Pénéplanation et dynamique profonde des Pyrénées

Gemma V. Bosch

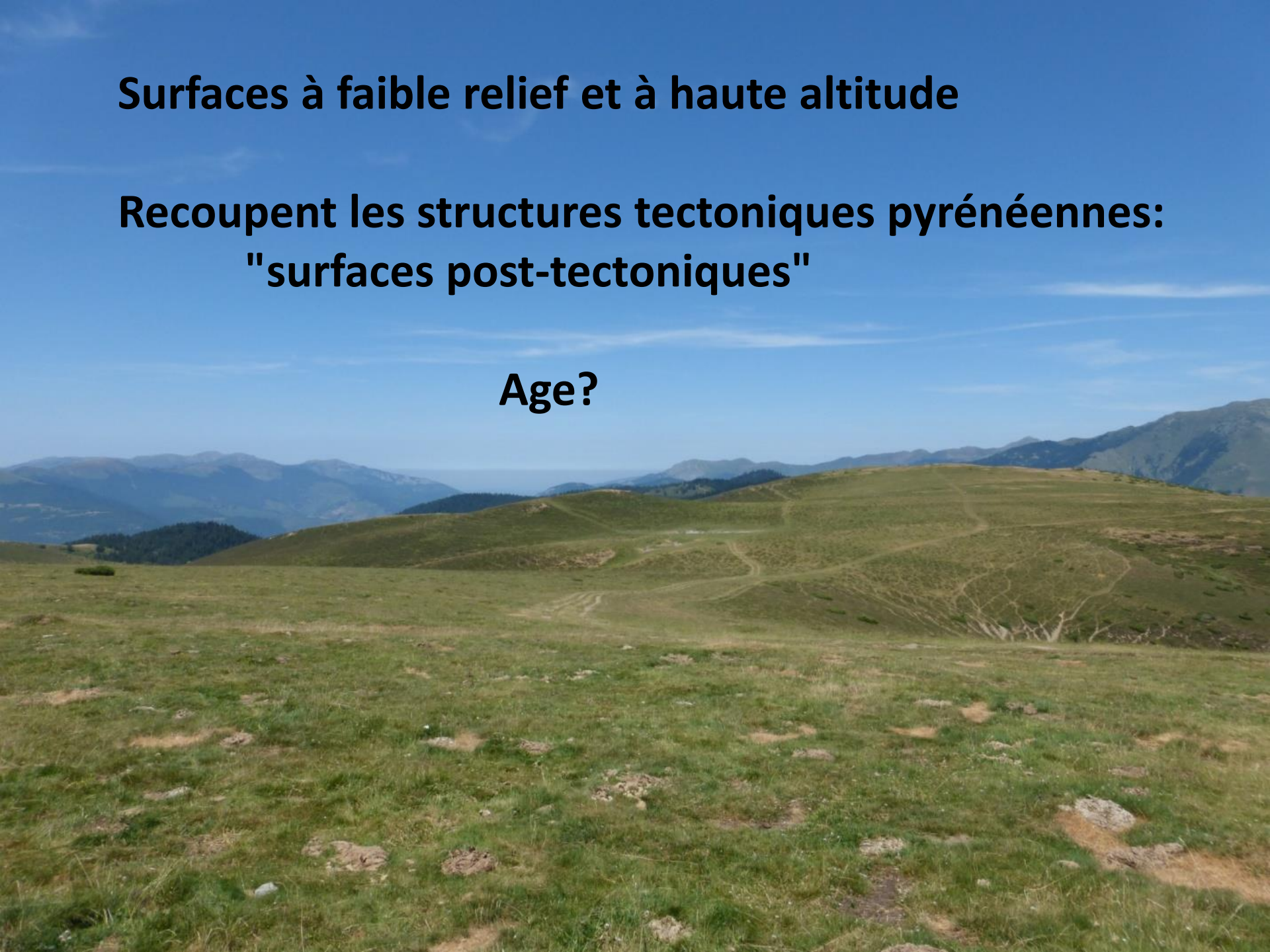
Thèse soutenue à Rennes le 09/12/2016

Devant un jury composé de :

Jean VAN DEN DRIESSCHE (directeur)
Julien BABAULT (encadrant)
Alexandra ROBERT (encadrante)

Antonio CASAS SAINZ (rapporteur)
Marianne FONT (rapporteur)
Gweltaz MAHÉO (examinateur)
Yves LAGABRIELLE (examinateur)
Robert WYNS (examinateur)

GÉOSCIENCES Rennes
UNIVERSITÉ DE RENNES 1
Géosciences pour une Terre durable brgm
RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

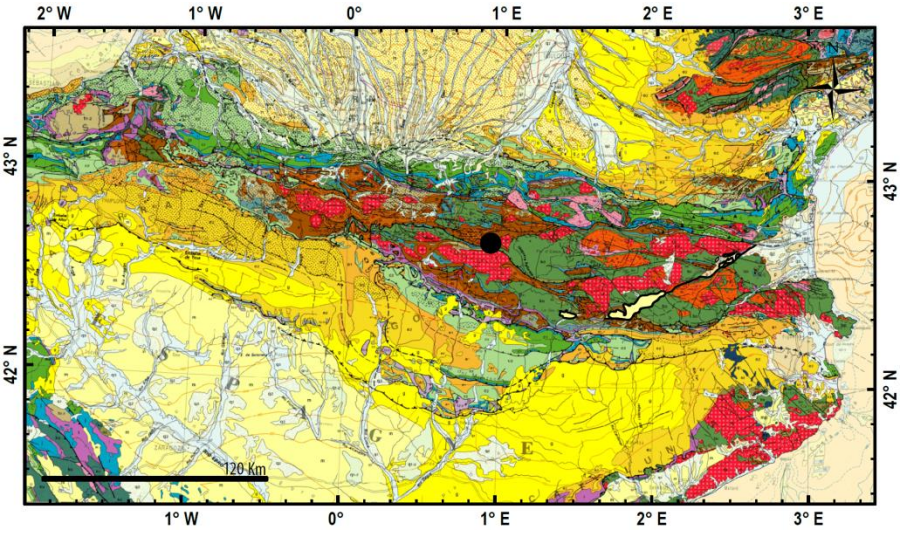


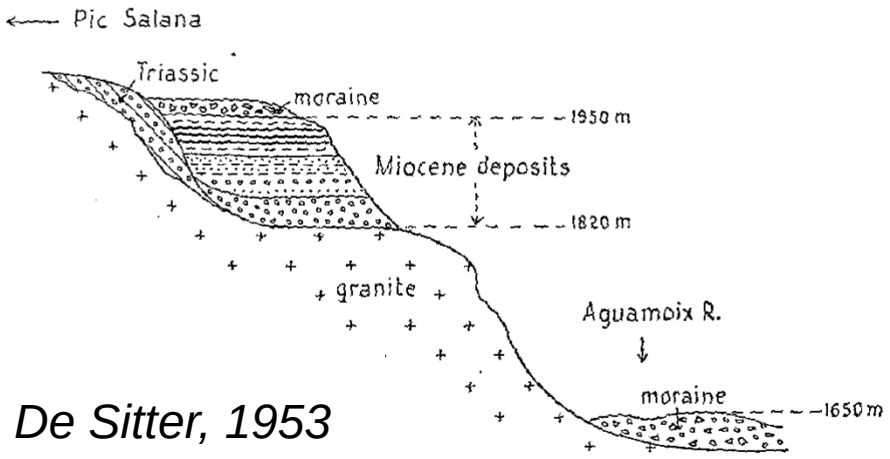
Surfaces à faible relief et à haute altitude

Recoupent les structures tectoniques pyrénéennes:
"surfaces post-tectoniques"

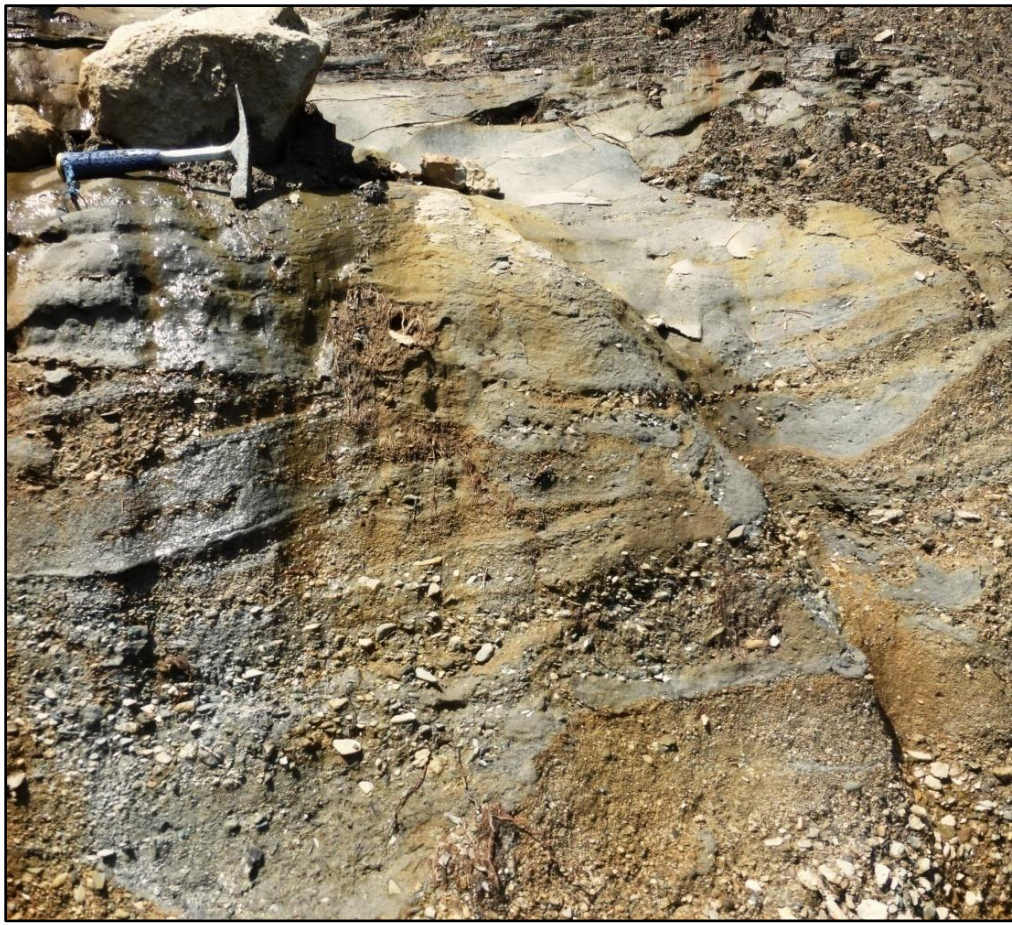
Age?

Upper age-limit: 11 Ma



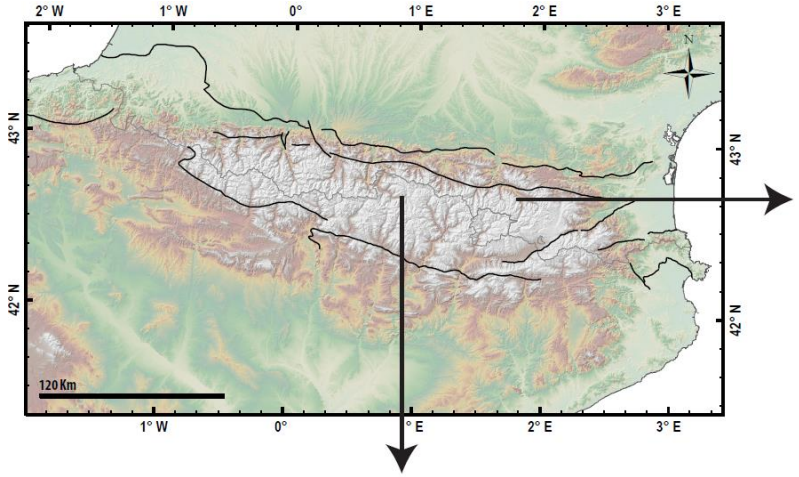


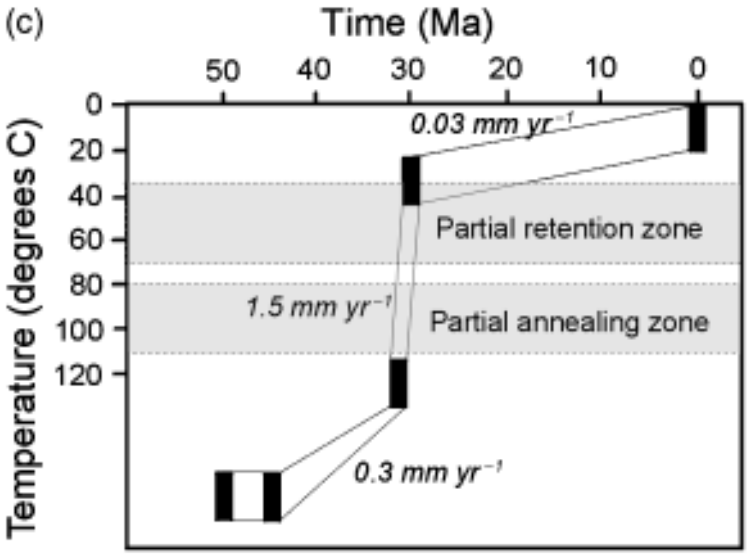
De Sitter, 1953



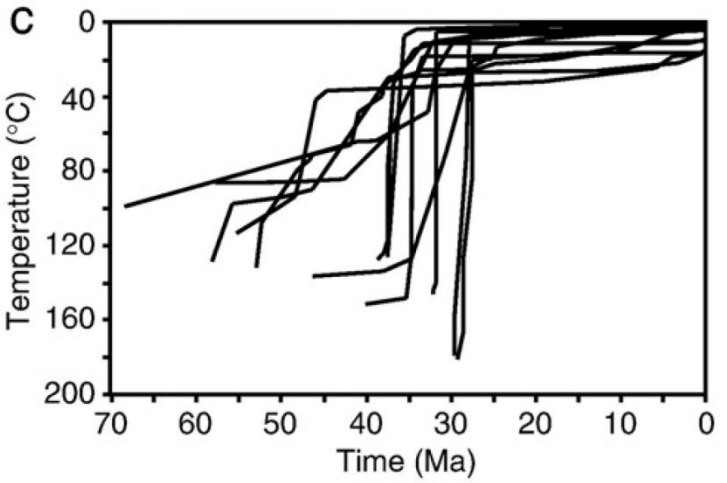
Lower age-limit: around 30 Ma

Thermochronology (AFT and AHe)

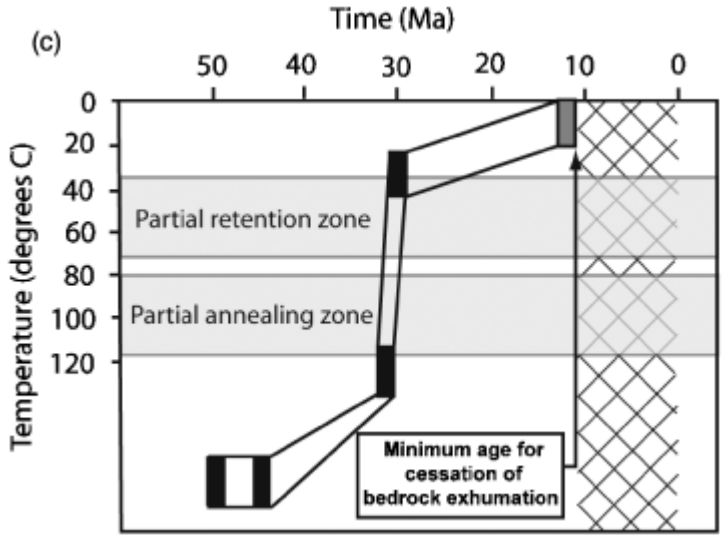




Gibson et al. 2007



Gunnell et al., 2009

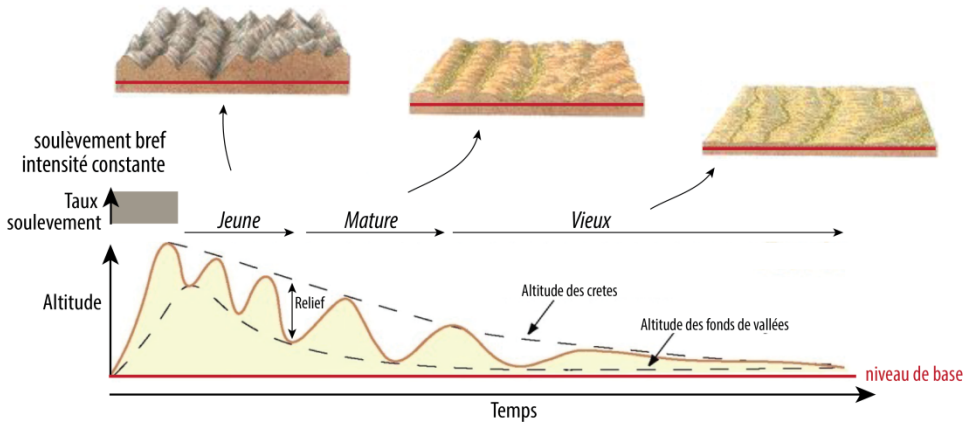


Babault et al. 2009, modified from Gibson et al. (2007)

Origine?

Interprétation classique ("le cycle géographique" (Davis, 1899))

1**. Aplanissement**: érosion à long terme et formation de la pénéplaine



La diminution progressive de l'altitude entraîne celle du potentiel érosif des rivières

Les vallées s'élargissent entrainant le lissage du relief

La source des rivières tend vers leur niveau de base

2**. Soulèvement post-tectonique**:

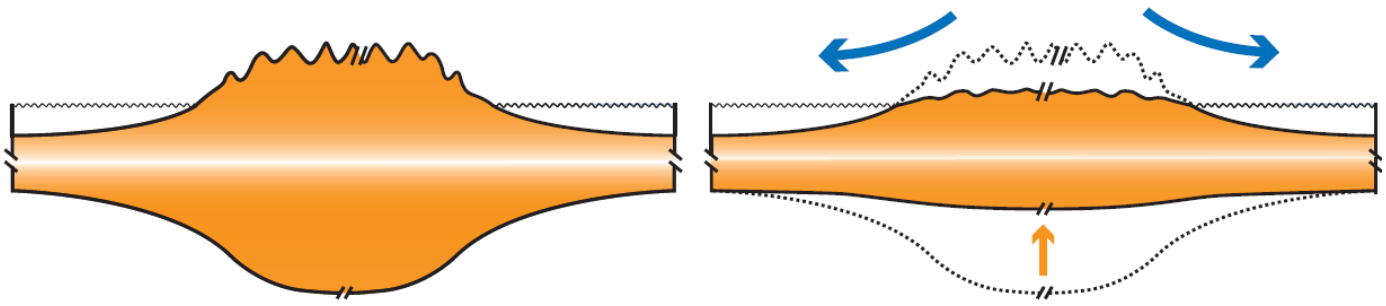
réjuvénation du relief, dissection de la pénéplaine

Les surfaces HE-LR sont les reliques d'une ancienne pénéplaine

Leur altitude correspond à la quantité de soulèvement post-tectonique

Interprétation classique à l'échelle lithosphérique

1. **Aplanissement**: érosion à long terme et formation de la pénéplaine

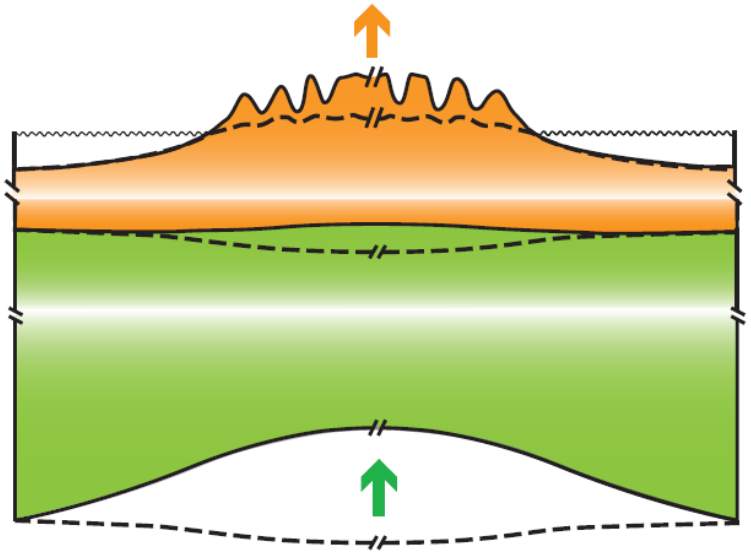


La diminution de l'altitude s'accompagne de
l'élimination de la racine crustale en profondeur

La seule présence d'une épaississement crustal invalide l'interprétation classique
(à moins d'envisager une densité crustale anormalement élevée
Proche de celle du manteau lithosphérique)

Interprétation classique à l'échelle lithosphérique

1**. Soulèvement post-tectonique**:
réjuvénation du relief, dissection de la pénéplaine



La seule façon d'entraîner un soulèvement de la pénéplaine *sans la déformer* est d'amincir le manteau lithosphérique

Tout épaississement crustal nécessiterait un raccourcissement conséquent
et une déformation de la surface de pénéplanation
au même titre que celle de couches de sédiments

L’interprétation classique dans le cas des Pyrénées

Une montagne en voie d'aplanissement :
au début du Néogène il n'y avait plus de Pyrénées…

Marc Calvet, Toulouse 2011

Les plas du Campcardos et au fond le Carlit

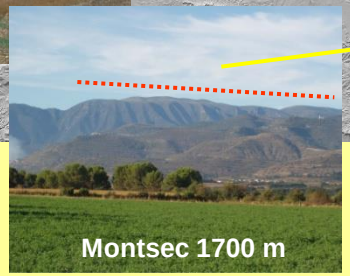
Marc Calvet, Toulouse 2011

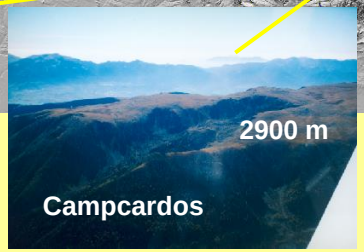
À l'ouest aussi…

Au centre: des plans sur les marges plissées; une haute chaîne jamais arasée?

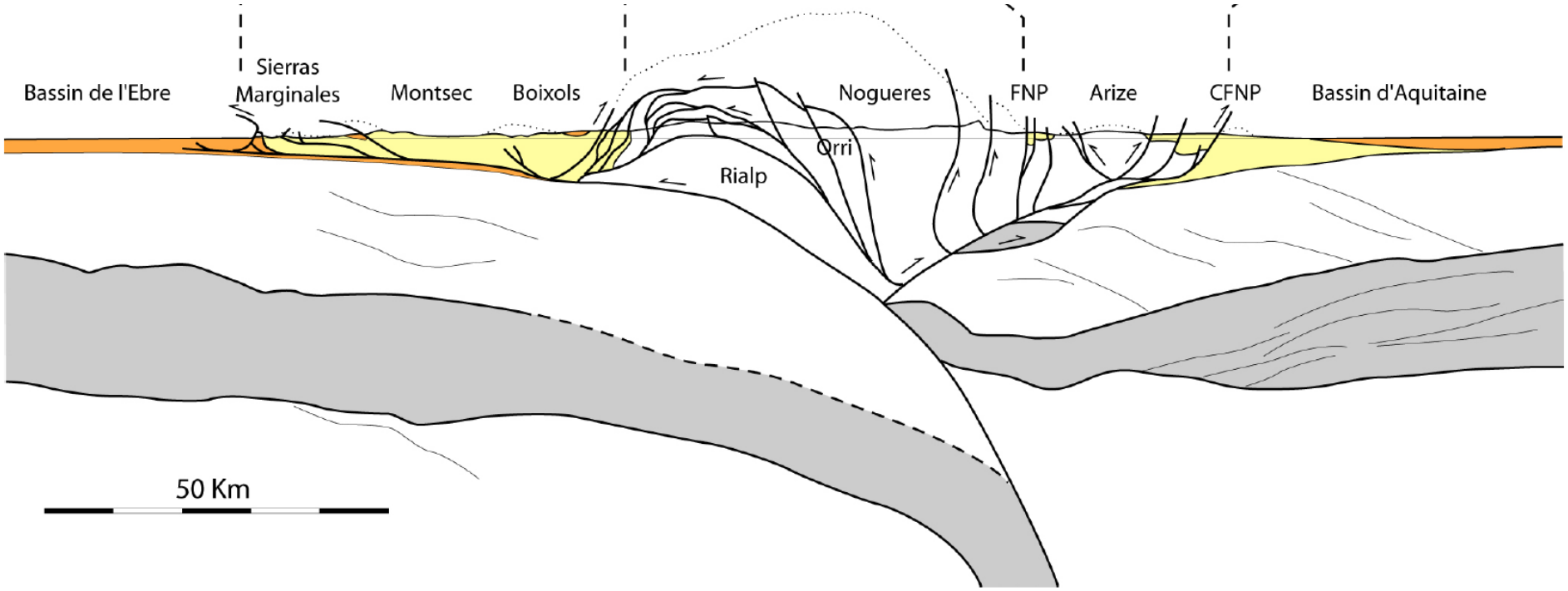
À l'est des aplanissements généralisés,des Prépyrénées à la Haute chaîne axiale

?





