

Origine et évolution des ruptures gravitaires de grande ampleur dans les chaînes subalpines méridionales à l'Holocène

Contraintes géomorphologiques, géochronologiques et géophysiques

Swann Zerathe

Thèse sous la direction de **Thomas Lebourg**

Mardi 2 juillet 2013

Plan de l'exposé

Introduction et problématique

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur

- a) *Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution*
- b) *Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle*

3^{ème} partie : Chronologie et cinématique des ruptures: application des cosmonucléides

- a) *Principe de la méthode et stratégie*
- b) *Problèmes méthodologiques: la datation des cherts*
- c) *Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines*

4^{ème} partie: Discussion

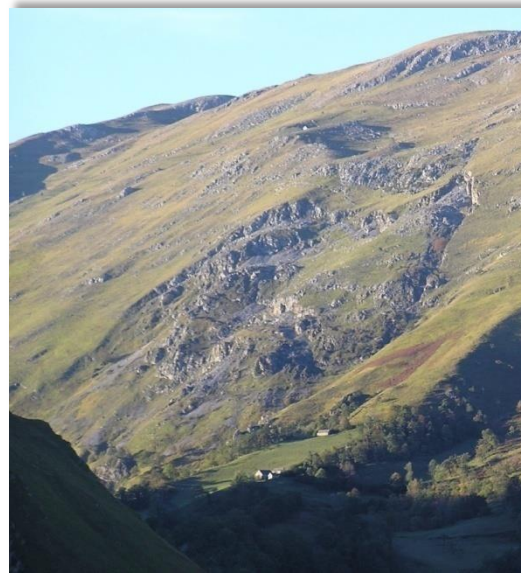
- a) *Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines*
- b) *Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine*

Conclusion et perspectives

Les mouvements gravitaires : une grande variété de processus à différentes d'échelles spatiales et temporelles



Deep Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD): contre-pentes et double-crête, Canada

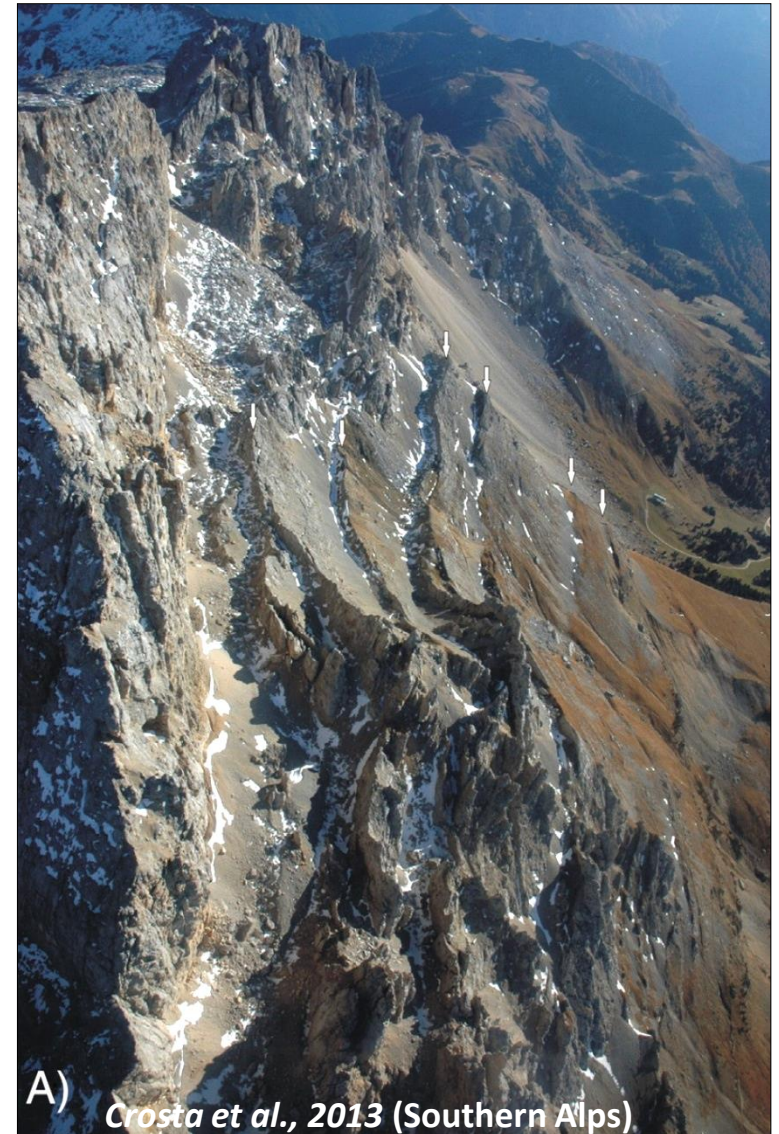
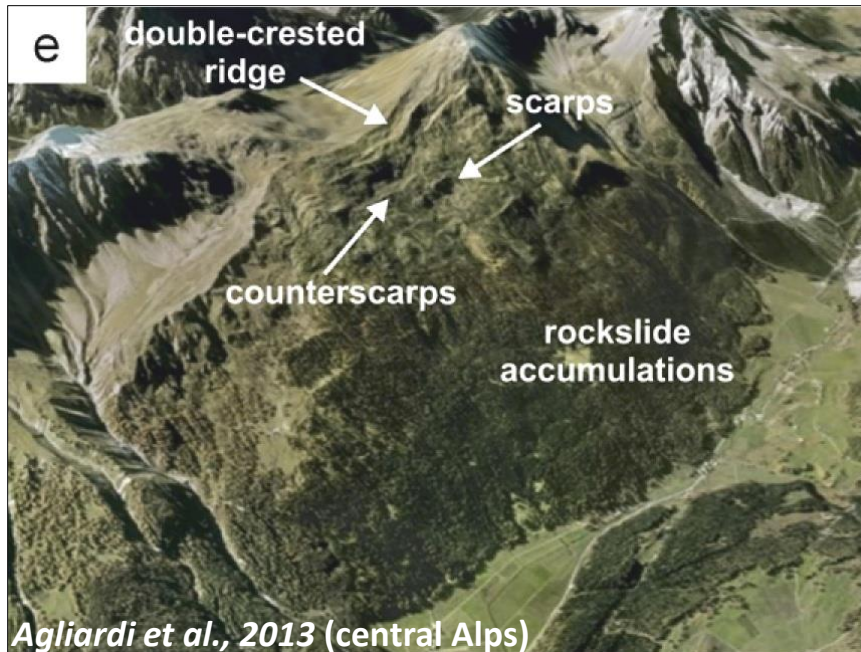


Glissement de grande ampleur (DSL): Le Layens, Pyrénées, image pers.



Ecroulement rocheux sur une autoroute, Canada, 2008

Les Deep-Seated Gravitational Slope Deformation (DSGSD) « étalements gravitaires géants »



Mouvements rocheux de 10^9 m^3

Développement à l'échelle de montagnes

Morpho-structures spécifiques

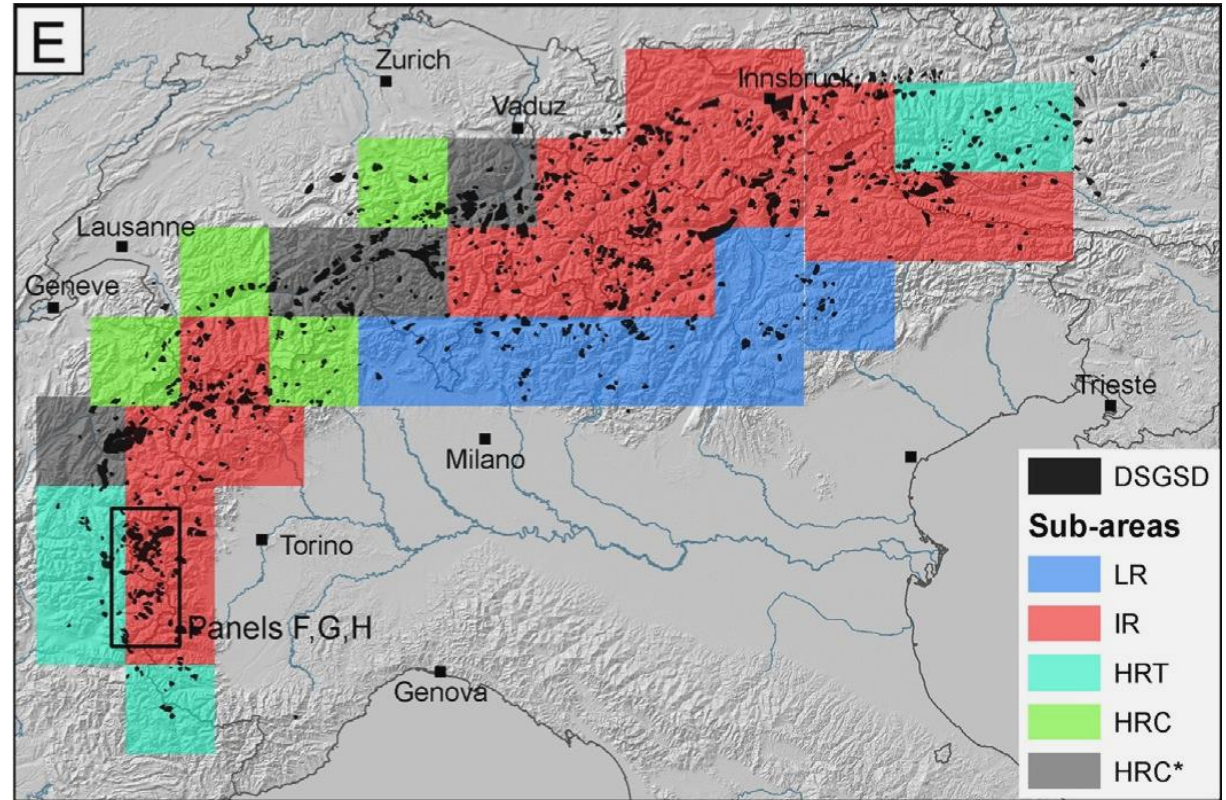
Les **Deep-Seated Gravitational Slope Deformation** (DSGSD) « étalements gravitaires géants »

> **900 cas** de DSGSD recensés dans les **Alpes**

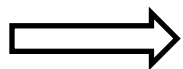
Contrôlés par l'**exhumation long-terme** des massifs

Ne semblent pas influencés par la pluviométrie

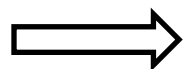
Mouvements **extrêmement lents** (\sim mm/an), non-catastrophiques



Crosta et al., 2013



Evoluent sur une échelle de temps « géologique » ($> 10^7$ ans)



Risques associés relativement limités

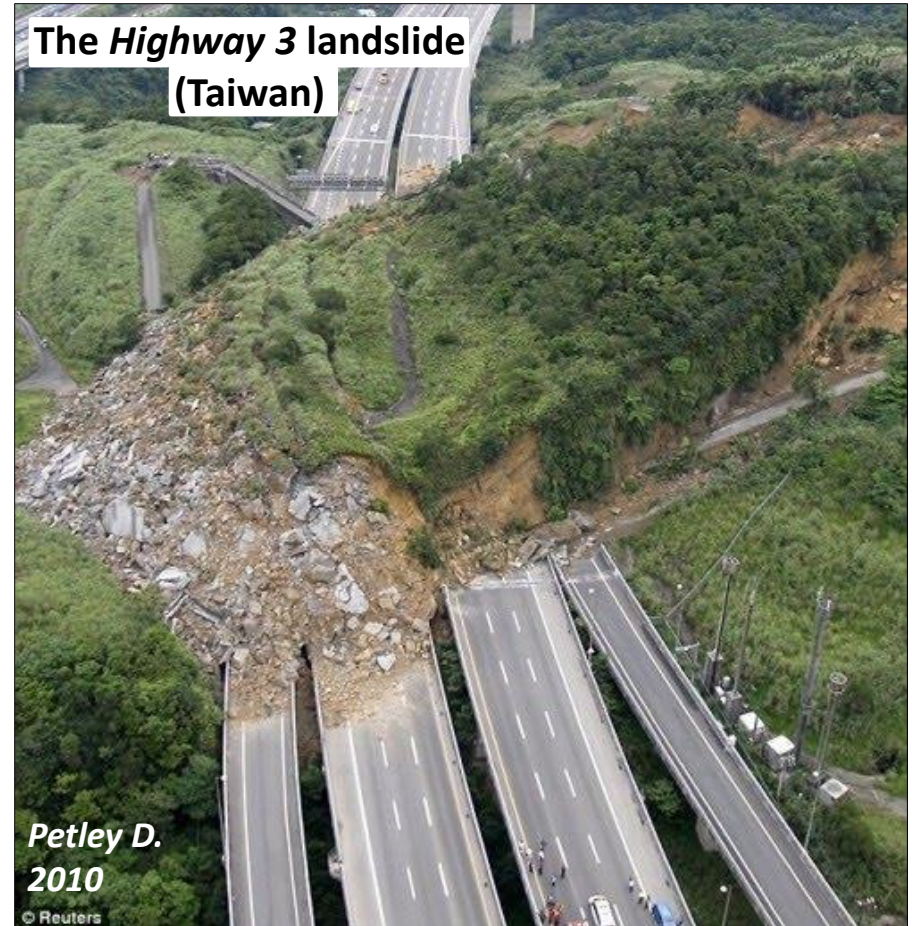
Les **Deep-Seated Landslide (DSL)**
« glissements de grande ampleur profonds »

Mouvements à l'échelle de versants,
mobilisant des volumes rocheux $> 10^6 \text{ m}^3$

Surface de rupture profonde ($> 30 \text{ m}$)

Evolution temporelle complexe, supposée sur
des échelles de temps longues ($> 10^3 \text{ ans}$)

Rupture catastrophique possible !

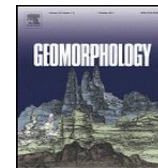


Quels sont les facteurs qui conditionnent l'évolution de ces mouvements vers une rupture brutale ?

Les **Deep-Seated Landslide (DSL)** « glissements de grande ampleur profonds »

Questionnements scientifiques de la communauté :

(Edt. special, by Crosta G. & Clague J., 2009:
Dating, triggering, modelling and hazard assesment of large landslides)



- Distribution régionale à l'échelle de chaîne de montagne
- **Origine des ruptures et facteurs déclenchants**, incluant l'**impact des forçages climatiques**
- **Chronologie et temps d'évolution** incluant l'âge d'initiation, les phases d'accélération ou de réactivation et la récurrence temporelle
- Les **mécanismes de ruptures**, incluant le **conditionnement** de la zone de **rupture** et l'origine du collapse final
- Contrôle passif ou actif exercé par les structures géologiques

Les **Deep-Seated Landslide (DSL)** « glissements de grande ampleur »

Vision conceptuelle de l'évolution temporelle de la résistance d'un versant

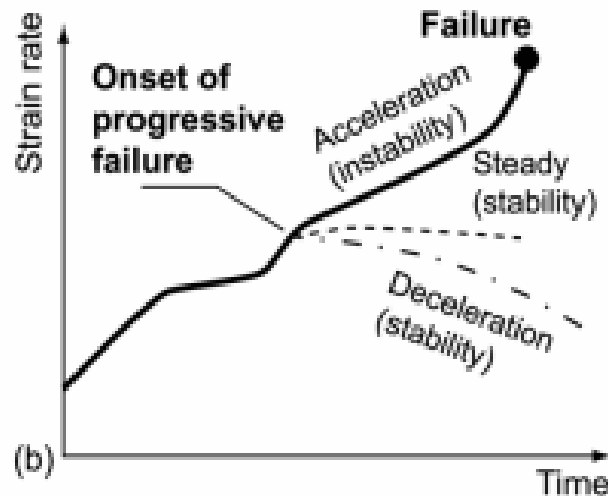
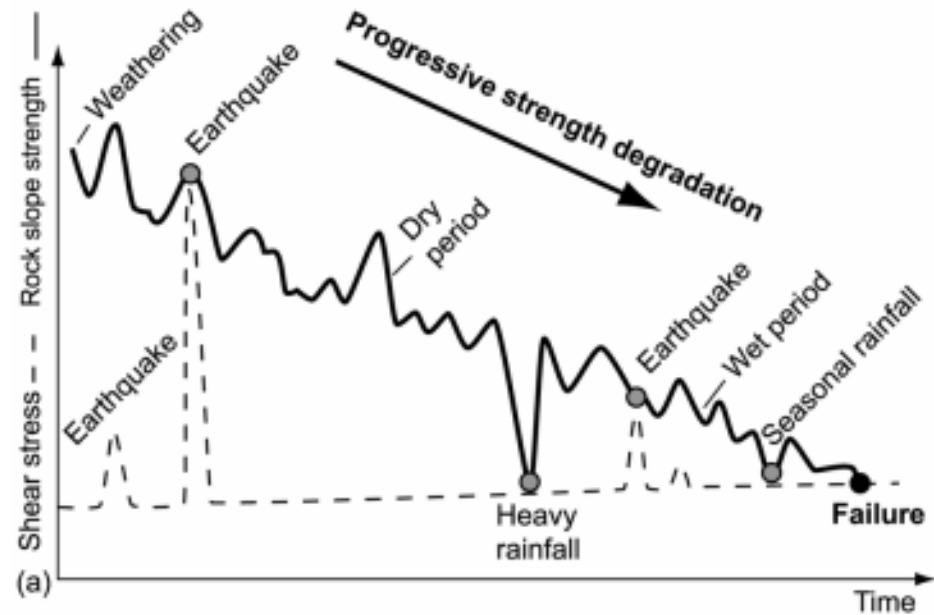
Facteurs préparatoires à la rupture

⇒ altération / endommagement progressif du massif

Facteurs déclenchants

⇒ provoquent la rupture catastrophique

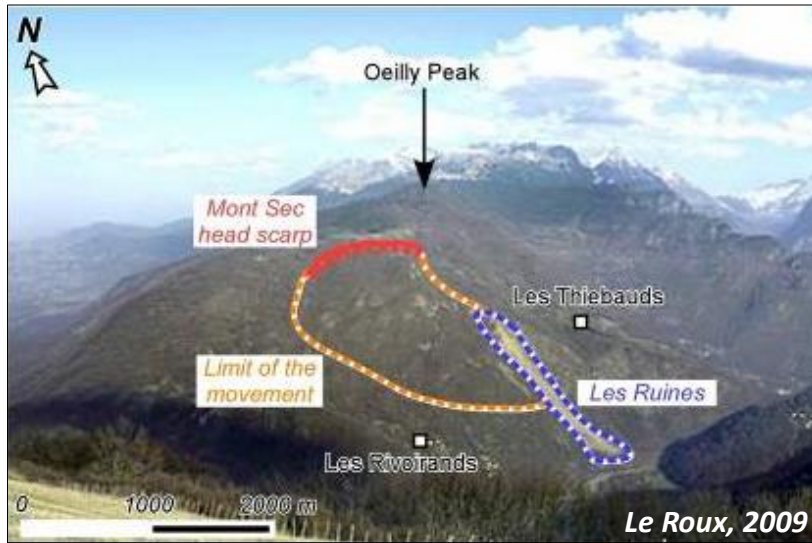
Quelle échelle de temps d'évolution ?



Prager et al., 2008

Facteurs de contrôle des DSL dans les Alpes ??

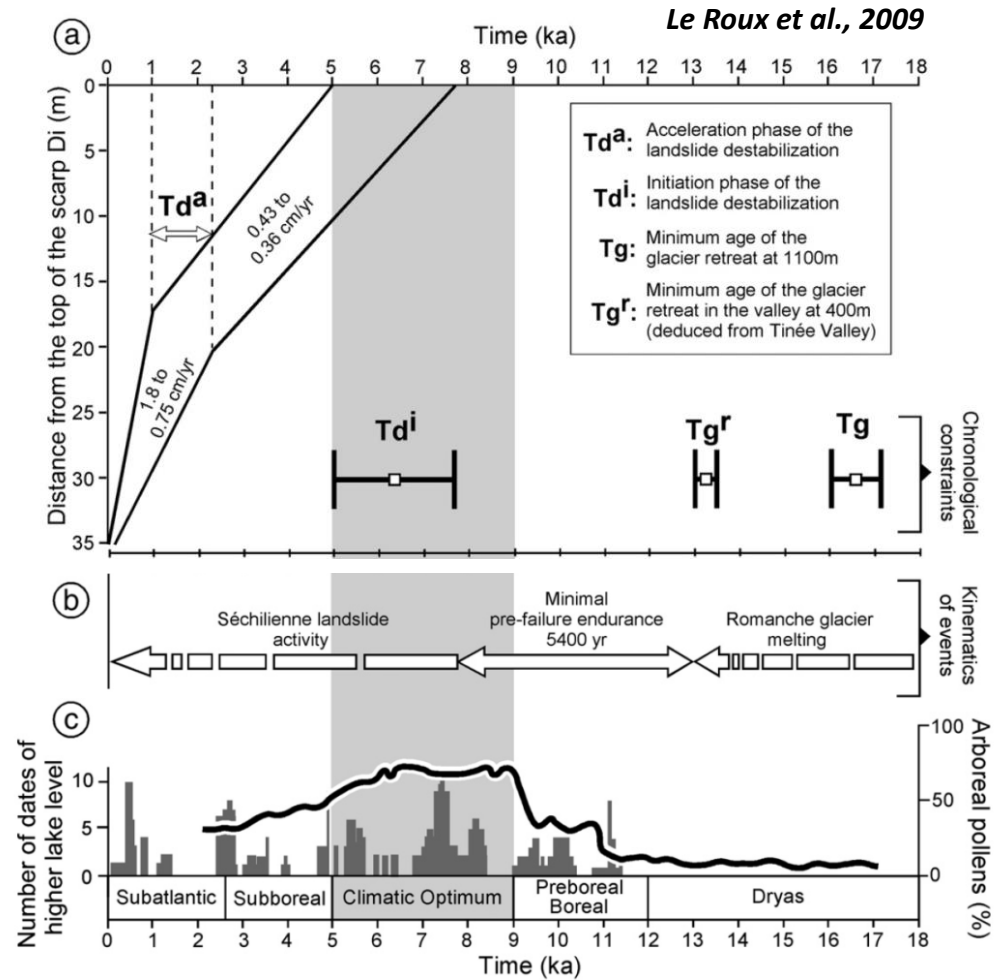
ex. du glissement de **Séchilienne** (38)



Initiation entre 5 à 8 ka BP

Rupture progressive (~0.5 cm/an)

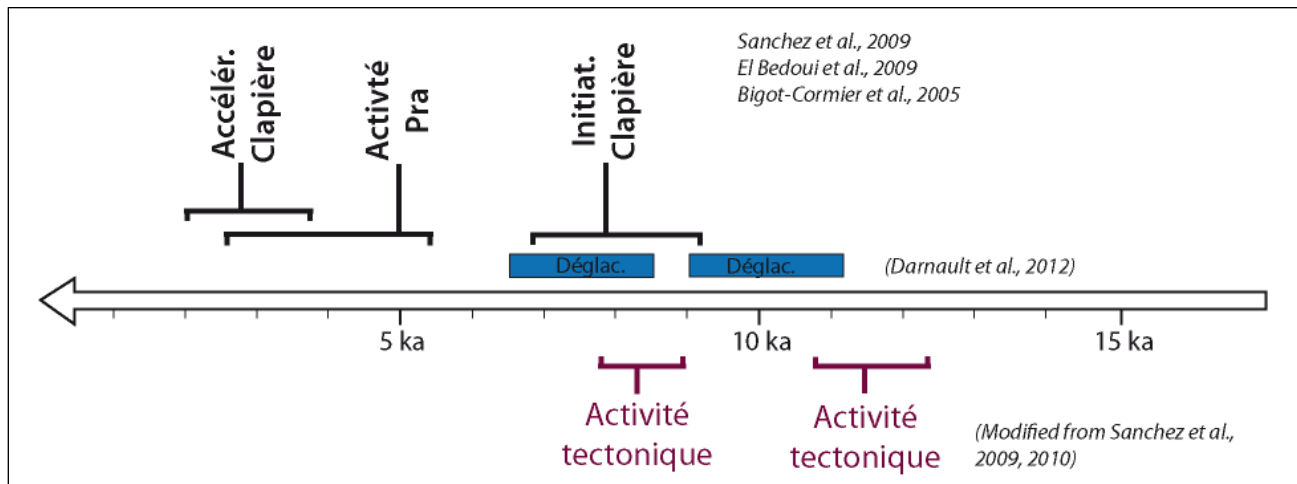
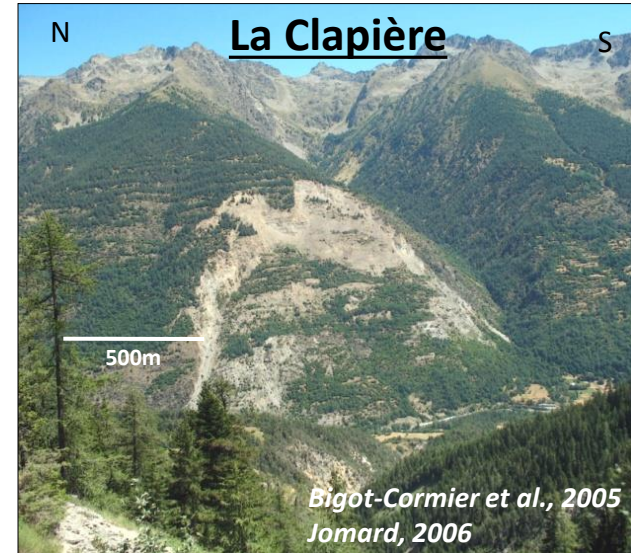
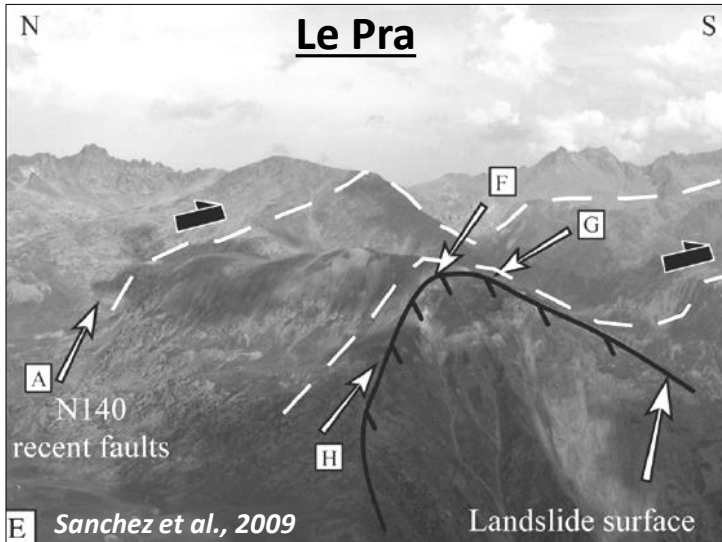
Phase d'accélération entre 1 et 2 ka BP



Plusieurs facteurs de contrôle possibles: **Déglaciation ? Forçages climatiques ?**

Facteurs de contrôle des DSL dans les Alpes ??

ex. des glissements de la Tinée (06)



Influence de l'héritage glaciaire ? Forçage Sismo-tectonique ? climatique ?

Problématique générale de la thèse :

Sur quelles échelles de temps les mouvements de versant de grande ampleur évoluent-ils ?

Quels sont les facteurs qui conditionnent leur initiation et leur évolution vers une rupture rapide (dans le cas de la chaîne Alpine) ?

