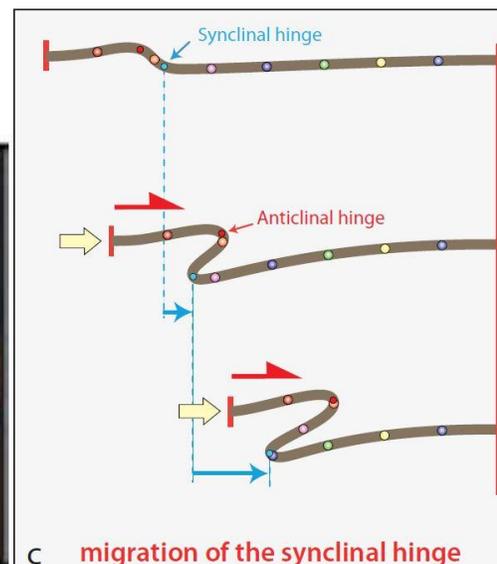


A  
Perrin et al., 2013



B  
228 cm

— Microbilles (niveau de décollement)   
 — Marqueur coloré   
 — Plasticine   
 — Principaux chevauchements   
 — Chevauchements et retro-chevauchements secondaires

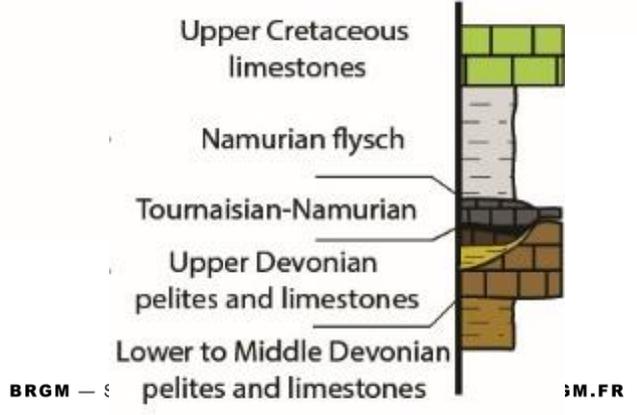
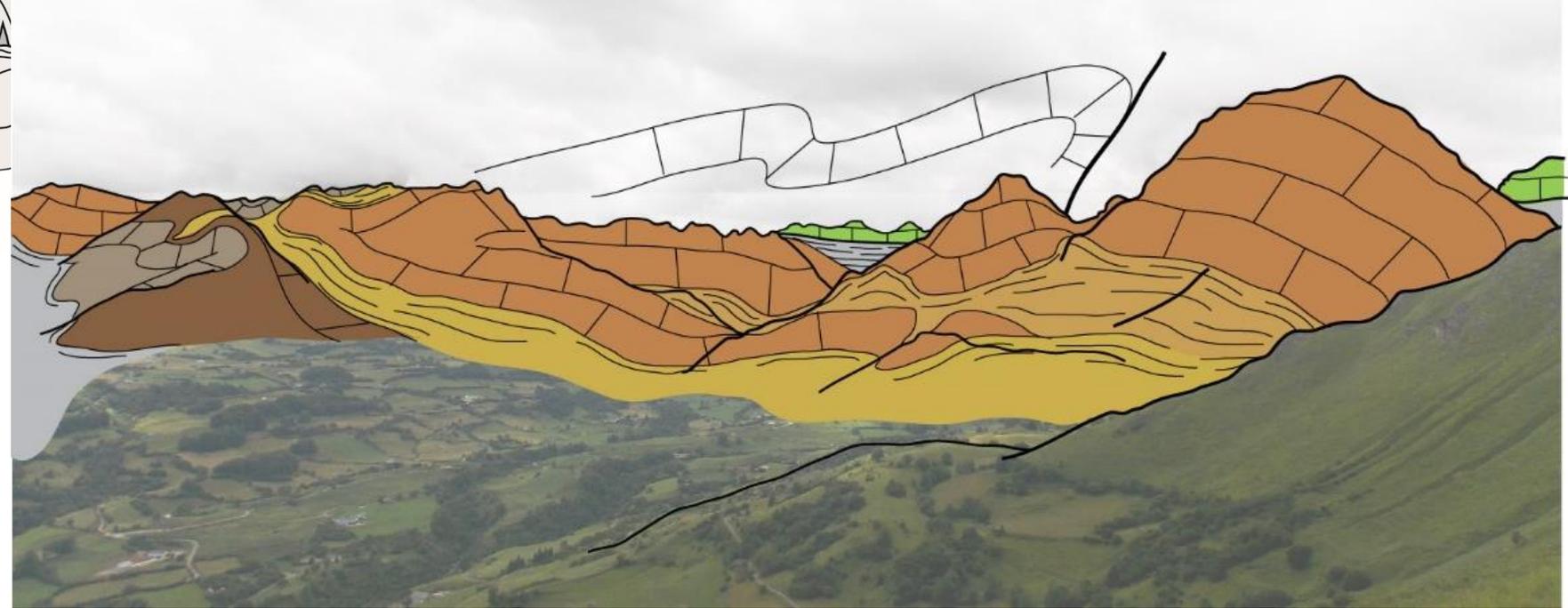
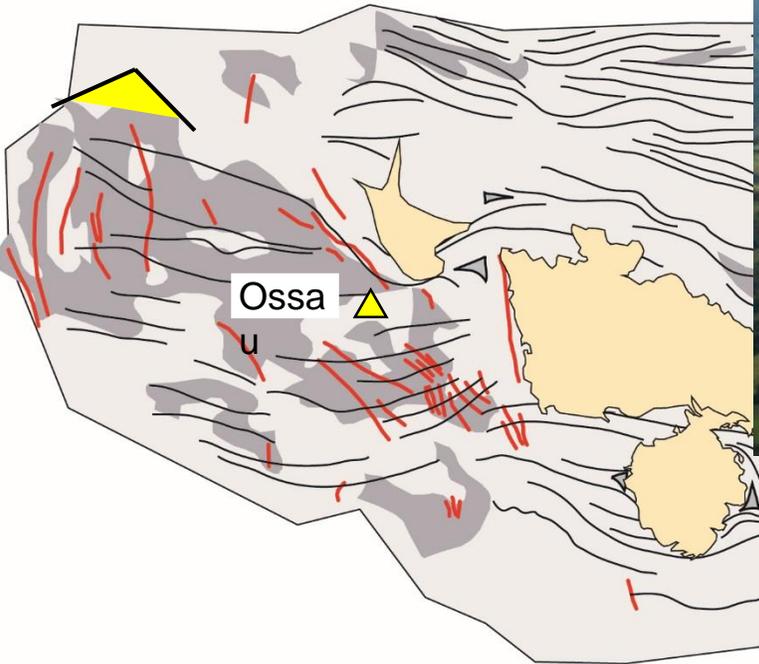


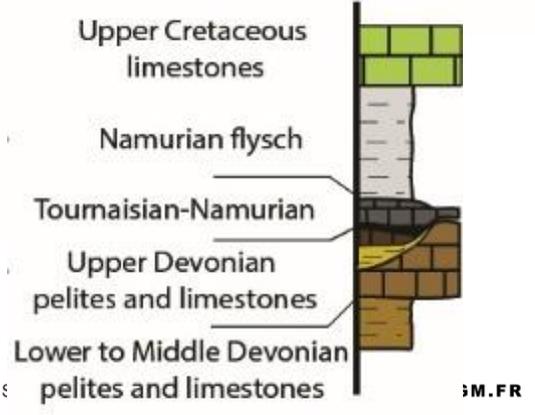
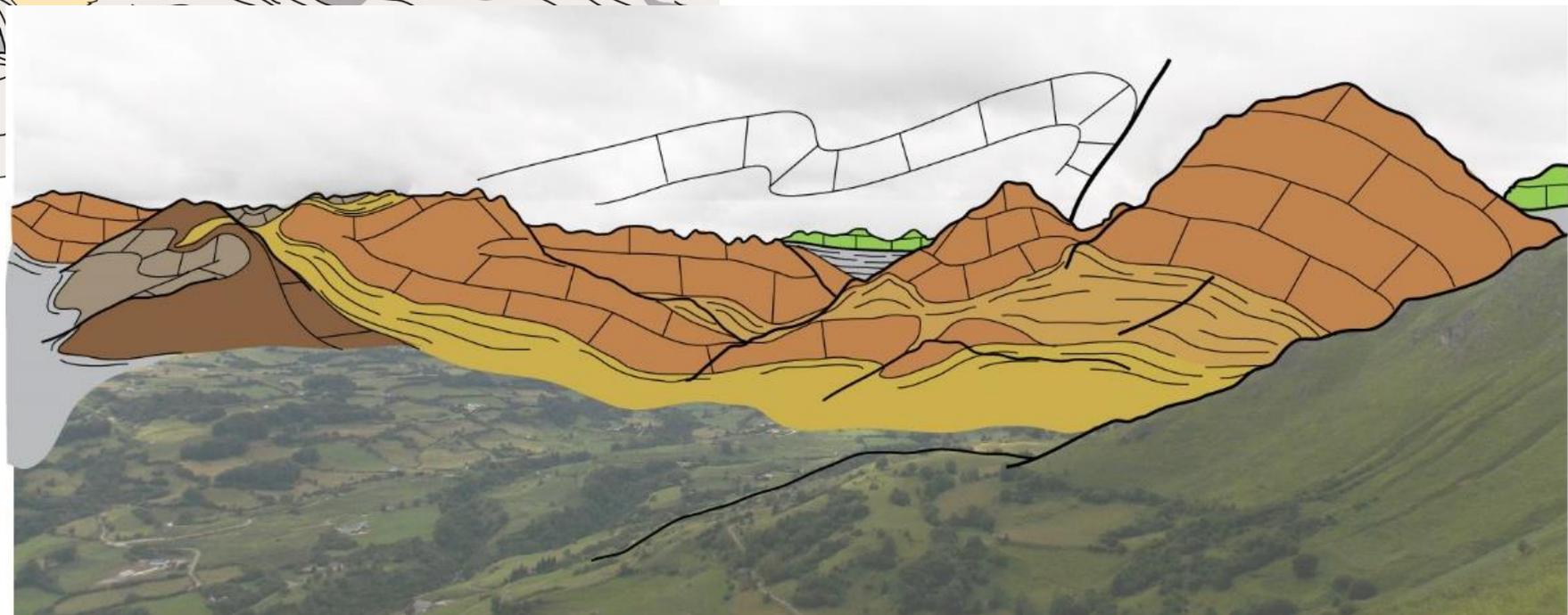
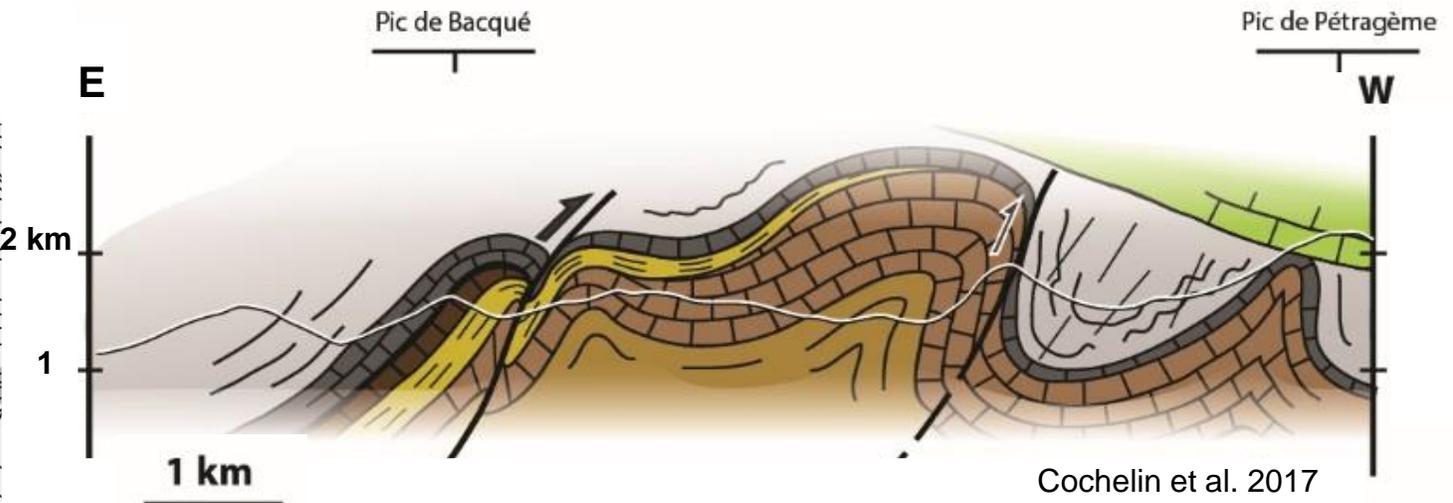
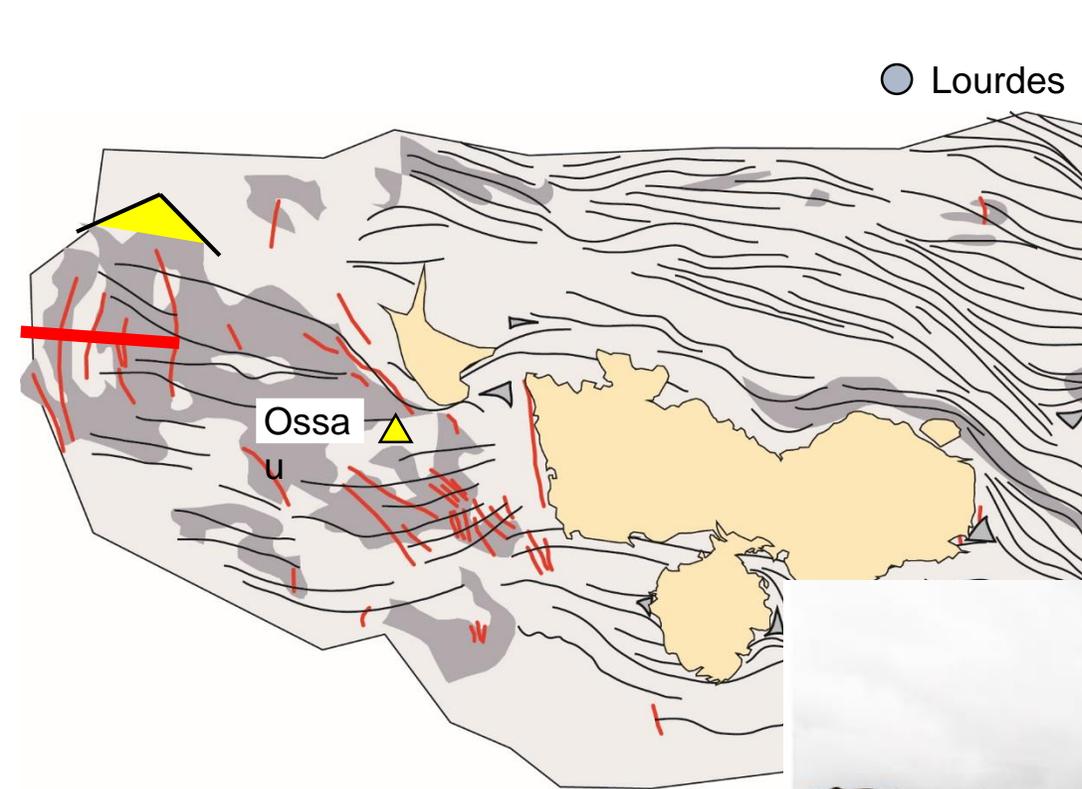
c migration of the synclinal hinge  
Perrin et al., 2013

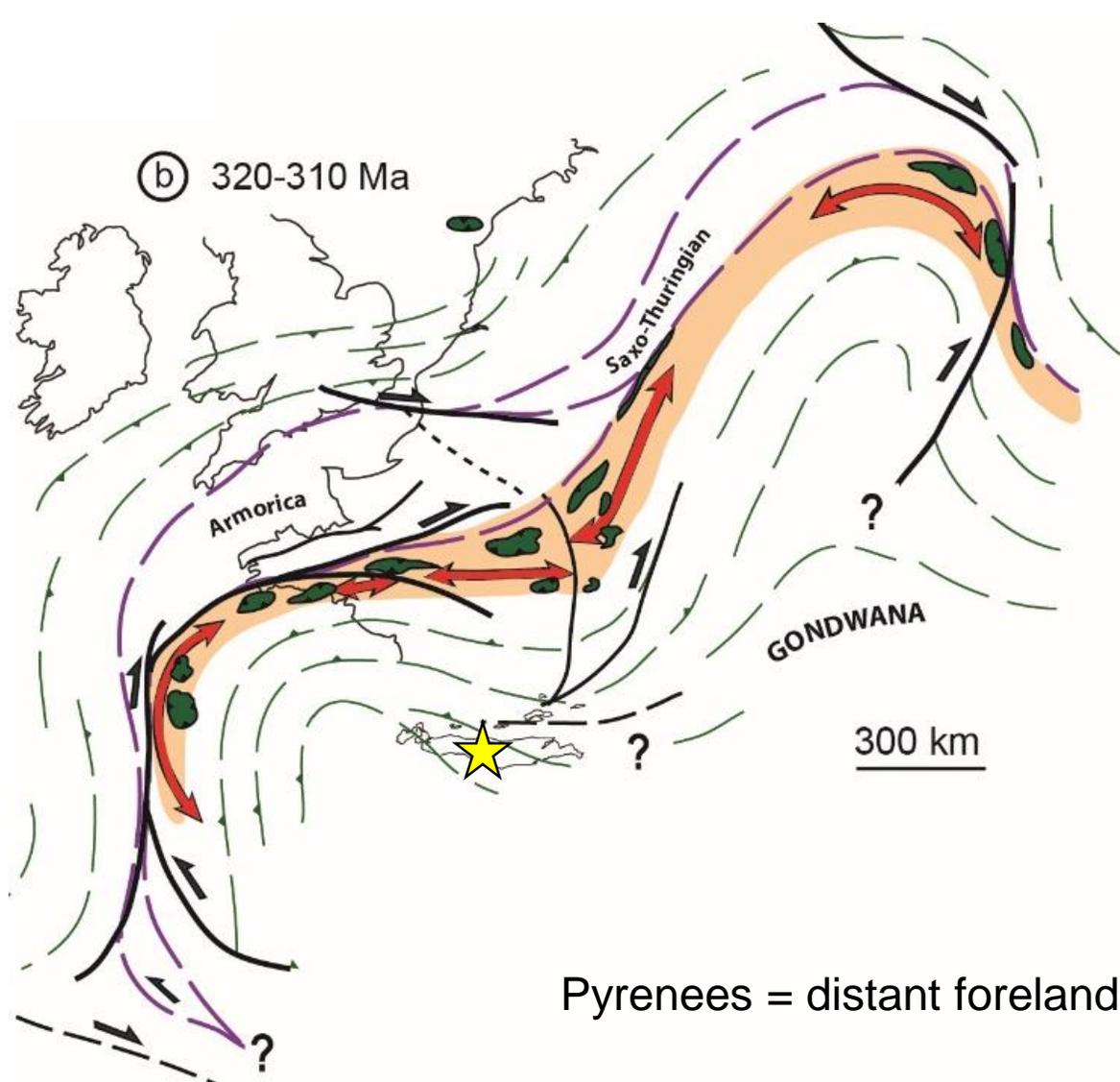
Multi-layers model, with new materials

Strength contrasts have a critical impact on the formation of recumbent folds at low depth

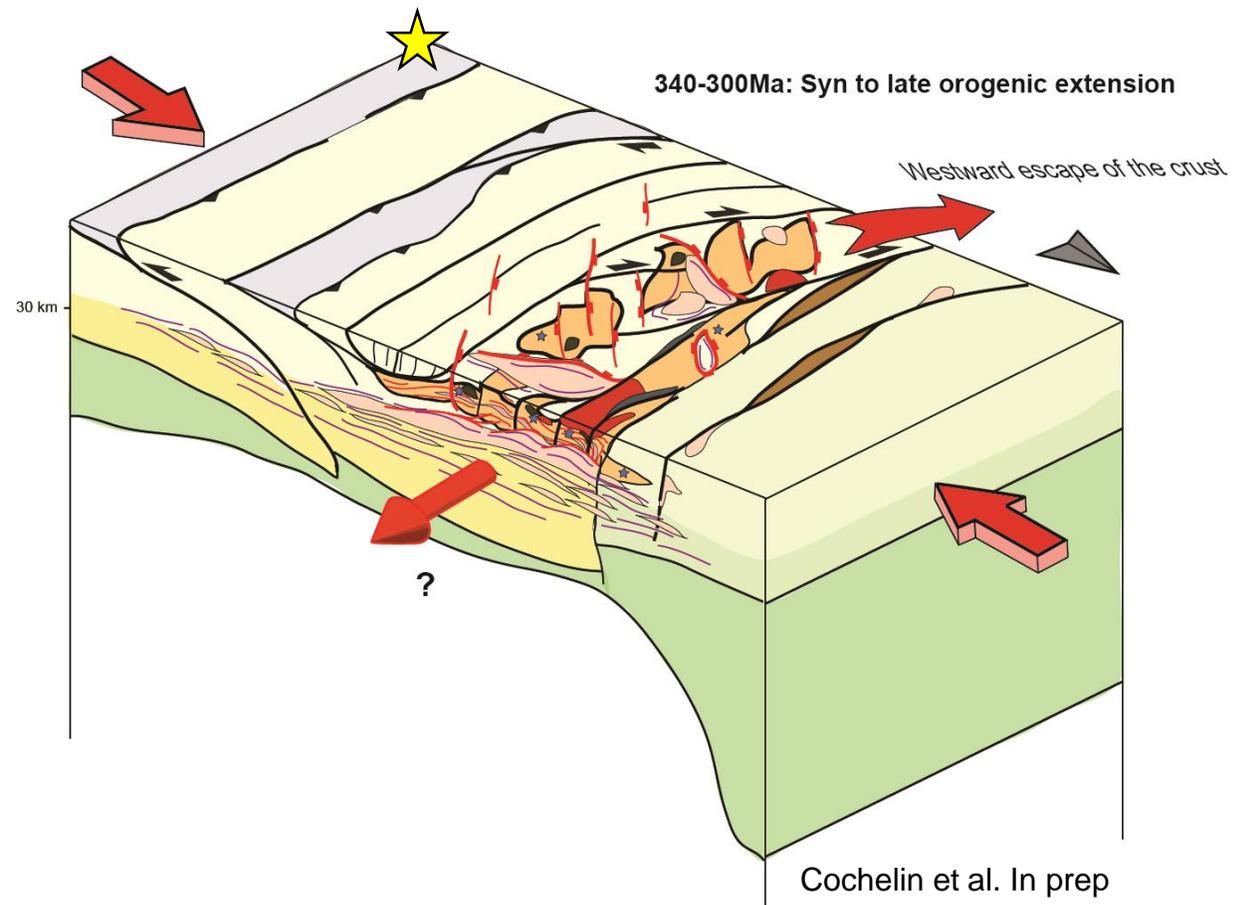
Panorama depuis la Vallée de Lescun







Cochelin et al. 2017



Pyrenees = distant foreland, northern limb of the arc

Latest compressional deformation related to Variscan orogeny

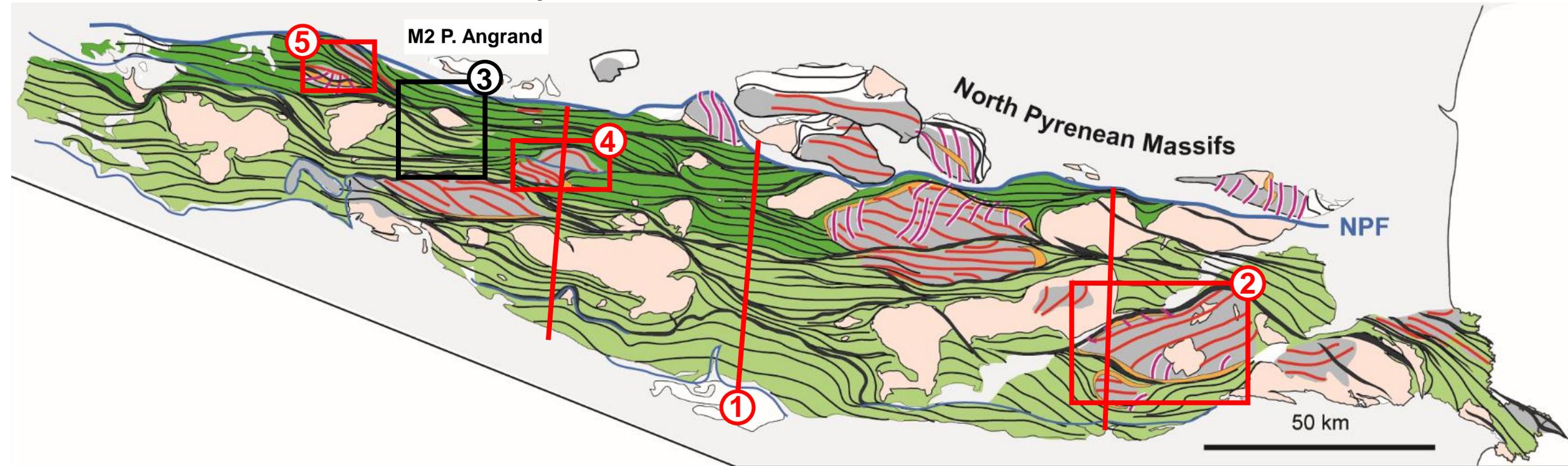


## 2 – Late-Variscan deformation

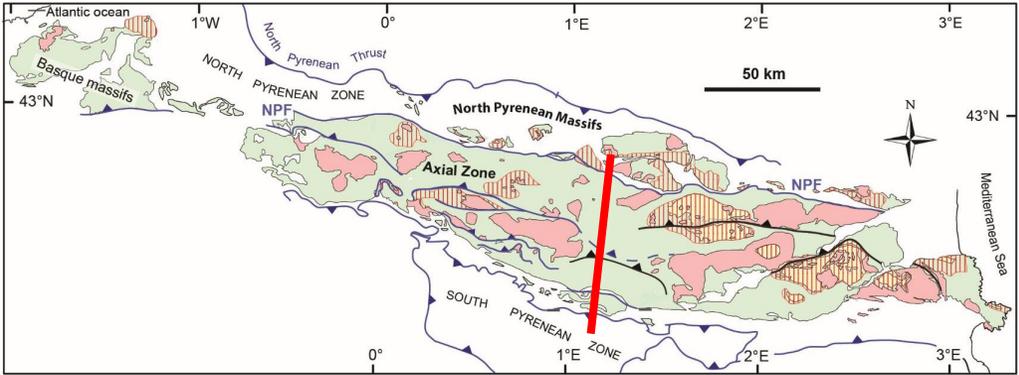


# The anatomy of the Axial Zone

Simplified strain field of the Axial Zone

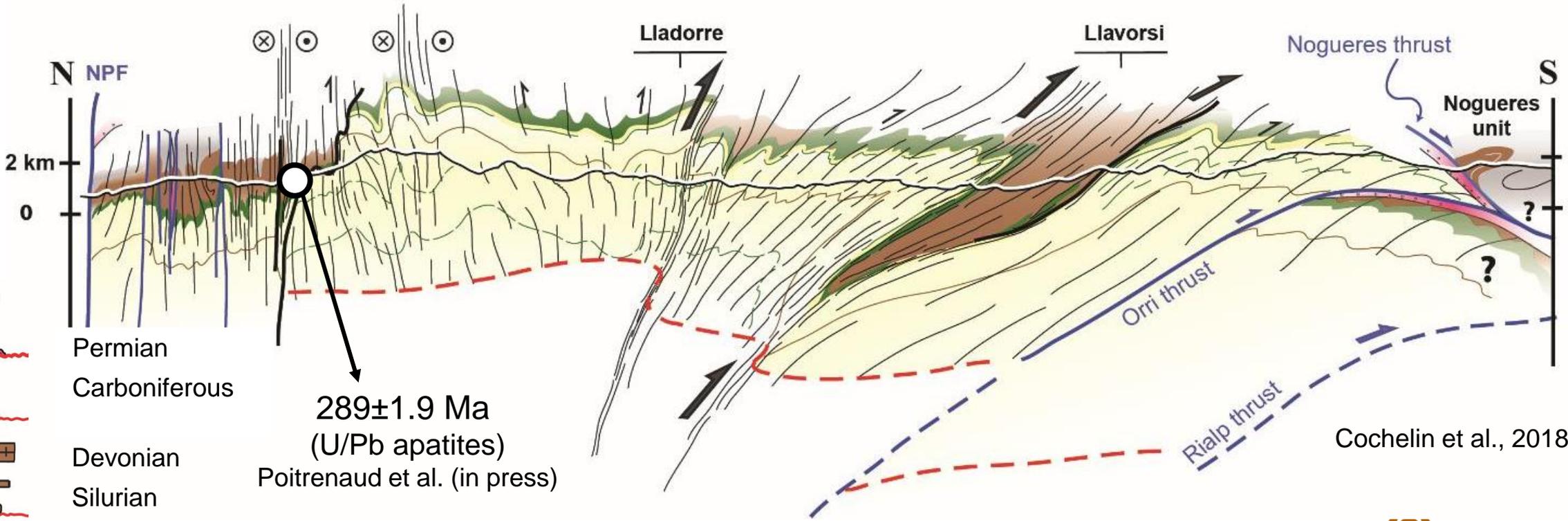


# Cross-section in the upper crust: the Central Pyrenees



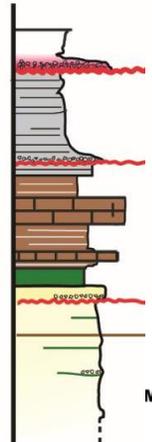
heterogeneous - apparently coaxial deformation

Non coaxial «top to the south» shearing



Cochelin et al., 2018

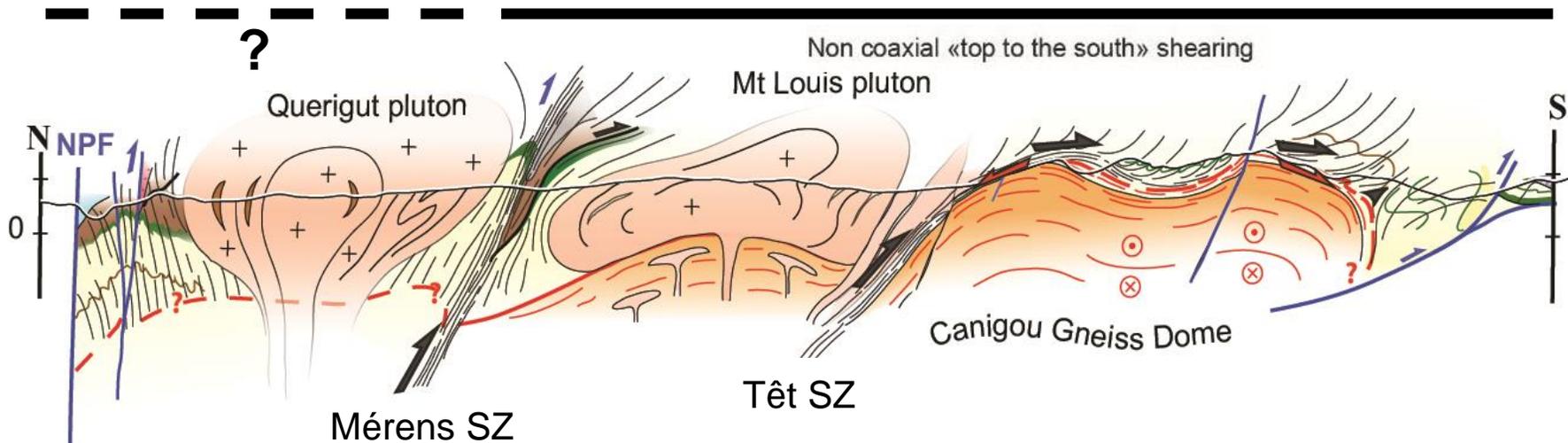
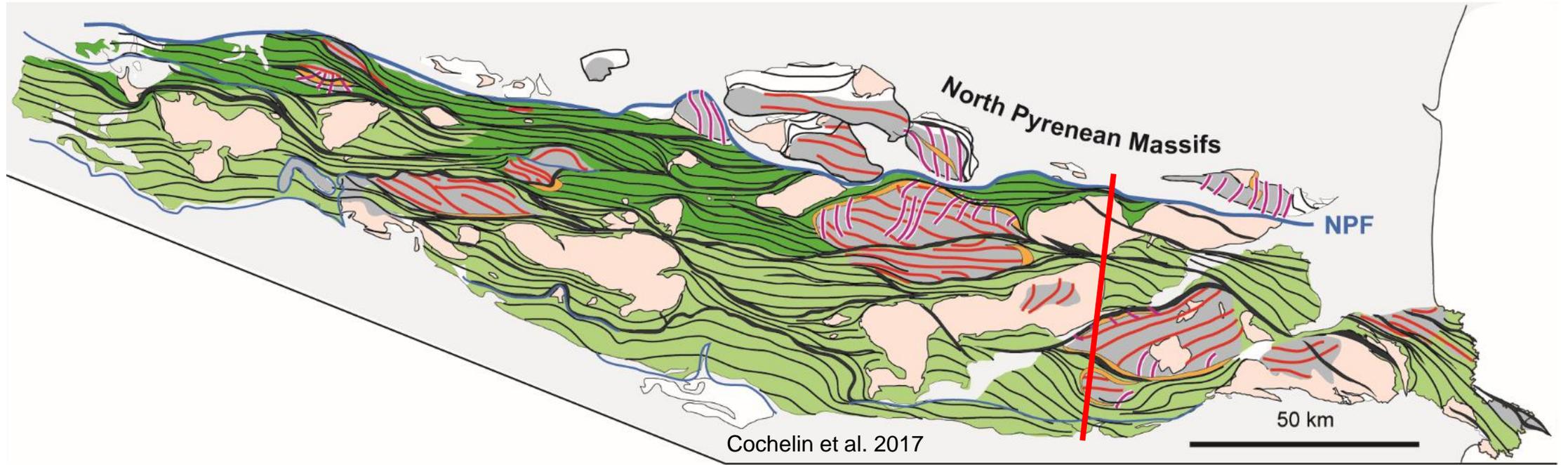
Rock pile



Permian  
Carboniferous  
Devonian  
Silurian

Cambrian-Ordovician

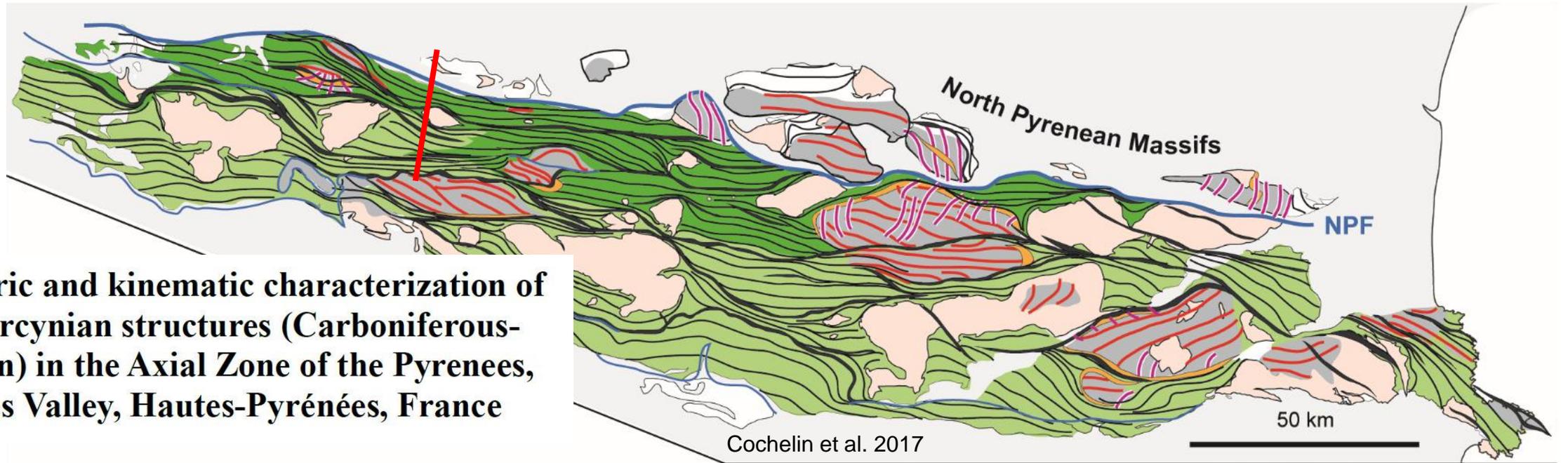
# Cross-section in the eastern Pyrenees



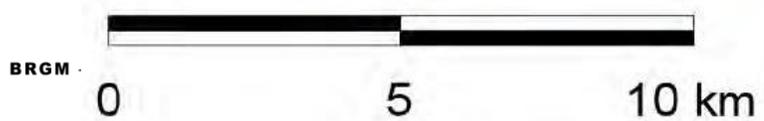
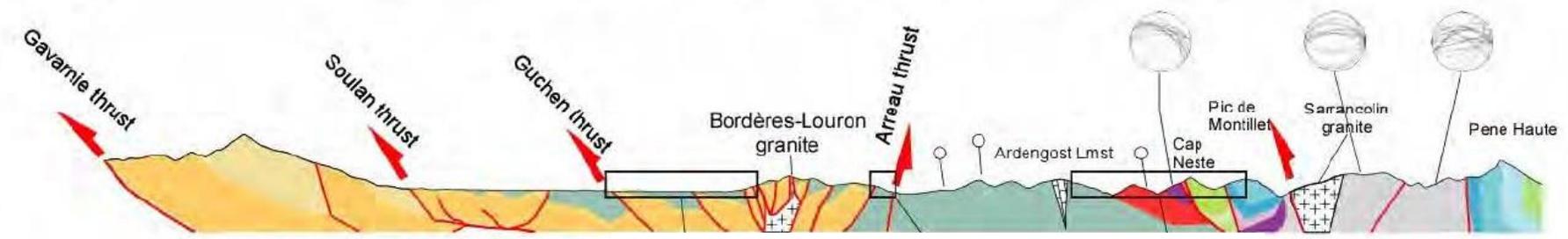
# Cross-section in the middle Pyrenees

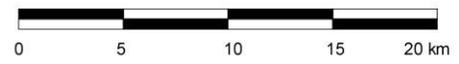
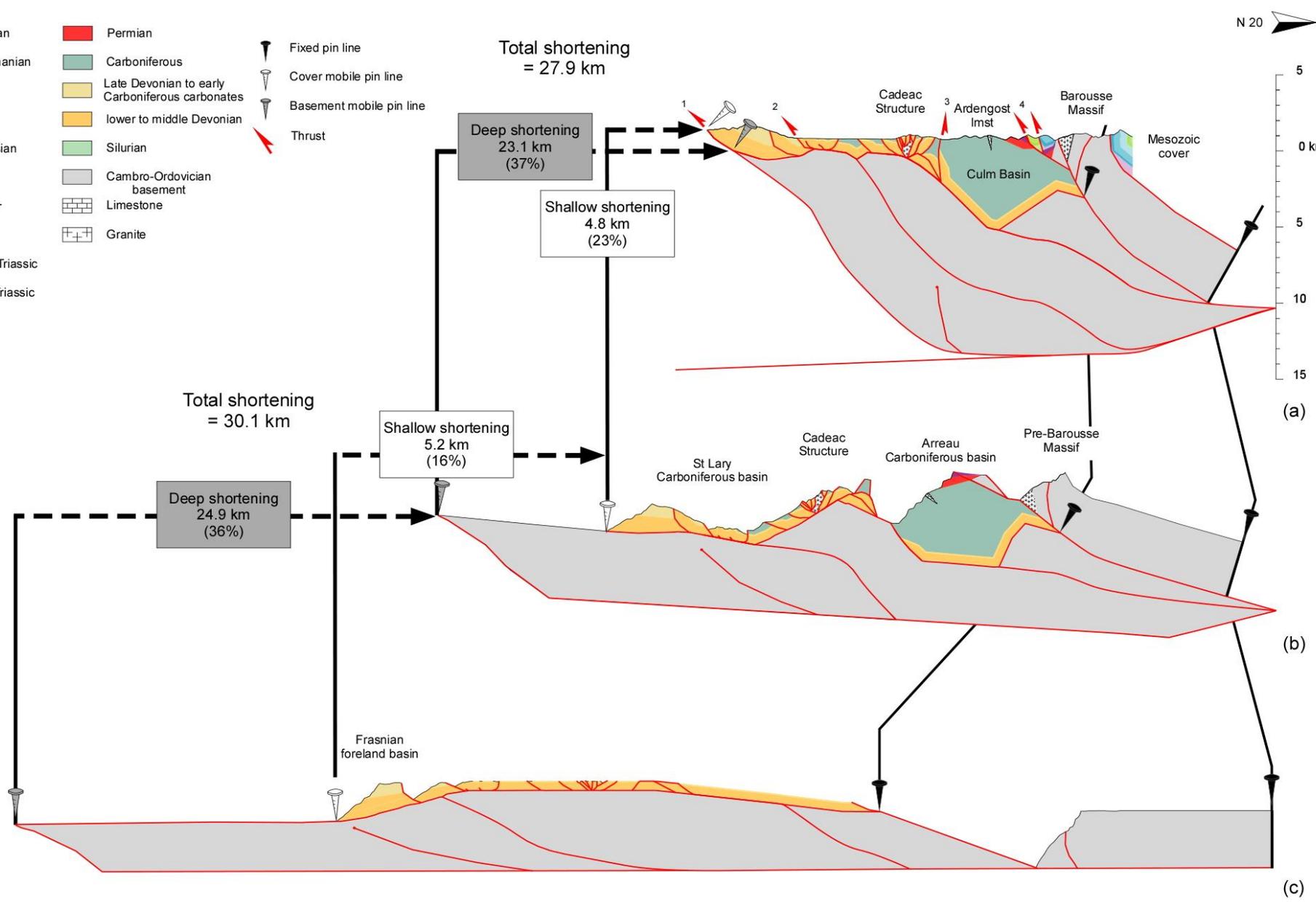
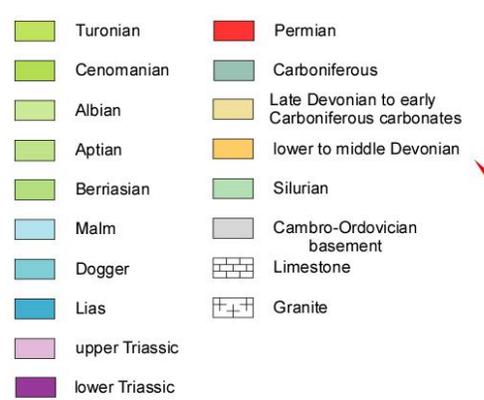
Paul Angrand (M2)

**Geometric and kinematic characterization of the Hercynian structures (Carboniferous-Permian) in the Axial Zone of the Pyrenees, Nestes Valley, Hautes-Pyrénées, France**



Gavarnie Unit	Bordères Unit	Cadeac Structure	Arreau Unit	NPFZ	Toward NPZ
	St Lary Culm basin		Arreau Culm basin		Barousse Massif