Interprétation alternative:
le développement en altitude de la pénéplaine pyrénenne
(Babault et al. 2005)



Modifié d'après Roure et al.1989 et Beaumont et al. 2000

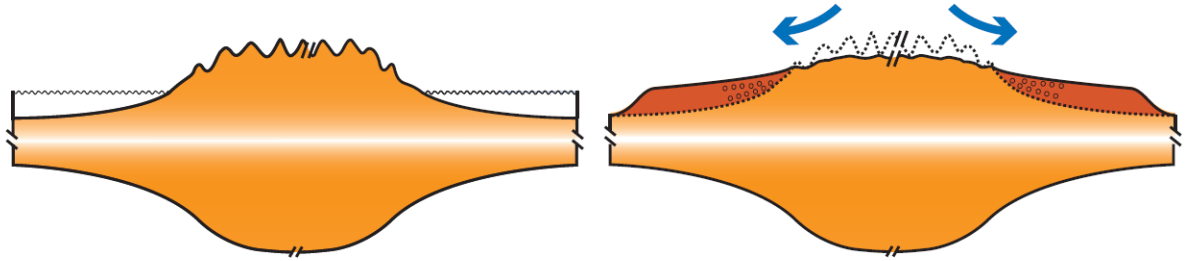
Interprétation alternative:
le développement en altitude de la pénéplaine pyrénenne (Babault et al. 2005)

Interprétation alternative:

Le développement en altitude de la pénéplaine pyrénenne (Babault et al. 2005)

La remontée du niveau de base efficace des rivières

(conditions aux limites de la chaine et climat)



L'aggradation des sédiments détritiques au pied de la chaîne traduit:

la diminution de la capacité des rivières à exporter les sédiments

la diminution progressive de leur potentiel érosif

la remontée de leur niveau de base des rivières

Le niveau de base des rivières tend vers l'altitude de leur source!

Les surfaces HE-LR sont les reliques d'une ancienne pénéplaine qui s'est développée en altitude

La racine crustale est préservée

Surfaces à haute altitude et faible relief : reliques d'une pénéplaine pyrénéenne miocène

- Modèle 1 : soulèvement post-miocène
  Erosion de la racine crustale
  changement de densité en profondeur post-miocène
  "érosion" du manteau lithosphérique

- Modèle 2 : haute altitude acquise dès le miocène
  Conservation de la racine crustale

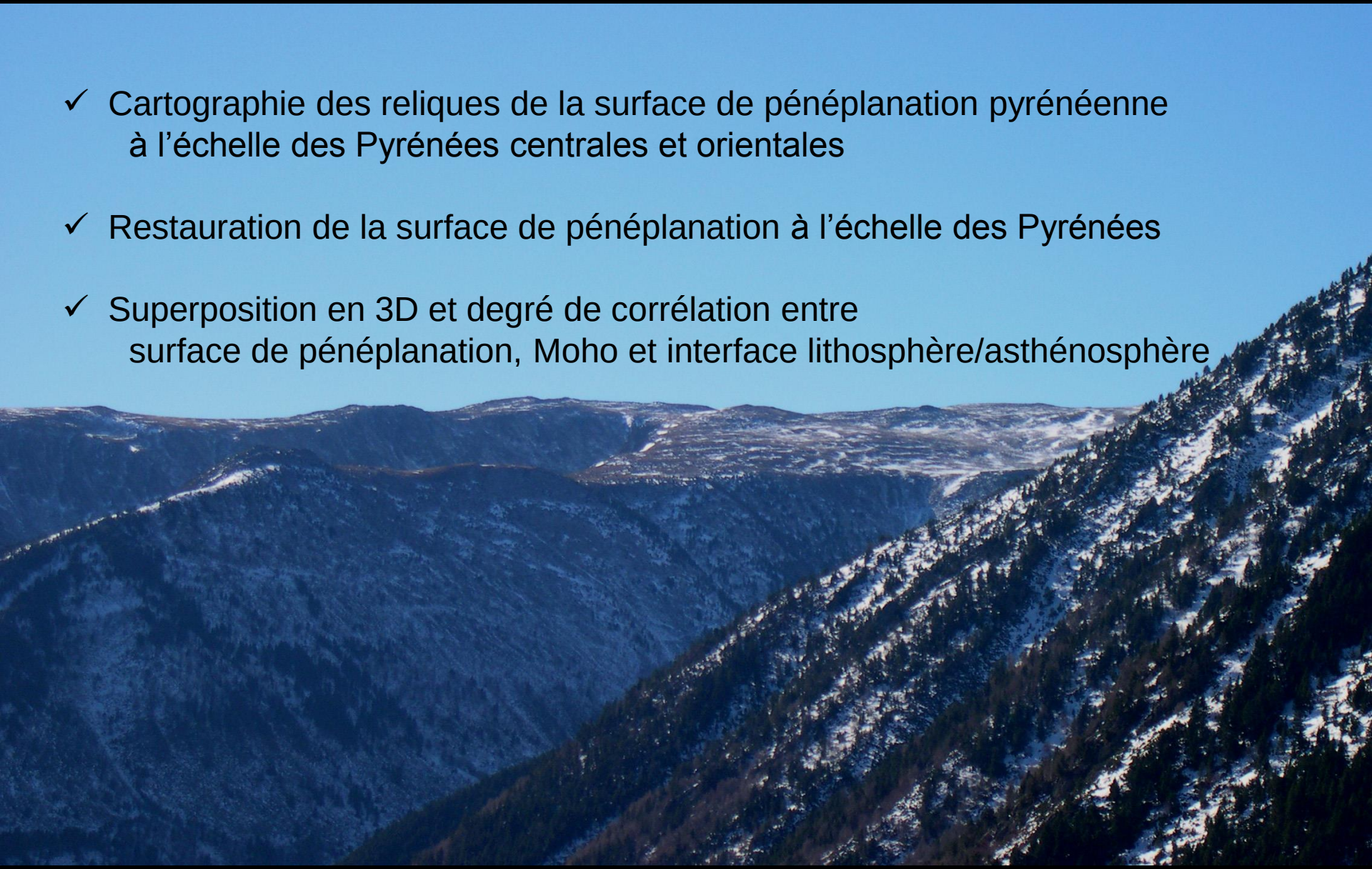
➢ Modèle 1 appliqué aux Pyrénées orientales :
L'altitude des surfaces est contrôlée par la limite lithosphère/asthénosphère et indépendante de la topographie du Moho

➢ Modèle 2 appliqué aux Pyrénées centrales et orientales :
*L'altitude des surfaces est contrôlée par la topographie du M*oho

Existe-il une dualité entre Pyrénées orientales et le reste des Pyrénées ?

Quelle est l'extension de ces surfaces à l'échelle des Pyrénées?

Les objectifs



- ✓ Cartographie des reliques de la surface de pénéplanation pyrénéenne à l'échelle des Pyrénées centrales et orientales
- ✓ Restauration de la surface de pénéplanation à l'échelle des Pyrénées
- ✓ Superposition en 3D et degré de corrélation entre surface de pénéplanation, Moho et interface lithosphère/asthénosphère

Méthodologie

Compilation bibliographique des cartes géomorphologiques des Pyrénées

→ **Terrain + observations Google Earth**

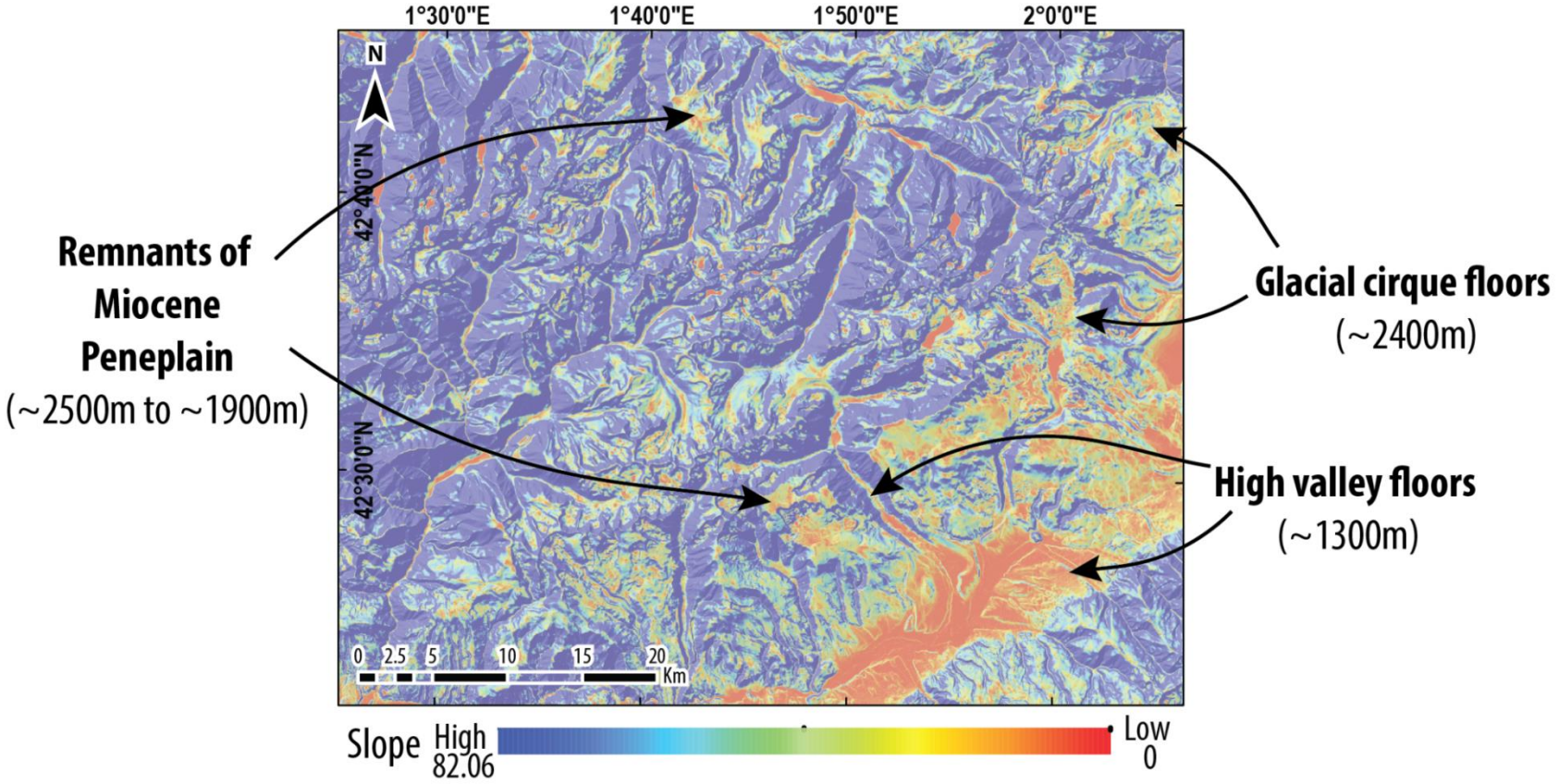
→ Détermination des **paramètres numériques** qui **différencient** les **reliques de pénéplaine** du reste des formes du relief

→ **Extension de la cartographie locale à l'échelle de la chaîne**

→ **Validation terrain**

Caractéristiques numériques des reliques

Comment cartographier automatiquement des surfaces reliques à très **faible pente** situées à **haute altitude**?
Application de deux filtres calculés à partir du MNT: **la pente** et **l'altitude**



On ne peut pas différencier le fond des cirques glaciaires et des hautes vallées
des reliques de la pénéplaine pyrénéenne

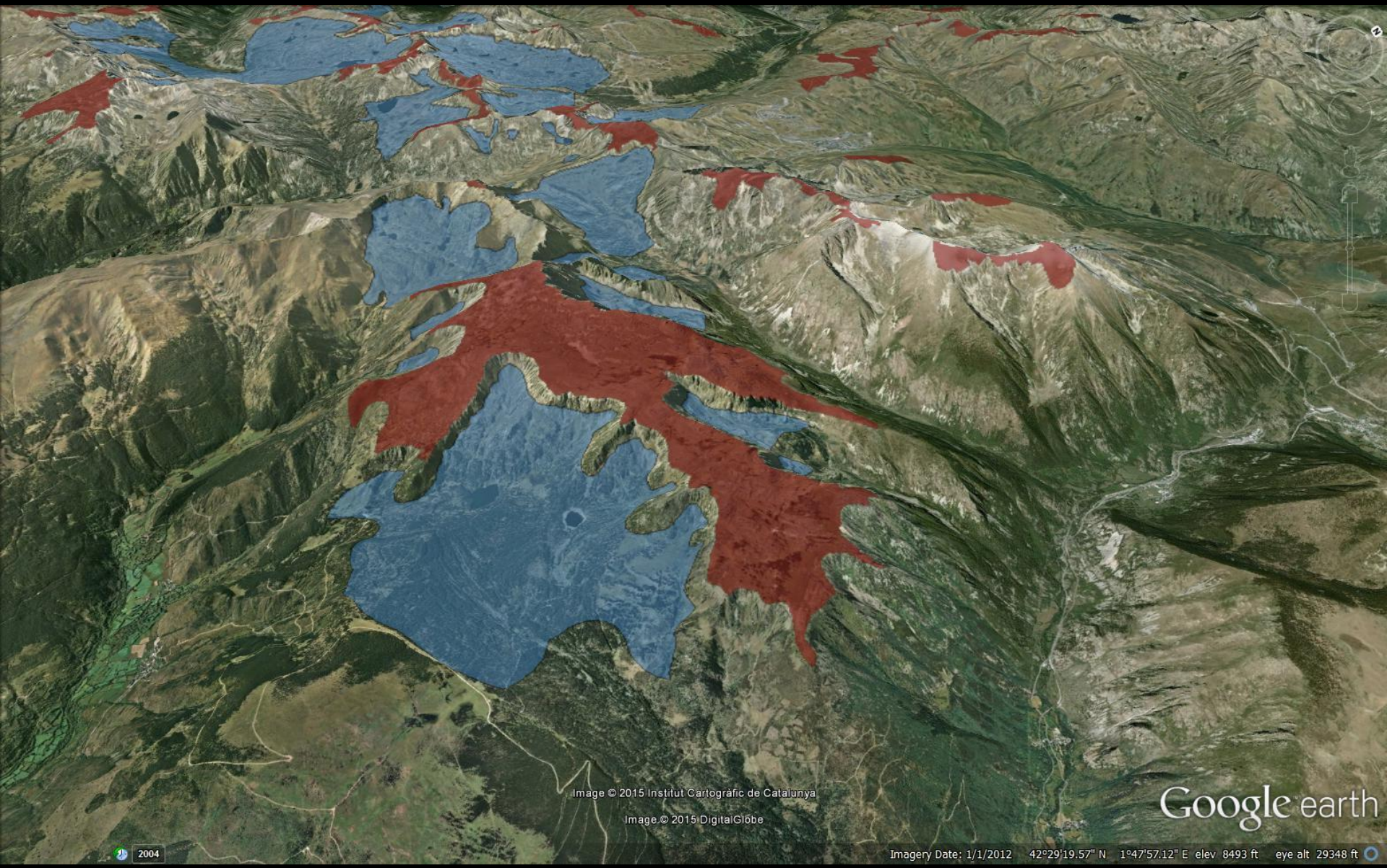
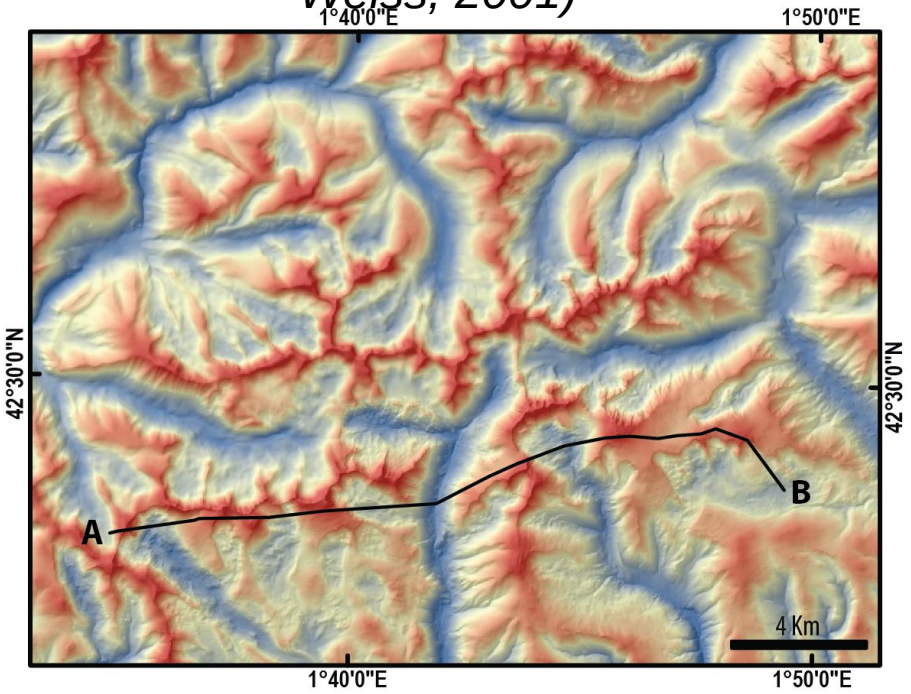


Image © 2015 Institut Cartogràfic de Catalunya
Image © 2015 DigitalGlobe
Google earth
2004
Imagery Date: 1/1/2012 42°29'19.57" N 1°47'57.12" E elev 8493 ft eye alt 29348 ft

Caractéristiques numériques des reliques

Topographic Position Index *(e.g. Weiss, 2001)*

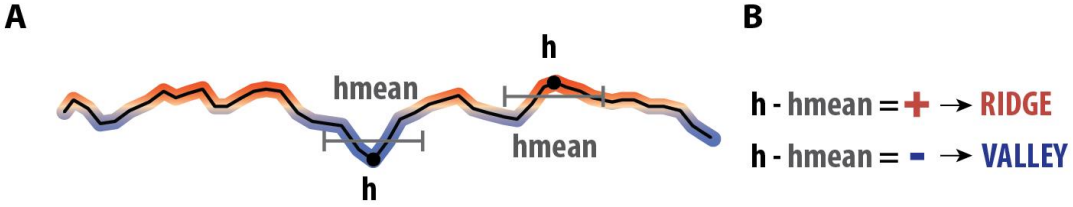


Déviation par rapport à l'altitude moyenne (*dev*)

(Galland et Wilson, 2000; De Reu et al.2013)

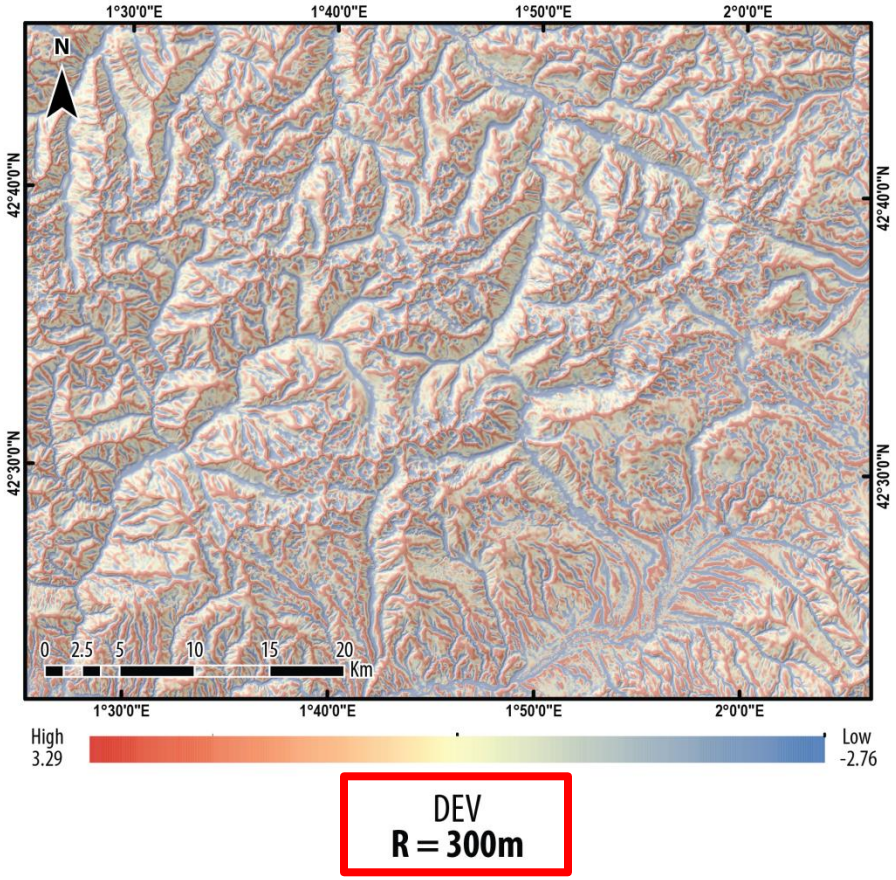
***dev* = TPI (R) / Std (R)**

Permet de différencier les **reliques de la pénéplaine pyrénéenne, du fond** des **cirques glaciaires** et du **fond des hautes vallées**

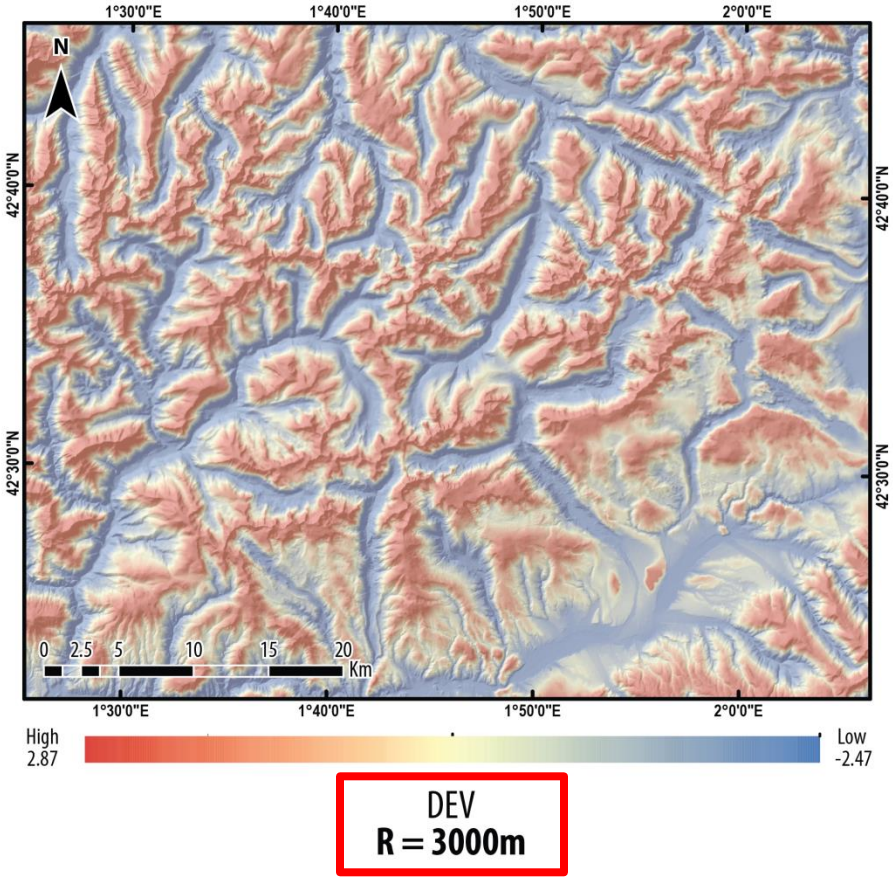


Caractéristiques numériques des reliques

Deviation from mean elevation (*dev*)