★ Nécessité d'étudier un territoire géologiquement simple, si possible sans l'influence de processus glaciaires

⇒ **Analyse de la branche méridionale des chaînes subalpines** (financement par la région PACA)

• **Analyses cartographiques et structurales multi-échelles**

• **Contraintes sur les structures profondes: tomographie électrique**

★ Nécessité d'accéder à la cinématique long-terme des glissements et de contraindre temporellement les phases de ruptures

• **Datations grâce aux nucléides cosmogéniques produits *in-situ* (collaboration avec le CEREGE)**

Plan de l'exposé

Introduction et problématique

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur

- a) *Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution*
- b) *Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle*

3^{ème} partie : Chronologie et cinématique des ruptures: application des cosmonucléides

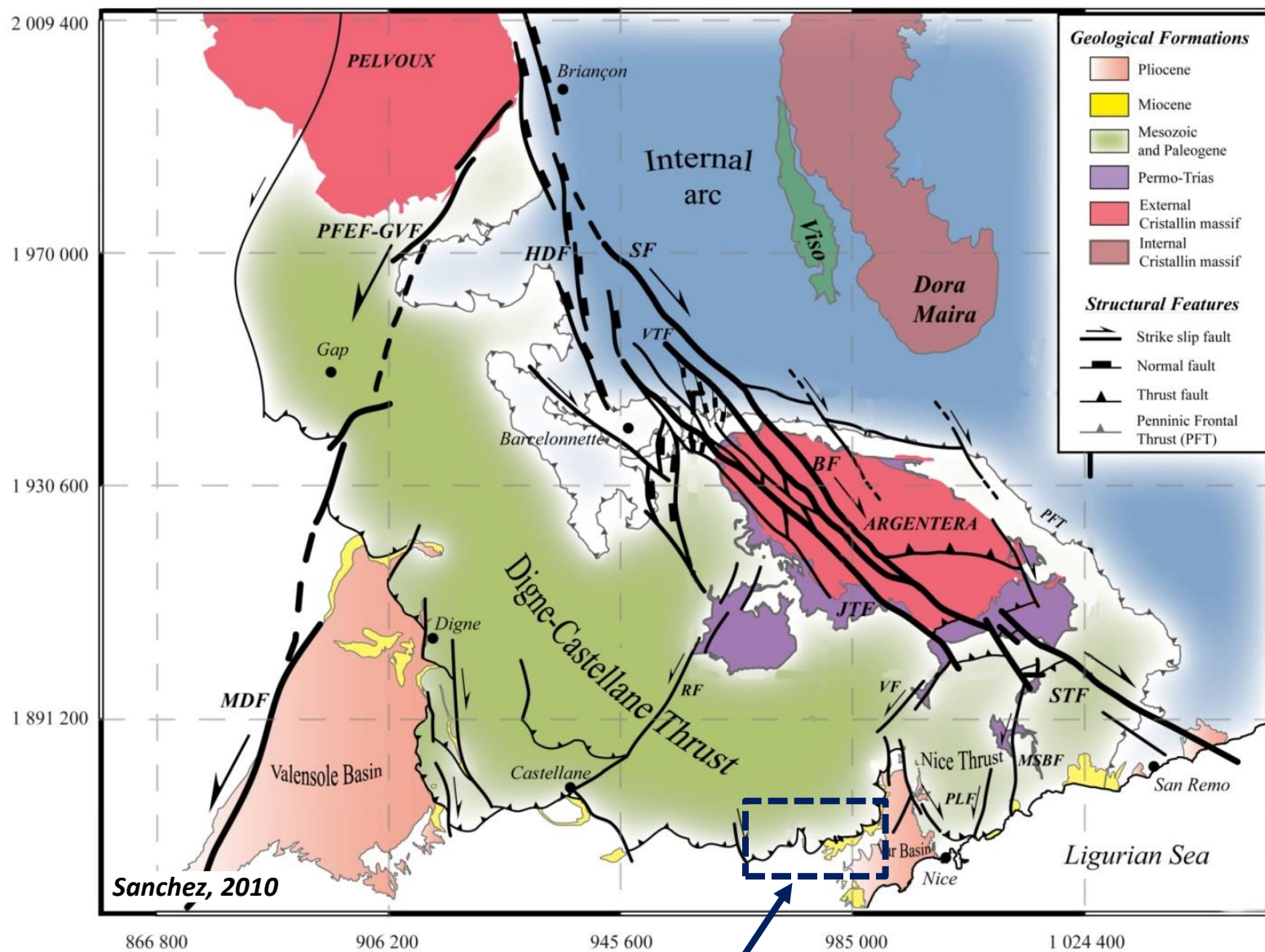
- a) *Principe de la méthode et stratégie*
- b) *Problèmes méthodologiques: la datation des cherts*
- c) *Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines*

4^{ème} partie: Discussion

- a) *Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines*
- b) *Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine*

Conclusion et perspectives

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales



Zone d'étude

Pas d'englacement au cours des derniers épisodes glaciaires

Julian, 1980

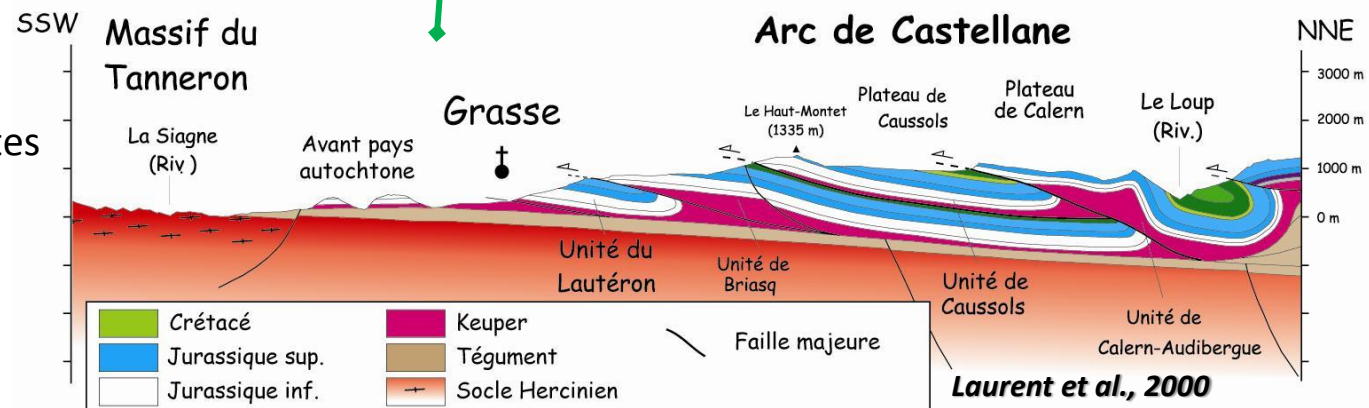
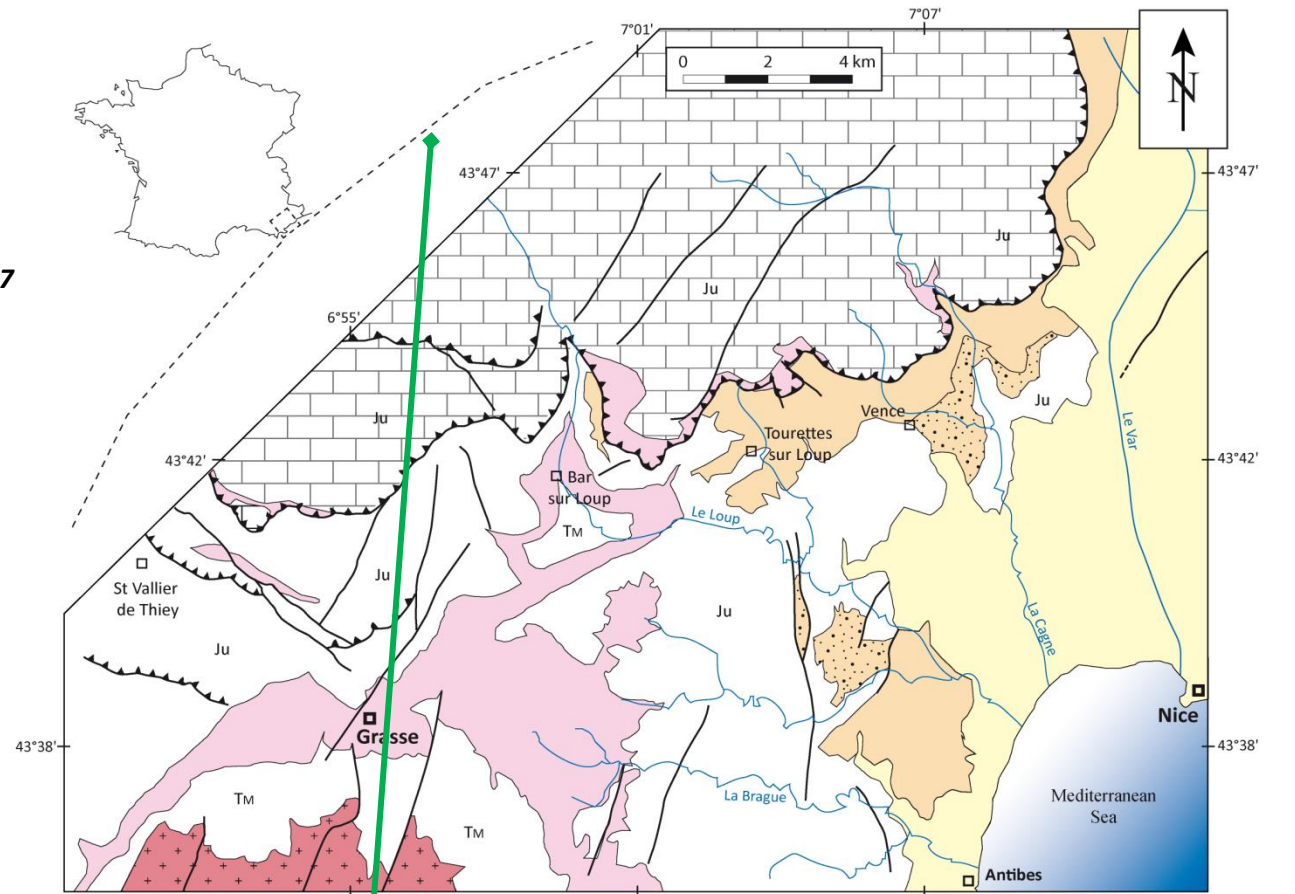
Bravard, 1987

Structuration héritée de la compression Alpine ~ N-S (Miocène)

Décollement dans les séries triasiques et chevauchements à vergence Sud

Empilement de nappes calcaires

Réseau de failles décrochantes N20-40° et N140-160°



Plan de l'exposé

Introduction et problématique

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur

- a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution*
- b) Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle*

3^{ème} partie : Chronologie et cinématique des ruptures: application des cosmonucléides

- a) Principe de la méthode et stratégie*
- b) Problèmes méthodologiques: la datation des cherts*
- c) Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines*

4^{ème} partie: Discussion

- a) Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines*
- b) Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine*

Conclusion et perspectives

SW

NE



Vue panoramique du versant de la Marbrière

Objectifs :

Valider l'identification des morpho-structures gravitaires présentes sur le front subalpin

Identifier les mécanismes à l'origine de ces morpho-structures et la typologie des glissements

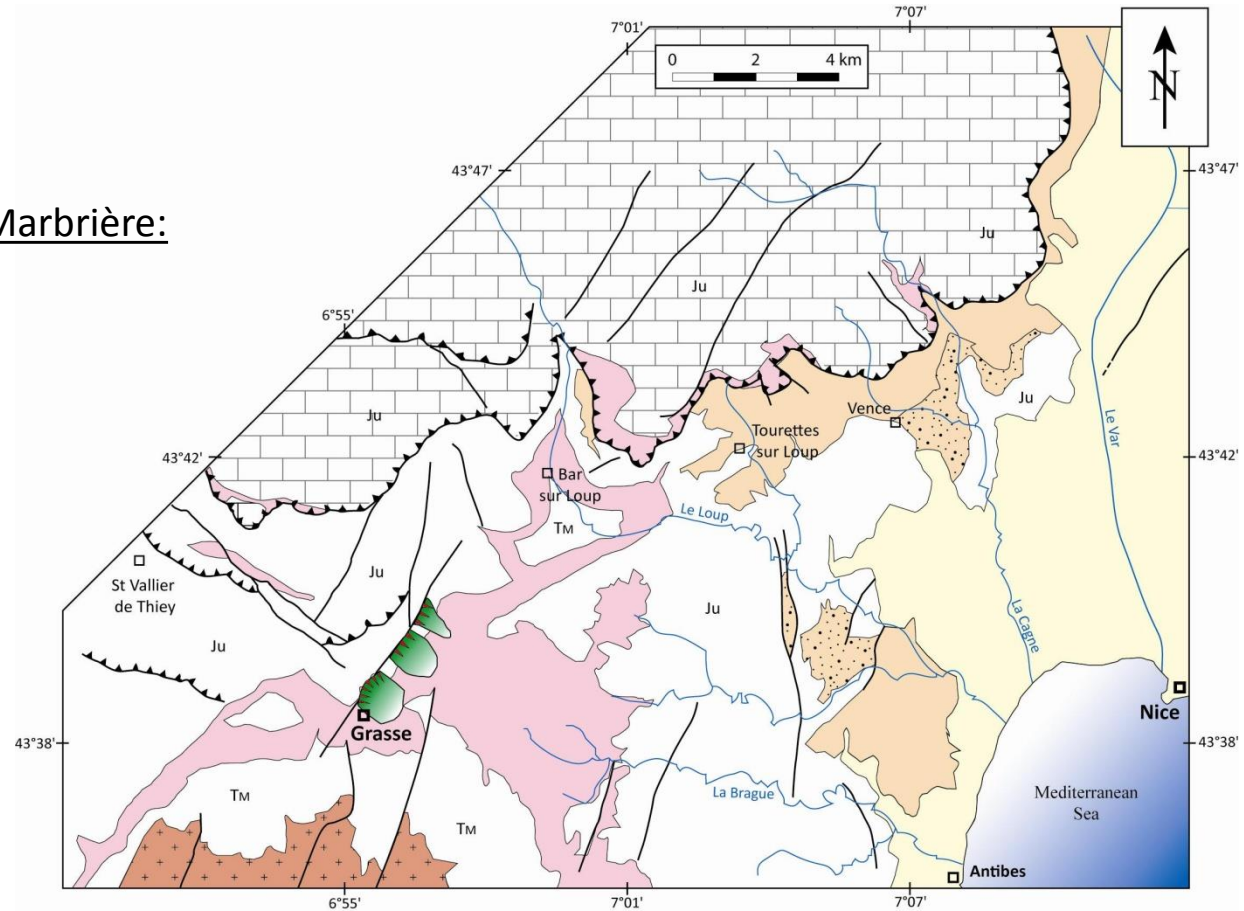
Etablir un recensement des mouvements de grande ampleur à l'échelle du front subalpin

Identification du glissement de la Marbrière:

Trois DSL majeurs sur un même versant

Total de $110 \cdot 10^6 \text{ m}^3$
 de matériel rocheux

Contexte de « rock-spreading »



Large-scale landslides
 ($v > 10^6 \text{ m}^3$)
 (mapped and analyzed)



Tertiary Unit

- Pliocene - Conglomerate
- Miocene - Marls and limestone
- Oligocene - Conglomerate

Mesozoique Unit

- Subalpine domain (Jurassic)
- Jurassic - Limestone and dolomite
- Trias Keuper - Mudstone and gypsum
- Trias Muchelkalk - Limestone

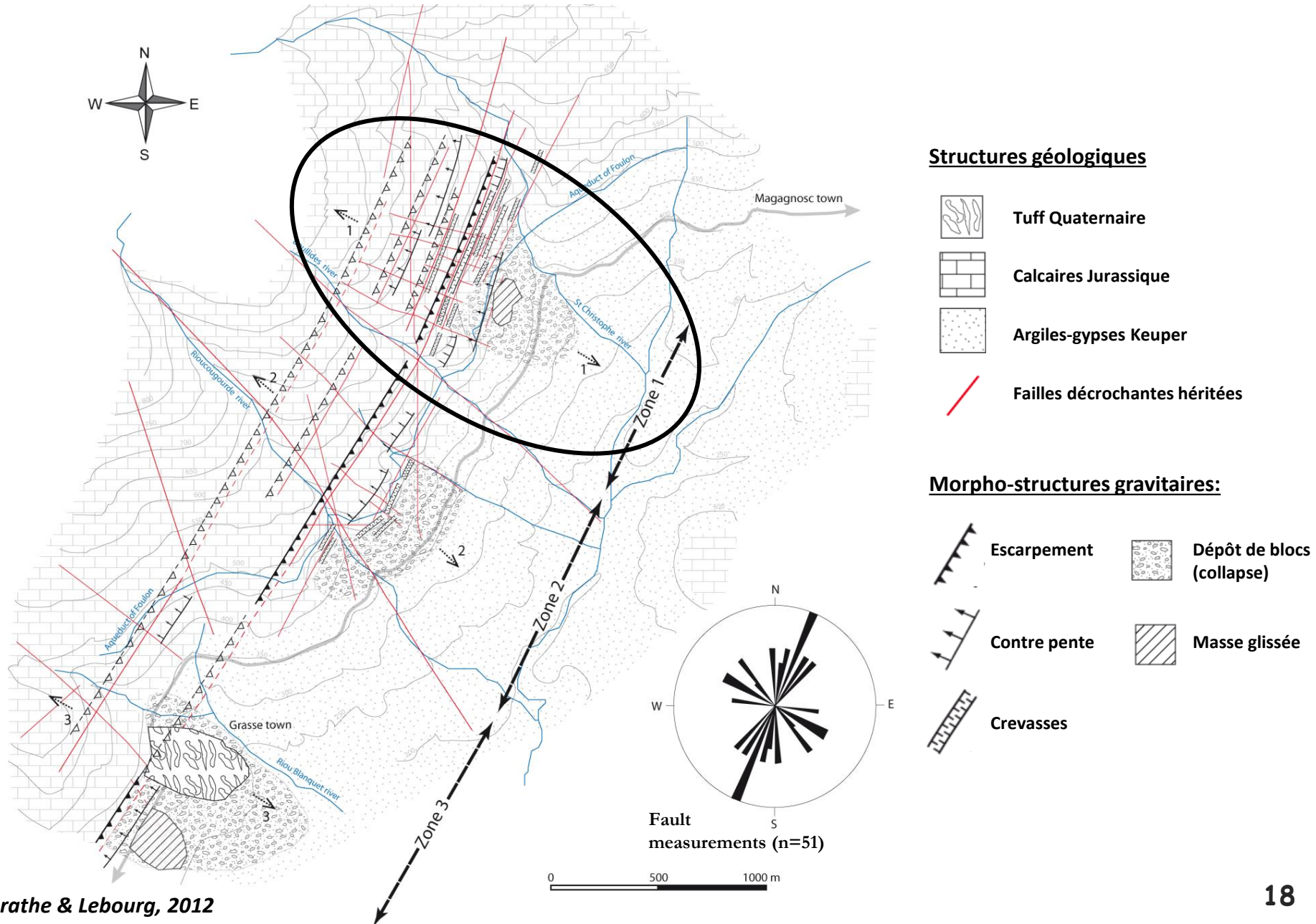
Hercynian bedrock

- Granit, schist, gneiss

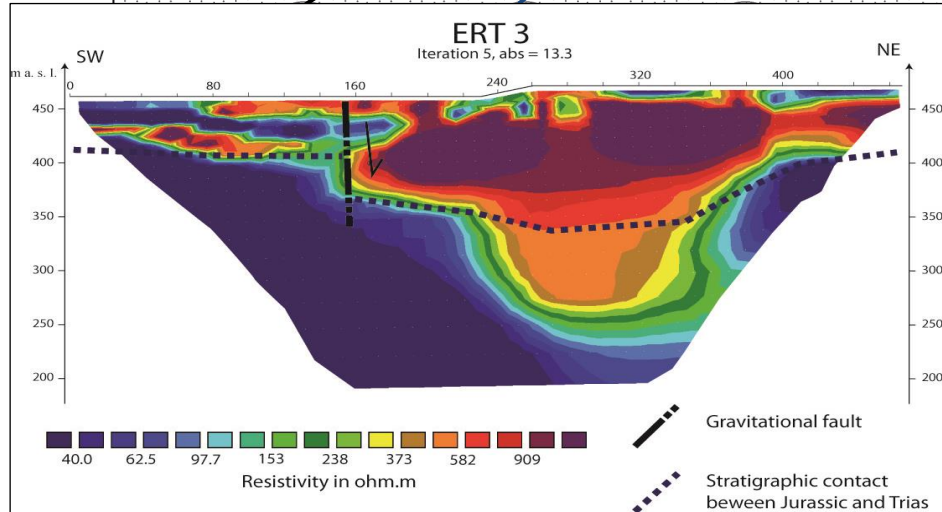
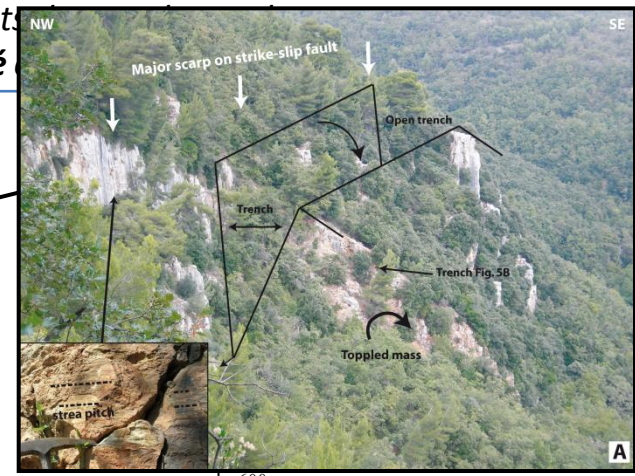
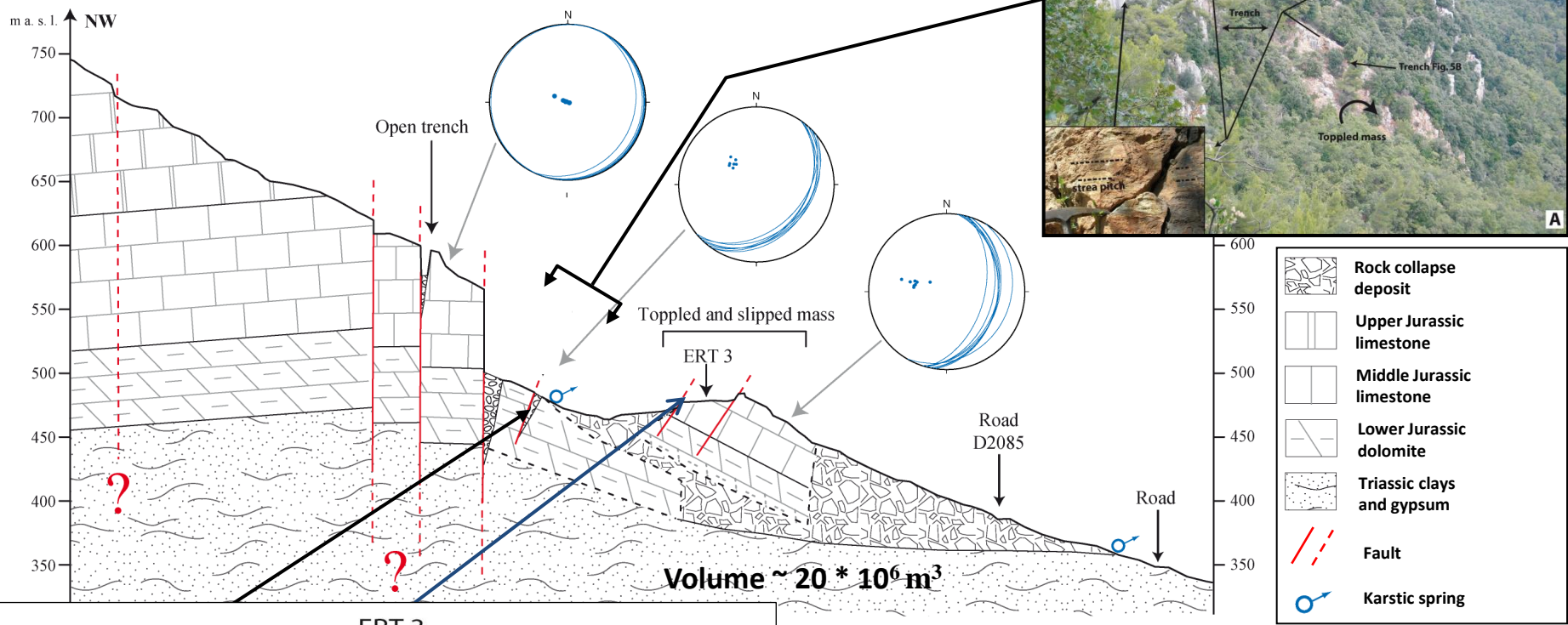
Tectonics faults

- Thrust faults
- Strike-slip faults

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution



2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité

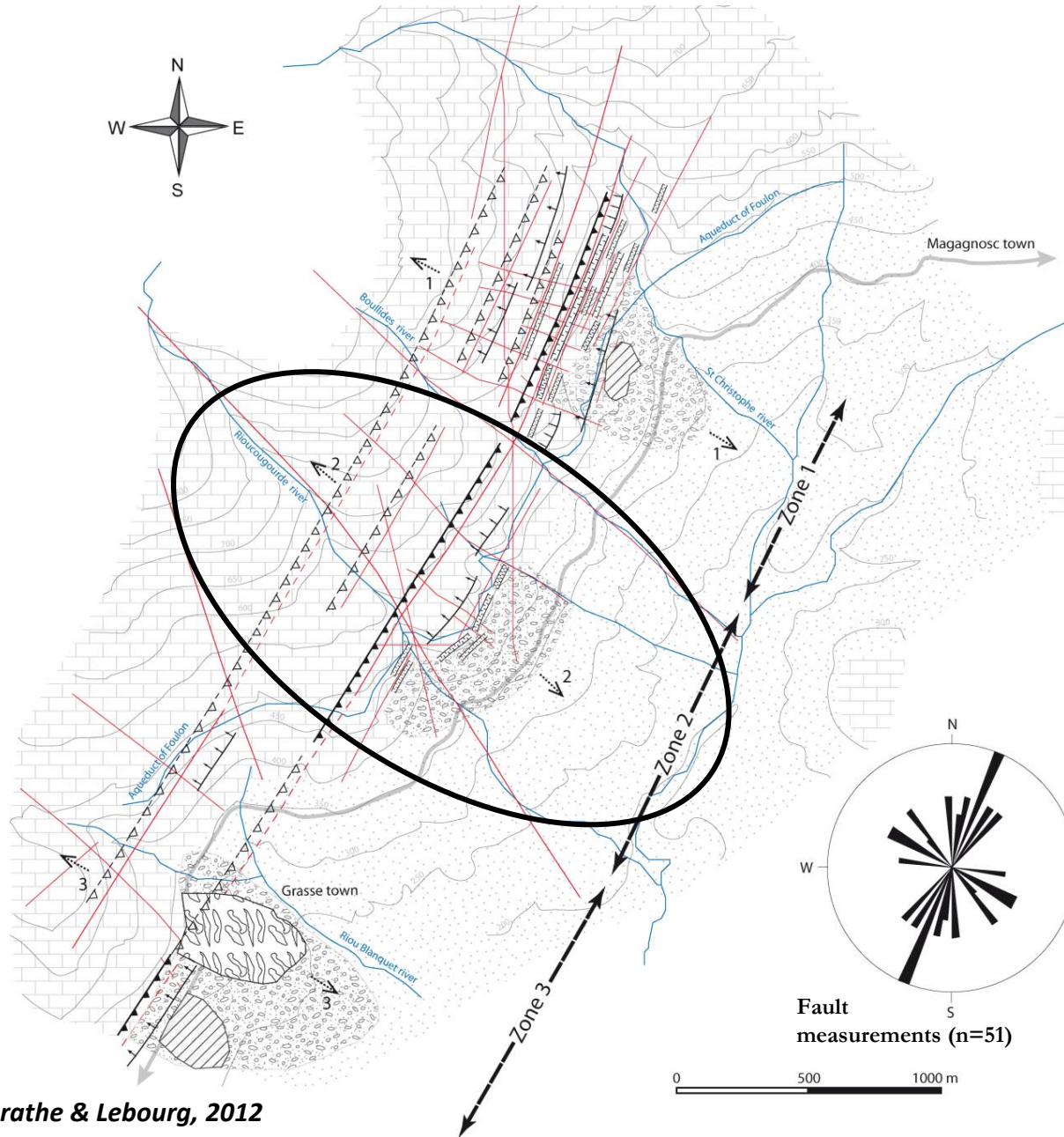


Subsidence





Basculement ($\sim 40^\circ$)

