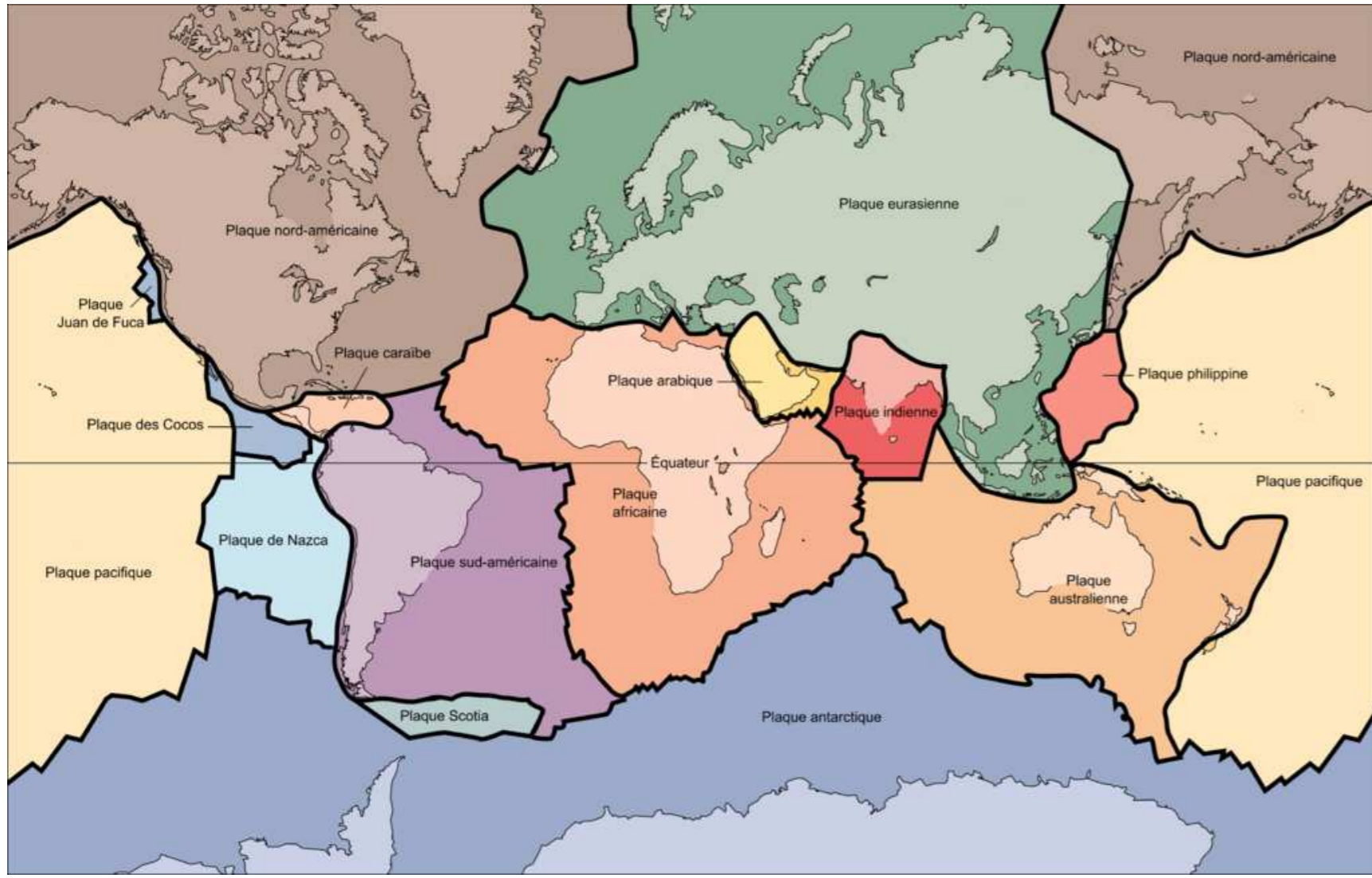


DE LA SUBDUCTION A LA COLLISION

Une planète animée

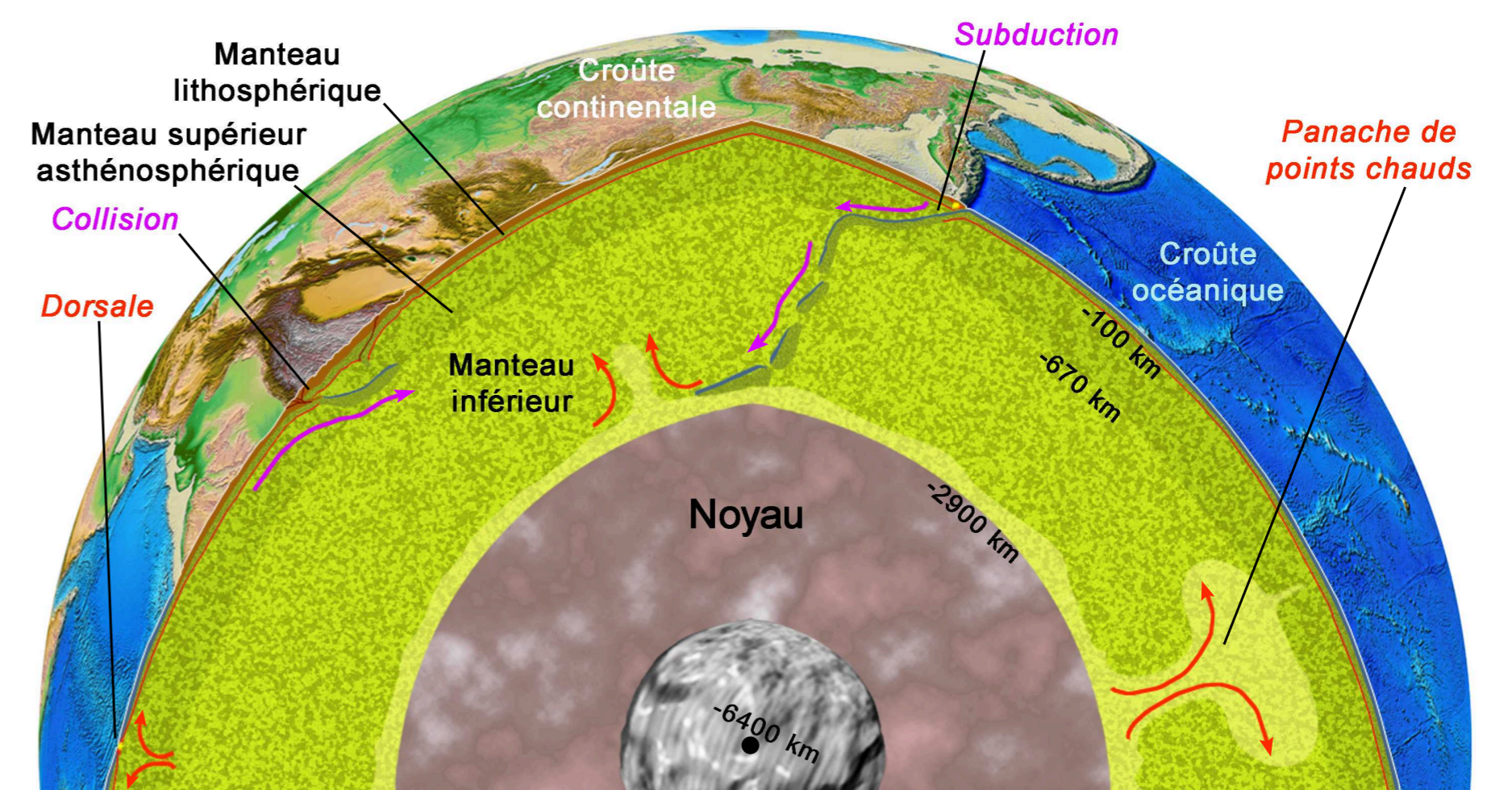
Les **plaques tectoniques** sont des portions de lithosphère qui «**glissent**» sur le **manteau terrestre**, de quelques cm/an. Leur épaisseur varie entre 15 et 200 km, pour un rayon terrestre de 6400 km. Leurs mouvements remodelent continuellement notre globe, ouvrent des océans et forment des chaînes de montagnes.



Les principales plaques tectoniques de notre planète

Convection et subduction

La différence de température entre le cœur de la Terre et sa périphérie entraîne une convection de matière à l'échelle du globe. Une **zone de subduction** est un lieu où **une plaque océanique plonge dans le manteau asthénosphérique, sous une plaque lithosphérique moins dense**. Lentement englouties, les roches sont transformées jusque parfois fondre en profondeur.



