



**POLYTECH**  
**GRENOBLE**  
Département Géotechnique

*Ecole polytechnique de l'université Grenoble-I (Université Joseph Fourier)*



## **Cours de Géologie appliquée**

# ***MOUVEMENTS GRAVITAIRES***

## ***1. MOUVEMENTS DUS AUX VIDES SOUTERRAINS***



**POLYTECH**  
**GRENOBLE**  
Département Géotechnique

*Ecole polytechnique de l'université Grenoble-I (Université Joseph Fourier)*



## ***MOUVEMENTS GRAVITAIRES***

Définition d'un **mouvement gravitaire**  
(appelé communément **mouvement de terrain**) :

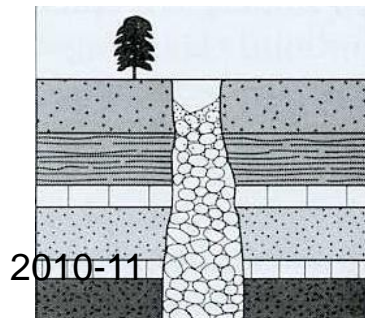
Déplacement d'une masse de sol ou de roche, dû essentiellement à la **gravité**, par opposition aux mouvements **tectoniques** (déformation et rupture de la croûte terrestre, ondes sismiques provoquant les tremblements de terre, remontée de lave, ...)

# TYPES DE MOUVEMENTS GRAVITAIRES

- Mouvements dus à des vides souterrains (affaissements s.l., *en anglais, subsidence*)



- Mouvements de pente (glissements de terrain s.l., *en anglais, landslides*)



# ***MOUVEMENTS DUS AUX VIDES SOUTERRAINS***

## **CAUSES DE MOUVEMENT**

- CAVITES DE DISSOLUTION OU D'ENTRAINEMENT
- EXCAVATIONS (MINES ET CARRIERES, TUNNELS, ...)
- TASSEMENT DU AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES
- COMPACTION DES SEDIMENTS
- EXPLOITATION DE FLUIDES
- PHENOMENES VOLCANIQUES (CALDERA)



# ***MOUVEMENTS DUS AUX VIDES SOUTERRAINS***

## PLAN DU CHAPITRE

1. DESCRIPTION DES CAVITES
2. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS ET DES MECANISMES DE RUPTURE DES CAVITES
3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE DUS AUX CAVITES
4. RETRAIT-GONFLEMENT DES ARGILES

# 1. DESCRIPTION DES CAVITES

1.1. CAVITES DE DISSOLUTION

1.2. MINES ET CARRIERES SOUTERRAINES

1.3. CAVITES VOLCANIQUES

# DISSOLUTION DU CALCAIRE ET DU GYPSE

Solubilité dans l'eau :

- calcite ( $\text{CaCO}_3$ ) : 0,2 g/l
- gypse ( $\text{CaSO}_4$ ) : 2 g/l
- chlorure de sodium ( $\text{NaCl}$ ) : 360 g/l

## CALCAIRE

Taux d'ablation (volume rocheux annuellement dissous, rapporté à la surface affleurante du massif) : de l'ordre de  $10^{-4}$  m/an (1 cm/siècle)

*Exemple de modelé karstique de surface dans le calcaire : lapiaz (calcaire urgonien du Vercors) ↓*



## GYPSE

Ablation de **plusieurs mm par an** pour une couche de gypse baignée par une retenue