Collapse rocheux par glissement translationnel






2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution



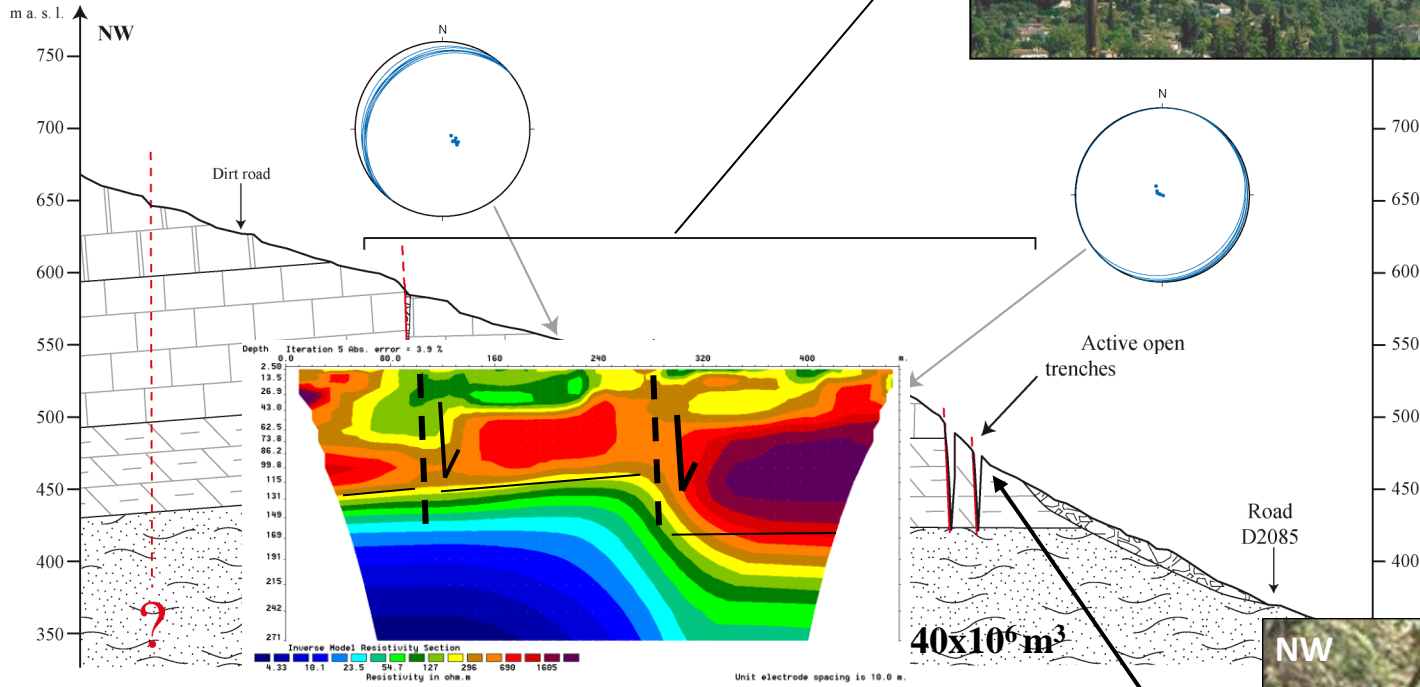
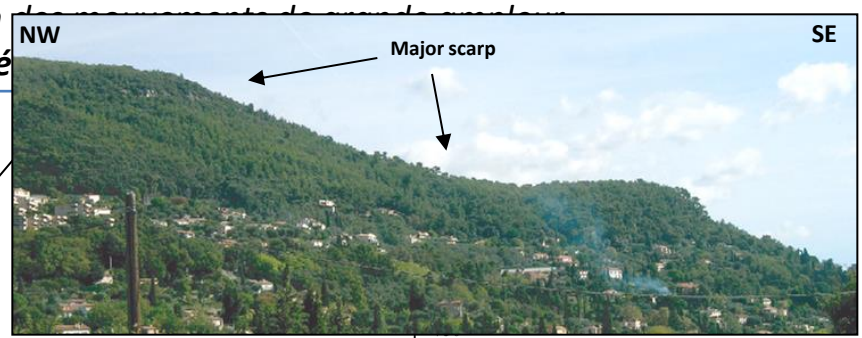
Structures géologiques

-  Tuff Quaternaire
-  Calcaires Jurassiques
-  Argiles-gypses Keuper
-  Failles décrochantes héritées

Morpho-structures gravitaires:

-  Escarpement
-  Contre pente
-  Crevasses
-  Dépôt de blocs (collapse)
-  Masse glissée

2^{ème} partie : Morphologie et distribution
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'é



- Rock collapse deposit
- Upper Jurassic limestone
- Middle Jurassic limestone
- Lower Jurassic dolomite
- Triassic clays and gypsum
- Fault
- Karstic spring

Subsidence

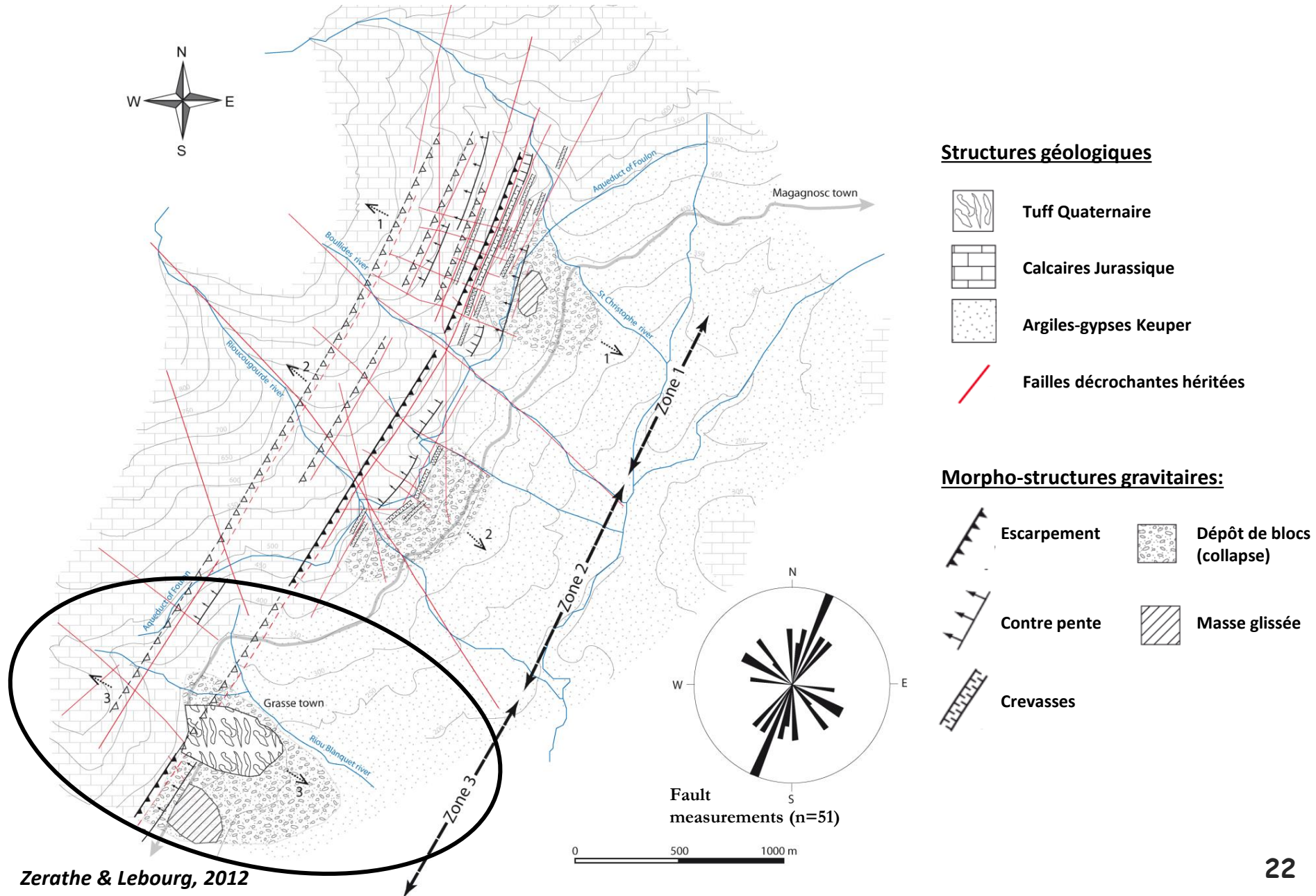
Léger basculement (~10°)

Glissements superficiels en pied de versant

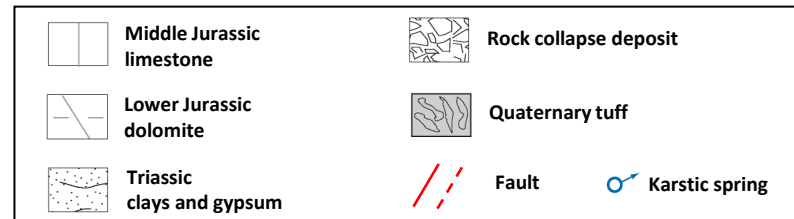
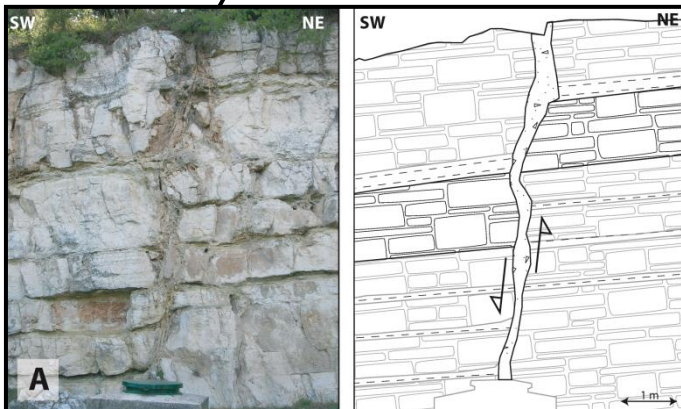
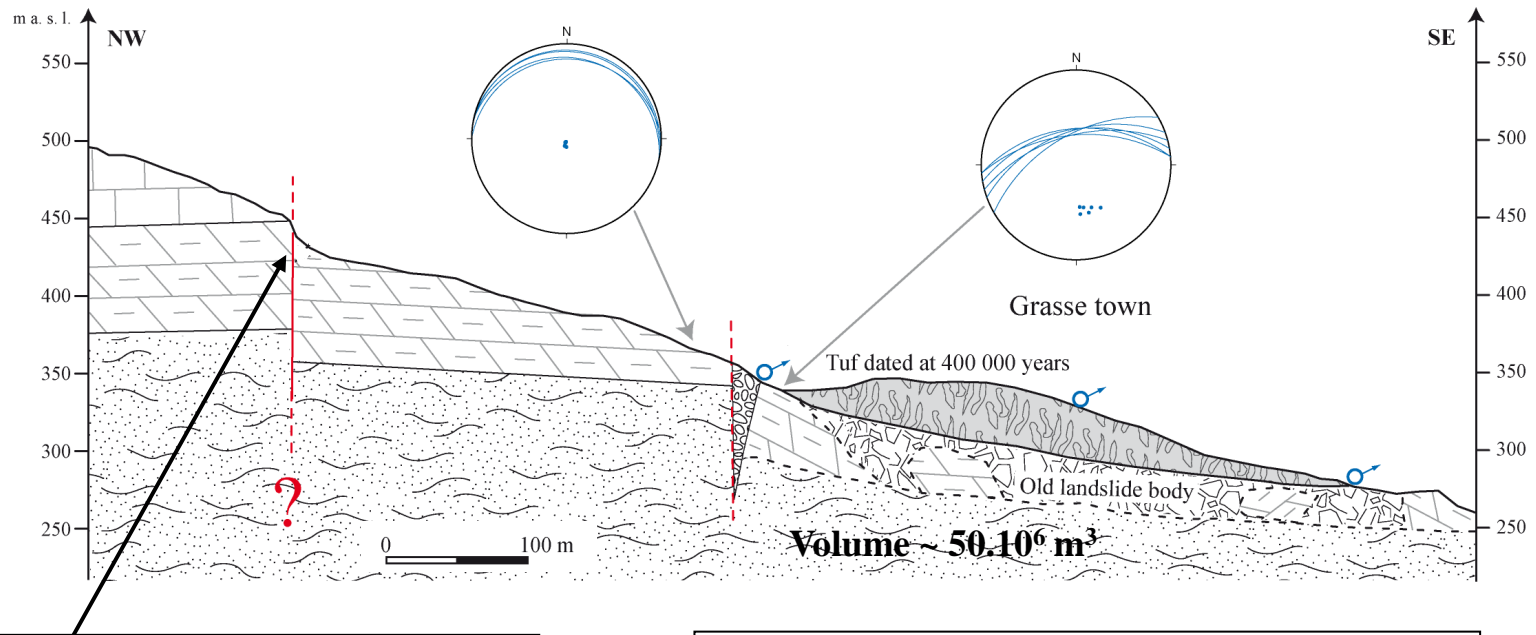


Crevasse ouverte active

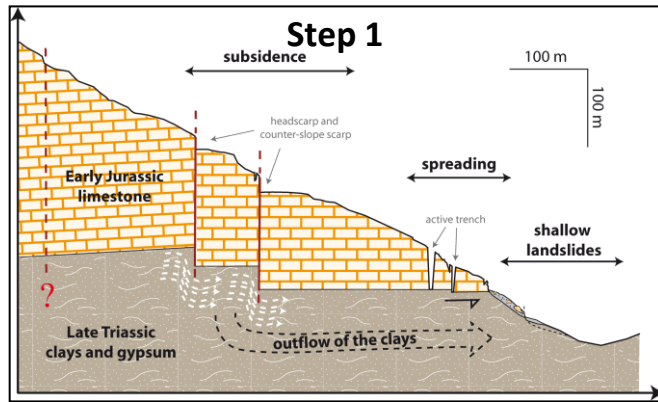
2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution



2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution



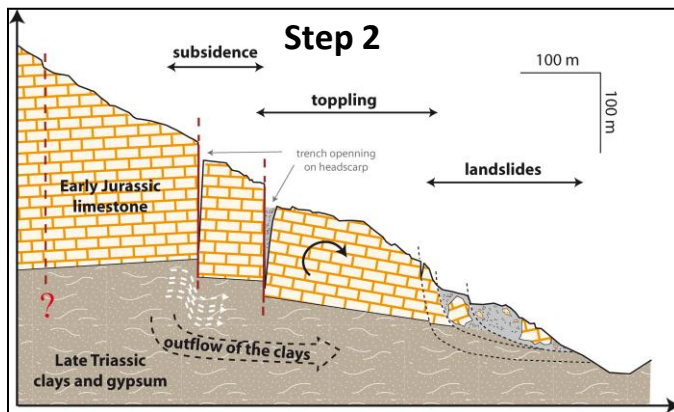
2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur
 a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'état de maturité et modèle d'évolution



Déformation lente

Fluage lent du soubassement argileux sous la charge lithostatique des compartiments calcaires individualisés par les failles

- **subsidence** de la partie supérieure du versant
- « **spreading** » en pied de versant

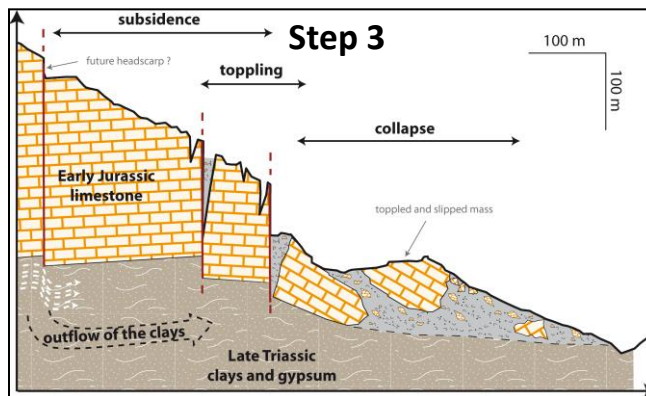


Accélération des déformations

Initiation de glissements dans la partie inférieure du versant et basculement progressif des compartiment calcaires

- ouvertures en tension des escarpements sommitaux

Zerathe & Lebourg, 2012



Collapse rocheux

Écroulement de grande ampleur par glissement translationnel suivant la stratification

- rétrogression des déformations

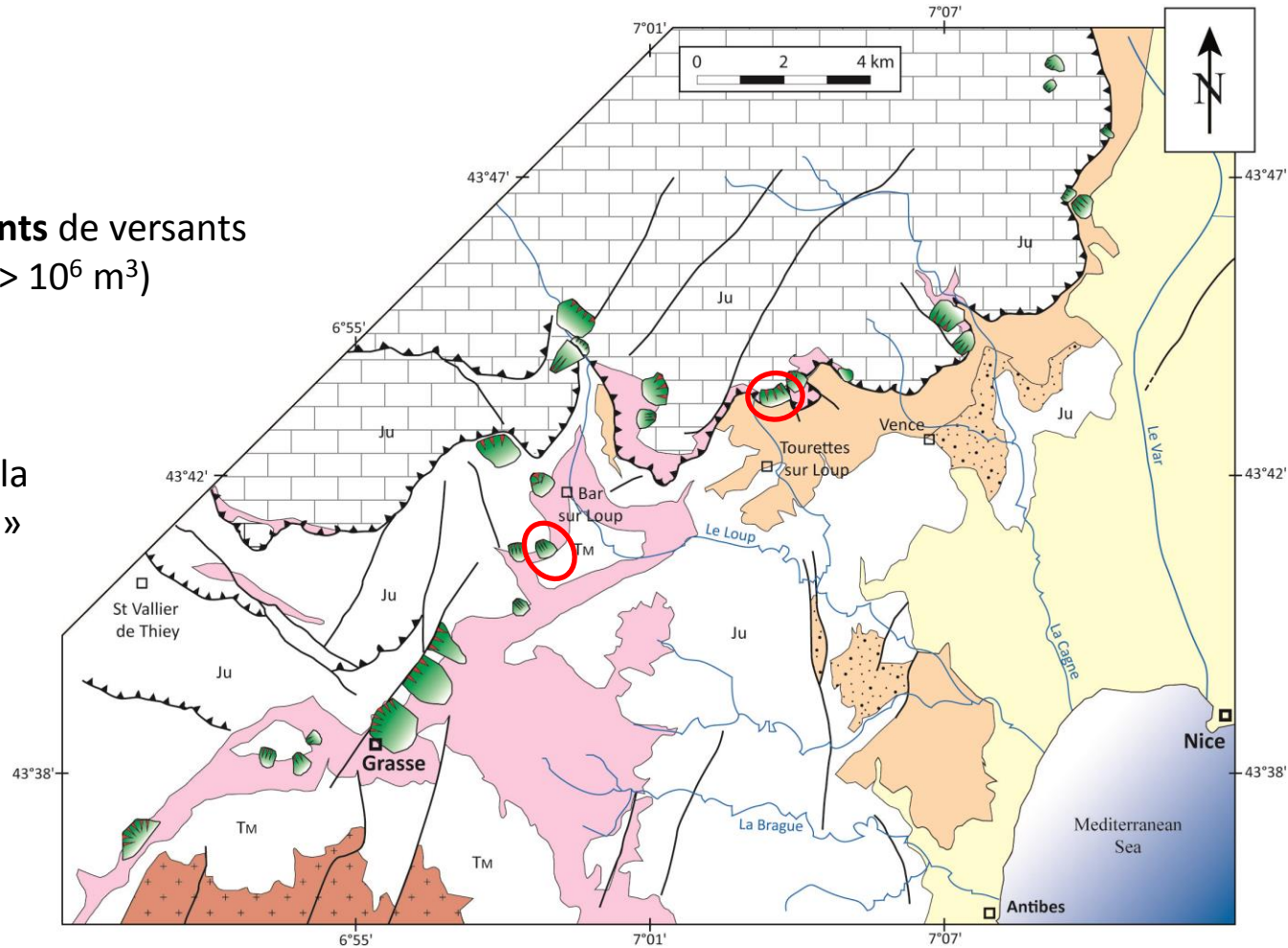
b) Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle

Plus de **20 grands mouvements** de versants identifiés (paléo-ruptures, $V > 10^6 \text{ m}^3$)

Typologie similaire à celle de la Marbrière « *block spreading* »

+ variantes

Majorité de glissements prédisposés par un héritage structural



Large-scale landslides
($v > 10^6 \text{ m}^3$)
(mapped and analyzed)



Tertiary Unit

- Pliocene - Conglomerate
- Miocene - Marls and limestone
- Oligocene - Conglomerate

Mesozoique Unit

- Subalpine domain (Jurassic)
- Jurassic - Limestone and dolomite
- Trias Keuper - Mudstone and gypsum
- Trias Murchelkalk - Limestone

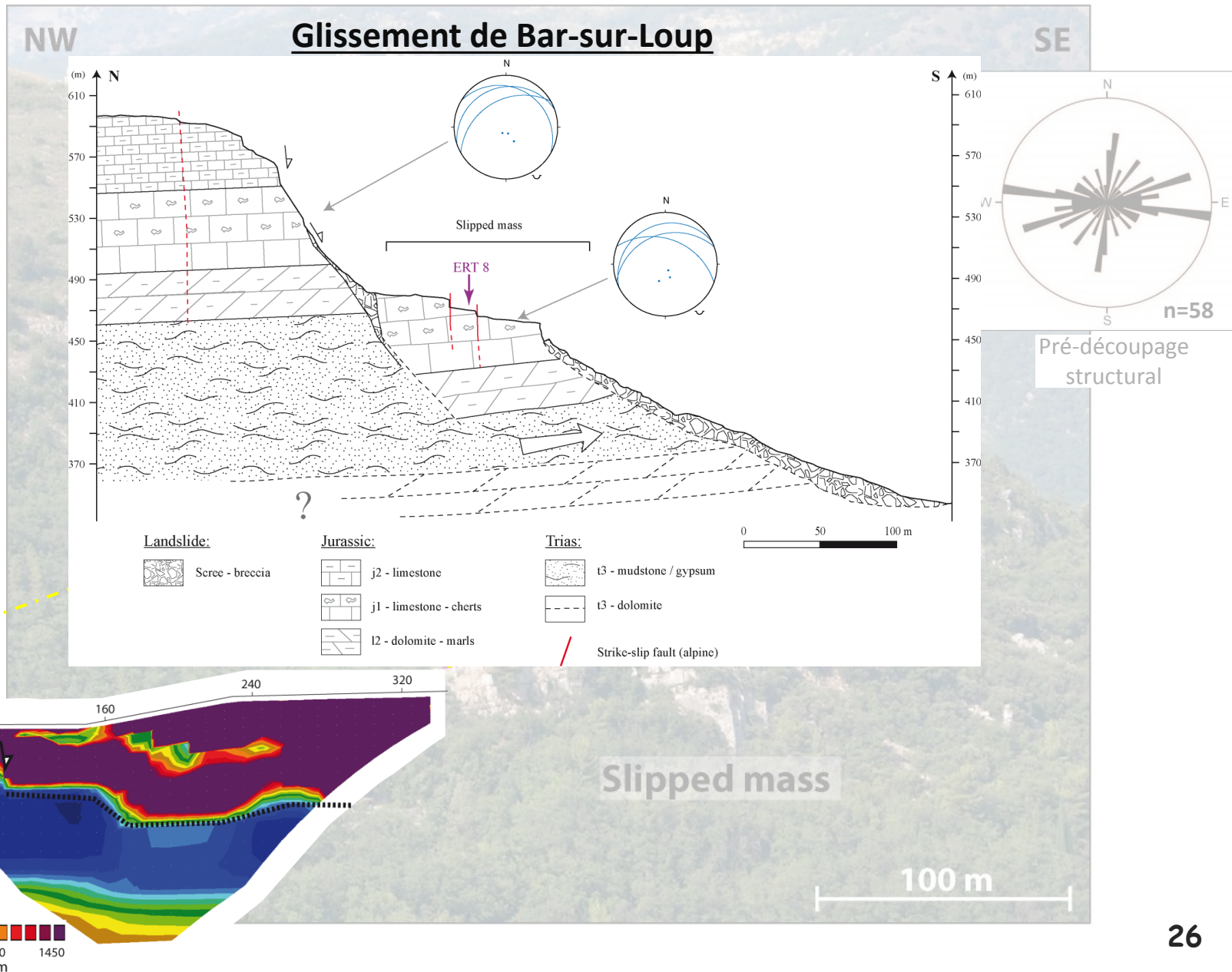
Hercynian bedrock

- Granit, schist, gneiss

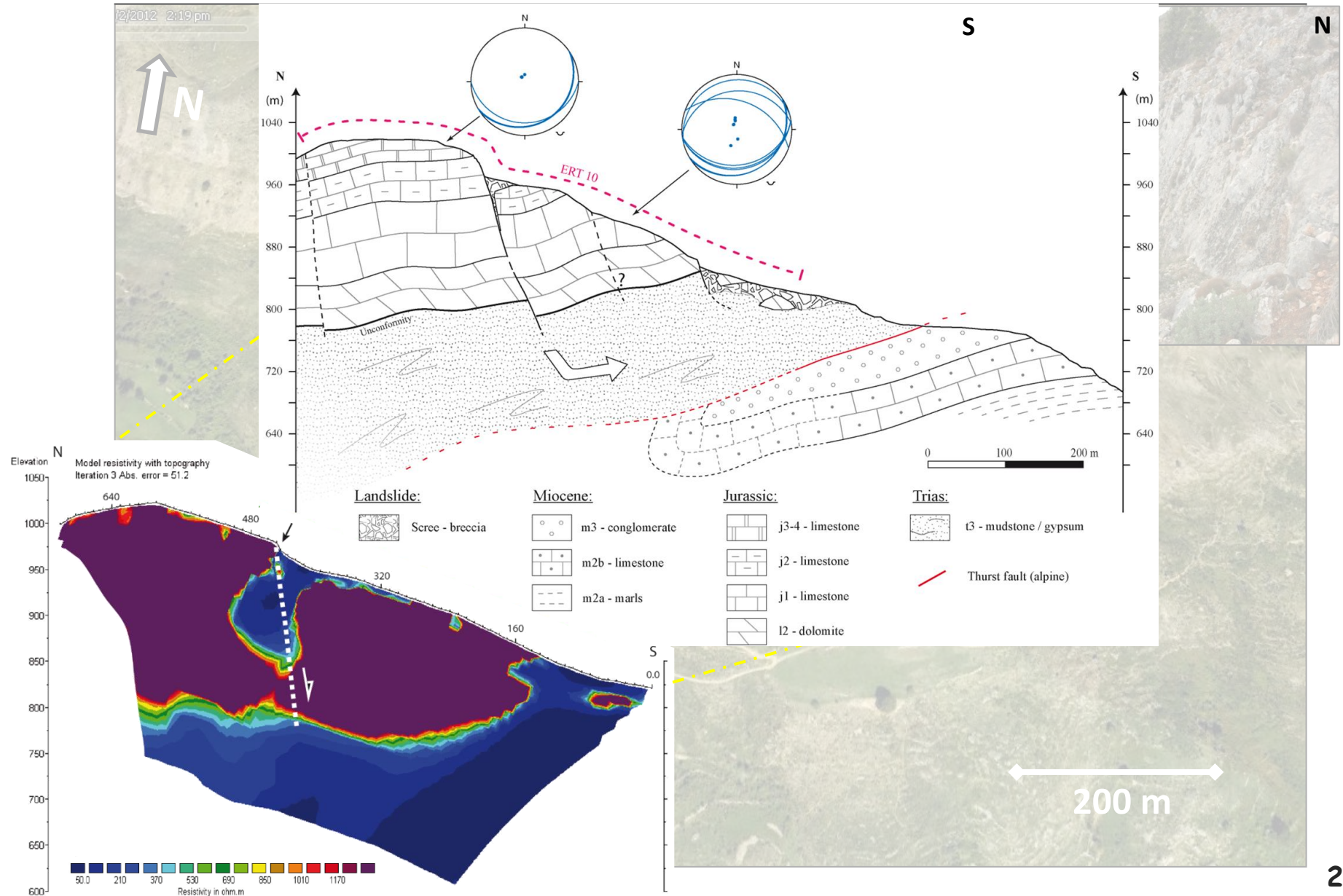
Tectonics faults

- Thrust faults
- Strike-slip faults

Absence de rotation de la masse glissée



Glissement du Caire



Synthèse

- 1 Une vingtaine de paléo-glissements de grande ampleur nouvellement identifiés sur le front subalpin (*validation géophysique*)
- 2 Glissements profonds de type « rock-spreading » caractérisés par différents modèles d'évolution (*collapse rocheux probable*)
- 3 Fort contrôle de l'héritage structural sur l'initiation et la morphologie des glissements (*validation géophysique*)
- 4 Différents état de maturités identifiés (*morphologie, préservation de l'escarpement*)