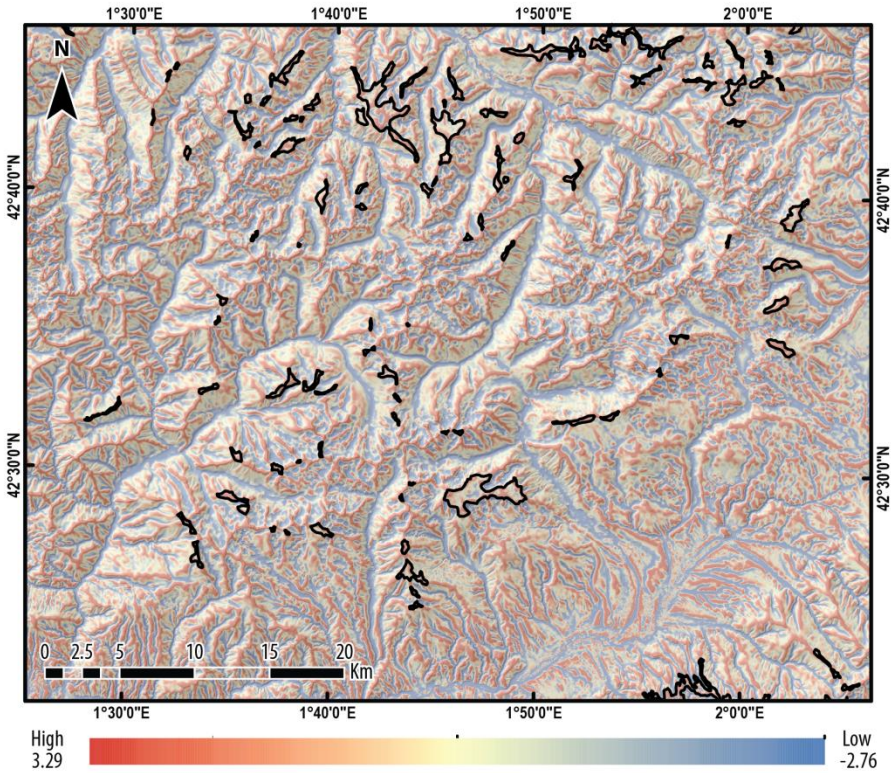
DEV
R = 300m



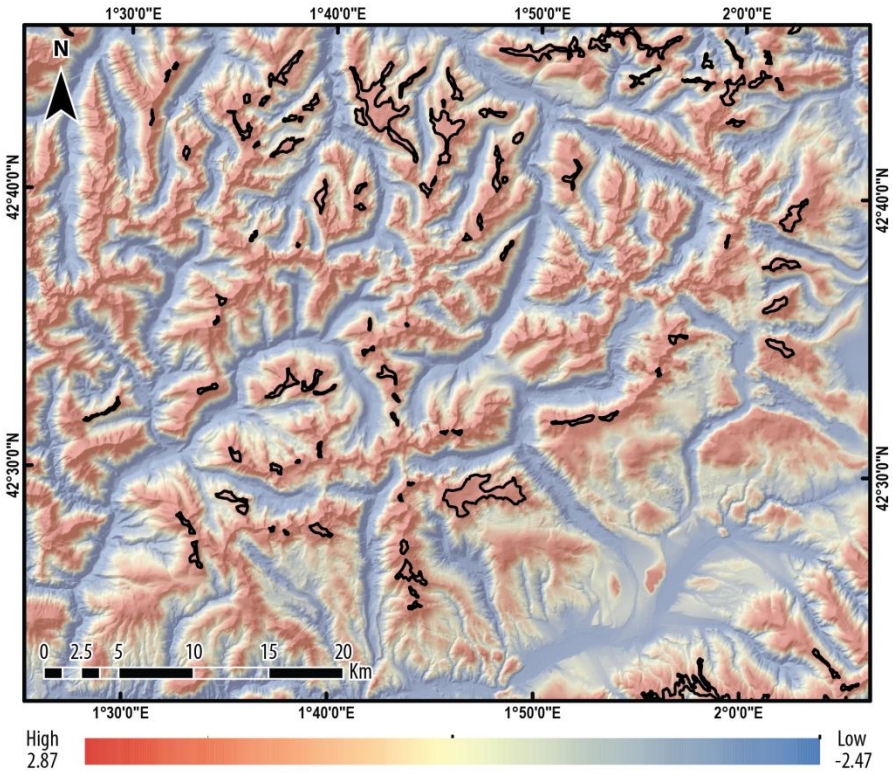
DEV
R = 3000m

Caractéristiques numériques des reliques

Deviation from mean elevation (*dev*)



DEV
R = 300m

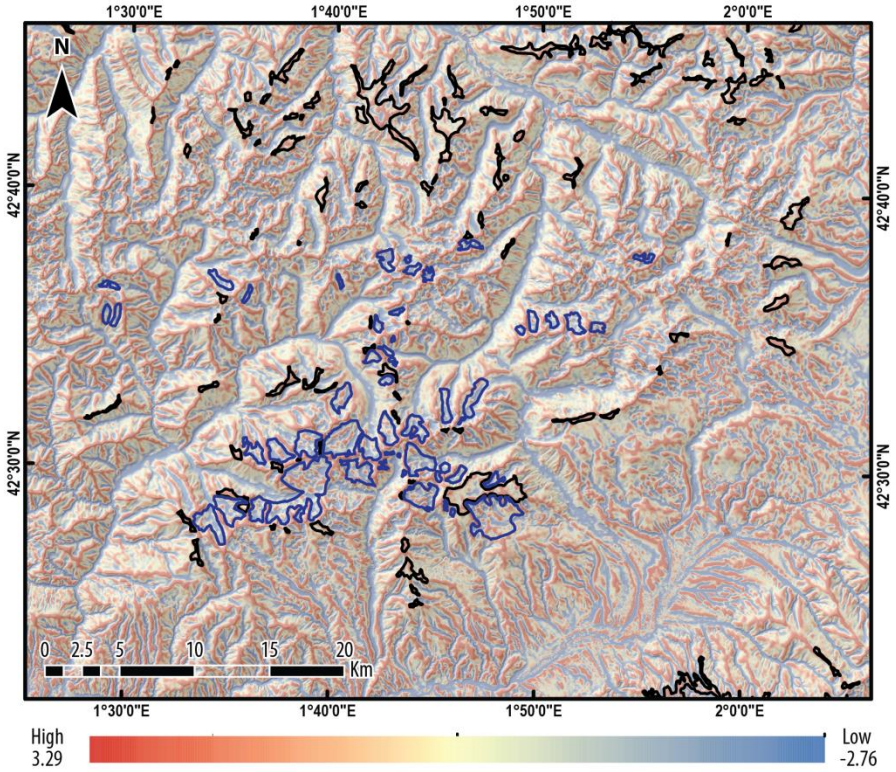


DEV
R = 3000m

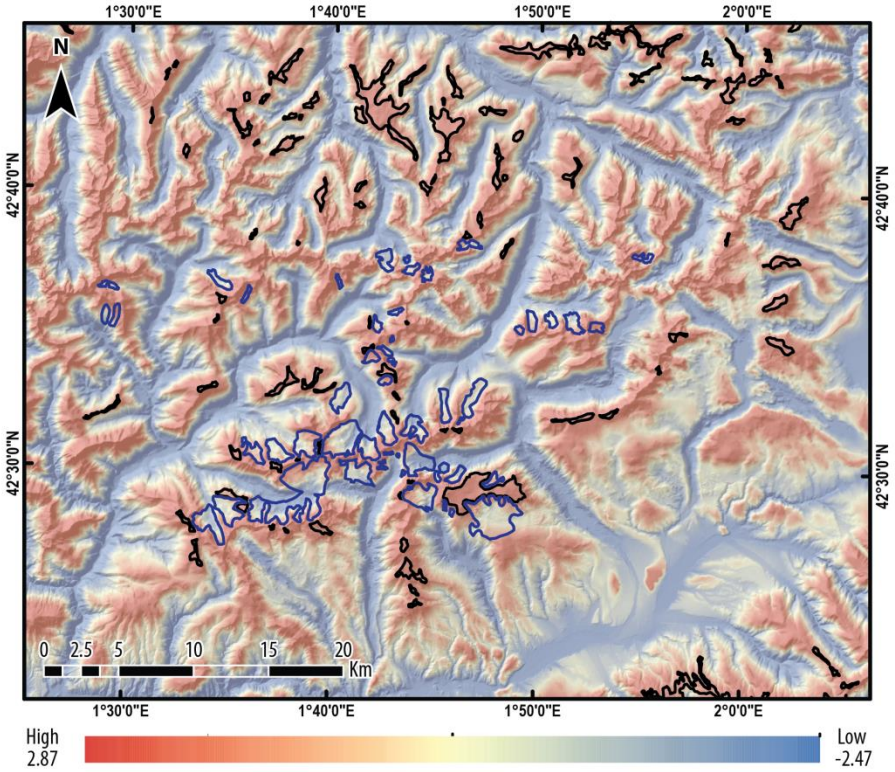
Reliques pénéplaine Pyrénéenne

Caractéristiques numériques des reliques

Deviation from mean elevation (*dev*)



DEV
R = 300m

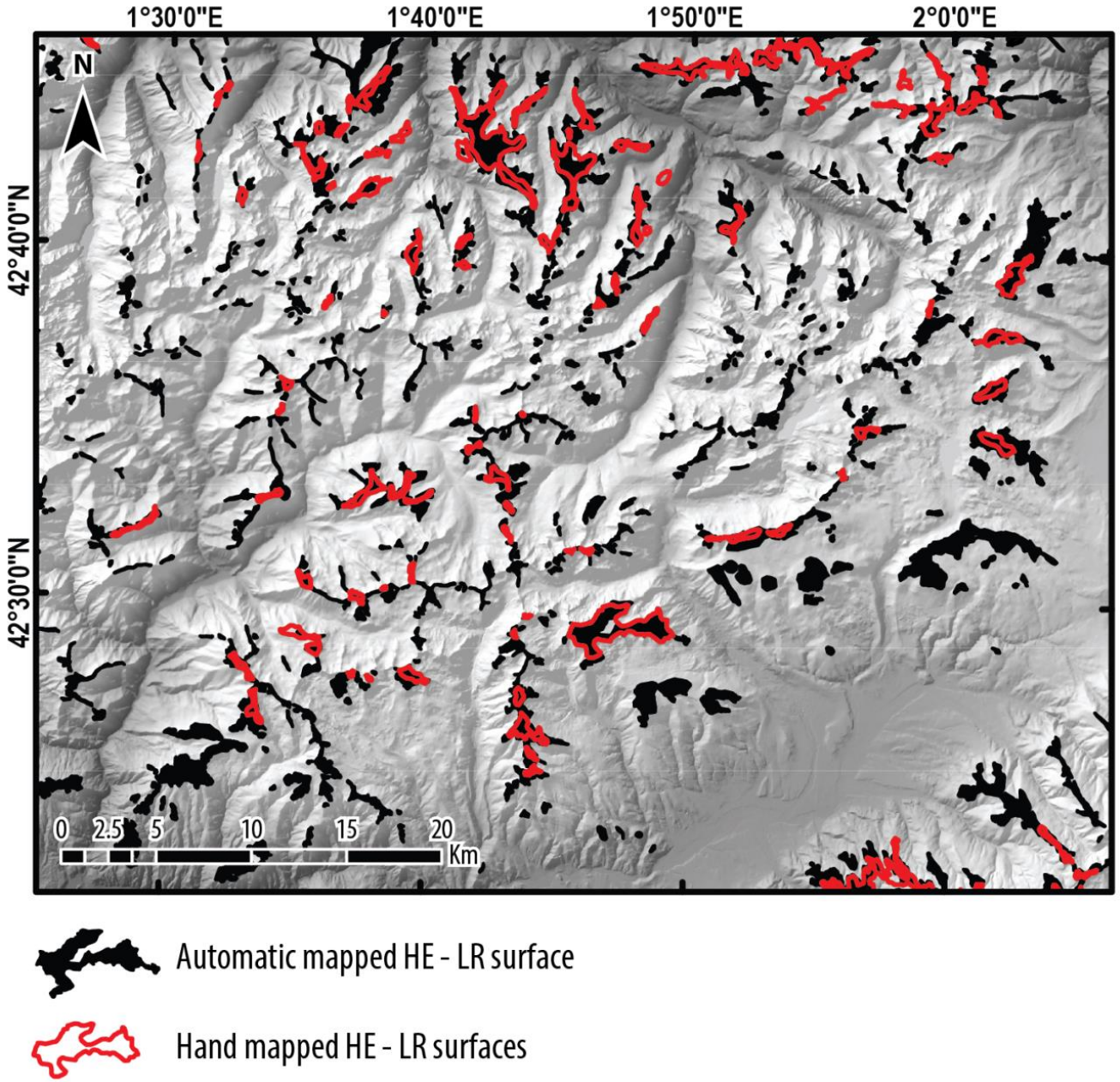


DEV
R = 3000m

Reliques pénéplaine Pyrénéenne

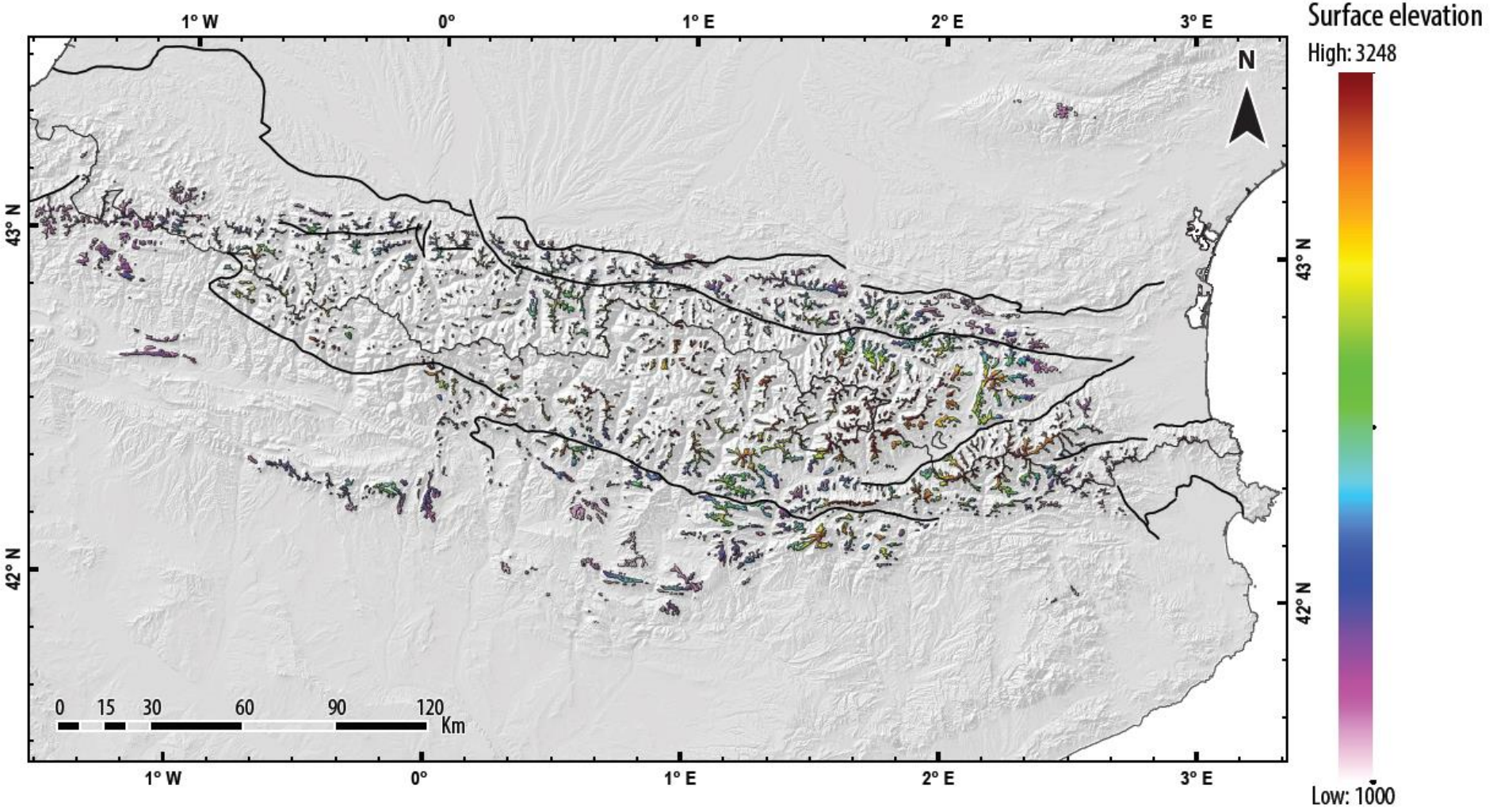
Cirques glaciaires

Méthode de cartographie : résultats



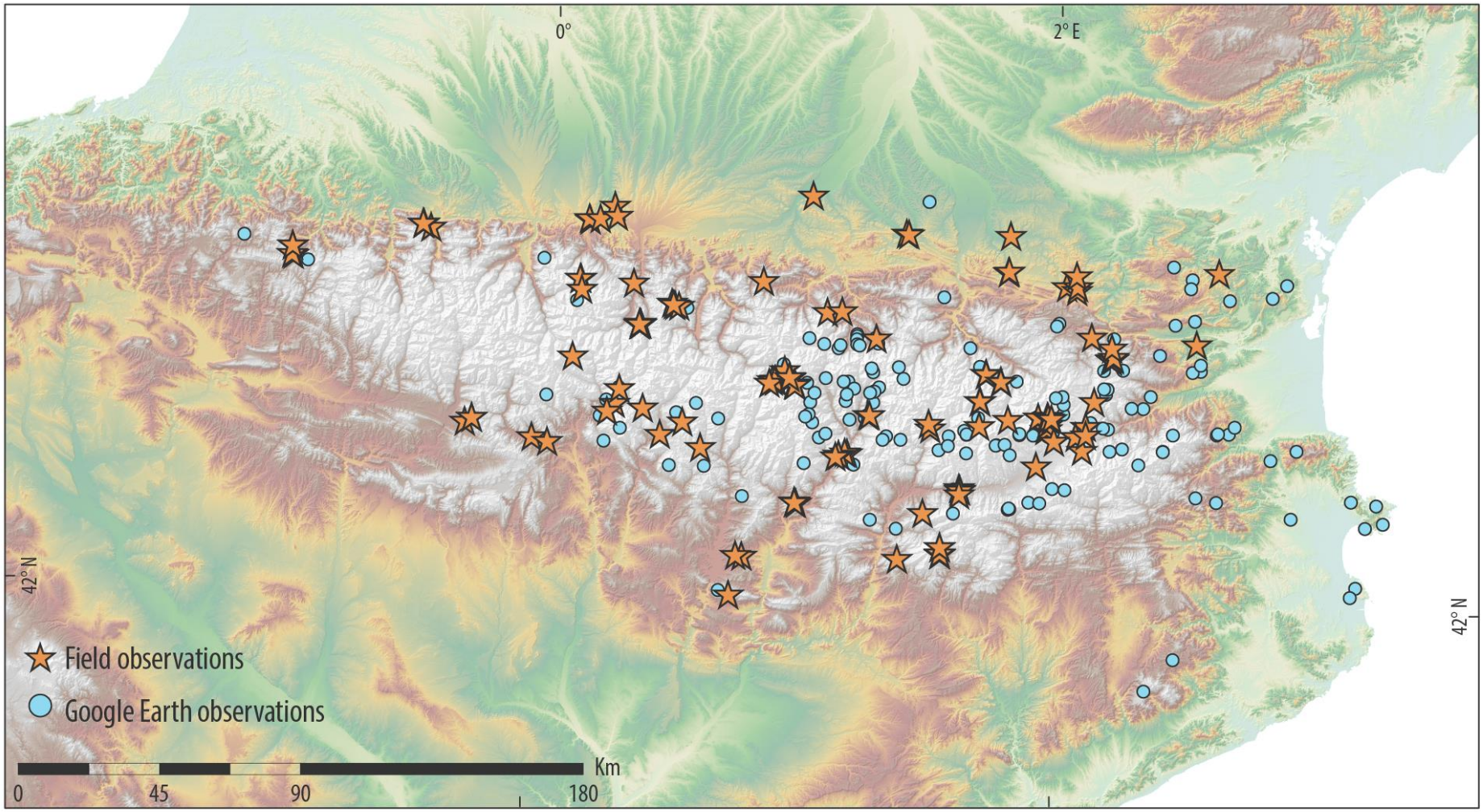
Methodologie de cartographie des reliques de la pénéplaine

Resultat

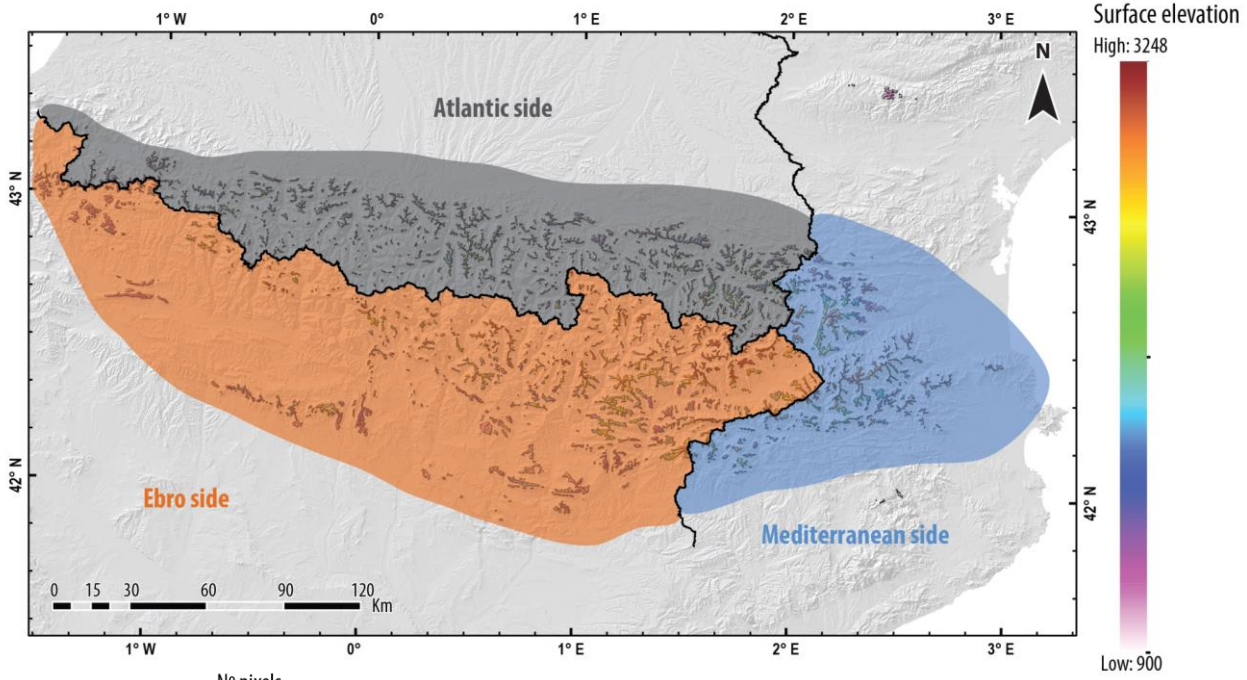


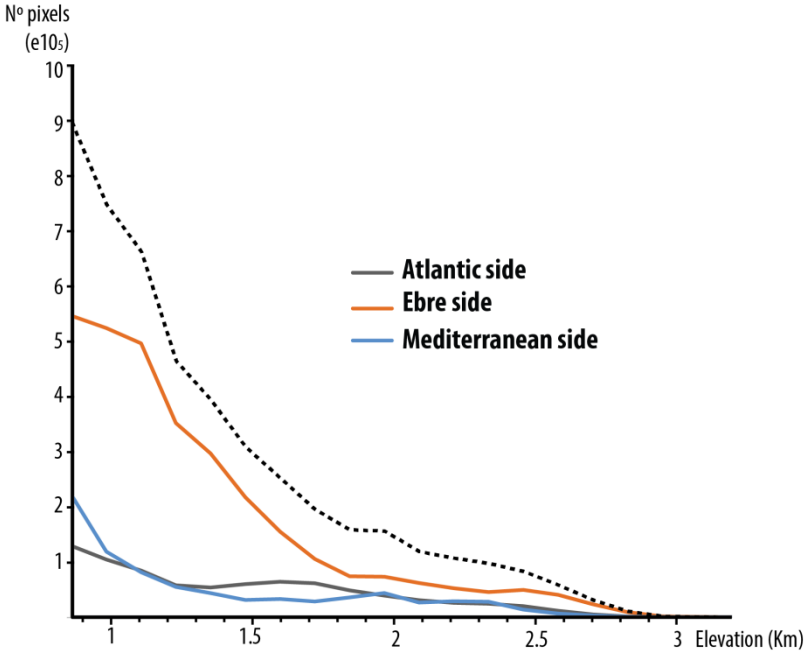
Methodologie de cartographie des reliques de la pénéplaine