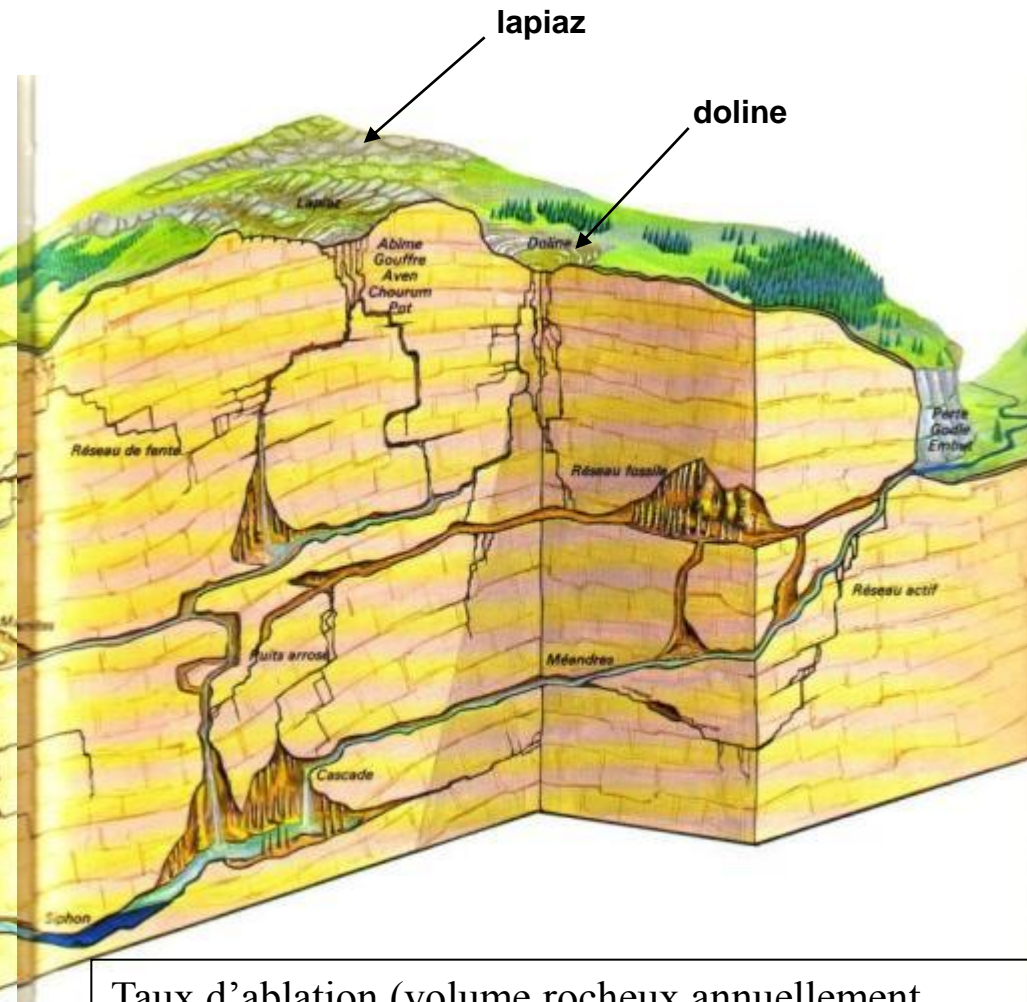
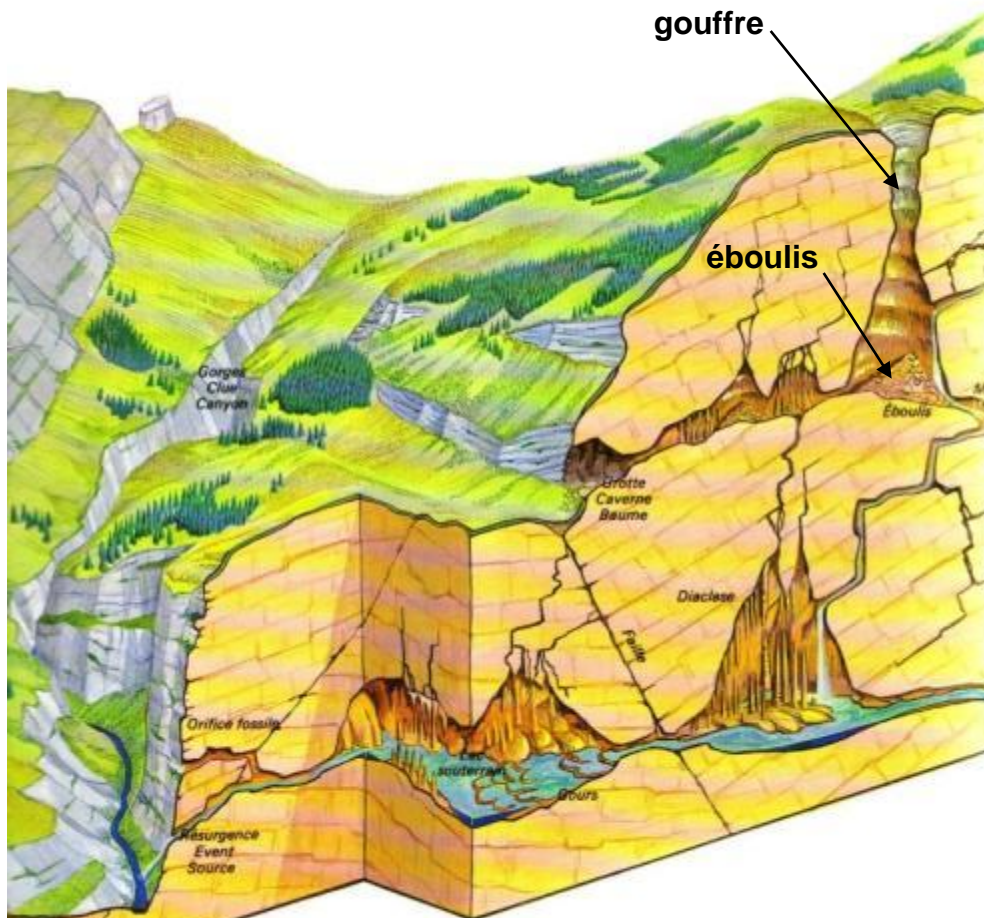
*Exemple de modelé karstique de surface dans le gypse : entonnoir de dissolution (gypse triasique) ↓*





# Modèle karstique dans le calcaire

La dissolution se produit en surface et en profondeur dans les fractures et les joints, qui s'élargissent progressivement. Des conduits se forment aux intersections (puits, galeries). Lorsque les vides deviennent importants, des éboulements peuvent se produire.