**Balanced cross-section:**

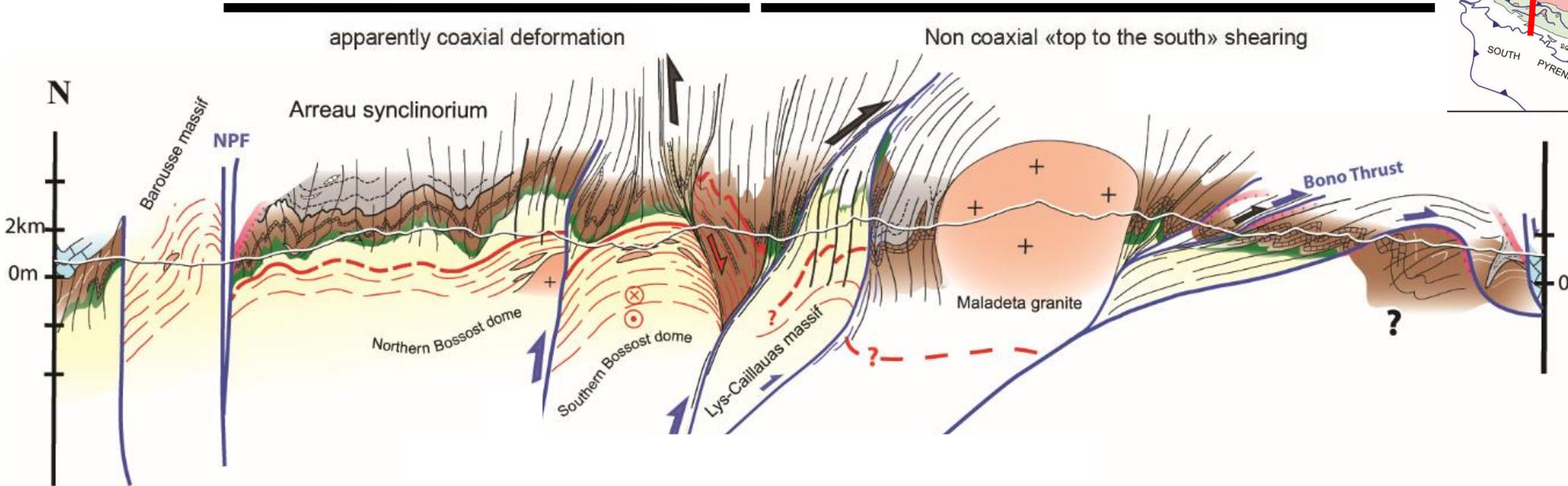
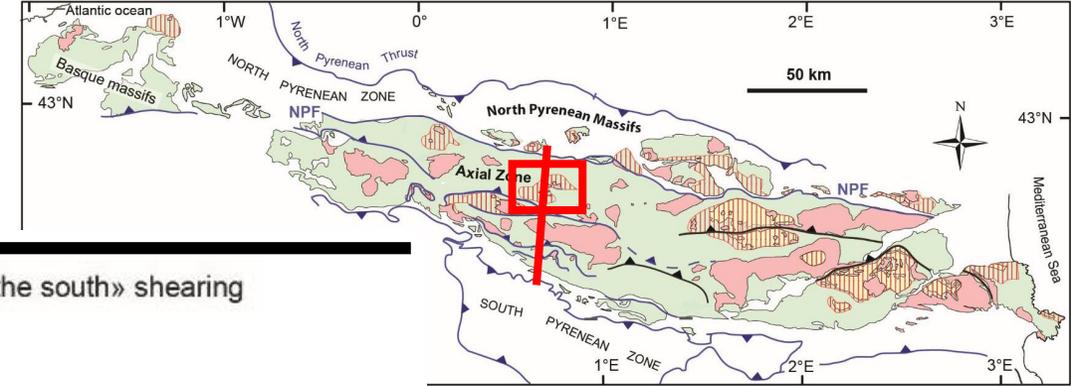
→ New constraints on Alpine deformations

23 km thick-skin  
4.8 thin-skin

→ Estimation for Variscan deformations:  
Shortening = 30km

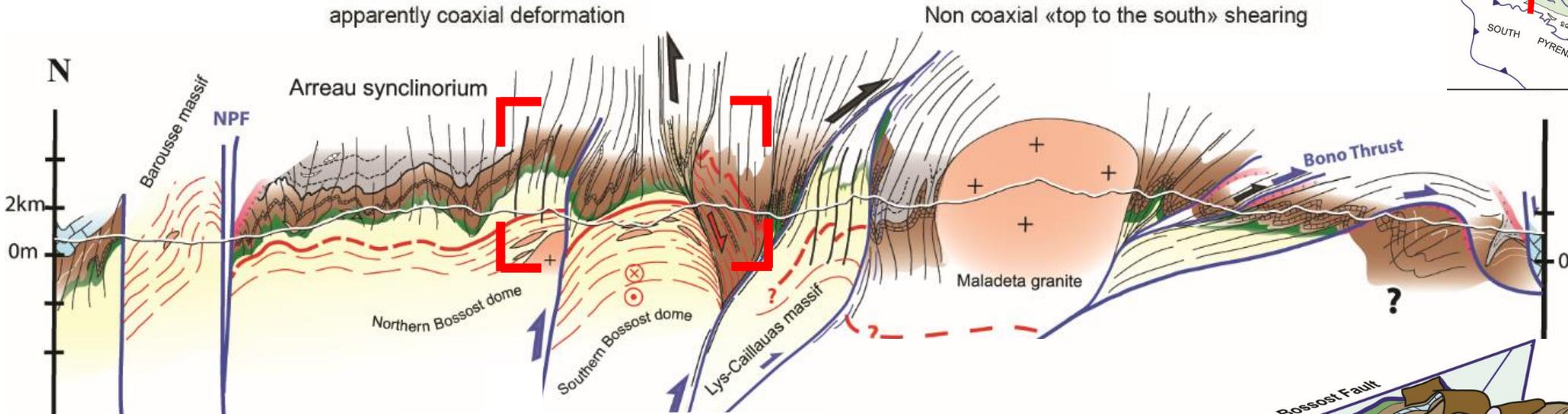
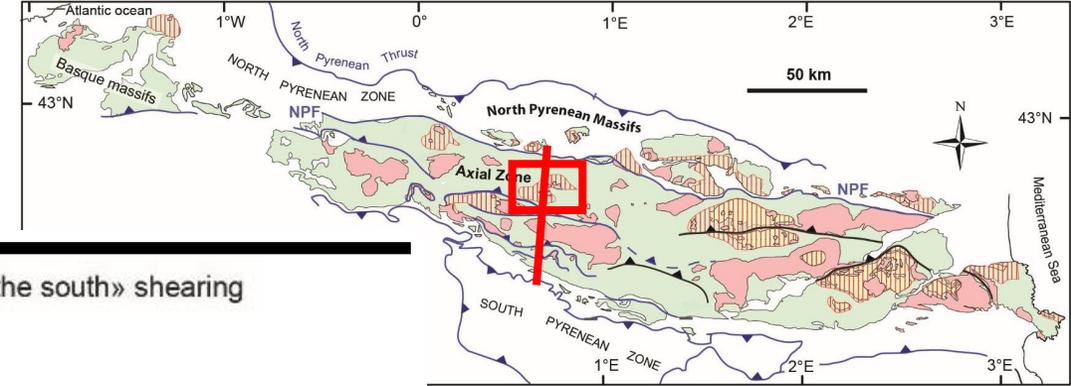
Decollement in Silurian black shales  
Thick-skin tectonics below (83%)

# Cross-section in the middle Axial Zone

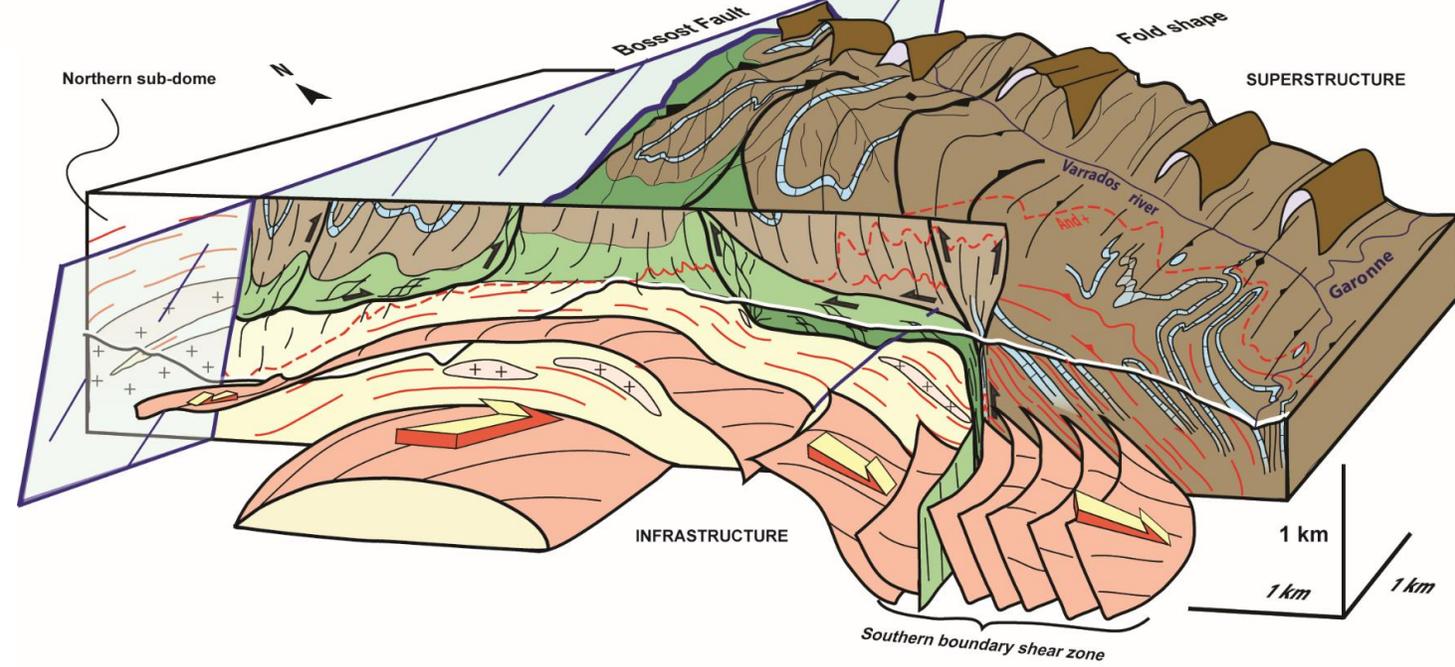


Cochelin et al. 2017

# Cross-section in the middle Axial Zone

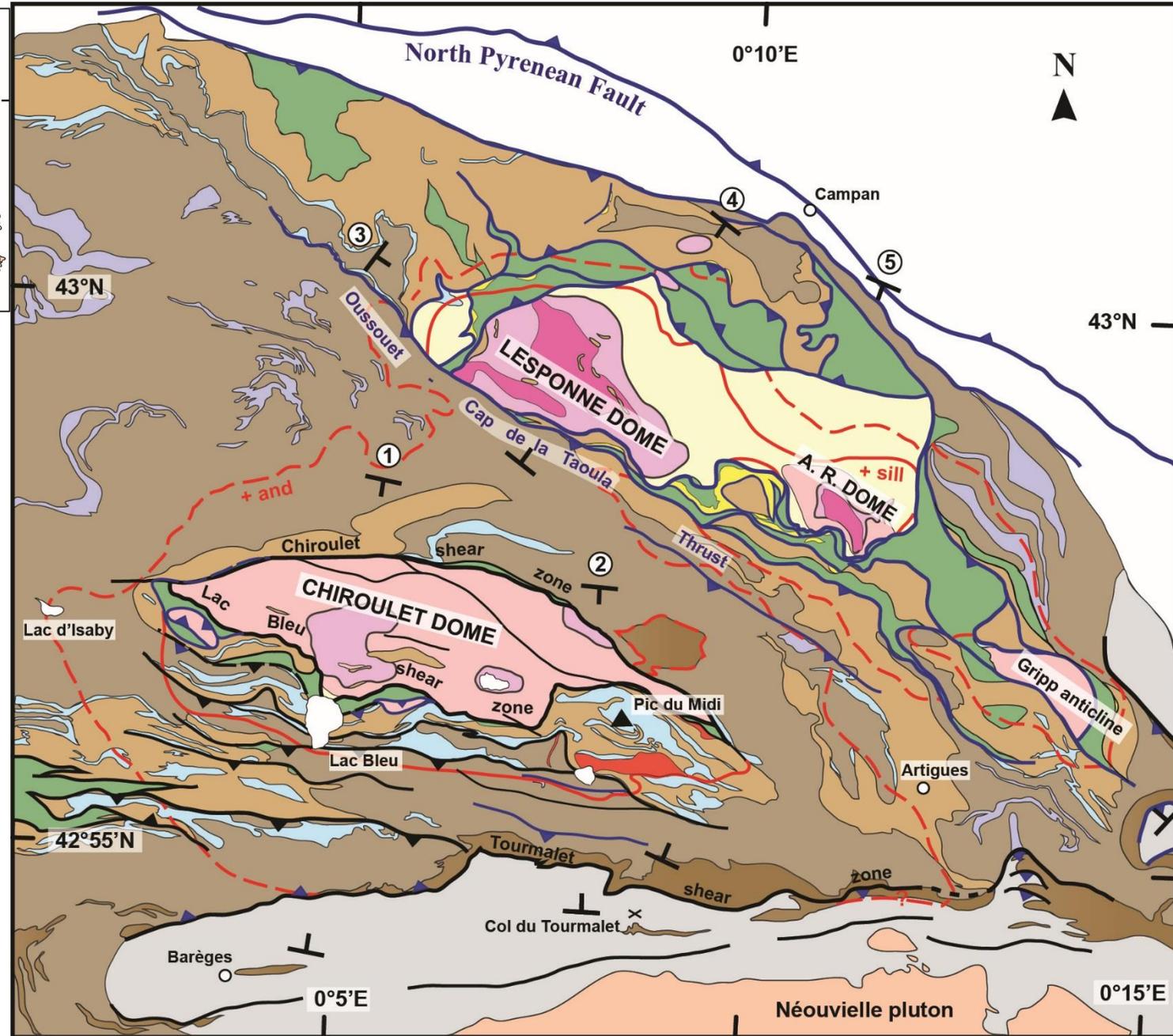
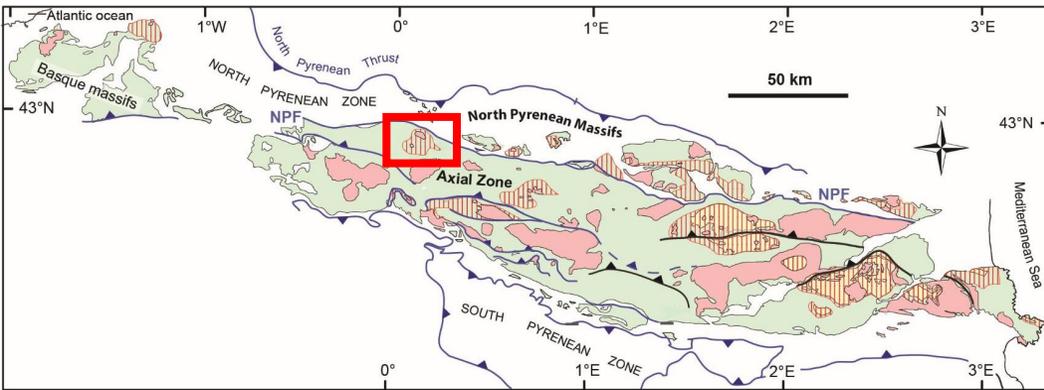


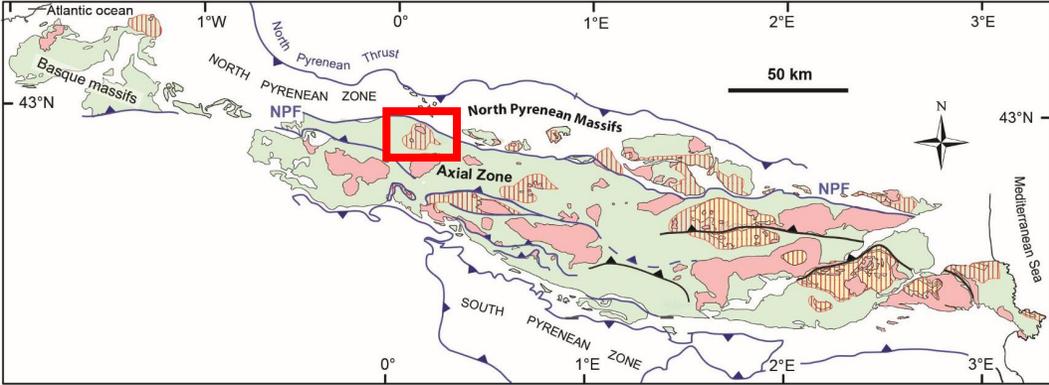
Cochelin et al. 2017



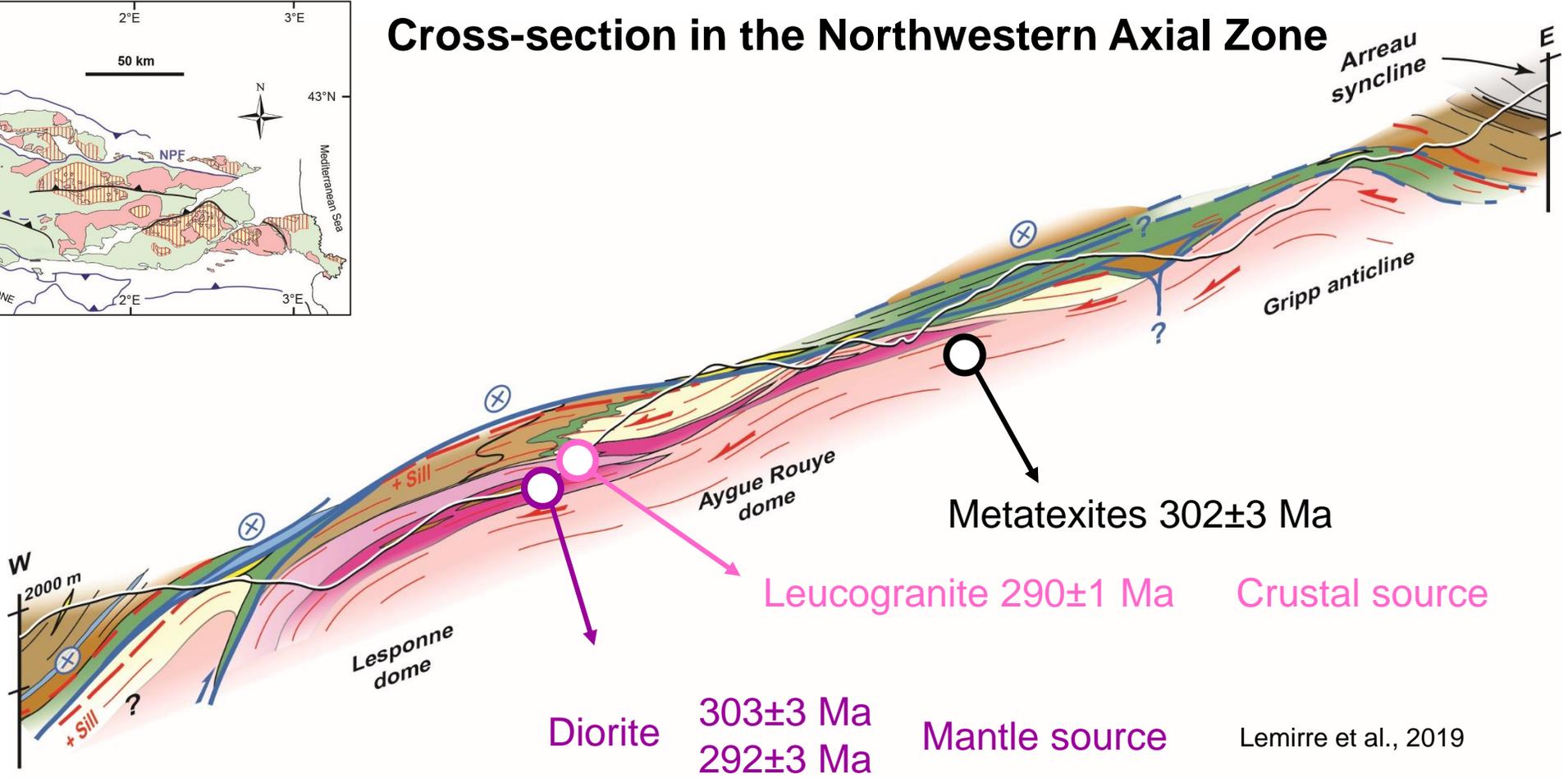
# Cross-section in the Northwestern Axial Zone

Cochelin et al., in prep

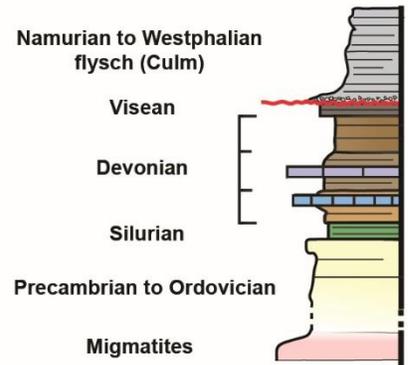




# Cross-section in the Northwestern Axial Zone



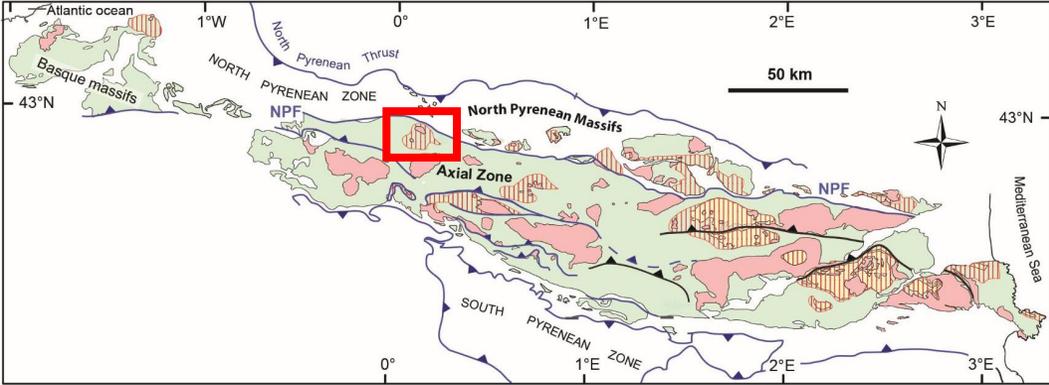
## Rock pile



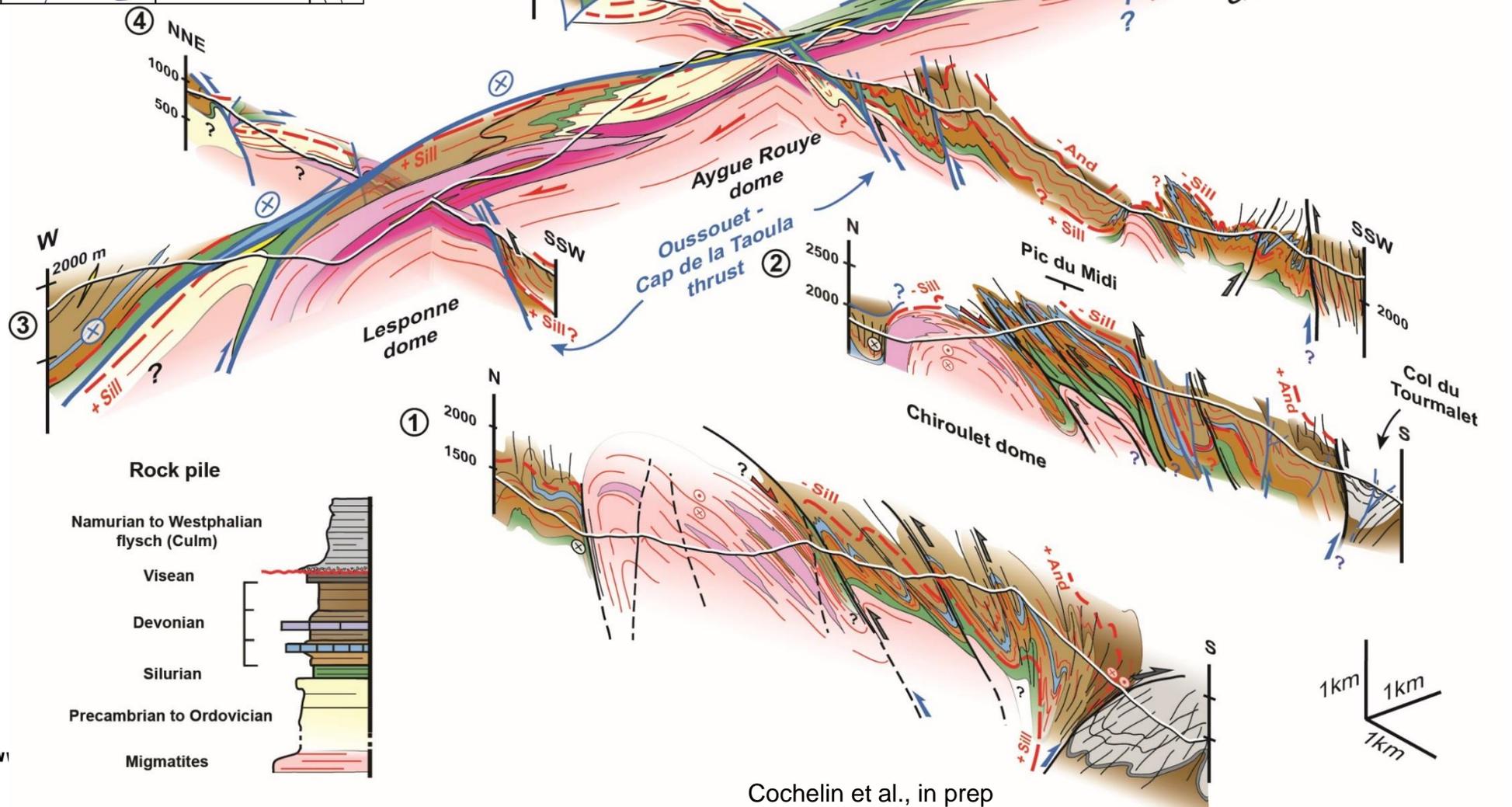
Leucogranite 290±1 Ma      Crustal source

Diorite 303±3 Ma  
292±3 Ma      Mantle source

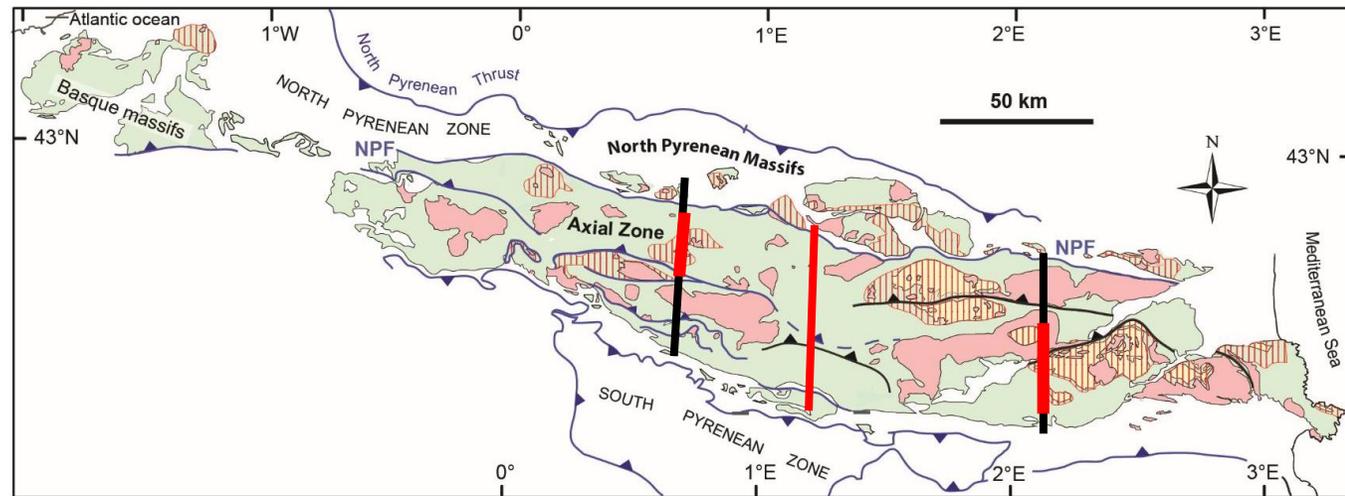
Lemirre et al., 2019



# Cross-section in the Northwestern Axial Zone



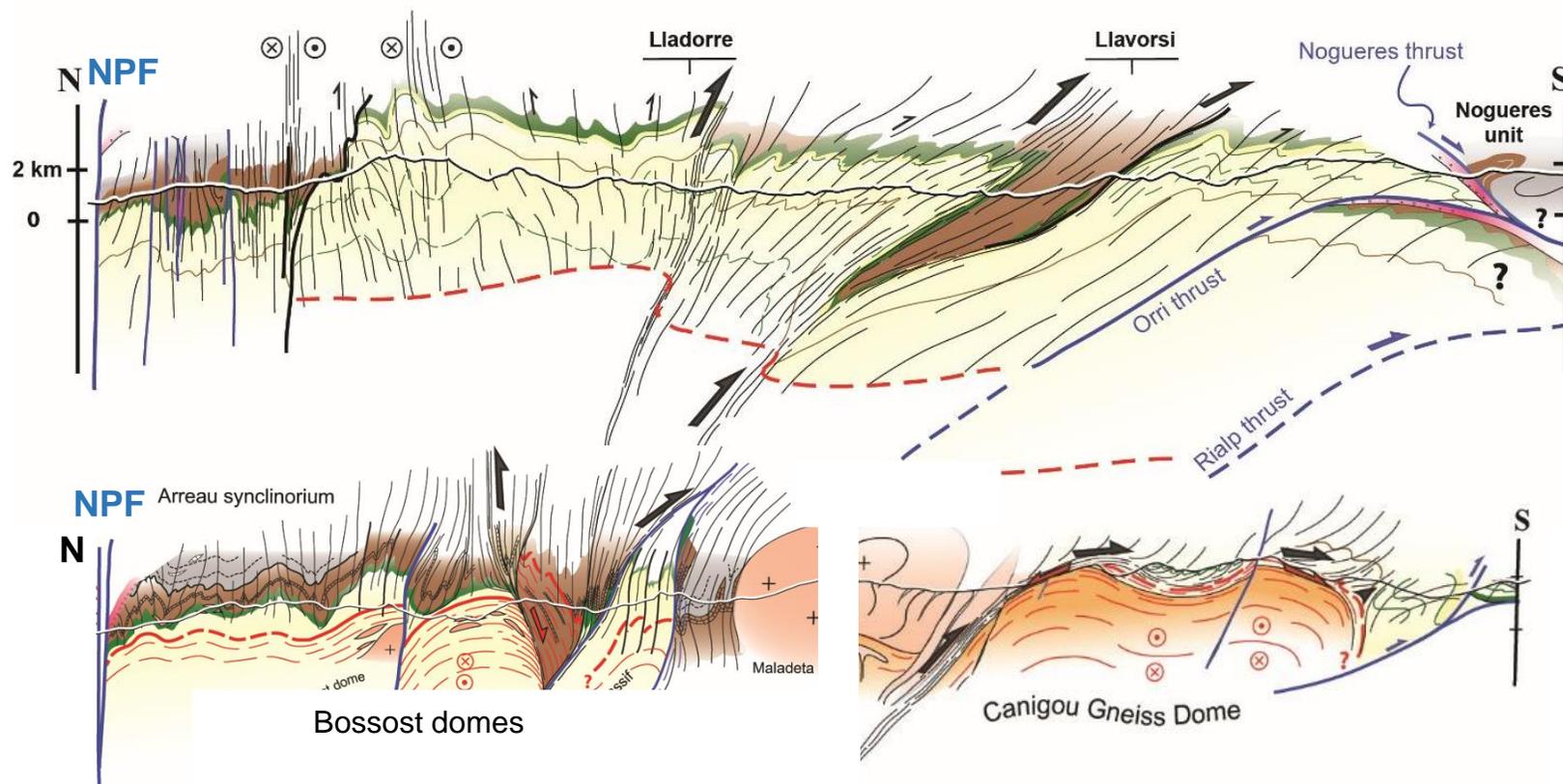
# Structural segmentation of the Axial Zone



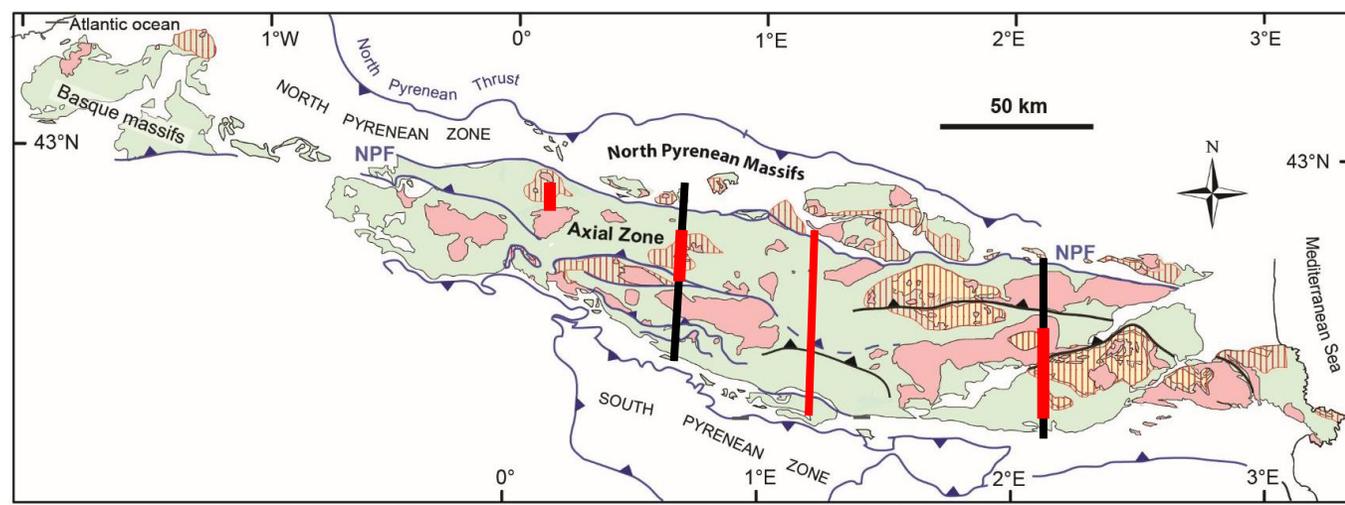
heterogeneous - apparently coaxial deformation

Non coaxial «top to the south» shearing

?



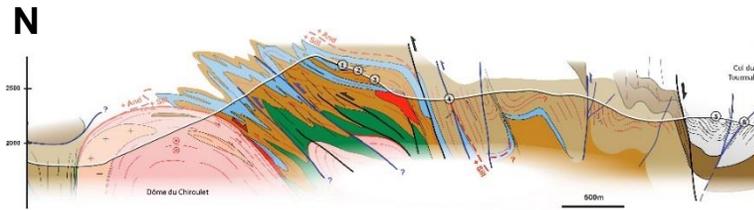
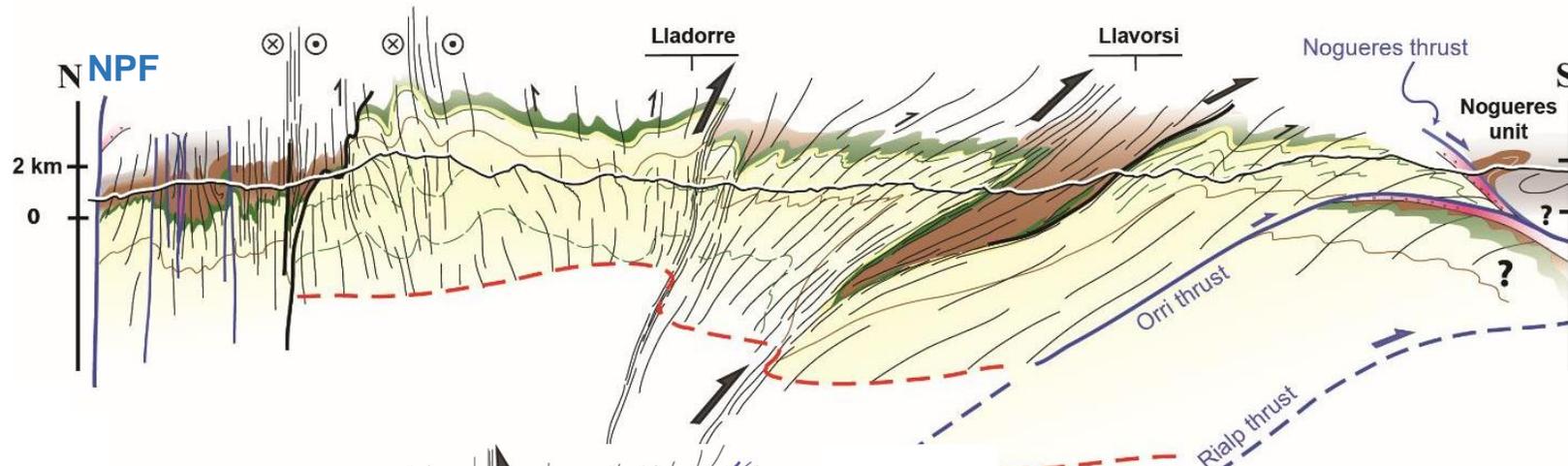
# Structural segmentation of the Axial Zone



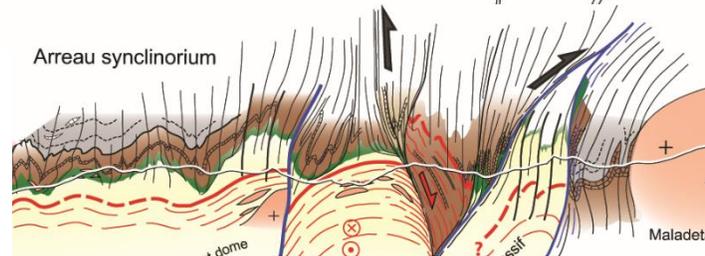
heterogeneous - apparently coaxial deformation

Non coaxial «top to the south» shearing

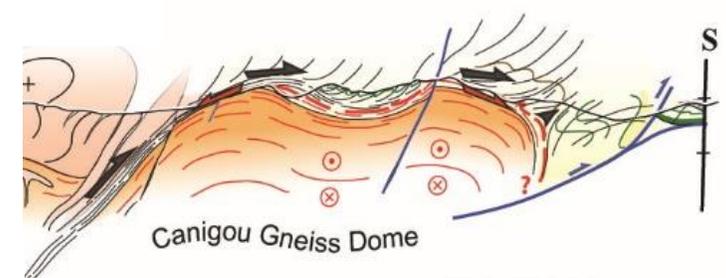
Non-coaxial  
« top to the north »  
shearing