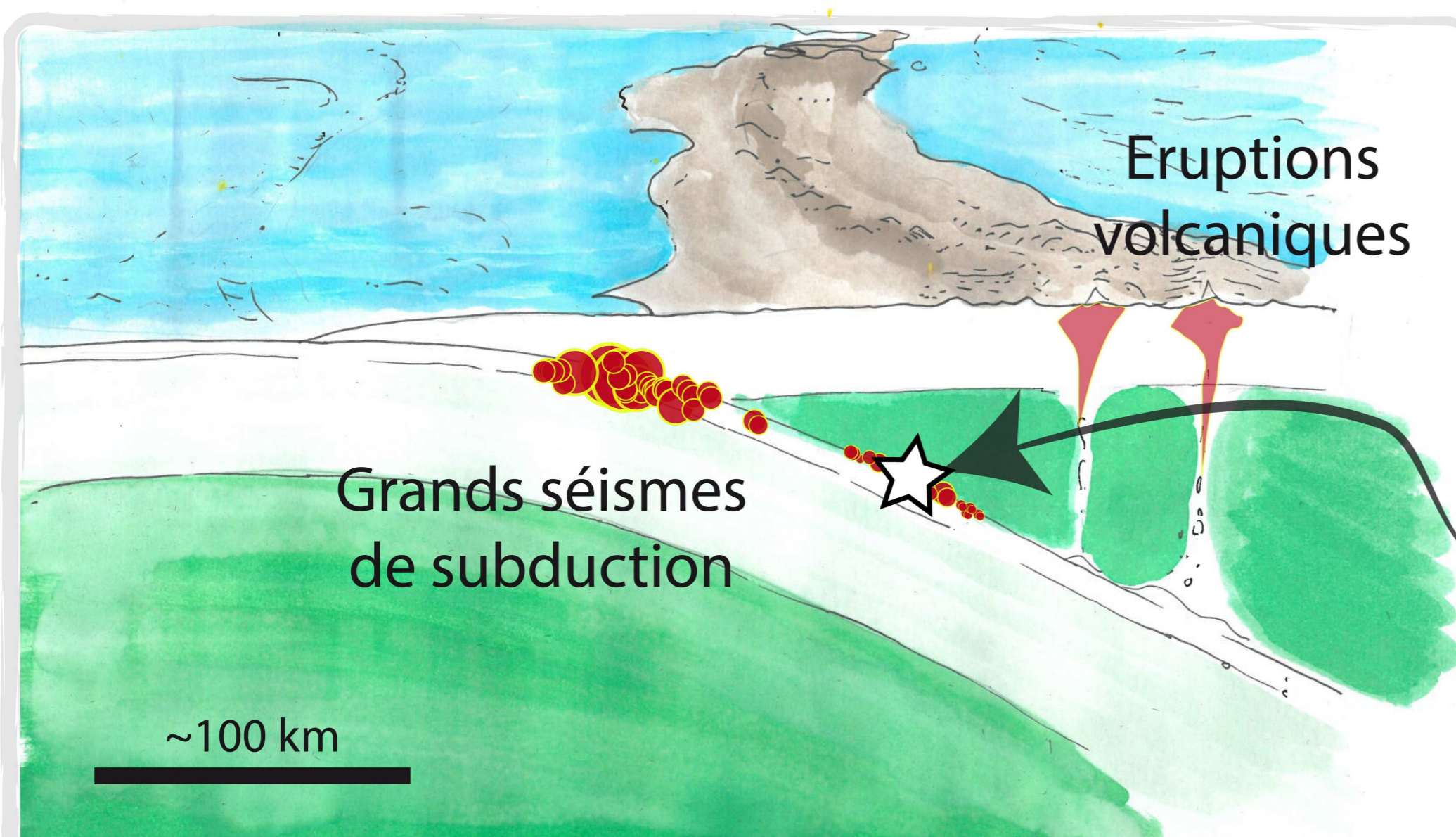
Séismes et montagnes

La collision de deux plaques continentales crée des chaînes de montagnes. A l'échelle humaine, ce processus est dévastateur : pendant la subduction, la friction entre les plaques libère de l'énergie sous forme de **séismes gigantesques** (Sumatra, 2004 ; Fukushima, 2011), et des **éruptions majeures** de volcans de grande taille affectent durablement le climat (Krakatoa, 1883 ; Pinatubo, 1991). Pendant la collision, des **séismes intracontinentaux** sont enregistrés (Gorkha au Népal, 2015).

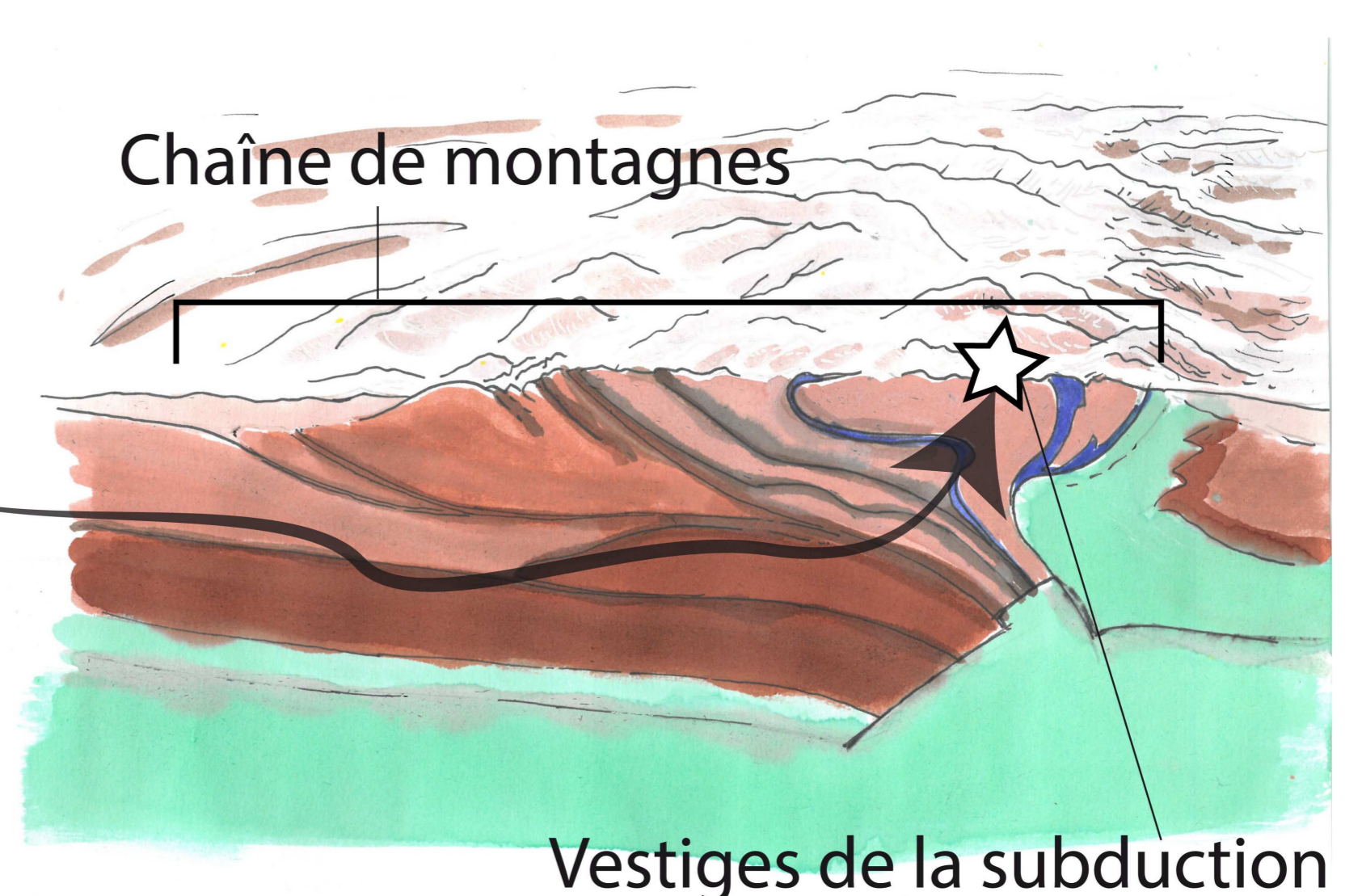
Voir l'inaccessible

Les parties profondes des zones de subduction n'étant pas directement observables, on étudie les roches transformées en profondeur et remontées à la surface dans les chaînes de montagnes. Un **échantillonnage** des roches exhumées est suivi d'**analyses physico-chimiques** de leurs minéraux et de **modélisations en laboratoire** pour comprendre leurs propriétés. La minéralogie et la déformation des roches permettent ainsi de reconstruire l'histoire de leur enfouissement et de leur exhumation.

DE LA SUBDUCTION....



... A LA COLLISION



LE GÉOLOGUE SUR LE TERRAIN

Pourquoi aller sur le terrain ?

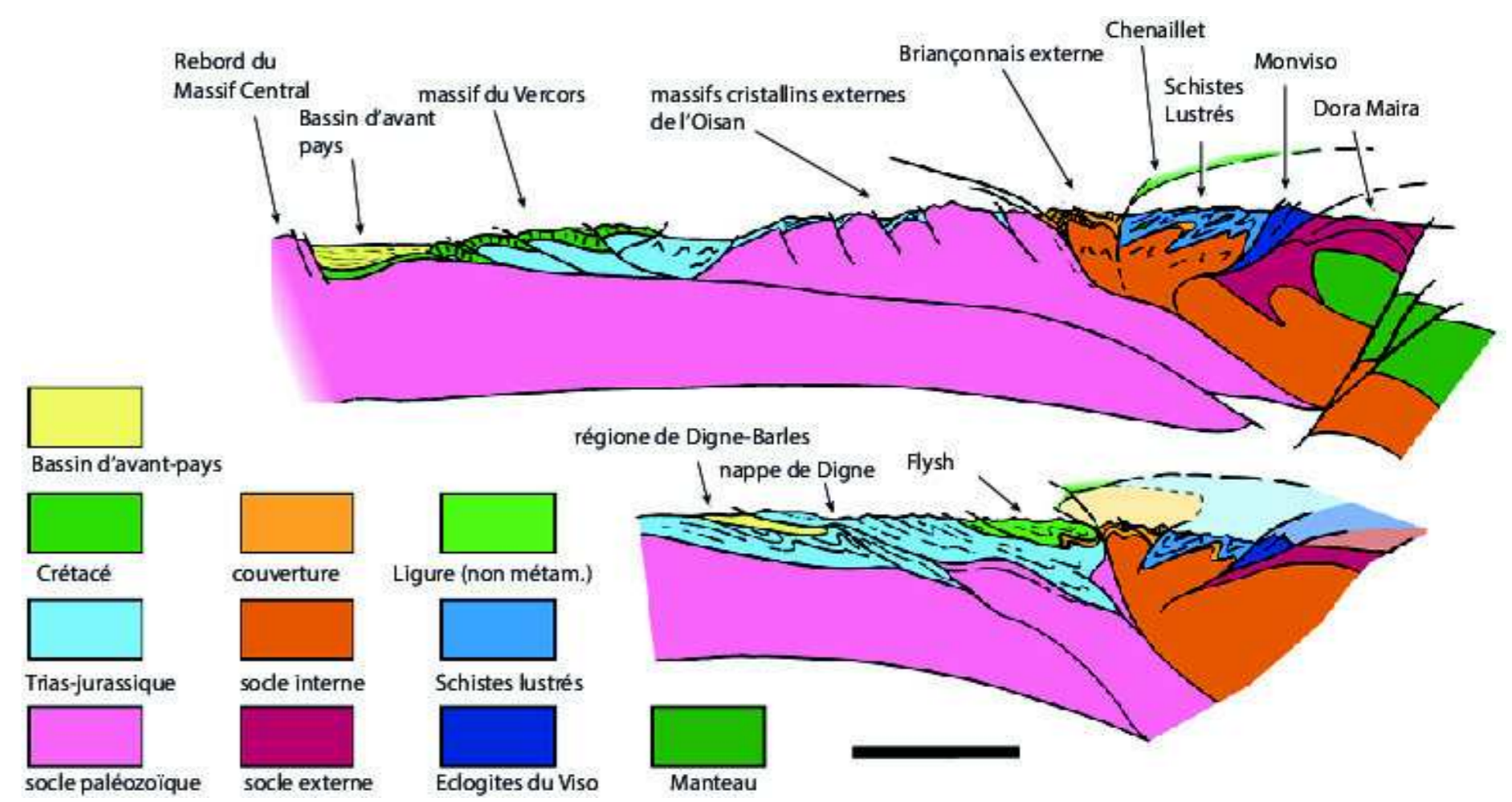
La géologie a été traditionnellement fondée sur **l'observation et l'interprétation des roches visibles en surface**. Cette approche permet d'affiner nos connaissances sur la structure géologique d'une région donnée et sur les **processus** comme la formation des montagnes, le fonctionnement des failles, etc.