Validation sur le terrain

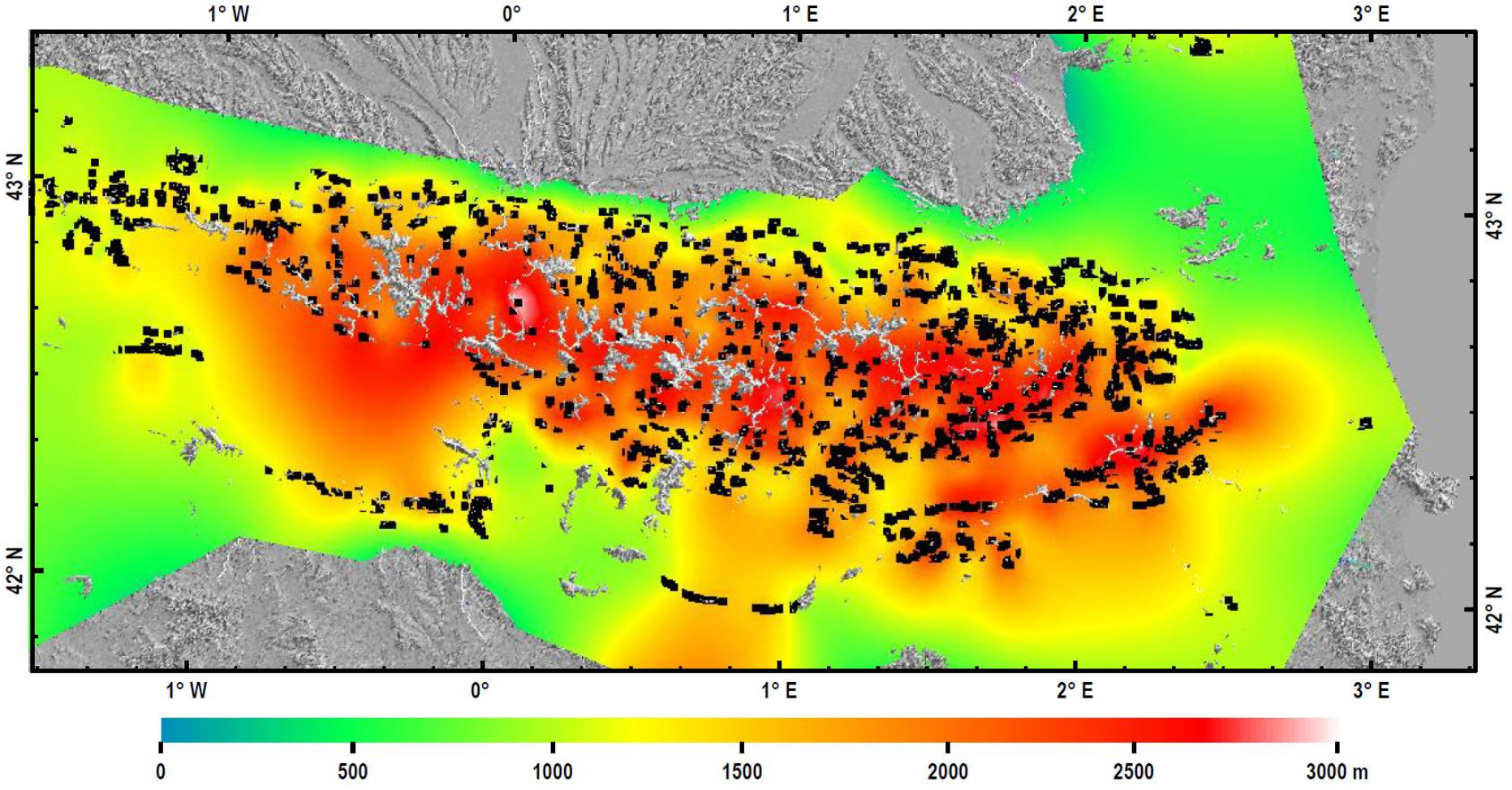


Restauration de la géométrie de la surface de pénéplanation dans les Pyrénées au Miocène moyen (~ 10 Ma)


1° W
0°
1° E
2° E
3° E
N
Atlantic side
43° N
42° N
Ebro side
Mediterranean side
0 15 30 60 90 120
Km
Surface elevation
High: 3248
Low: 900

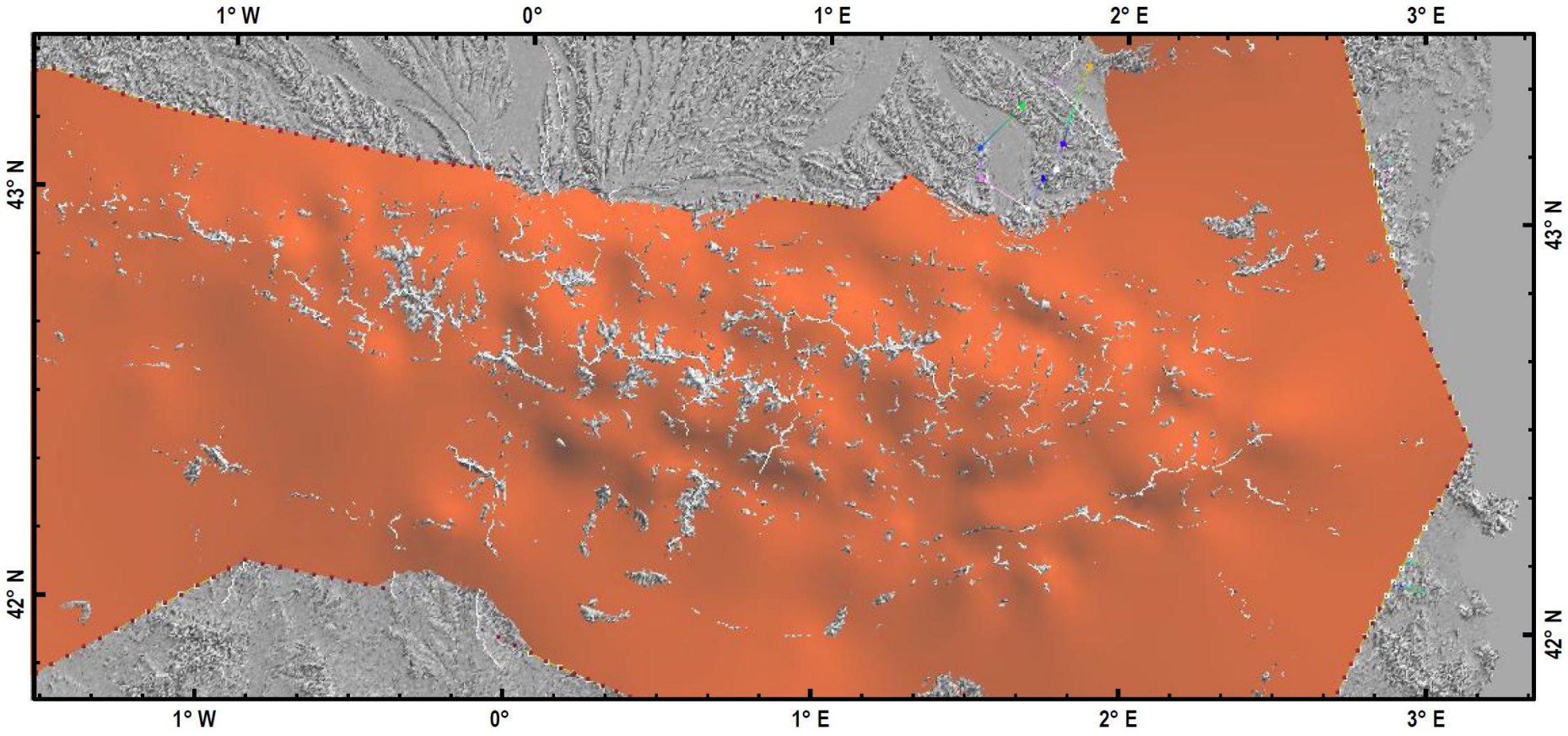

Nº pixels
(e10⁵)
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1
Atlantic side
Ebre side
Mediterranean side
1
1.5
2
2.5
3
Elevation (Km)

Interpolationof the surfaces remnants



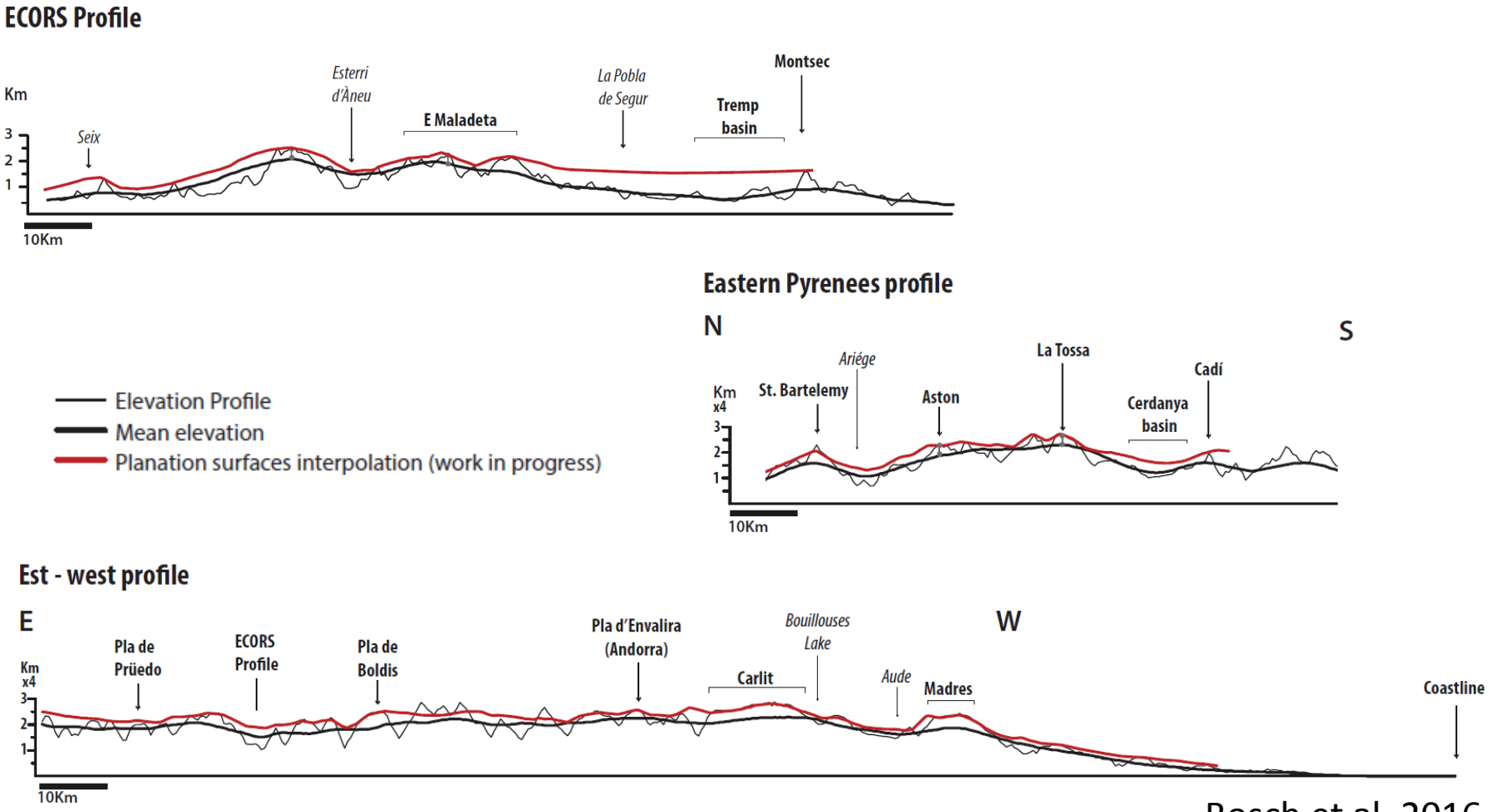
Bosch et al. 2016

Interpolation of the surface remnants



The highly elevated Pyrenean peneplain

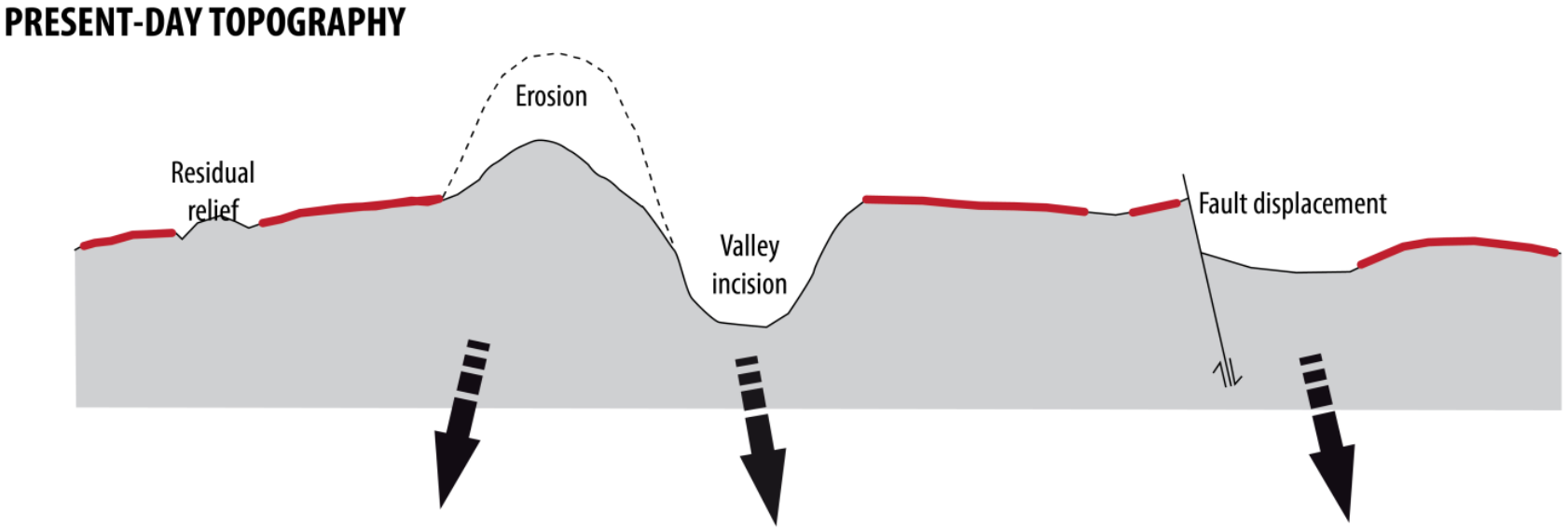
Interpolation of the HE-LR surfaces



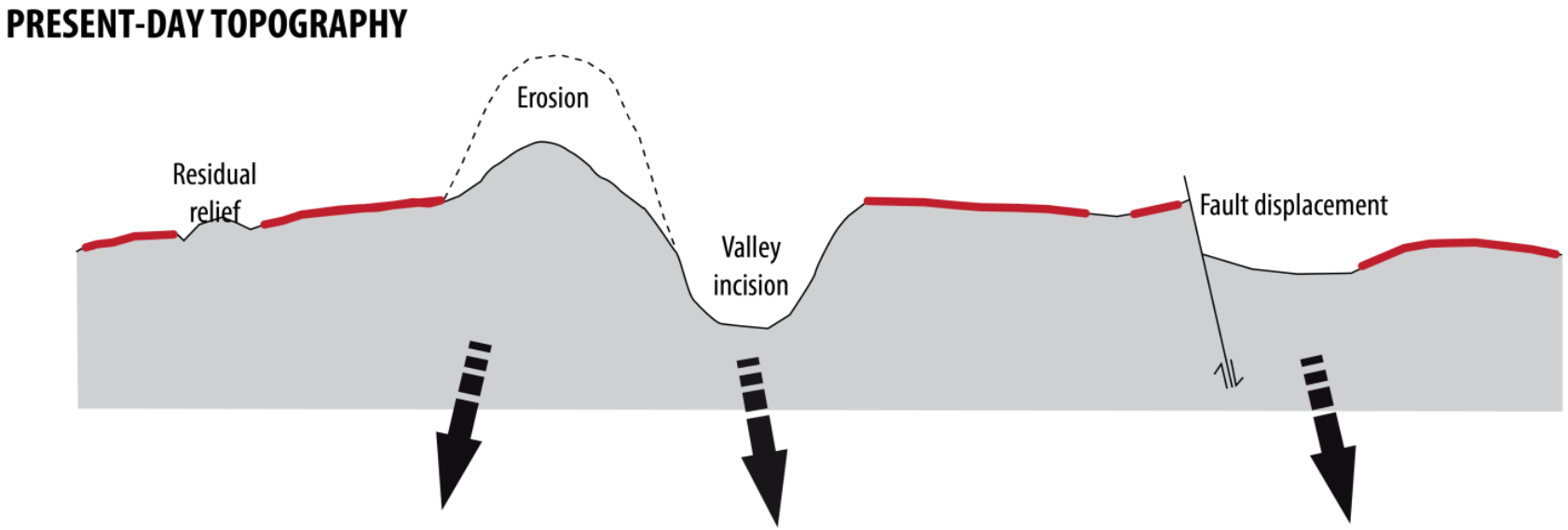
Bosch et al. 2016

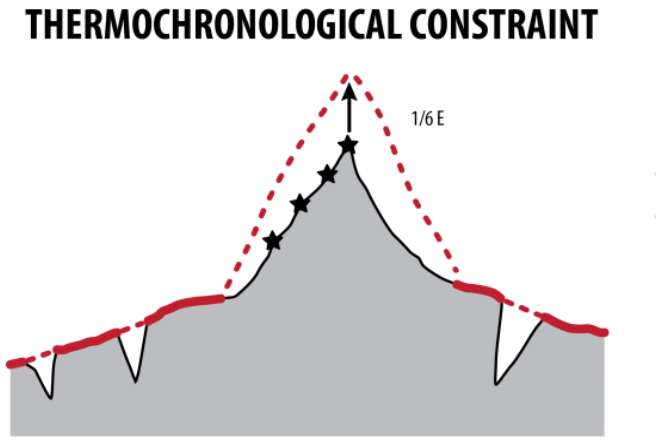
The difference in elevation (~ 450m) between the restored peneplain surface and the mean elevation corresponds to the amount of erosion due to Plio-Quaternary dissection