Chiroulet dome

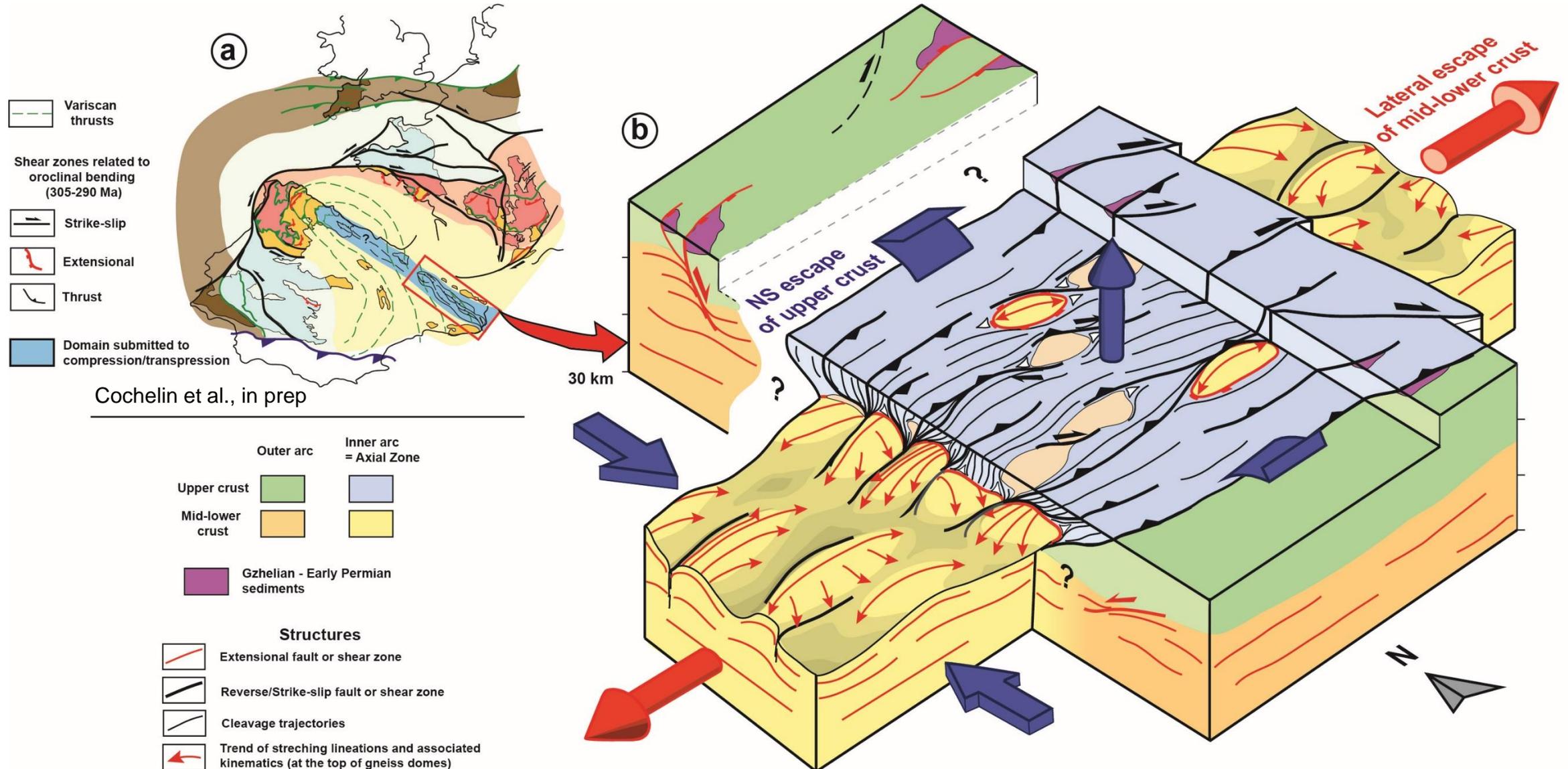


Bossost domes

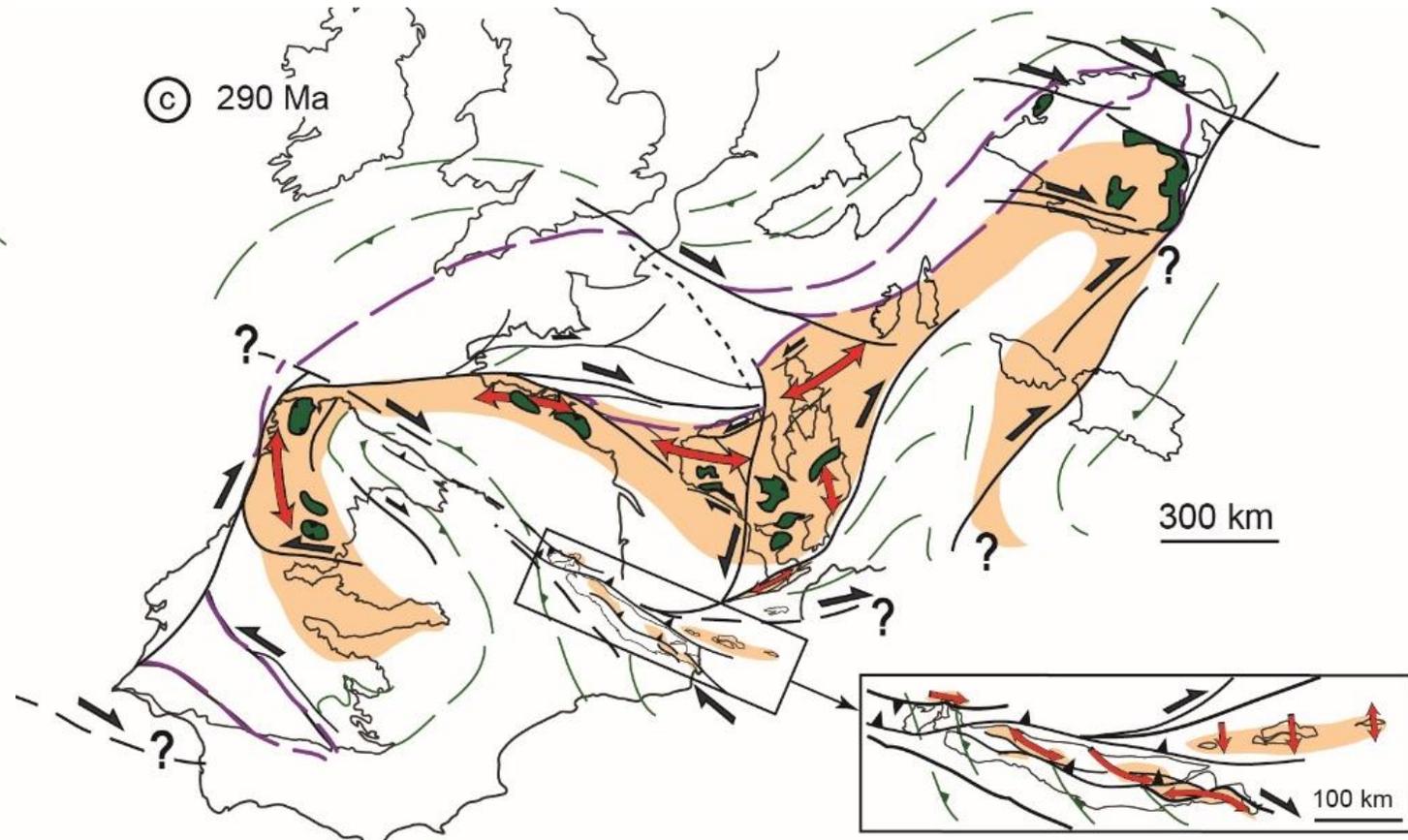
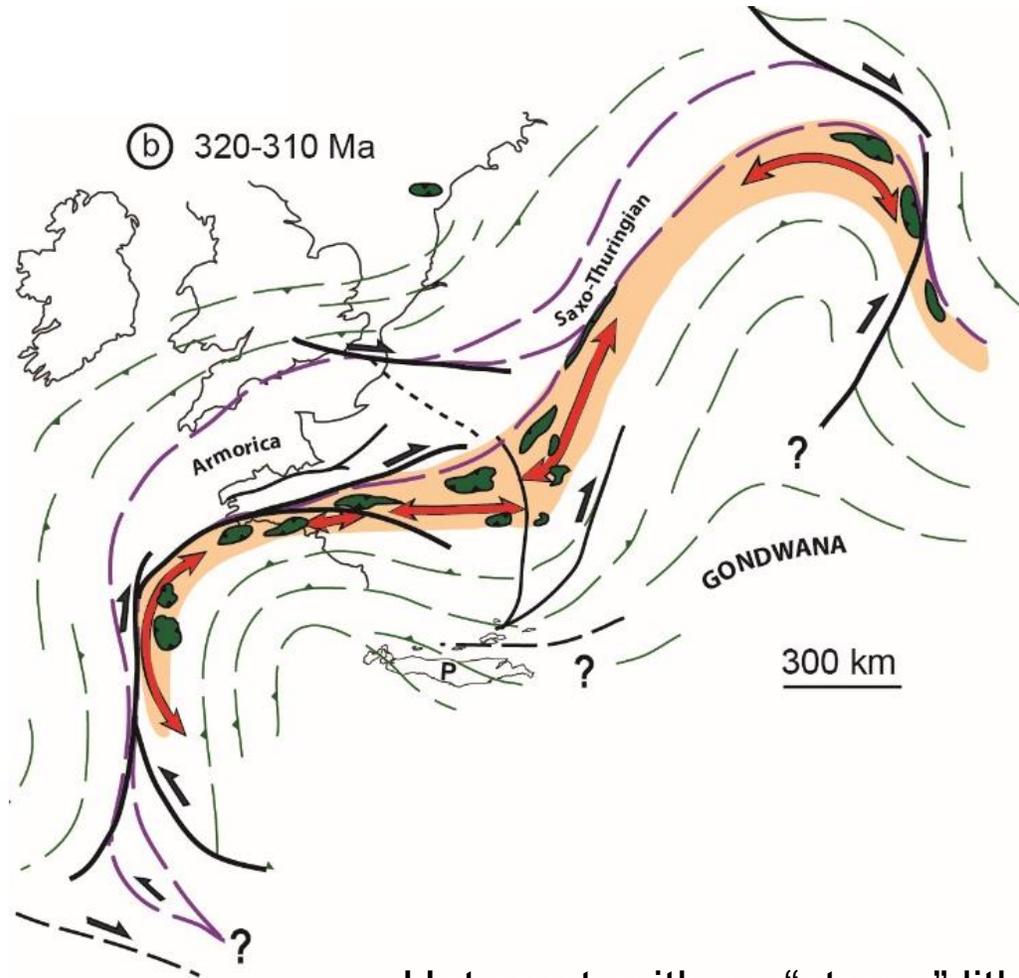


Canigou Gneiss Dome

# Three-dimensional deformation model (300-290 Ma)



# “Hot Orogen” deformation patterns in the core of an orocline



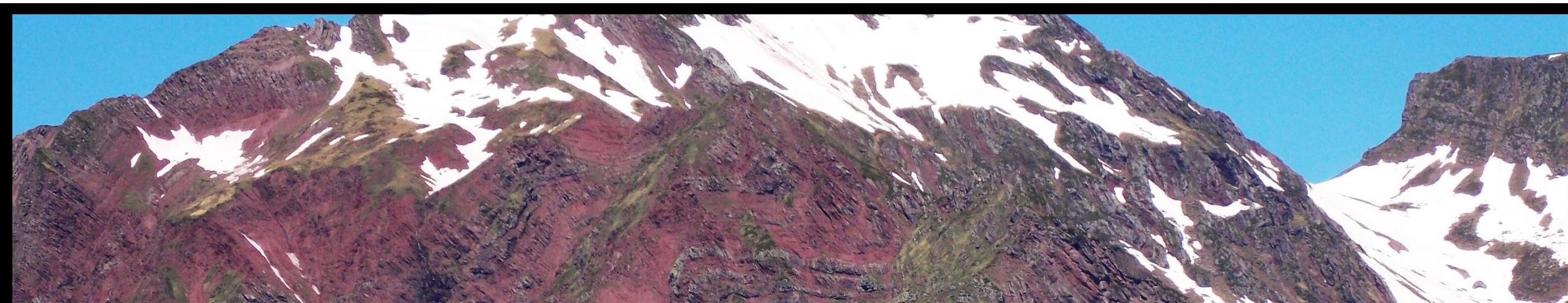
Cochelin et al. 2017

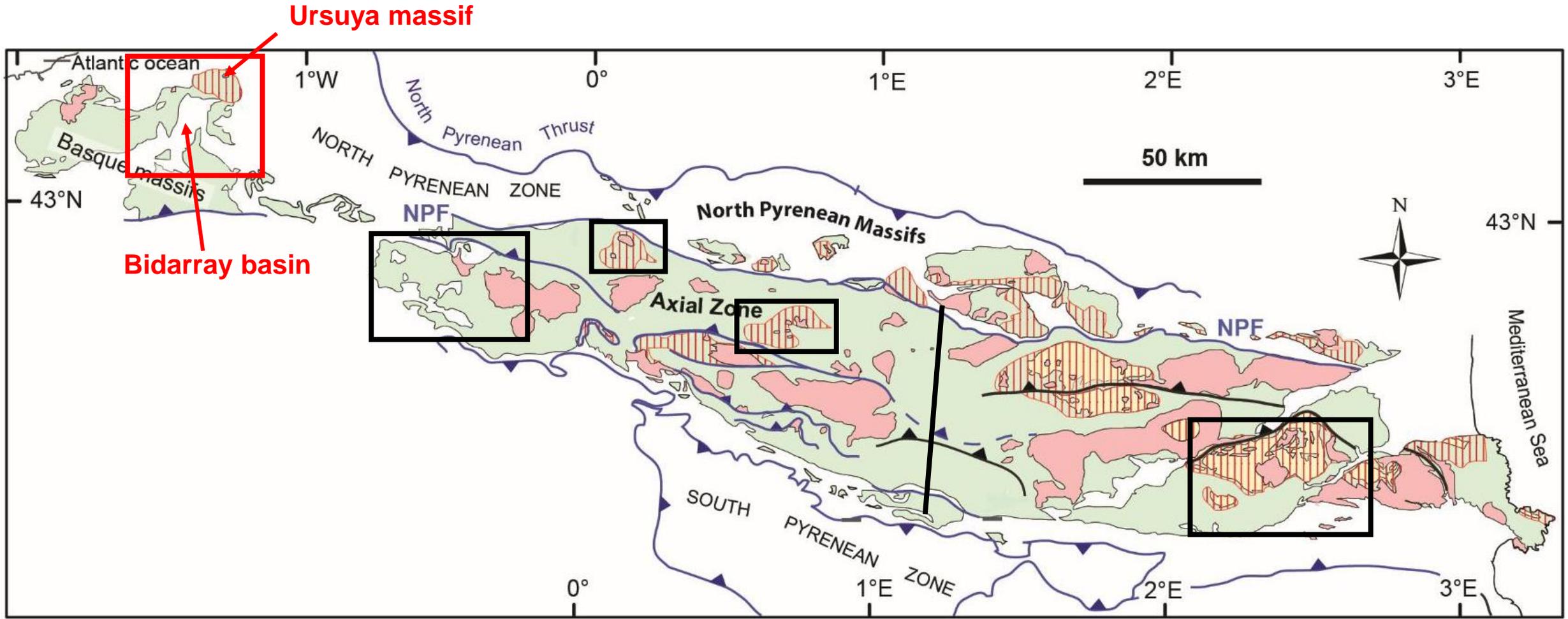
Hot crust, with no “strong” lithospheric mantle → Delamination

In a context of oroclinal buckling

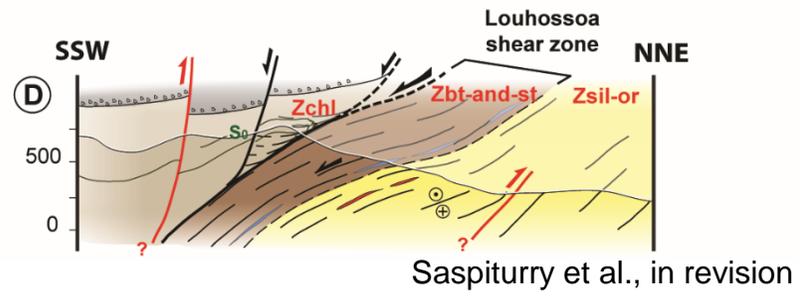
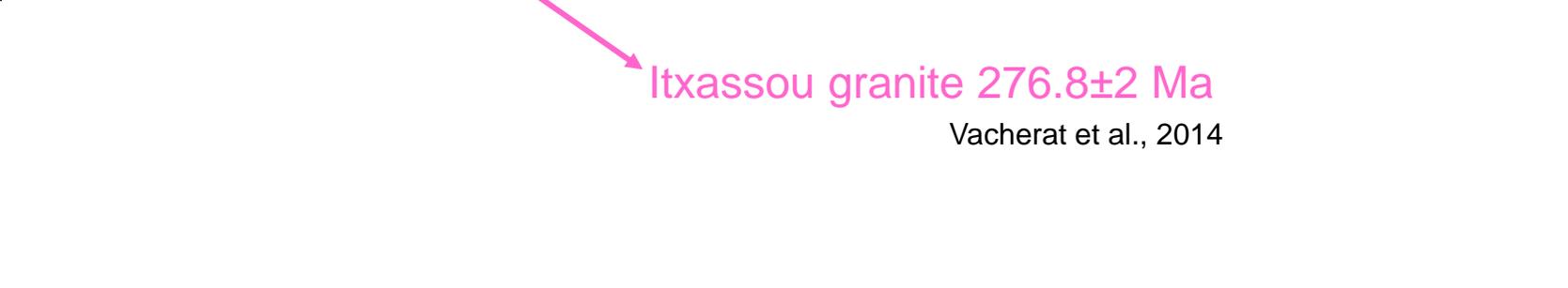
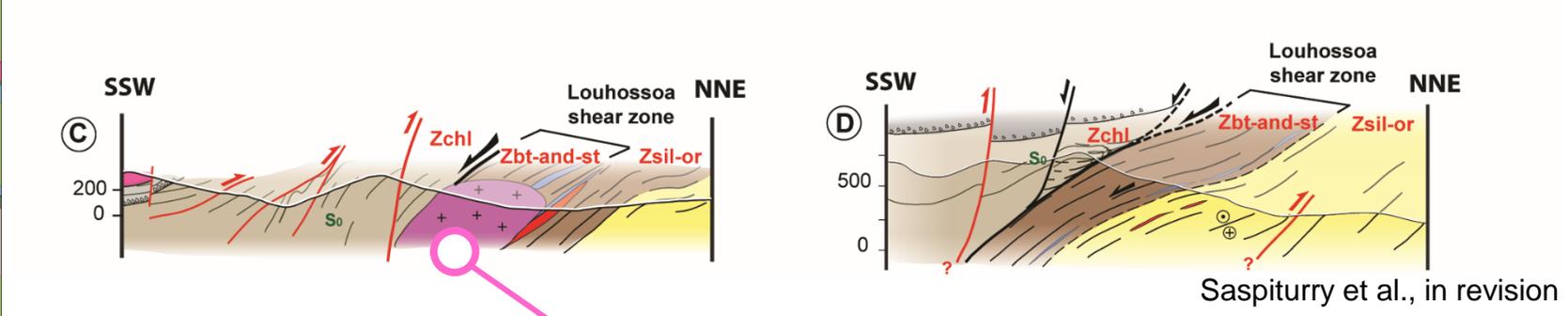
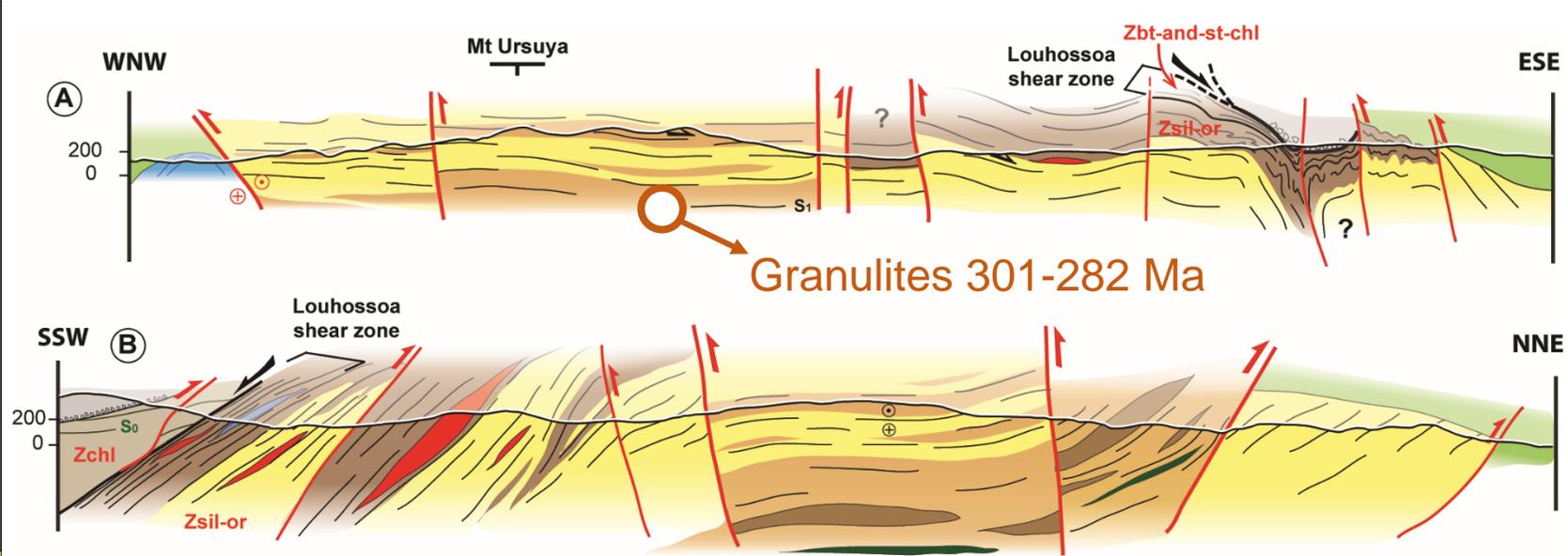
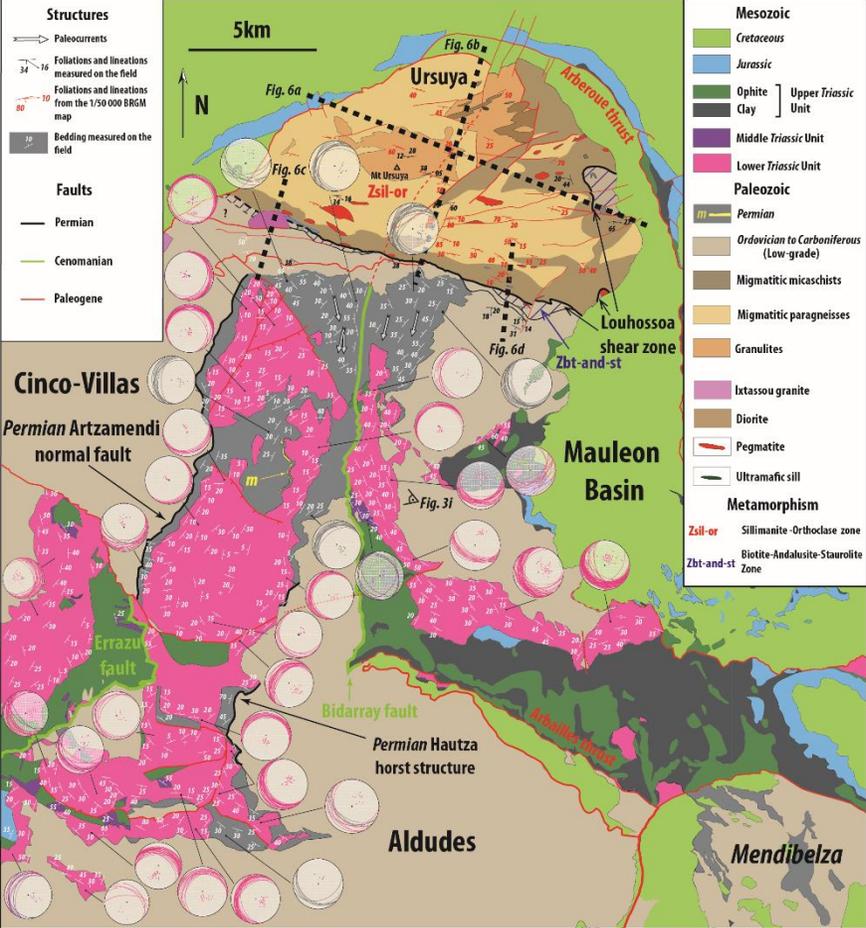


## **3 – Post-orogenic deformation (Permian)**

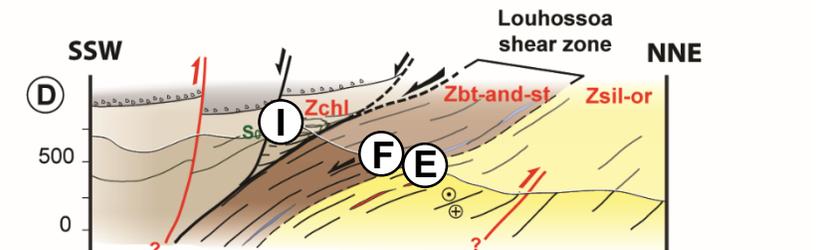
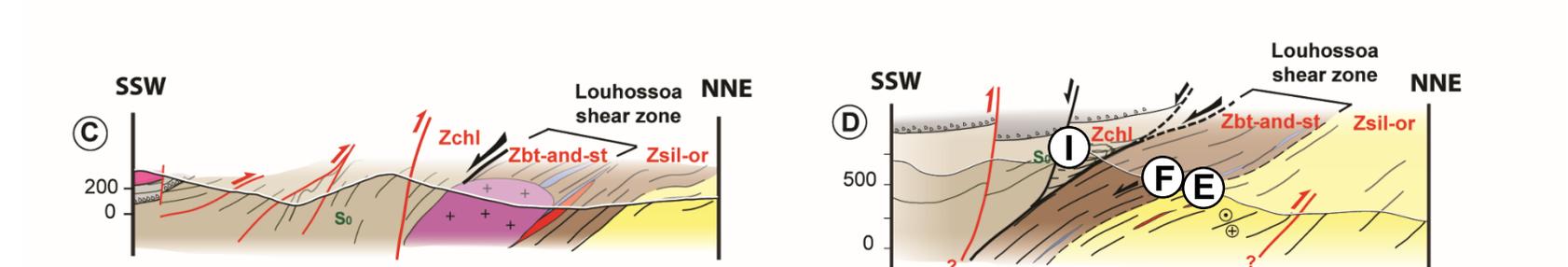
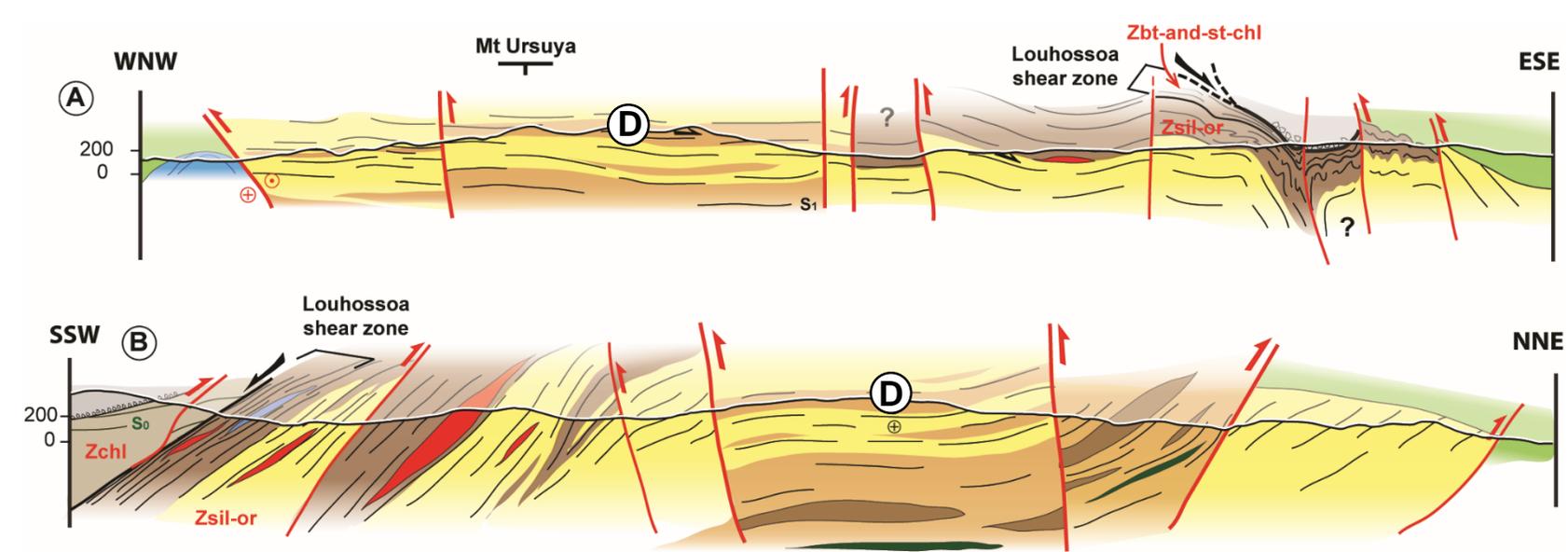
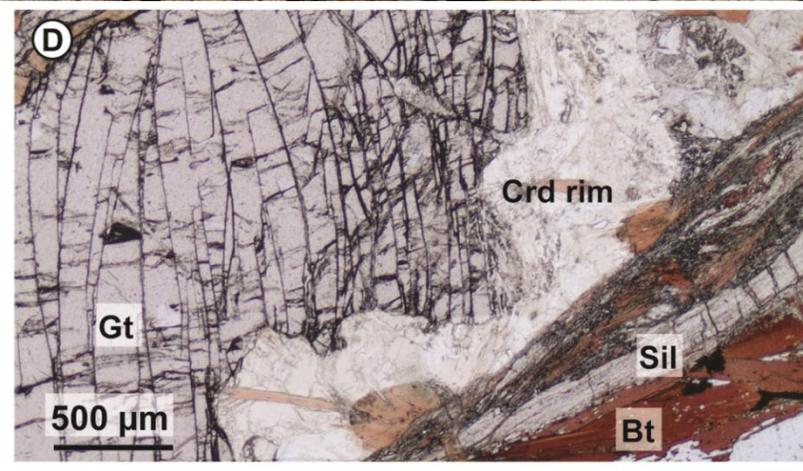
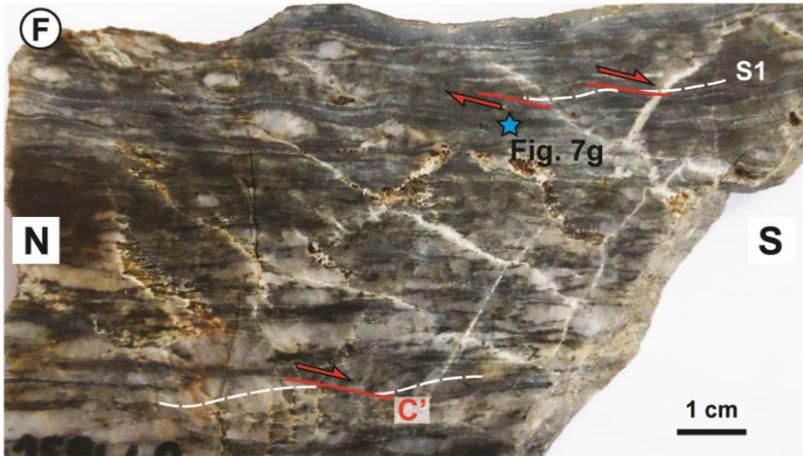




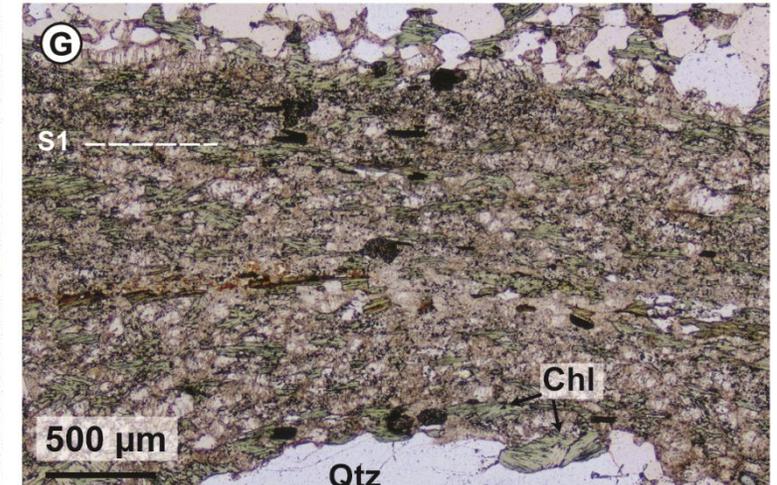
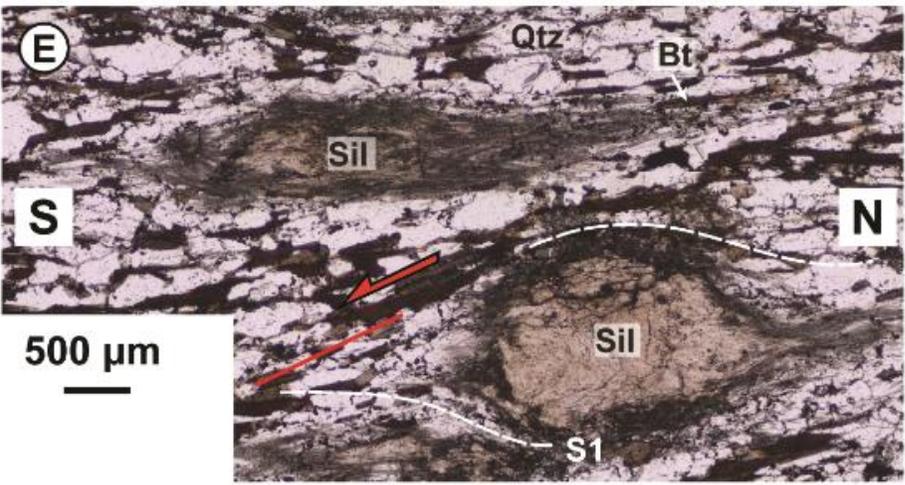
**Permian extension: focus on the North Pyrenean and Basque massifs**



Itxassou granite 276.8±2 Ma  
Vacherat et al., 2014



Saspiturry et al., in revision

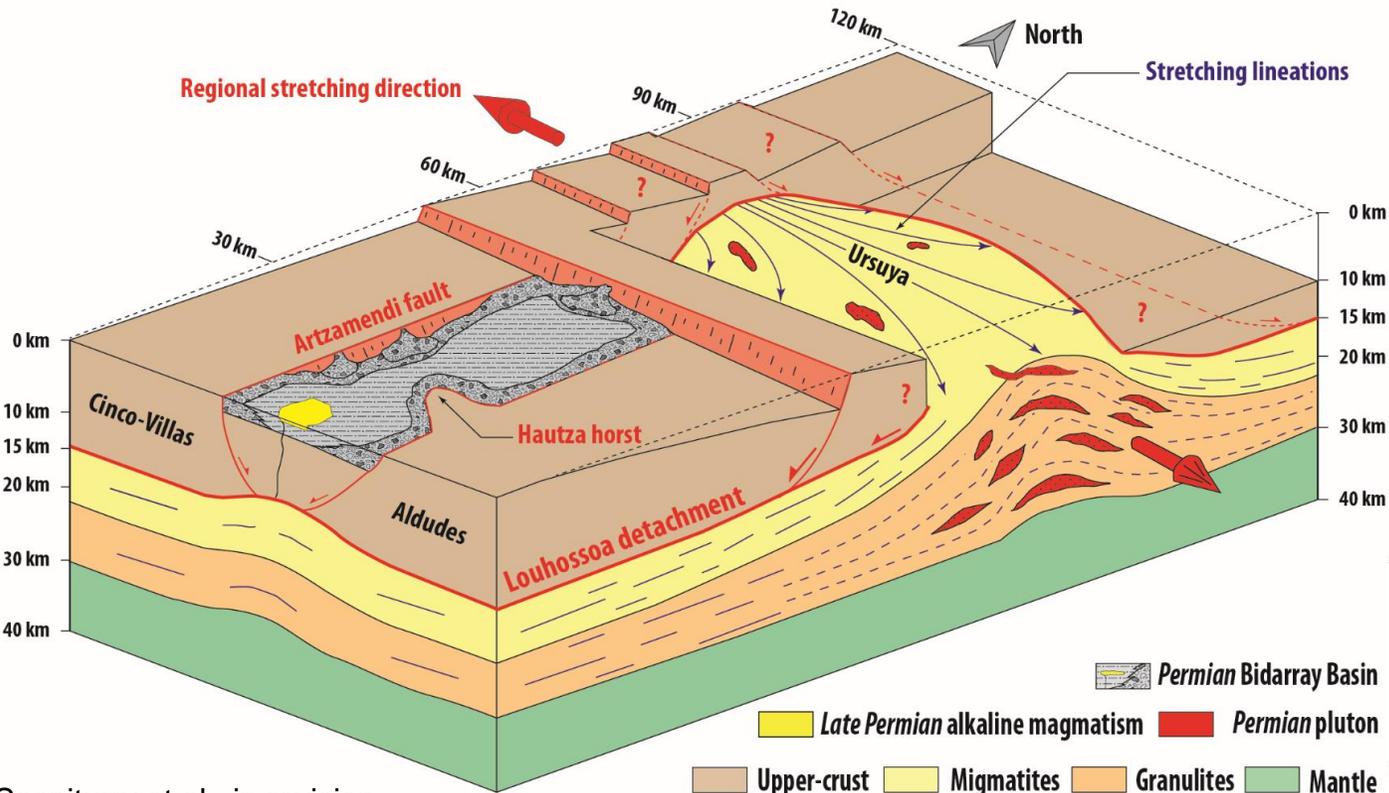


# Exhumation of granulites by regional extension (still hot lithosphere)

Mid-crustal granulites exhumed up to 5-6 km into a Metamorphic Core Complex

MCC is parallel to regional direction of stretching

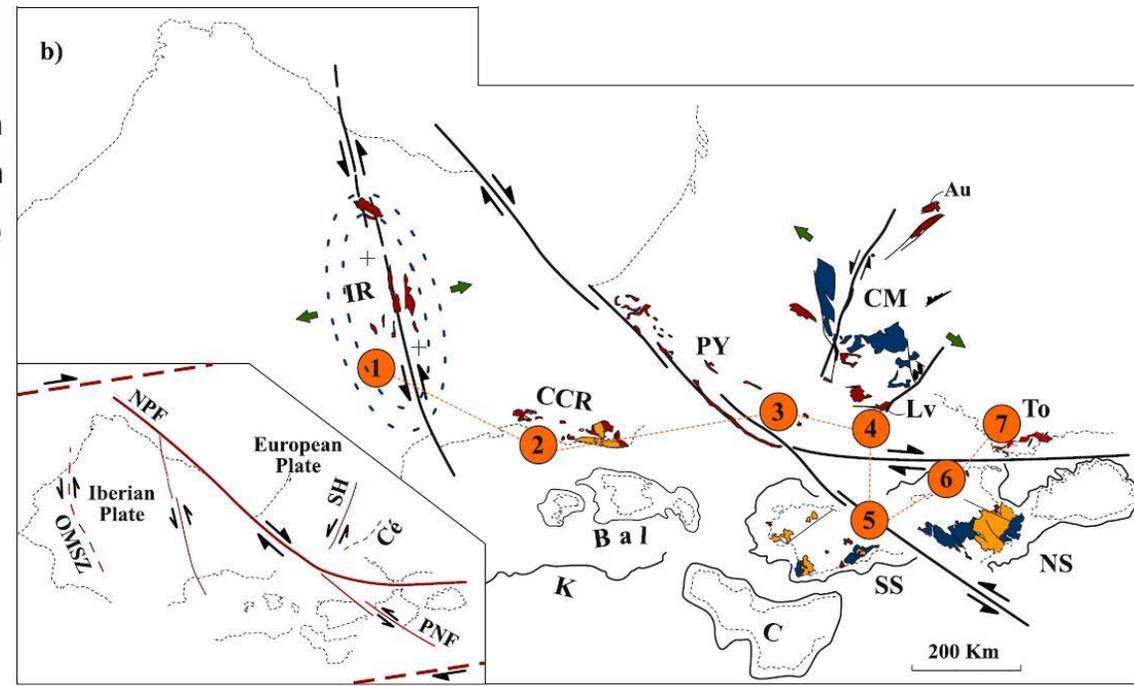
Development of extensional basins (grabens)



Saspiturry et al., in revision

→ Lithosphere is still hot

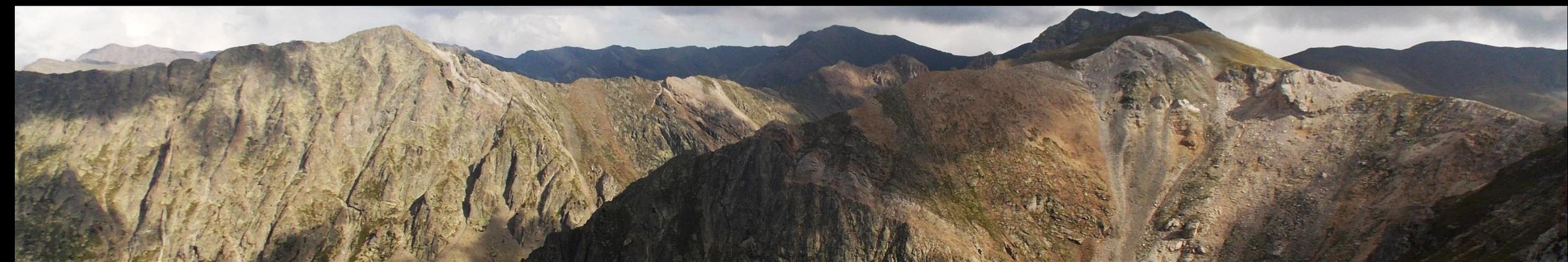
→ Deformation is **distributed** in the whole crust (strain partitioning) rather than localized within lithospheric-scale strike-slip faults



Gretter et al., 2015



## Conclusions & perspectives



# Concluding points

## Early deformation (D1) = “Variscan” deformation (330-310Ma)

- Well expressed in upper crustal levels: in first order **thin-skin tectonics** → **no clues of Variscan nappes**
- Compatible with deformation in the **distant foreland** of the belt, northern branch of the Arc

## Main deformation phase: N-S shortening (310-290Ma)

- **Vertical strain partitioning** between the upper crust (**thickening**) and the weak lower crust (**thinning**)
- No stratigraphic nor metamorphic breaks → **no clues of Variscan nappes**
- **Homogeneous deformation**, the **Axial Zone = Continuous unit** & a doubly vergent accretionary domain
- **Shortening** induced by the **bending** of the Cantabrian **orocline** after **delamination**

## Permian E-W extension (after 290Ma)

- Exhumation of granulites within Metamorphic Core Complexes & formation of Permian grabens
- Still hot lithosphere, with dominant **homogeneous** deformation and **thinning**

# For future investigations?

## Early deformation (D1) = “Variscan” deformation (330-310Ma)

- D1 deformation in the rest of the Pyrenees? Further investigations are needed
- Tectonic context during the formation of Devonian and Carboniferous basins?  
→ Syn-orogenic development during southward thrusting (nappes) is now clearly challenged

## Main deformation phase: N-S shortening (310-290Ma)

- Variscan deformation(s) in North Pyrenean Massifs is still not clear  
→ Link with the Axial Zone?
- Amount of shortening is difficult to estimate
- Amount of exhumation within gneiss domes is not well constrained

## Permian extension (after 290Ma)

- Deformation(s) in the North Pyrenean Massifs is still not clear
- Evidences of Permian extension in the Axial Zone are very scarce

## Alpine history

- Paleozoic structures should be taken into account to better constrain later tectonic phases...

... Thanks to the RGF program, it is clearly possible now...