Taux d'ablation (volume rocheux annuellement dissous, rapporté à la surface affleurante du massif) de l'ordre de  $10^{-4}$  m/an (1 cm/siècle)

Dissolution du calcaire par l'eau chargée d'anhydride carbonique (après avoir traversé la couverture végétale et le sol) :

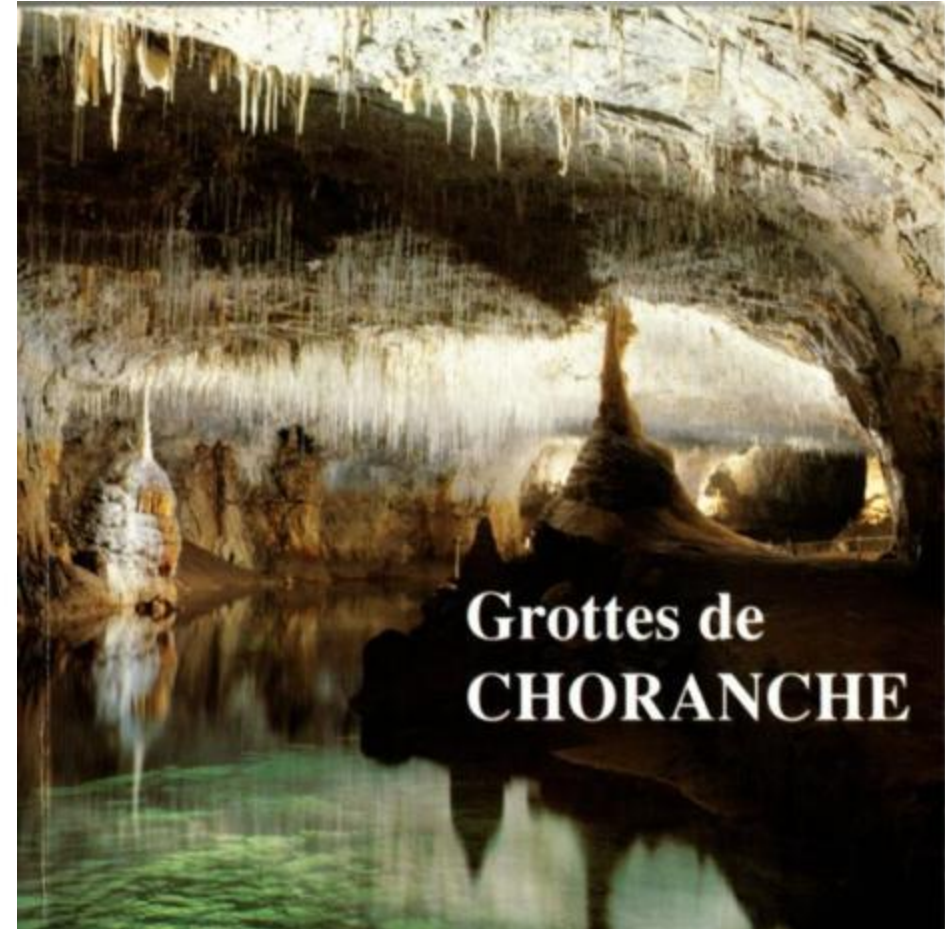
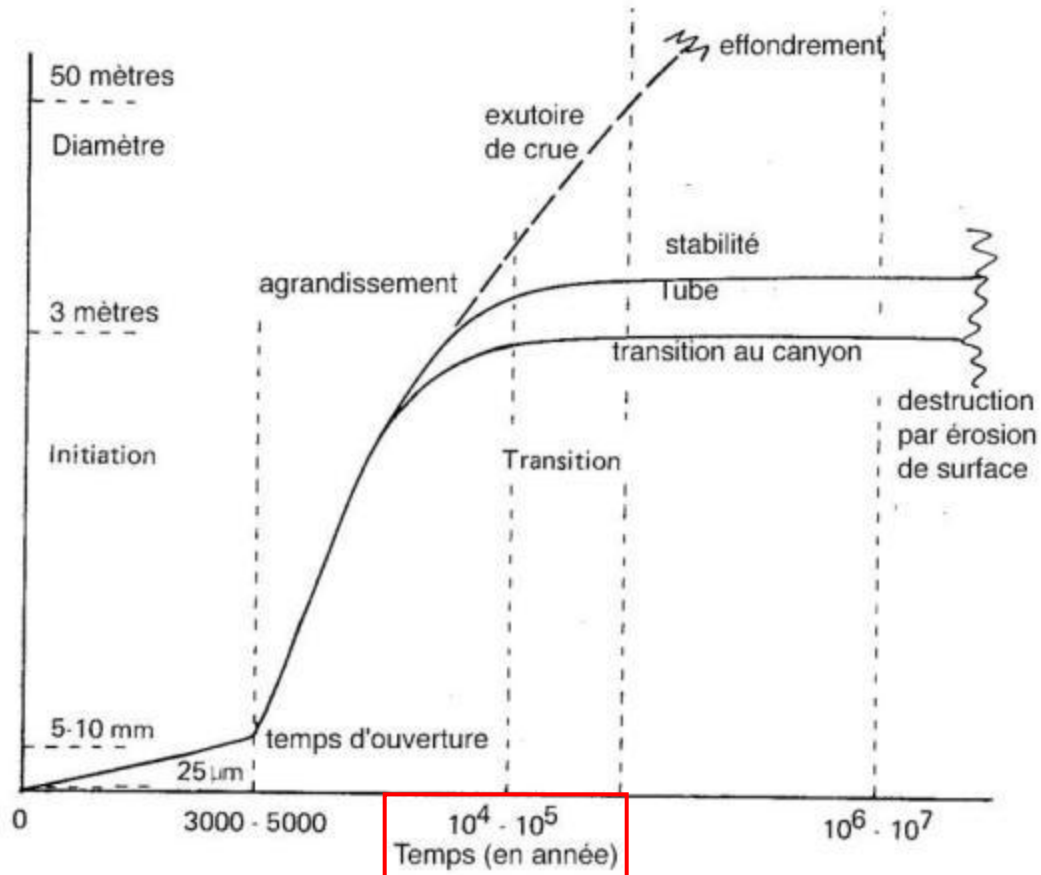
$$\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2 + \text{CaCO}_3 \rightarrow \text{Ca}(\text{CO}_3\text{H})_2$$