© ISTeP

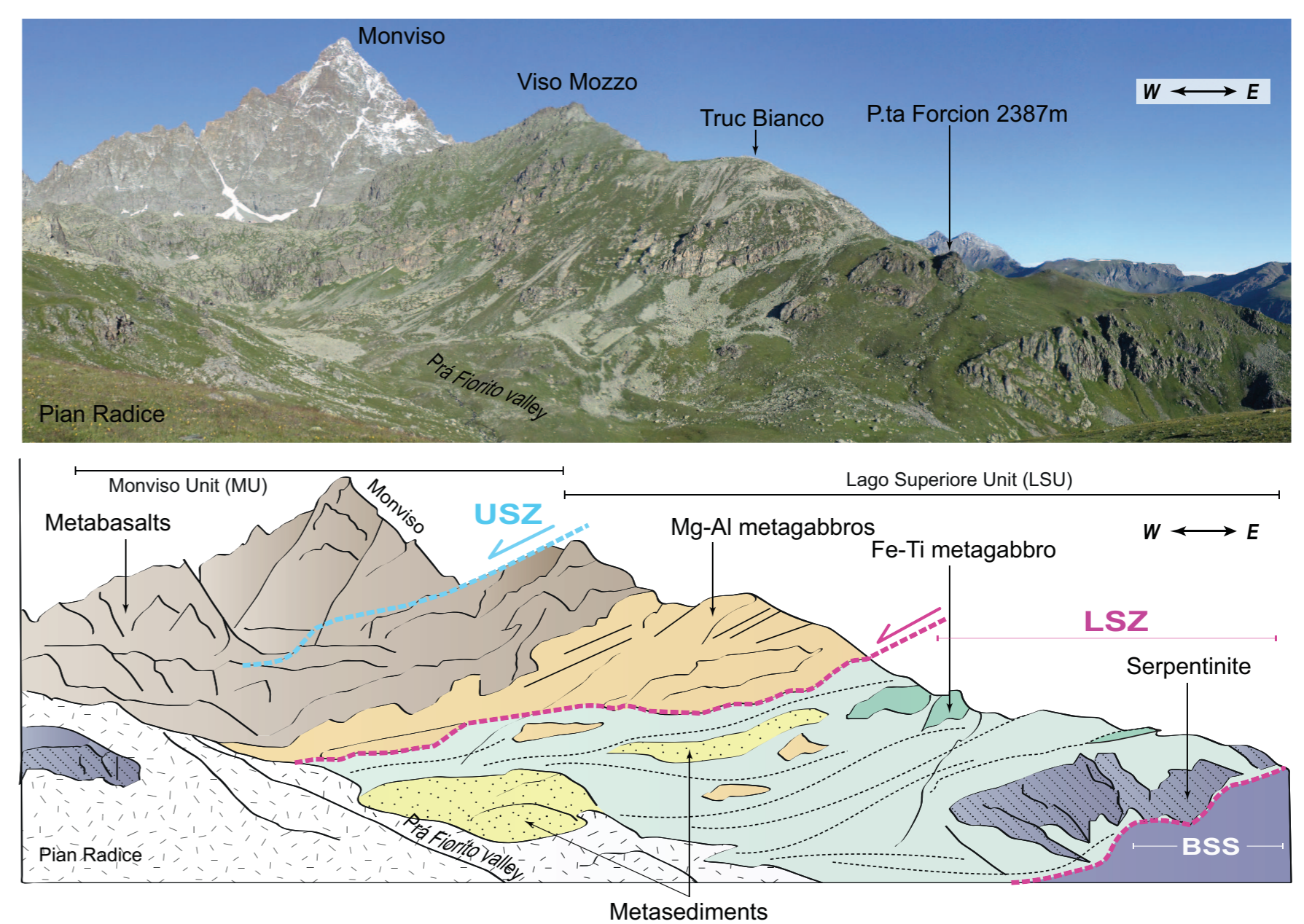
Coupes géologiques

A partir de plusieurs **observations ponctuelles**, on peut réaliser des **cartes géologiques** qui indiquent les différents types de roches présentes en surface, et proposer des **coupes géologiques** qui visualisent les couches profondes.



Deux coupes géologiques des Alpes (© Jolivet et al., 2004)

Les coupes géologiques issues des observations dans les Alpes permettent de comprendre la formation des chaînes de montagnes. Elles révèlent une **imbrication de couches d'âges différents, séparées par des failles**.

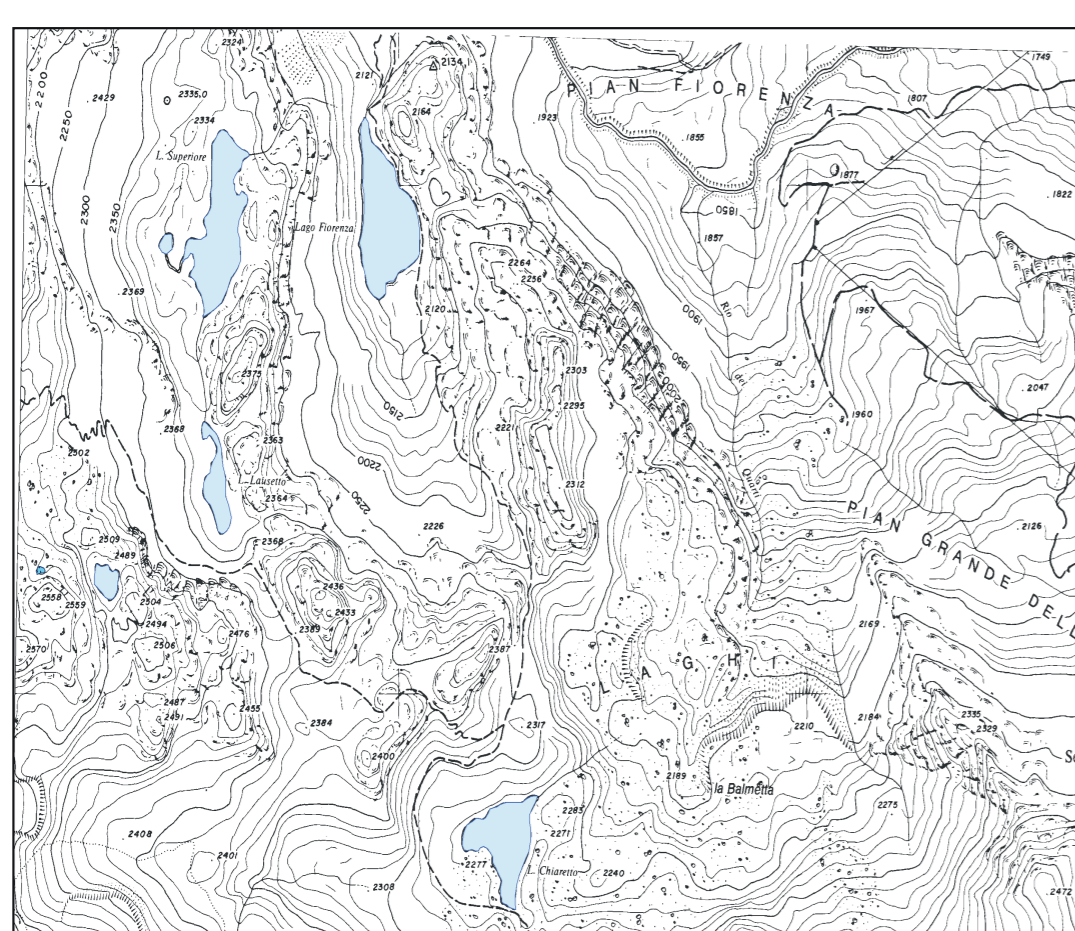


Panorama du Monviso (Alpes) interprété et légendé (© ISTeP).

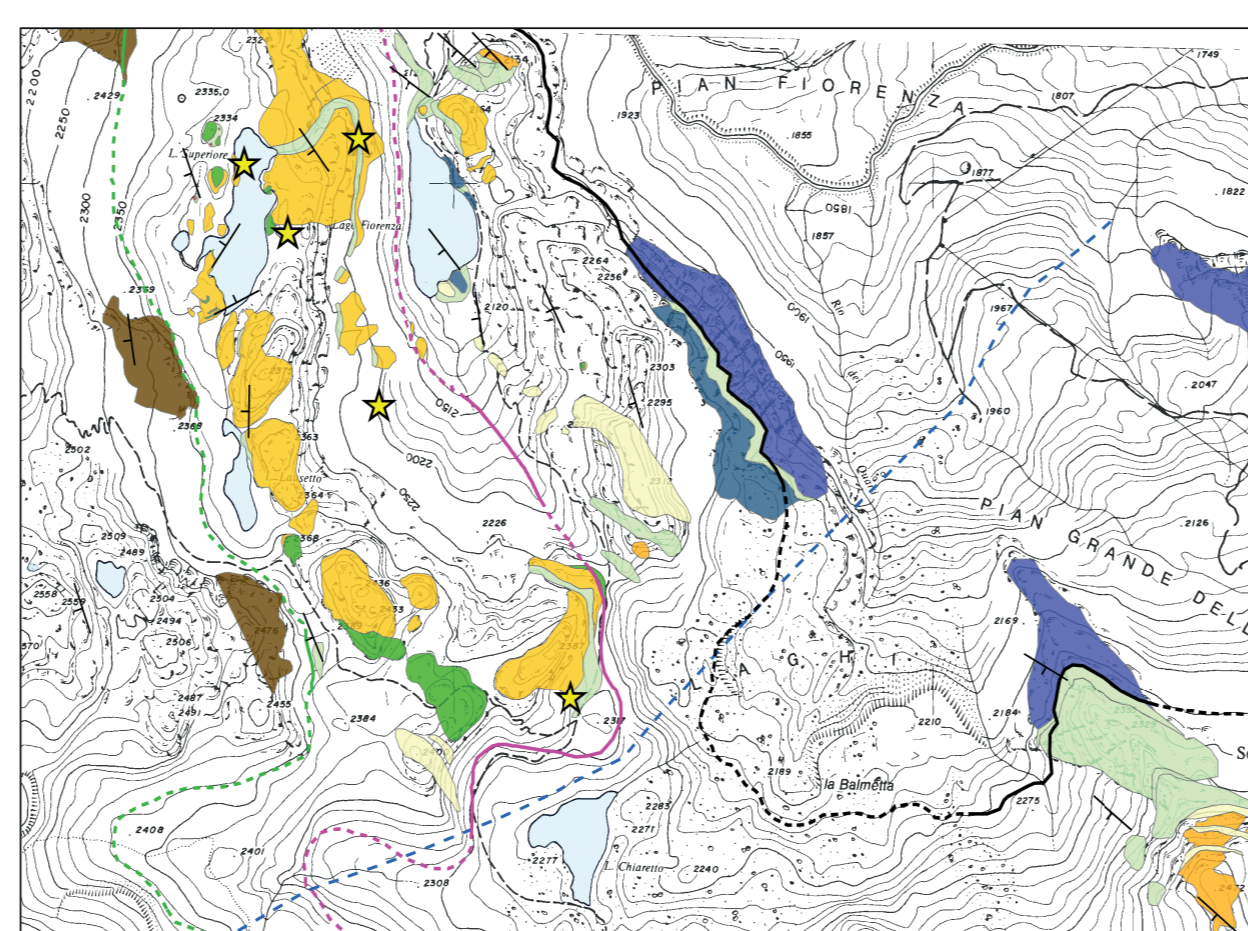
Sur le terrain, le géologue ...