# plan

État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

**Le chantier RGF-Pyrénées**

- Sédimentologie – stratigraphie – paléo-environnement
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

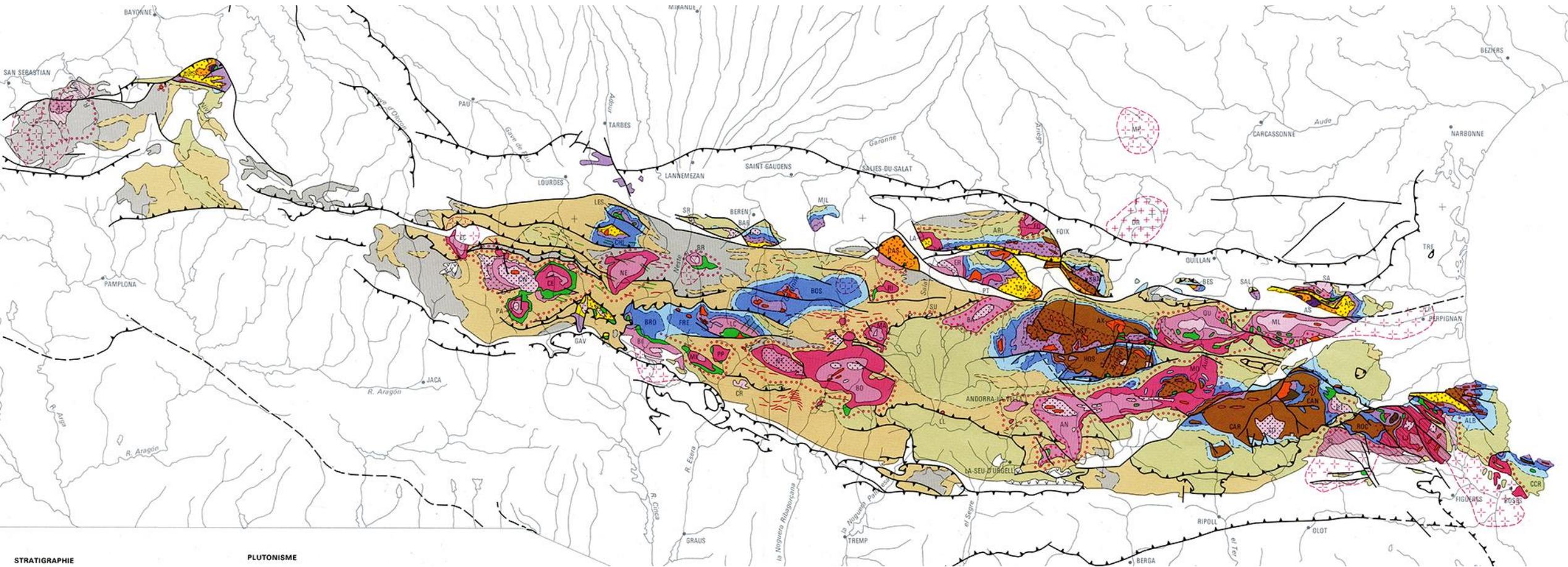
# Origine et développement de la thermicité dans les Pyrénées varisques, conséquences sur l'évolution du segment ouest-européen de l'orogène

*Baptiste Lemirre*

Encadrants : *Michel de Saint Blanquat & Stéphanie Duchêne*



# Les Pyrénées varisques : un avant-pays chaud



Barnolas, Chiron, 1996



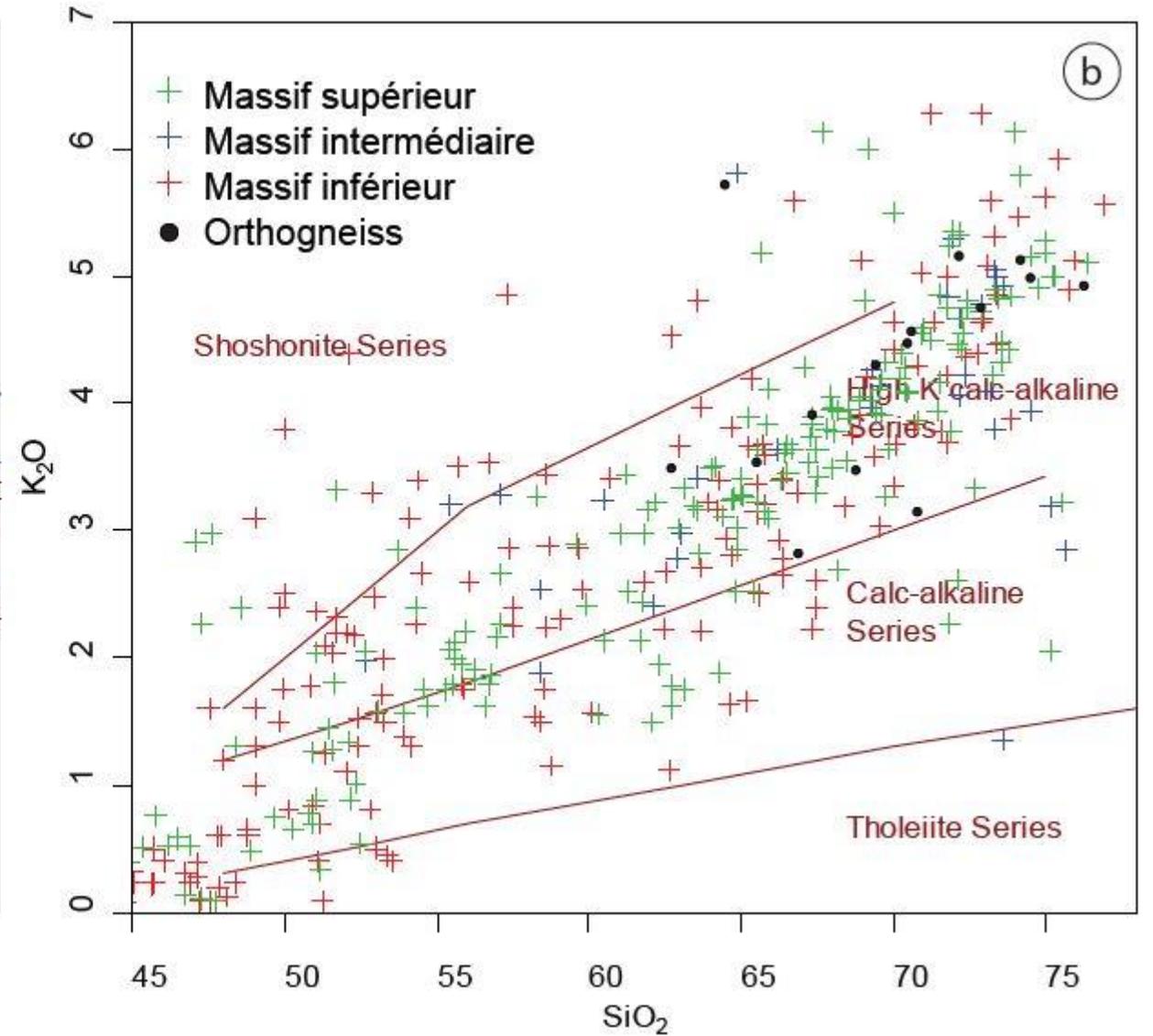
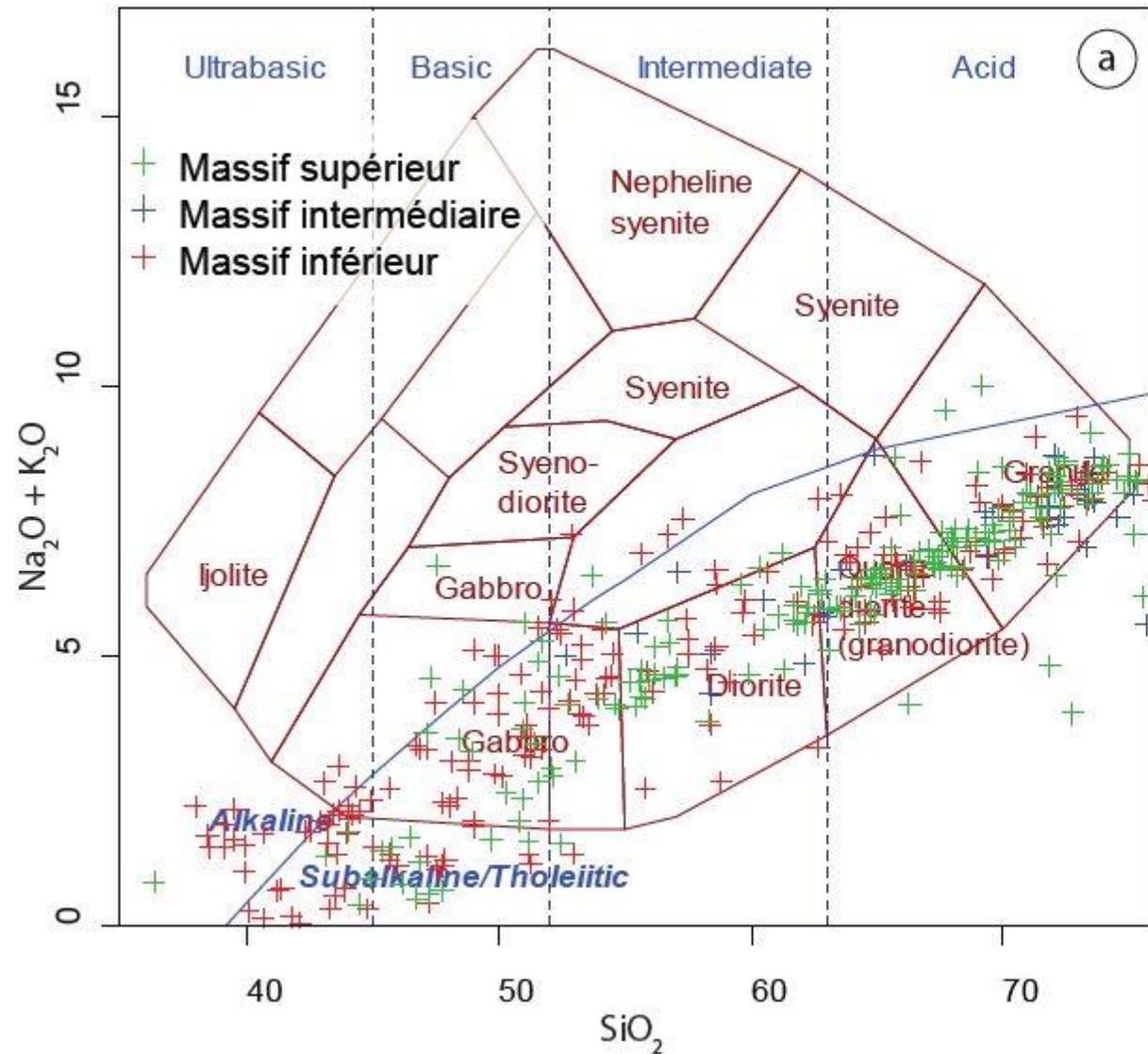




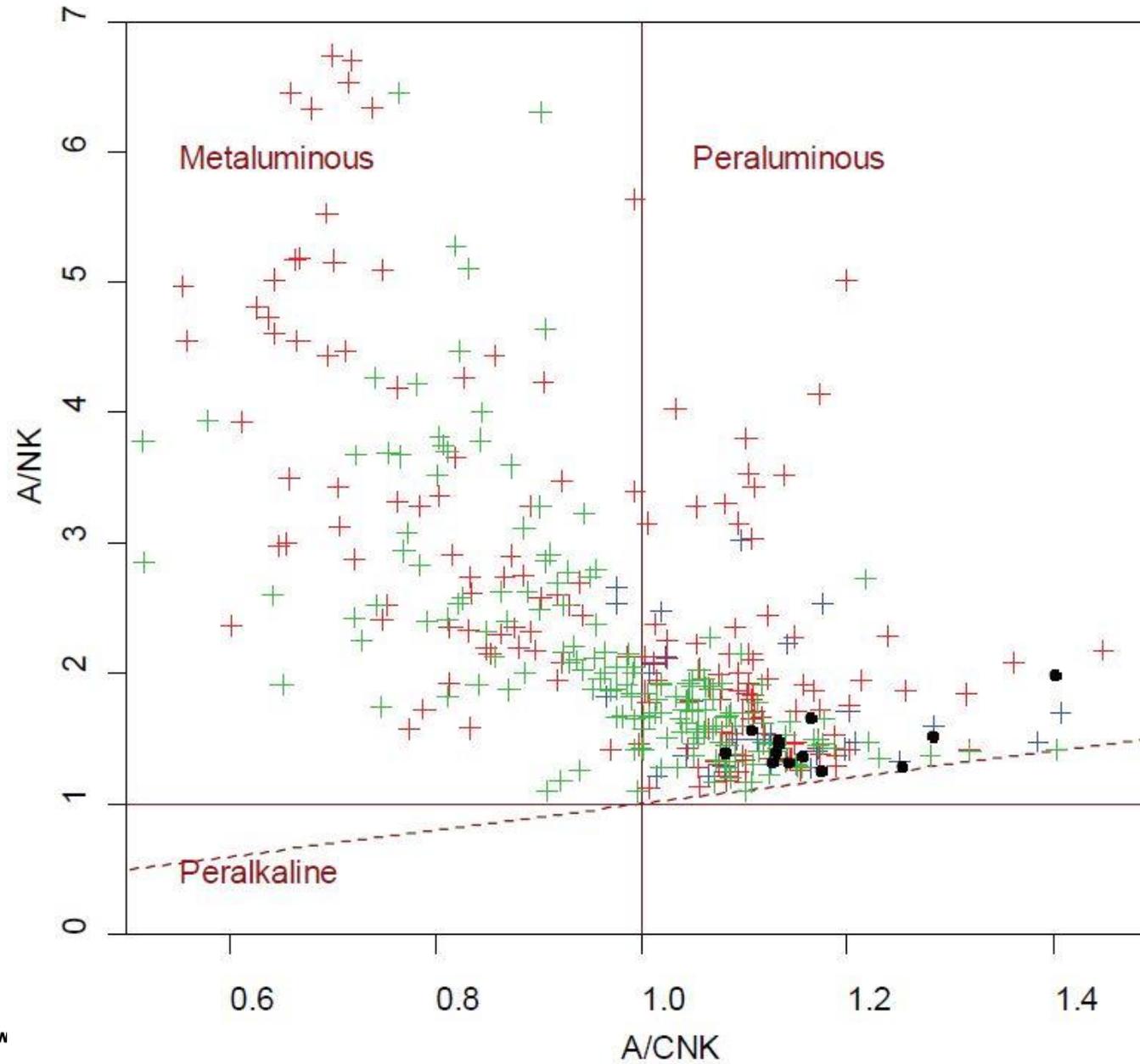




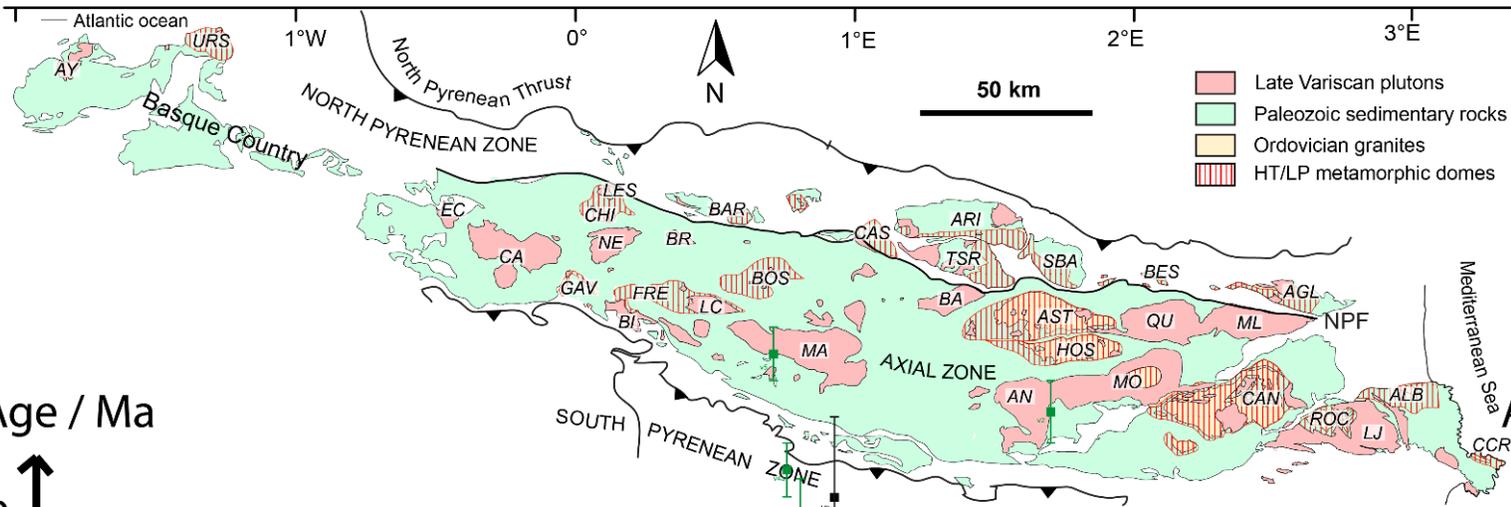
# Magmatisme varisque des Pyrénées



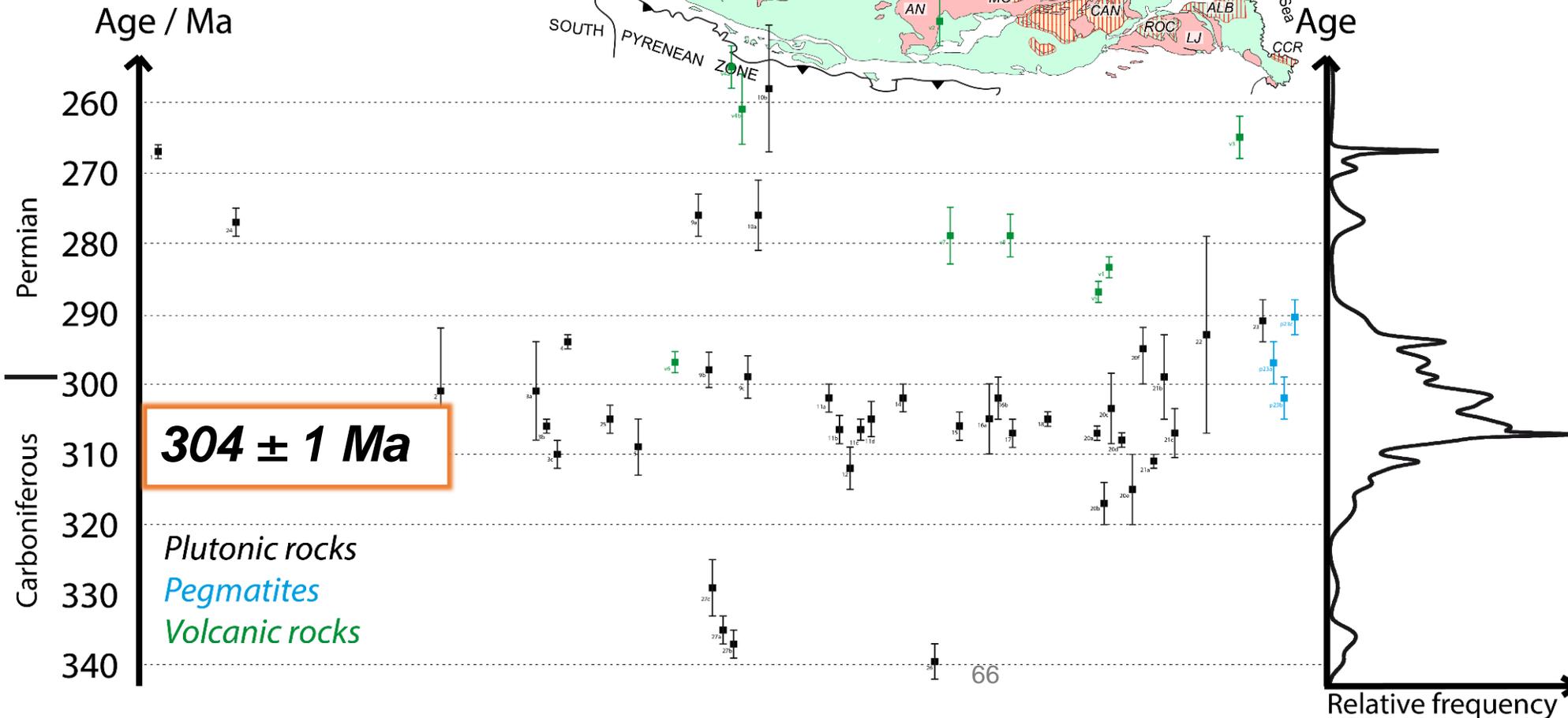
# Magmatisme varisque des Pyrénées



# Magmatisme varisque des Pyrénées



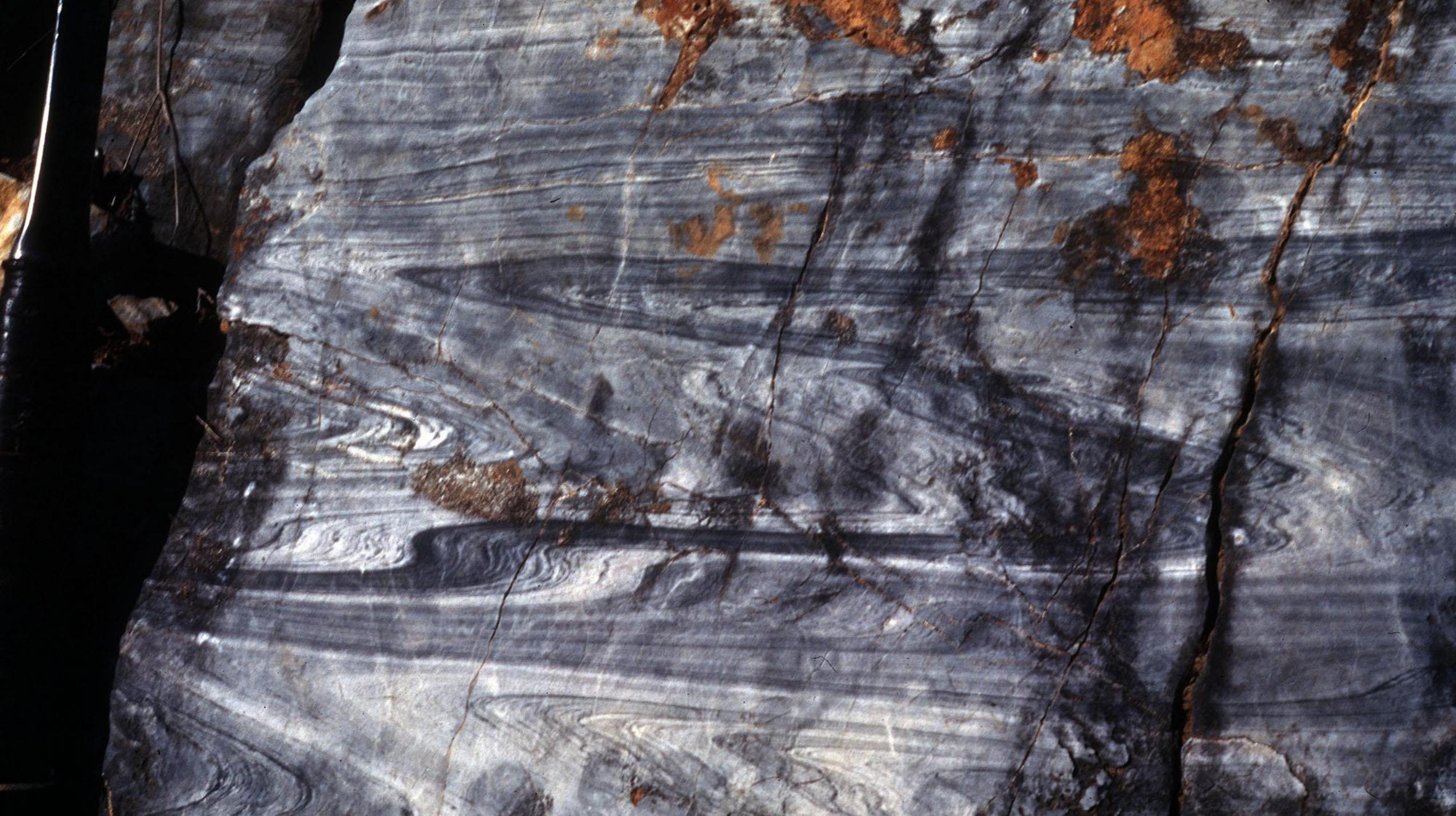
*Denèle et al. (2014) et références incluses*  
*Mezger and Gerdes (2014)*  
*Esteban et al. (2015)*



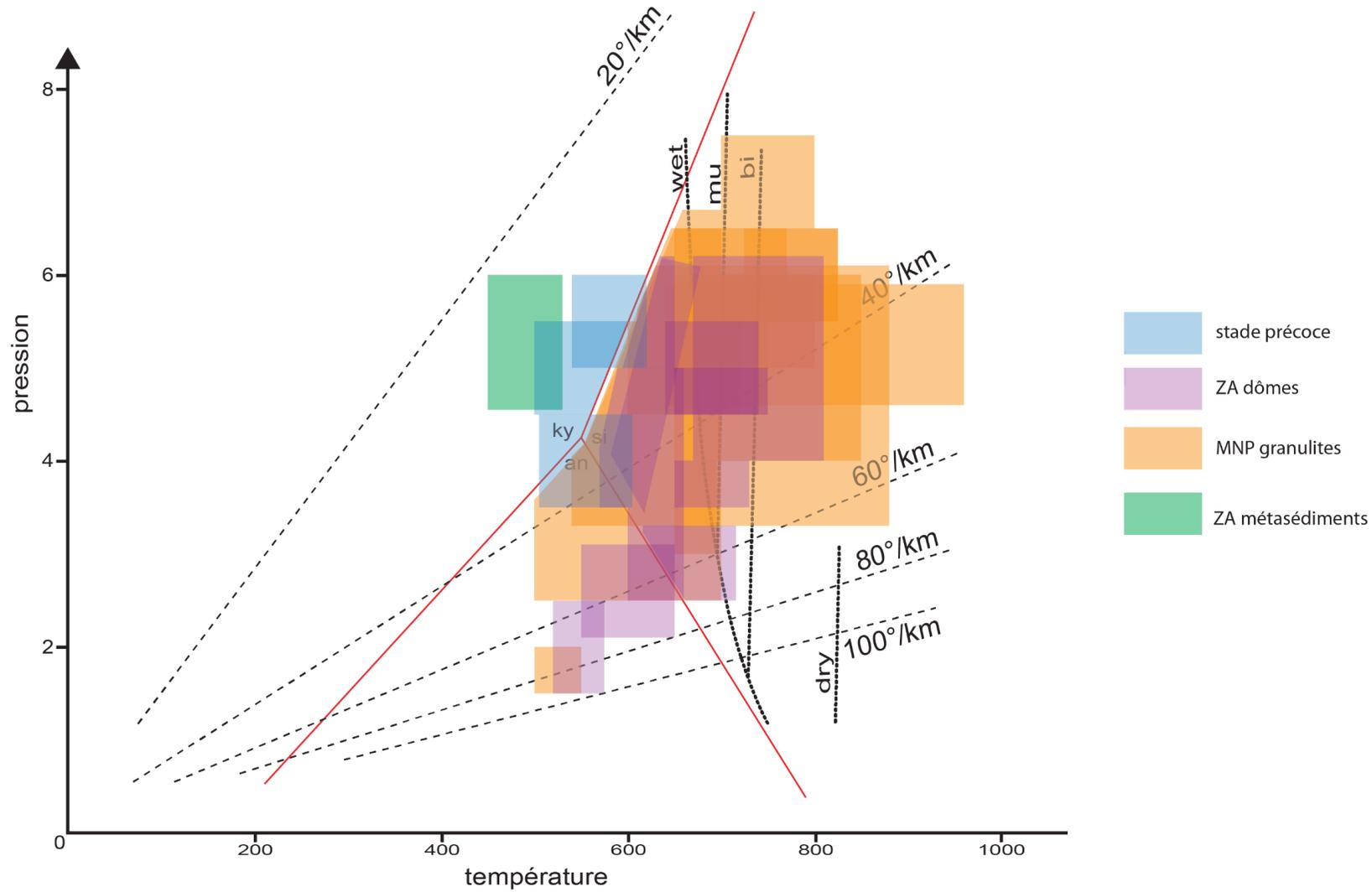




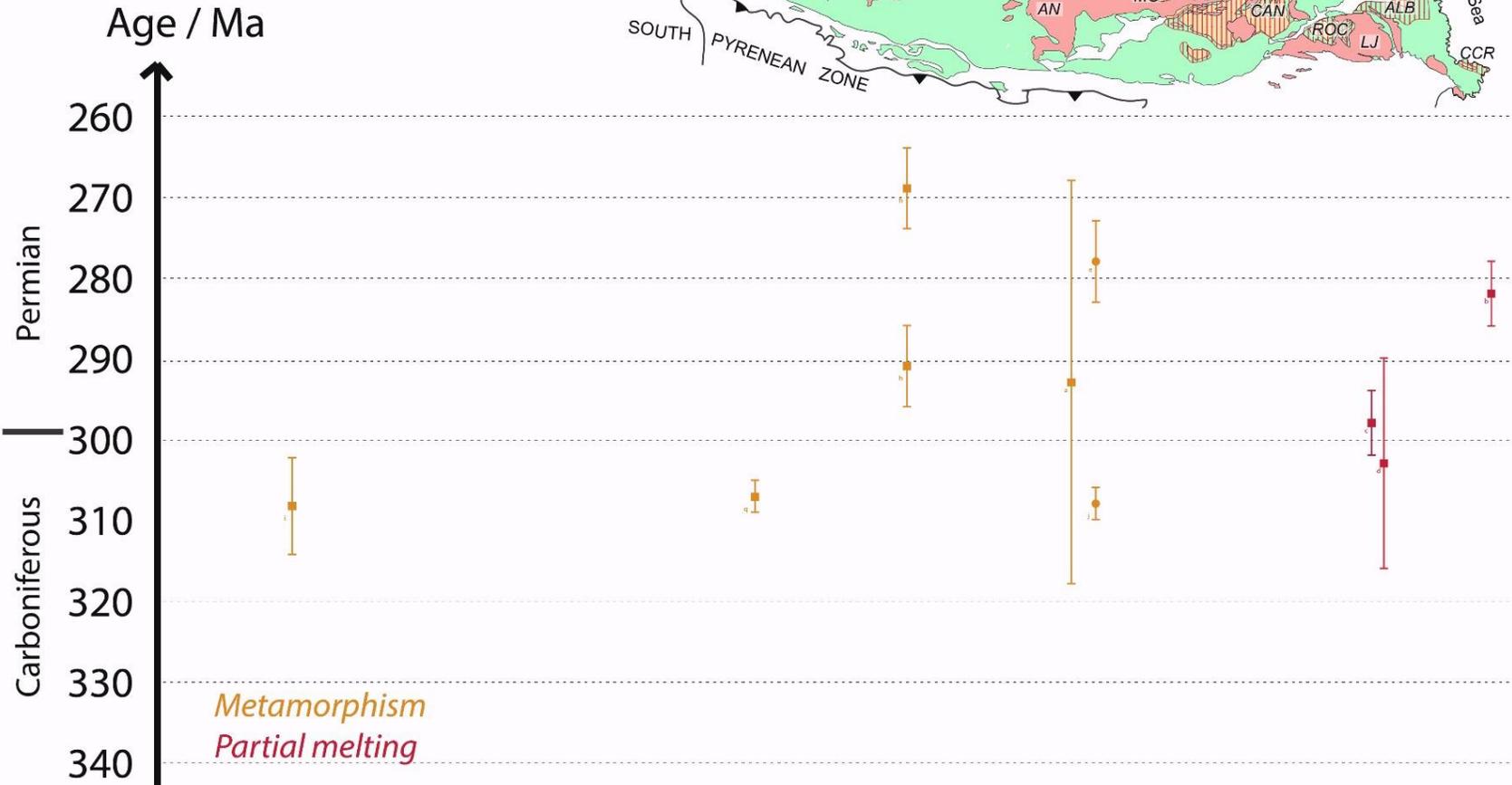
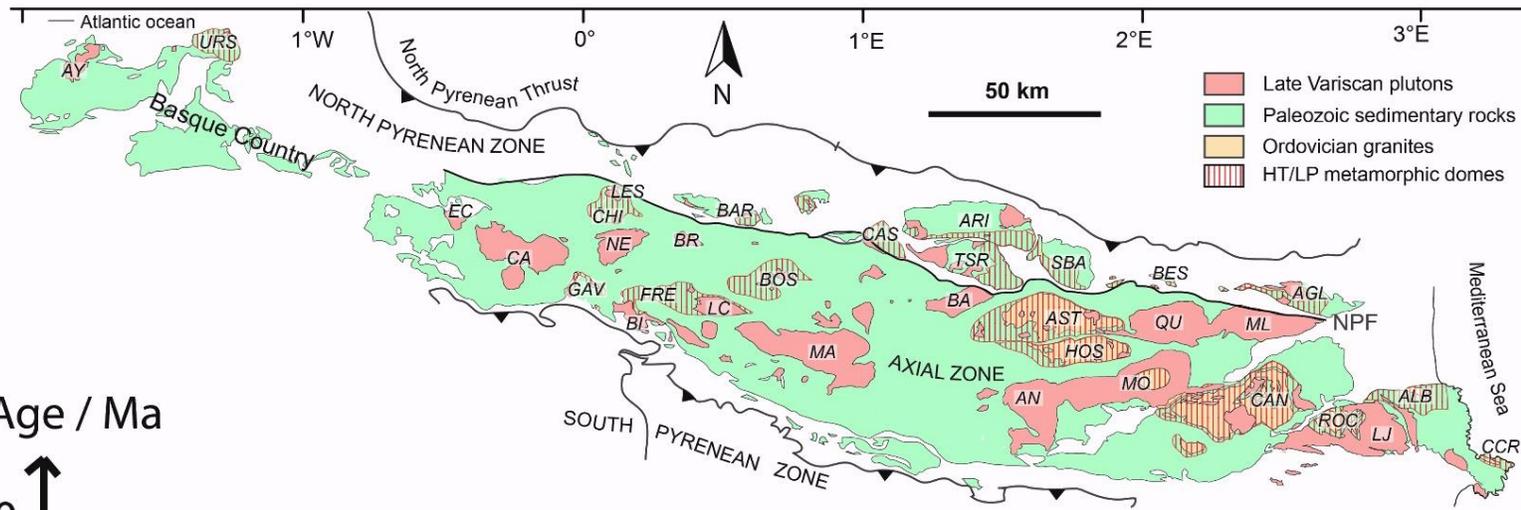




# Métamorphisme HT-BP varisque des Pyrénées



# Métamorphisme HT-BP varisque des Pyrénées



*Delaperrière et al. (1994)*  
*Kilzi (2014)*  
*Vacherat (2014)*  
*Aguilar et al. (2014)*

# Les Pyrénées varisques : un avant-pays chaud

- Importance du métamorphisme HT-BP et du magmatisme
- Epaissement crustal modéré, absence de métamorphisme HP

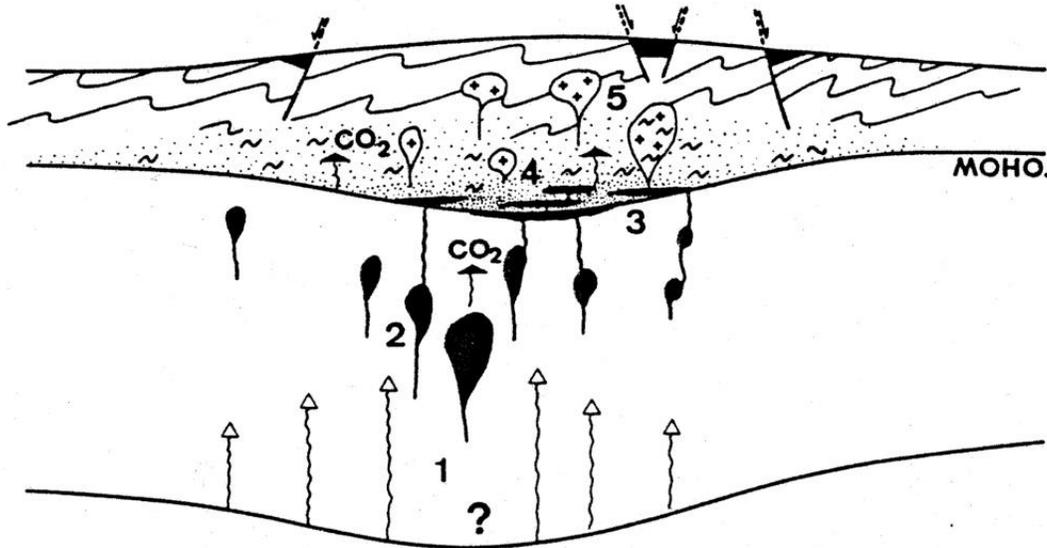
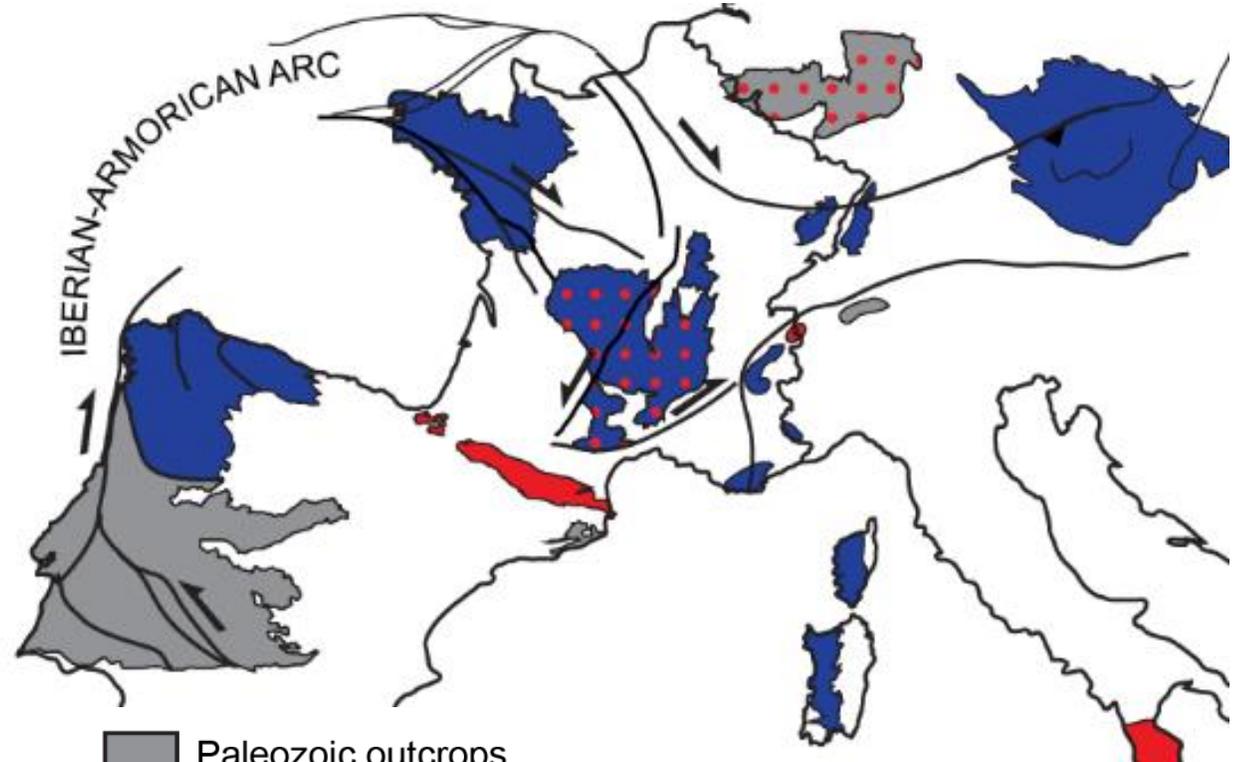


Fig. 62 - Modèle géodynamique interprétatif pour la genèse des granulites du groupe II (ca. 300 Ma). 1 = anomalie thermique dans le manteau supérieur; 2 = magmas basiques; 3 = complexes stratifiés; 4 = anatexie et croûte inférieure restitutive; 5 = granitoïdes post-tectoniques.

(Vielzeuf, 1984)



- Paleozoic outcrops
- Occurrences of HP granulites
- Occurrences of HT granulites
- Xenoliths of HT granulites

Modifié d'après Pin et Vielzeuf (1983)

# Origine et mise en place de la haute température dans les orogènes ?

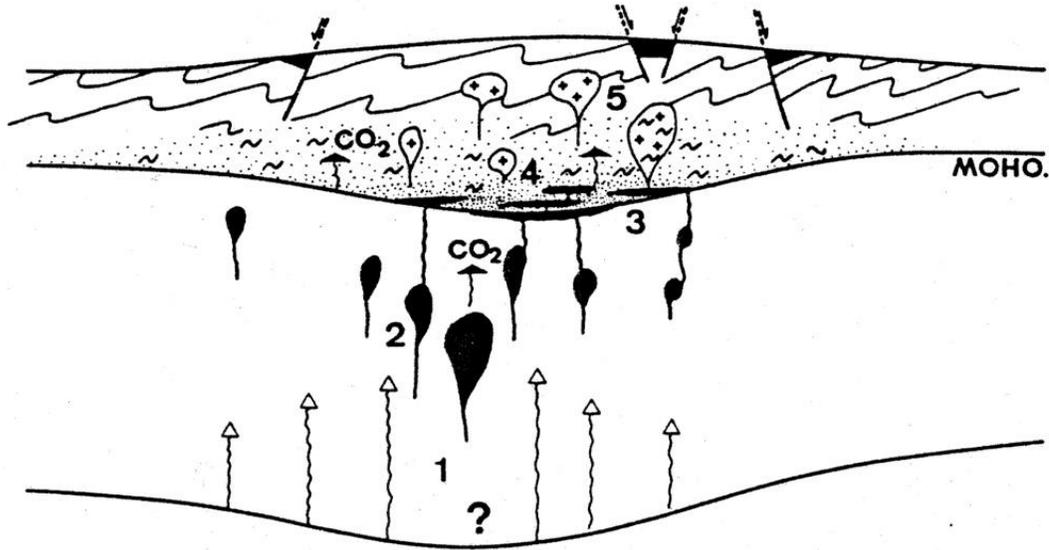
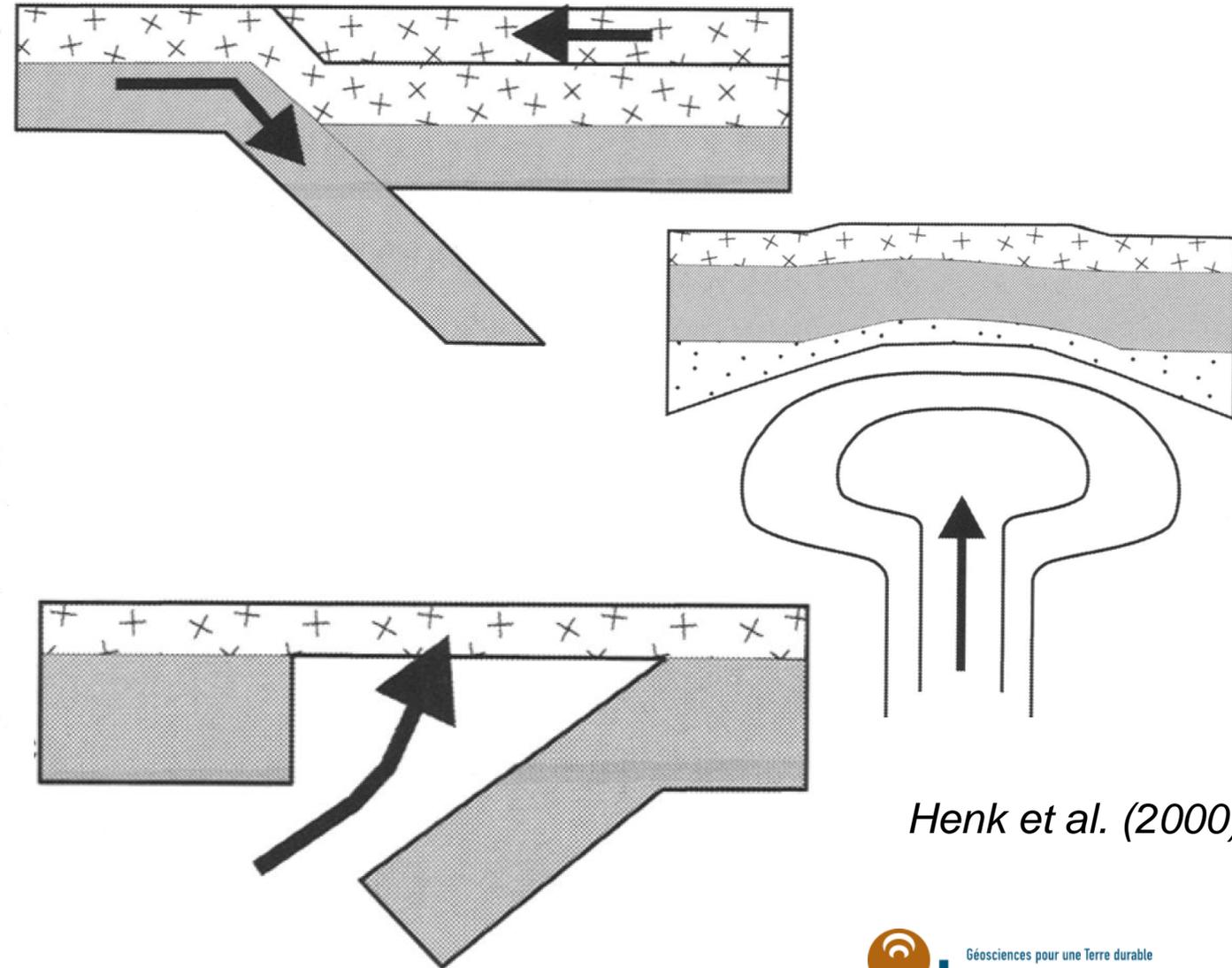


Fig. 62 - Modèle géodynamique interprétatif pour la genèse des granulites du groupe II (ca. 300 Ma). 1 = anomalie thermique dans le manteau supérieur; 2 = magmas basiques; 3 = complexes stratifiés; 4 = anatexie et croûte inférieure restitique; 5 = granitoïdes post-tectoniques.