Déterminer l'âge des ruptures

Valider les hypothèses sur la cinématique de ces glissements

Plan de l'exposé

Introduction et problématique

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur

- a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'états de maturité et modèle d'évolution*
- b) Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle*

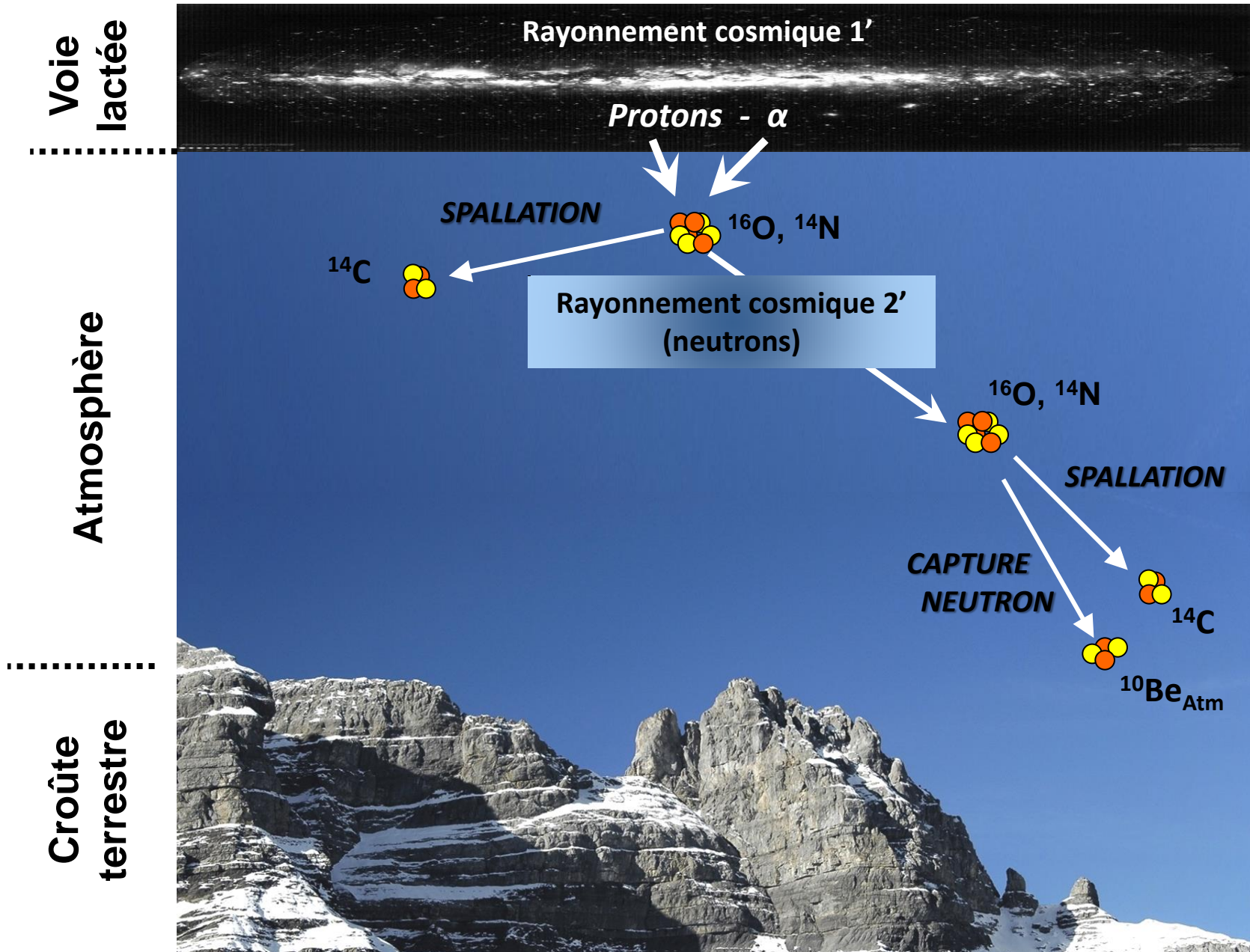
3^{ème} partie : Chronologie et cinématique des ruptures: application des cosmonucléides

- a) Principe de la méthode et stratégie*
- b) Problèmes méthodologiques: la datation des cherts*
- c) Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines*

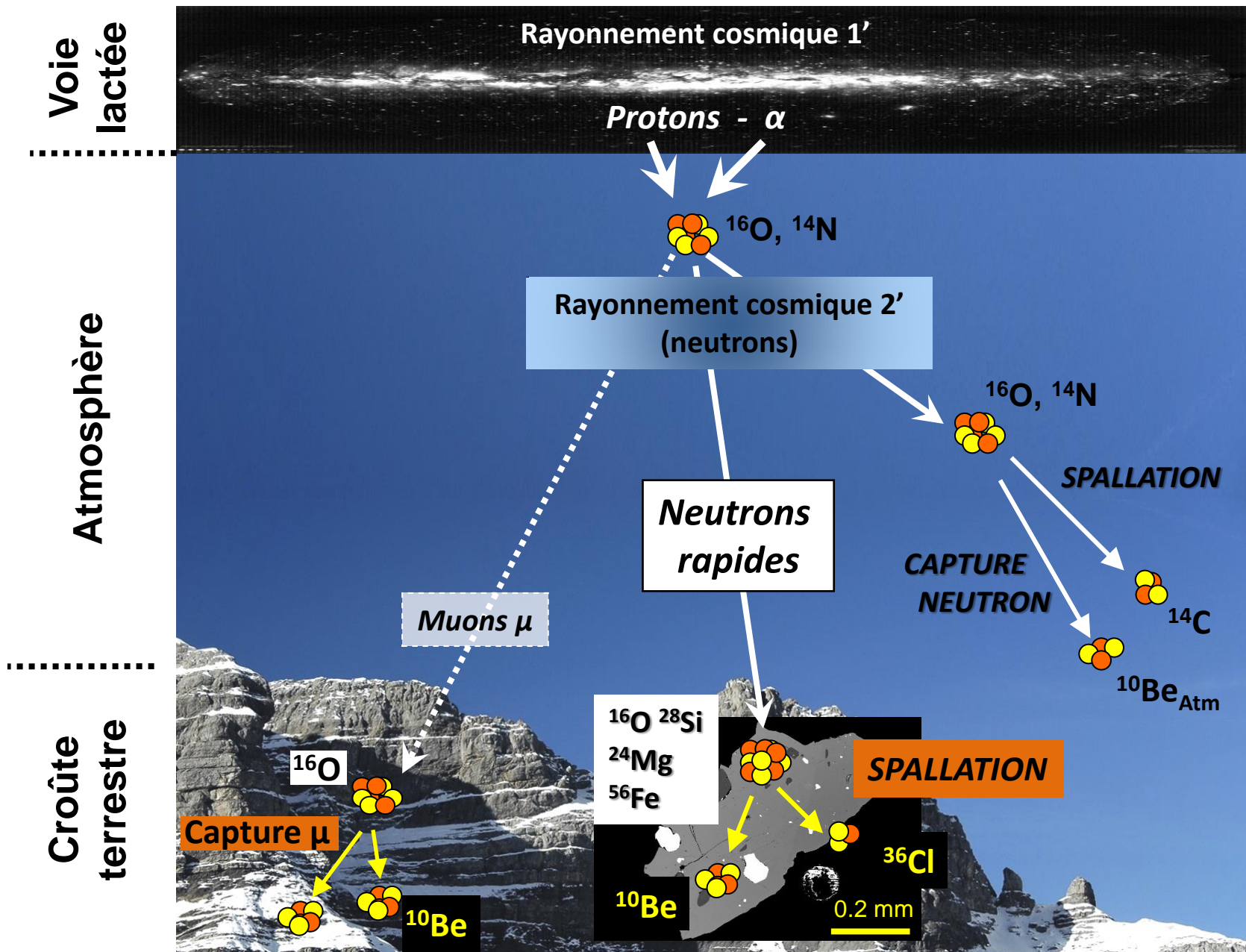
4^{ème} partie: Discussion

- a) Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines*
- b) Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine*

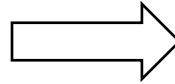
Conclusion et perspectives



a) Principe de la méthode et stratégie

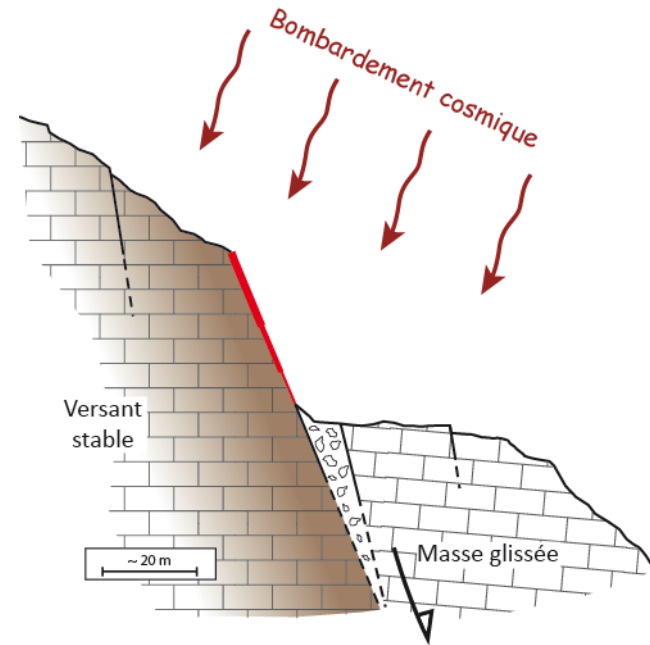


Application aux
mouvements de versants



Profil échantillonnage vertical:

- Age initiation de l'instabilité
- Cinématique du glissement

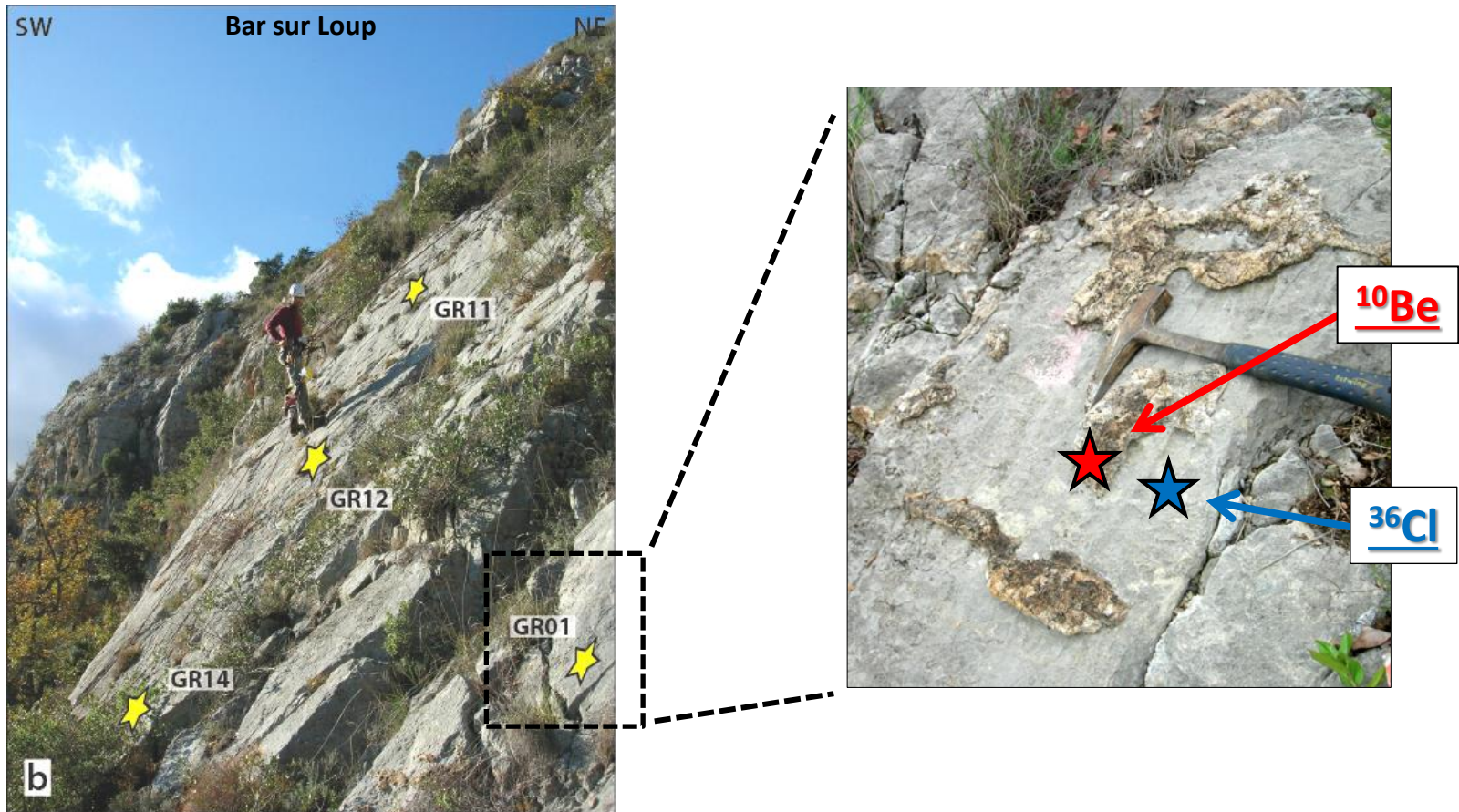


Paramètres clés, nécessaires au calcul d'un âge d'exposition :

- 1 Concentration en nucléides cosmogéniques (*Chimie + SMA*)
- 2 Taux de production (*atm/gr/an*)
- 3 Demi-vie du radionucléide, taux d'érosion local, héritage ...

a) Principe de la méthode et stratégie

Problématique des chaînes subalpines = lithologies carbonatées... mais avec la présence de quelques concrétions de cherts (silice diagenétique)

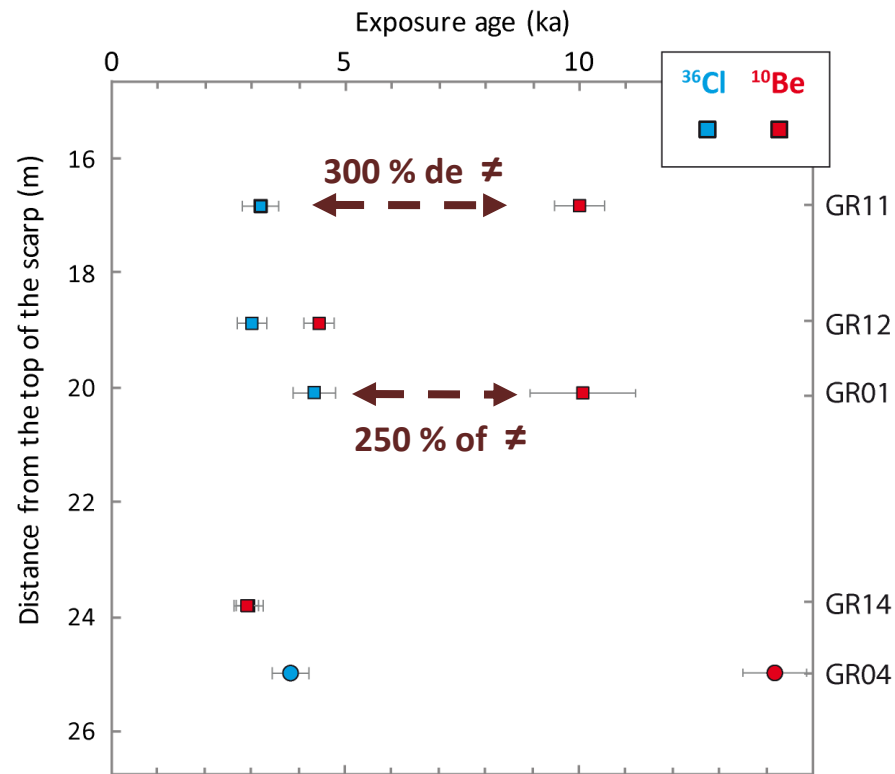


Objectifs premiers:

- Mieux contraindre les âges
- Valider l'approche ^{36}Cl

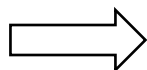
b) Problèmes méthodologiques: la datation des cherts

**Problème majeur de
corrélation entre les
deux méthodes !!**



Zerathe et al., 2013

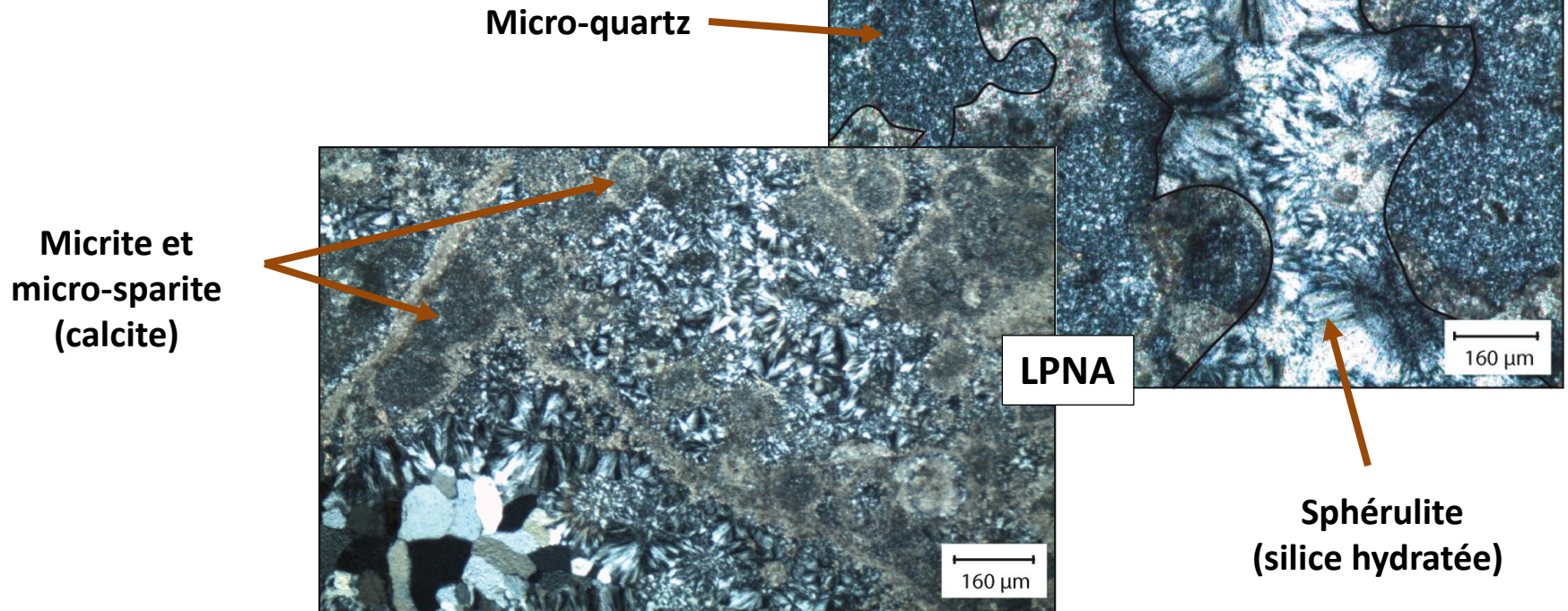
Hypothèse d'un biais méthodologique lié à l'application « ¹⁰Be – Chert »



Nécessité de revoir la méthodologie !

Analyse pétrochimique et minéralogique
des cherts

Zerathe et al., 2013



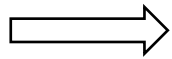
Origines possibles de la surconcentration en ^{10}Be :

→ Contamination par du ^{10}Be atmosphérique (Boaretto et al., 2000)

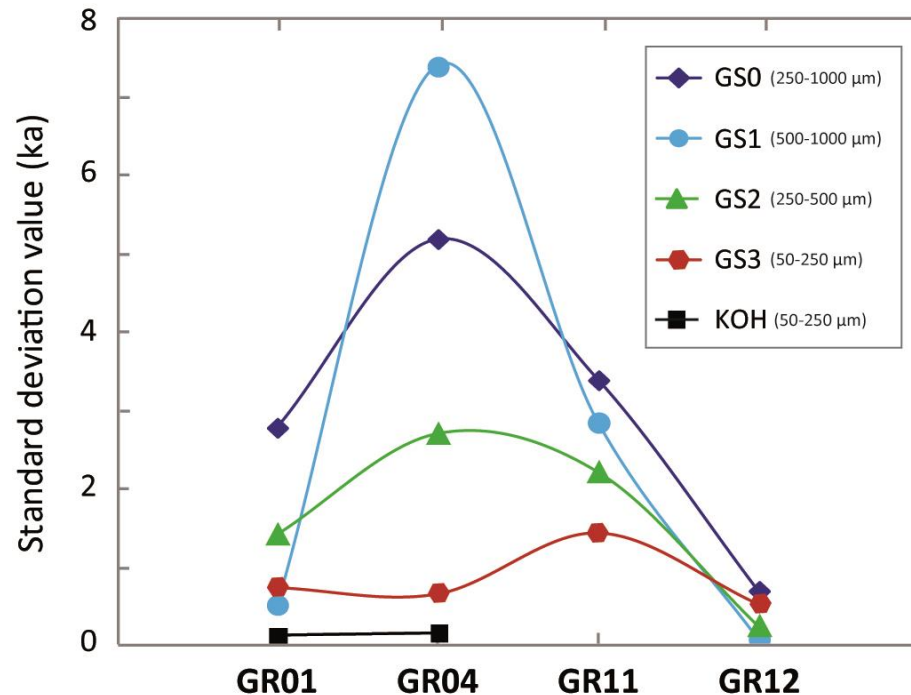
→ Surproduction de ^{10}Be dans de la calcite (Braucher et al., 2005, 2006)

→ Adsorption massive de ^{10}Be sur la silice hydratée (Verstraete, 2005)

Ré-échantillonnage et « reprocessing » de quatre échantillons de chert



Nombreux tests méthodologiques



Zerathe et al., 2013

Origine probable de la surconcentration:

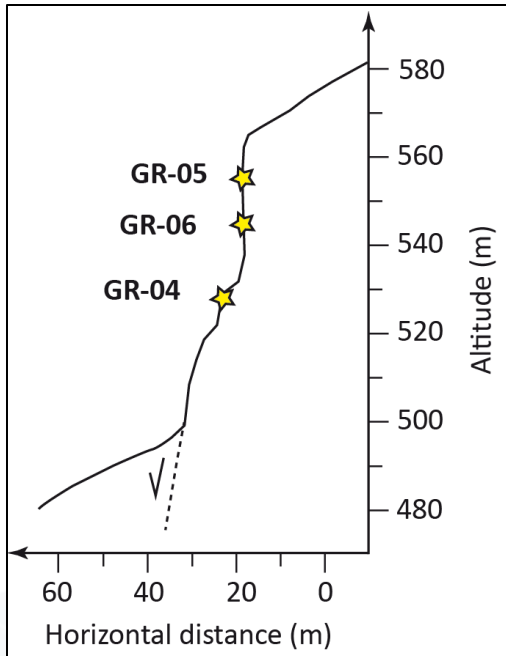
→ Adsorption massive de ^{10}Be par la silice hydratée