(d'après P. Minvielle, Grottes et canyons, Denoël, 1977)



# DISSOLUTION DU CALCAIRE

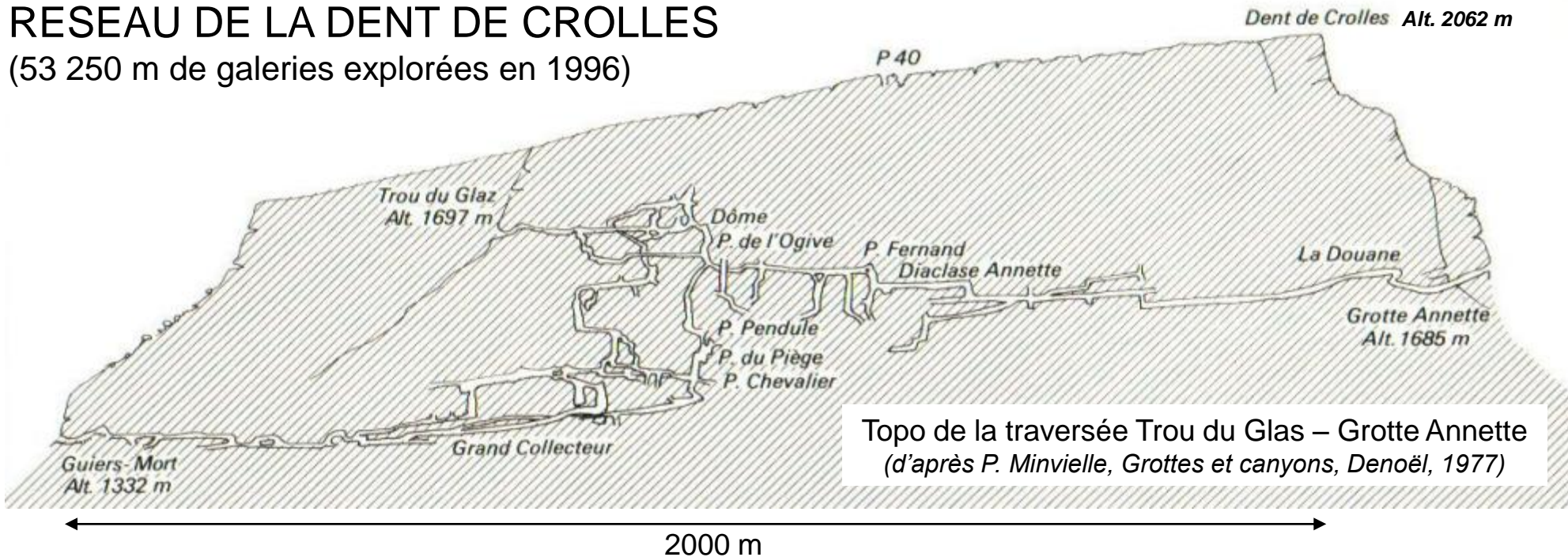
Temps de formation des conduits karstiques dans le calcaire (d'après White)



Salle d'environ 30 m de diamètre et 15 m de hauteur  
(photo R. Delon, in *Grottes de Choranche*, Castelet, 1991)

# RESEAU DE LA DENT DE CROLLES

(53 250 m de galeries explorées en 1996)