(Vielzeuf, 1984)



Henk et al. (2000)

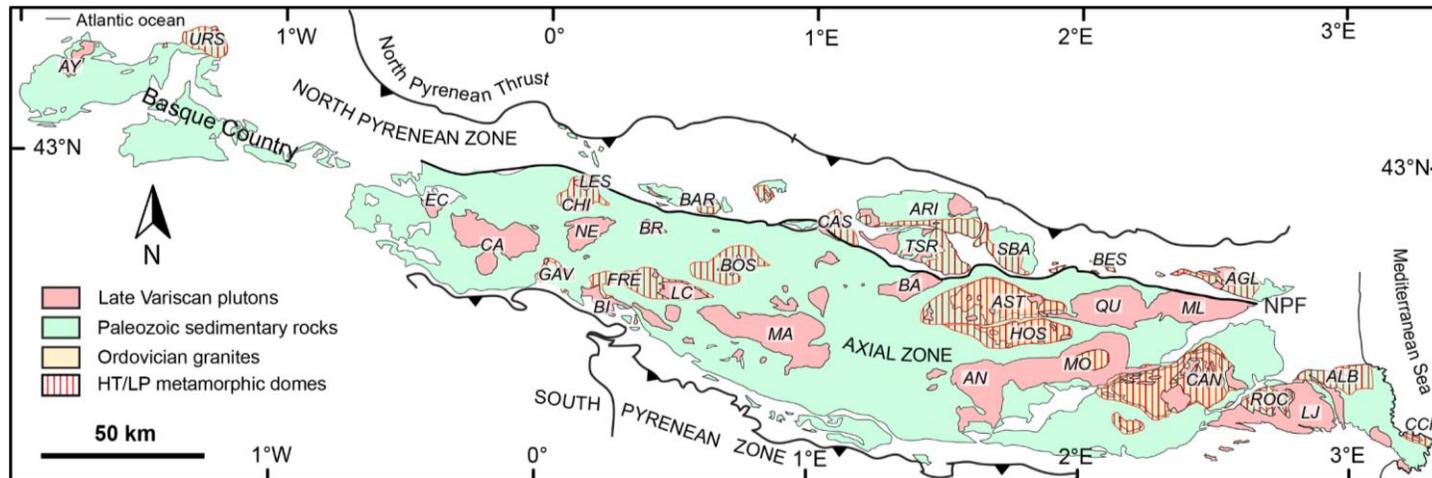
## Questions posées :

à l'échelle de la chaîne...

- origine, âge et durée du magmatisme
- conditions PT, âge et durée du métamorphisme
- relations avec la déformation
- source et transferts de chaleur
- modèle géodynamique

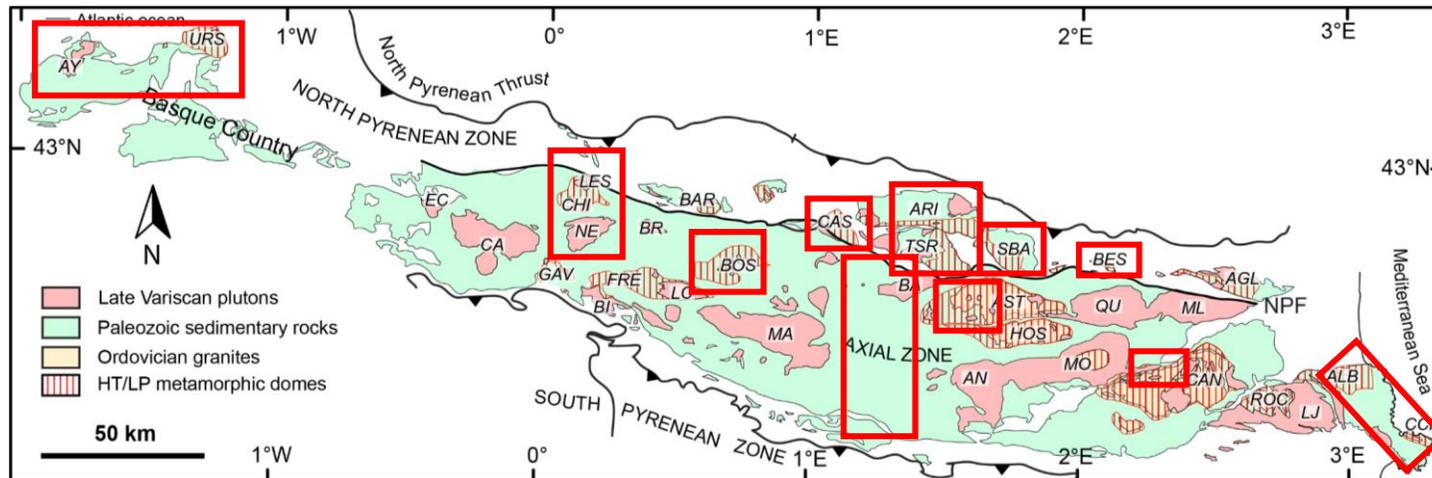
## Les attendus :

- répondre aux questions...
- tout en alimentant la base de donnée du RGF



# Méthodologie et collaborations

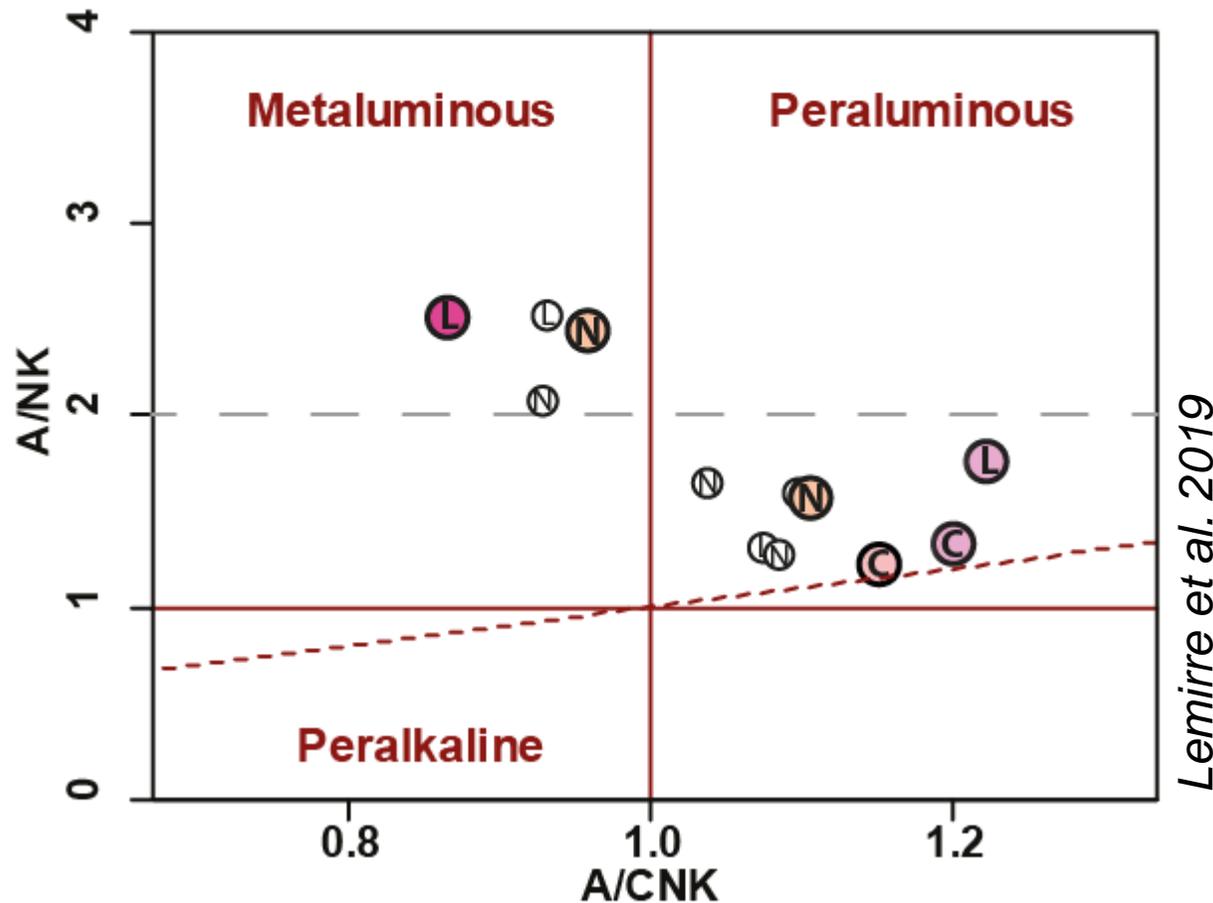
- **Étude de terrain** (*collaboration avec B. Cochelin, GET Toulouse*)
- **Estimations Pression-Température** (*collaboration avec A. Lahfid, BRGM Orléans*)
- **Pétrologie et Géochimie**
- **Géochronologie** (*collaboration avec M. Poujol, Géosciences Rennes*)
- **Modélisation numérique** (*collaboration avec M. Gerbault, GET Toulouse*)



# Origine, âge et durée du magmatisme

N Néouvielle    C Chiroulet    L Lesponne  
● Diorite    ● Granodiorite    ● Leucogranite    ● Migmatite

⊕ Additional data from Debon et al 1996



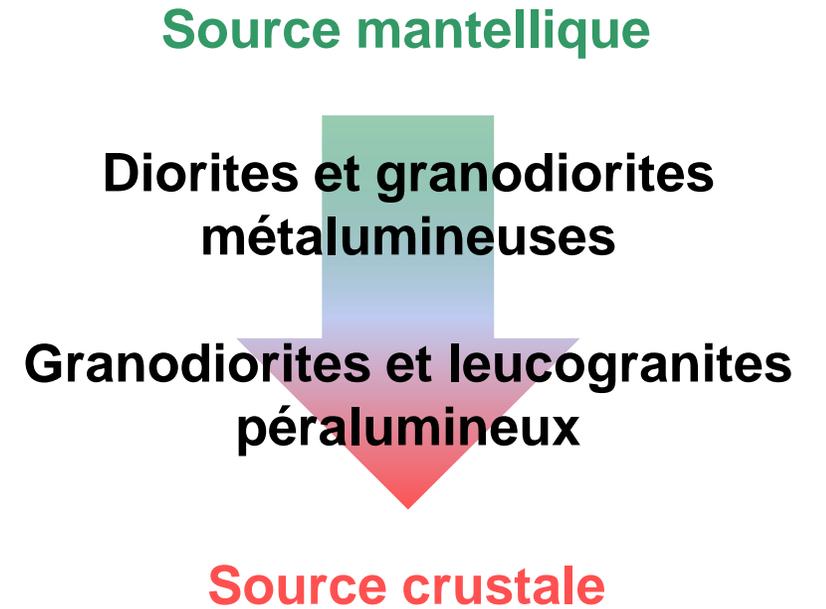
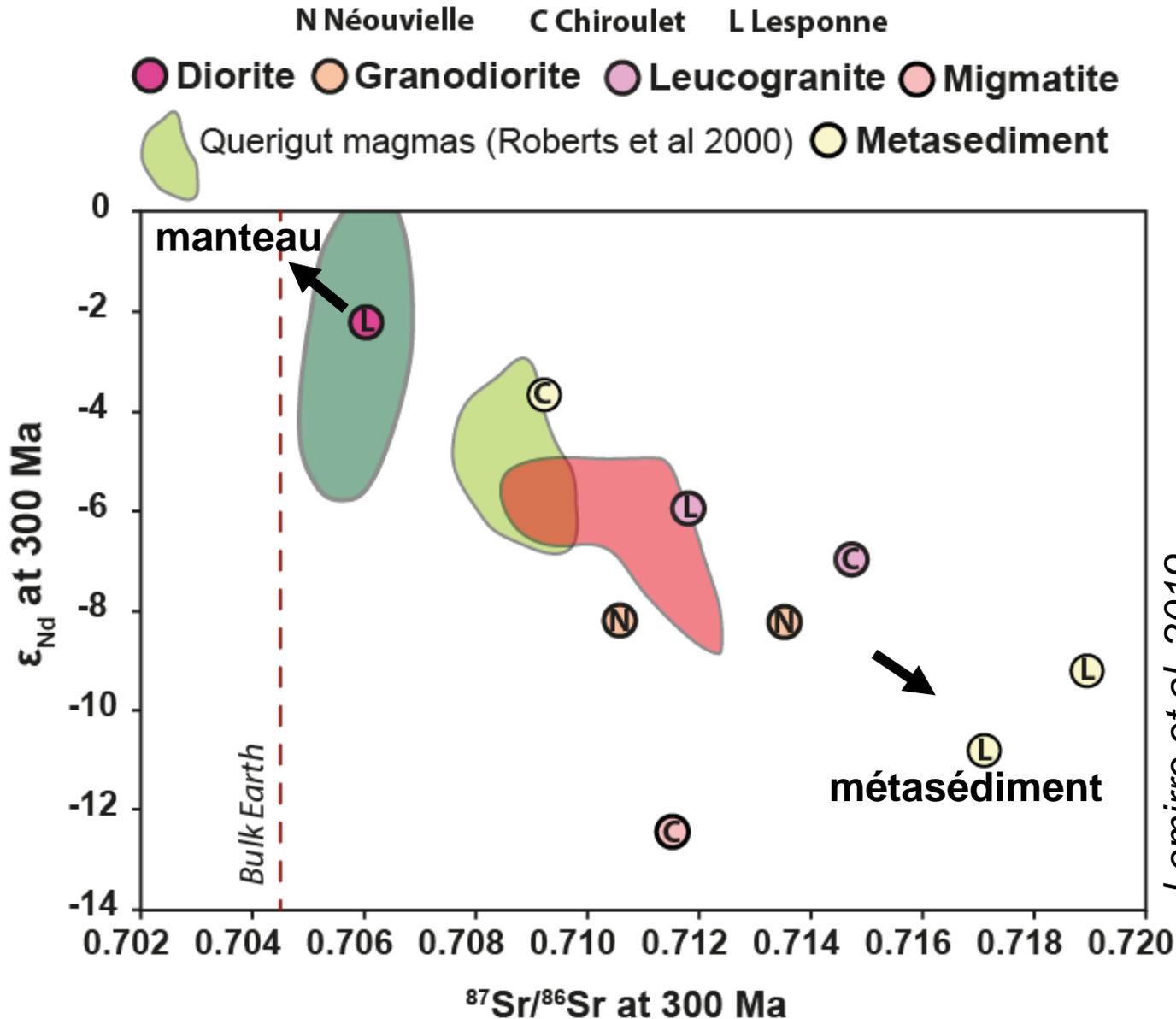
**Roches plutoniques calco-alcalines potassiques**

**Diorites et granodiorites métalumineuses**

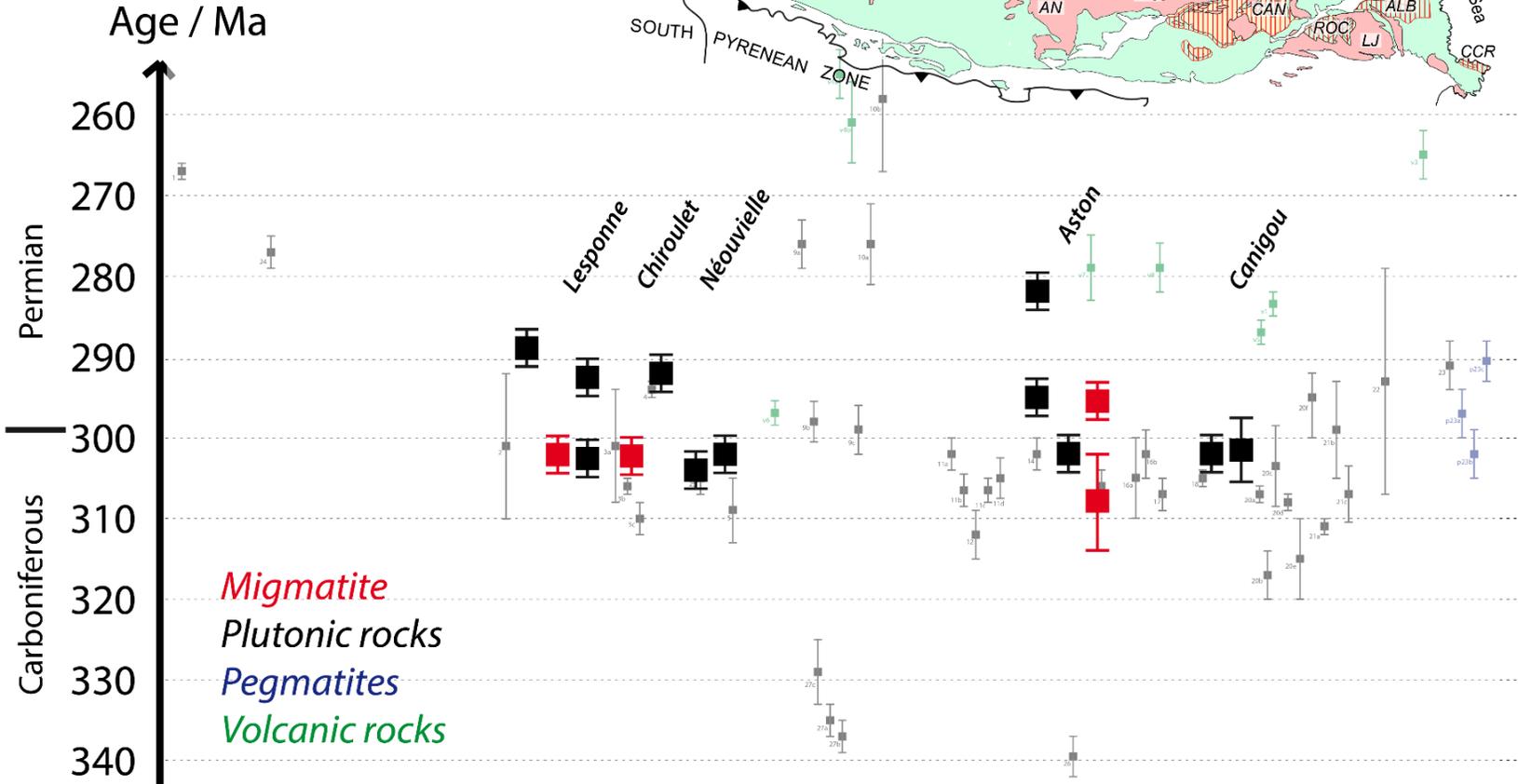
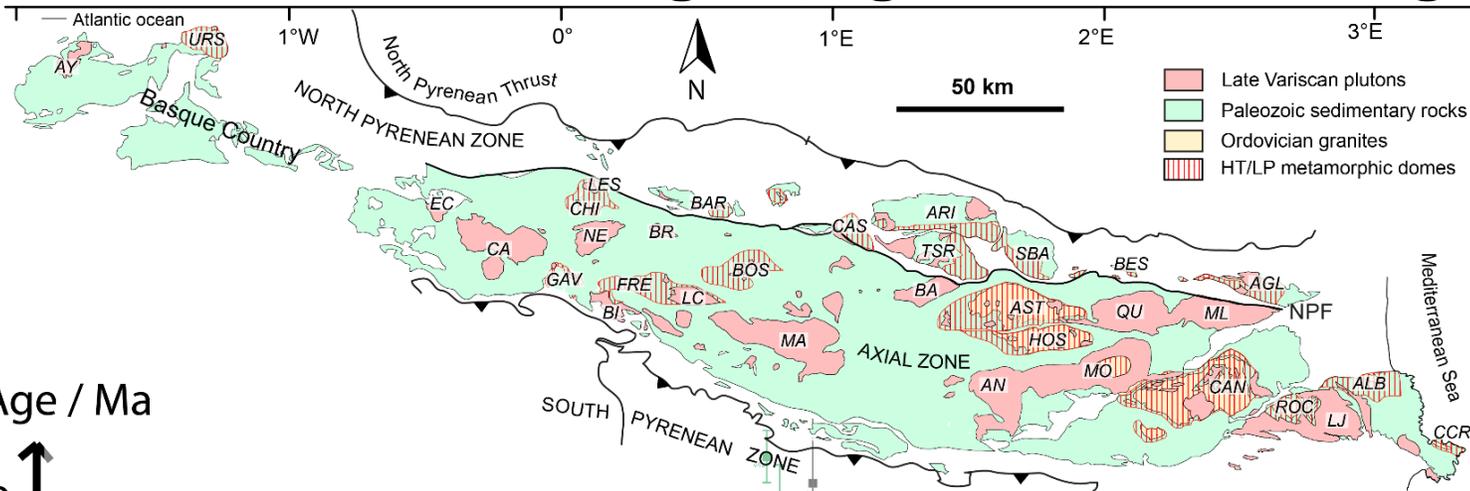
**Granodiorites et leucogranites péralumineux**

**Origine mixte, croûte et manteau ?**

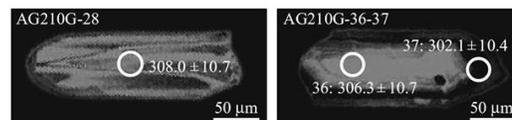
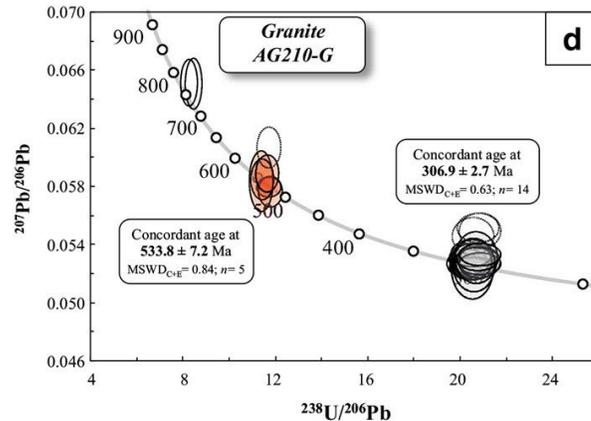
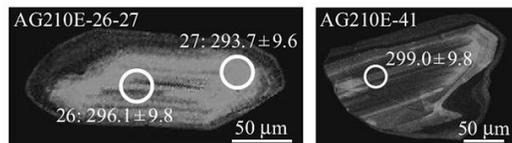
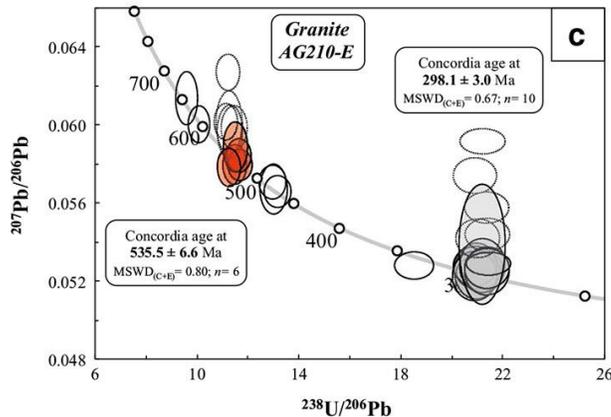
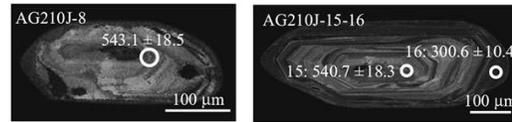
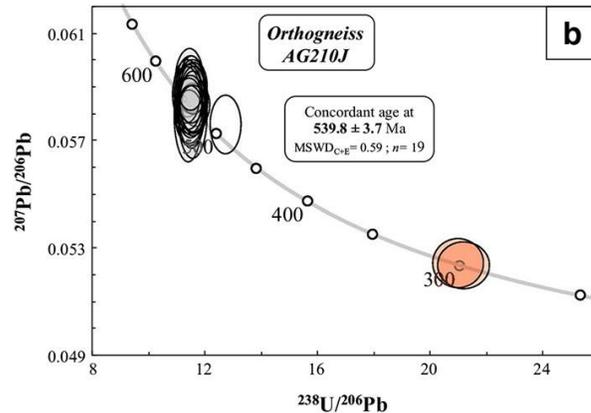
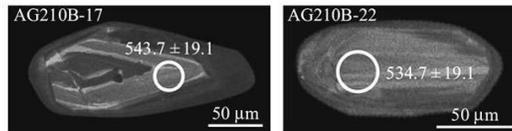
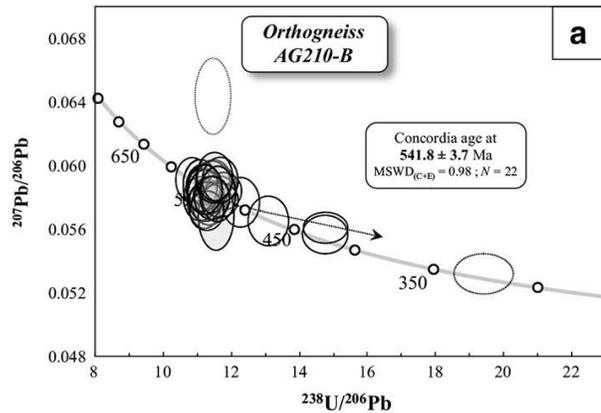
# Origine, âge et durée du magmatisme



# Origine, âge et durée du magmatisme



# Magmatisme dans les massifs Nord-pyrénéens : l'Agly

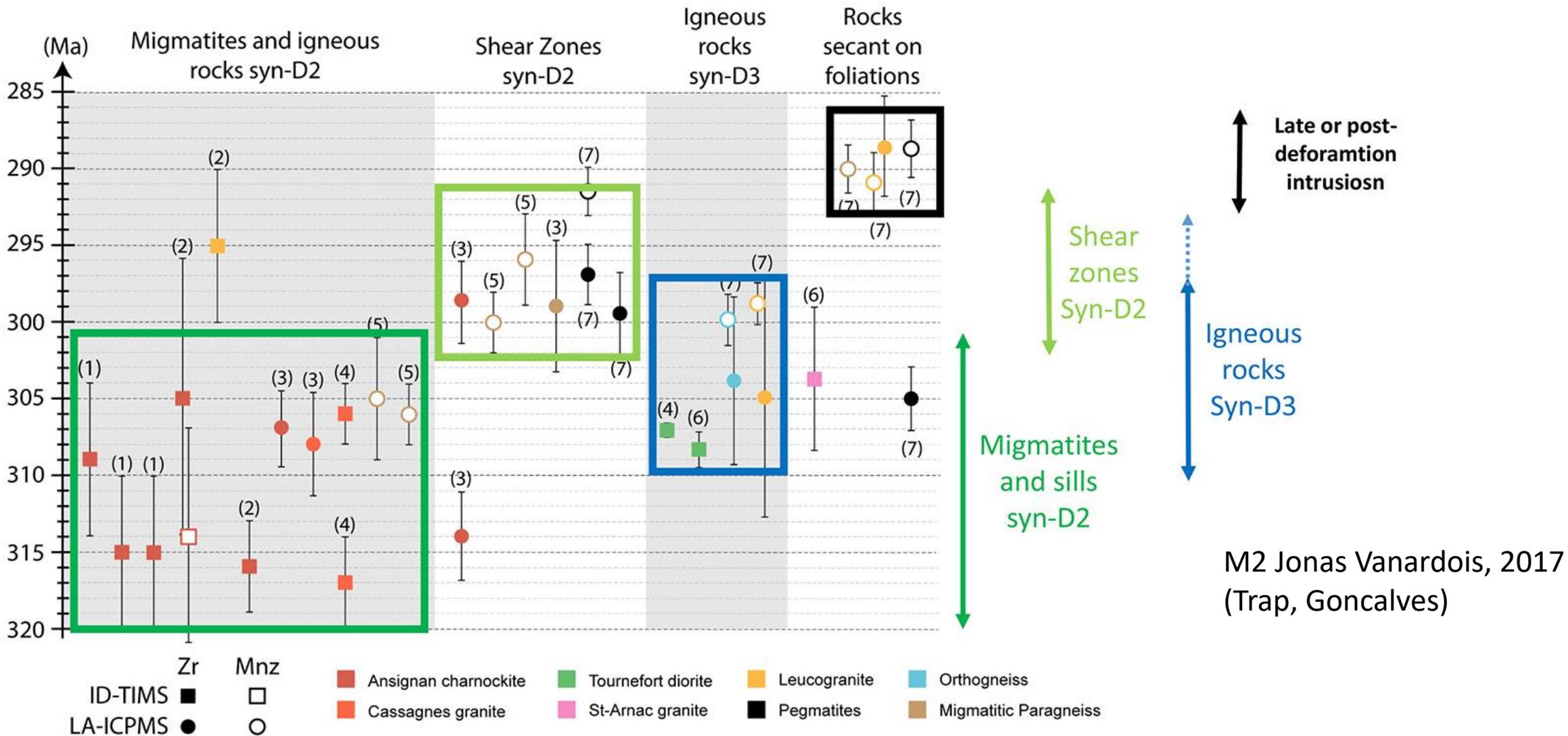


M2 Baptiste Tournaire Guille, 2014  
(Olivier, Paquette, Bosse, Guillaume)

- Principales phases d'injection magmatique : -
- Cambrien 540-520 Ma
  - Ordovicien ?
  - Carbonifère sup. – Permien 310-295 Ma

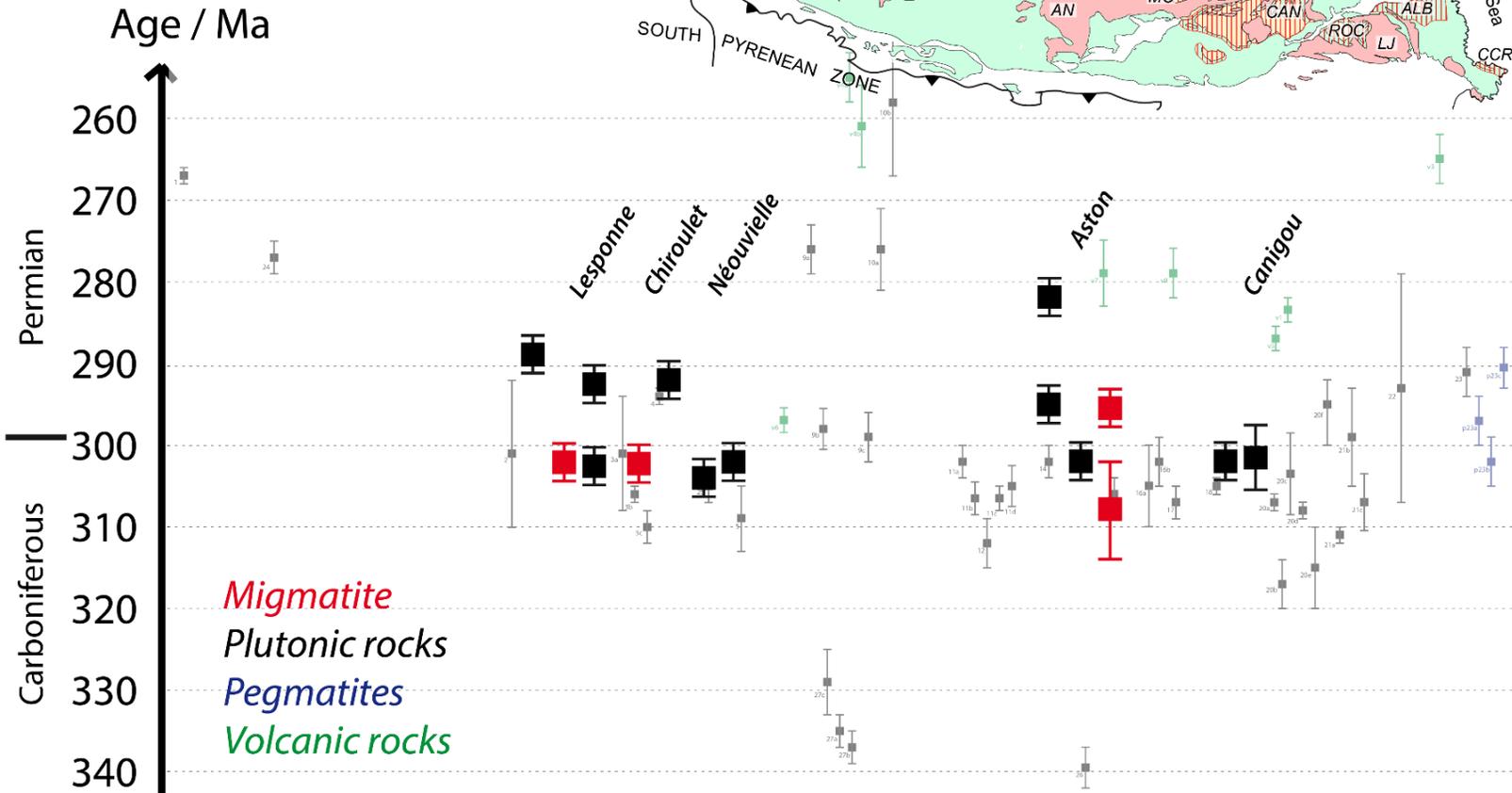
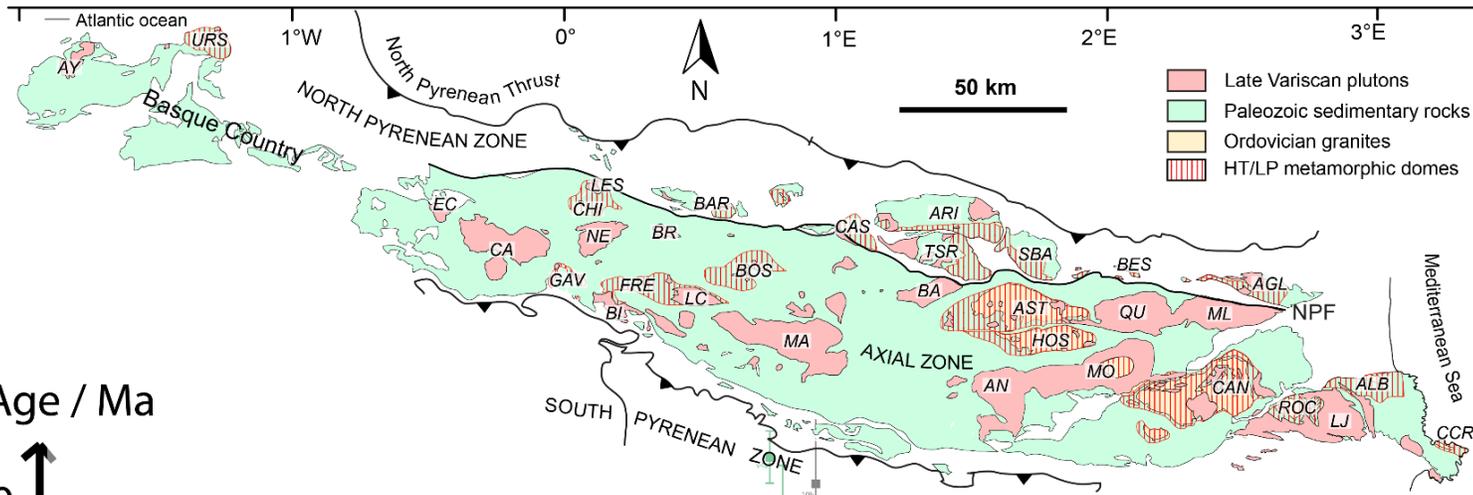
Tournaire Guille et al., 2019

# Magmatisme et déformation dans les massifs Nord-pyrénéens : l'Agly



(1) Postuaire, 1982; (2) Respault & Lancelot, 1983; (3) Tournaire Guille et al., 2018; (4) Olivier et al., 2004; (5) Siron et al., submitted; (6) Olivier et al., 2008; (7) This study

# Origine, âge et durée du magmatisme



ca. 310 Ma (?)

- *Injection de magmas mantelliques à la transition croûte-manteau, début de la fusion de la base de la croûte*

ca. 304 Ma

- *Injection de magmas mantelliques (suite)*
- *Formation des plutons dans la partie supérieure de la croûte*

- *Début de fusion de la croûte moyenne*

ca. 290 Ma

- *Cristallisation des magmas*

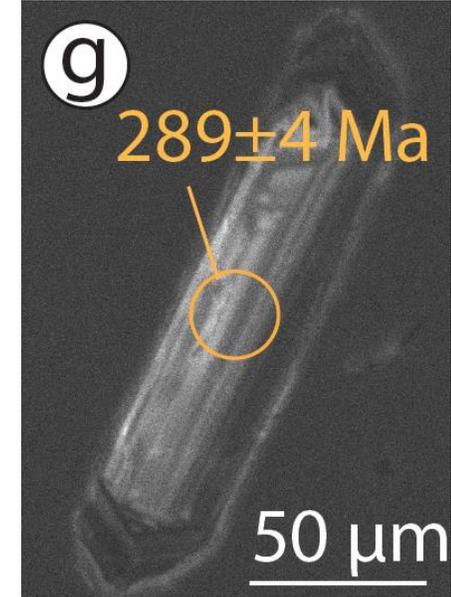
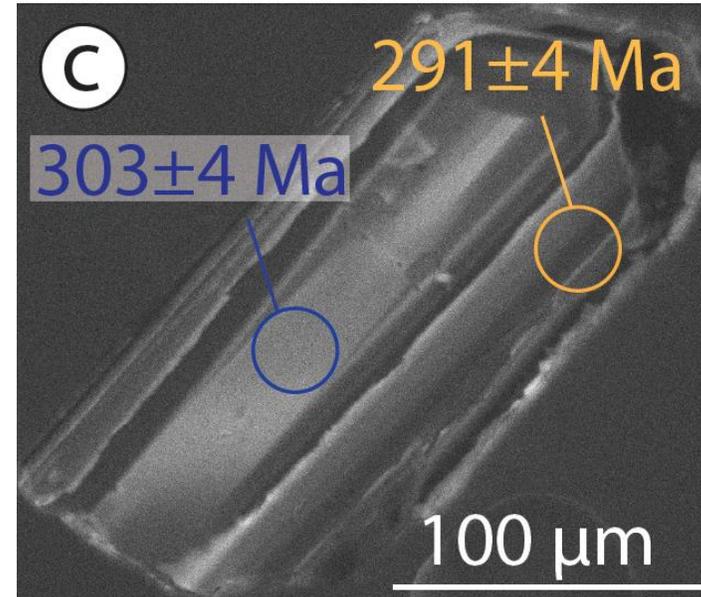
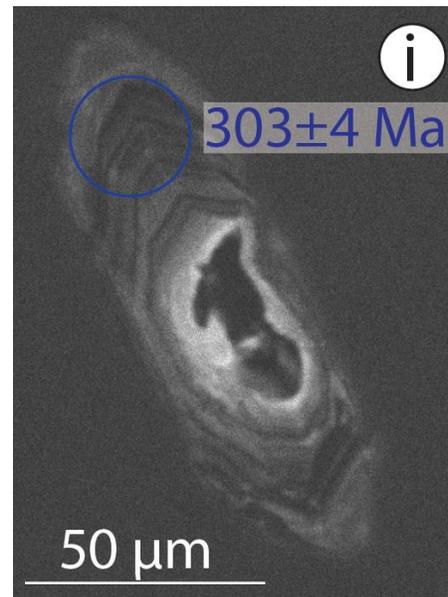
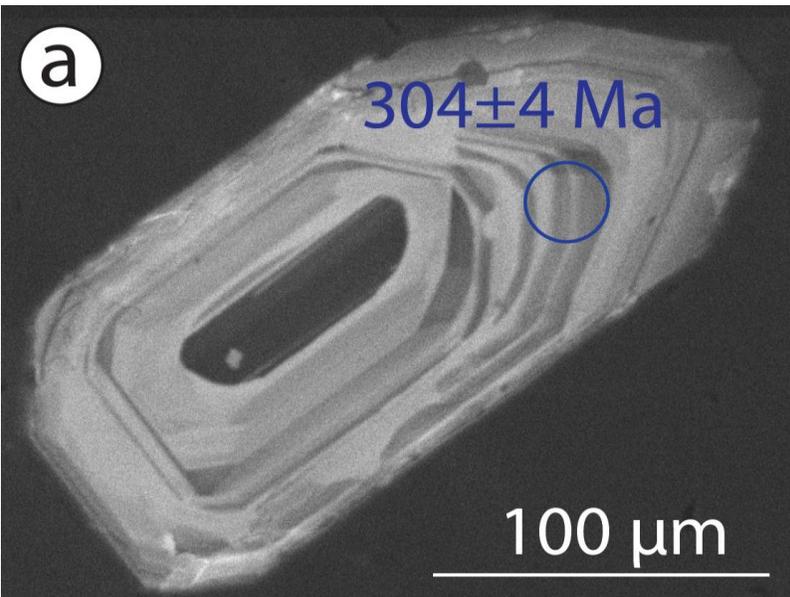
# Composition et âge du magmatisme

granodiorite

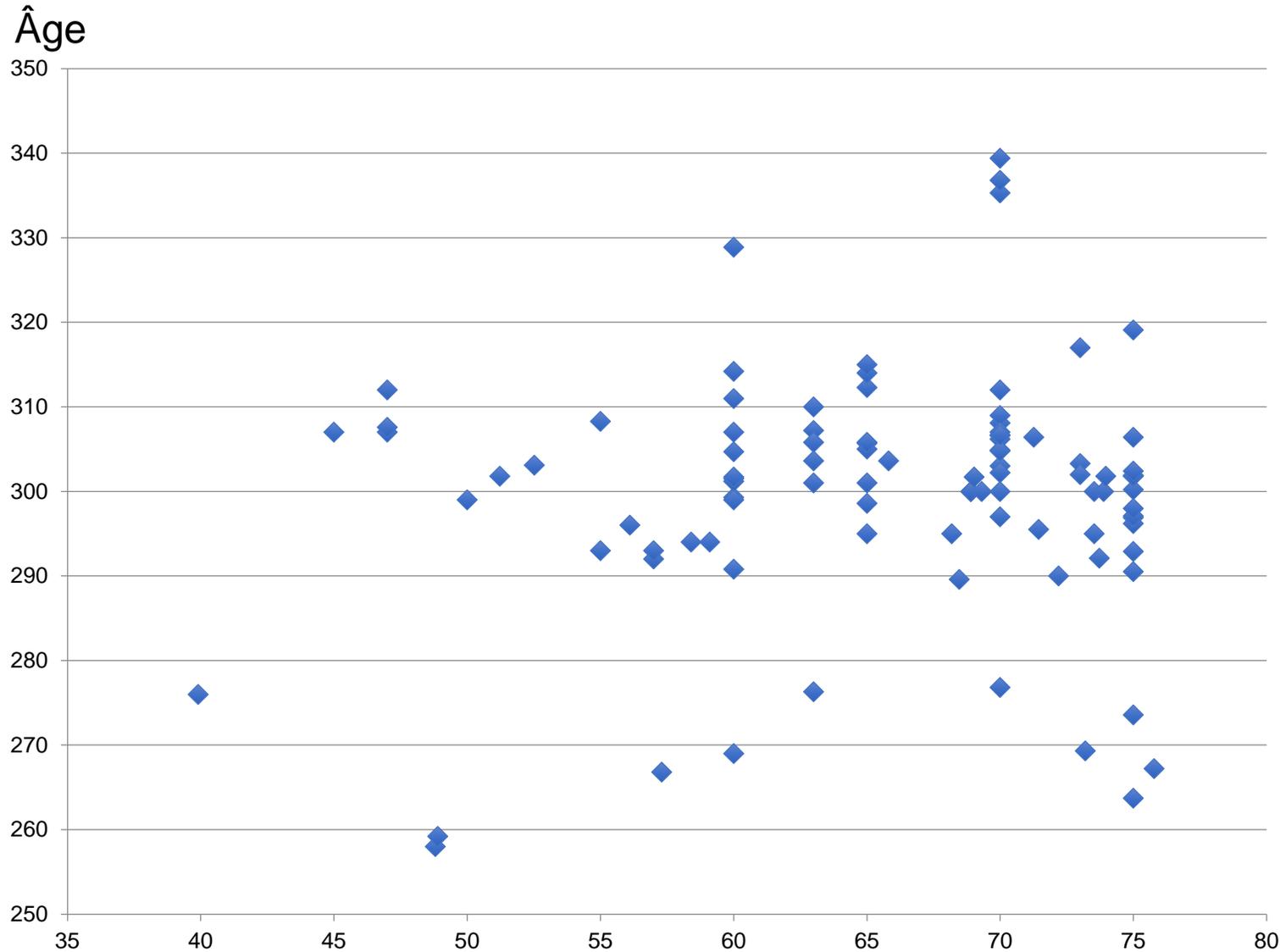
migmatite

diorite

leucogranite

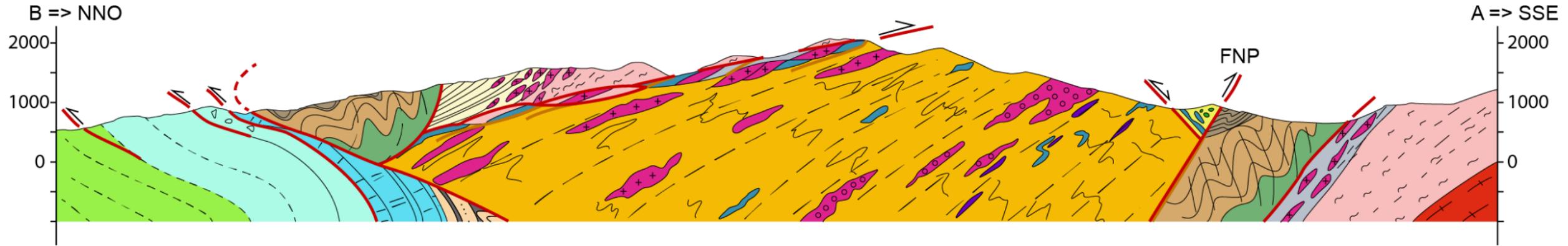


# Composition et âge du magmatisme

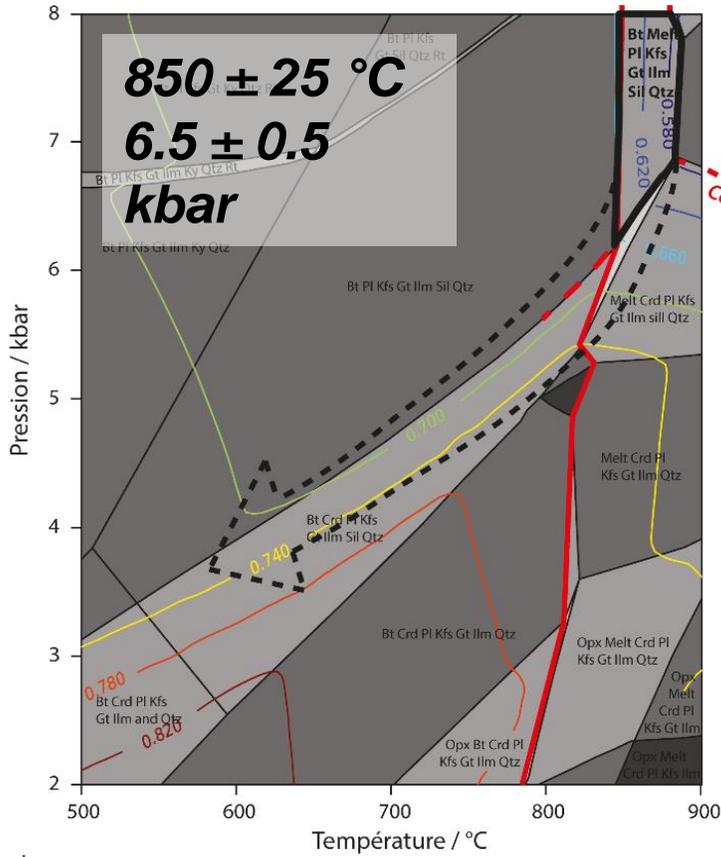


- Même si tendance générale à des magmas de plus en plus différenciés, les compositions sont variées tout au long de l'histoire magmatique
- Magmatisme 'pluri-modal'
- MASH-DeepHotZone à la transition croûte-manteau

# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



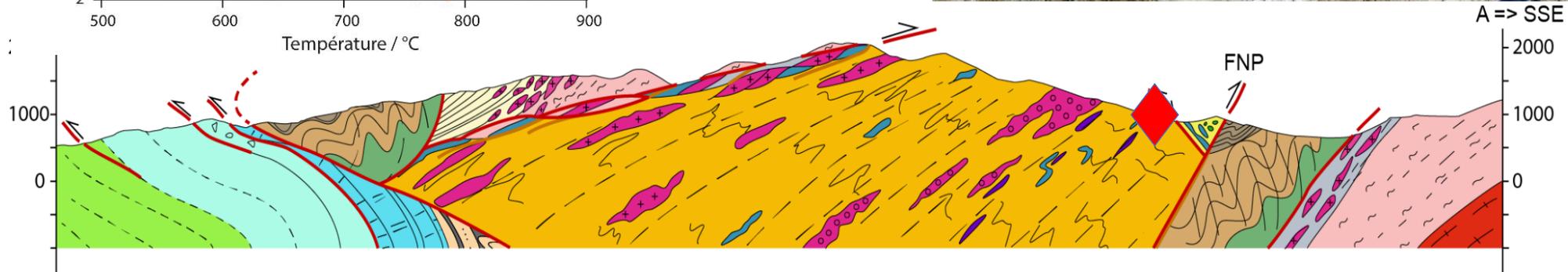
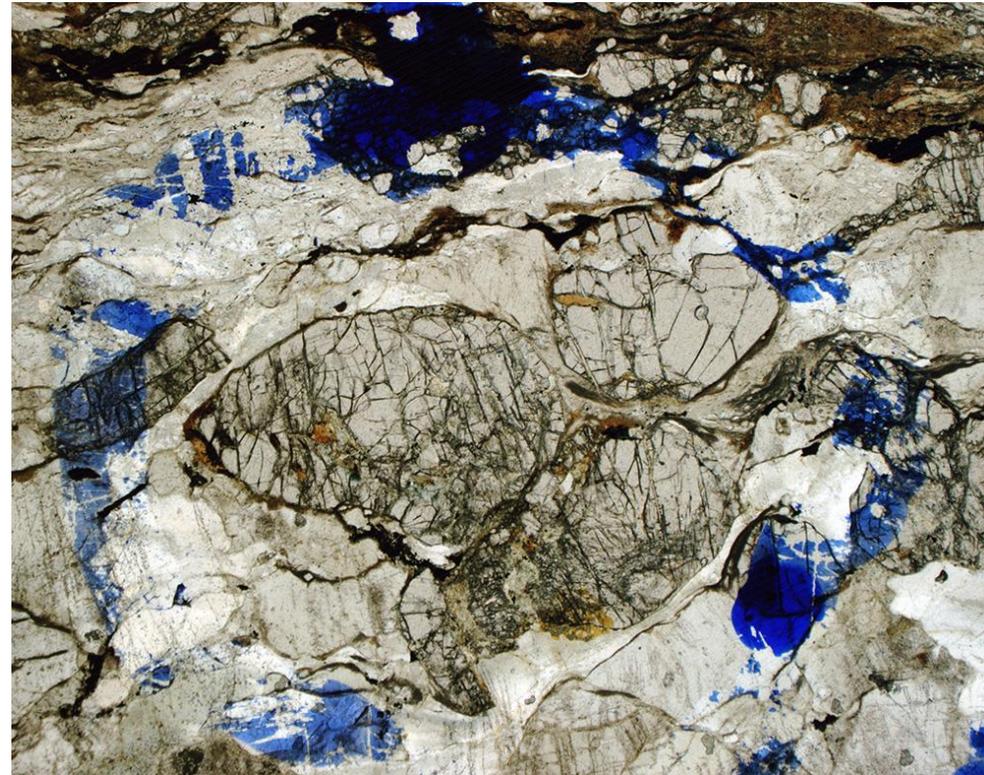
# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



*melt-Pl-Kfs-Gt-Ilm-Sil-Qtz ± Bt*

*Cordierite* Compo. (wt %)

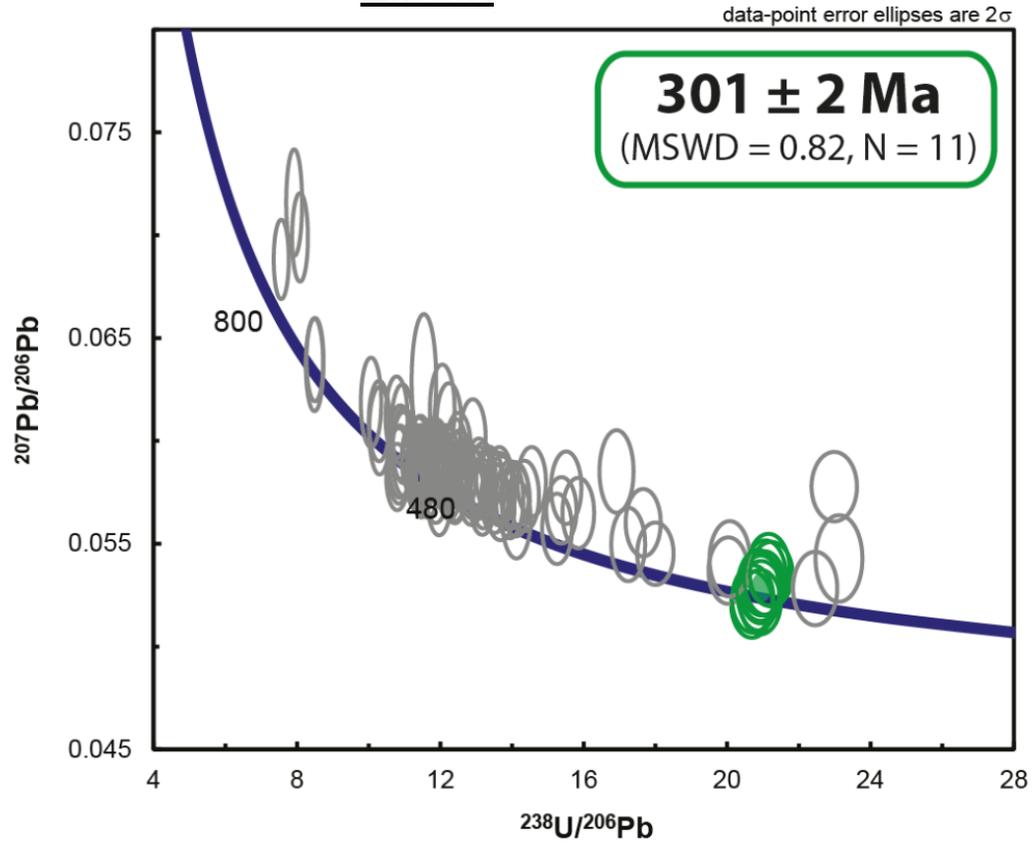
Na <sub>2</sub> O	1.18
CaO	1.17
K <sub>2</sub> O	3.18
FeO	11.66
MgO	3.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.09
SiO <sub>2</sub>	52.48
H <sub>2</sub> O	0.40



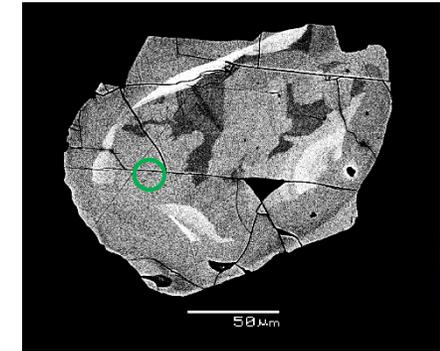
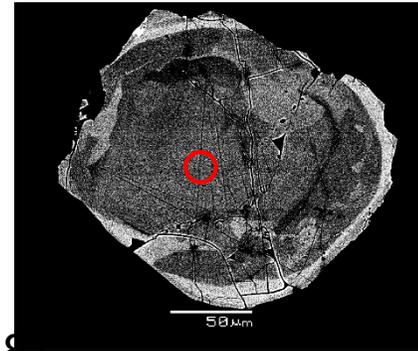
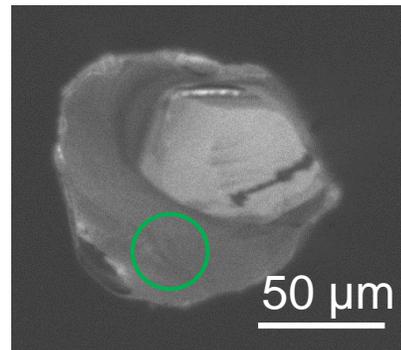
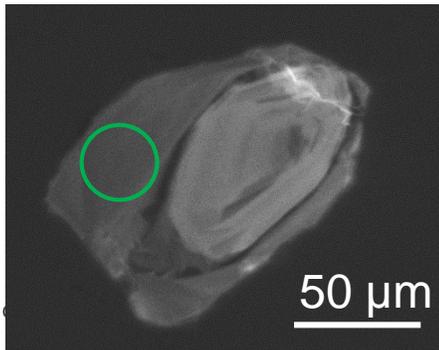
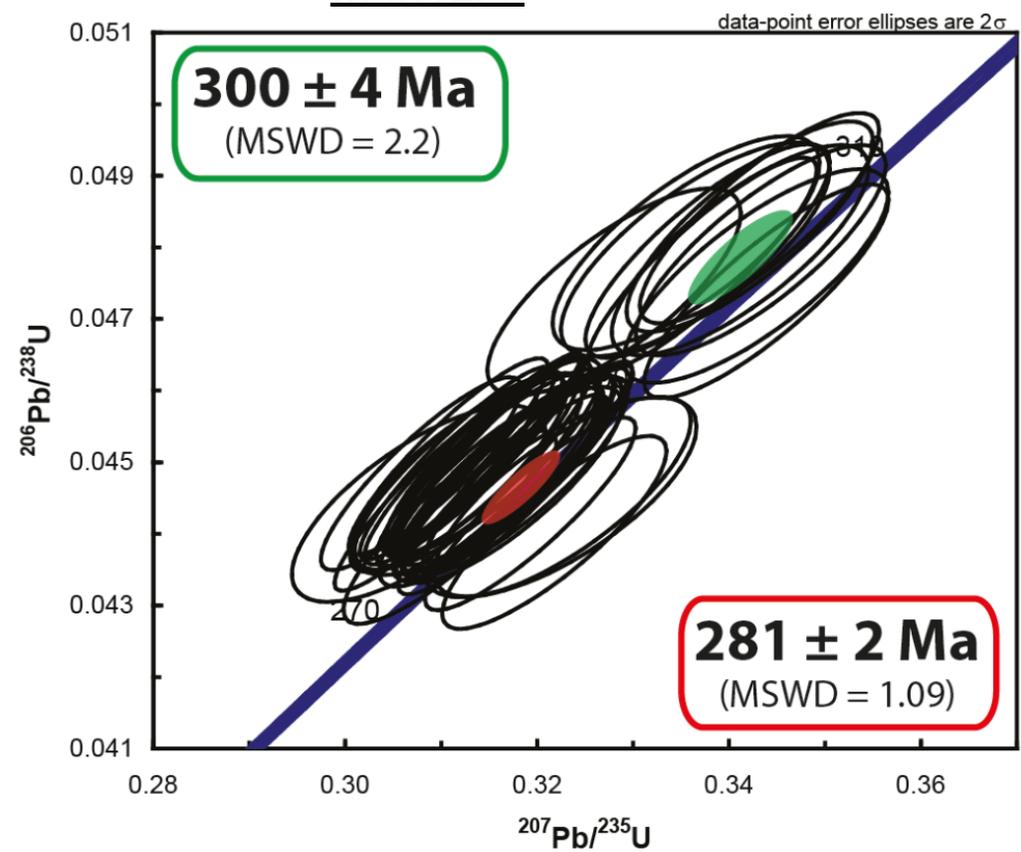
- |             |           |                 |                |                    |                  |
|-------------|-----------|-----------------|----------------|--------------------|------------------|
| amphibolite | migmatite | granulite       | upper devonian | trias              | upper cretaceous |
| lherzolite  | granitoid | orthogneiss     | lower devonian | permian-stéphanian | lower cretaceous |
| ZIM breccia | cipoline  | lower paleozoic | silurian       | carboniferous      | jurassic         |

# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme

## Zircon

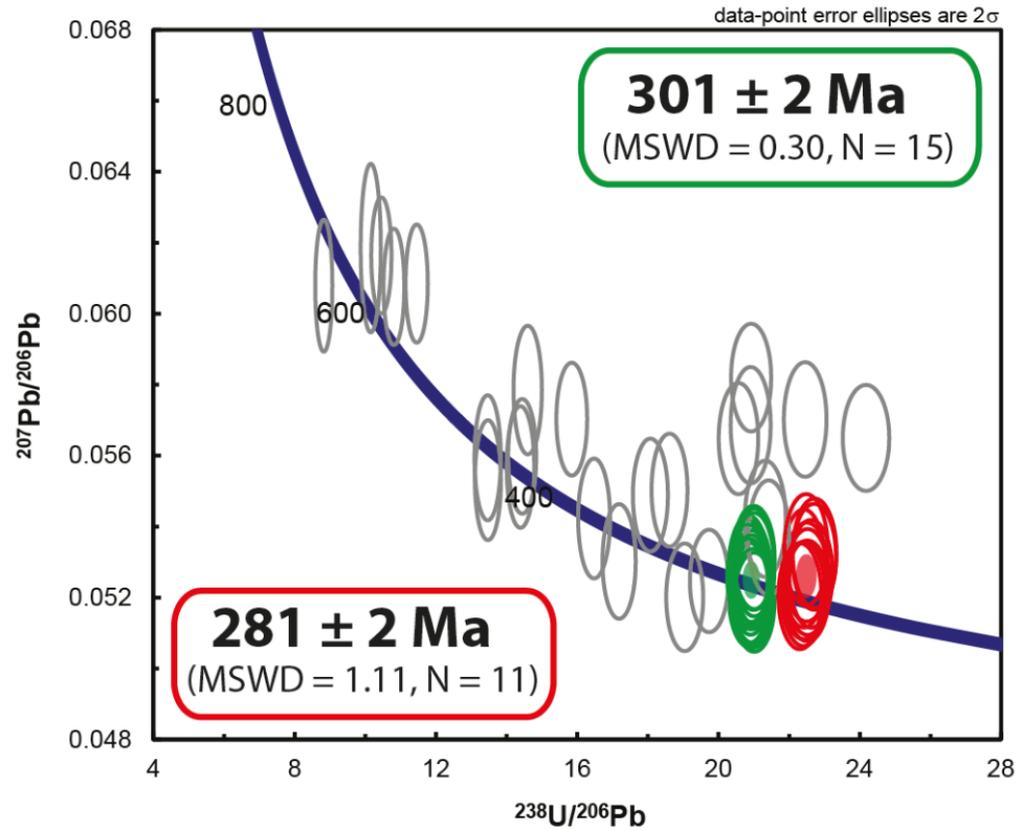


## Monazite

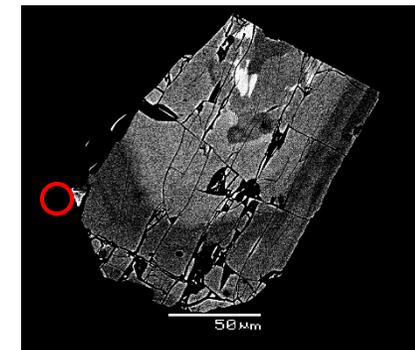
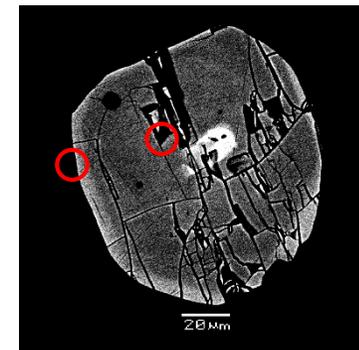
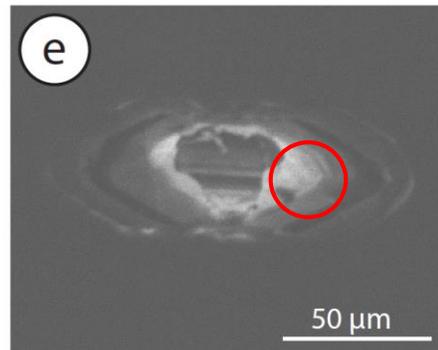
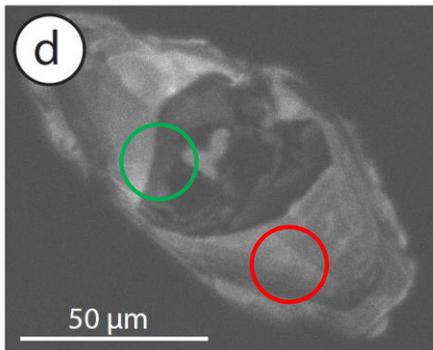
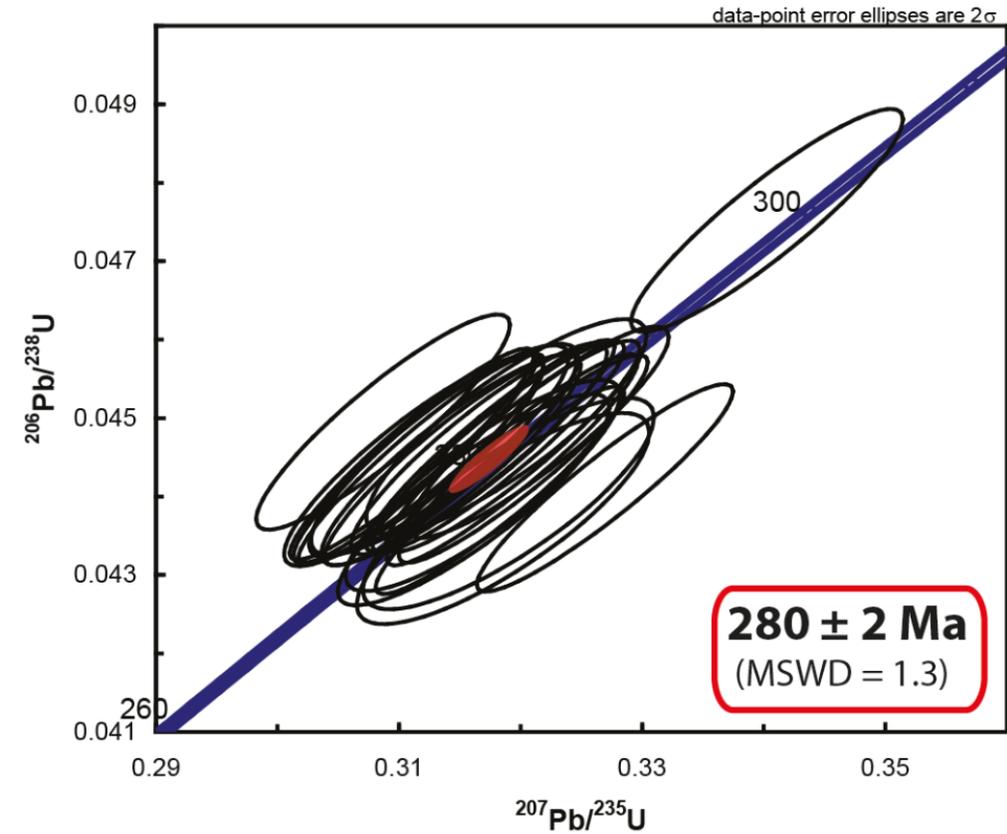


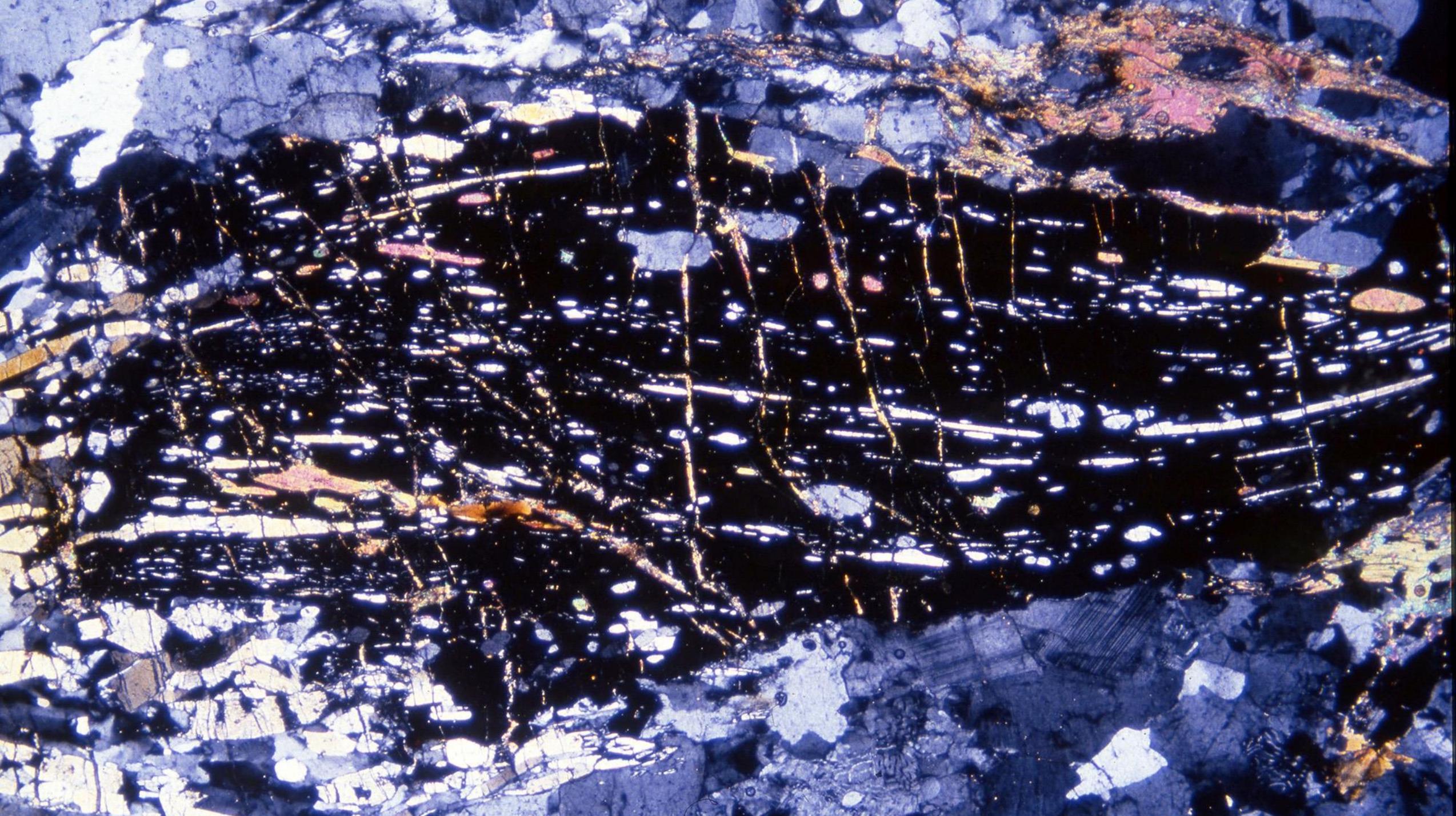
# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme

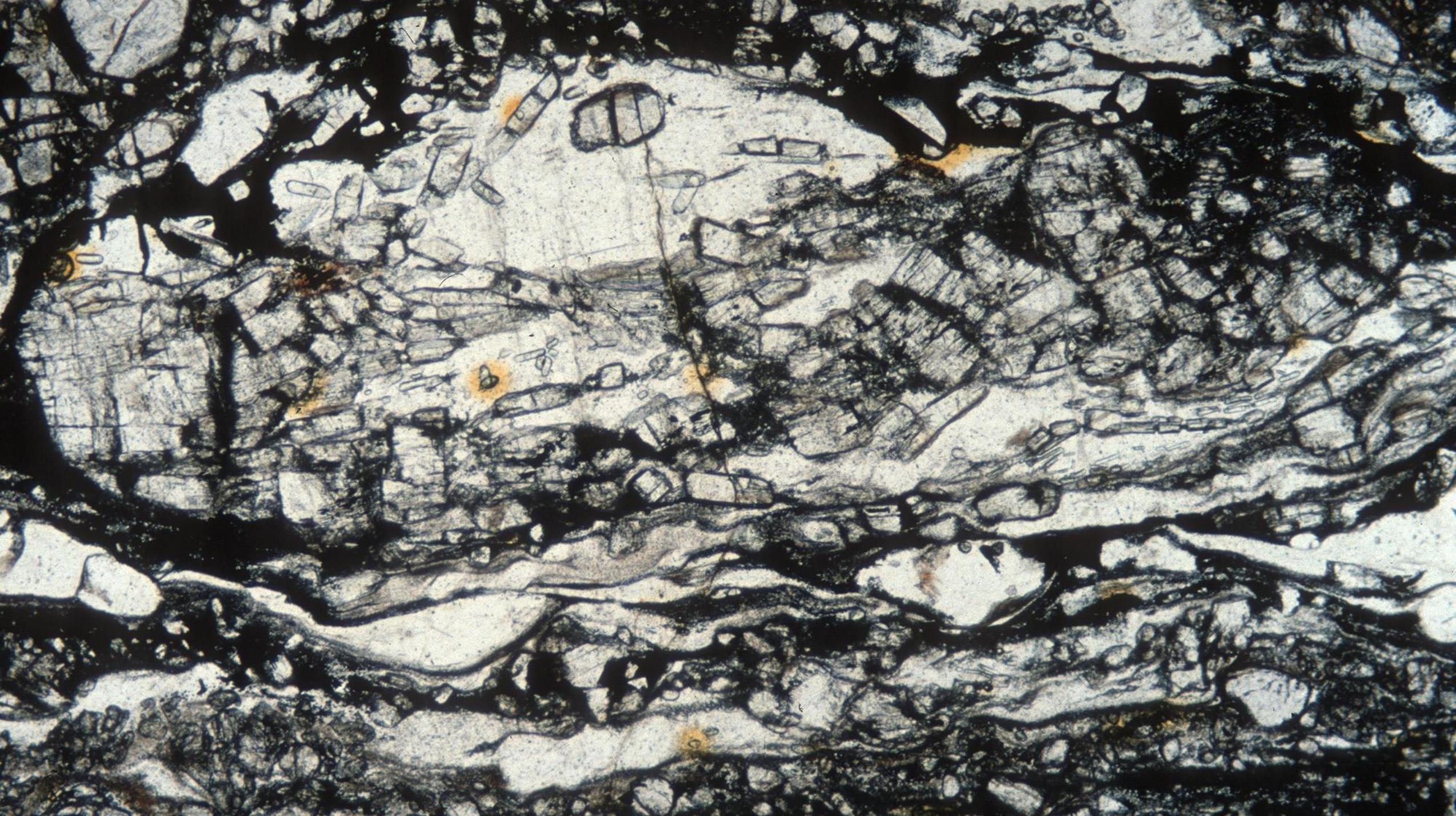
## Zircon

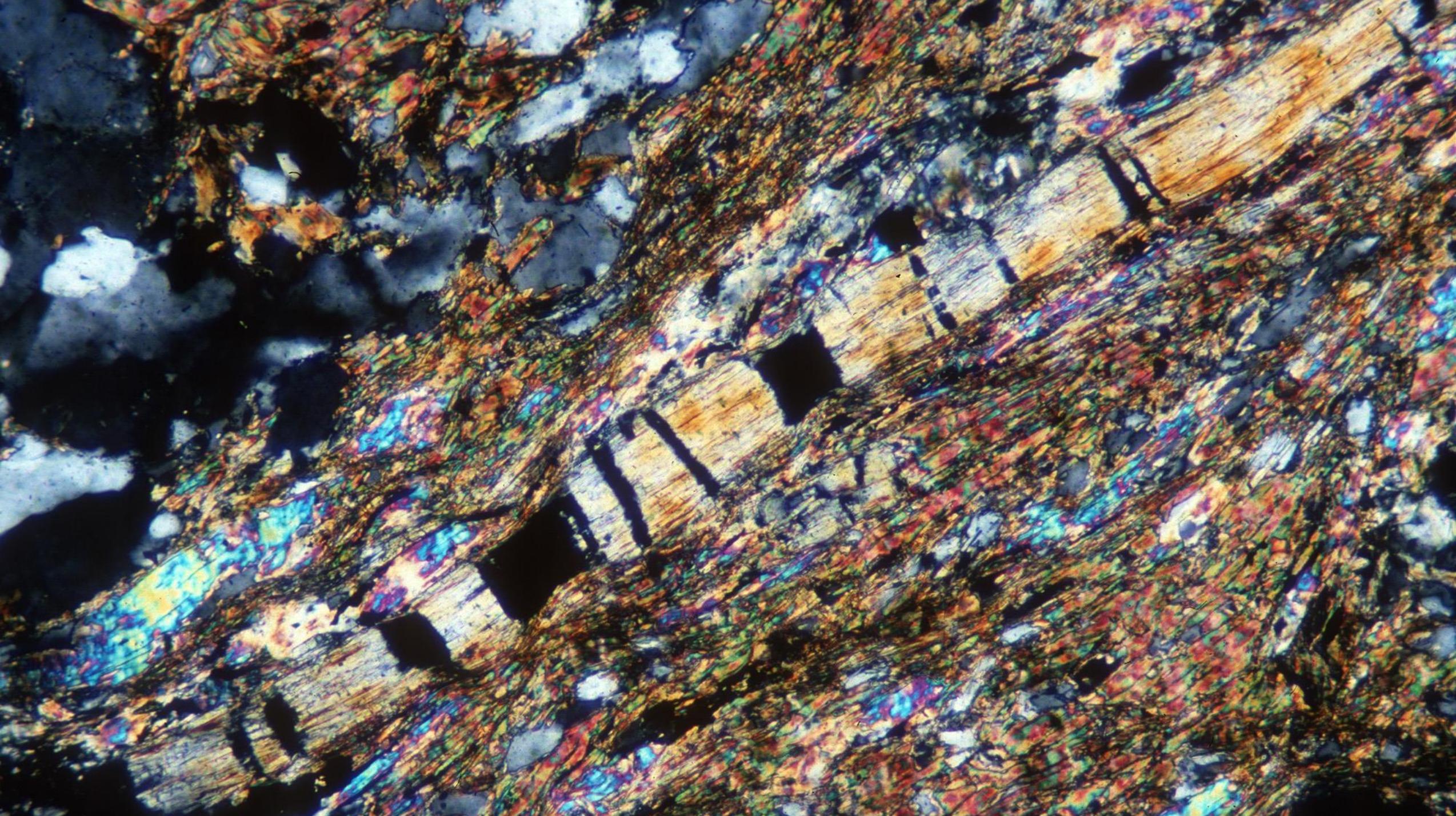


## Monazite

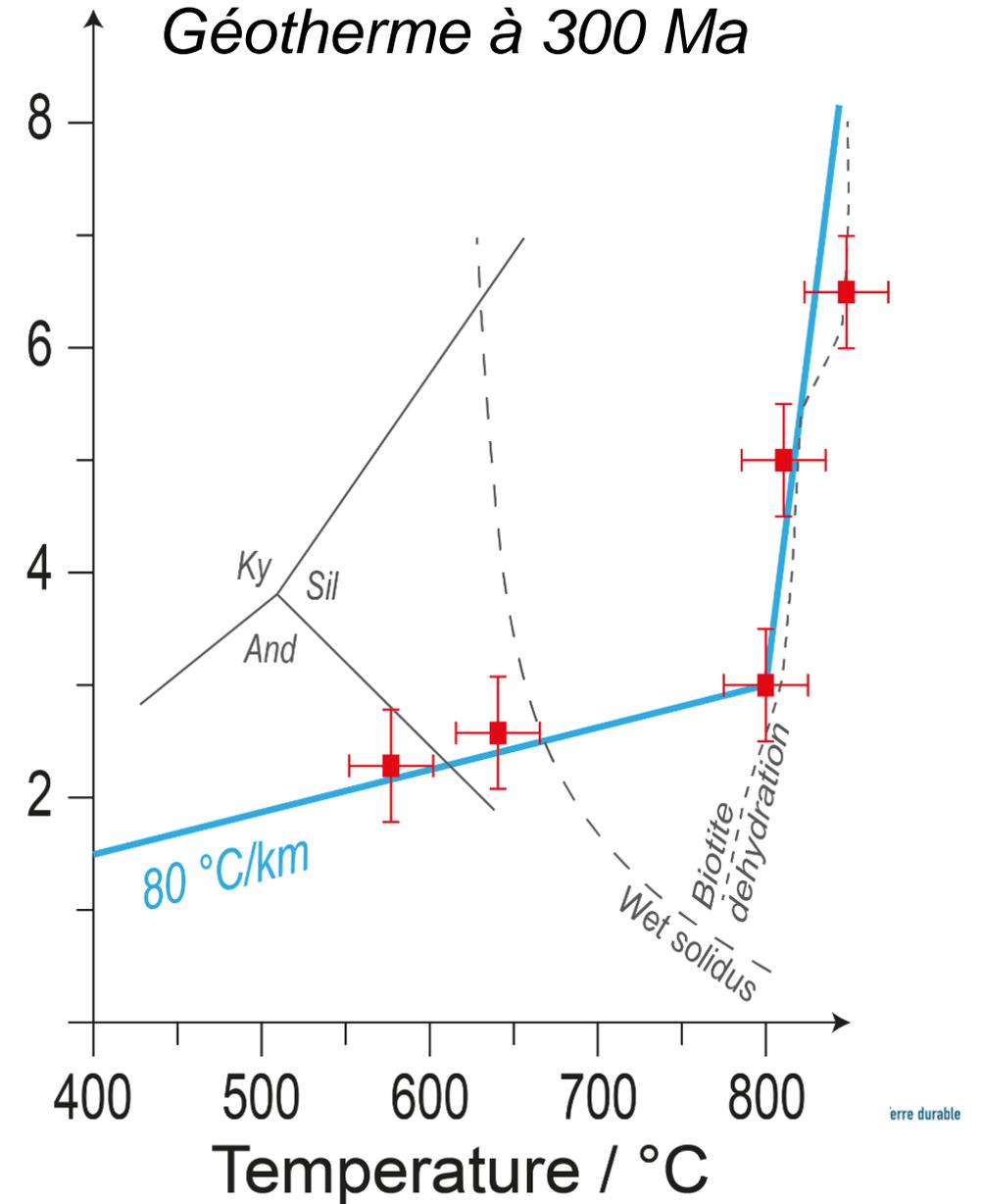
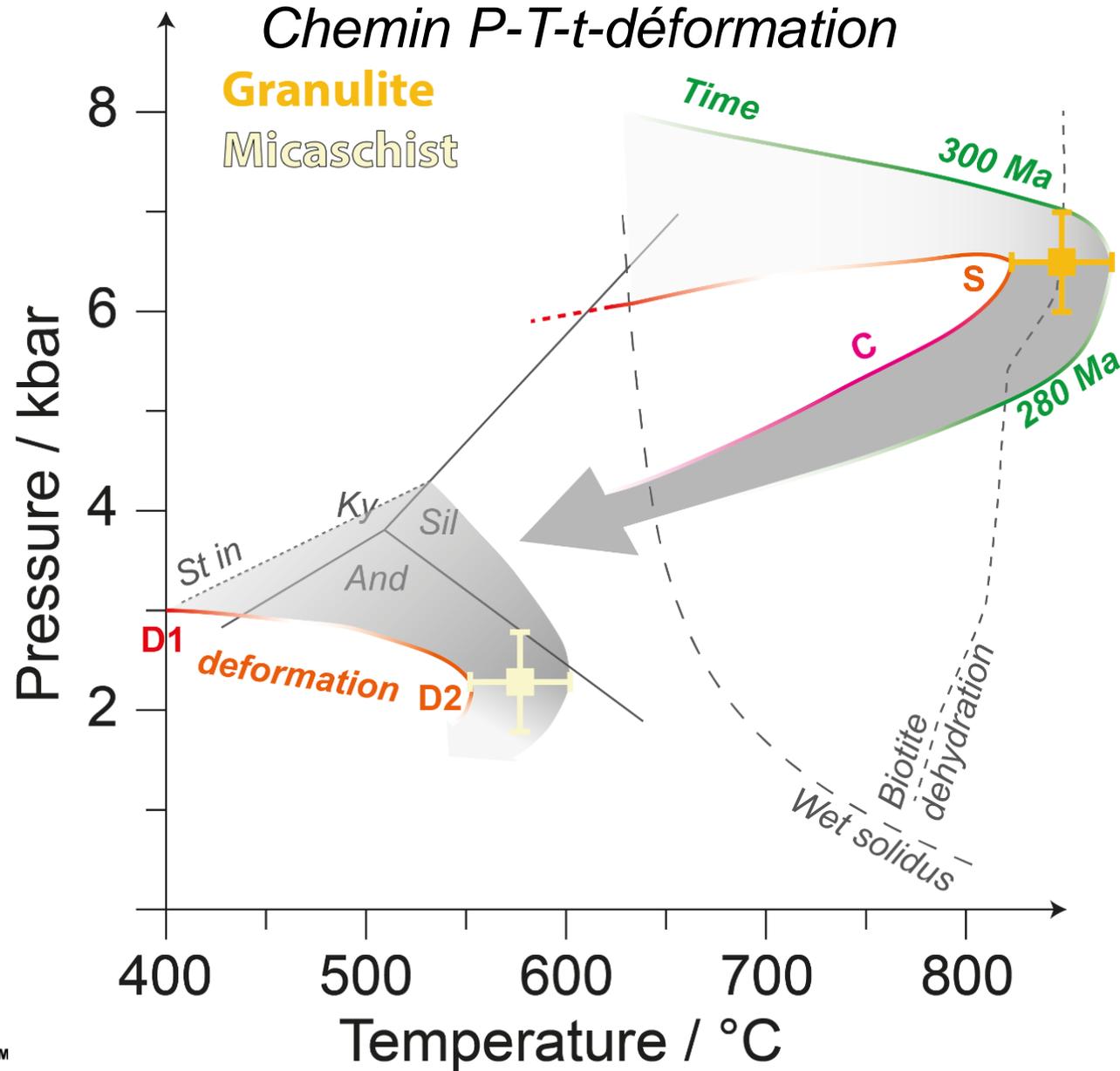