Nécessiter d'éliminer cette phase minérale pour obtenir des âges corrects

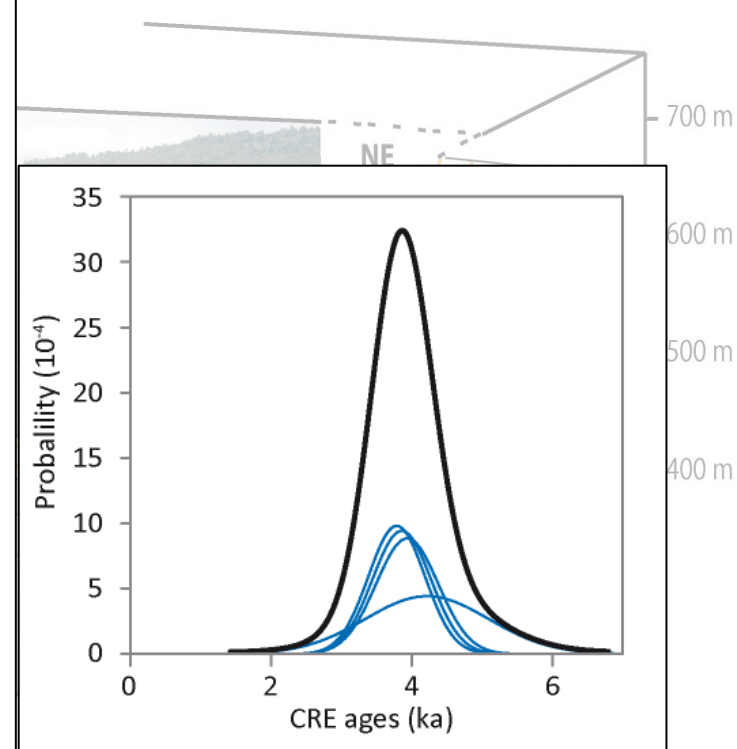
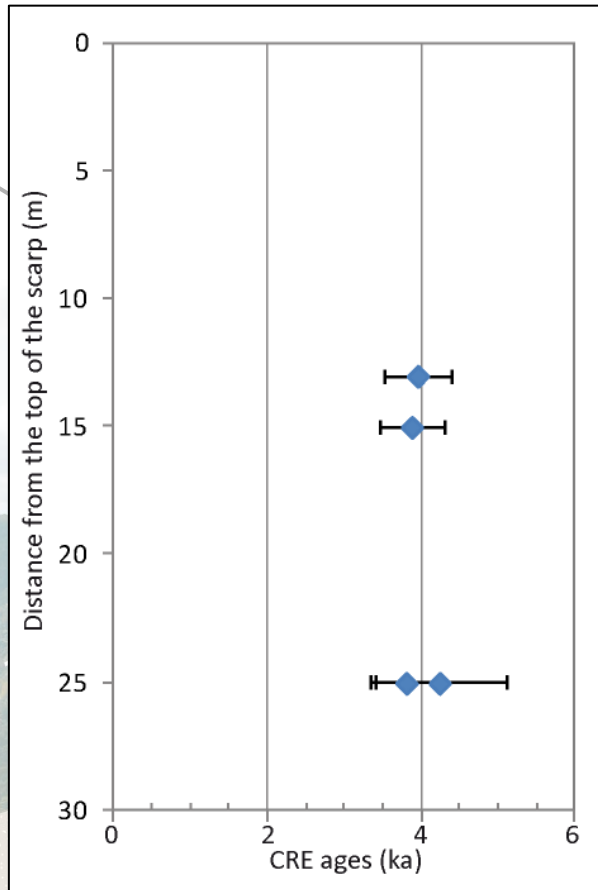


Six glissements sélectionnés pour la réalisation de profils de datation

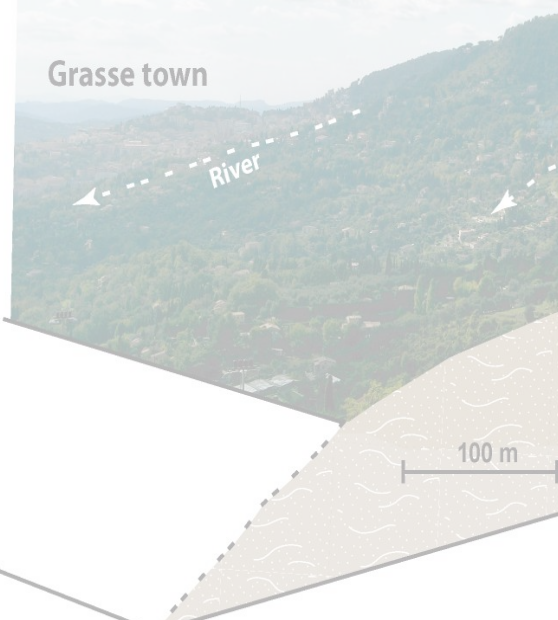
c) Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines

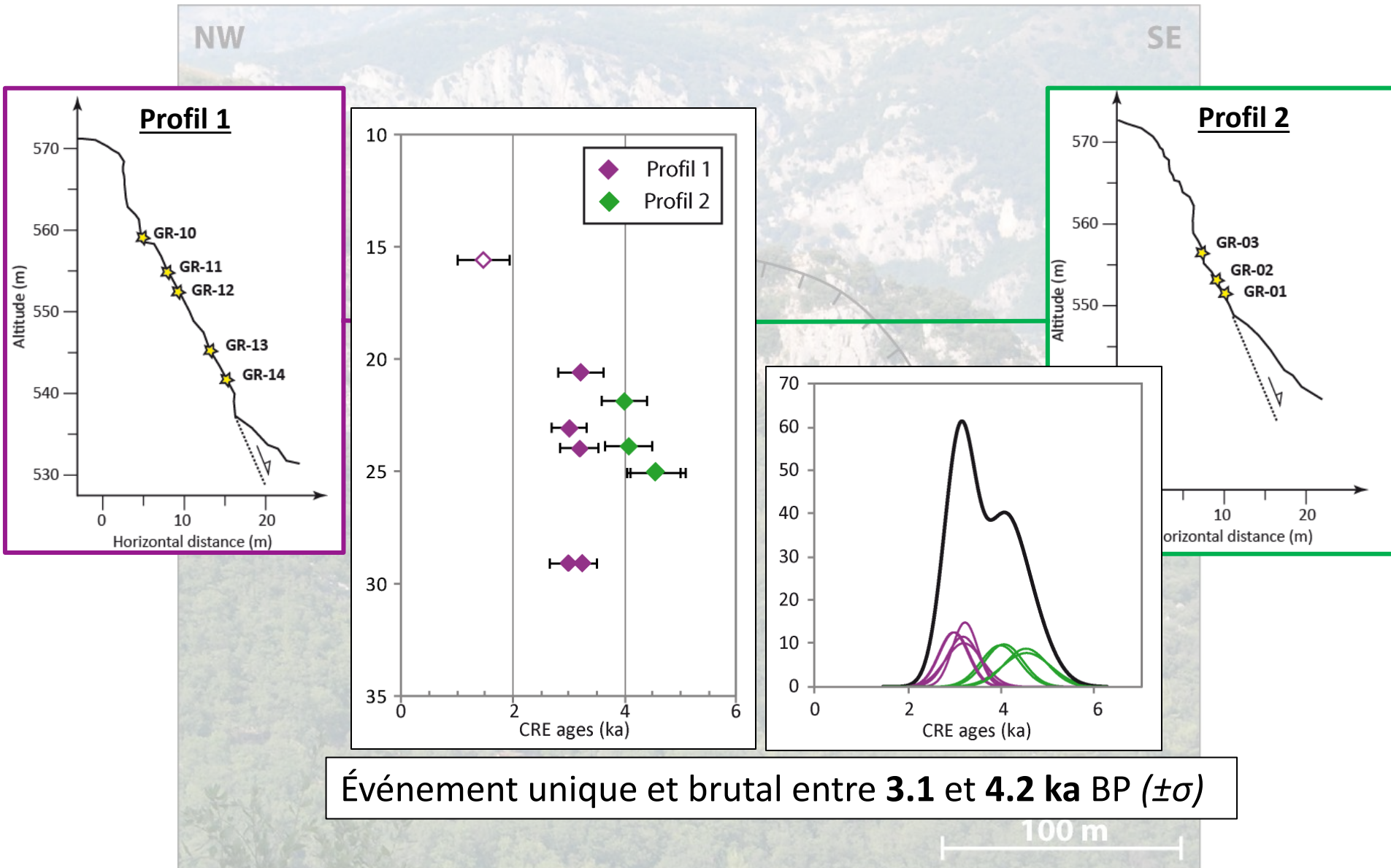


Zone 1 de la Marbrière



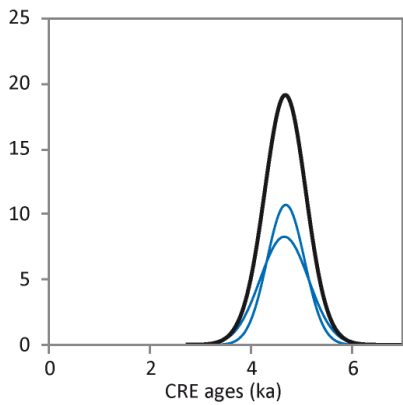
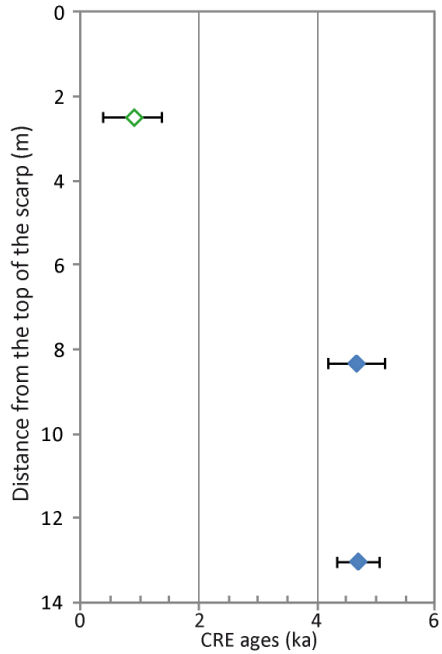
Événement unique et brutal à 3.9 ± 0.5 ka BP ($\pm\sigma$)





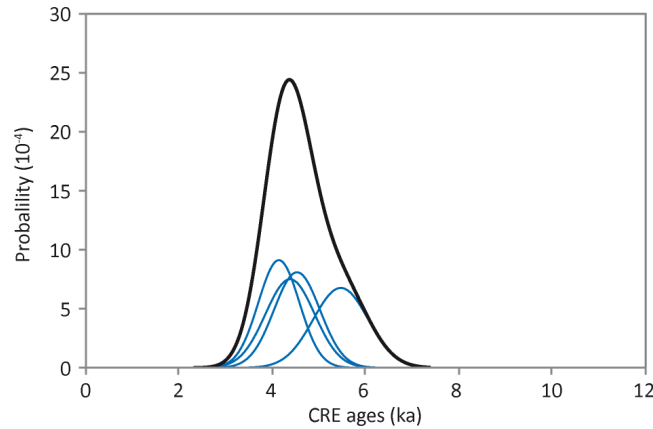
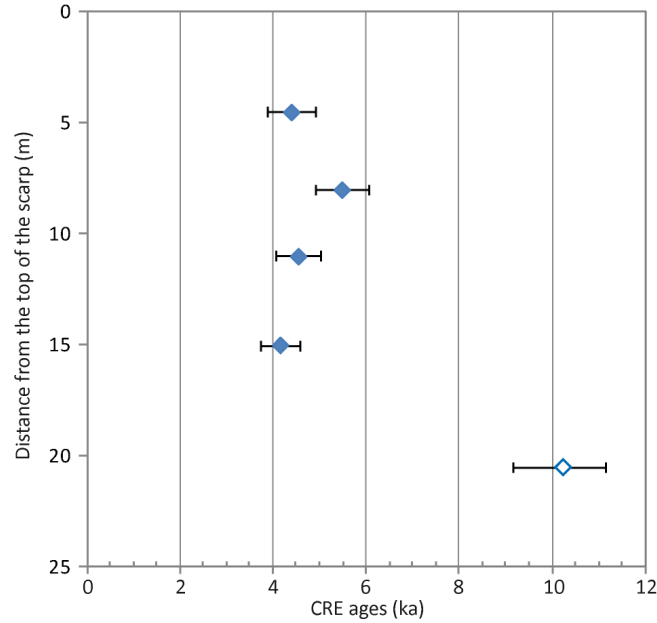
c) Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines

Magagnosc



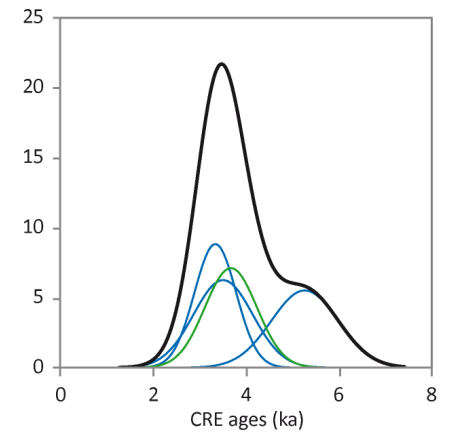
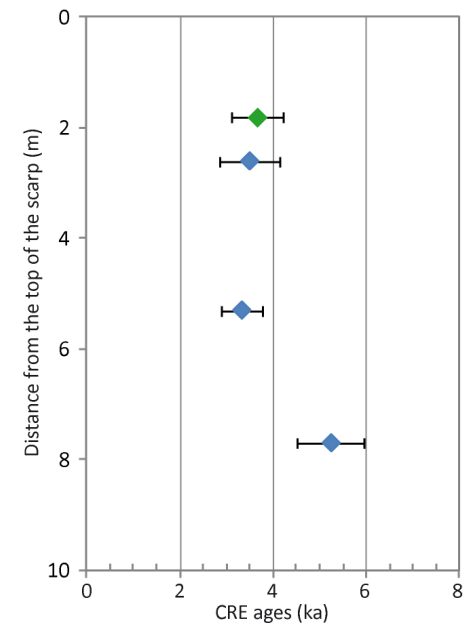
Rupture à 4.7 ± 0.5 ka BP

Baou des Noirs



Rupture à 4.6 ± 0.7 ka BP

Gattières

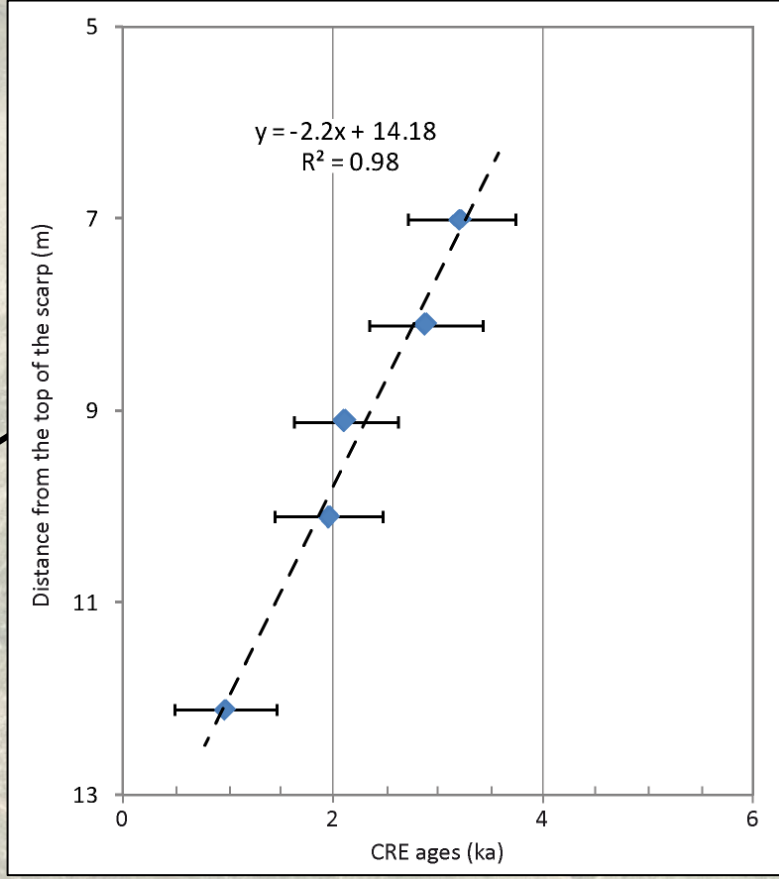
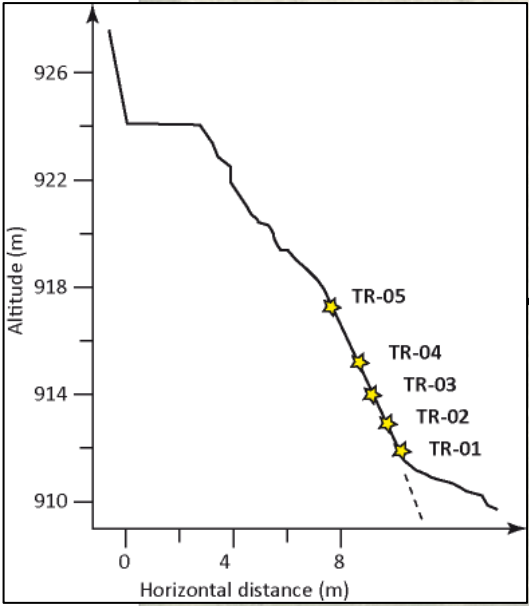


Rupture à 3.7 ± 0.7 ka BP

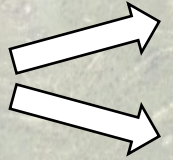
Glissement du Caire



2/2012 2:19 pm



Cinématique différente !
⇒ progressive et continue

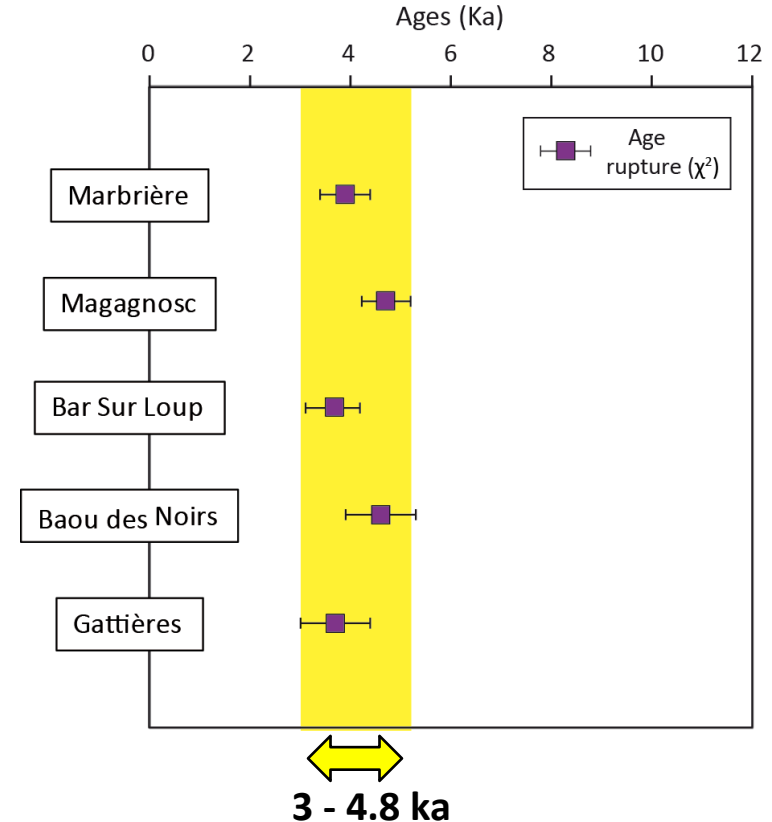


Vitesse de glissement $\approx 2.2 \pm 1 \text{ mm.yr}^{-1}$

Initiation entre **6 et 7 ka BP**

Synthèse des résultats de datations :

- 1 Validation de la **possibilité d'évolution** des mouvements lents de type « **rock spreading** » en **collapse rocheux**
- 2 **Rupture soudaine de 5 glissements dans la période 3 - 4.8 ka BP** (possiblement **synchrone**)
- 3 Cinématique de rupture singulière pour le glissement du Caire (progressive et lente)



Ces glissements ont-ils un facteur de forçage (déclenchant) commun ?

Quelle peut-en être la nature ?

Plan de l'exposé

Introduction et problématique

1^{ère} partie : Contexte géologique et morphologique des chaînes subalpines méridionales

2^{ème} partie : Morphologie et distribution des mouvements de grande ampleur

- a) Échelle locale : la Marbrière, notion d'états de maturité et modèle d'évolution*
- b) Échelle régionale: distribution des DSLs et facteurs de contrôle*

3^{ème} partie : Chronologie et cinématique des ruptures: application des cosmonucléides

- a) Principe de la méthode et stratégie*
- b) Problèmes méthodologiques: la datation des cherts*
- c) Application aux grands mouvements de versant des chaînes subalpines*

4^{ème} partie: Discussion

- a) Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines*
- b) Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine*

Conclusion et perspectives

a) Origine des collapses rocheux dans les chaînes subalpines ?

Déclenchement par un fort séisme ?

Nécessiterait l'occurrence passée d'un séisme de $M_w > 7.5$ dans un rayon de 100 km ...

Jibson et al., 2004, 2006
Lebourg et al., accepted

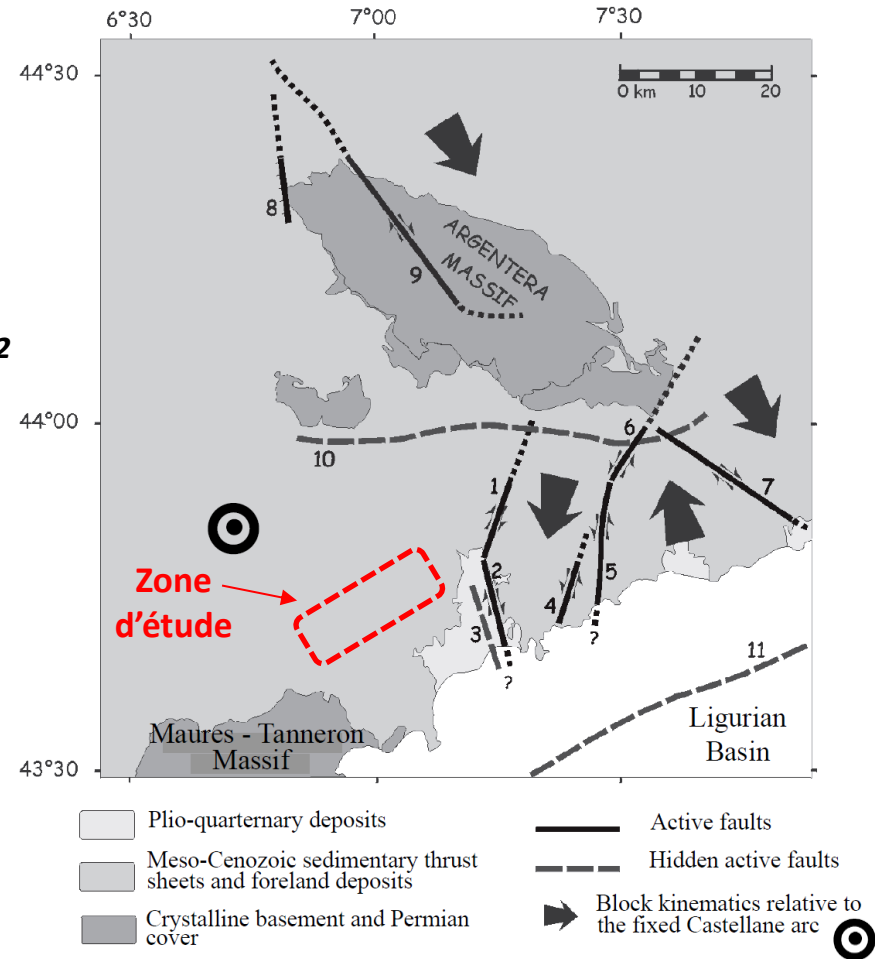
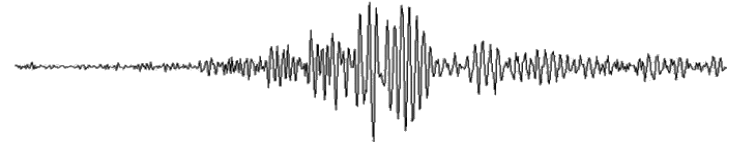
Événement peu probable au regard du contexte sismo-tectonique régional

Bauve et al., 2012
Larroque et al., 2009, 2011, 2012
Sanchez et al., 2010
Courboux et al., 2007

Quasi-absence de données paléo-sismologiques

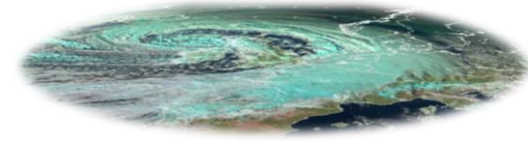
Sanchez et al., 2009

Pas de distribution spécifique E-O des glissements en fonction de leur volume (attendue dans le cas d'un épipcentre à l'Est)



a) Origine des collapsés rocheux dans les chaînes subalpines ?

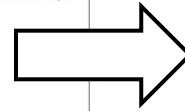
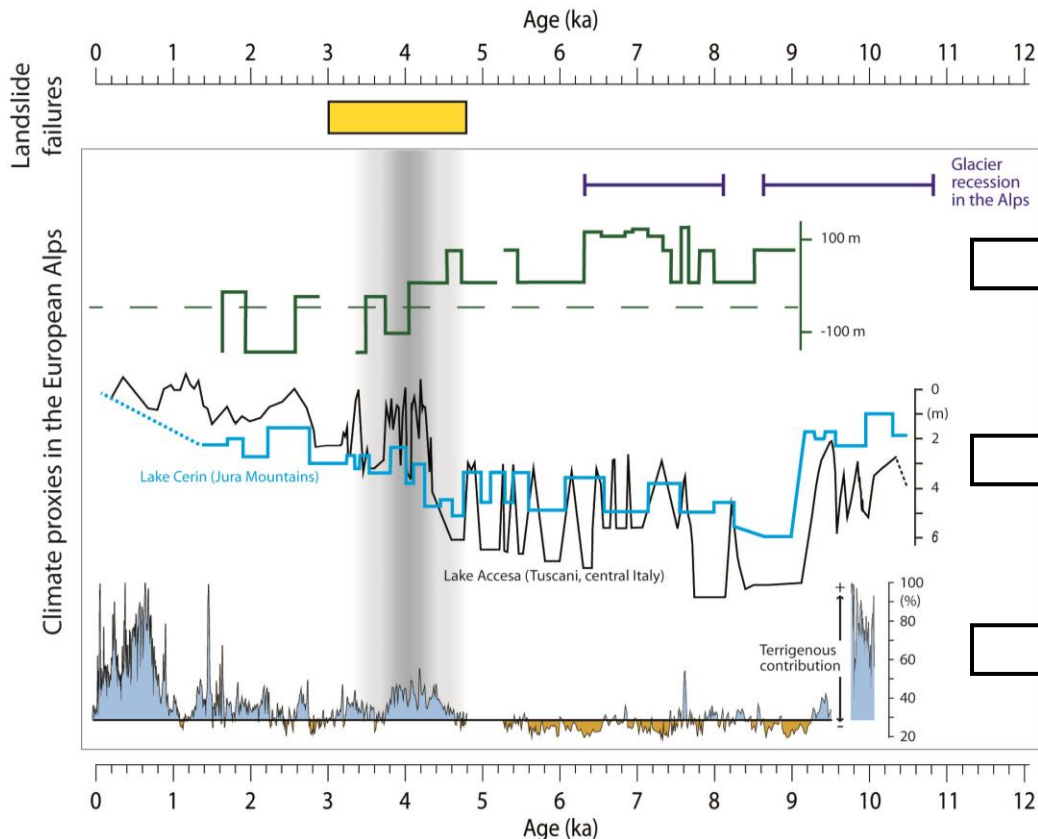
Déclenchement par un forçage climatique ?