Méthodologie

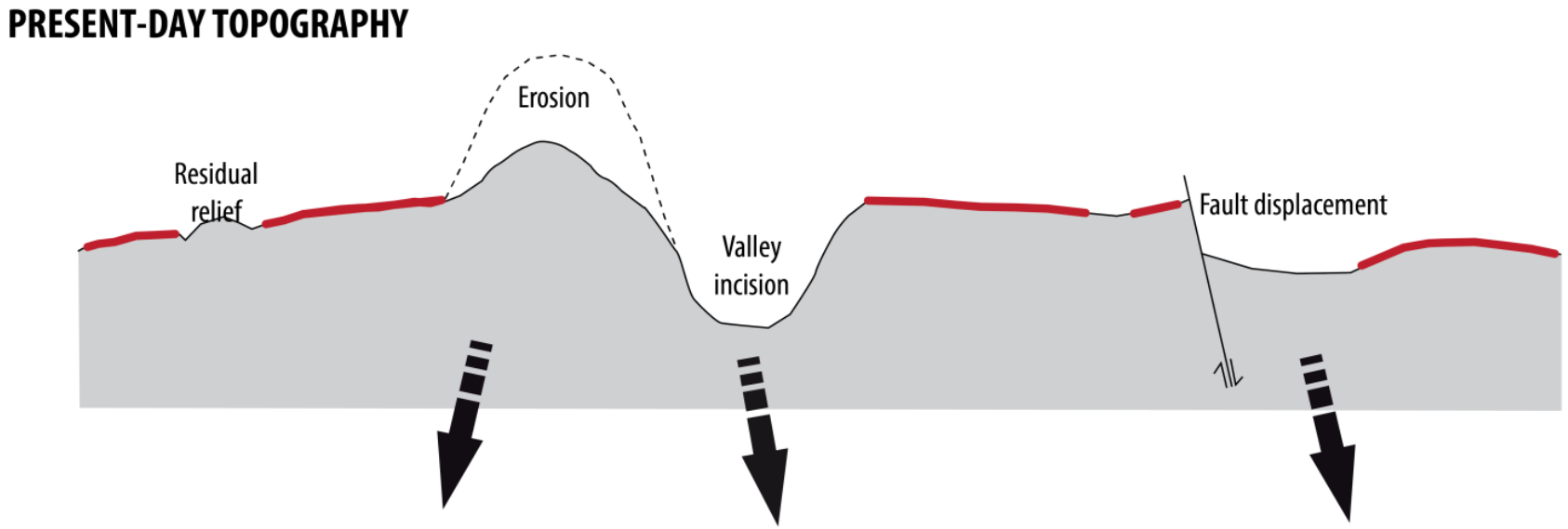


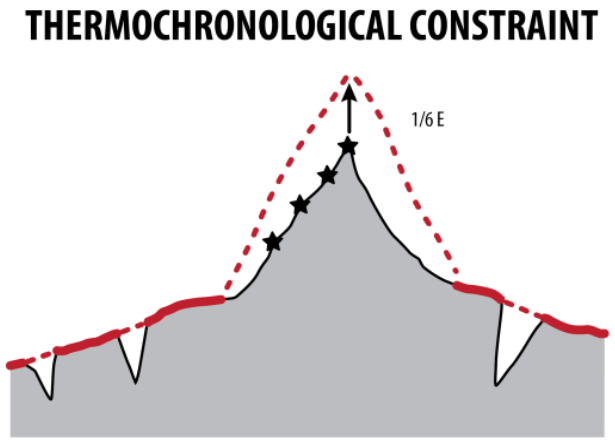
Méthodologie

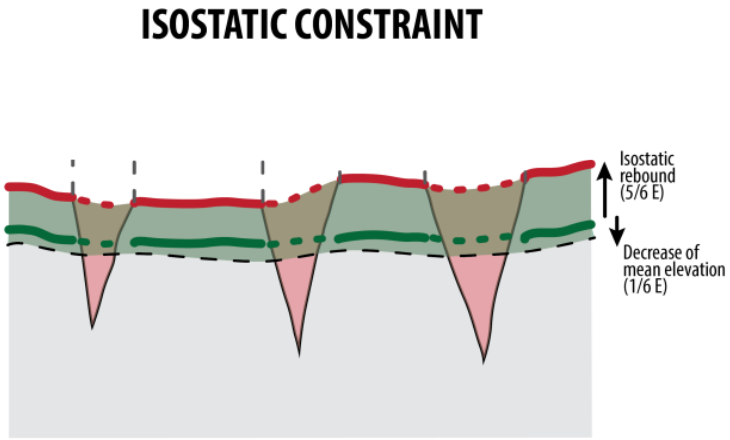




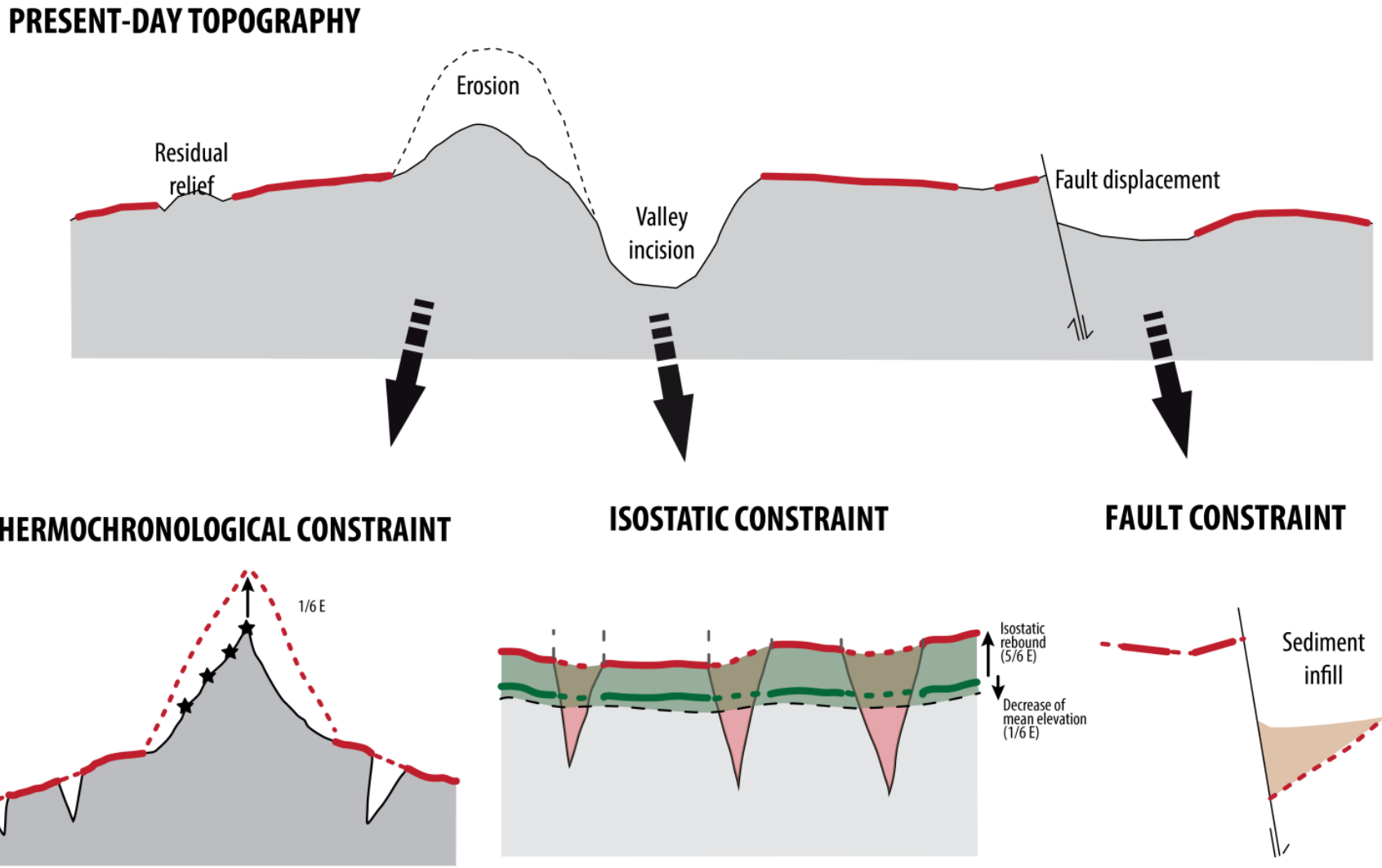
Méthodologie



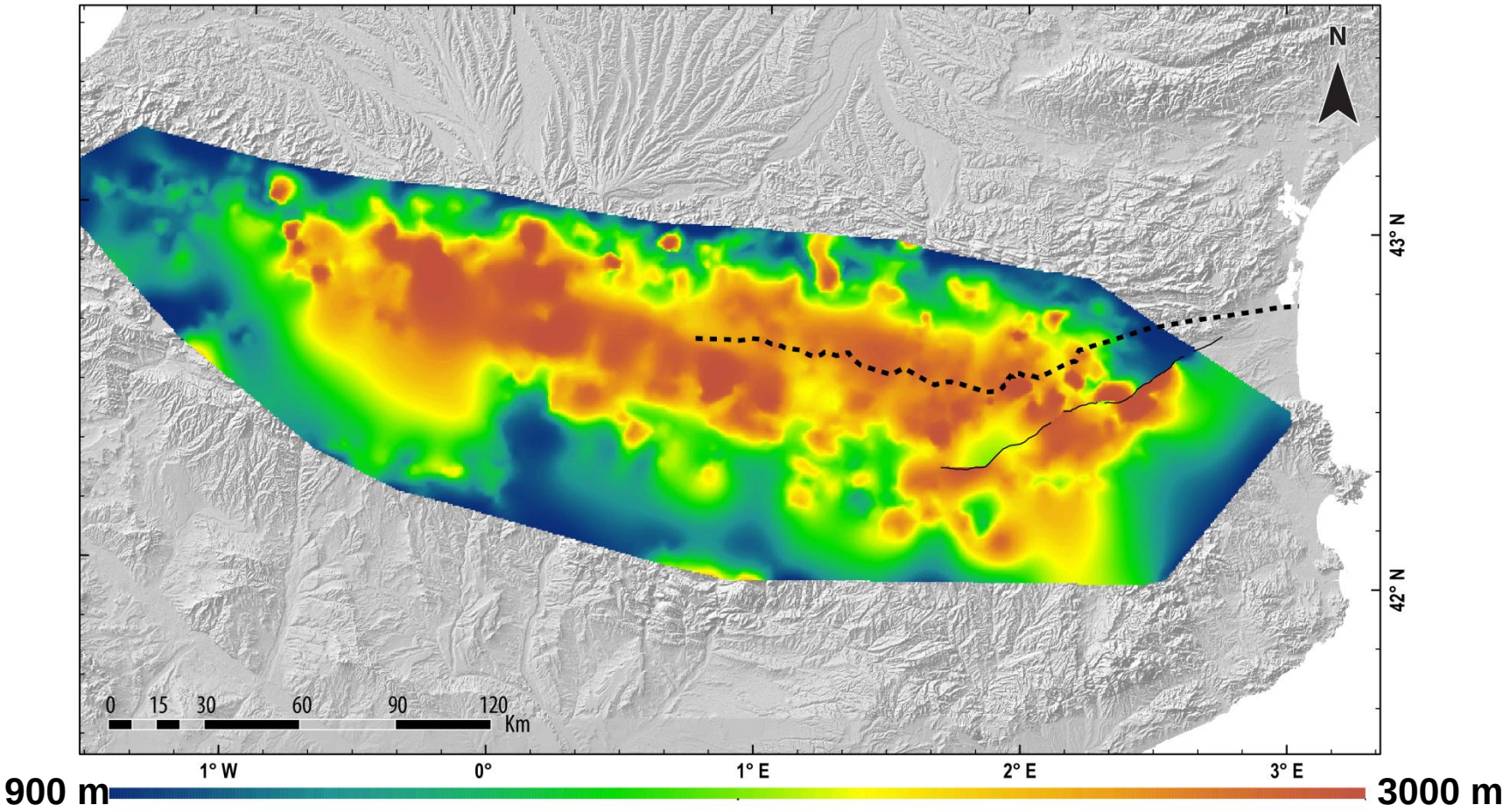


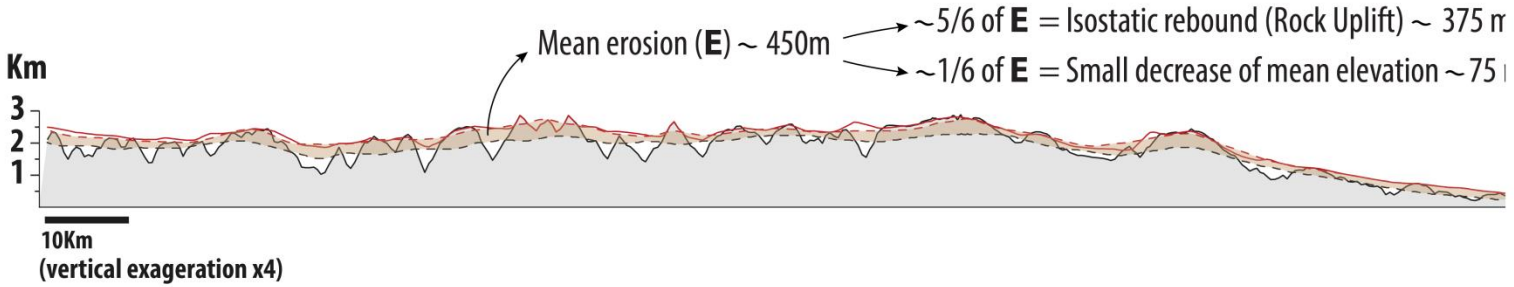


Méthodologie



Restauration de la géometrie de la pénéplaine





Altitude des reliques et structure profonde

Modèle 1D des épaisseurs crustale et lithospherique

Inputs → (*Fullea et al., 2007*) → **Outputs**

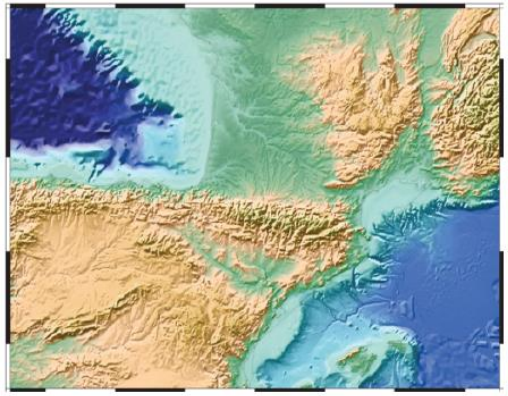
- Isostasie locale
- Equilibre thermique

hypothèse

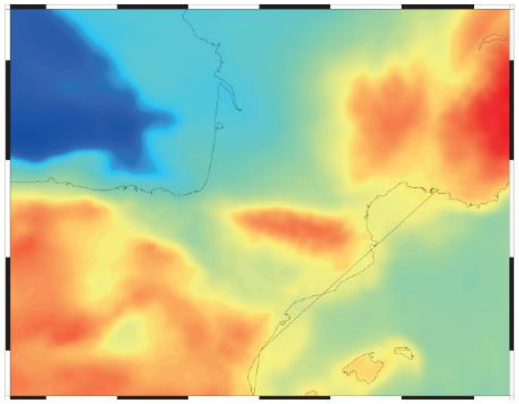
Outputs

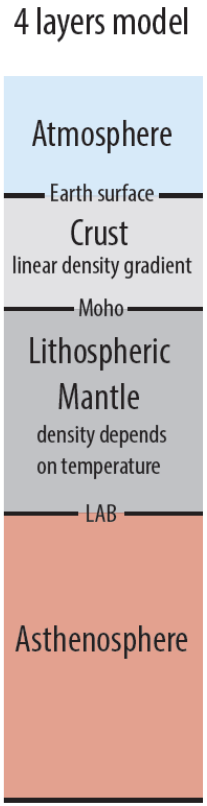
- Z croute
- Z lithosphère

Topographie



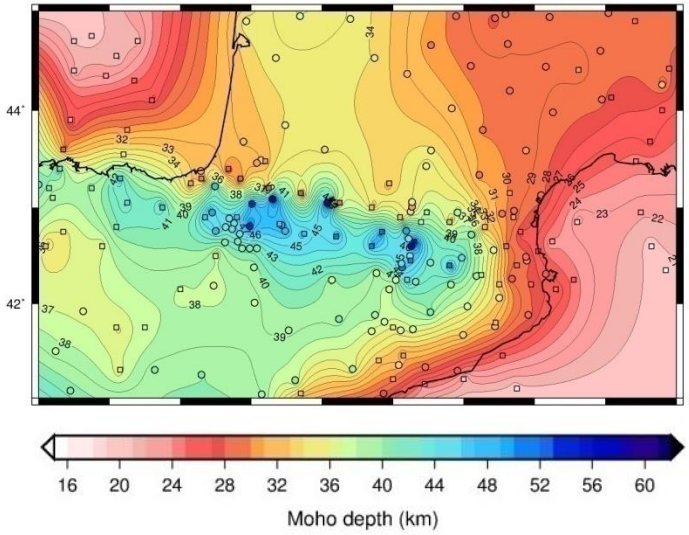
Géoid





Validation hypothèses

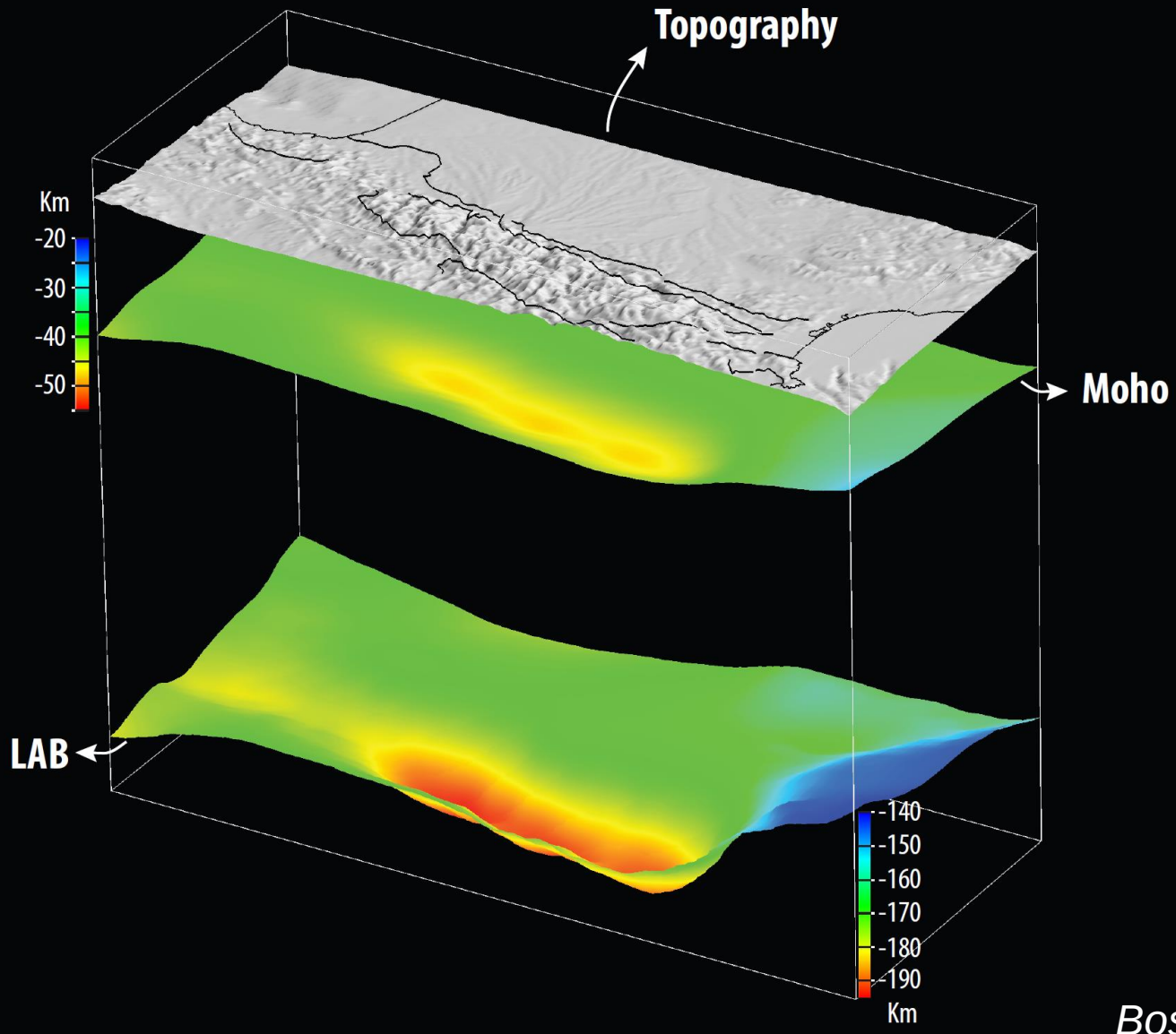
Z croute données sism



Compensation at 400km

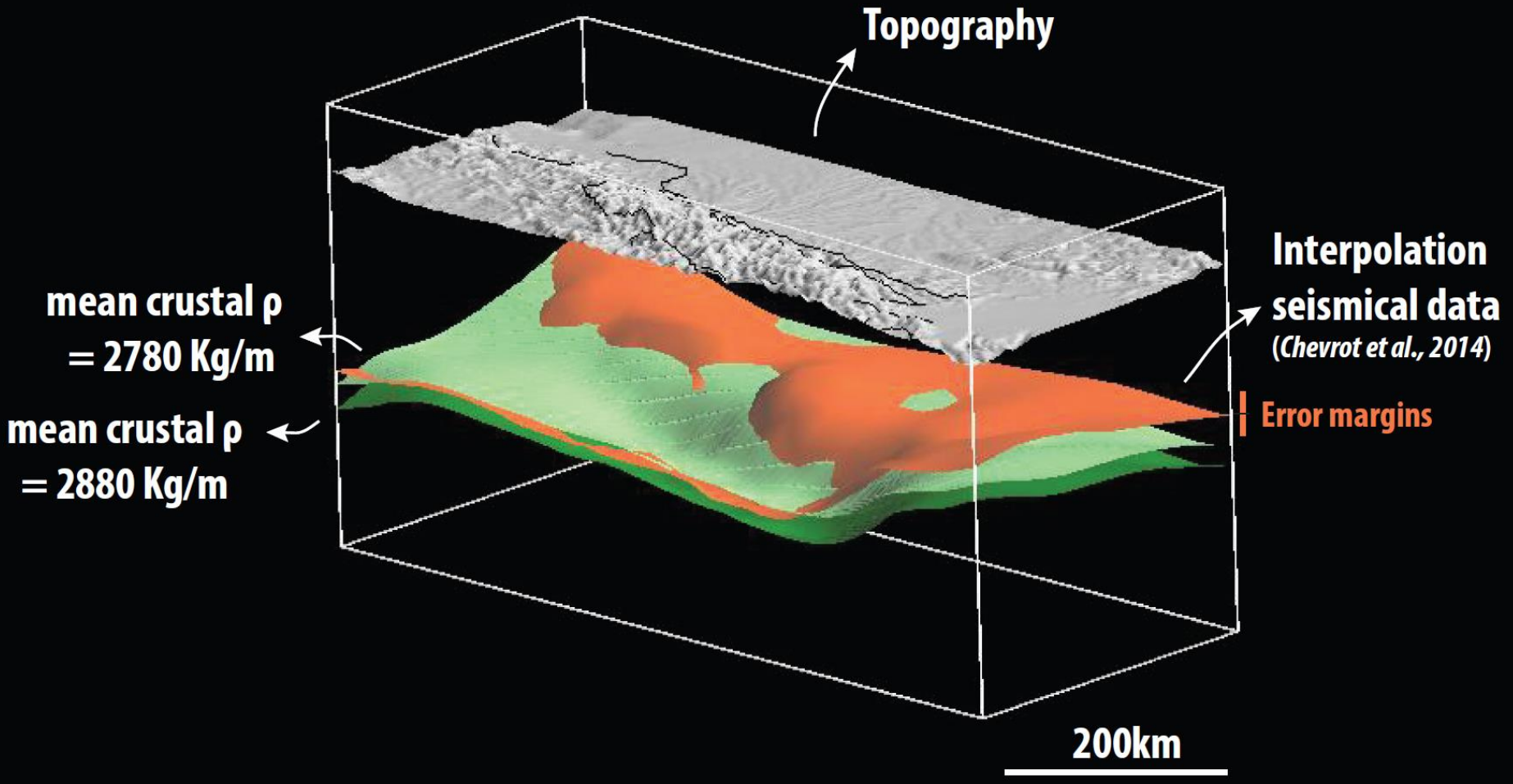
Chevrot et al., (2014)

Epaisseurs crustale et lithosphérique des Pyrénées



Bosch et al., 20

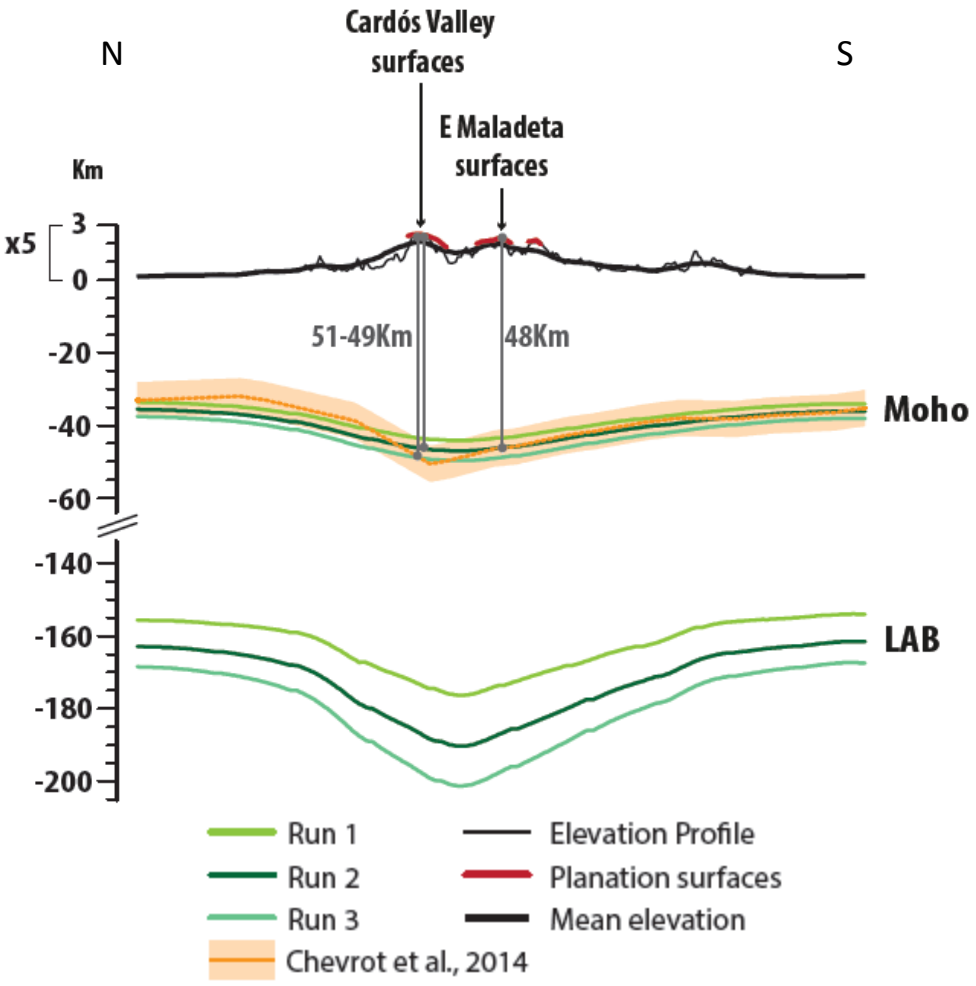
Épaisseur crustale des Pyrénées



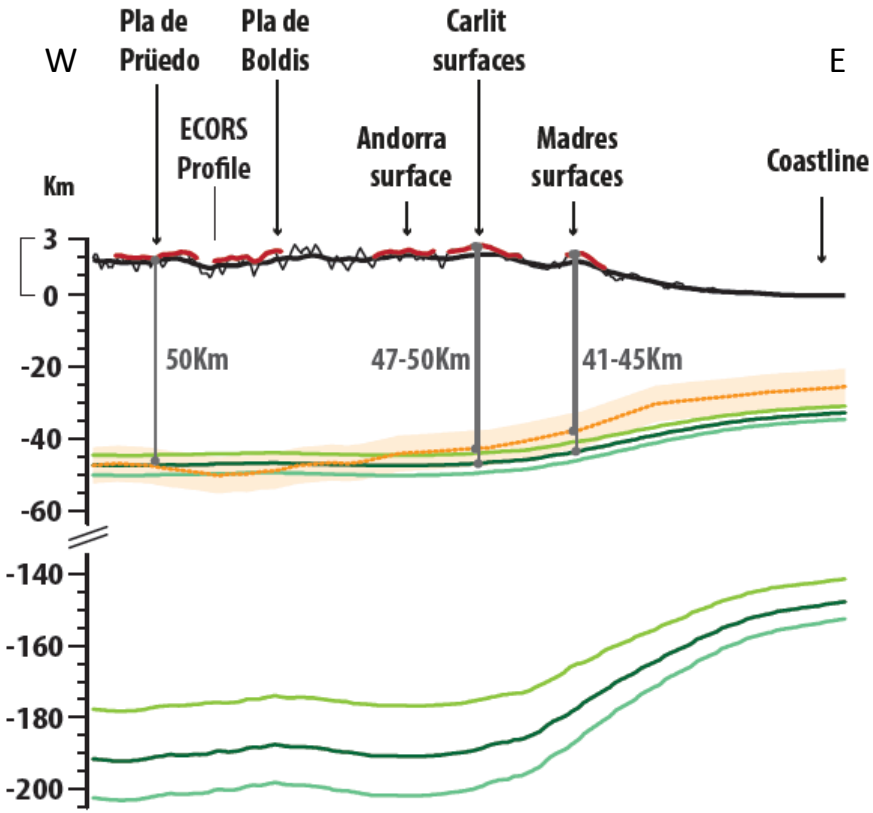
Bosch et al., 20

Reliques vs. structure profonde des Pyrénées

ECORS profile

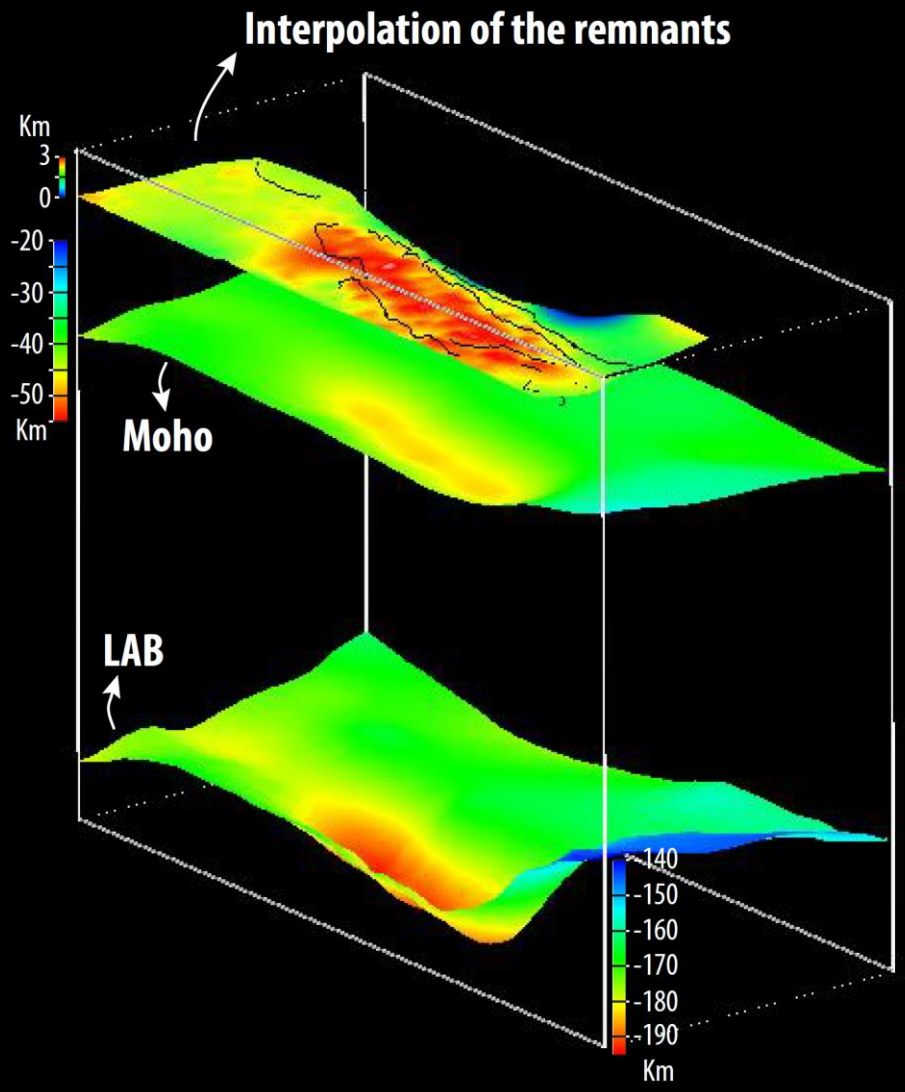


West-East profile



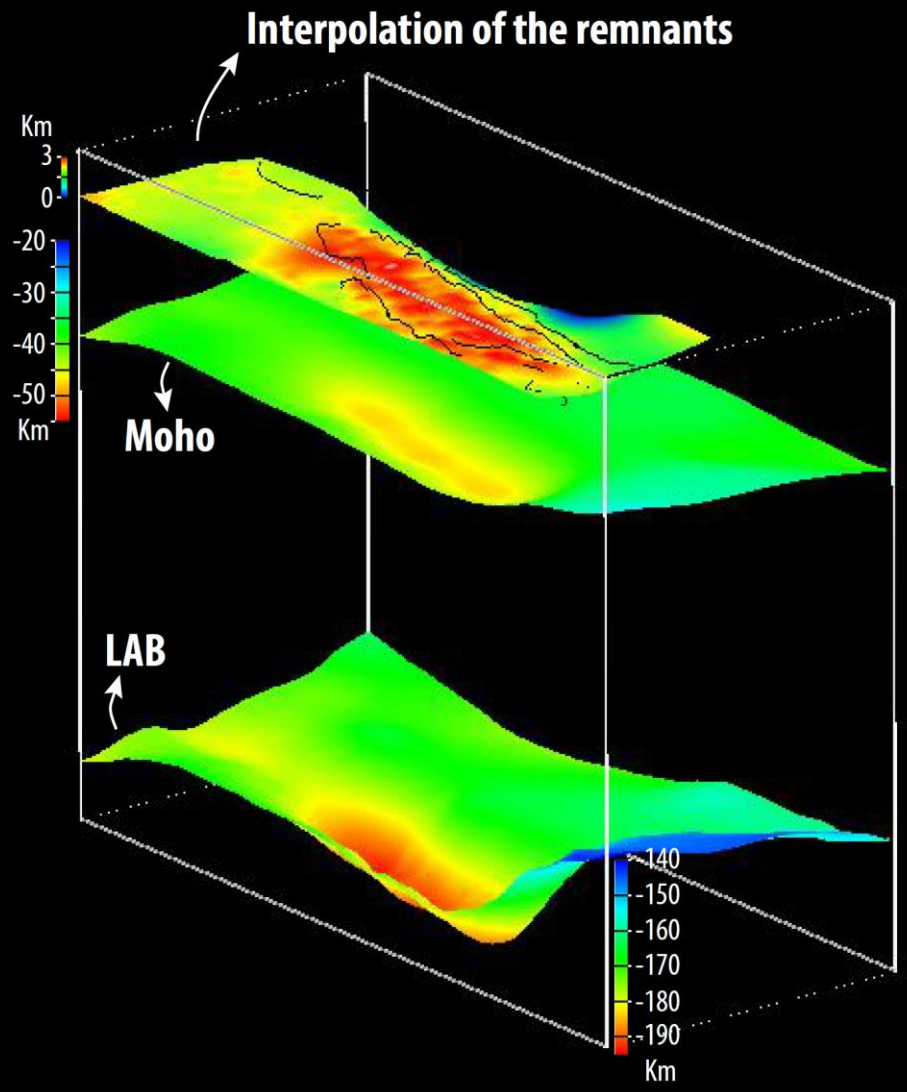
Bosch et al., 20

CONCLUSIONS



- L'altitude de ces surfaces est compensée isostatiquement par une croûte épaisse de 40 à 50 km de densité normale
- Elles correspondent à des reliques d'une seule et même surface de pénéplanation en haute altitude qui se développe jusqu'au Miocène moyen