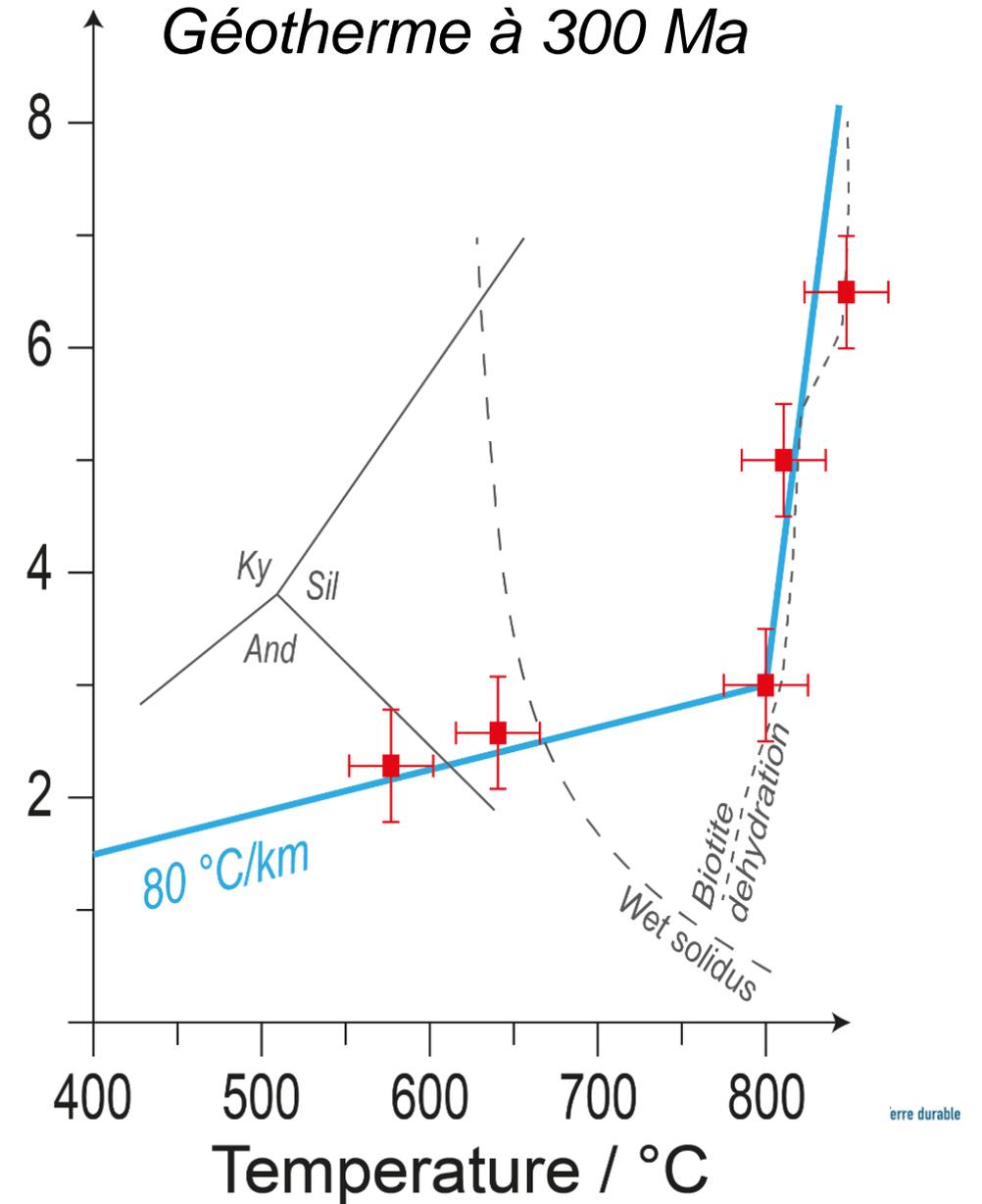
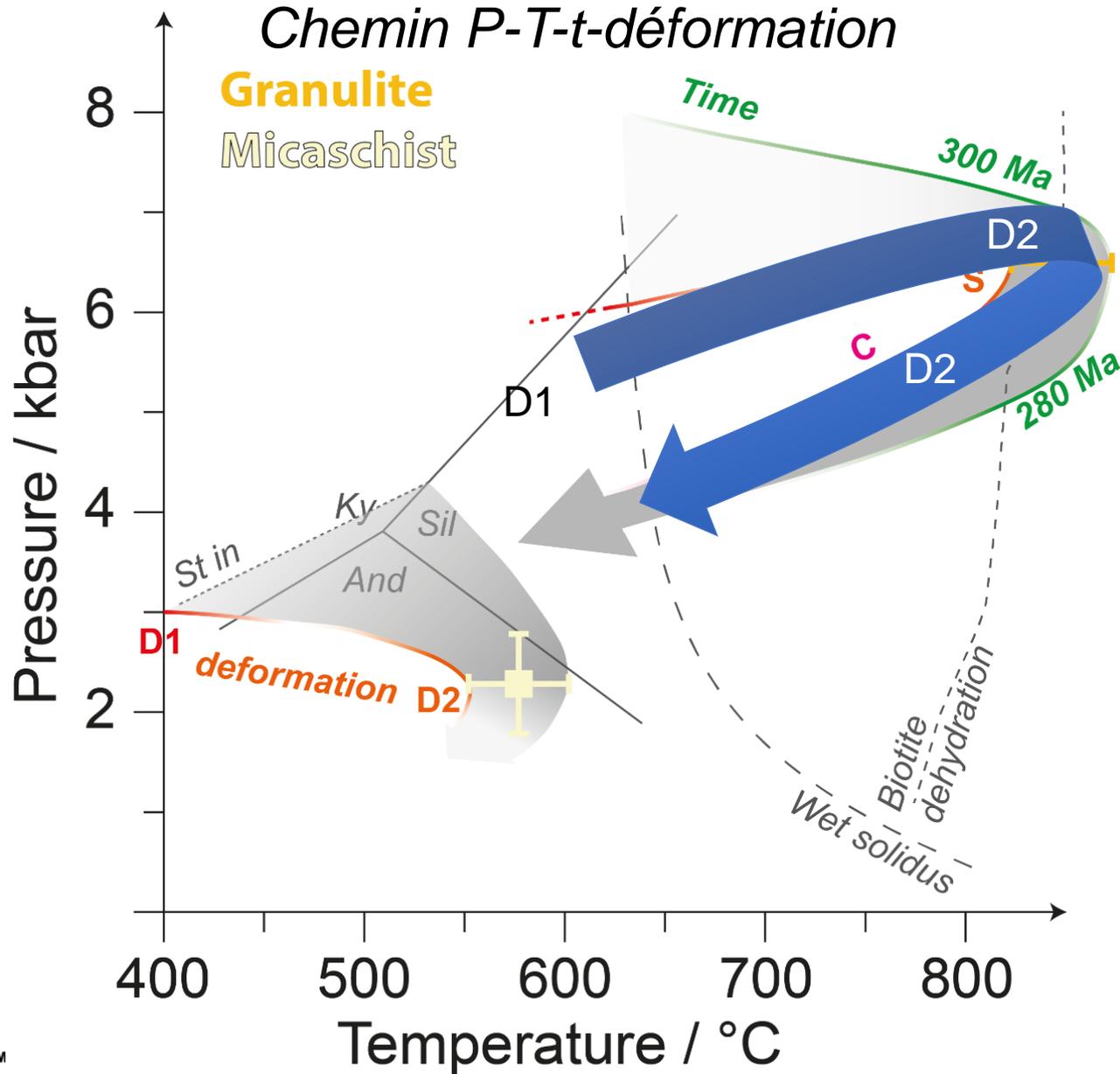




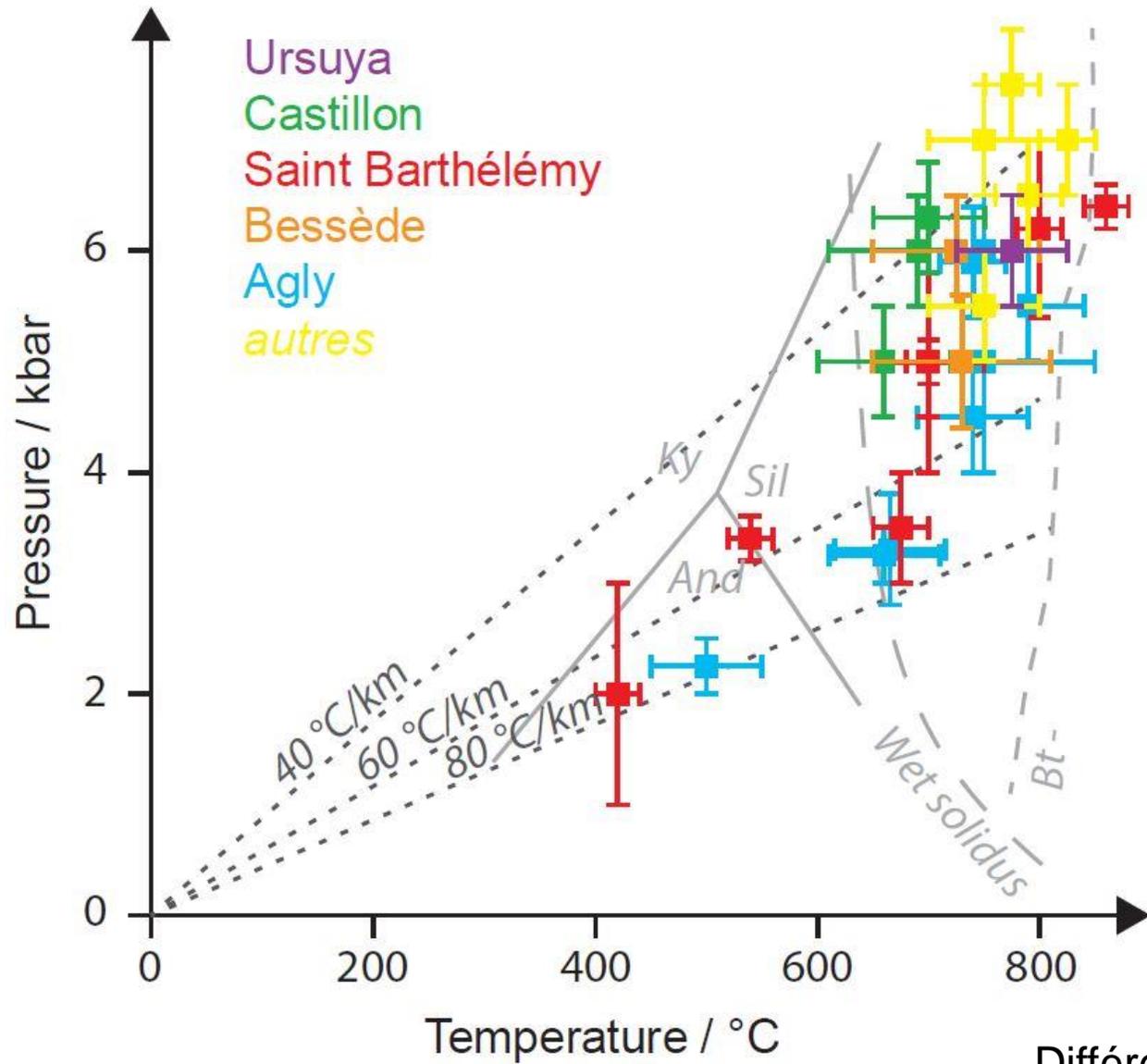
# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



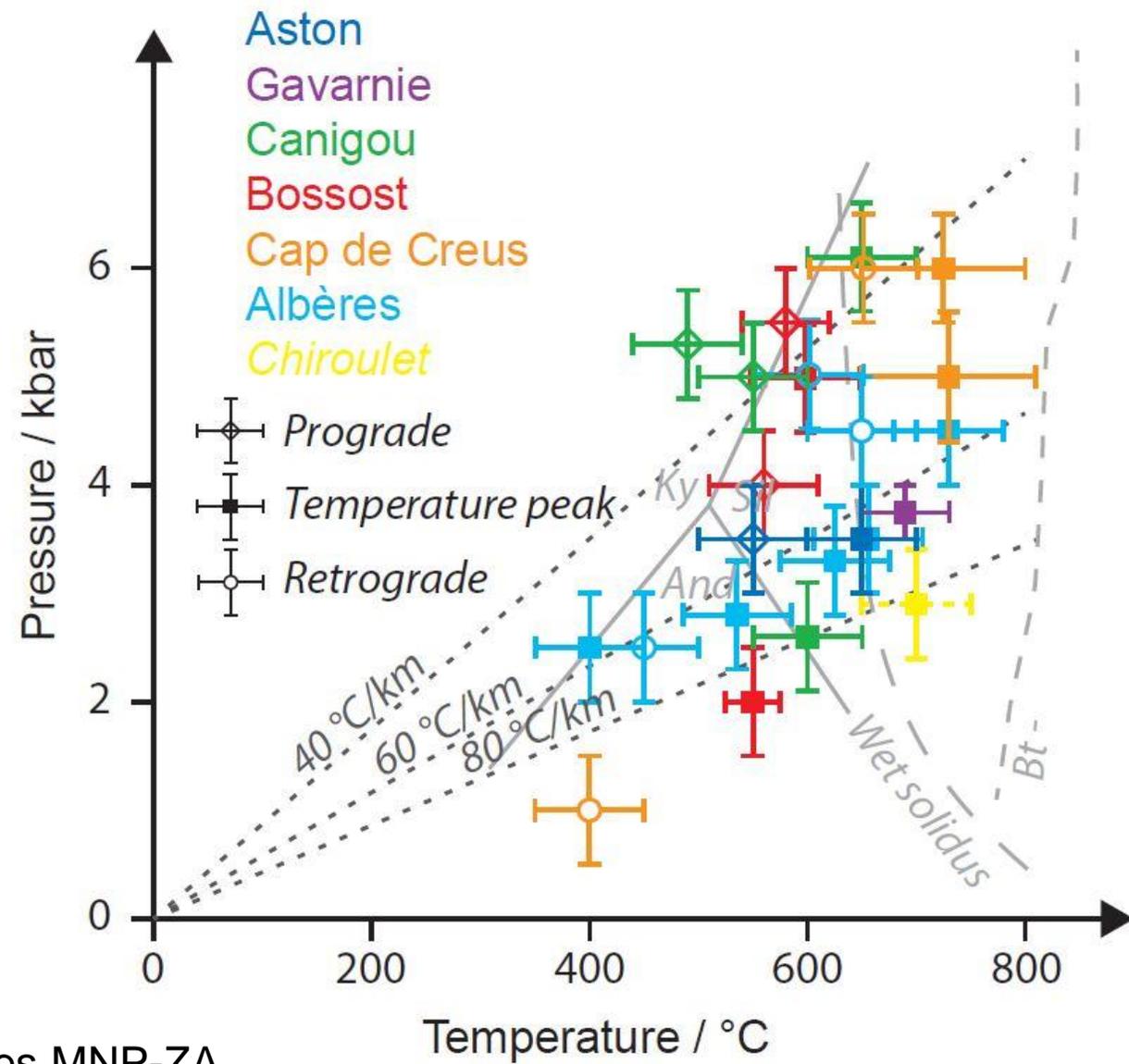
# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



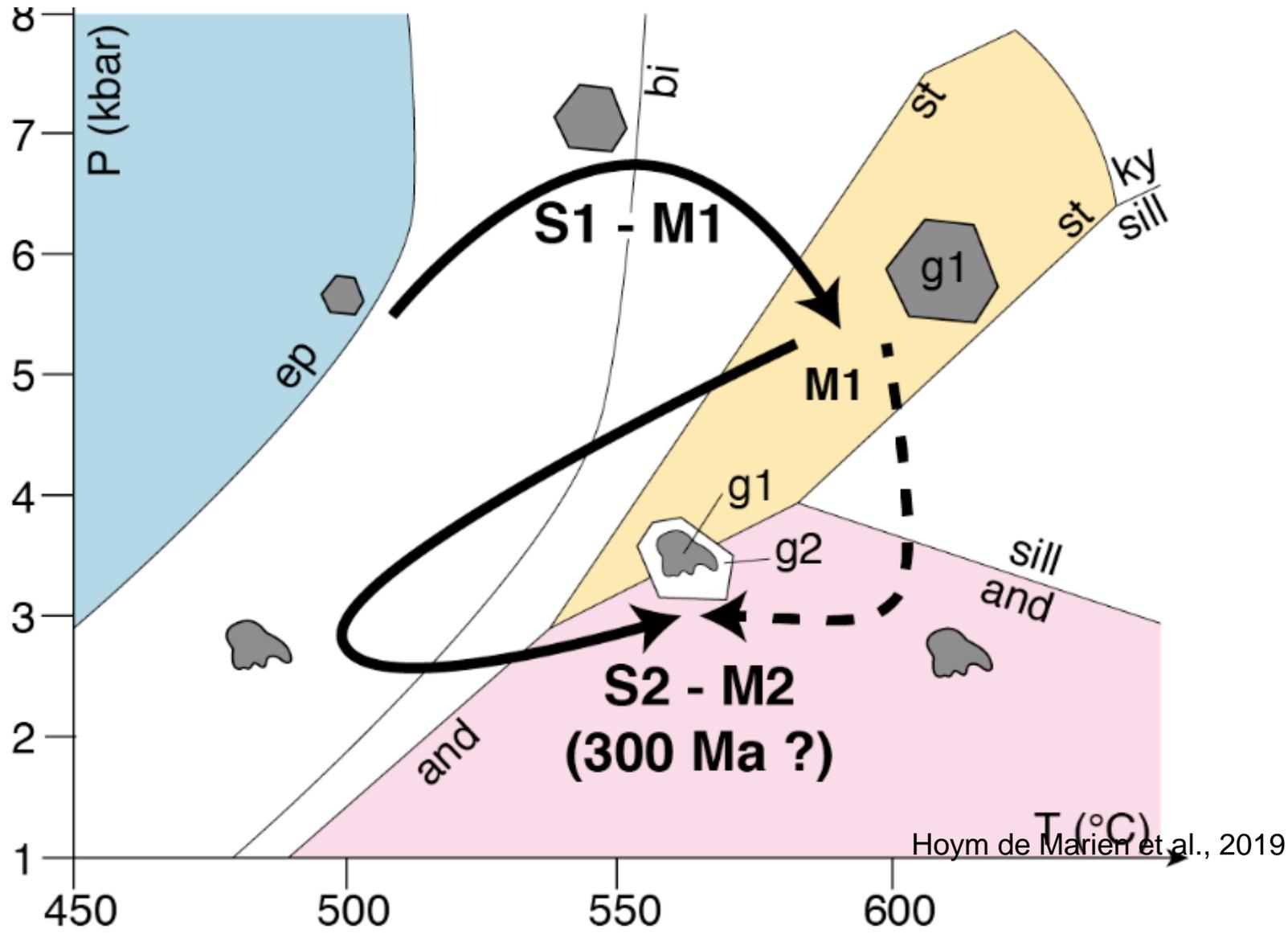
# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



Différences MNP-ZA



# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



## Massif du Canigou

M2 Luc de Hoym de Marien  
(Pitra, Van den Driessche,  
Le Bayon, Cagnard)

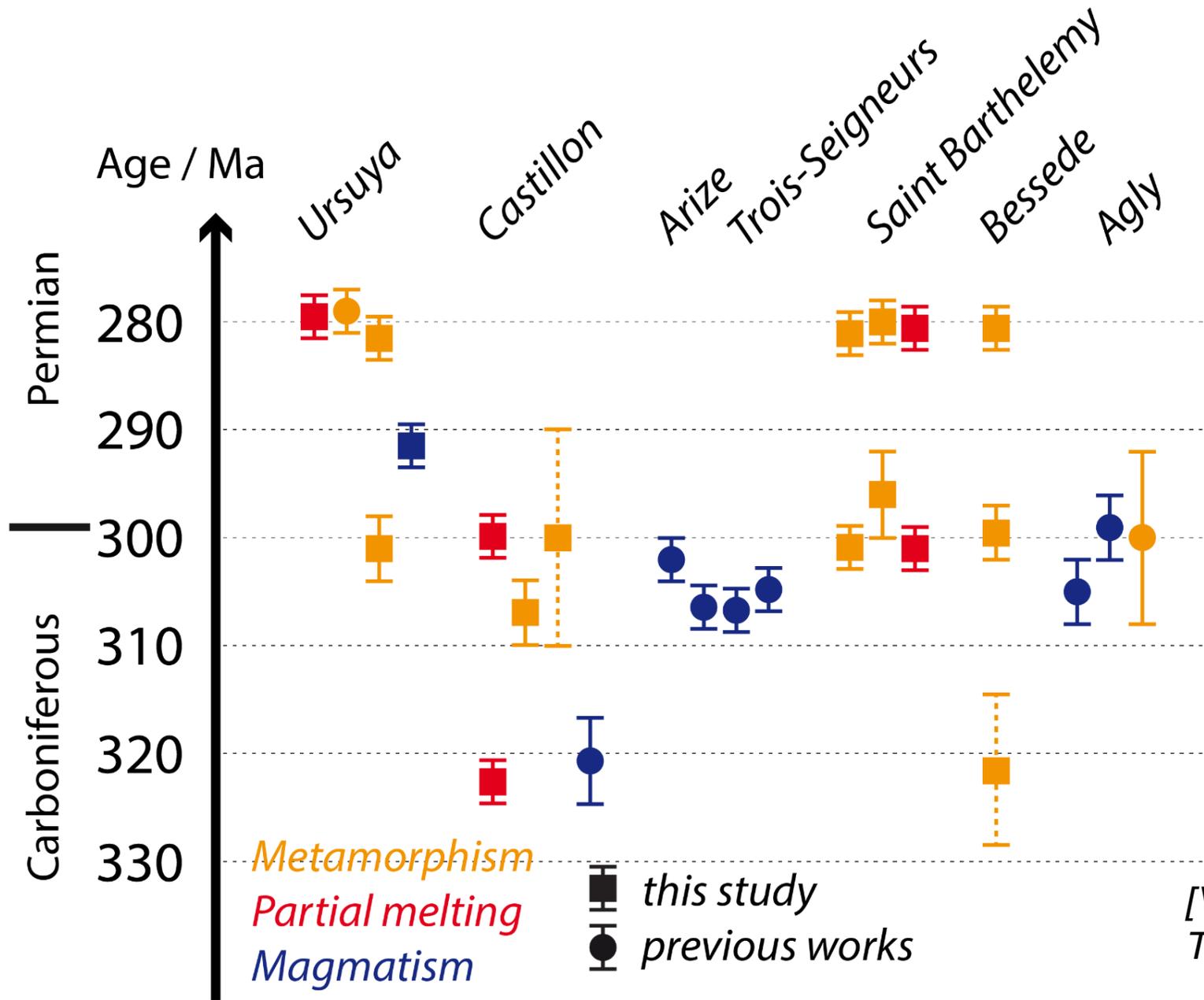
La question du  
métamorphisme précoce de  
moyenne pression

Gap temporel entre D1/M1 et  
D2/M2 ?

Hoym de Marien et al., 2019

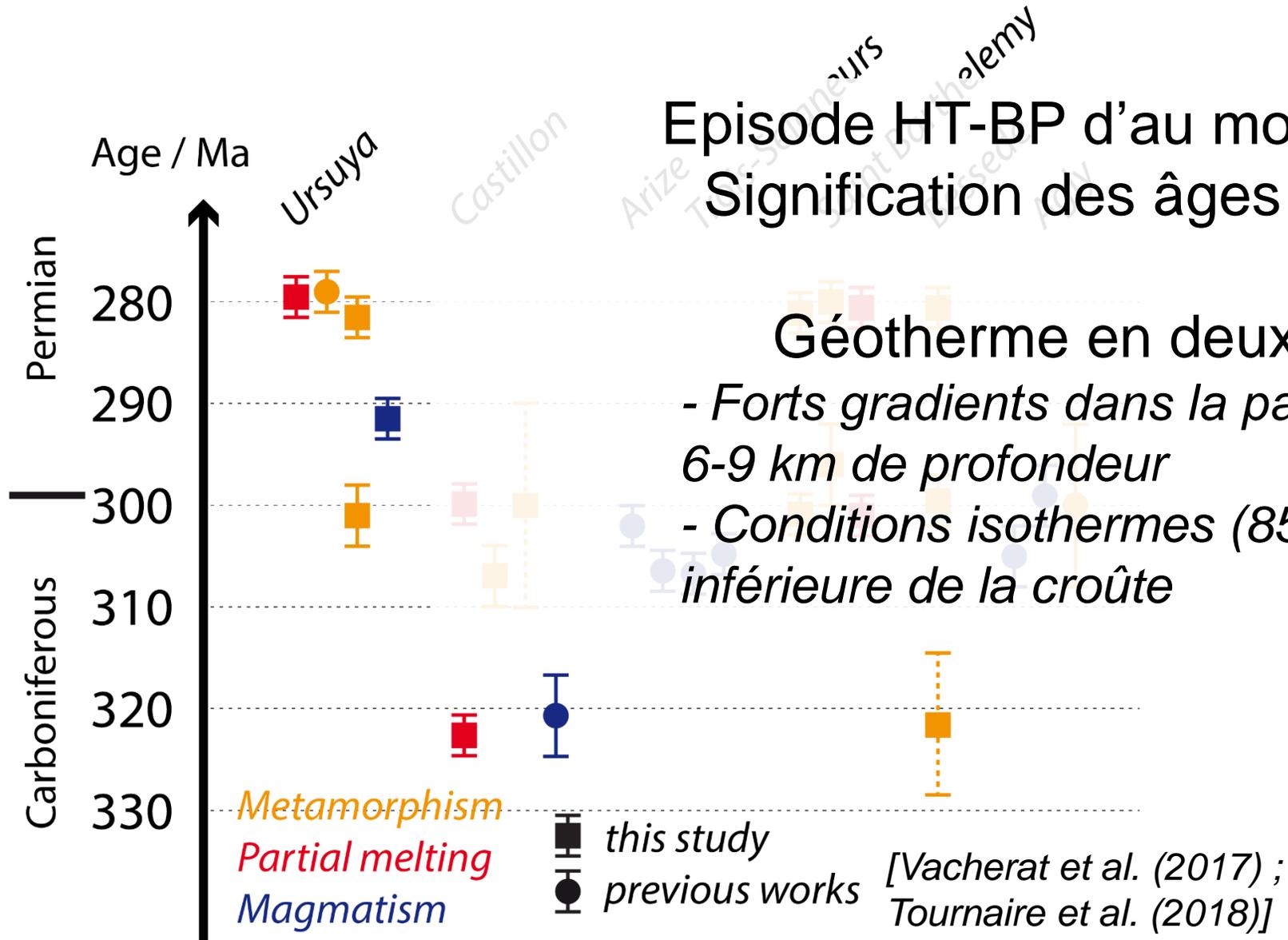
Synthetic P-T paths with sketches of sequential growth of garnet. The prograde part of the P-T path between 5.5 kbar 510 °C and 6.7 kbar 550 °C corresponds to a gradient of 9 °C/km.

# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme



[Vacherat et al. (2017) ;  
Tournaire et al. (2018)]

# Conditions PT, âge et durée du métamorphisme

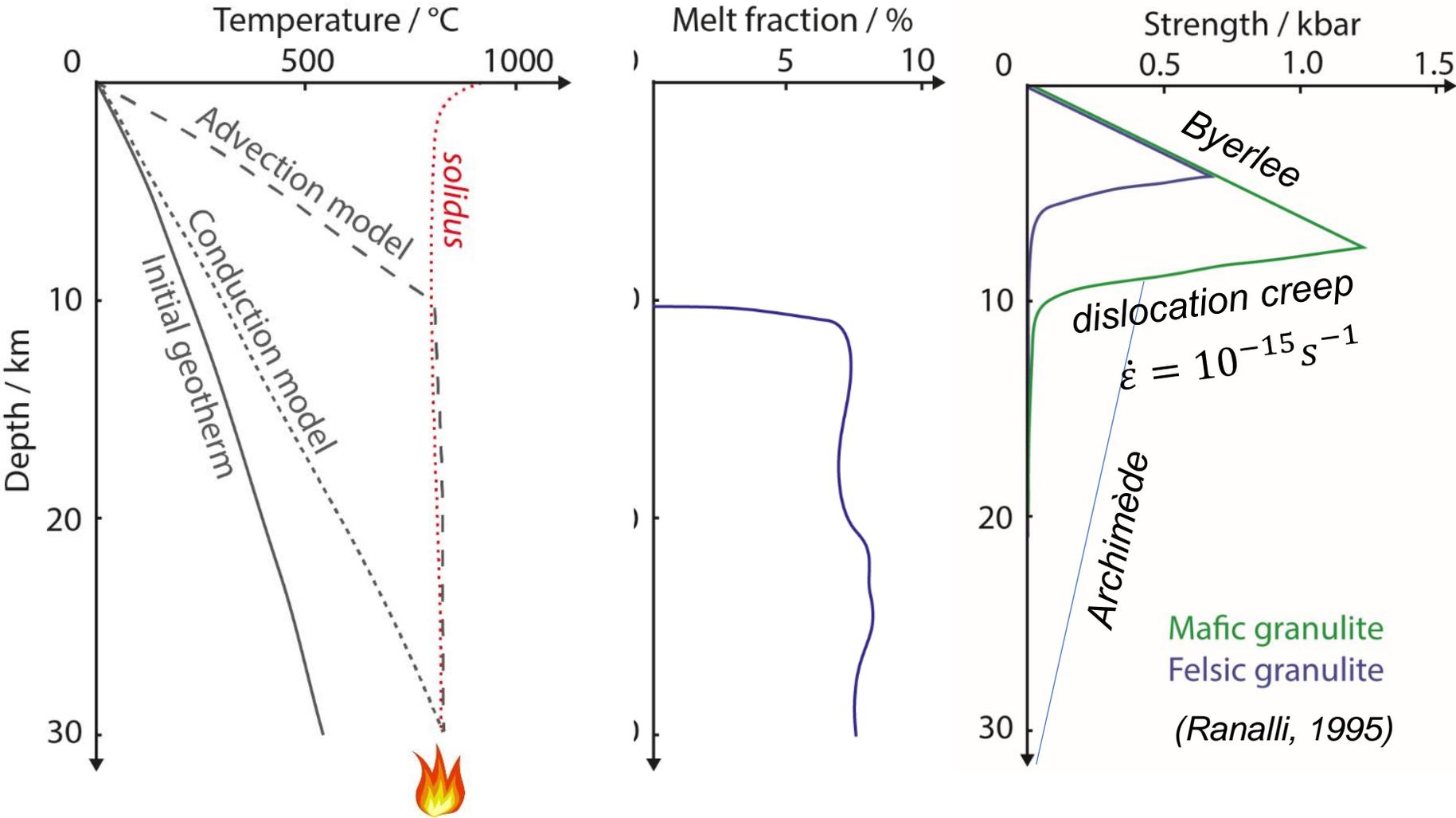


Episode HT-BP d'au moins 20-30 Ma  
Signification des âges à 280 Ma ?

Géotherme en deux parties :

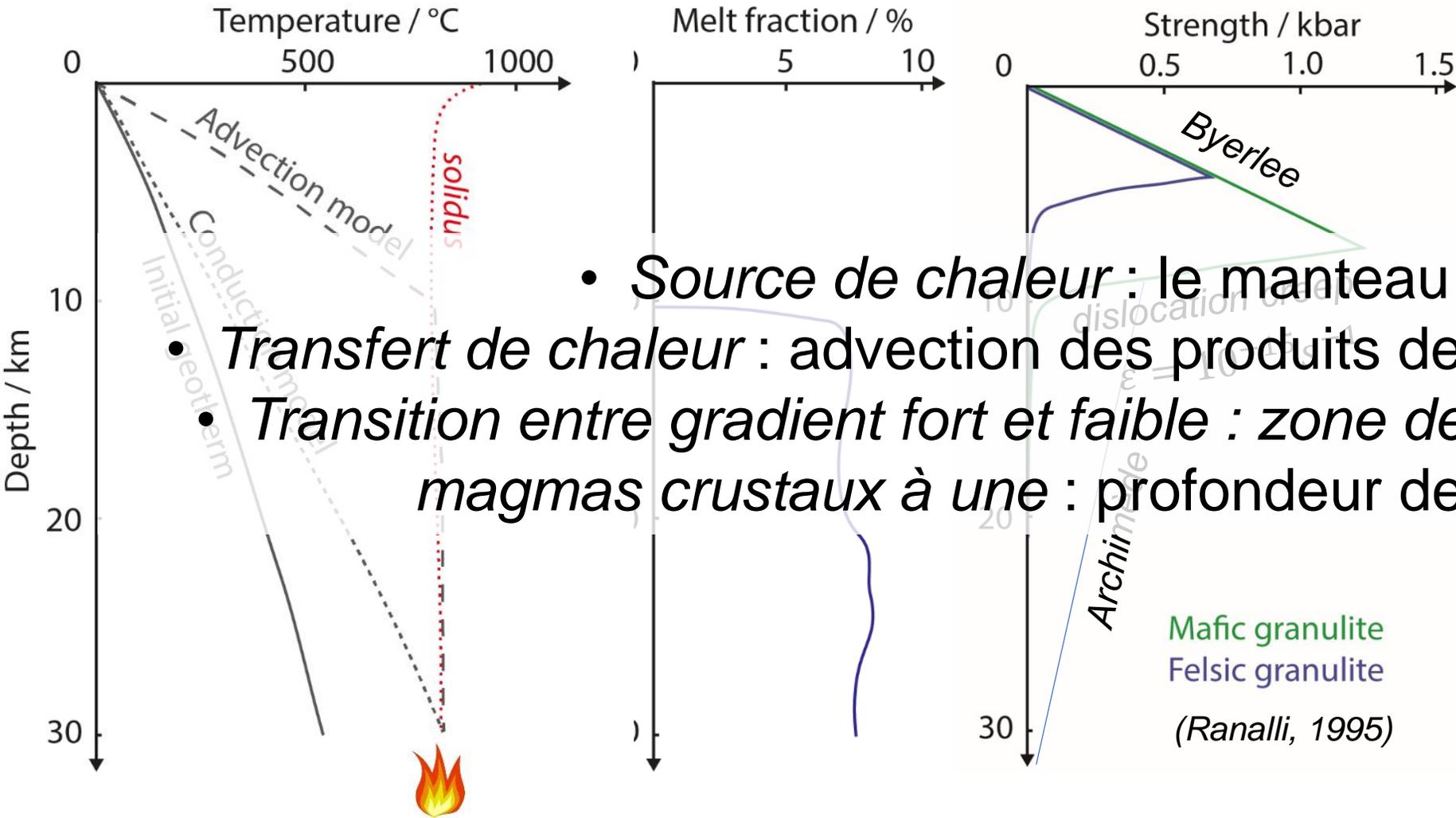
- Forts gradients dans la partie supérieure jusqu'à 6-9 km de profondeur
- Conditions isothermes (850 °C) dans la partie inférieure de la croûte

# Origine de l'anomalie thermique



- Température à la base de la croûte = 850 °C
- Advection des produits de fusion
- *Fraction de liquide > 7 %*
- *Poussée d'Archimède > Enveloppe des contraintes*
- *Vitesse d'advection imposée = 2.5 km/Ma (géochrono)*

# Origine de l'anomalie thermique



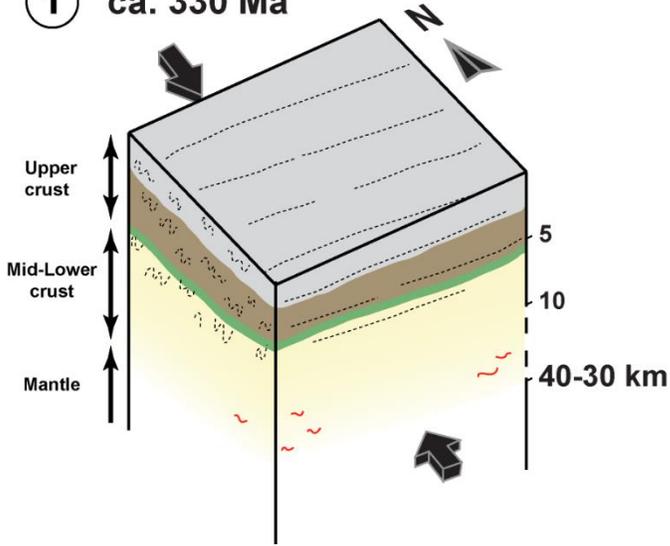
- *Source de chaleur : le manteau*

- *Transfert de chaleur : advection des produits de fusion partielle*
- *Transition entre gradient fort et faible : zone de stockage des magmas crustaux à une profondeur de 6-9 km*

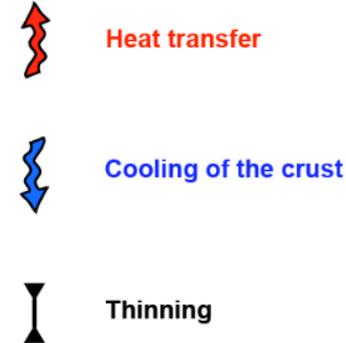
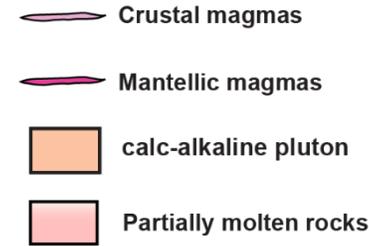
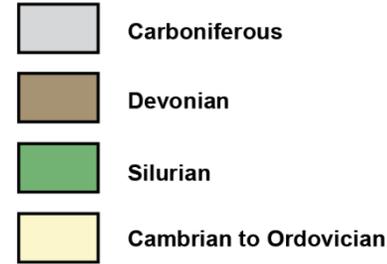
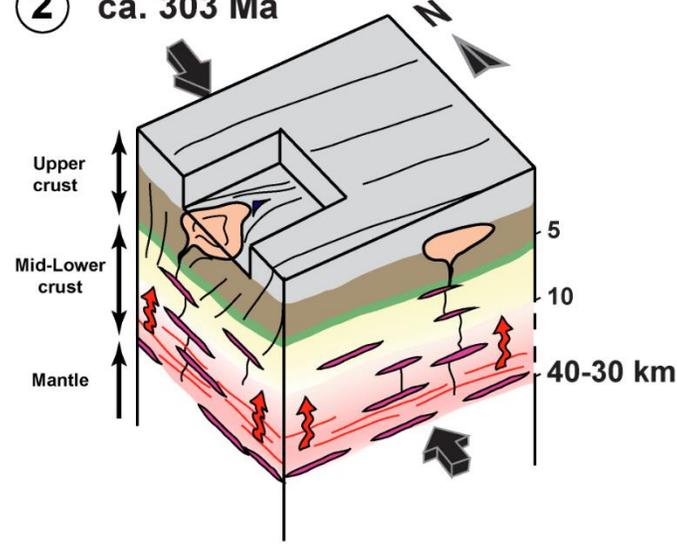
- Température à la base de la croûte = 850 °C
- Advection des produits de fusion
- *Fraction de liquide > 7 %*
- *Poussée archimède > 10 MPa*
- *Enveloppe des contraintes*
- *Vitesse d'advection imposée = 2.5 km/Ma*

# Origine et développement de l'anomalie thermique dans les Pyrénées

① ca. 330 Ma



② ca. 303 Ma

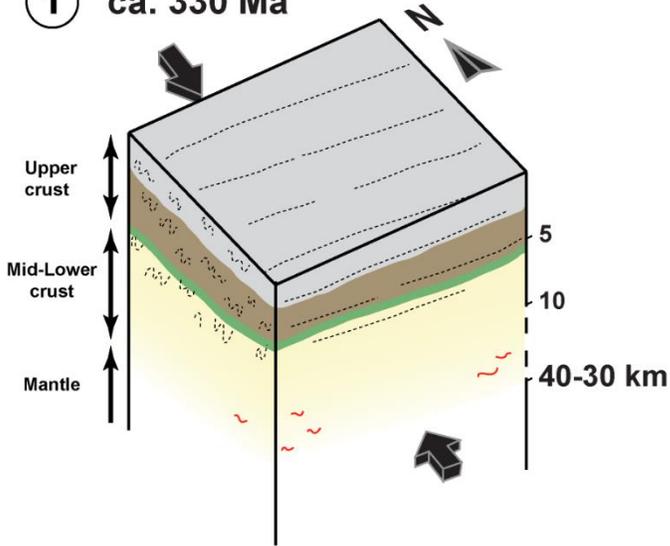


- Déformation D1, épaissement modéré (10 km ?)
- Érosion thermique de la lithosphère et début de la fusion de la base de la croûte ??