- repère la zone d'intérêt et se localise à l'aide d'un **GPS** (1) et d'une **carte géologique** (2) ;
- observe et interprète le paysage et les affleurements de roches à l'aide de photographies et de notes prises sur son **carnet de terrain** (3). Des **drones** permettent aussi de visualiser les affleurements de roches en 3D ;
- mesure, avec une **boussole** et un **clinomètre** (4), la direction et l'inclinaison des couches géologiques et des axes des plis ;
- collecte à l'aide d'un **marteau** (5) des échantillons de roches pour les étudier en laboratoire. Ils sont d'abord observés à la **loupe** (6) puis rangés dans des **sacs à échantillon** (7) étiquetés.

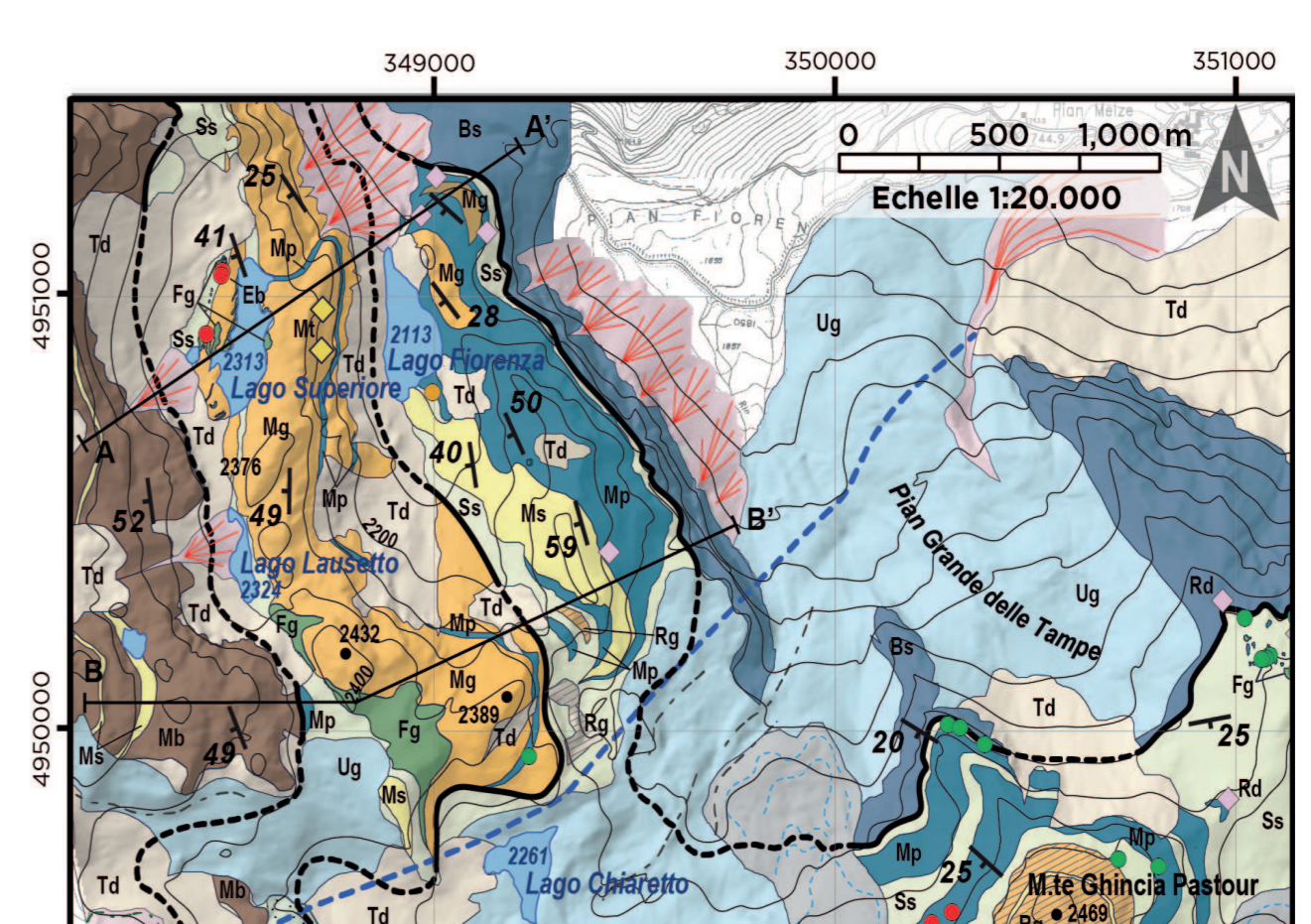
Des observations de terrain aux cartes géologiques



1. Carte topographique



2. Minute de terrain



3. Carte géologique complète

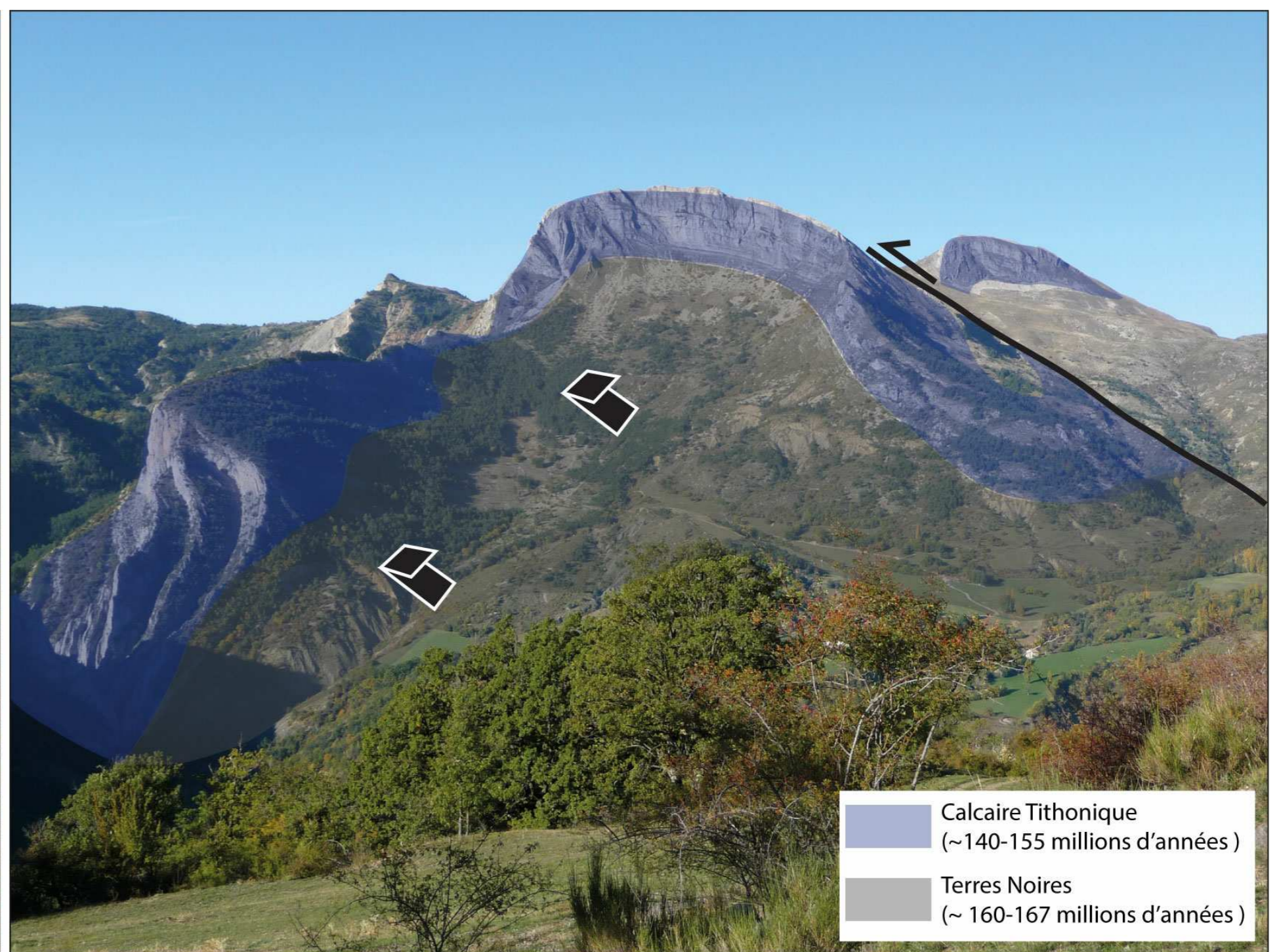
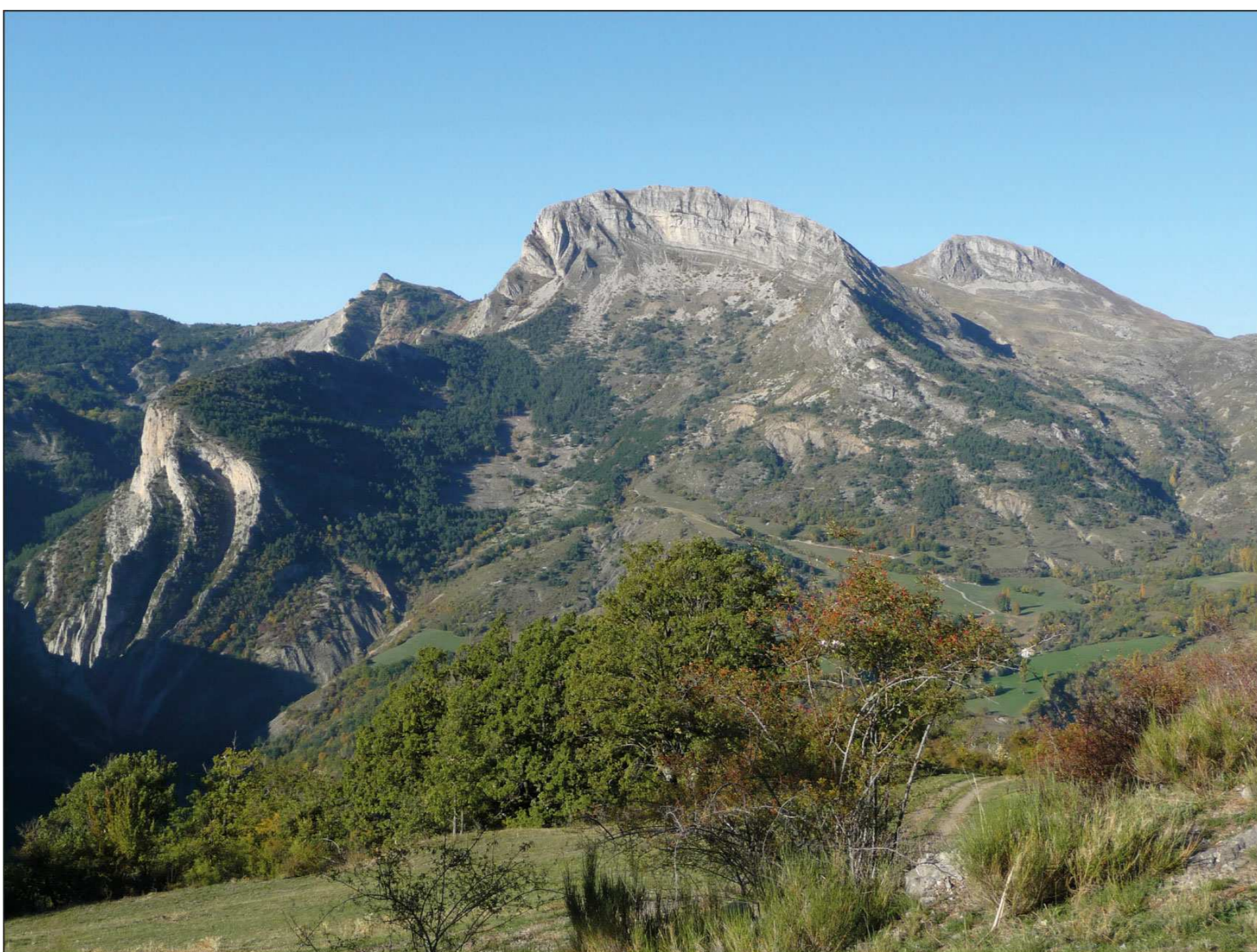
INTERPRETER LE PAYSAGE GEOLOGIQUE