CONCLUSIONS

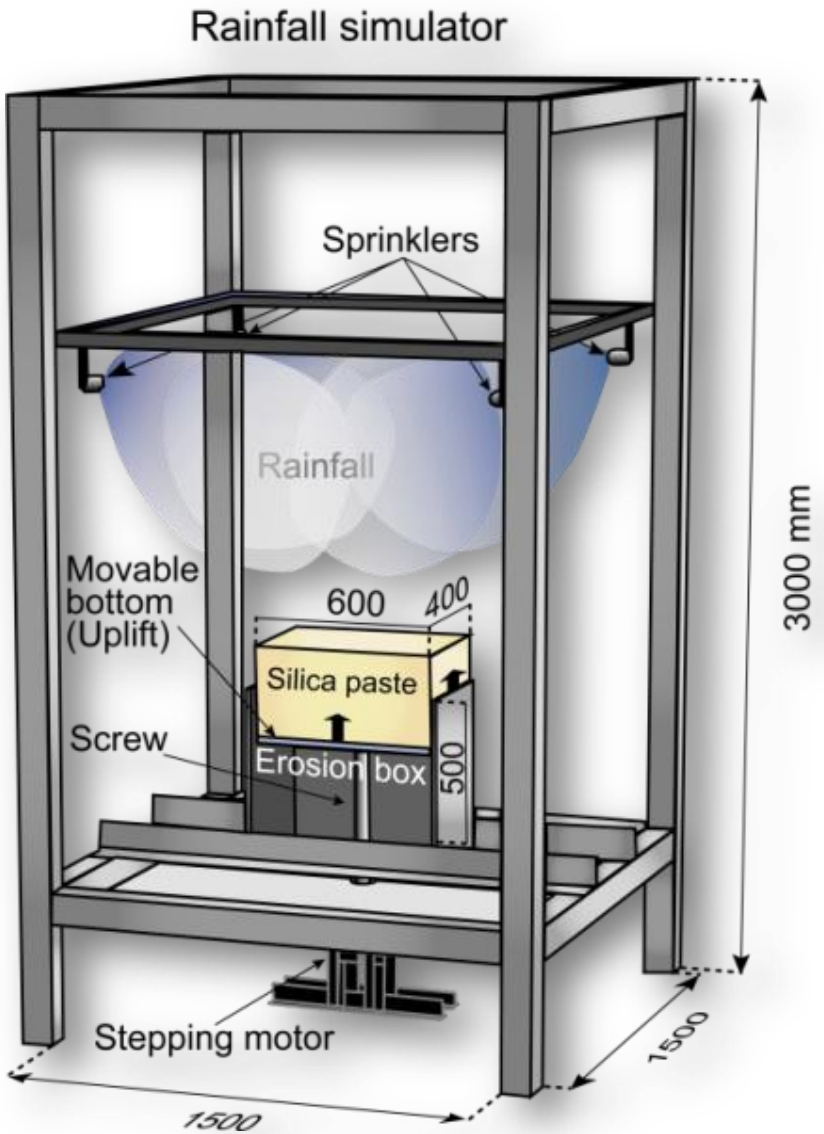


- Les surfaces d'érosion à faible relief et haute altitude sont présentes partout dans la chaîne
- Les mouvements verticaux dans les Pyrénées post-Miocène se limitent
  (1) à la diminution de l'altitude moyenne de la chaîne en réponse à l'érosion et
  (2) au rebond isostatique des surfaces reliques (surface de "non-

Merci

Influence of the piedmont sedimentation: experimental approach

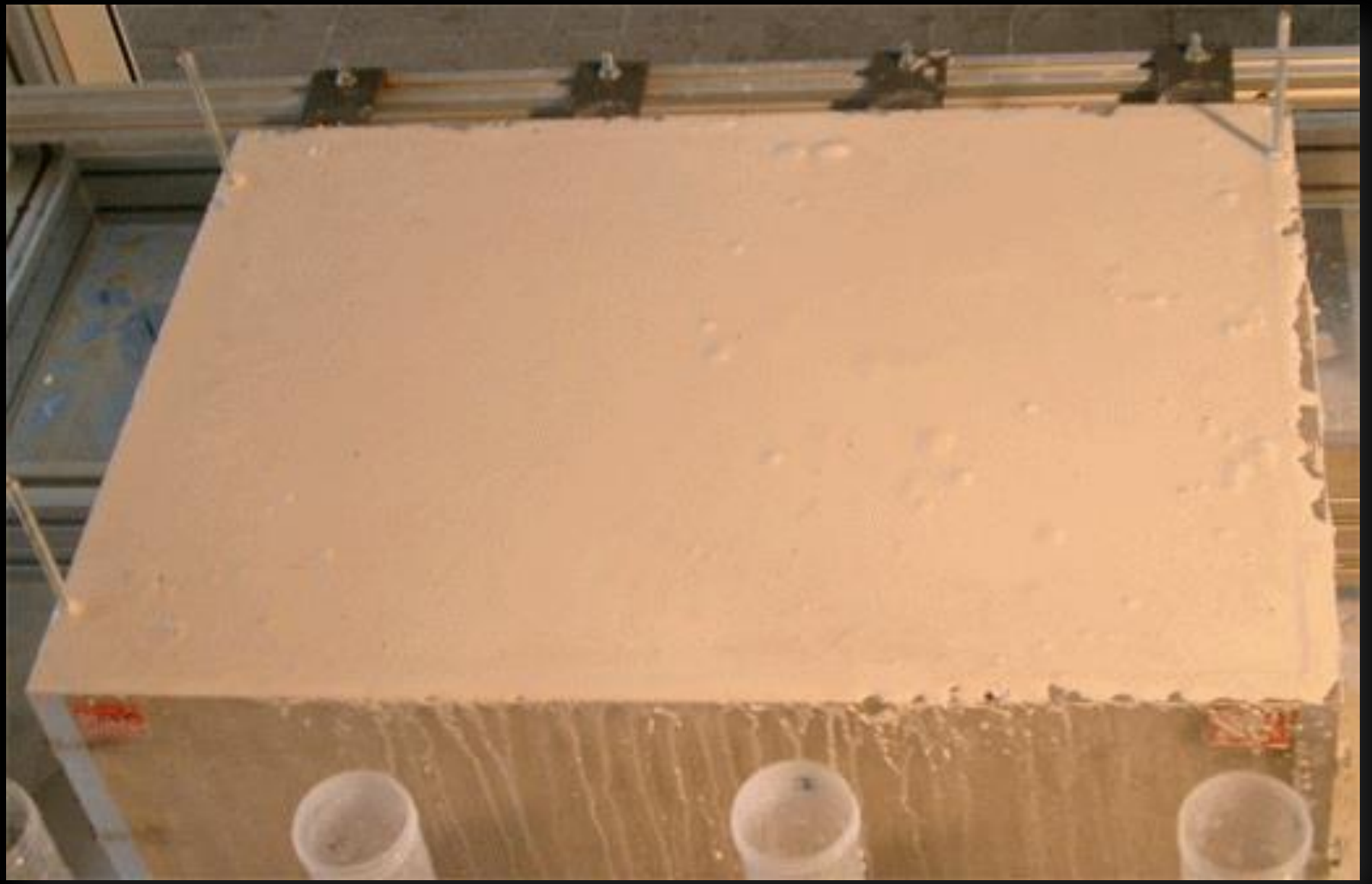
(Babault, 2004, Babault et al. 2005, 2006)

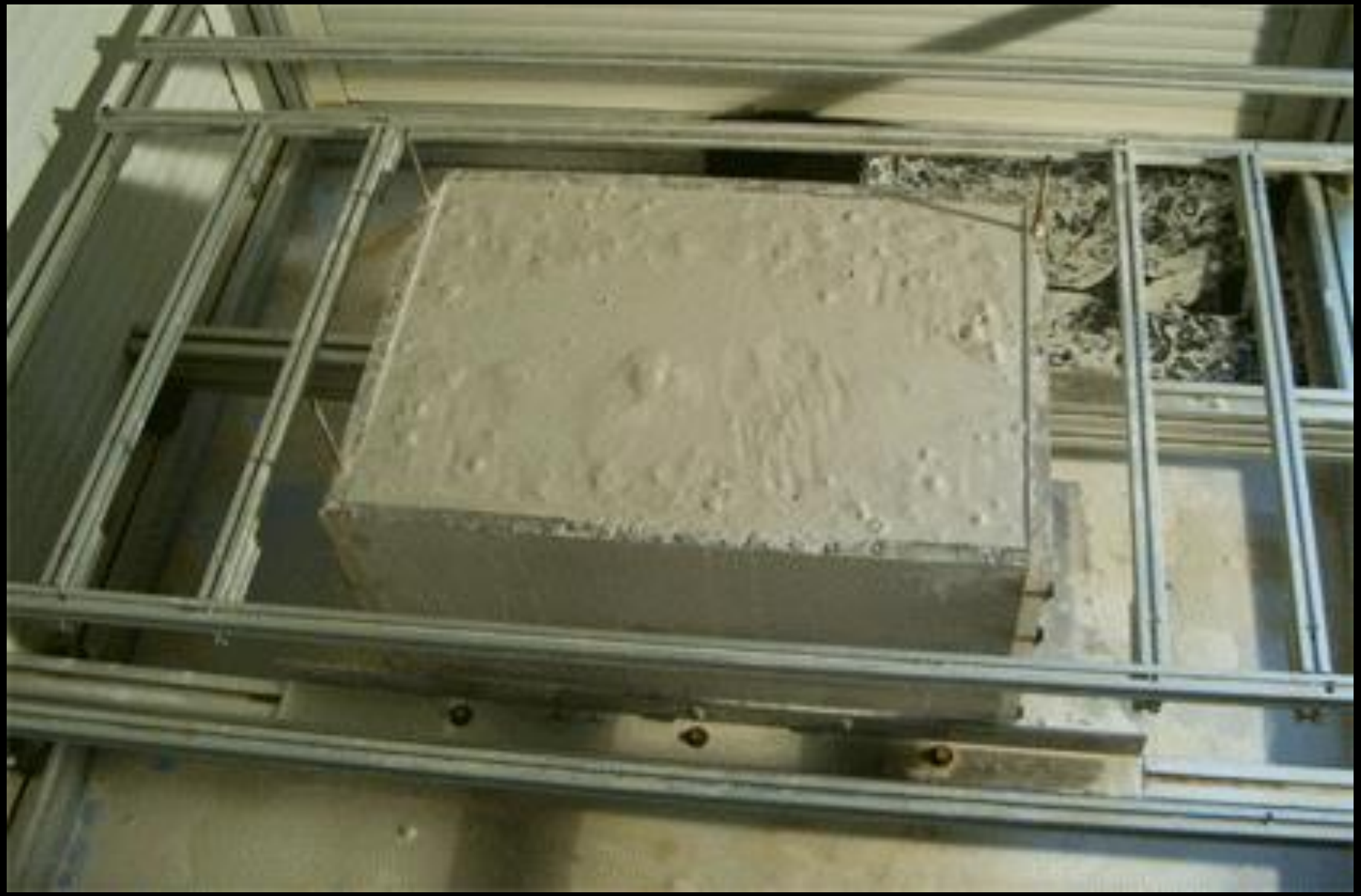


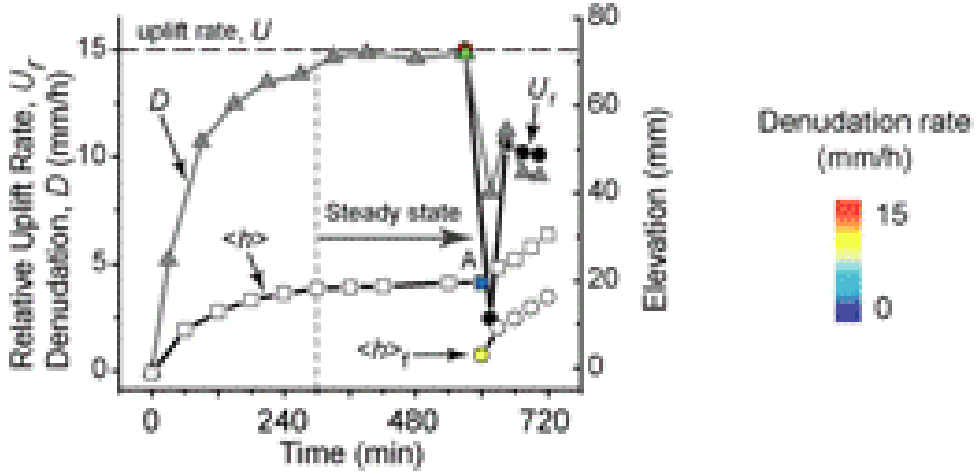
Laboratorio de Rennes

Tipo de experimento 1

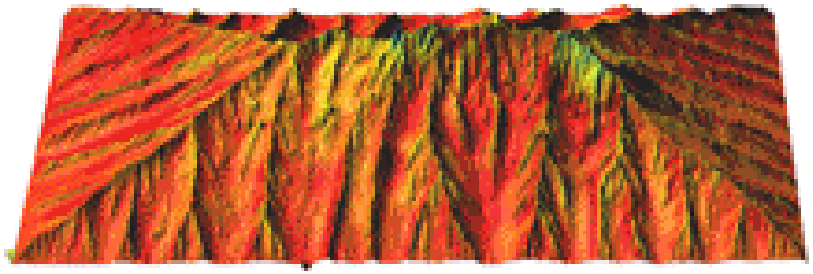
Tipo de experimento 2:
Tipo 1 + sedimentación de piedemonte

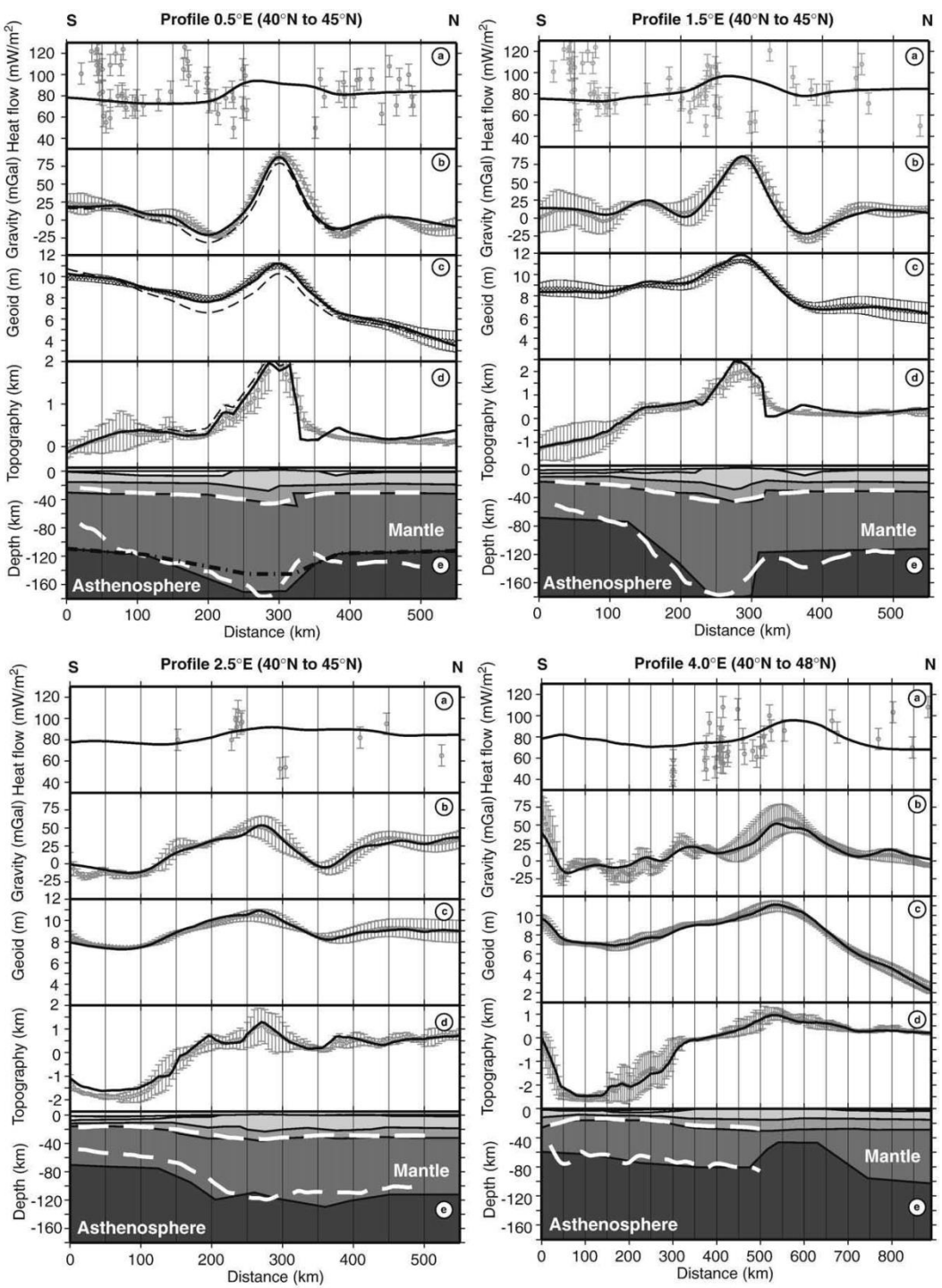




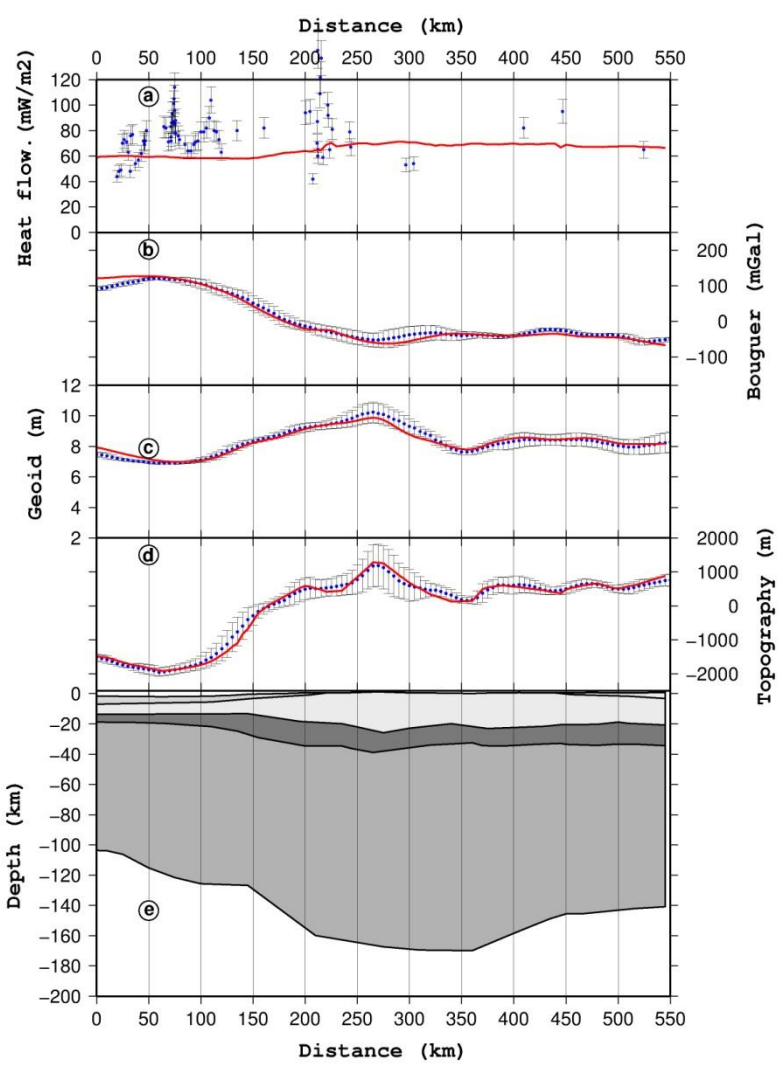

uplift rate, U
D
U_r
Steady state
<h>
A
$<h>_t$
Relative Uplift Rate, U_r
Denudation, D (mm/h)
Elevation (mm)
Time (min)
0
240
480
720
15
10
5
0
60
40
20
Denudation rate
(mm/h)
15
0