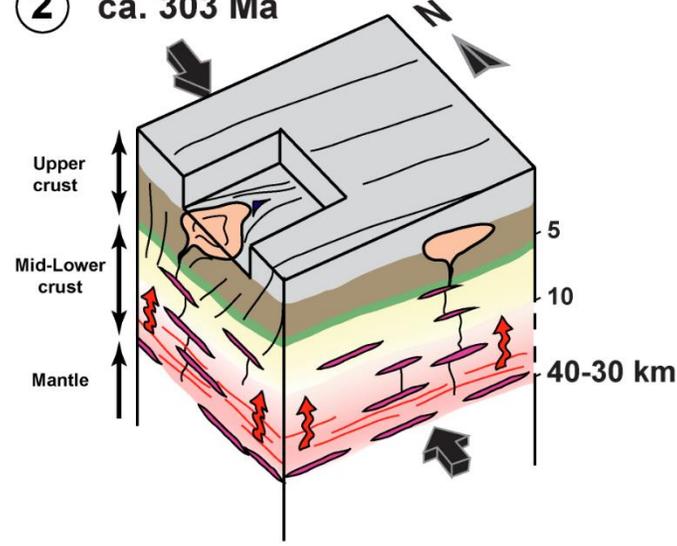
- Injection de magmas mantellique à la base de la croûte
- Mise ne place des plutons intermédiaires (diorite, granodiorite) dans la moitié supérieure de la croûte
- Début de la fusion partielle
- Début D2

# Origine et développement de l'anomalie thermique dans les Pyrénées

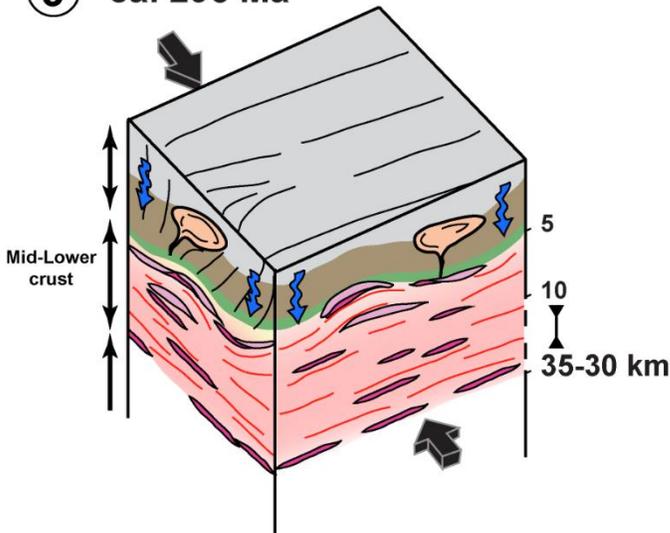
① ca. 330 Ma



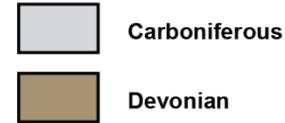
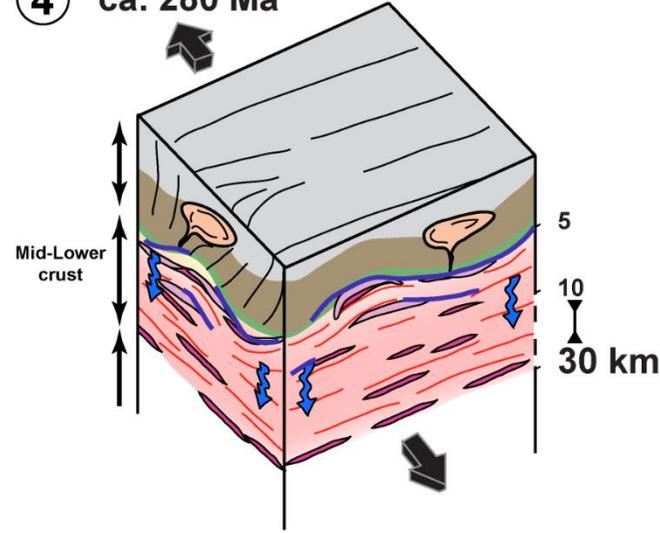
② ca. 303 Ma



③ ca. 290 Ma



④ ca. 280 Ma



## De 303 Ma à 290 Ma :

- Maturation thermique de la croûte
- Formation des dômes

## À partir de 290 Ma :

- Cristallisation des derniers magmas intermédiaires métalumineux
- Cristallisation des magmas peralumineux
- Début du refroidissement
- Localisation progressive de la déformation, transition D2-D3



# plan

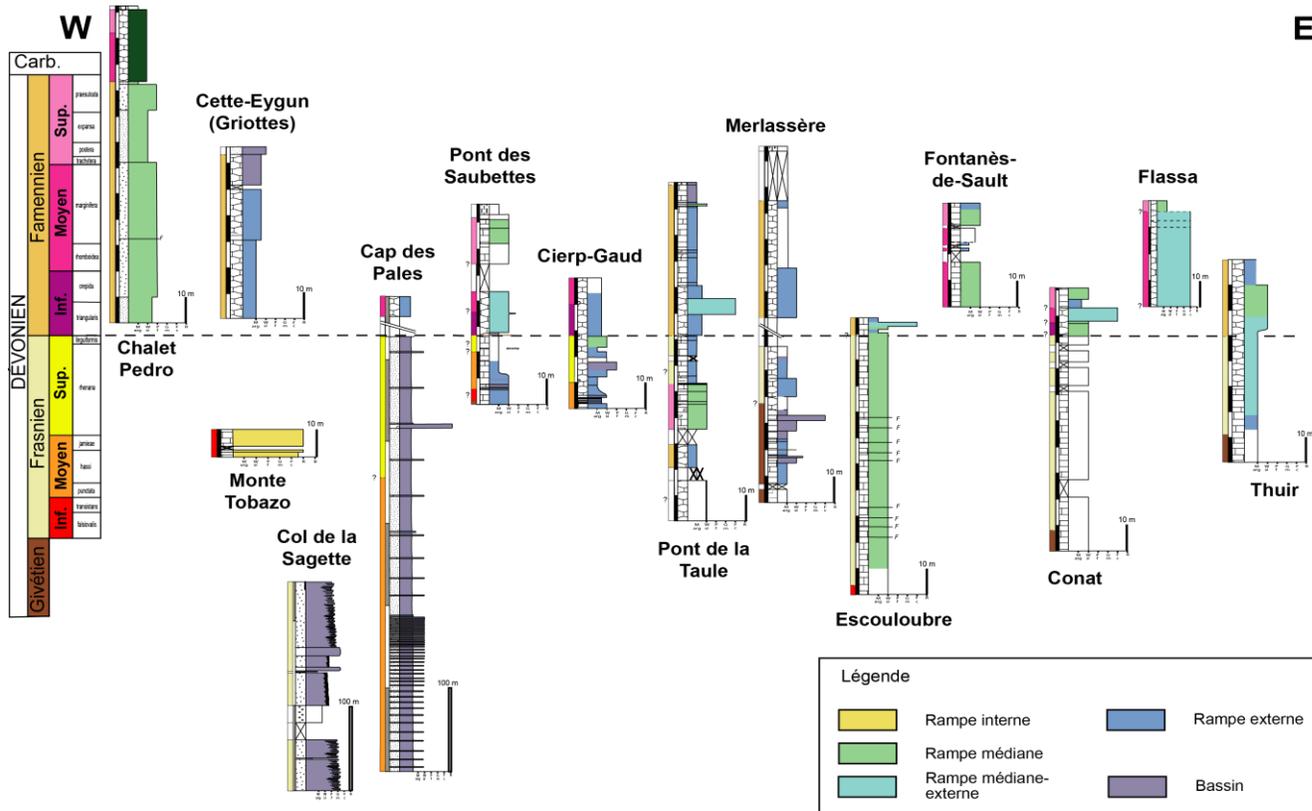
État des connaissances sur le cycle hercynien dans les Pyrénées avant le RGF

Le chantier RGF-Pyrénées

- Sédimentologie - stratigraphie
- Tectonique
- Métamorphisme et magmatisme

Synthèse et état des questions après le chantier RGF-Pyrénées

# Synthèse et questions



Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
en progrès mais peut mieux faire !

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?

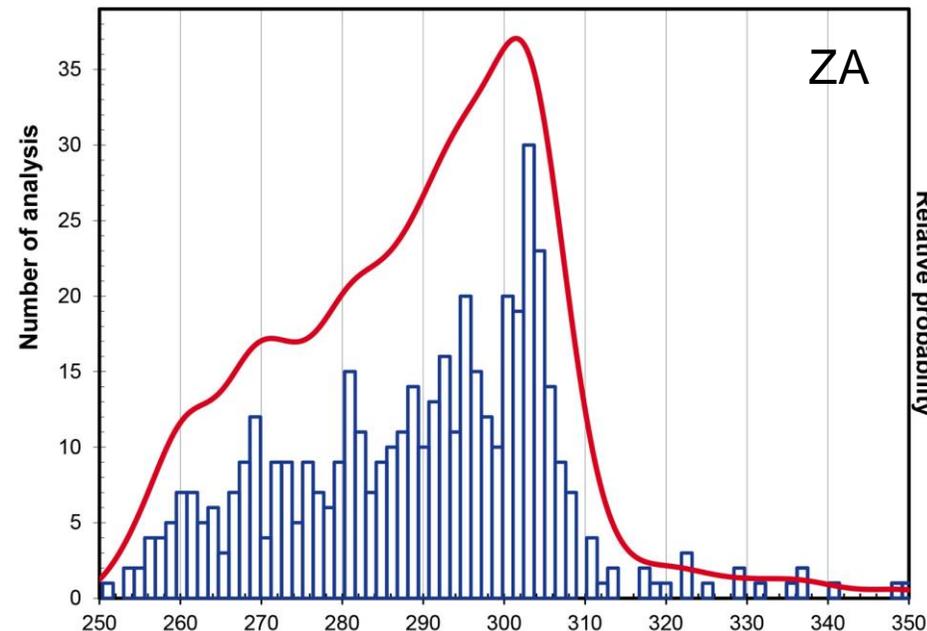
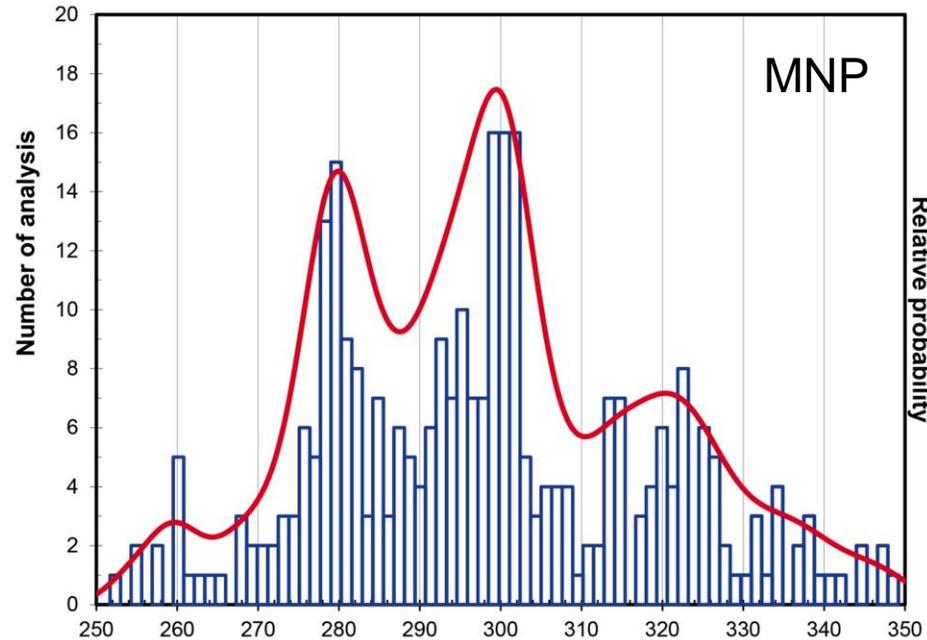
Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

Le Permien ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

Couplage surface – profond ?

# Synthèse et questions



Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

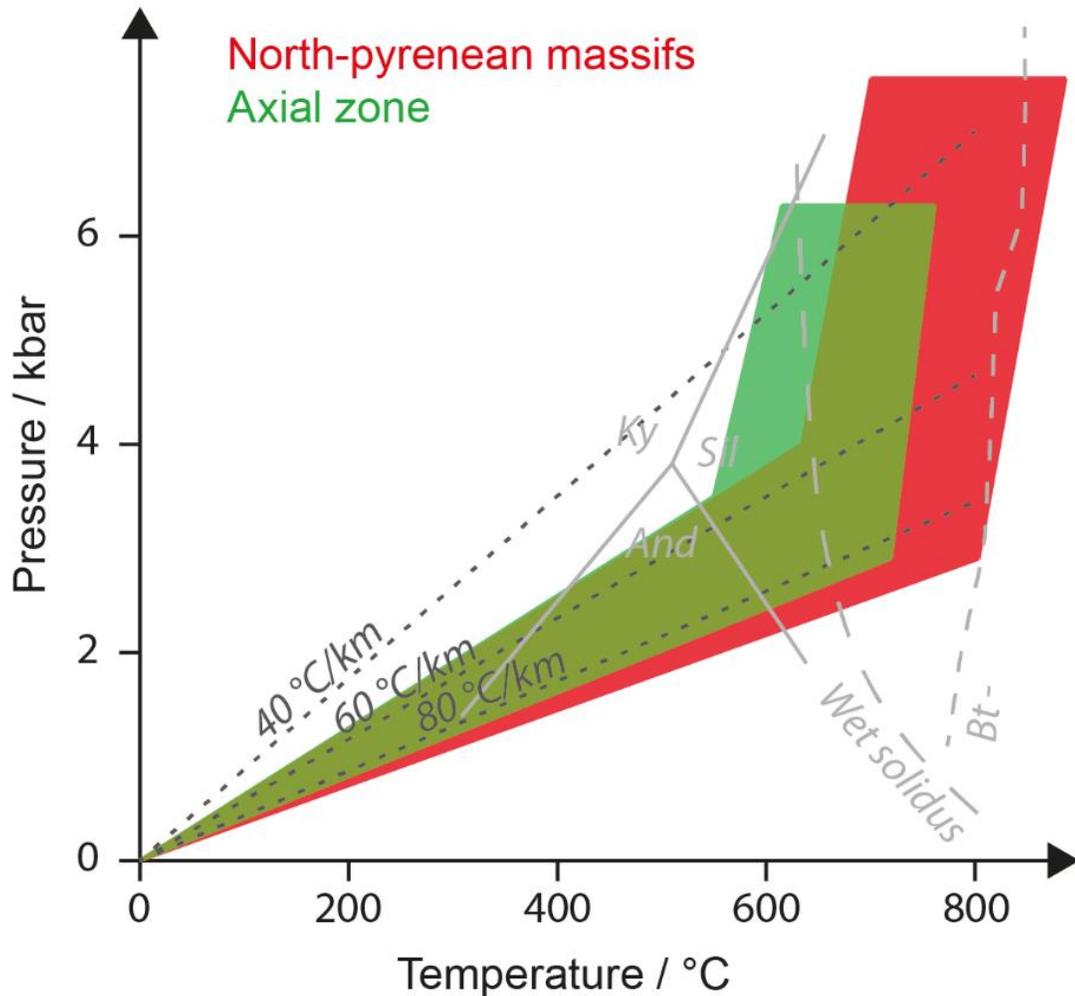
**Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?**  
**histoires sensiblement différentes !**

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

Le Permien ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

# Synthèse et questions



MNP : fort amincissement syn-D2  
ZA : pas d'amincissement syn-D2

Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

**Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?**  
**histoires sensiblement différentes !**

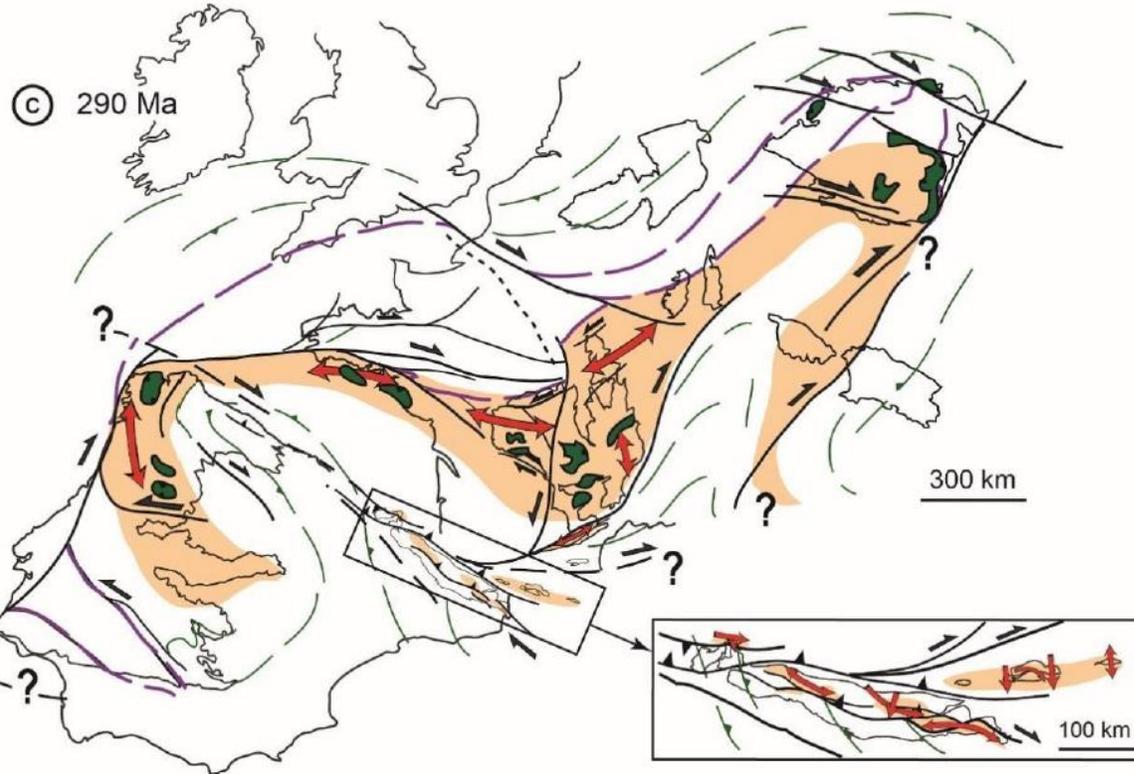
Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

Le Permien ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

# Synthèse et questions

Cochelin (2016)



Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
en progrès mais peut mieux faire !

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?  
**histoires sensiblement différentes !**  
**singularité pyrénéenne**

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

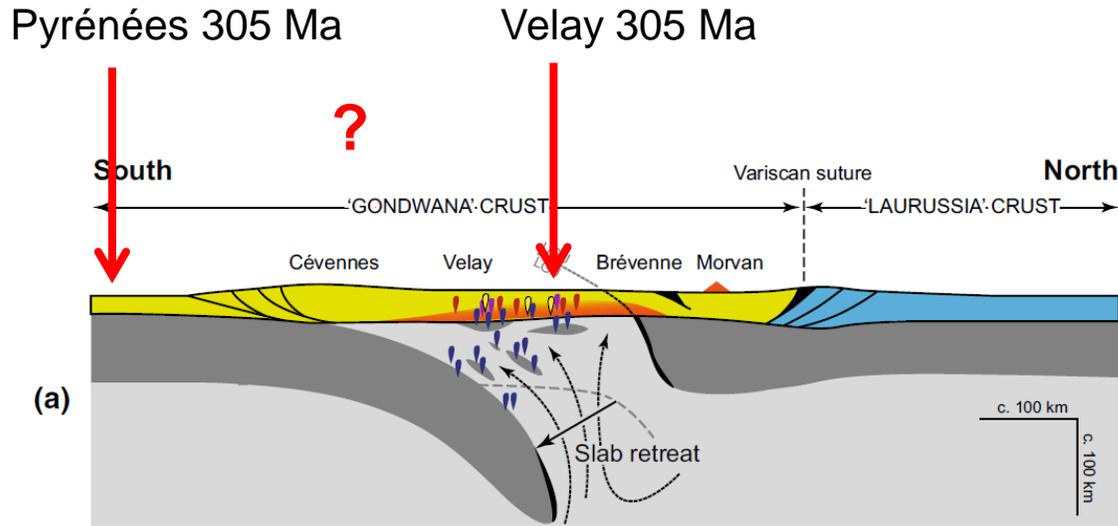
Le Permien ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

MNP : fort amincissement syn-D2

ZA : pas d'amincissement syn-D2

# Synthèse et questions



Laurent et al., 2018

- Apport de chaleur asthénosphérique par délamination du manteau lithosphérique
- Mais calendrier incompatible avec un retrait de slab du N vers le S...
- Délamination en lien avec la formation de l'orocline (modèle cantabrique, Gutiérrez-Alonso et al, 2012) ???

Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?  
**histoires sensiblement différentes !**  
**singularité pyrénéenne**

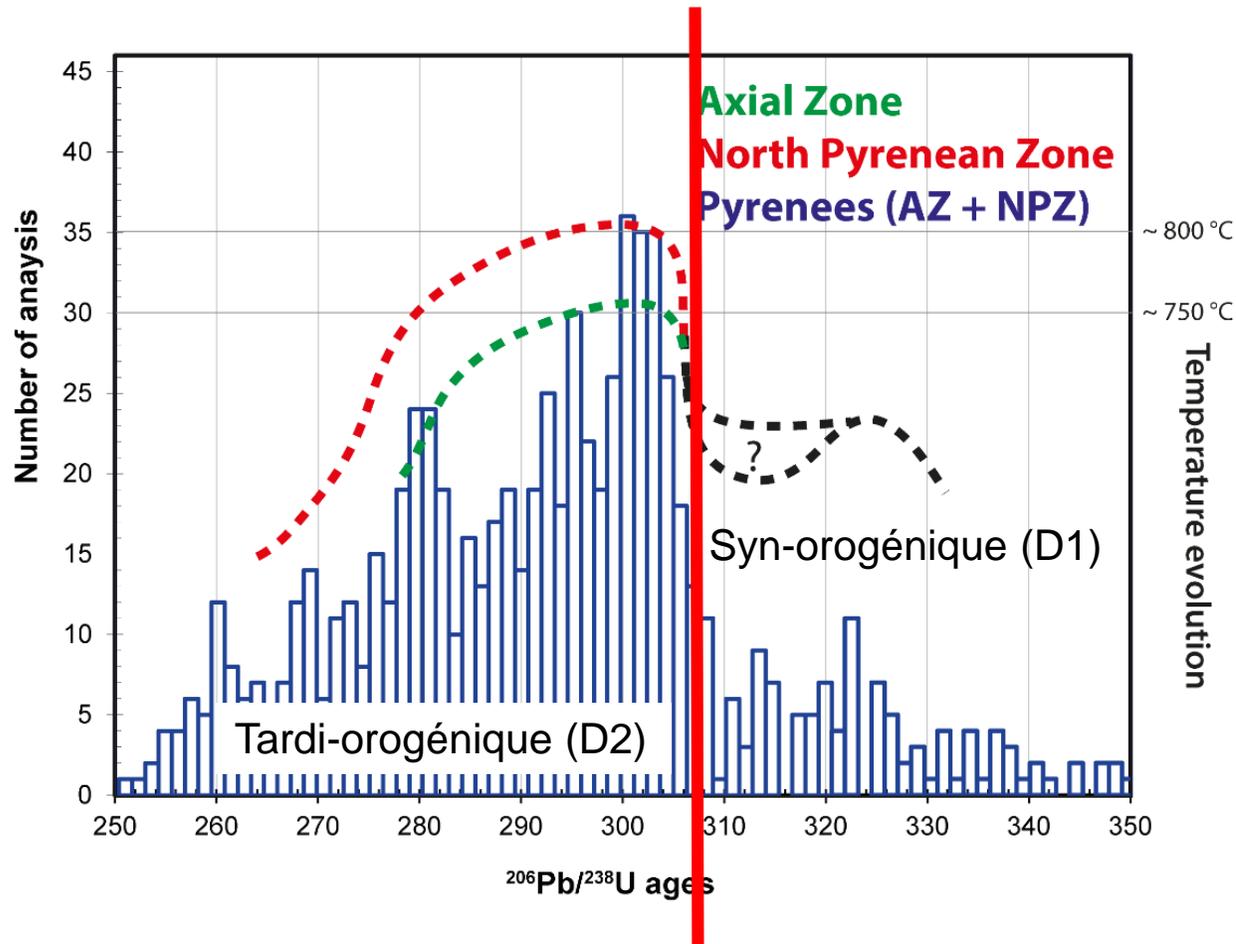
Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?

**questions sur la cause de la délamination la poule et l'œuf ?**

Le Permien ?

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

# Synthèse et questions



extinction progressive de l'anomalie mantellique  
et retour à l'équilibre d'une lithosphère qui se  
refroidit ?

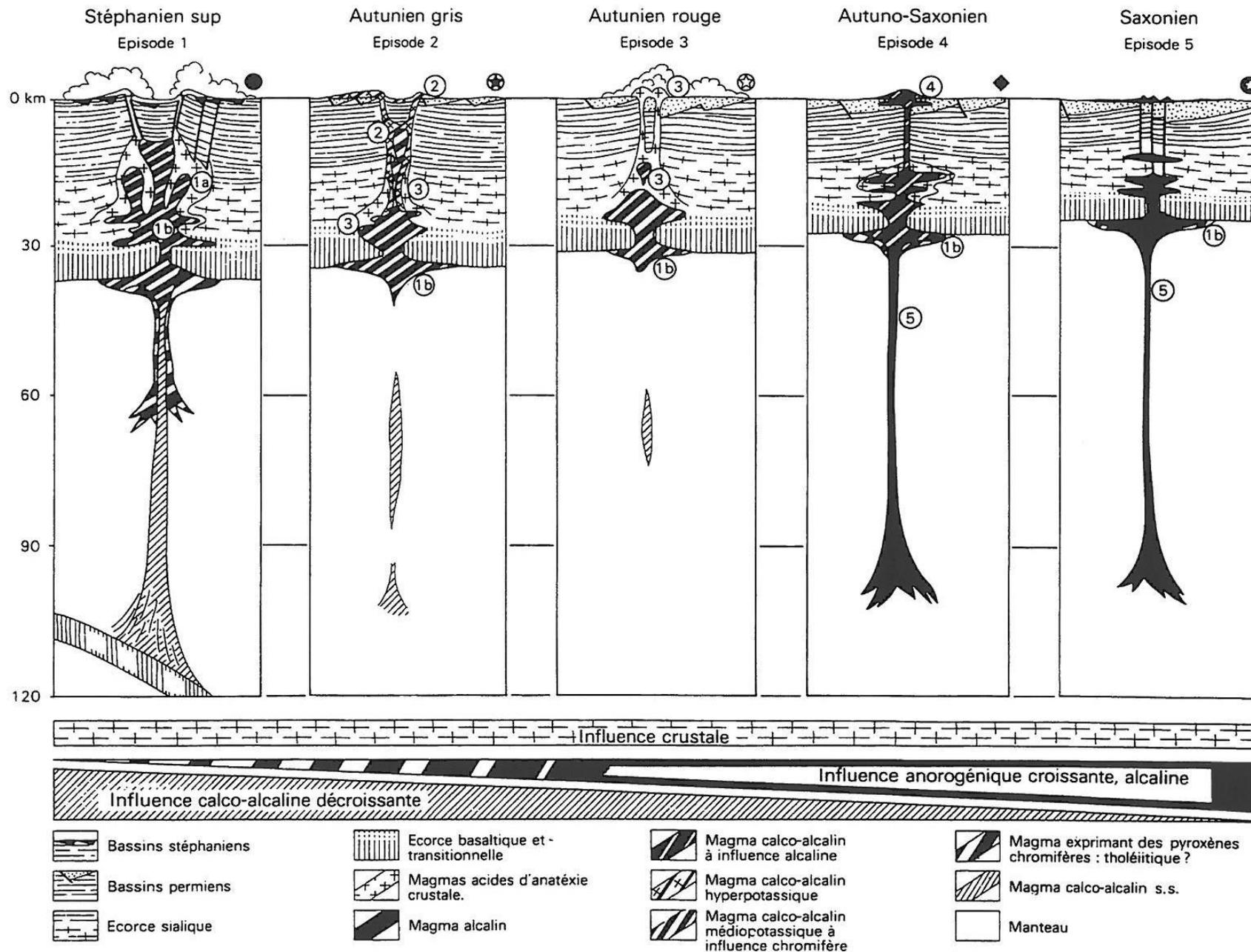
Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?  
**histoires sensiblement différentes !**  
**singularité pyrénéenne**

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle  
lithosphérique ?  
**questions sur la cause de la délamination**  
**la poule et l'œuf ?**

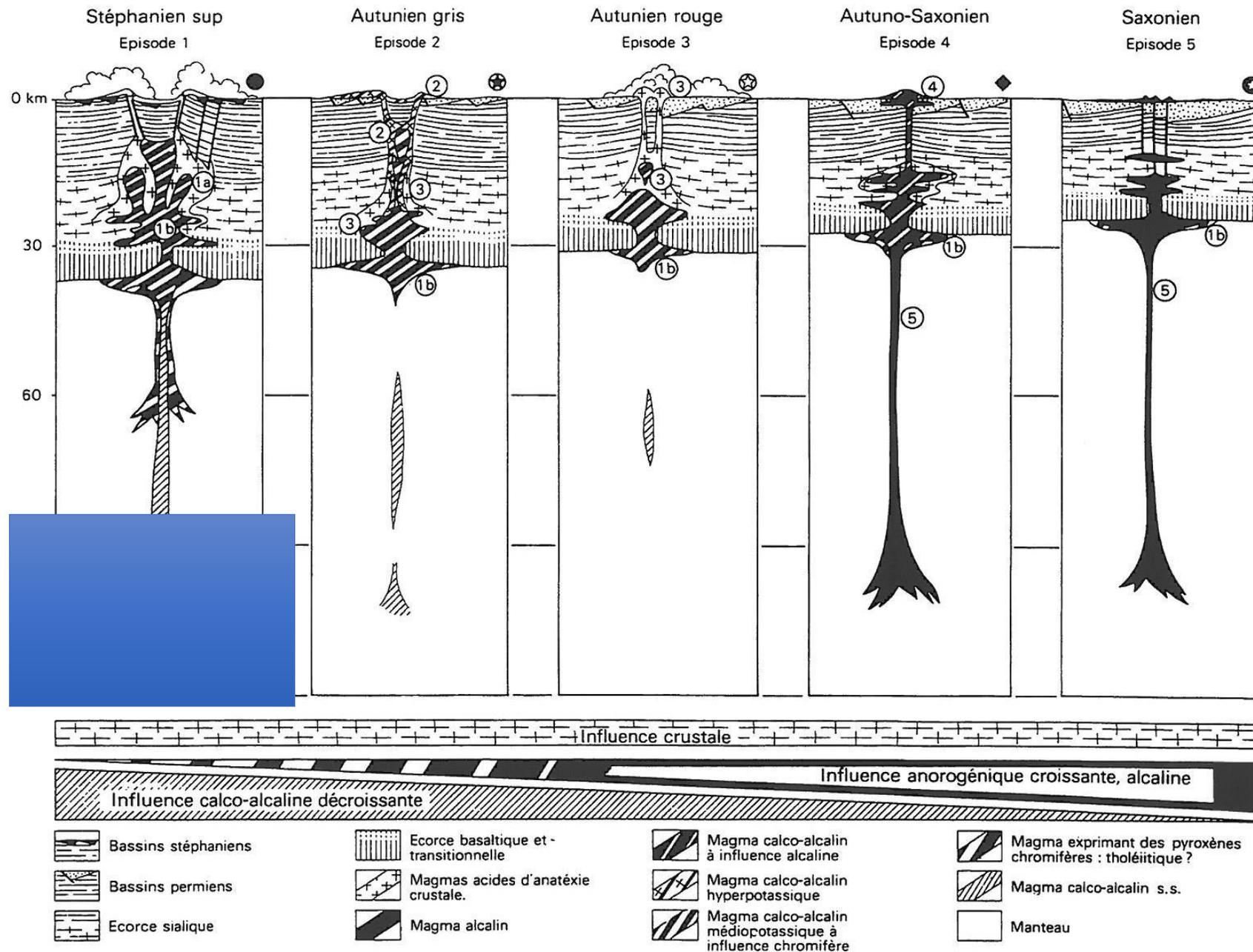
**Le Permien ?**

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-  
extension et la collision pyrénéenne etc... ?



Barnolas, Chiron, 1996

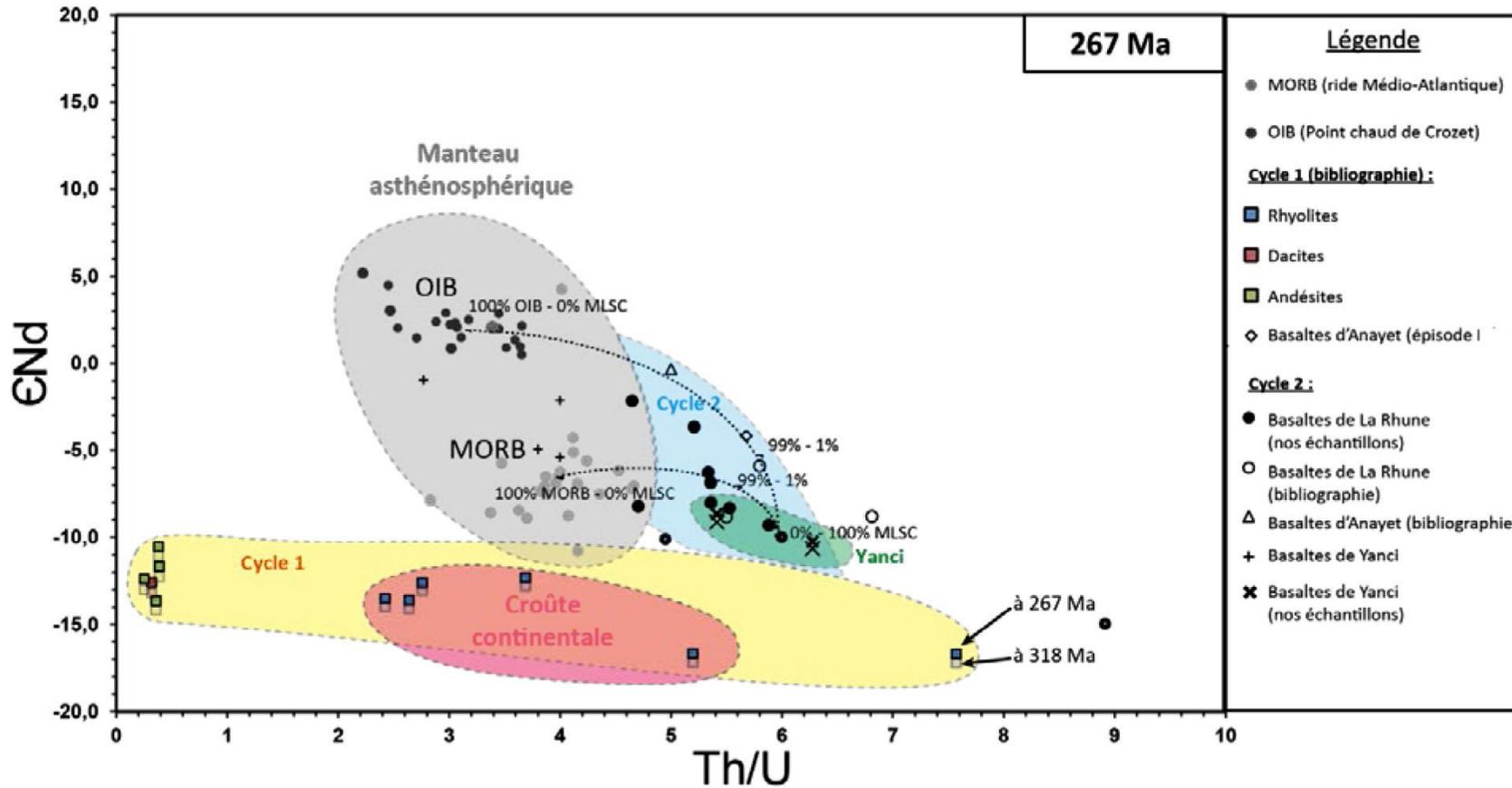
**Fig. 9.26.** Essai de reconstitution de l'évolution magmatique des Pyrénées du Stéphanien supérieur au Saxonien. D'après F. Bixel (1989).  
On passe d'un volcanisme calco-alcalin lié à la fin du cycle varisque à un volcanisme alcalin précurseur du cycle atlantico-alpin. Durant cette tranche de temps, l'écorce sialique joue un rôle important en produisant les magmas 1a et 3 qui interfèrent plus ou moins avec les magmas basiques en les acidifiant.



Barnolas, Chiron, 1996

**Fig. 9.26.** Essai de reconstitution de l'évolution magmatique des Pyrénées du Stéphanien supérieur au Saxonien. D'après F. Bixel (1989).  
 On passe d'un volcanisme calco-alcalin lié à la fin du cycle varisque à un volcanisme alcalin précurseur du cycle atlantico-alpin. Durant cette tranche de temps, l'écorce sialique joue un rôle important en produisant les magmas 1a et 3 qui interfèrent plus ou moins avec les magmas basiques en les acidifiant.

# Synthèse et questions

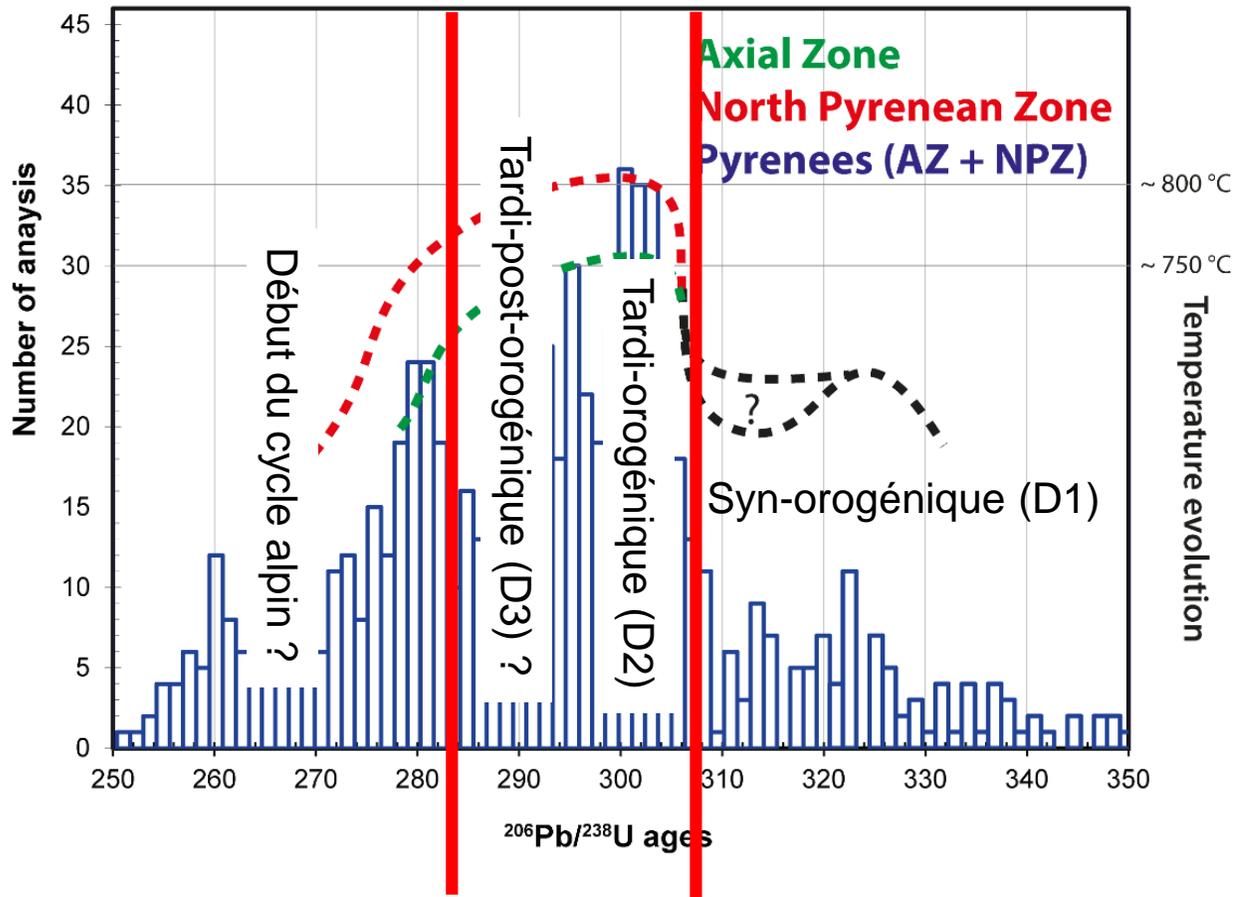


Roches magmatiques de la Rhune

M2 Marylou Vines 2014  
(Pochat, Bézos, La, Nonnotte)

Lien avec le magmatisme doléritique du Trias...

# Synthèse et questions



Lien avec le magmatisme du Trias ?

Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?  
**histoires sensiblement différentes !**  
**singularité pyrénéenne**

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?  
**questions sur la cause de la délamination**  
**la poule et l'œuf ?**

**Le Permien**  
**ou les Permien ?**

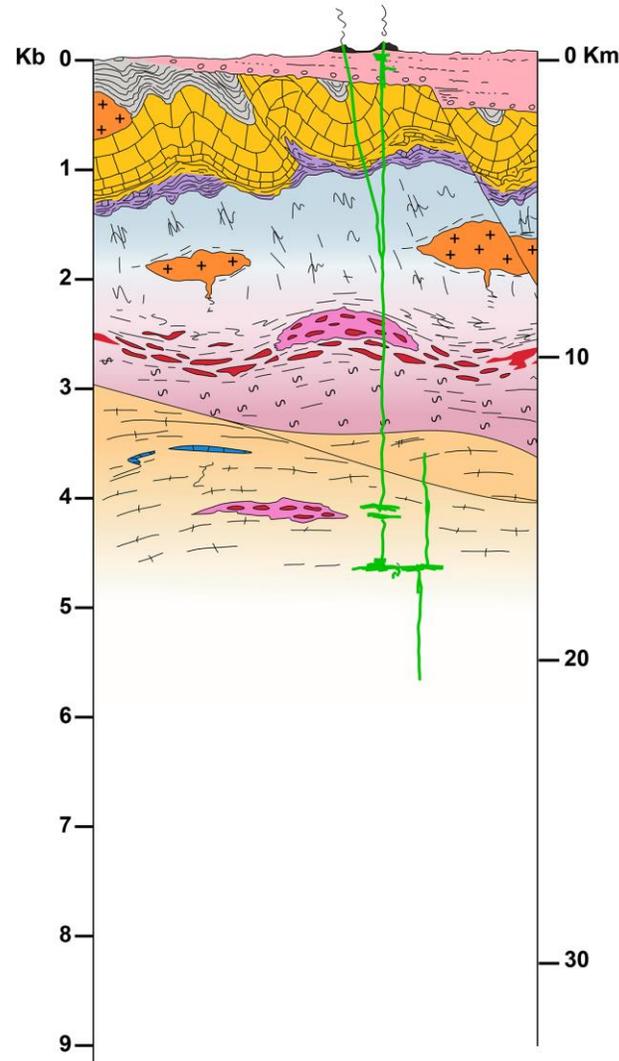
Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?

Exhumation en grande partie tardi-hercynienne : les MNP étaient en position de croûte supérieure à partir de la fin du Permien

On n'observe à la surface que la partie supérieure de la croûte hercynienne

Pas de croûte inf. visible. Elle est repartie en subduction lors de l'inversion au Crétacé sup.

Pas de haute-température (> 500-550°C ?) post-hercynienne dans le socle



Permien (inf. ?)

Intégration des 'différents domaines thématiques' ?  
**en progrès mais peut mieux faire !**

Zone axiale vs zone Nord-pyrénéenne ?  
**histoires sensiblement différentes !  
singularité pyrénéenne**

Géodynamique et histoire thermique à l'échelle lithosphérique ?  
**questions sur la cause de la délamination  
la poule et l'œuf ?**

Le Permien  
**ou les Permien ?**

Les héritages : anté varisque sur le varisque sur l'hyper-extension et la collision pyrénéenne etc... ?  
**bien connaître l'hercynien pour mieux  
comprendre l'alpin...**

# Perspectives ?

À quand la suite ?  
Comment on travaille après un chantier RGF ?  
Autre forme de financement ? ITN ? Sur quel thème ?  
(à organiser collectivement ... avec l'appui de...?)

# Perspectives ?

À quand la suite ?

Comment on travaille après un chantier RGF ?

Autre forme de financement ? ITN ? Sur quel thème ?  
(à organiser collectivement... avec l'appui de...?)

Merci à Baptiste, Bryan et les autres !