2012

D. Hantz - Polytec

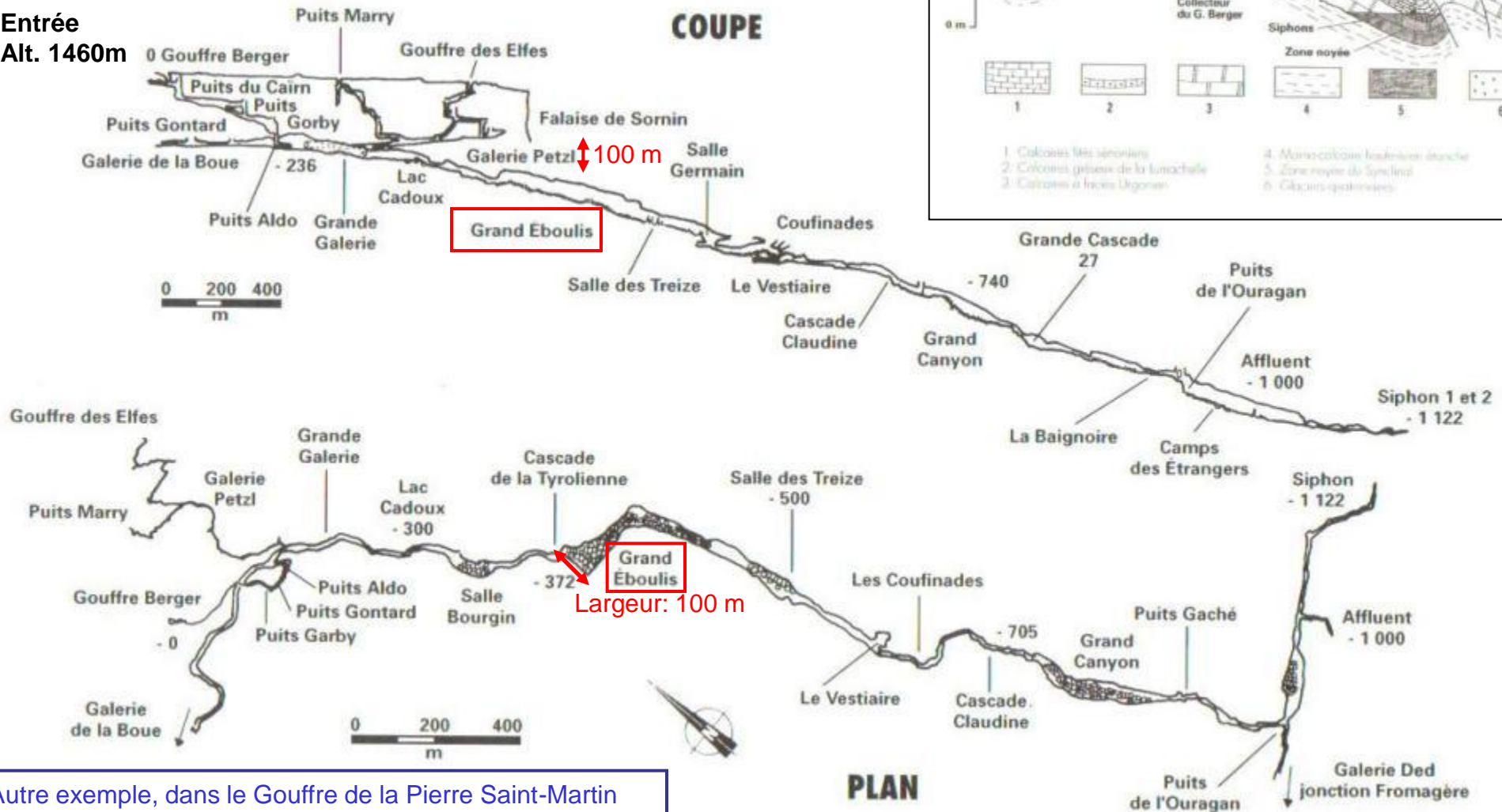




# EXEMPLES DE GRANDES CAVITES KARSTIQUES

## Gouffre Berger (Engins, massif du Vercors)

Entrée  
Alt. 1460m



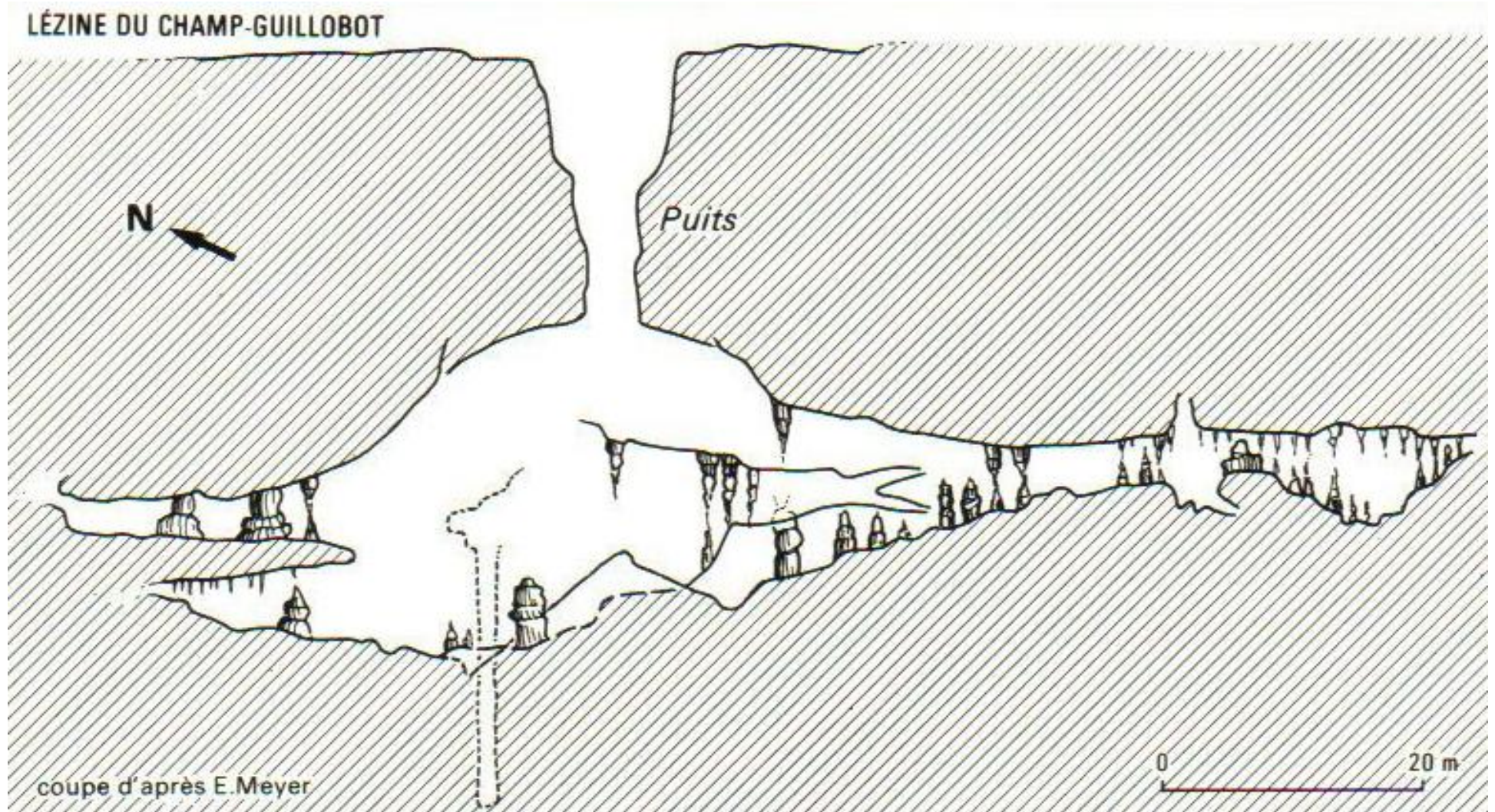
Autre exemple, dans le Gouffre de la Pierre Saint-Martin (Pyrénées) : Salle de la Verna, en forme de demi-sphère de 220 m de diamètre et 170 m de hauteur

### PLAN

(d'après Caillault et al., Spéléo dans le Vercors, Edisud, 1997)