Crête de la Taillante (Queyras, Alpes occidentales).



© IStEP

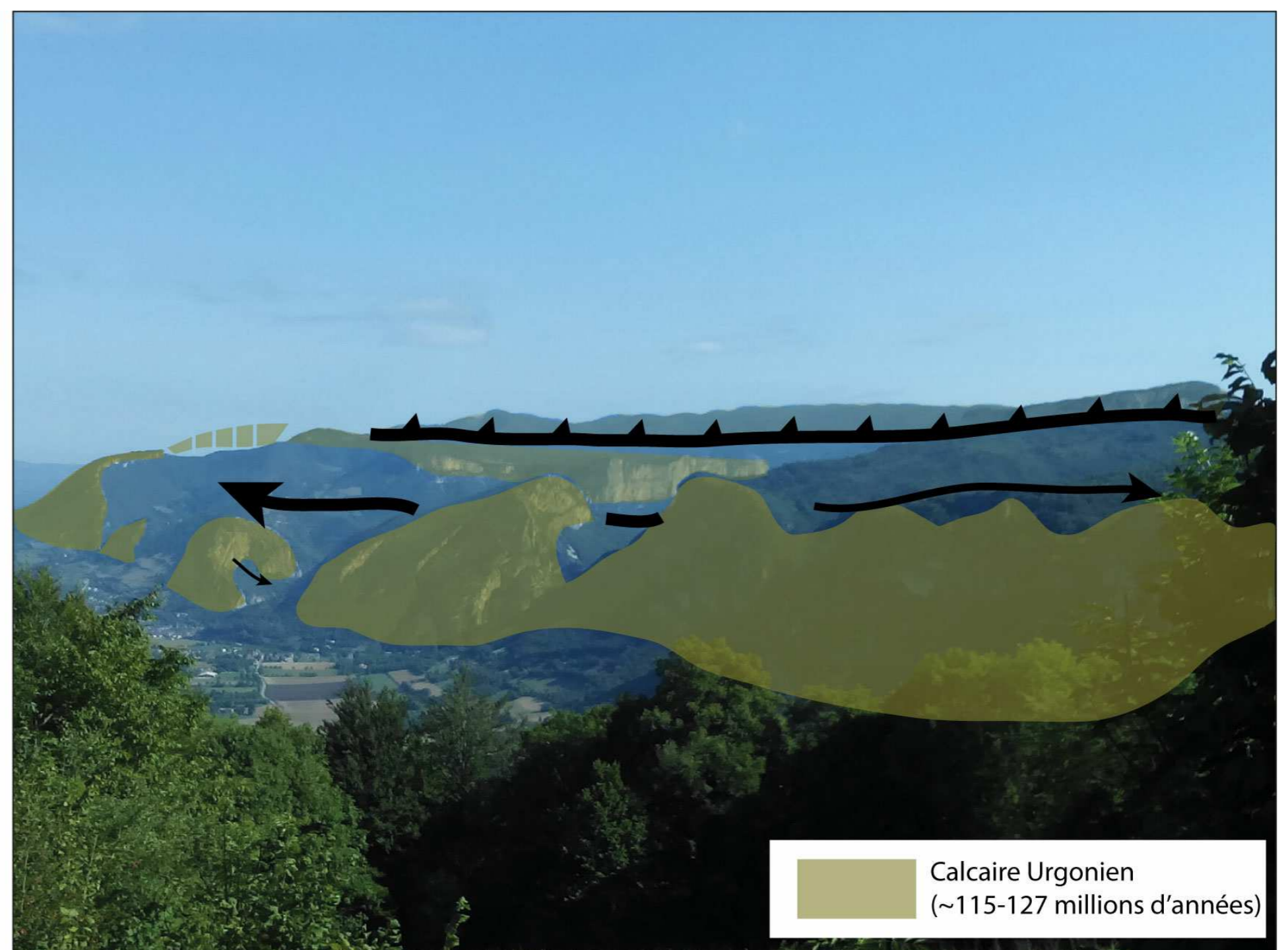
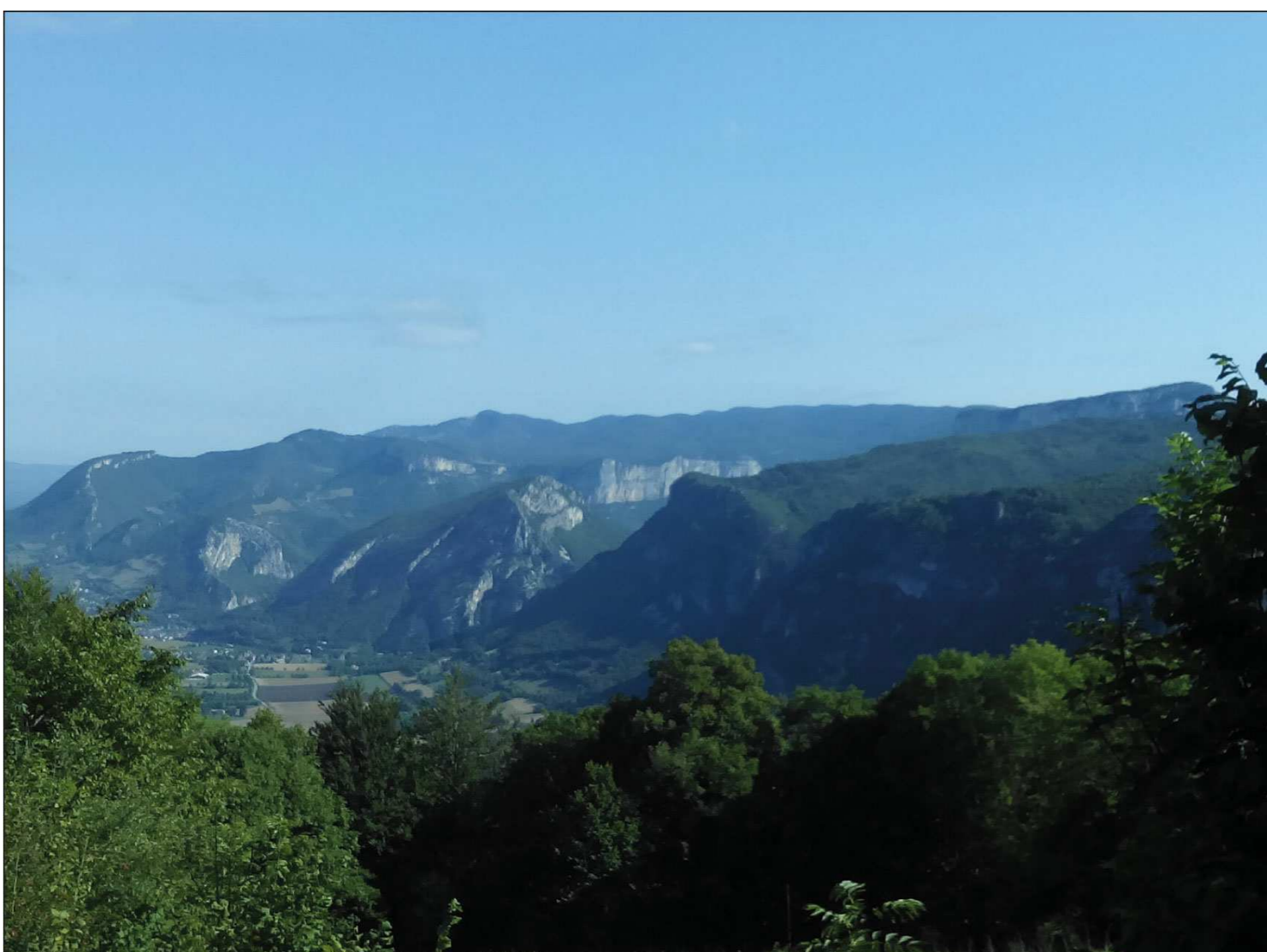
Plis dans des calcaires près de Barles (Alpes-de-Haute-Provence). La ligne noire indique un chevauchement de Terres noires (mélange de calcaire et d'argile) sur un calcaire plus récent du Jurassique.