Événement « 4.2 » identifié comme une **oscillation paléohydrologique majeure** de la période Holocène (à l'échelle des Alpes Européennes)

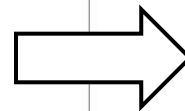
Walker et al., 2012

Magny et al., 2013



Recharge des glaciers, baisse de la limite supérieure des forêts

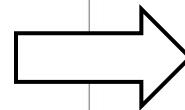
Nicolussi et al., 2005



Période de **hauts niveaux de lacs**

Digerfeldt et al., 1997

Magny et al., 2007, 2011



Pulses d'apports détritiques dans les dépôts lacustres

Giguet-Covex et al., 2011

Arnaud et al., 2012

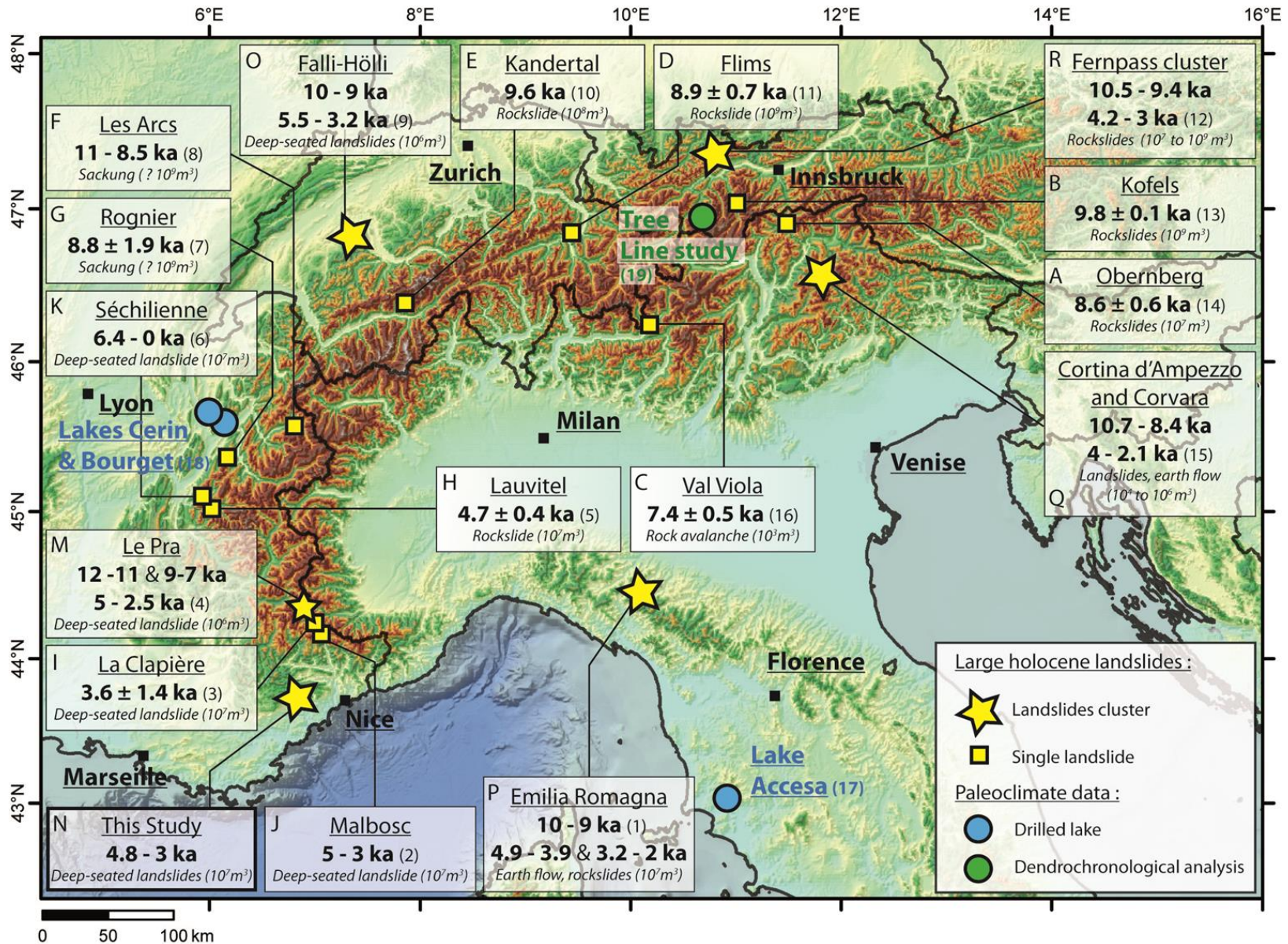


Evidences de crues torrentielles régionales

Dubar et al., 1995

Zerathe et al., in preparation

b) Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine



b) Temporalité et facteurs déclenchants des grands mouvements de versant à l'échelle alpine

Deux périodes d'activité gravitaire plus marquée au cours de l'Holocène:

① Période de 11 – 8 ka

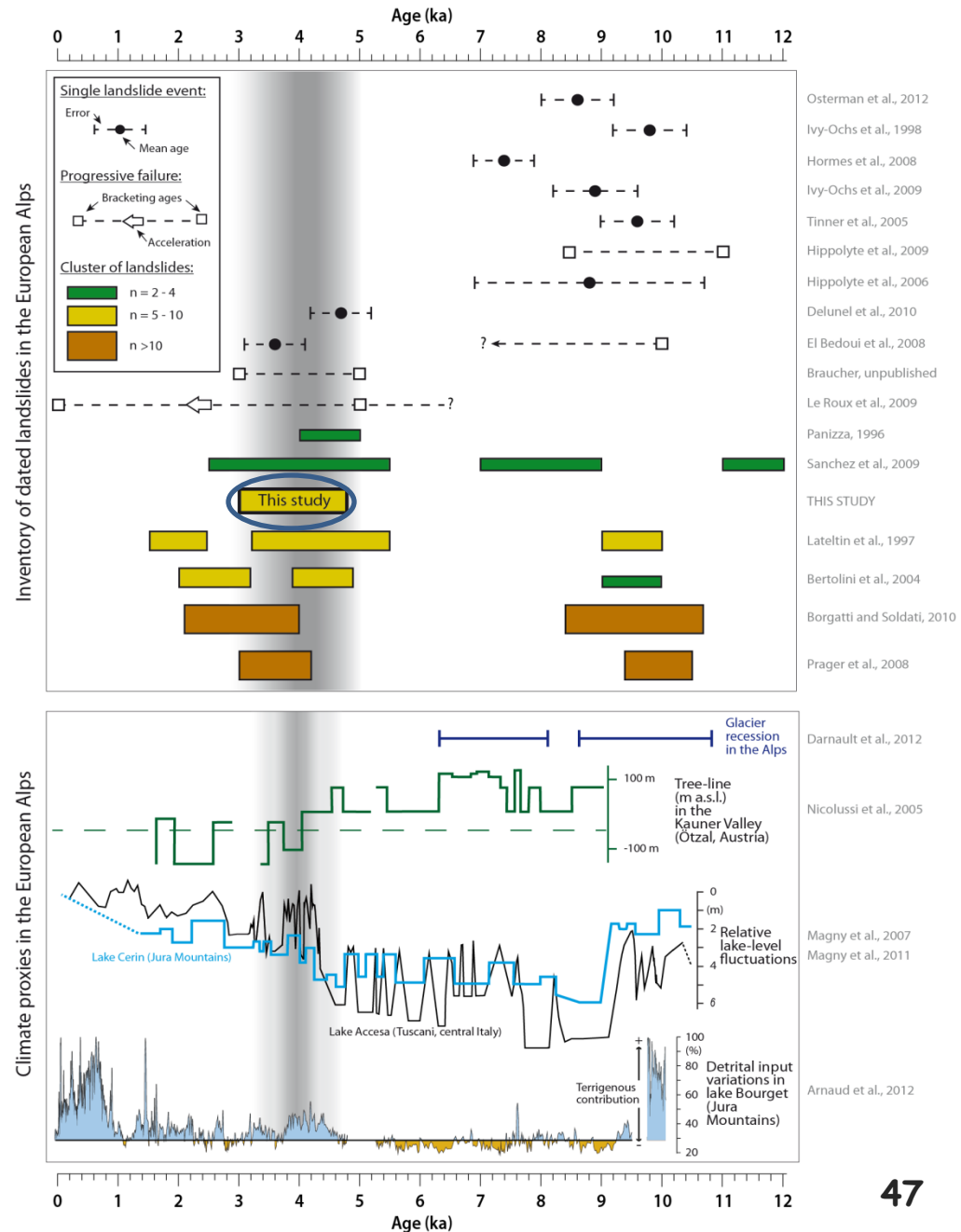
⇒ *Contrôle probable par les processus de déglaciation*

Mc Coll, 2012

② Période de 5 – 3 ka

⇒ *Contrôle probable par un forçage climatique lié à l'évènement « 4.2 »*

Zerathe et al., in preparation



- 1 Identification et caractérisation de plus de **20 paléo-glissements** de grande ampleur sur le front subalpin méridional
 - ↪ *Mouvements de type **rock-spreading**, typiques du contexte géologique subalpin*
 - ↪ ***Modèle d'évolution** particulier pouvant impliquer des **collapses rocheux***
 - ↪ ***Héritage structural**: facteur déterminant dans l'initiation de ces glissements*

- 2 Mise en lumière d'un **problème méthodologique** quant à la **datation de silice diagenétique à partir du ^{10}Be**
 - ↪ *Biais pouvant entraîner des **écarts d'âges considérables** ($\approx 300\%$)*
 - ↪ *Proposition d'un **nouveau protocole d'extraction chimique du ^{10}Be***

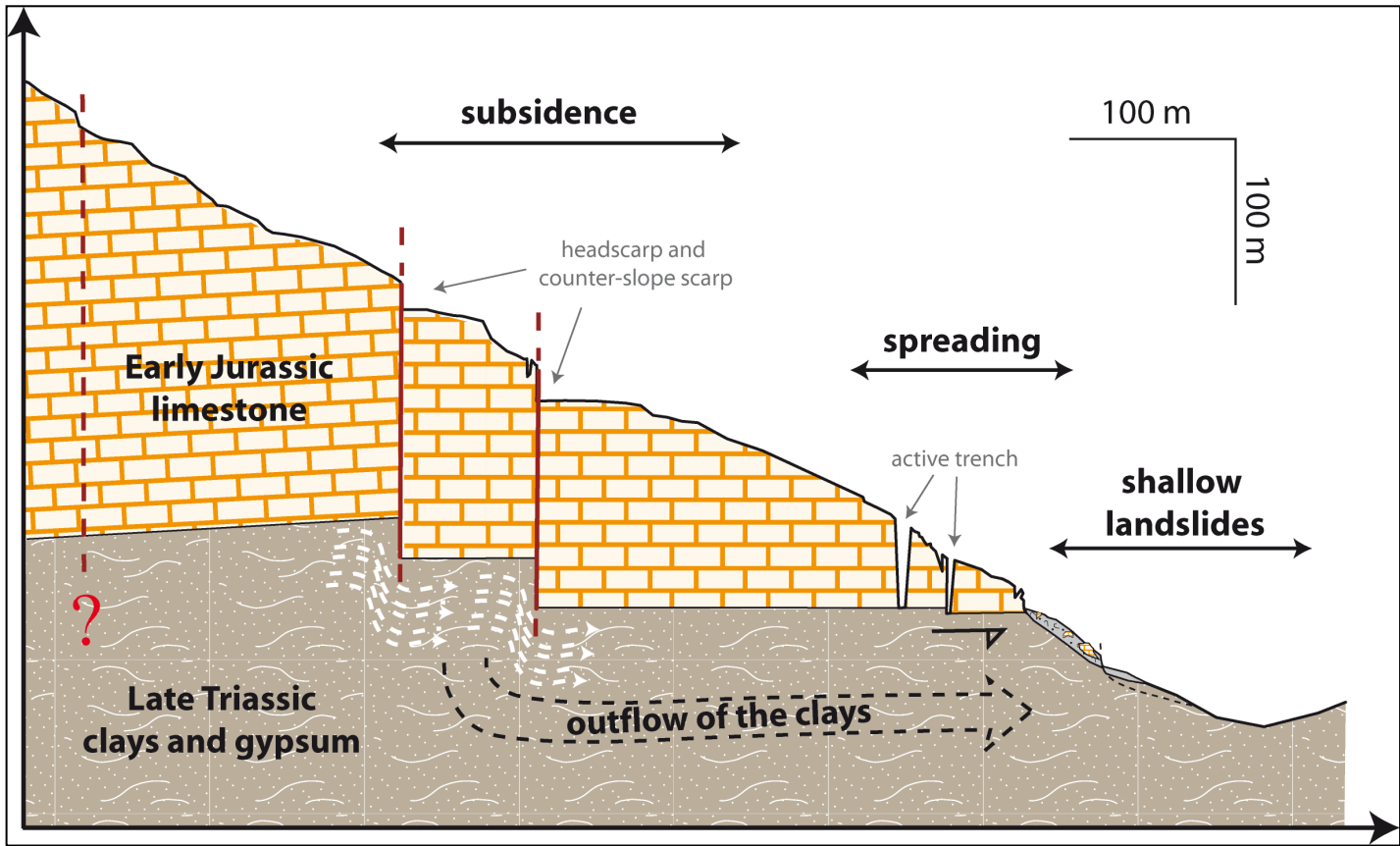
- 3 **Déclenchement de 5 grands glissements**, identifiés sur le front subalpin, dans la **période 3 – 4.8 ka** (ruptures possiblement synchrones)
 - ↪ *concordance temporelle avec l'événement « 4.2 »: une oscillation climatique majeure*
 - ↪ ***Forçage hydrologique des glissements***
 - ↪ ***Synchronicité** avec de nombreux autres grands **glissements à l'échelle Alpine***

- ★ **Confronter les hypothèses proposées** et les conclusions de cette étude **à des modélisations numériques** rigoureuses **d'un versant typique du front subalpin** en testant les effets:
 - 1) du contraste de rhéologie entre les calcaires et le soubassement argileux
 - 2) du pré-découpage structural
 - 3) de la mise en charge du versant par des fluides
 - 4) d'une variation potentielle du comportement mécanique des argiles saturées en eau

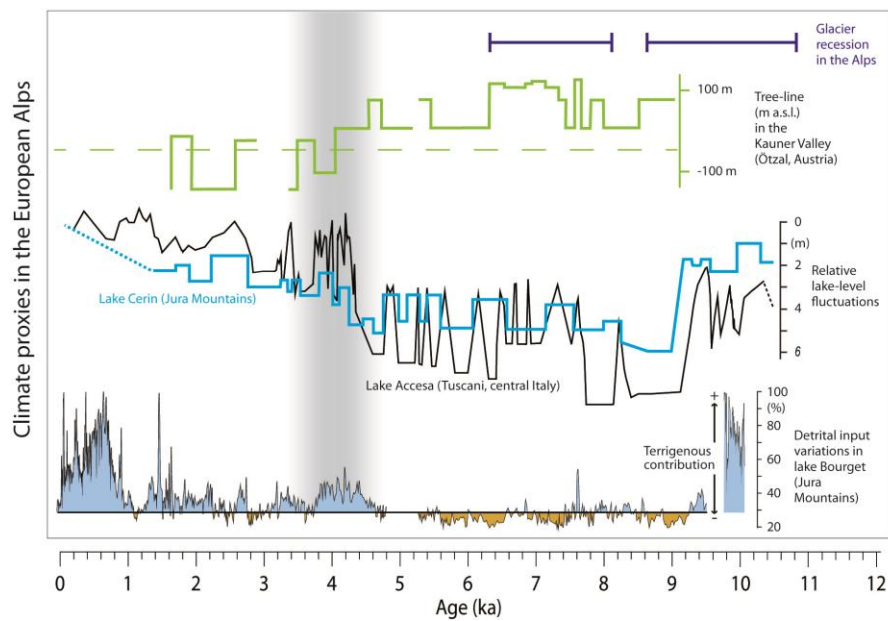
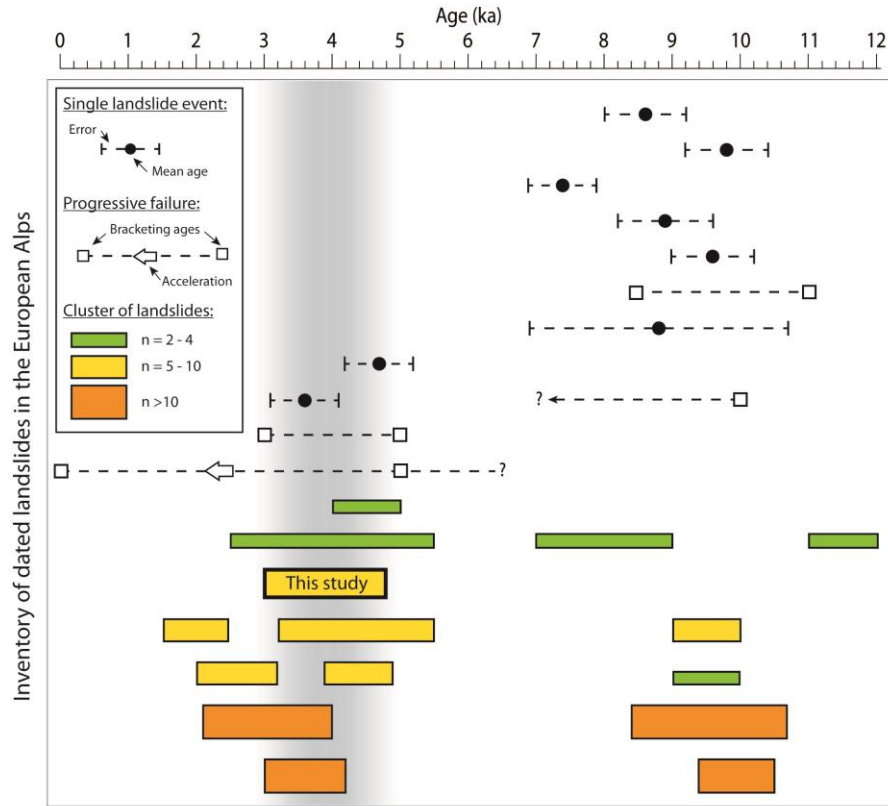
- ★ Réaliser une étude spécialement dimensionnée qui permettrait de **valider définitivement l'origine du biais méthodologique** mis en lumière pour la **datation de la silice diagenétique par le ^{10}Be**

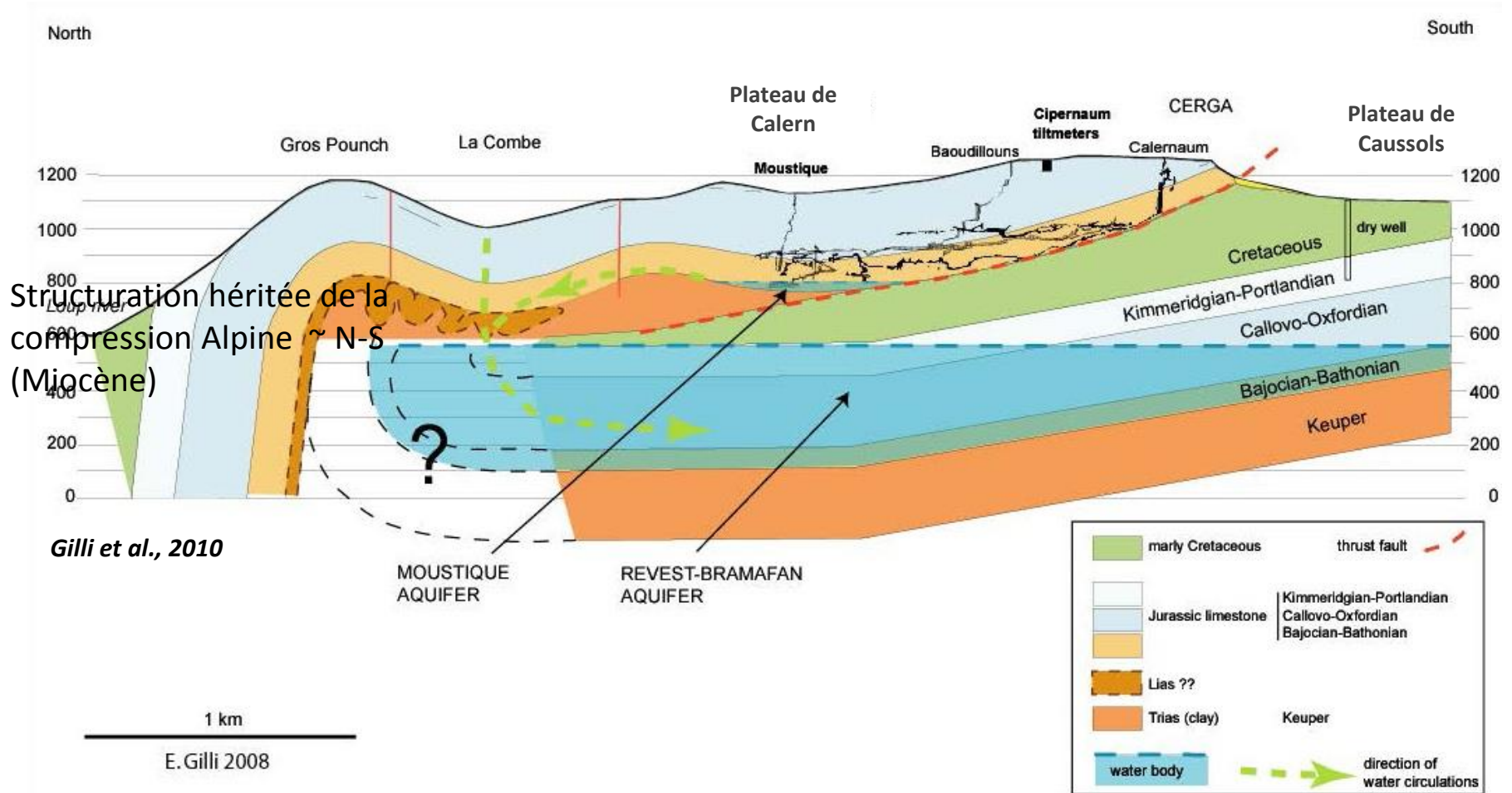
- ★ **Constituer une base de donnée** quantitative et **exhaustive des grands mouvements gravitaires datés dans l'arc Alpin**, pour permettre une analyse statistique plus fine et pondérée de leur distribution temporelle

**Merci pour
votre attention**



*Zerathe et al.,
in preparation*





Structuration héritée de la compression Alpine ~ N-S (Miocène)

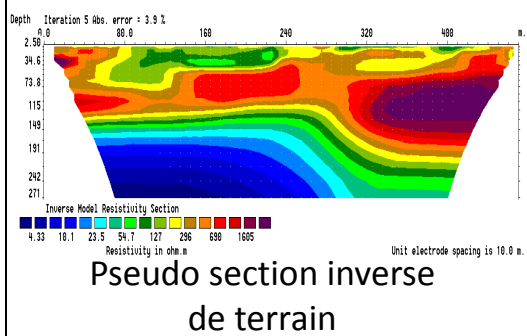
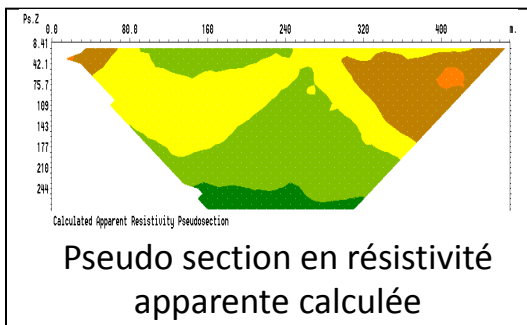
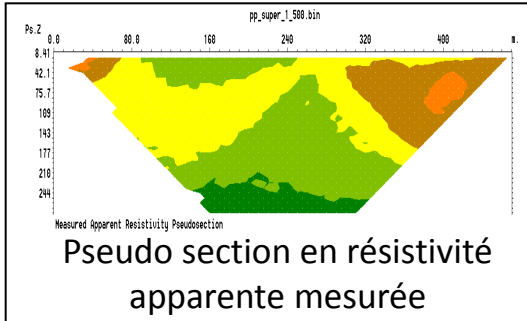
Forte karstification des séries calcaires

Keuper = niveau imperméable

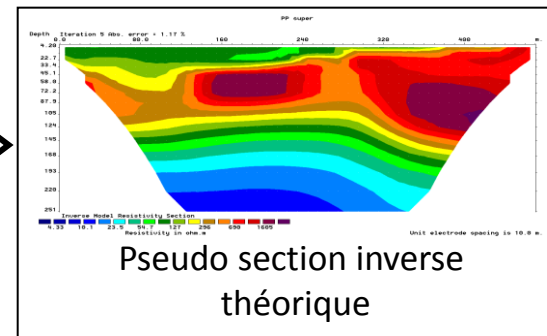
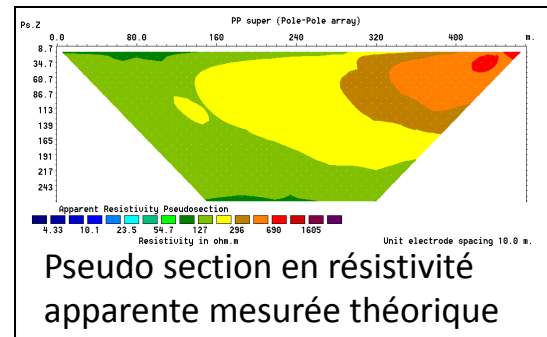
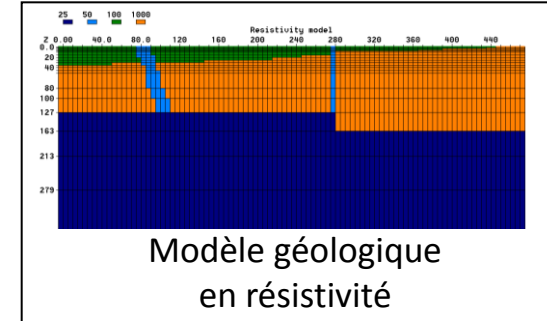
Aquifère karstique permanent dans chaque unité

Modélisation des profils électriques « Res2Dmod » Loke, 2002

Mesures de terrain et inversion, Loke 1997



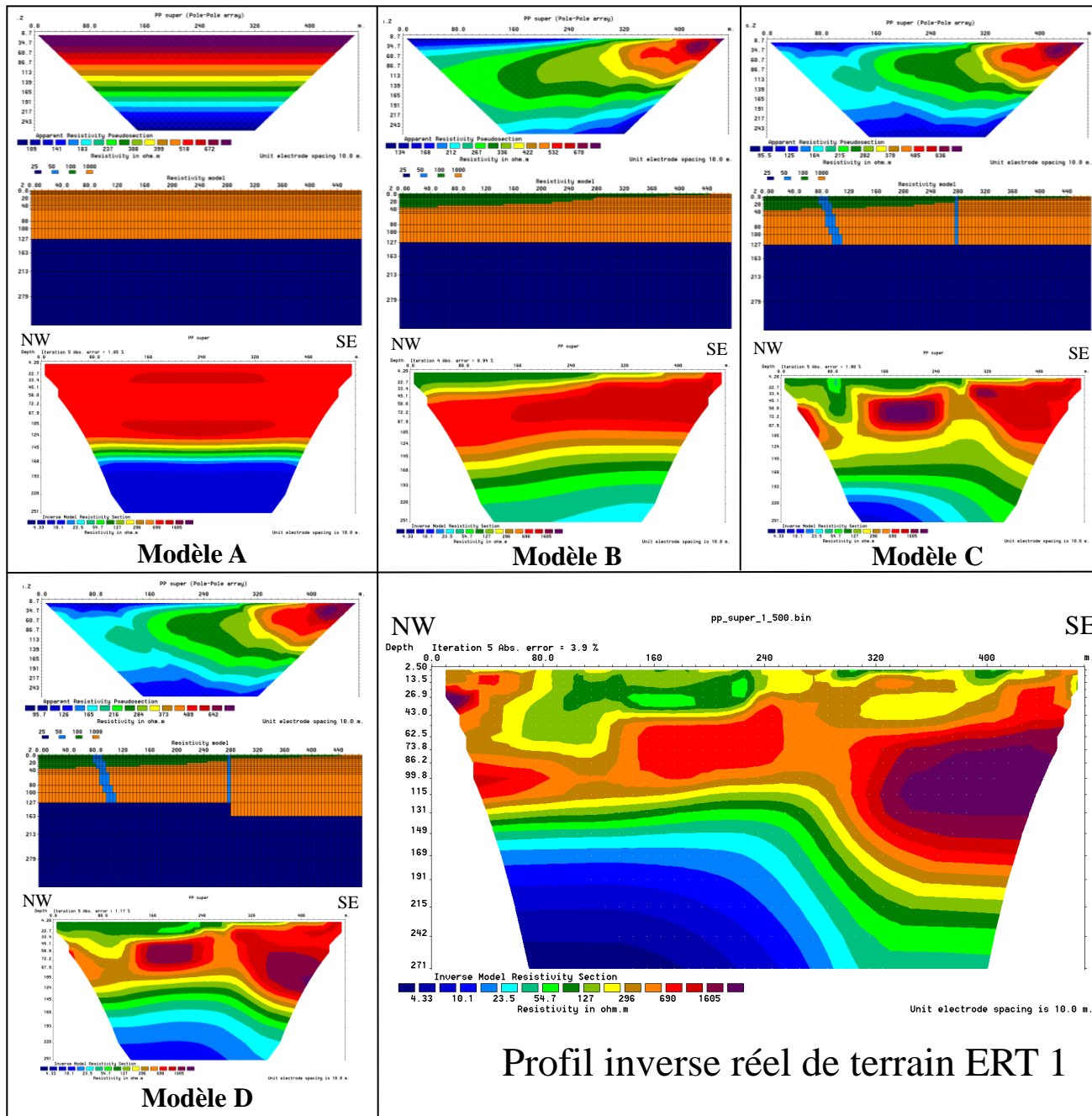
Modélisation Res2Dmod, Loke 2002



Comparaison Validation

Affiner l'interprétation des profils électriques grâce à des modèles conçus à partir des données de terrain (Nguyen et al, 2007)