# EXEMPLE DE GOUFFRE (POLIGNY, JURA)





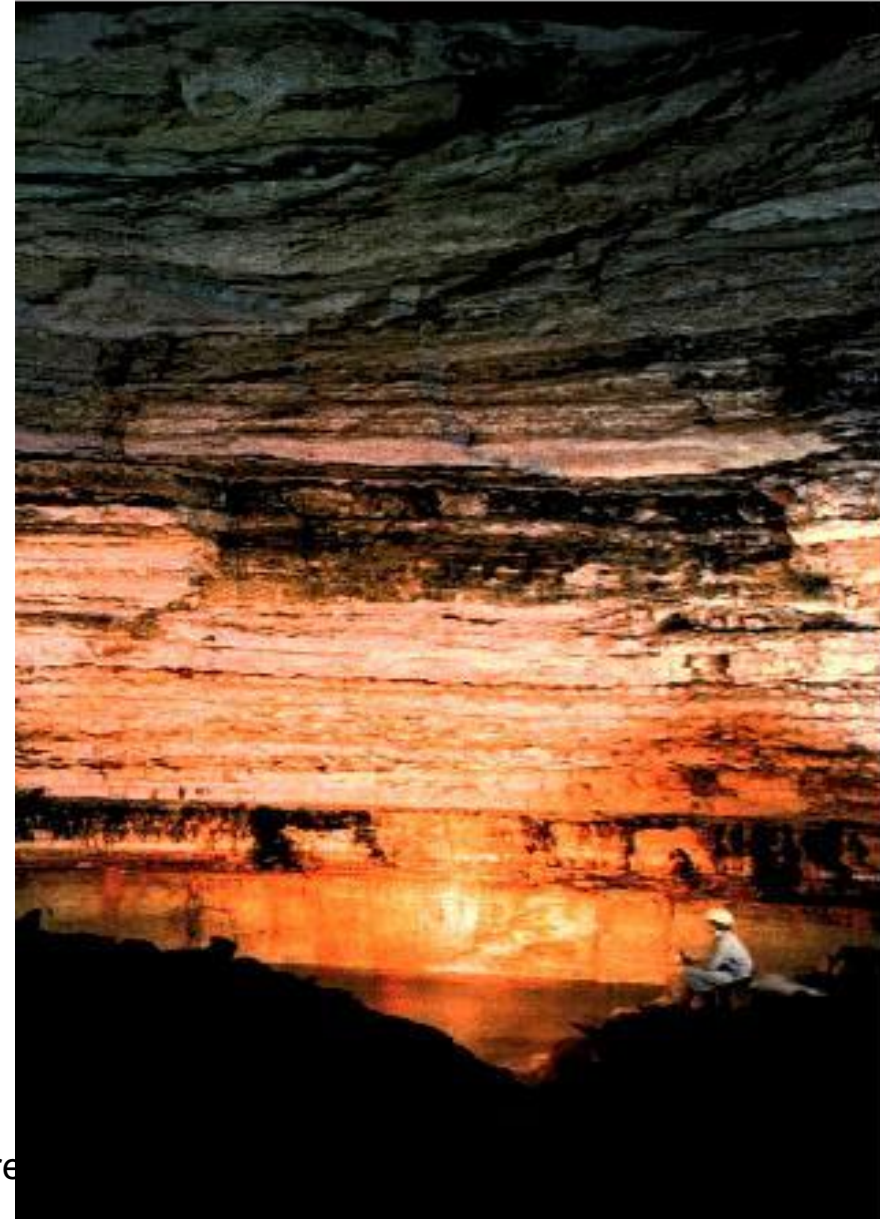
# DISSOLUTION DU GYPSE

La forte solubilité du gypse est à l'origine de la création rapide de grands volumes de vides

Caverne de dissolution dans le gypse (près de 100.000 m<sup>3</sup>), découverte sous la gare du Nord lors du creusement de la gare souterraine, attribuée au pompage d'eau pendant plus d'un siècle pour les locomotives à vapeur. →

*Photo AFTES, Catalogue des désordres en ouvrages souterrains*

Dans le trias de la bordure cévenole, les eaux infiltrées du Gardon traversent le gypse sur 4 à 5 km, avec un débit de 500 l/s et une teneur en sulfate de calcium de 50 mg/l à l'entrée (pertes) et 600 mg/l à la sortie (résurgences), ce qui correspond à la formation d'environ 400.000 m<sup>3</sup> de vides en un siècle.



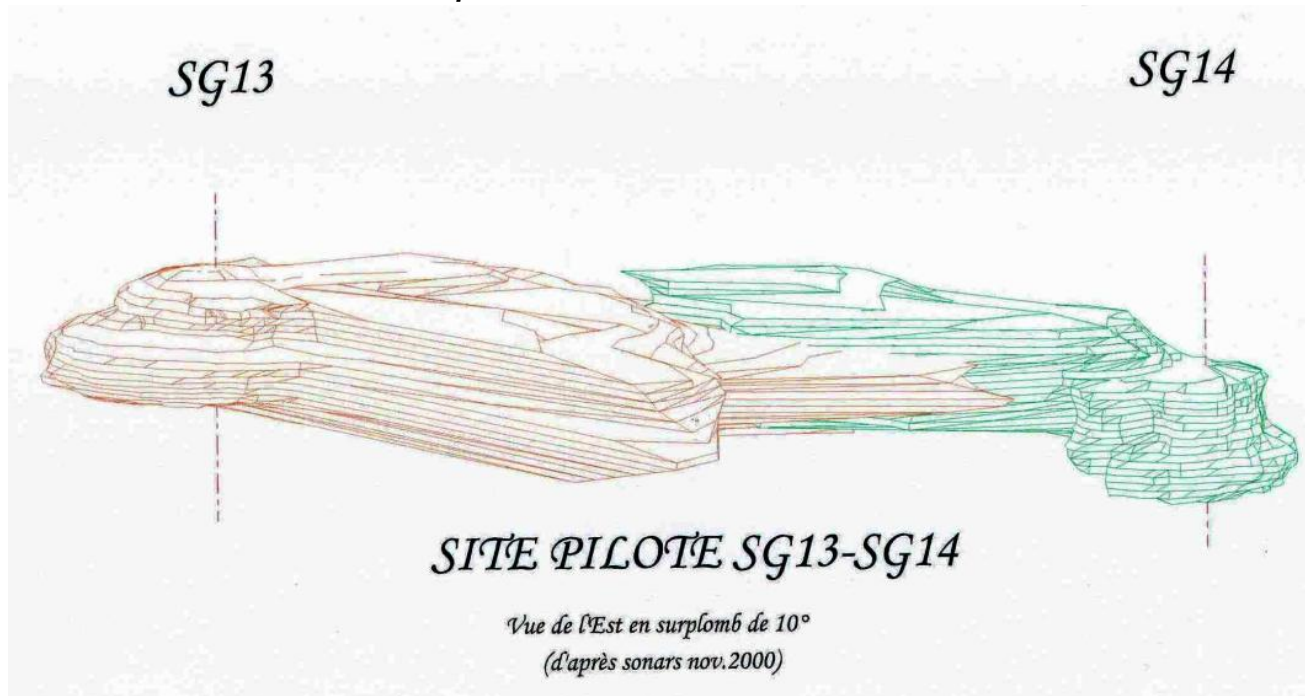
# CAVITES DE DISSOLUTION RESULTANT DE L'EXPLOITATION DU SEL