Calcaire Tithonique
(~140-155 millions d'années)
Terres Noires
(~ 160-167 millions d'années)

© IStEP

Plis dans un calcaire du Crétacé à Pont-en-Royans (Vercors). La ligne continue indique l'axe du pli et la ligne dentée montre le chevauchement des barres calcaires sur des unités plus récentes du Miocène.



Calcaire Urgonien
(~115-127 millions d'années)

© IStEP

ANALYSE DES ROCHES

Les cristaux

Les roches sont des assemblages de minéraux, souvent petits (< 1 mm) mais parfois géants (> 1 m) et généralement cristallins. Les cristaux peuvent grandir en remplaçant des matériaux pré-existants (micro-fossiles, anciens cristaux ou verres volcaniques). Ils se créent aussi à partir du magma ou des eaux profondes. On peut observer plusieurs types de cristaux dans une même roche, et certains sont typiques de l'environnement où ils se sont formés. Ils nous aident à reconstruire l'histoire d'une roche.

Outils d'analyse

Le **microscope électronique** facilite l'identification des plus petits cristaux, inclusions ou hétérogénéités de l'ordre du micromètre (diamètre du faisceau d'électrons). Il permet de voir la structure fine de la roche et de connaître l'ordre d'apparition des cristaux.

L'**analyse chimique** se fait sur la roche broyée ou sur le cristal, en quelques minutes et en série. Elle permet de confirmer l'identification et de guider la modélisation.

SPECTROMETRE DE MASSE équipé d'un LASER

détecteur (spectromètre)

générateur de laser



- ✓ destructif : oui (infime)
- ✓ taille : 1,20 mètre de long (chacun: laser et spectromètre)
- ✓ prix : 600 000 €

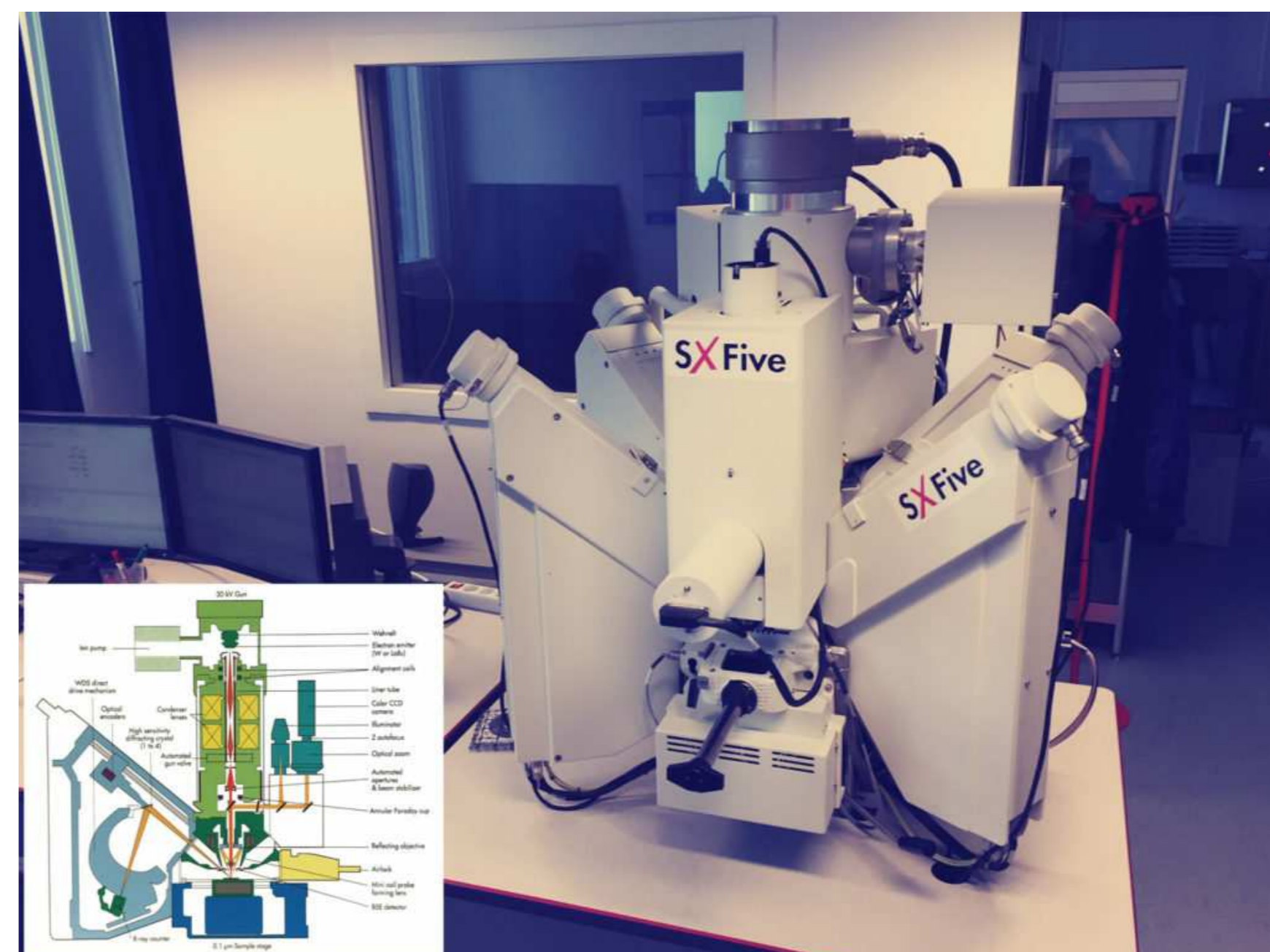
- ✓ optimisé pour :
 - concentrations faibles
 - datation

© ISTRP

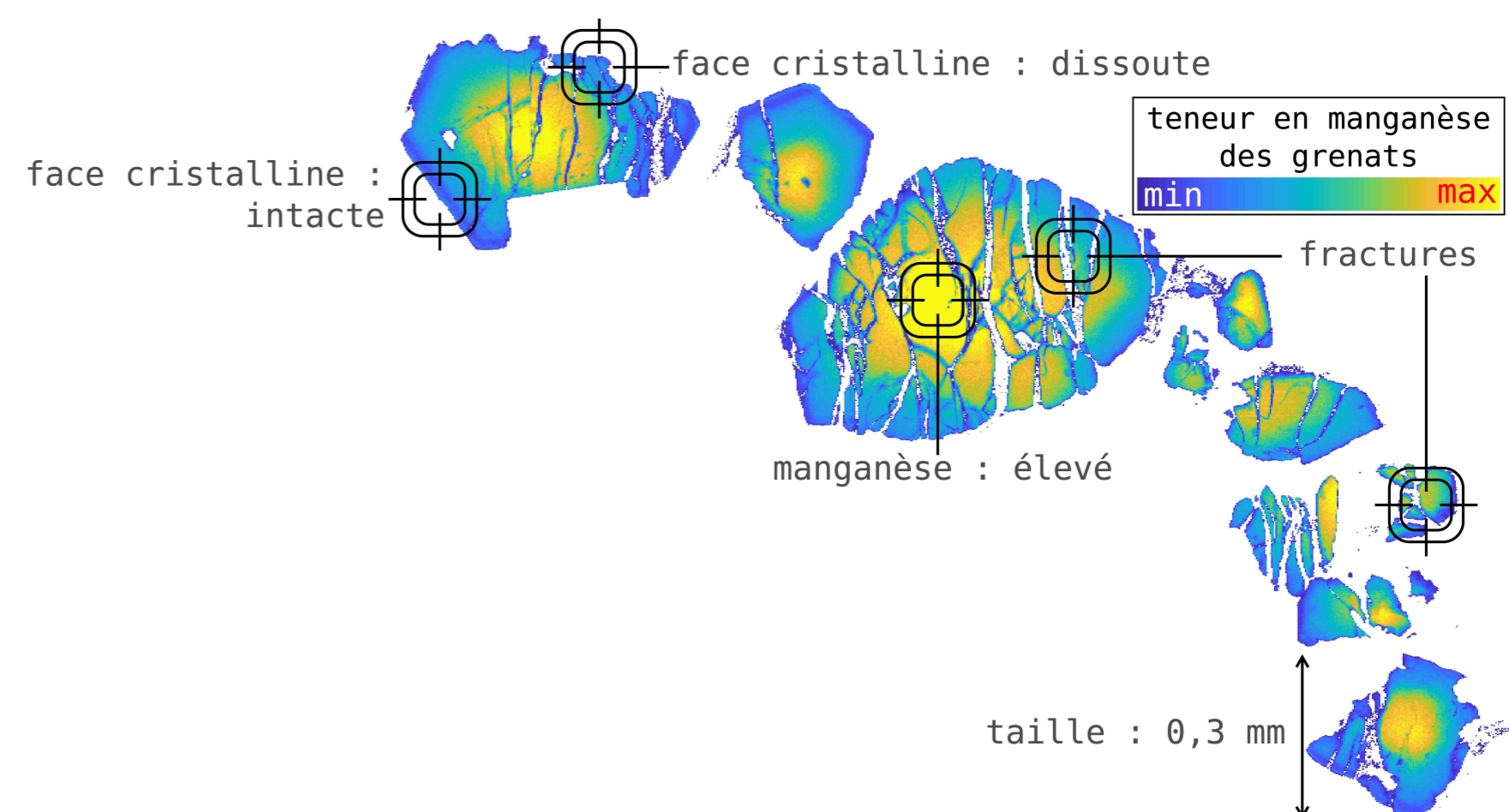
Grâce à un faisceau laser de 1 à 30 micromètres de diamètre, on peut analyser de très petits volumes. Avec les techniques les plus avancées, on peut explorer des échantillons encore plus petits mais le temps et les coûts de préparation et d'analyse augmentent rapidement.