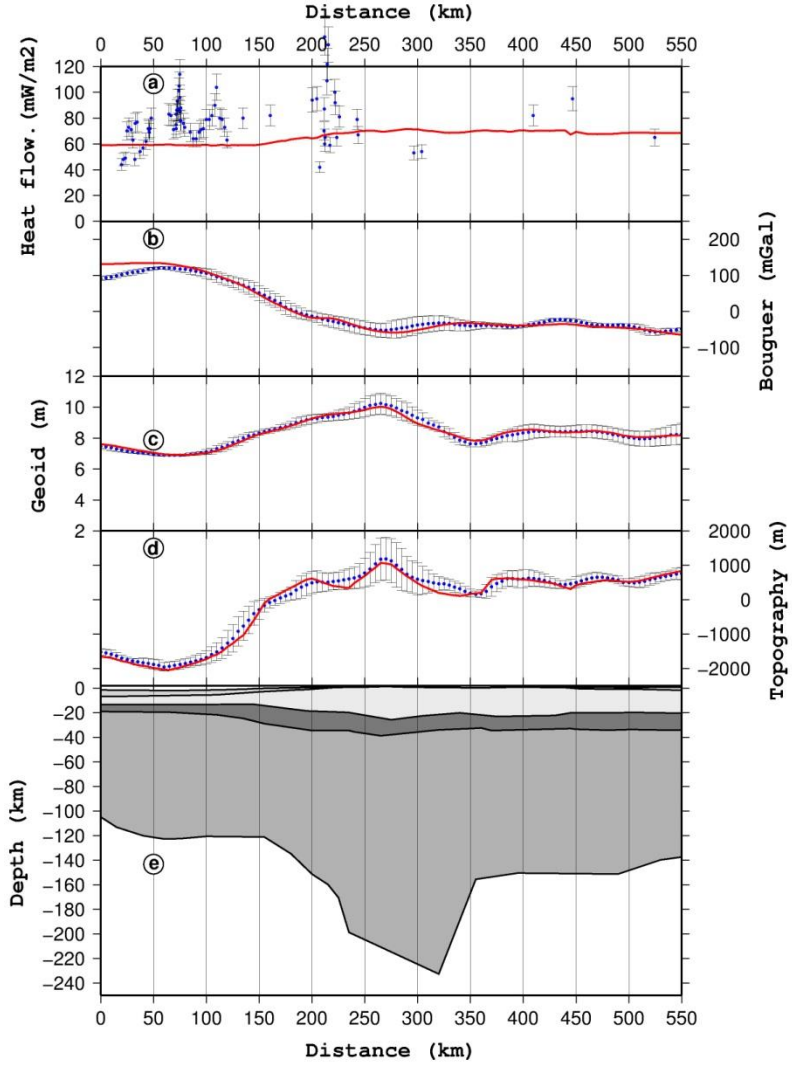
A





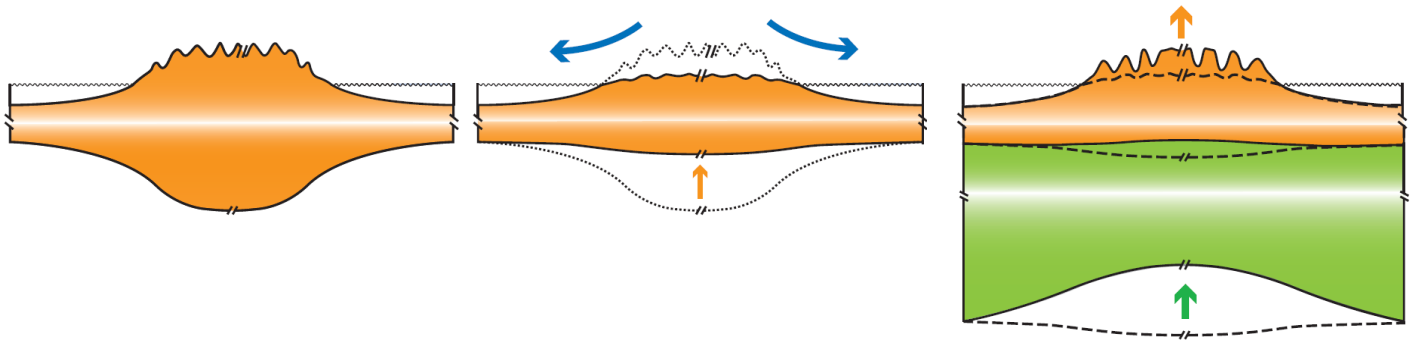
Gunnell et al. 2009


Distance (km)
Heat flow. (mW/m2)
Bouguer (mGal)
Geoid (m)
Topography (m)
Depth (km)
a
b
c
d
e

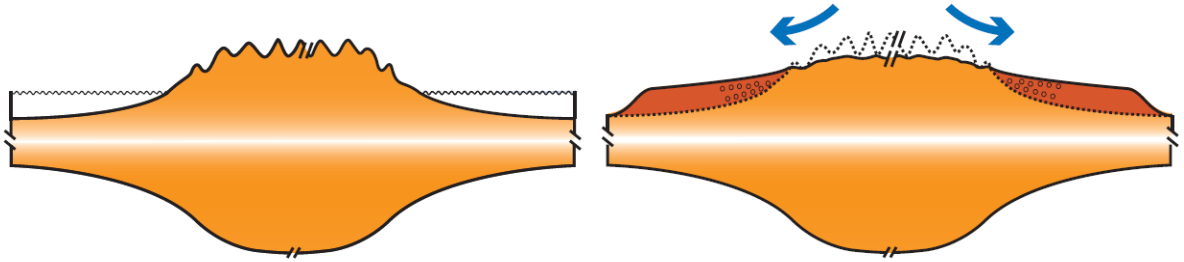

Distance (km)
Heat flow. (mW/m2)
Bouguer (mGal)
Geoid (m)
Topography (m)
Depth (km)
a
b
c
d
e

Reliques de pénéplaine à haute altitude : deux hypothèses

Pénéplanation au niveau de la mer et soulèvement par amincissement du manteau lithosphérique



L'aplanissement en altitude par la remontée du niveau de base

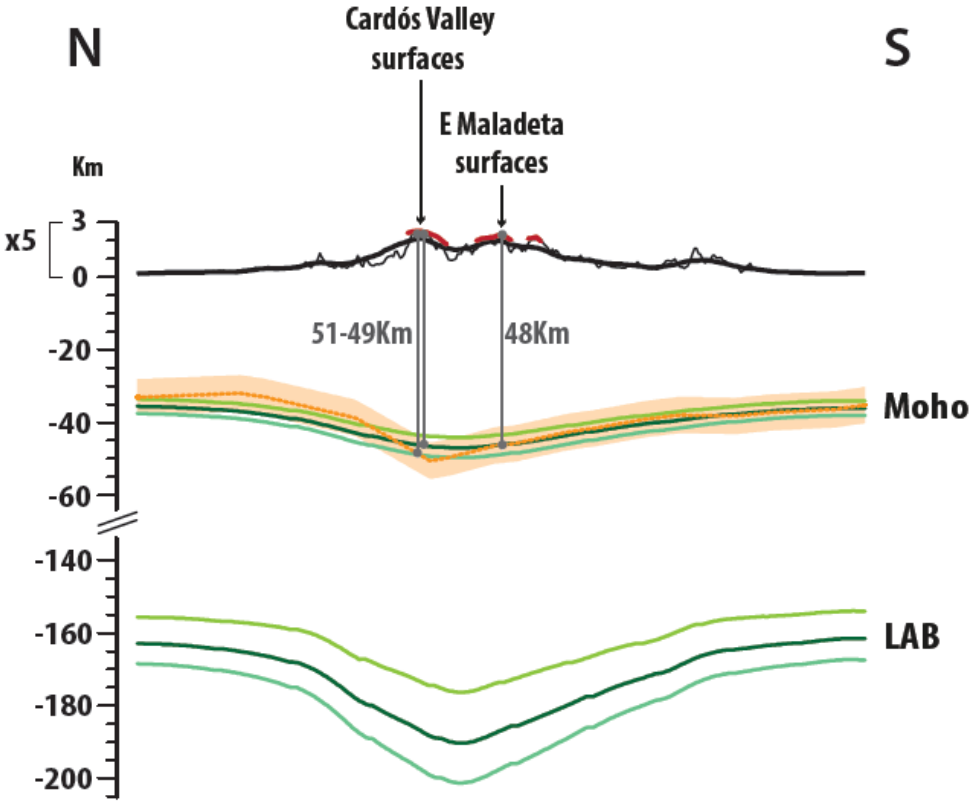


Erosion → Sédimentation de piémont → Racine crustale préservée → Altitude préservée

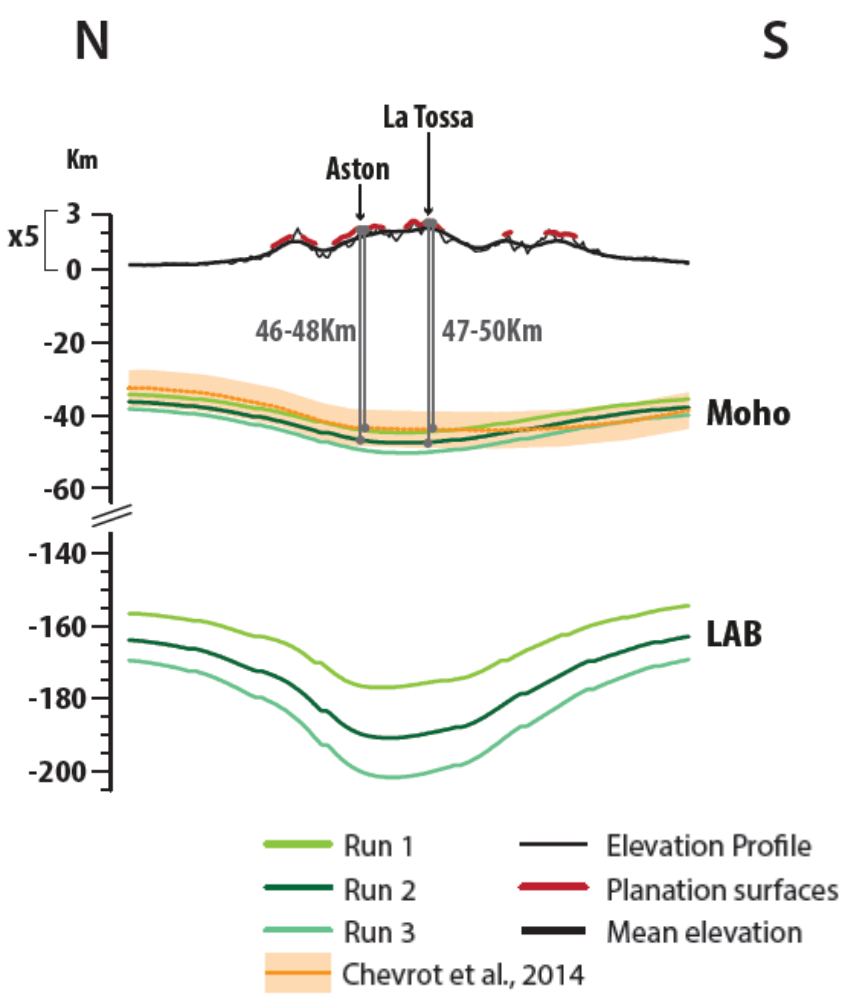
Babault et Van Den Driessche, 2005; Bosch et al. 2016

Surfaces vs. deep structure of the Pyrenees

ECORS Profile



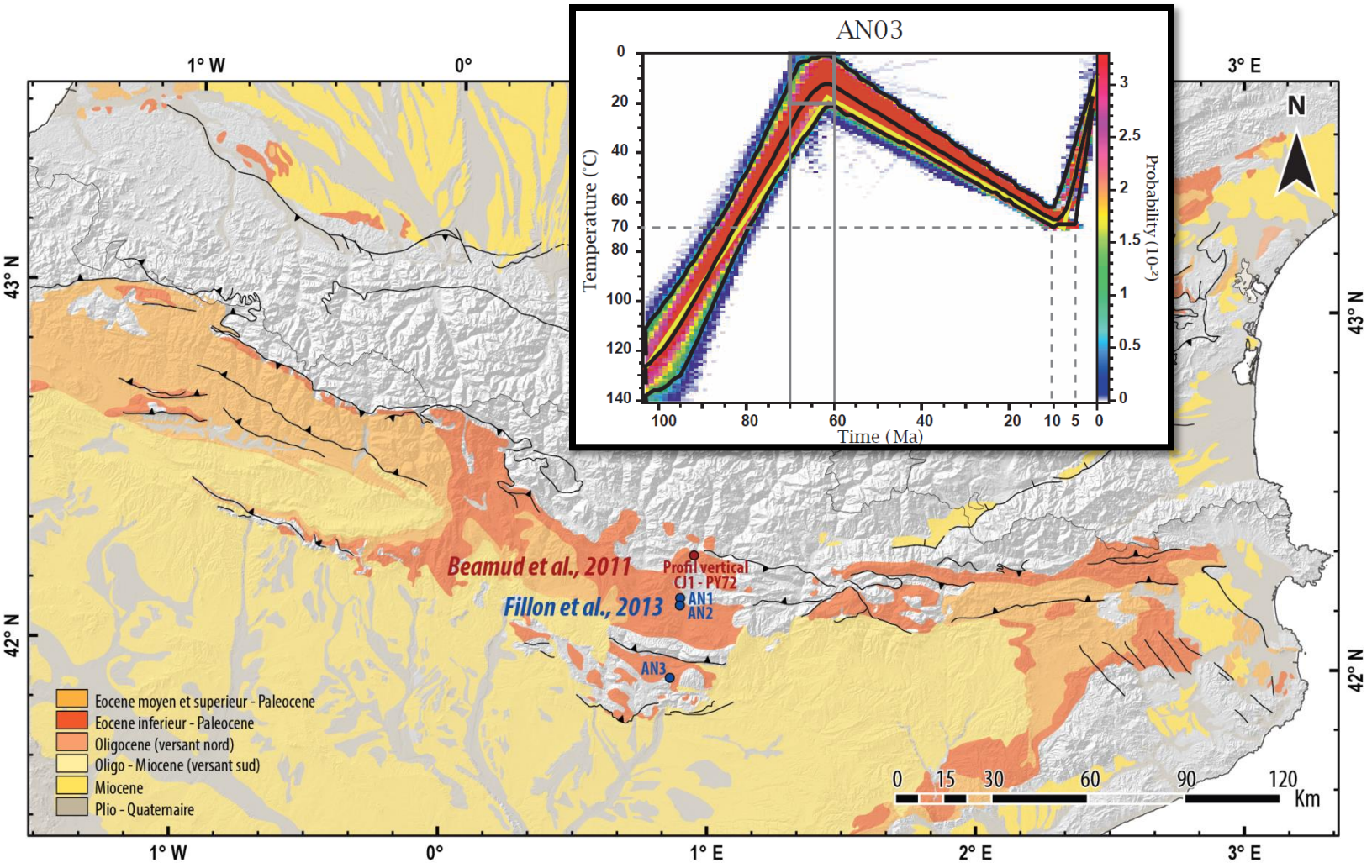
Eastern Pyrenees profile



Bosch et al., 2015

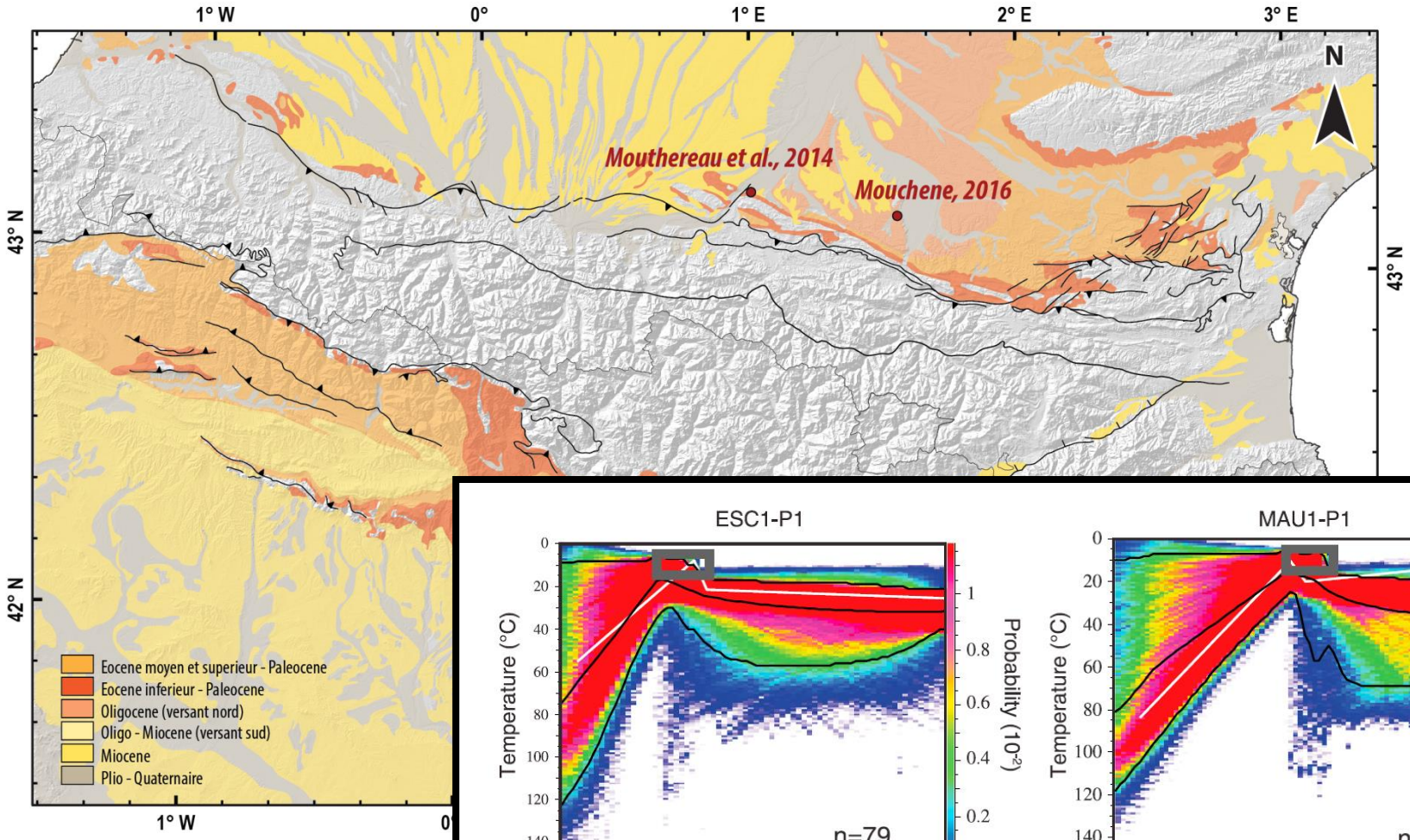
Enfouissement oligo-miocène des versants

AHe + AFT sur le versant sud



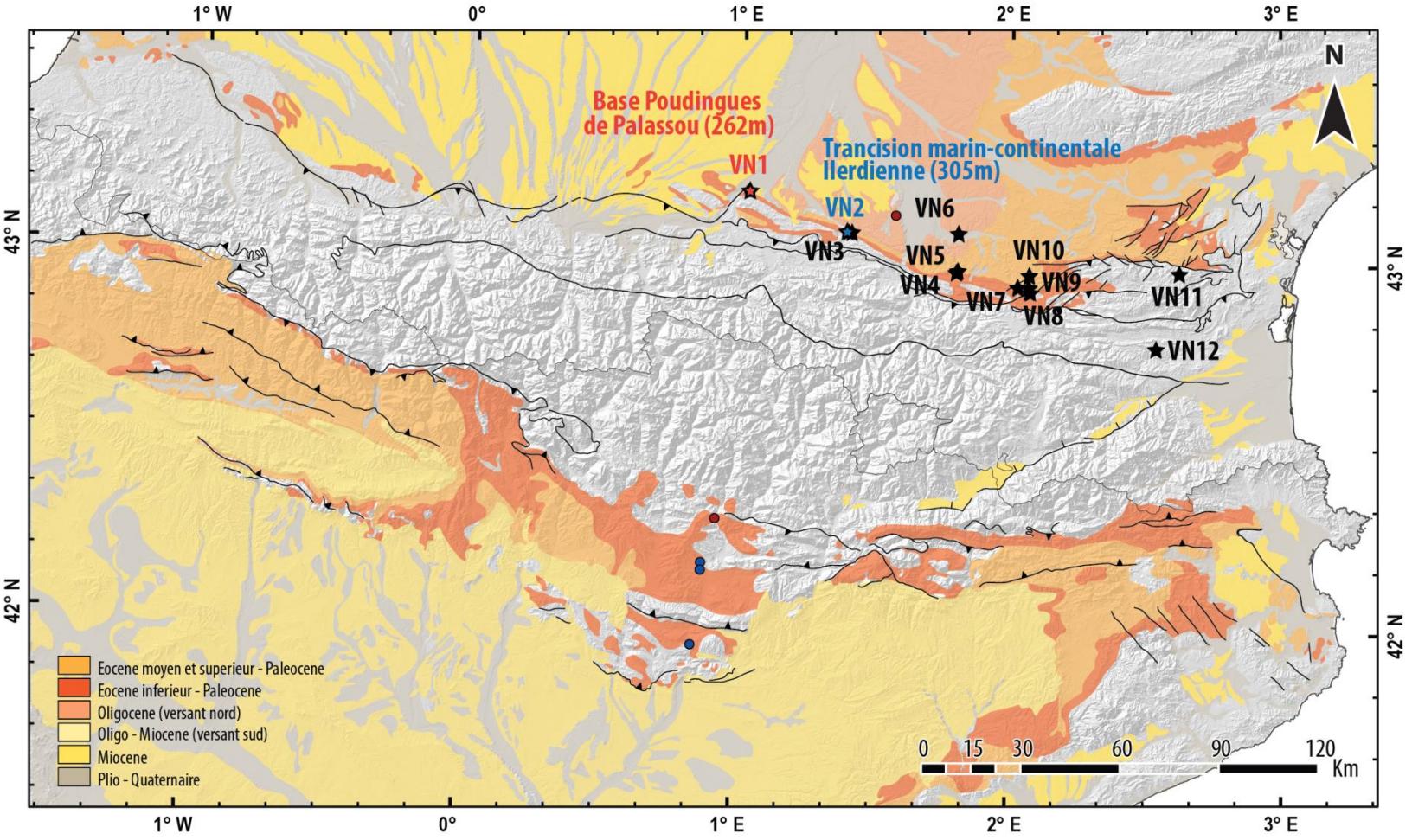
Enfouissement oligo-miocène des versants

AFT sur le versant nord



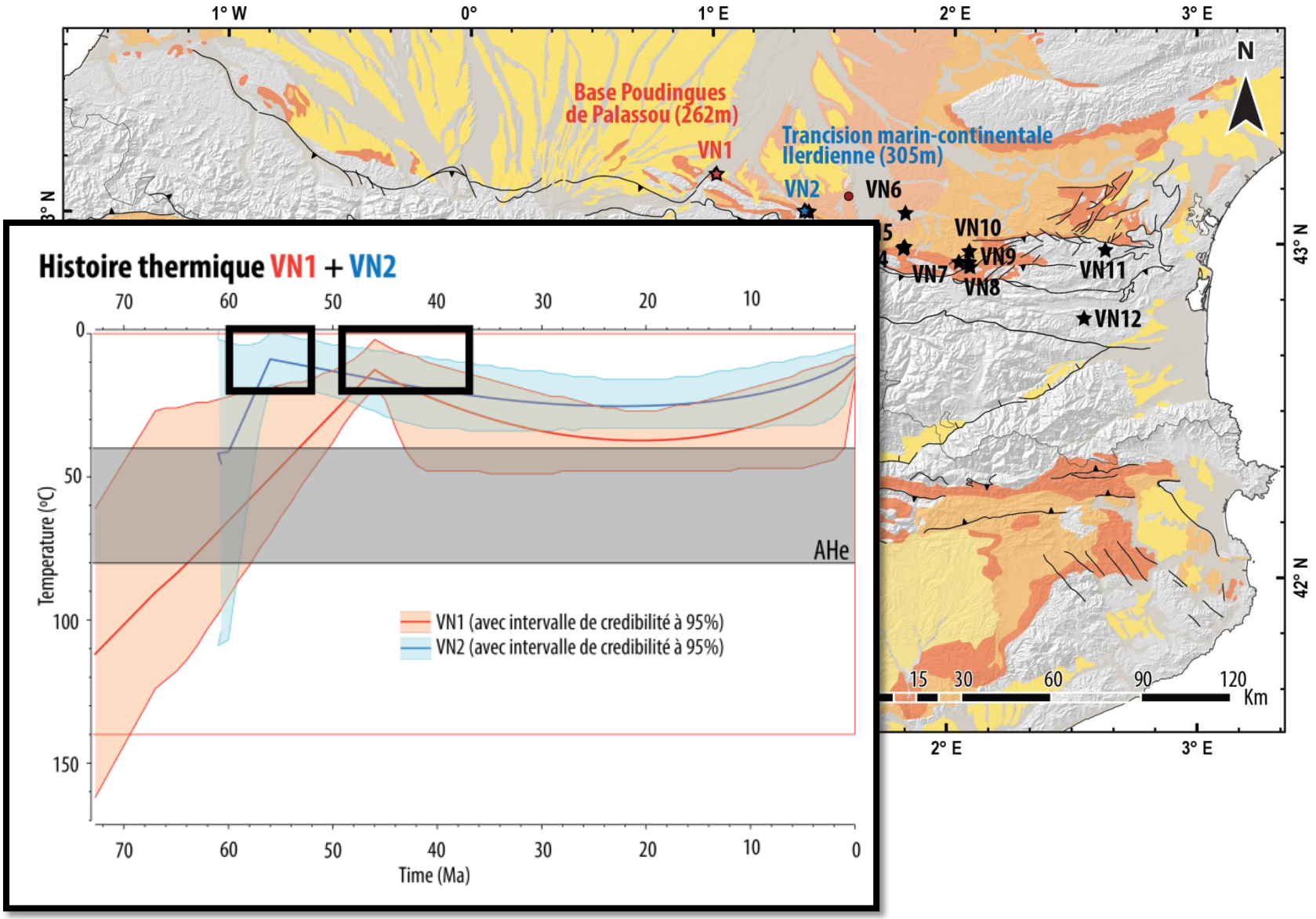
Enfouissement oligo-miocène des versants