Modélisation du profil ERT 1



Couches modélisées



p1 = 20 Ωm
argiles



p2 = 1000 Ωm
calcaires



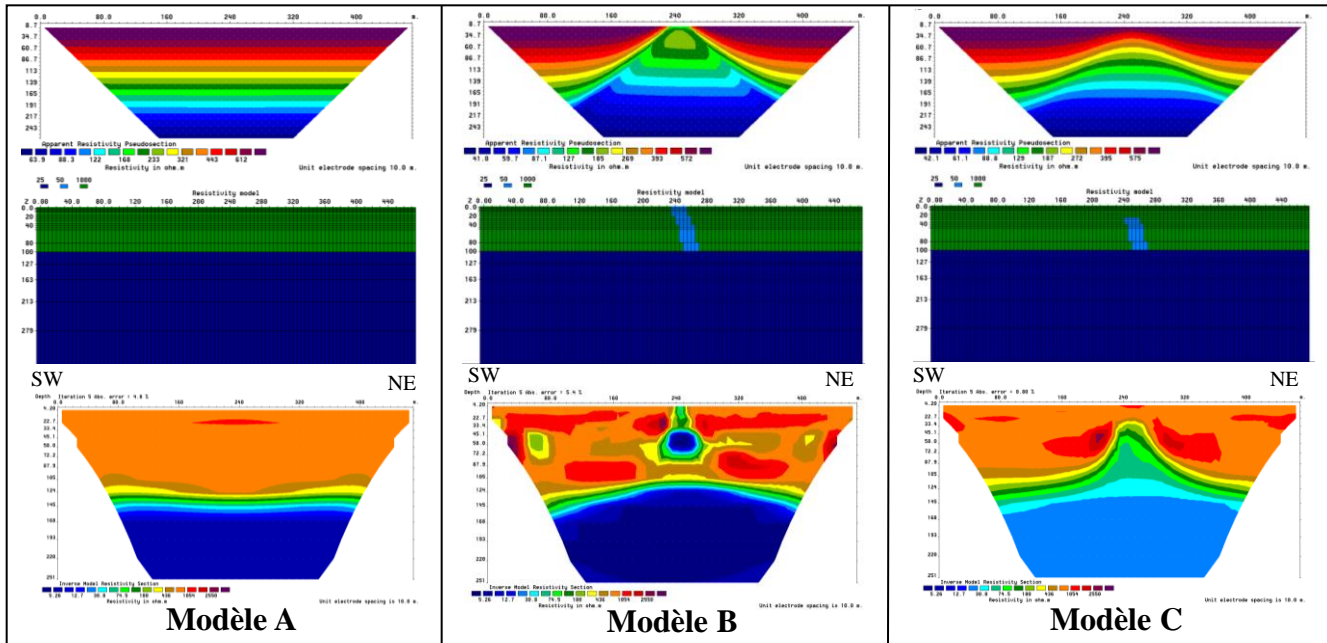
p3 = 100 Ωm
marnes
gréseuses






p4 = 50 Ωm
failles

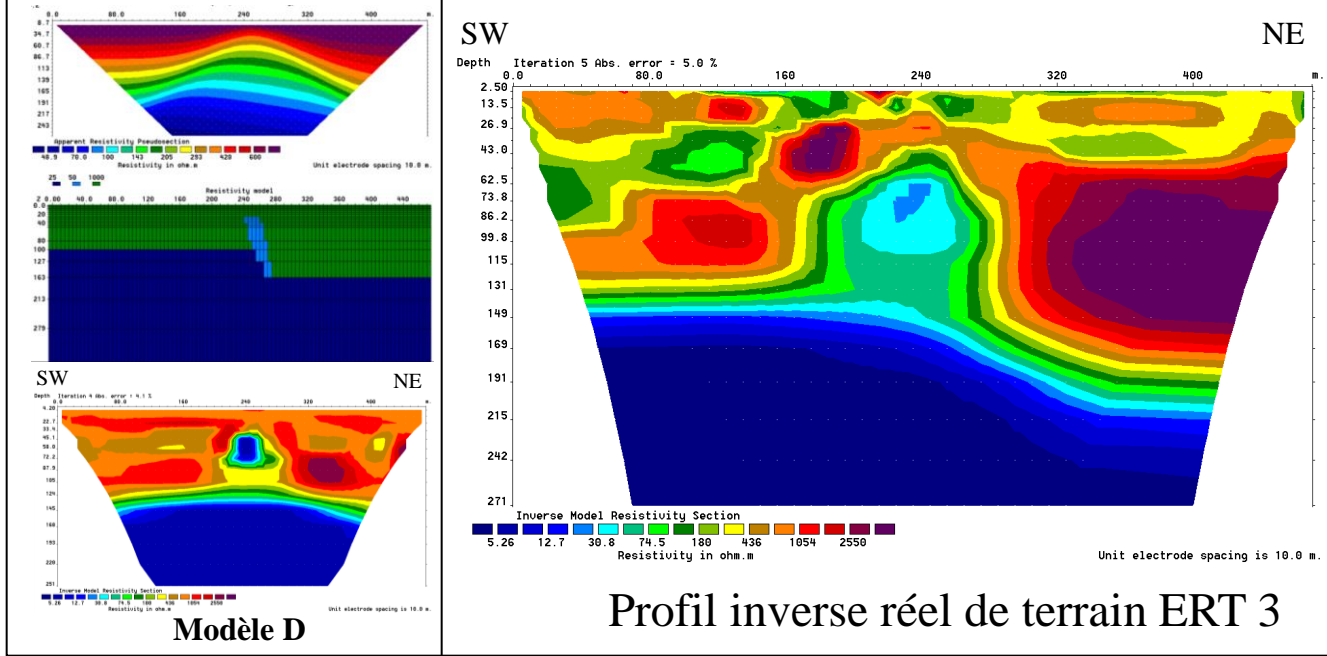
Profil inverse réel de terrain ERT 1

Modélisation du profil ERT 2

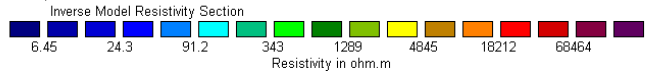
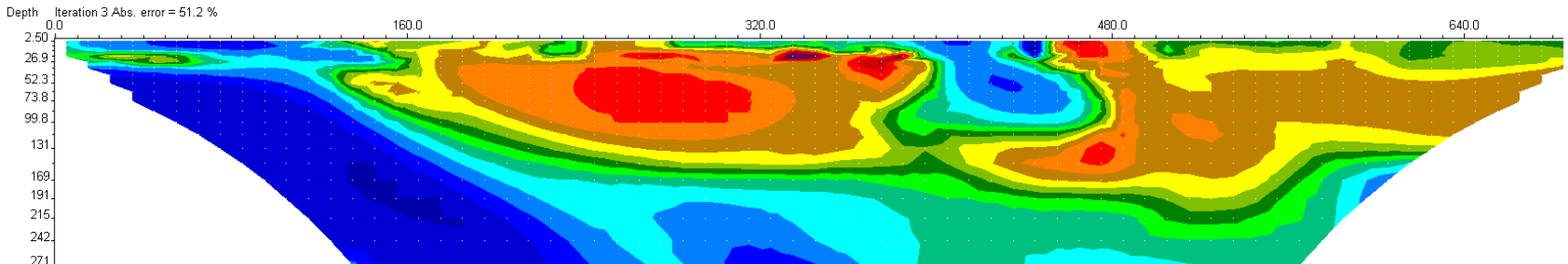
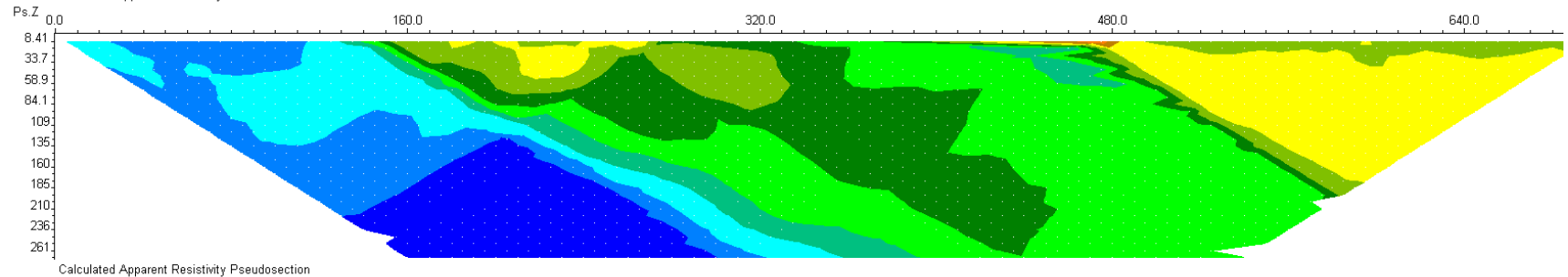
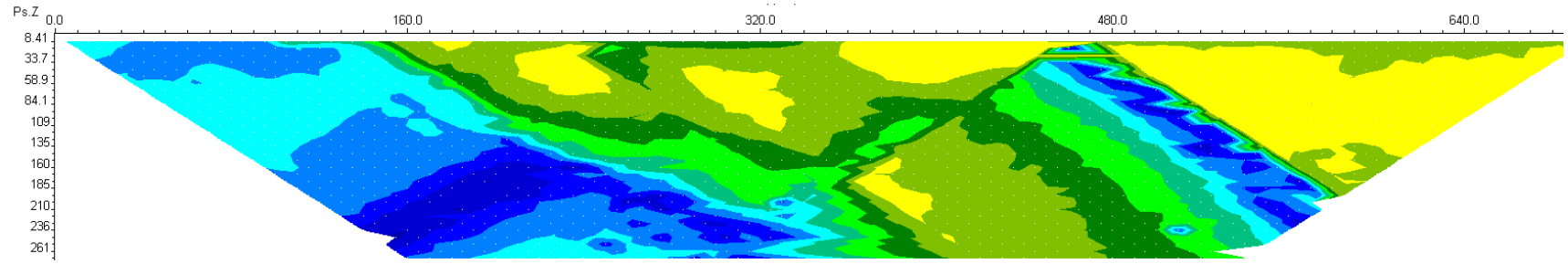


Couches modélisées

-  $\rho_1 = 20 \Omega\text{m}$
argiles
-  $\rho_2 = 1000 \Omega\text{m}$
calcaires
-  $\rho_4 = 50 \Omega\text{m}$
failles



ERT10: Glissement du Caire



Unit electrode spacing is 10.0 m.

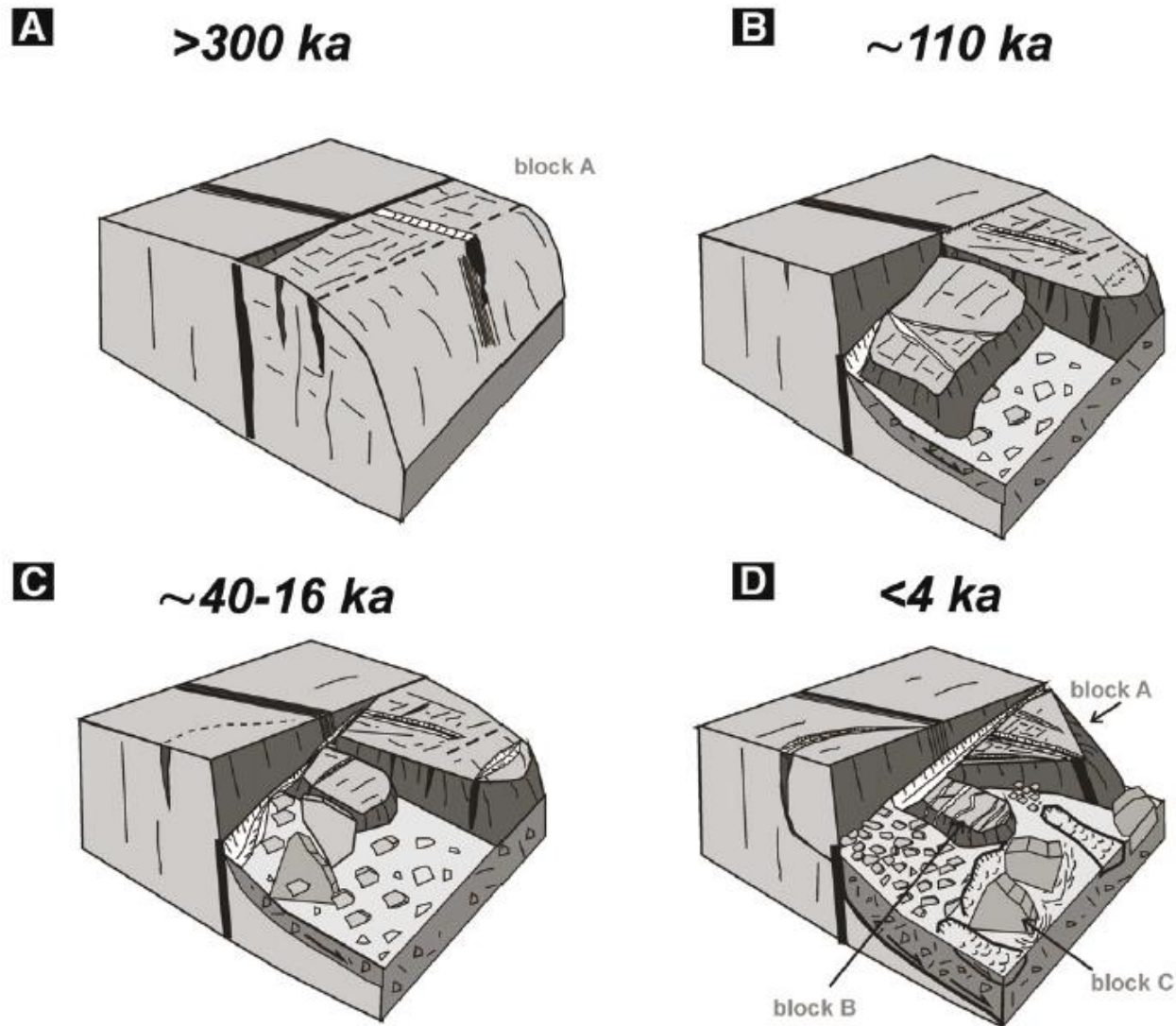


Fig. 7. Proposed model of a long-term evolution of the Foros slope failure. (A) Karstification affecting anisotropic limestones at the margin of karst plateau. (B) Incipient stage of the development of the giant slope deformation. (C) Eastward propagation of the slope deformation along strike slip-fault accompanied by the fragmentation of detached blocks. (D) Final fragmentation of the landslide body connected with onward propagation of deep-seated failure, evolution of shallow landslides and rockfalls (for details see Section 5.2).

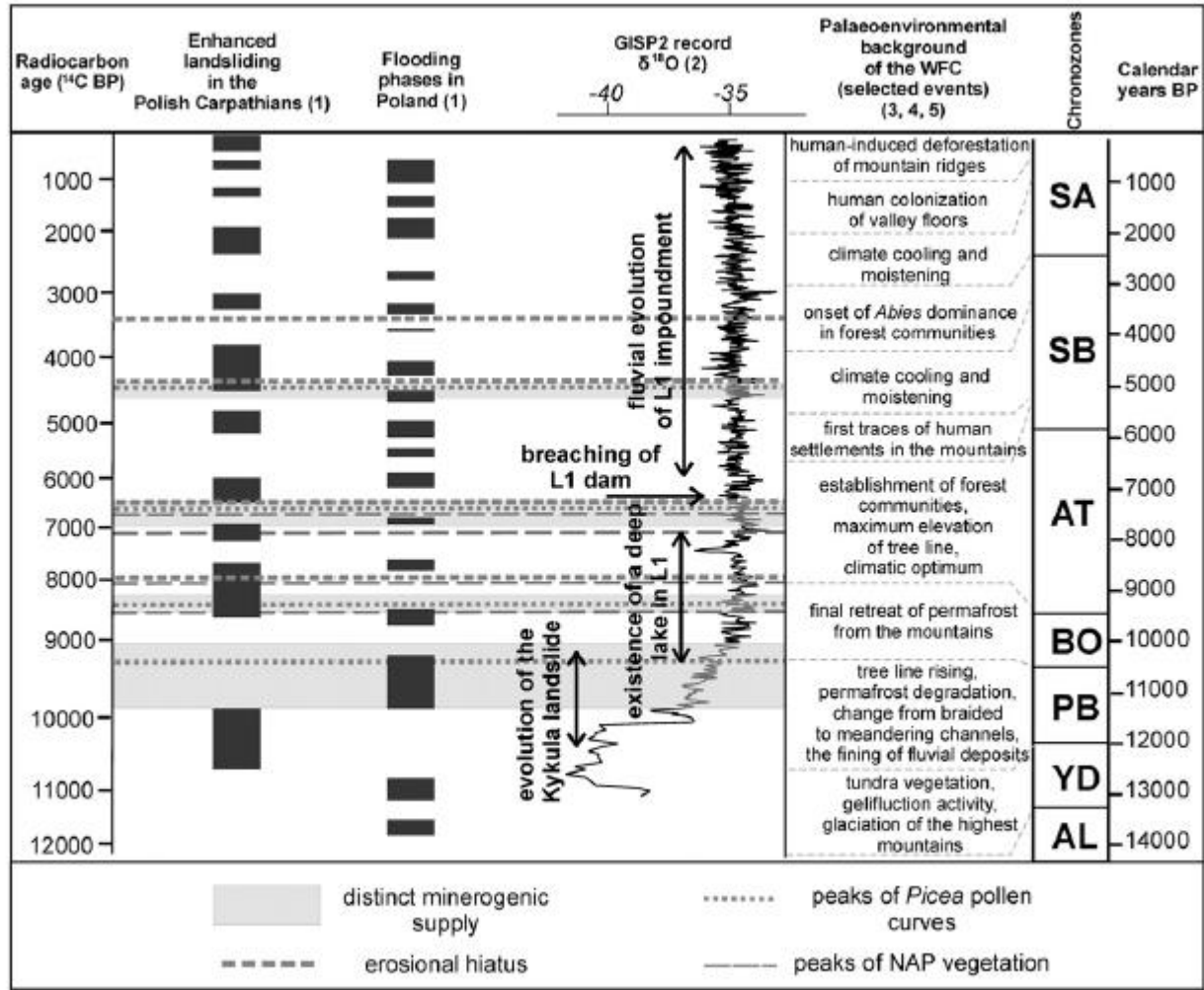
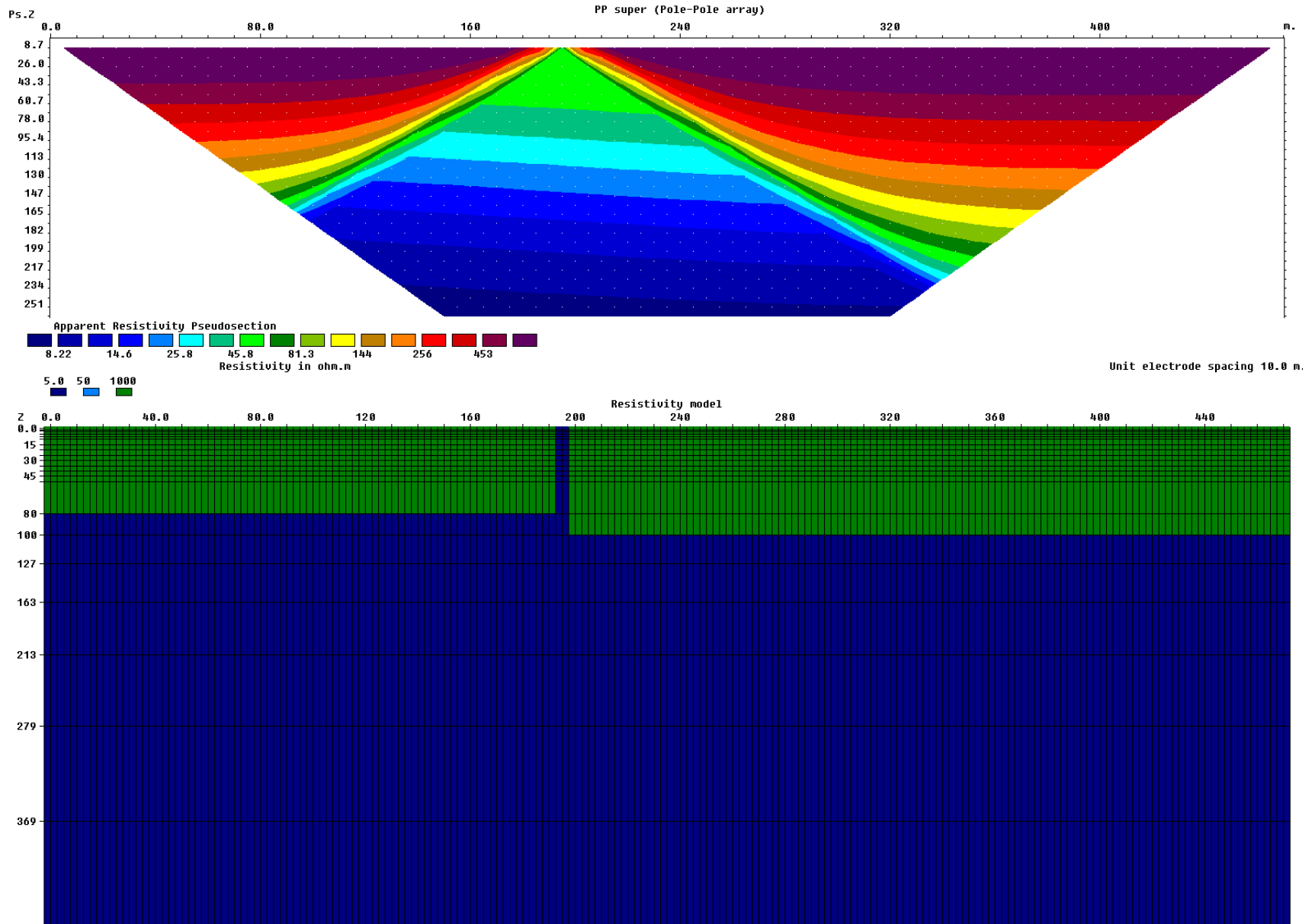


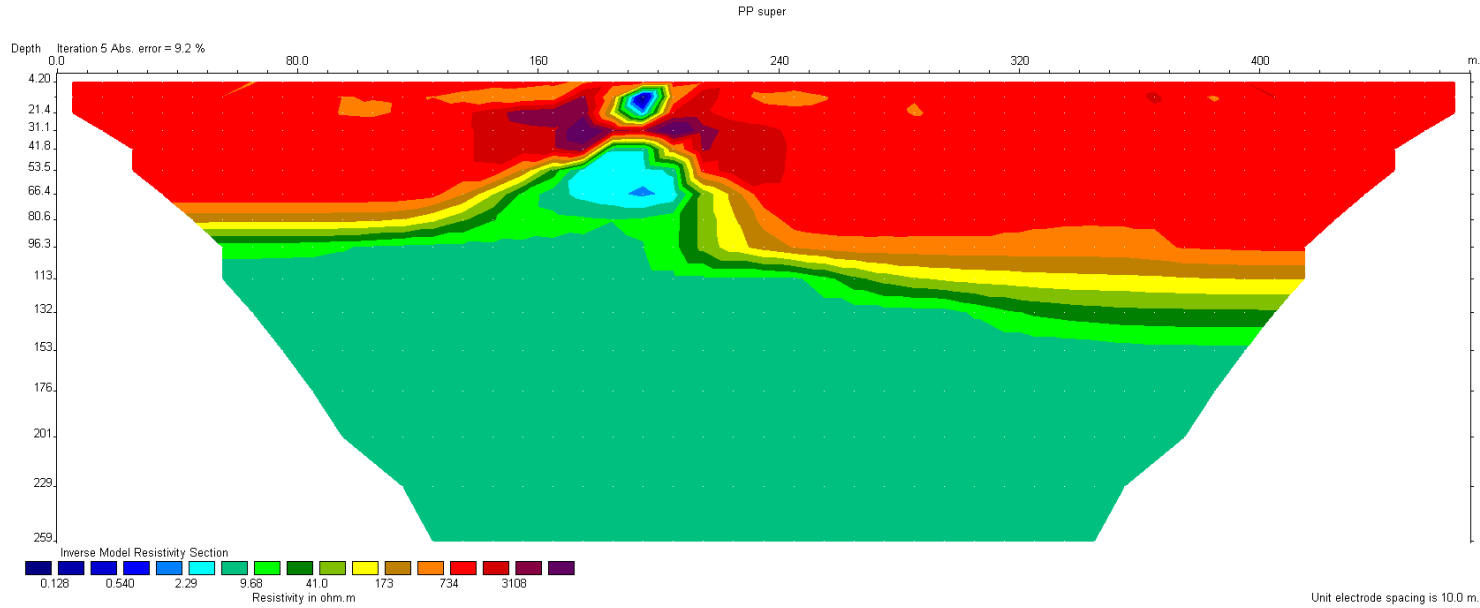
Fig. 11. Correlation of the chronological record from the Kykula landslide with other proxies. Data sources: 1 – Starkel et al. (2006); 2 – Grootes et al. (1993); 3 – Mol et al. (2000); 4 – Starkel (2003); 5 – Margielewski (2006a).