Cartographie d'une roche

Une microsonde électronique envoie un faisceau d'électrons sur un échantillon de roche et capte les rayons X émis en réponse.



Pour obtenir une **carte de composition**, on réalise un grand nombre d'analyses rapides. La composition est mesurée point par point. On obtient une grille de mesures avec laquelle on reconstruit une image de la **répartition des cristaux** et des **changements de composition** entre le centre et le bord.



Quelles informations en tirer ?

Ces analyses sont utilisées pour modéliser les conditions de cristallisation des minéraux. Sous quelle pression et à quelle température sont-ils apparus ? Ont-ils cristallisé simultanément ou en plusieurs générations ?

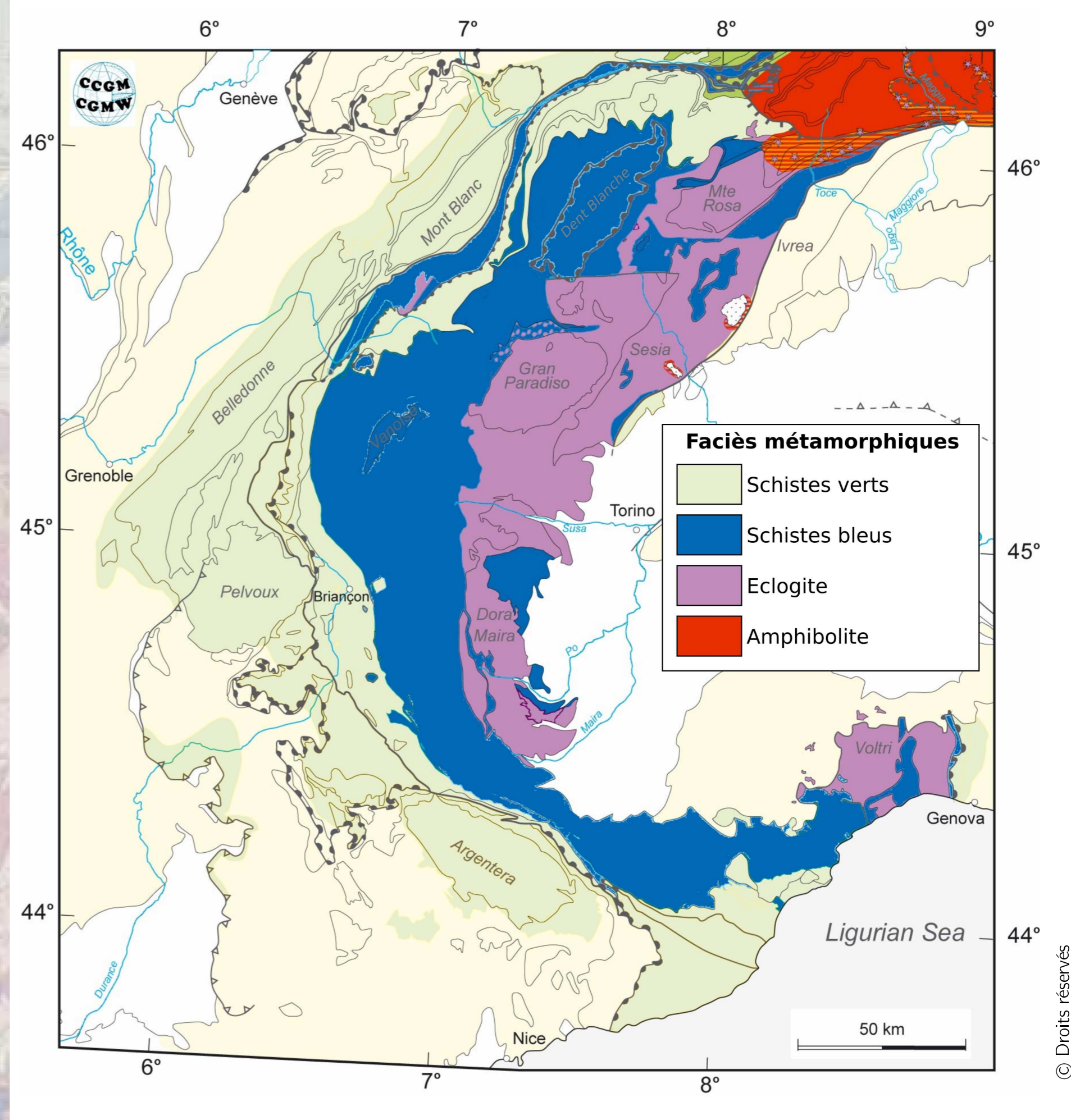
La mesure de la teneur en éventuels éléments radioactifs permet d'**évaluer l'âge des cristaux**. Il faut ensuite **expliquer les processus** qui leur ont permis de se former et d'arriver au cœur des montagnes.

TEMOINS DES PROFONDEURS

Un long périple

Les roches que l'on trouve aujourd'hui dans les chaînes de montagnes ont une histoire longue et éprouvante. Celles qui constituent des **vestiges des zones de subduction** se sont formées sur le fond océanique il y a plusieurs millions d'années. Ces **anciens basaltes** ont été **entraînés en profondeur**, arrachés à la plaque plongeante et remontés en surface.

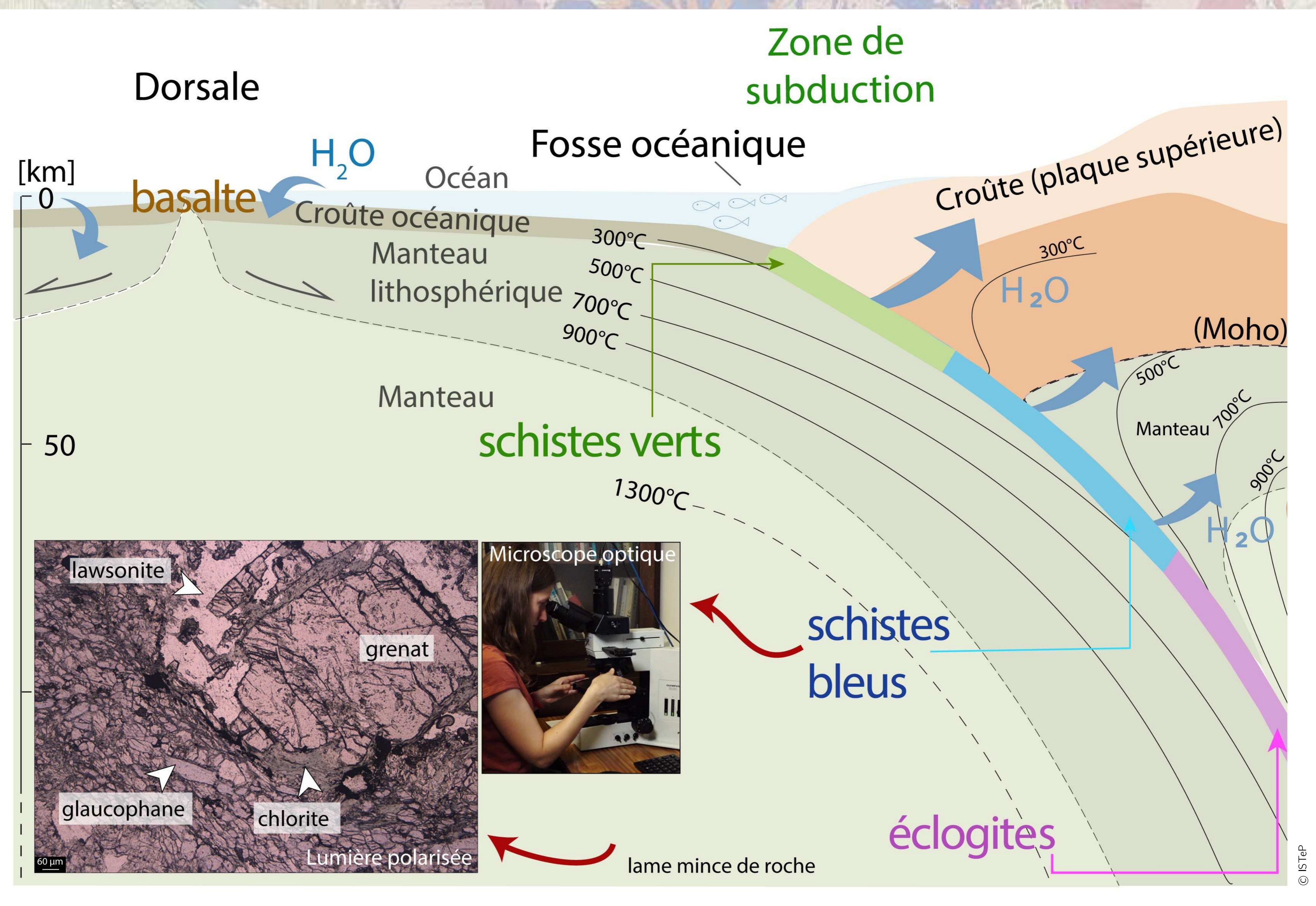
Un exemple dans les Alpes



Transformations

Sur le fond océanique, **l'eau de mer hydrate les basaltes**. Lorsque cette croûte, couverte de sédiments, est enfouie dans la zone de subduction, **la chaleur et la pression forment de nouveaux minéraux** et libèrent de l'eau.

La succession de ces minéraux caractérise la profondeur et la température atteintes. On distingue ainsi les conditions des **schistes verts** (Mont Blanc), des **schistes bleus** (Queyras) ou des **éclogites** (Grand Paradis).



MODELES DYNAMIQUES

Pourquoi modéliser ?

En observant des structures géologiques sur le terrain, le géologue peut **formuler des hypothèses sur les processus qui ont permis leur mise en place**. Cependant, ces informations sont discontinues, limitées dans l'espace et de courte durée, comparée aux temps géologiques. Pour combler les zones d'ombre, le géologue utilise **des modèles qui représentent de façon simplifiée les phénomènes naturels** (mouvements des plaques, réactions entre minéraux, évolution de la température dans la croûte). Ils permettent de comprendre le rôle des différents paramètres et les processus géologiques dans l'espace (profondeur) et dans le temps.