Échantillonnage pour AHe sur le versant nord



Enfouissement oligo-miocène des versants

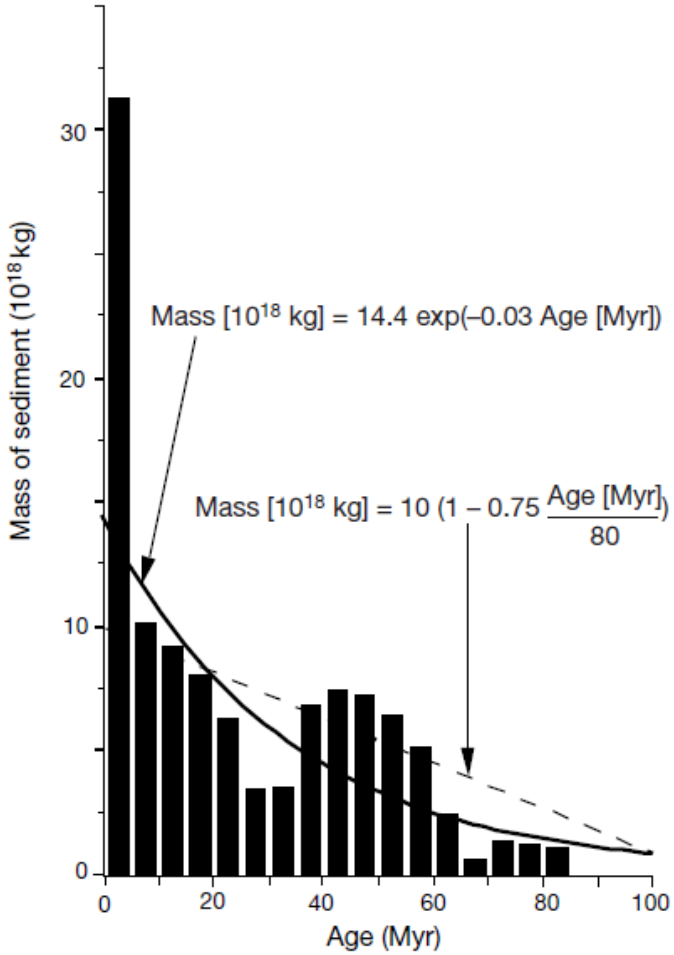
Échantillonnage pour AHe sur le versant nord



Increased sedimentation rates and grain sizes 2–4 Myr ago due to the influence of climate change on erosion rates

Zhang Peizhen*, Peter Molnar†‡ & William R. Downs§

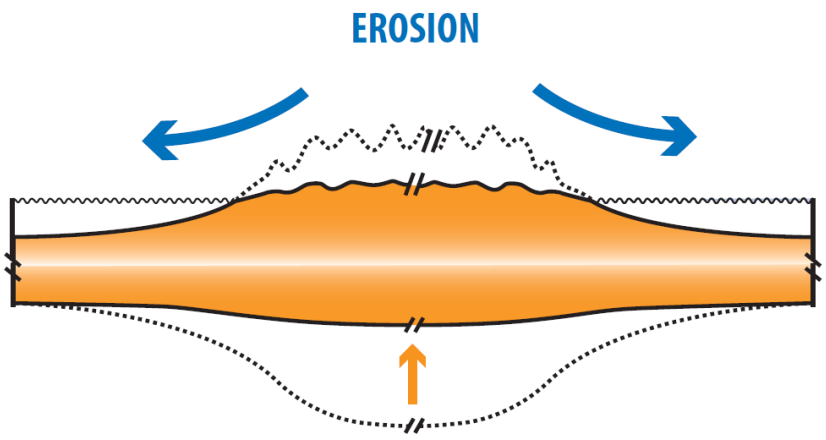
**Institute of Geology, State Seismology Bureau, Beijing, China*
‡ Department of Earth, Atmospheric, and Planetary Sciences, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts 02139, USA
§ Bilby Research Center, Northern Arizona University, Flagstaff, Arizona 86011-6013, USA



Classical interpretation: “uplifted peneplain” (Davis1899)

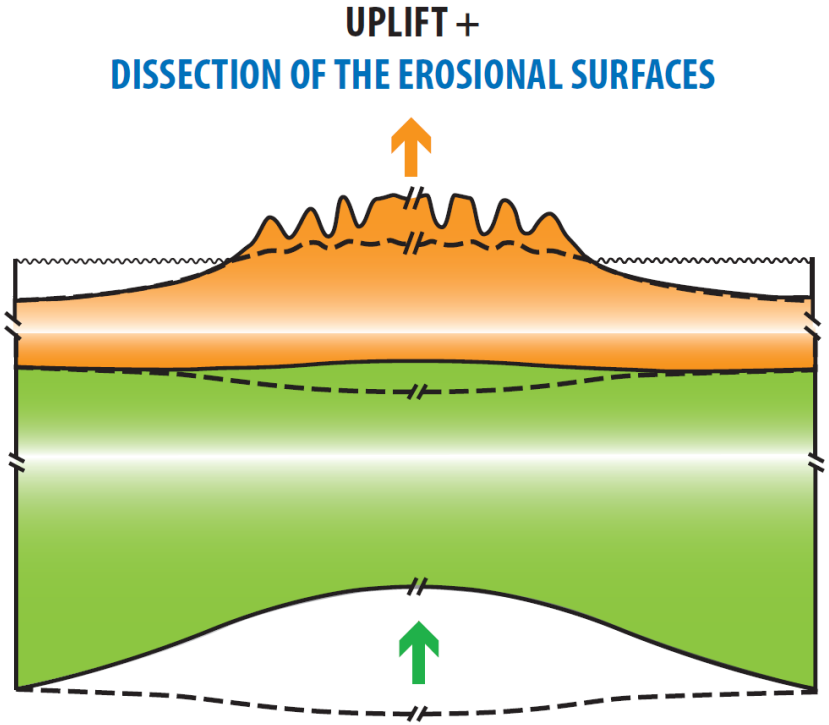
Peneplanation of a relief (mountain belt) → near sea level

uplift relief rejuvenation



Peneplanation = **crustal root erased**

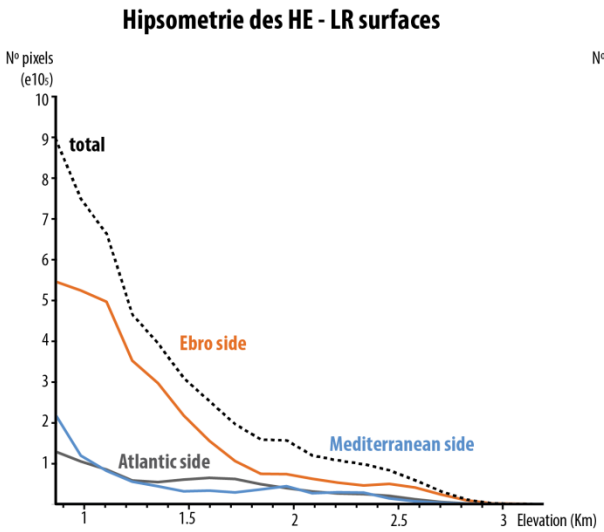
(“normal” crustal thickness)

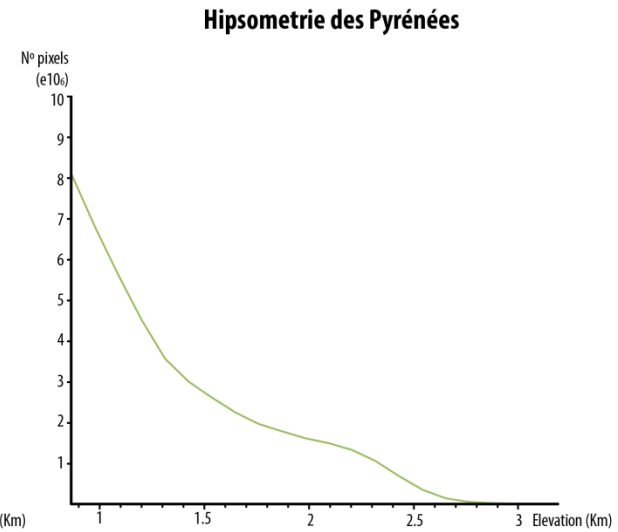


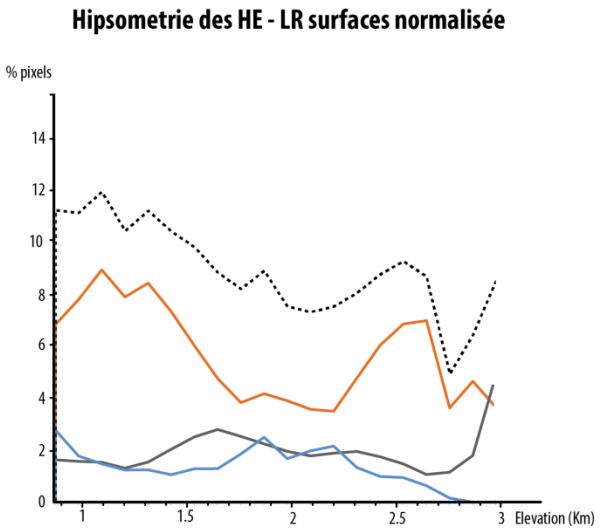
Uplifted peneplain = **mantle dynamics**

Methodologie de cartographie des reliques de la péneplaine

Definir les caracteristiques géomorphologiques des reliques : l'elevation (hipsometrie)







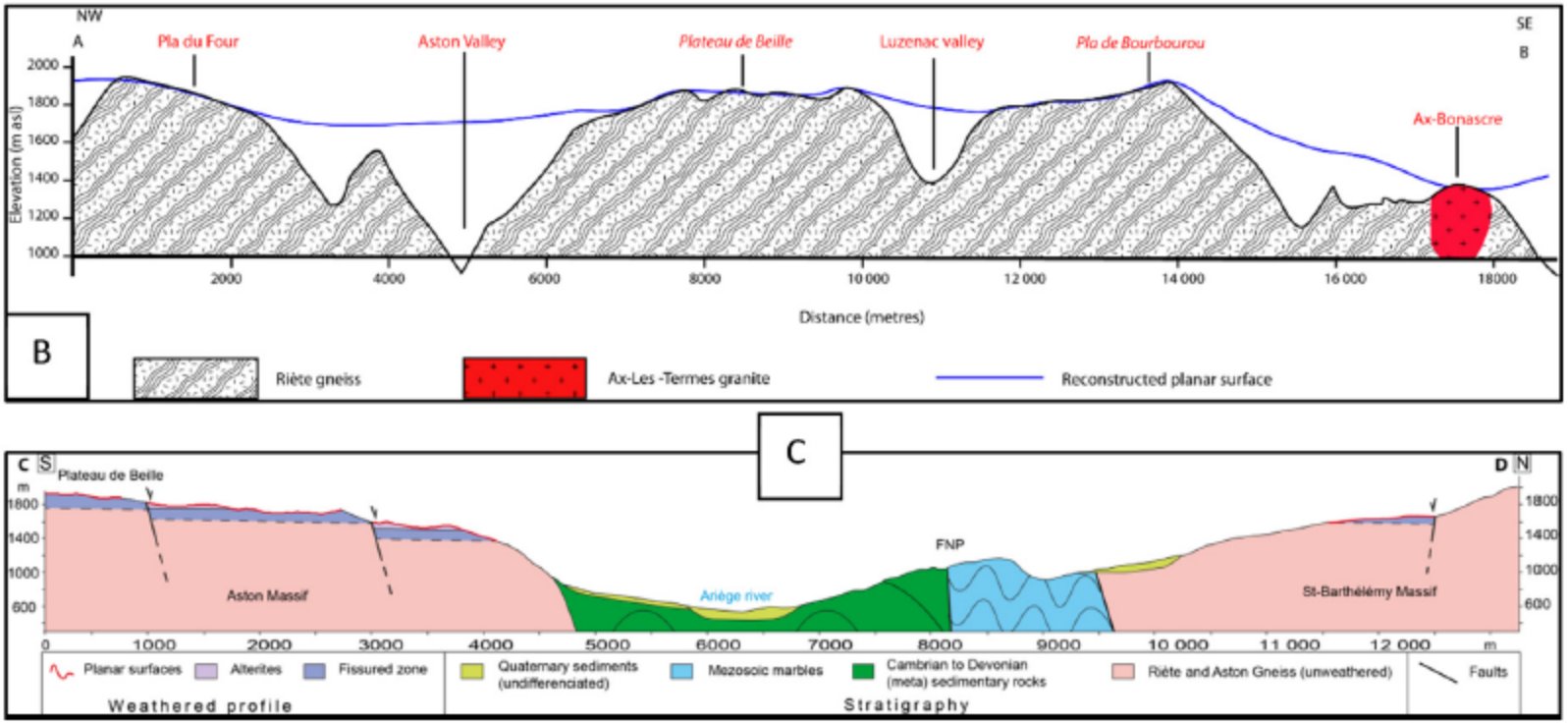


Fig. 5. A. Simplified geological map of the Aston area, derived from the 1/50,000 geological map (Destombes et al., 1969), and location of the surfaces (colour gradient from light grey for low elevations to black for high ones). PB: Plateau de Beille; PF: Pla du Four; PBr: Pla de Bourbourou; PdM: Pla du Mont; PT: Pla de Tabe; PM: Pla de Madame. A–B: Location of the cross-section. B. NW–SE cross-section from Pla du Four to Ax-Bonascre. The thalwegs are made by planar surfaces used to define the envelope surface. This surface is interrupted by incised valleys like the Aston one. The surface deflection between Pla de Bourbourou and Ax-Bonascre is concomitant with a step. C. North–south cross-section from the Plateau de Beille to the Saint-Barthélémy summit, showing the stepped surfaces and preserved alterites controlled by normal faults (not mapped in Fig. 5A) on both sides of the Ariège River (see the text for further explanations).

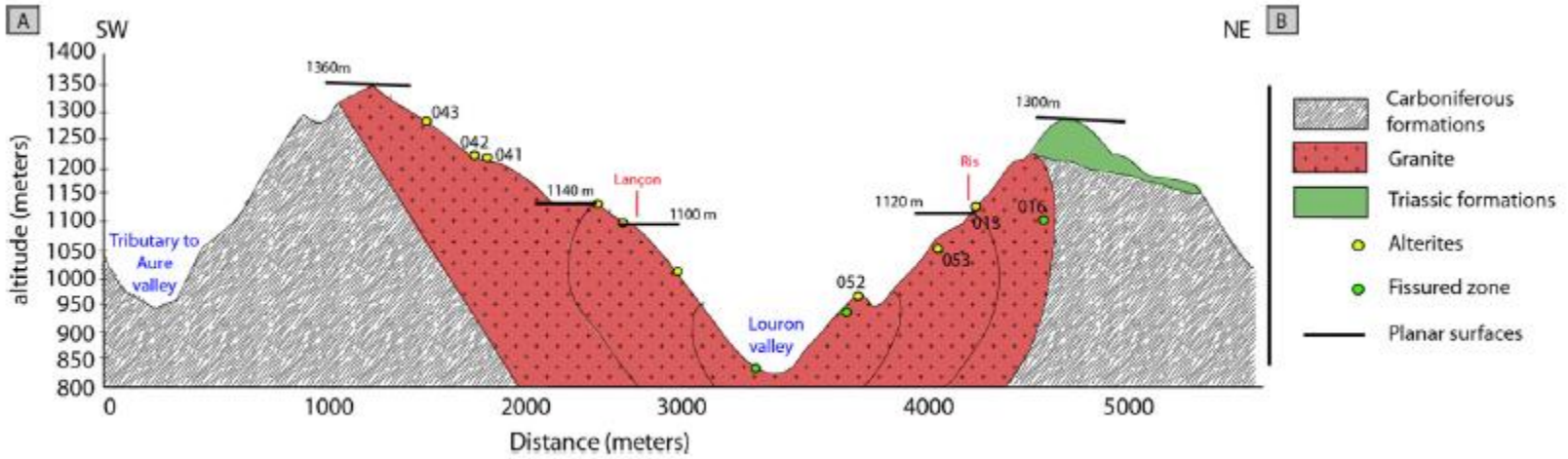
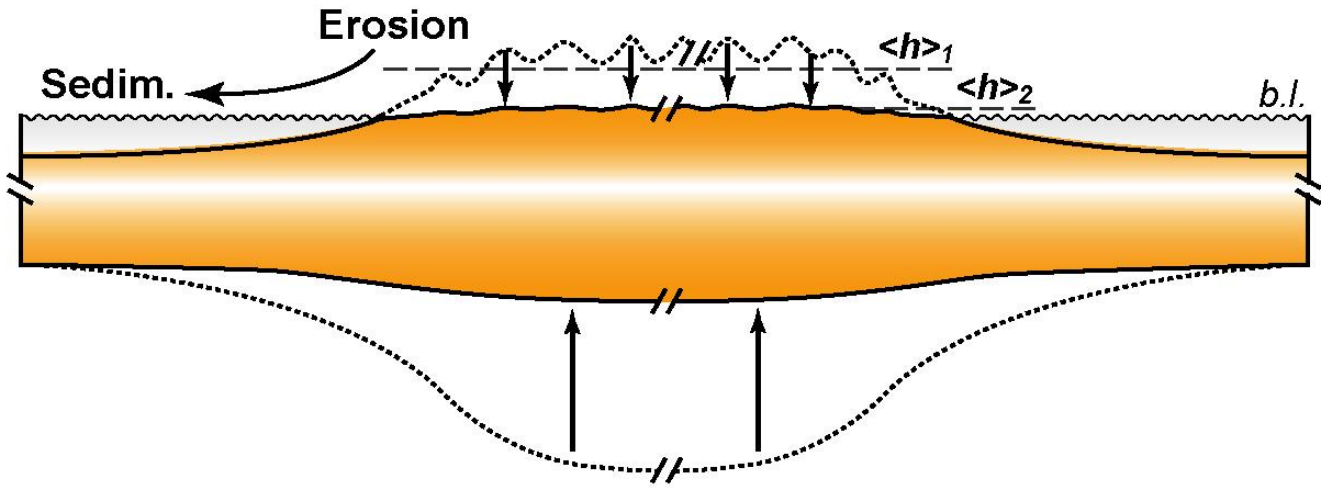
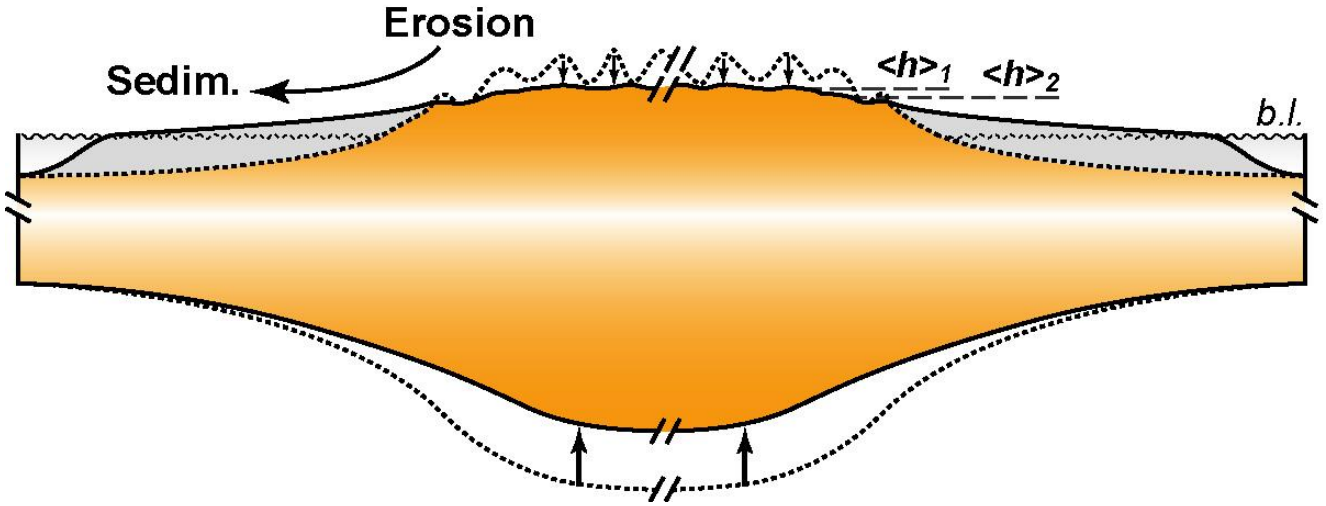


Fig. 4. NE–SW geological cross-section across the Bordères–Louron granite, showing the elevations of the different surface levels, such as the main one at 1100 m asl. See location in Fig. 2.

Model 1



Model 2



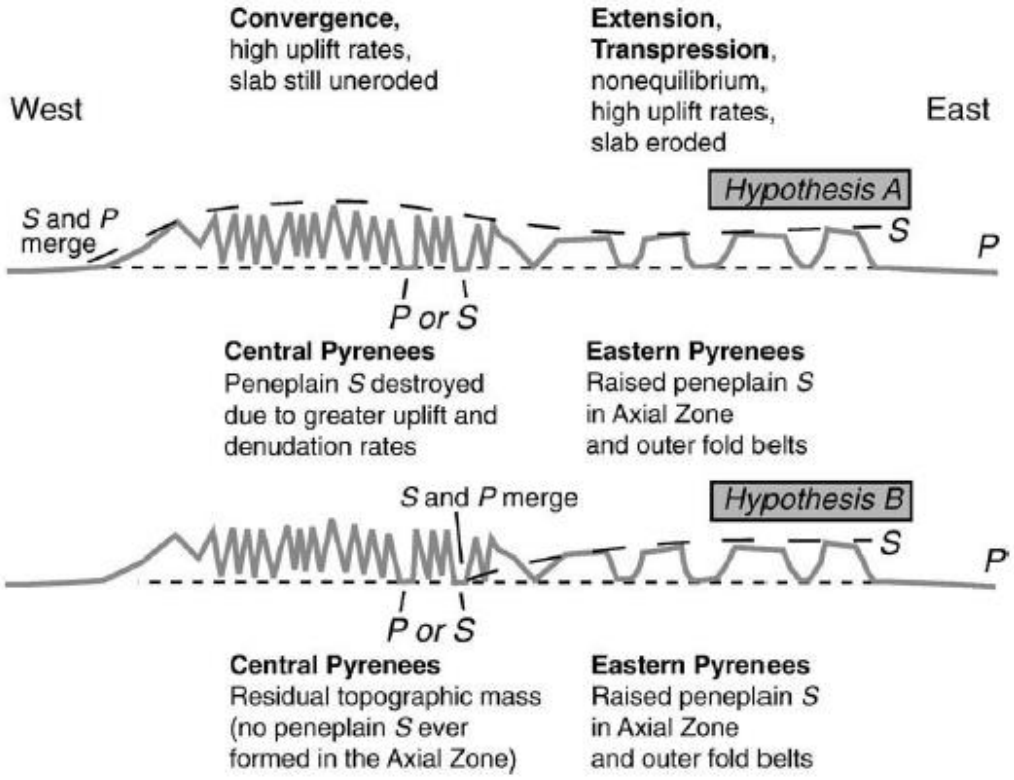
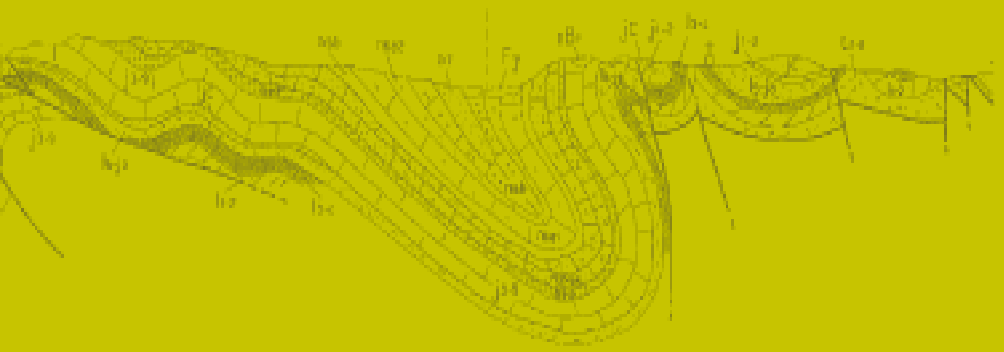


Fig. 9. Cartoon summarizing two alternative scenarios of topographic evolution in the Pyrenees prior to the uplift and valley incision caused by thermal erosion of the lithospheric root ca. 12 Ma. Topography in grey. Note that in scenario B the few occurrences of planar topography known in the Central Pyrenees cannot be unequivocally labelled as P or S.

Pénéplanation et dynamique profonde d

Gemma V. Bosch



RgF RÉFÉRENTIEL GÉOLOGIQUE DE LA FRANCE

Géosciences pour une Terre durable
brgm

Méthodologie de cartographie des reliques de la pénéplaine

Méthodes de cartographie semi-automatique

e.g. Brown et al., 1998; Prima et al., 2006

Basées sur 3 conditions principales *(Brown et al., 1998, d'après Pike, 1988)*:

- A **processus d'erosion distincts** doivent correspondre des **formes topographiques distinctes**
- Les **descripteurs quantitatifs de la topographie** doivent pouvoir identifier les **caractéristiques spécifiques** de chaque forme du relief
- Le **degré de définition** des unités topographiques doit être suffisant pour **mesurer ces différentes formes**

→ **ont une signification génétique**

→ **permettent d'adapter la cartographie à un objectif scientifique determiné**