Model pp_470m_a=10m

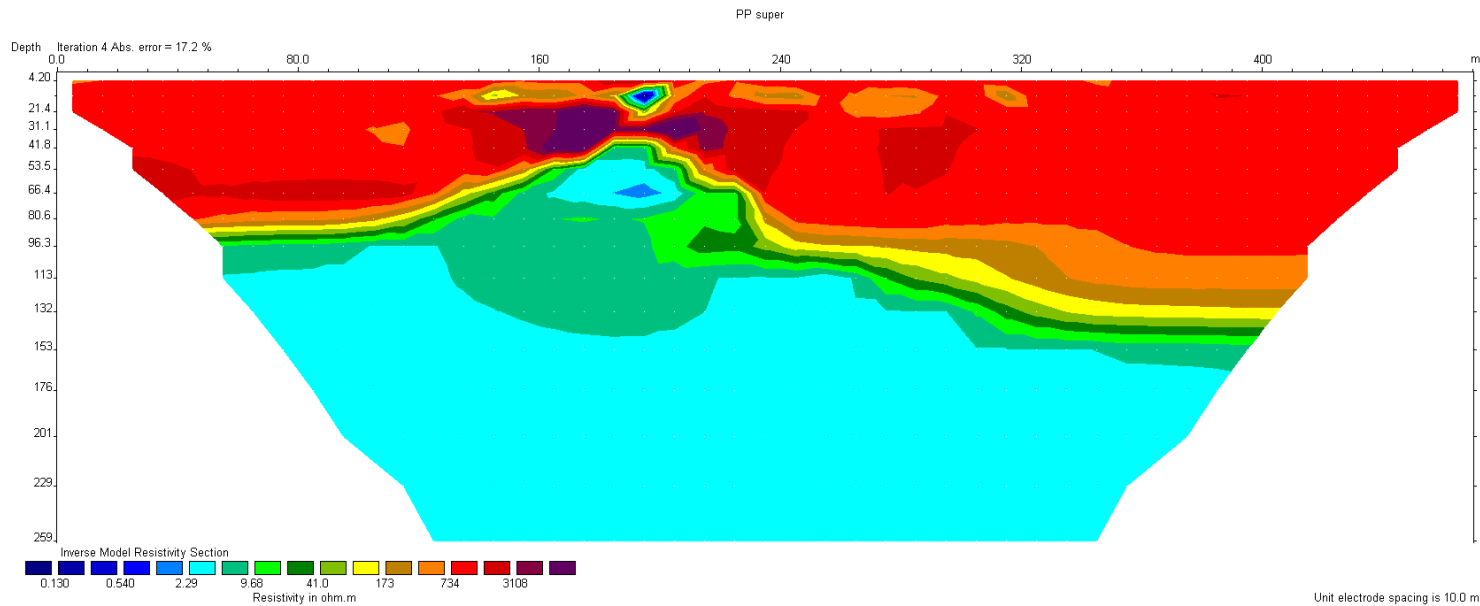


Profils inverses théoriques pp_470m (48°)

Pas de bruit

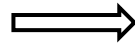


10% de bruit

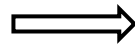


CRE age calculations and specificities

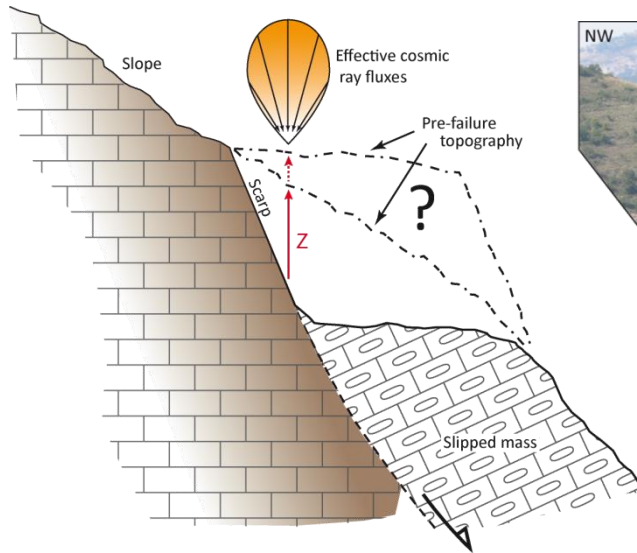
• Integration of inheritance :



Local long-term erosion rate (steady-state sample)



Pre-failure depth estimation (fieldwork...)



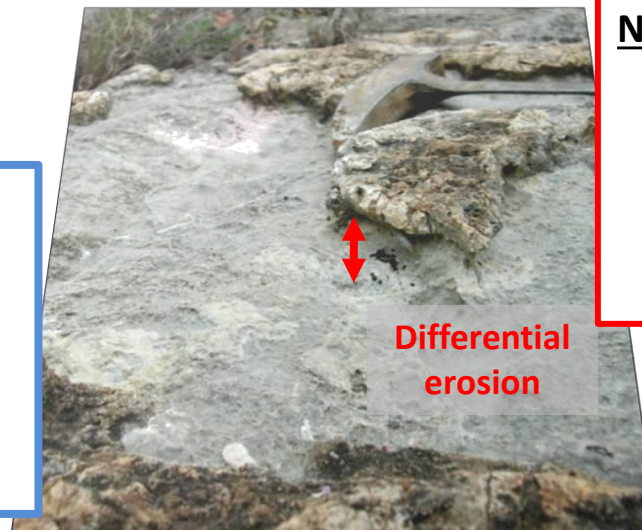
• Question: EROSION rate ?

Effective weathering on carbonates :

In-situ measurements $\approx 10 \mu\text{m}/\text{yr}$

Austrian Alps: $\epsilon \approx 10$ to $40 \mu\text{m}/\text{yr}$ *Plan (2005)*

^{36}Cl ages calculated with an erosion rate of $10 \mu\text{m} \cdot \text{yr}^{-1}$



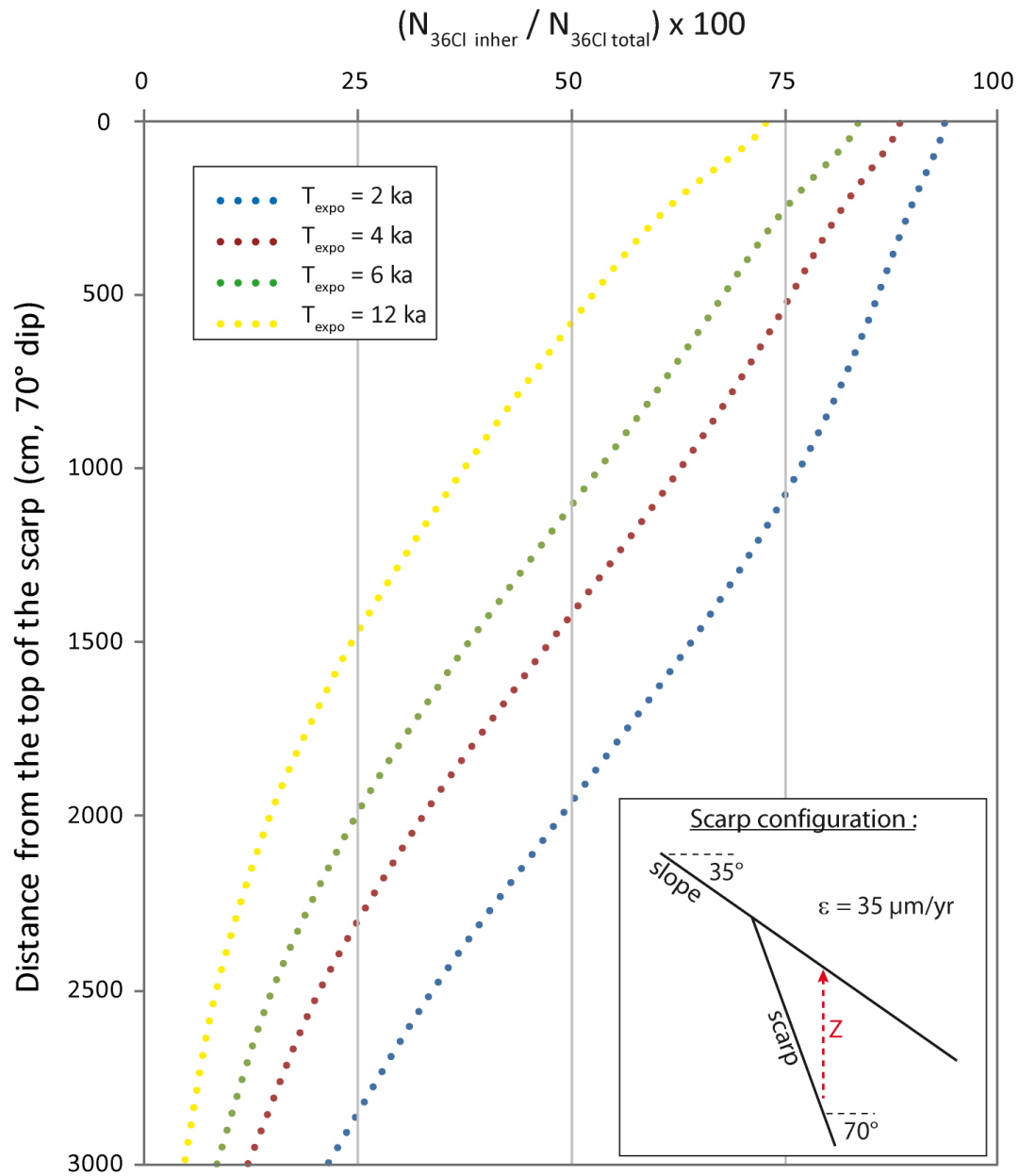
No erosion on chert :

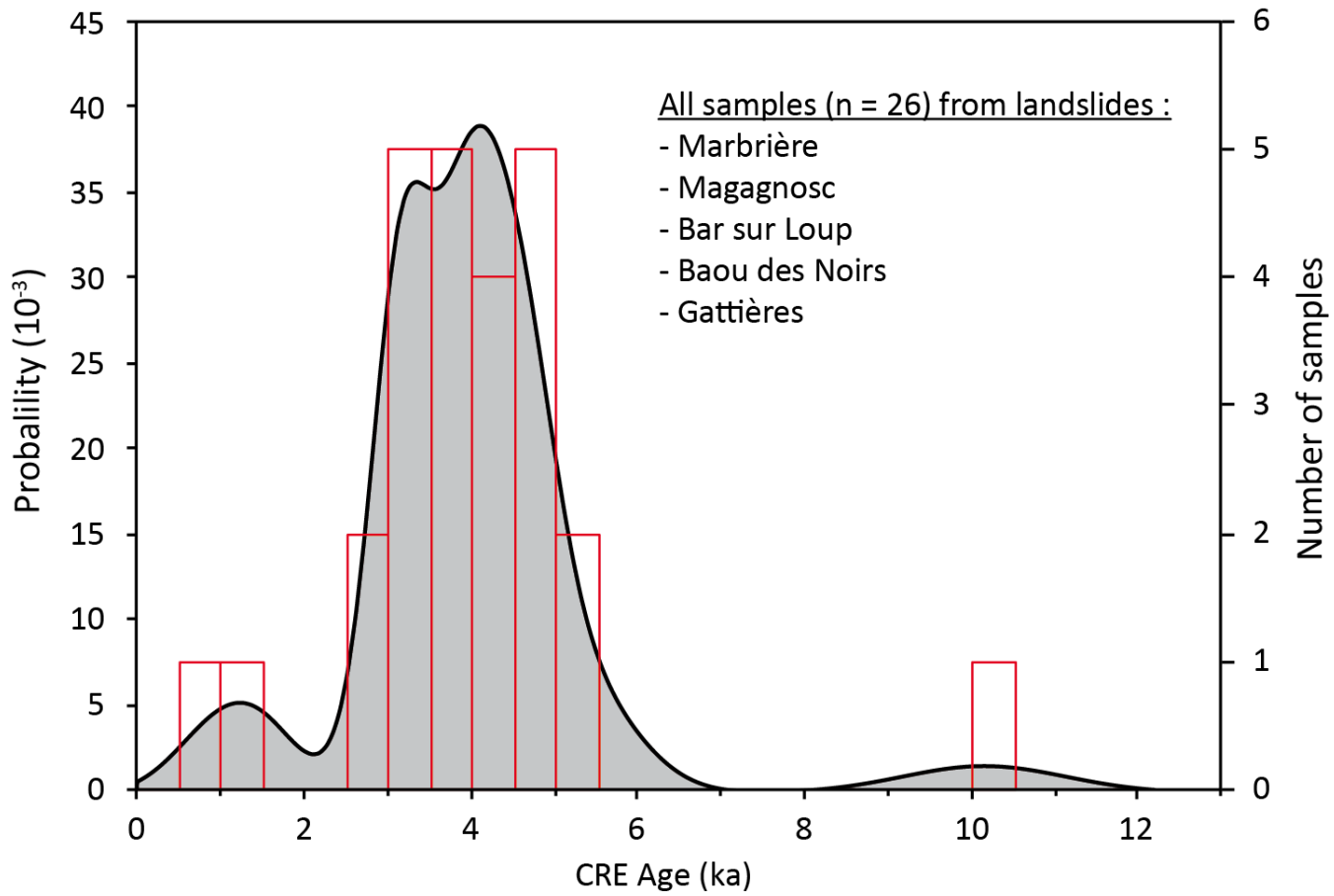
Amorphous silicate

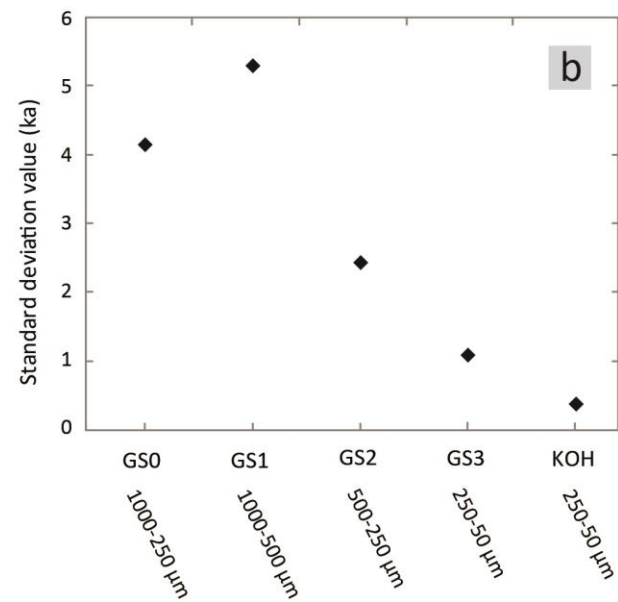
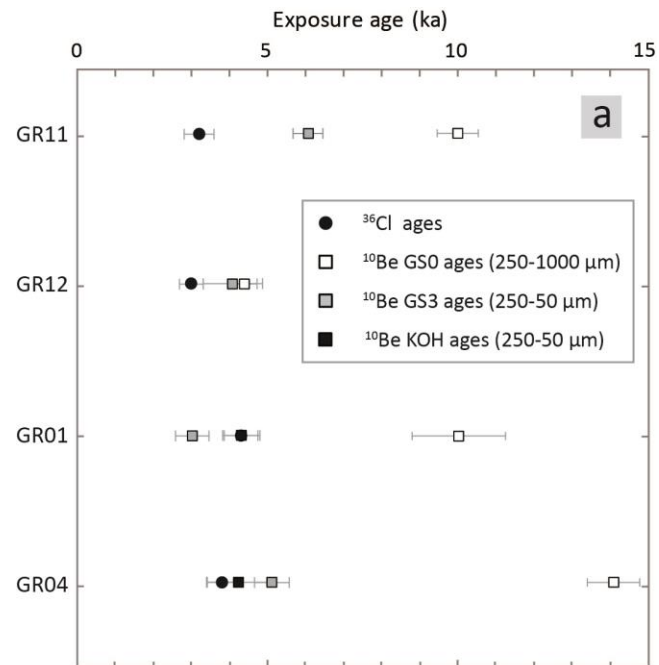
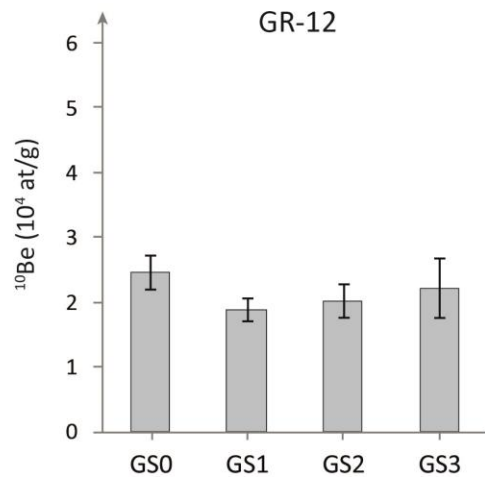
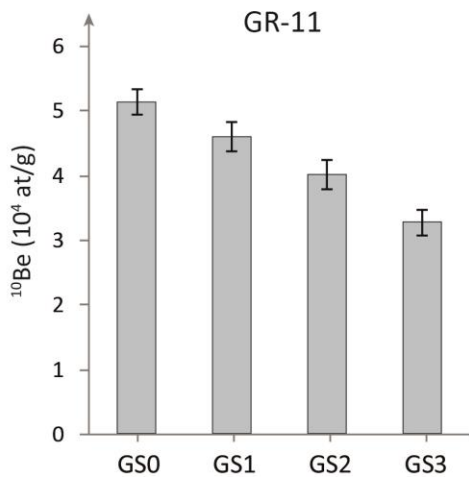
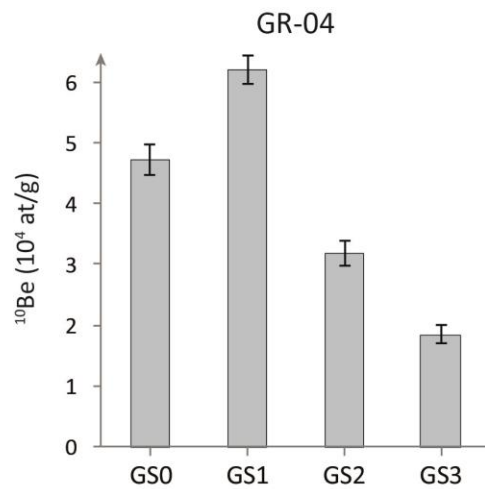
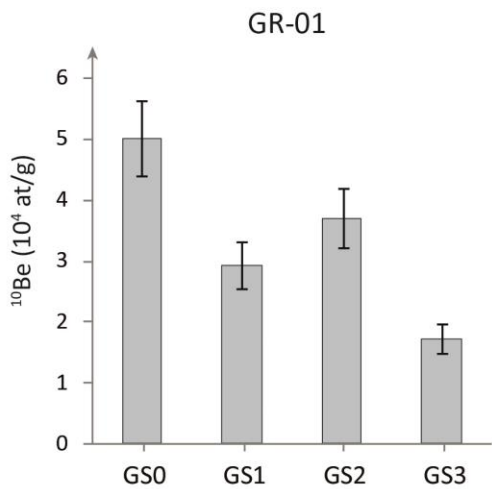
Brown varnish

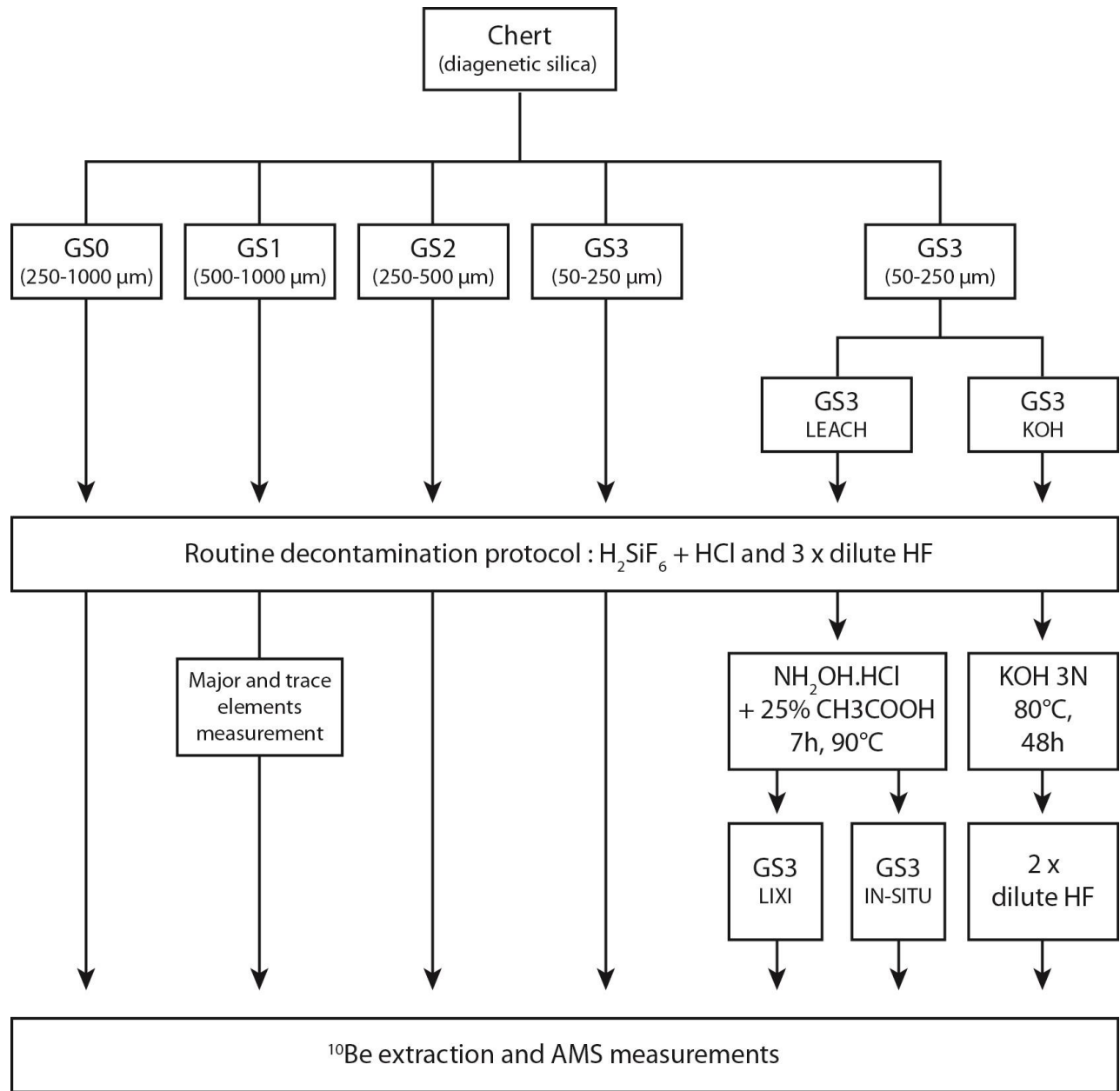
Mediterranean climate

^{10}Be ages calculated without erosion









Chert
(diagenetic silica)

GS0
(250-1000 μm)

GS1
(500-1000 μm)

GS2
(250-500 μm)

GS3
(50-250 μm)

GS3
(50-250 μm)

GS3
LEACH

GS3
KOH

Routine decontamination protocol : H_2SiF_6 + HCl and 3 x dilute HF

Major and trace
elements
measurement

$NH_2OH.HCl$
+ 25% CH_3COOH
7h, 90°C

KOH 3N
80°C,
48h

GS3
LIXI

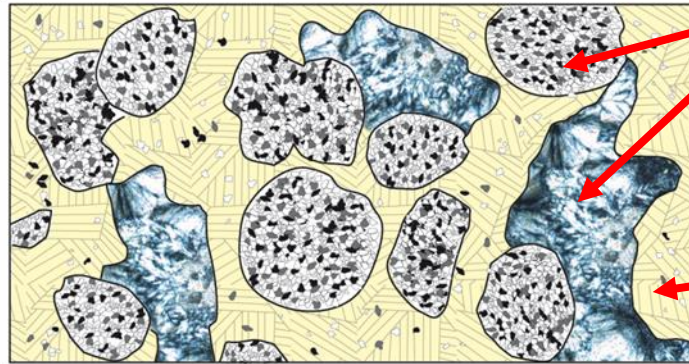
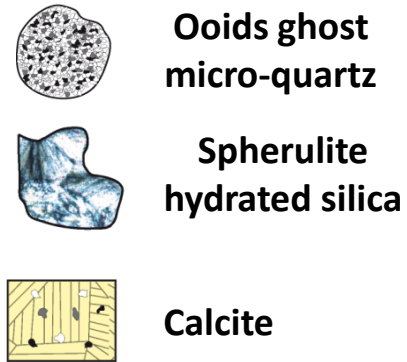
GS3
IN-SITU

2 x
dilute HF

^{10}Be extraction and AMS measurements

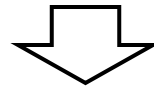
Summary: origin of the contamination

^{10}Be Production in bulk rock



$$P_{\text{O}_{\text{SiO}_2}}$$

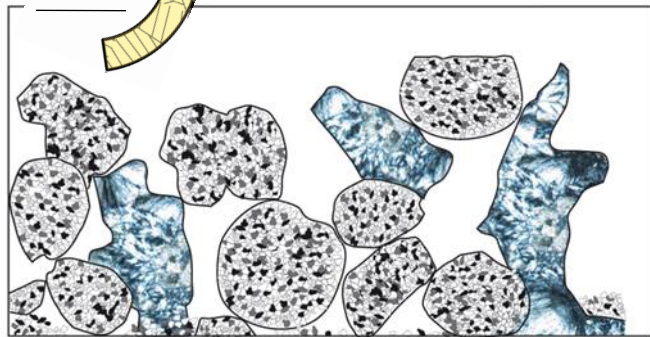
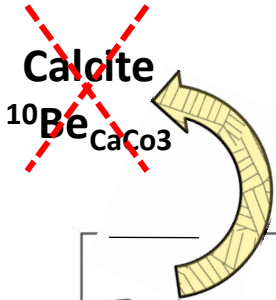
$$P_{\text{O}_{\text{CaCO}_3}} \approx 3 \text{ to } 6 \times P_{\text{O}_{\text{SiO}_2}}$$



Purification/Decontamination

Theory

In practice

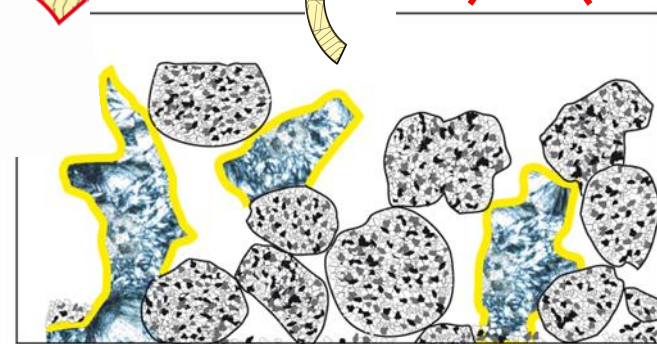


Remains $^{10}\text{Be}_{\text{SiO}_2}$ in Silica lattice

$$(1-N)\% \text{ } ^{10}\text{Be}_{\text{CaCO}_3}$$

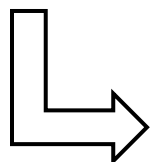
Adsorption on
 OH^- active sites

$$N\% \text{ of Calcite } ^{10}\text{Be}_{\text{CaCO}_3}$$



Chemical compositions of the 1000 – 500 μm group before total dissolution

	Major element compositions (%wt)						
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	PF	Total
GR-04	99.25	0.091	0.02	0.02	0.03	0.94	100.35
GR-11	97.85	0.078	0.21	0.02	0.02	1.01	99.19
GR-12	98.68	0.144	0.03	0.03	0.03	1.13	100.04



Evidence of no residual calcite inclusions

even after purification/decontamination process and for the largest grains (500 – 1000 μm)

The random residual deviation may not be directly linked to calcite

but due to the adsorption of ¹⁰Be previously released