Numérique ou analogique ?

La **modélisation analogique** reproduit des processus géologiques avec une maquette, à petite échelle de temps et d'espace. On peut utiliser du **sable** pour mimer les couches superficielles de la Terre, ou du **miel** pour prendre en compte l'augmentation de température et la viscosité des couches profondes.

Ci-dessous, des couches de sable coloré ont été comprimées pour simuler et visualiser la collision de plaques tectoniques.

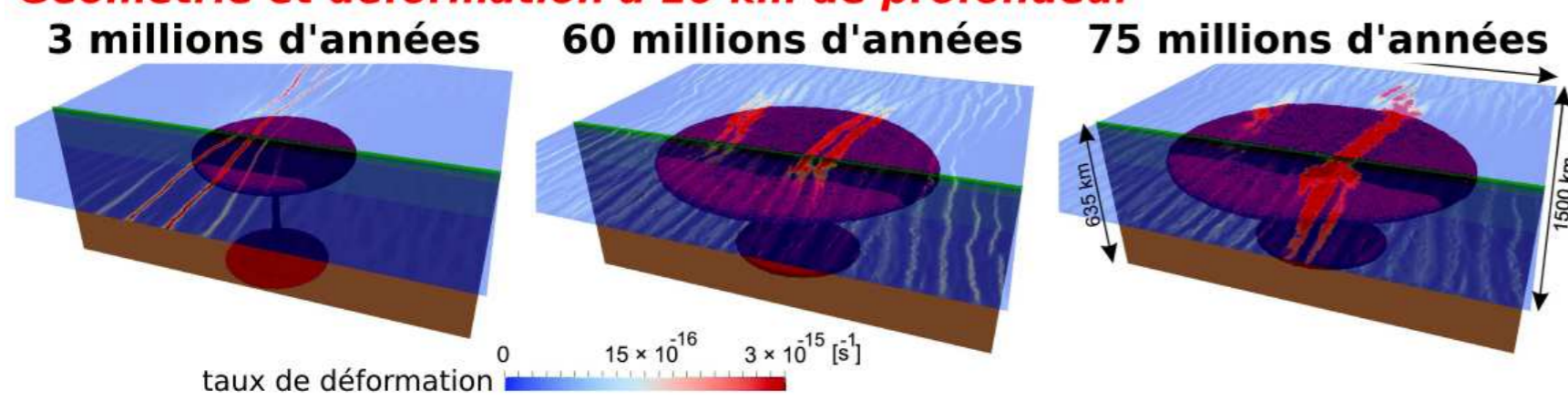


En **modélisation numérique**, pour chaque paramètre (vitesse de convergence des plaques, température, ...) et à chaque incrément temporel, on résout des **équations physiques**. On prend en compte les propriétés thermiques de la croûte, la présence de fluides et les transformations minéralogiques qui affectent les roches.

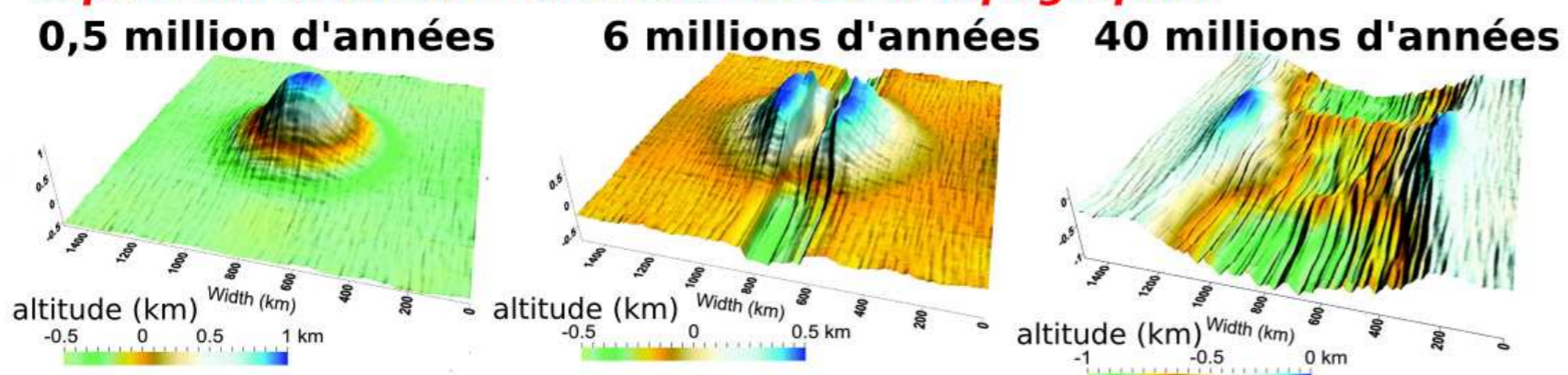
Modéliser en 3D

MODELISATION NUMERIQUE EFFET DE LA REMONTEE DE MAGMA PROFOND

Géométrie et déformation à 10 km de profondeur

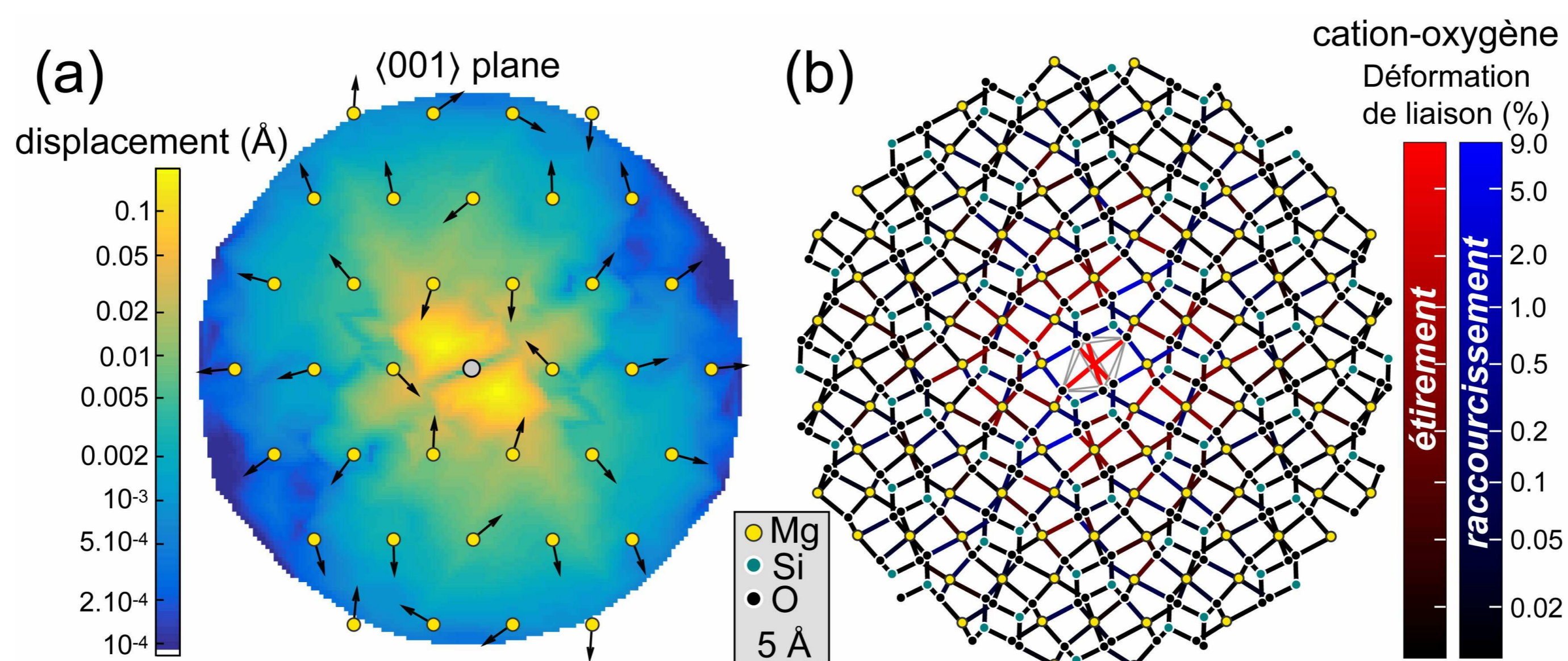


Impact sur la surface et évolution de la topographie



En comparant les images des simulations numériques à la topographie réelle du terrain, on peut tester la validité des modèles théoriques et ajuster leurs paramètres.

Modélisation d'un cristal d'olivine déformé par un défaut



Modélisation de la déformation d'un cristal d'olivine qui incorpore anormalement, au centre, un atome de calcium.

(1 Å = 10^{-10} m; © Dubacq et Plunder, 2018)

L'Institut des Sciences de la Terre de Paris (ISTeP)

Ses activités

L'ISTeP regroupe une centaine de personnes qui travaillent pour comprendre comment la Terre fonctionne. Il mène des recherches fondamentales sur les **archives paléoclimatiques**, mais aussi sur la **tectonique des plaques** et les **processus physico-chimiques** qui contrôlent ces expressions de la dynamique terrestre.

Par ailleurs, l'ISTeP aborde des sujets d'actualité et accompagne la transition des ressources conventionnelles (hydrocarbures fossiles) vers des formes d'énergie moins polluantes, comme la **géothermie**.

Les **risques naturels** (glissements de terrain, séismes) font aussi partie des processus que l'ISTeP tente de cerner. L'**aménagement du territoire et la préservation du patrimoine** posent aussi des problèmes géologiques abordés par l'ISTeP. Ses recherches se nourrissent ainsi de la rencontre entre une science pluridisciplinaire et des préoccupations sociales concrètes.

Ses moyens

Pour atteindre ces objectifs, l'ISTeP organise des **expéditions scientifiques** aux quatre coins du monde afin de collecter des données. Ses **outils d'analyse ultra-modernes** permettent ensuite de déterminer des compositions chimiques ou de dater des roches. Enfin la **puissance de calcul** de la Faculté des Sciences de Sorbonne-Université permet de tester les hypothèses formulées à travers des **modèles numériques 3D** haute résolution, capables de **reproduire en quelques heures des phénomènes extrêmement lents**.

Les géosciences traitent donc de problèmes complexes sur des durées allant de la seconde aux millions d'années, et des distances allant du grain de sable à la plaque tectonique.