*Des milliers de cavernes ont été créées dans le monde entier, en faisant circuler de l'eau qui ressort saturée en sel (saumure)*

*Leur volume varie de  $10^4$  à plus de  $10^6$  m<sup>3</sup>*

*Leur profondeur de 100 à 3000 m*

Exemple d'une caverne de 240 000 m<sup>3</sup>, à 250 m de profondeur (Lorraine)  
*d'après Berest et al., 2011*



# L'EXTRACTION DE MATIERES PREMIERES DANS LE SOUS-SOL

- **Exploitations souterraines à l'époque gallo-romaine**

- **Développement au moyen-âge** →

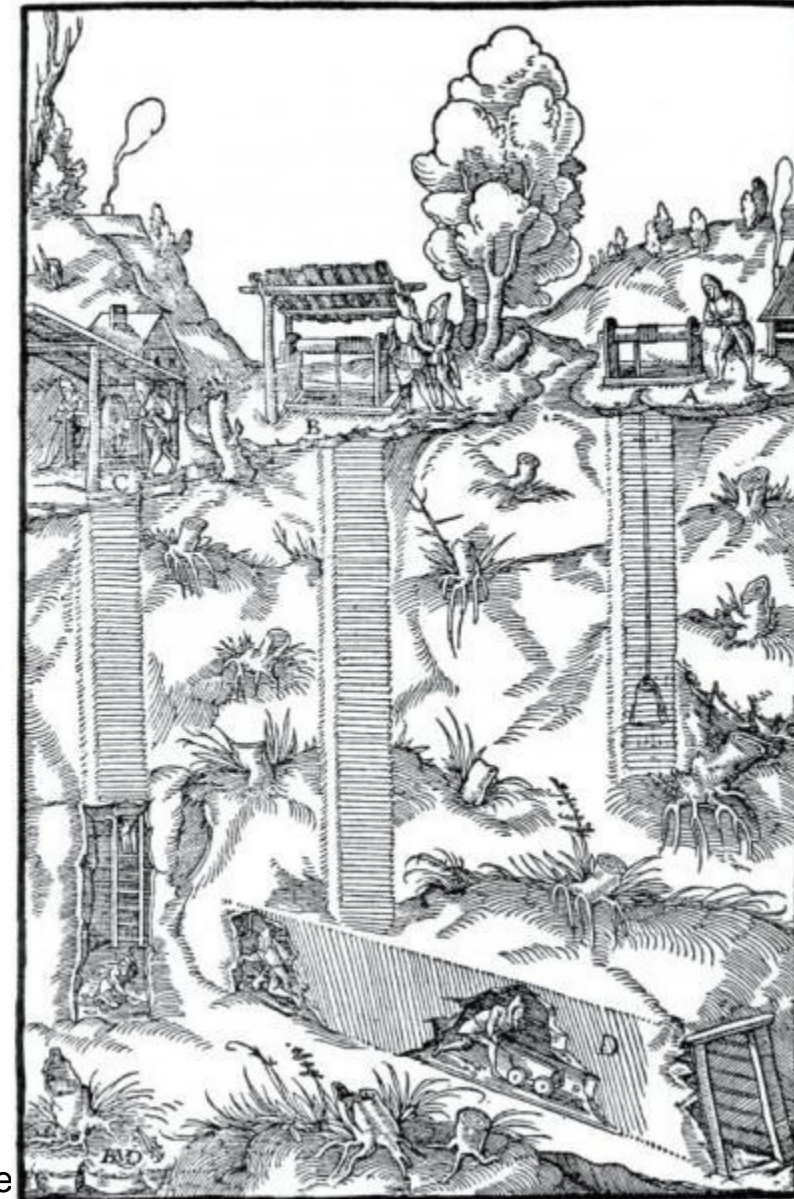
Gravure représentant des puits verticaux et une galerie venant du jour, extraite de "De re metallica", d'Agricola (1556).

• **MINES** : Extraction de matériaux d'importance jugée stratégique par les états (combustibles fossiles, métaux, sel, potasse, ...). **Concession d'exploitation** délivrée par l'Etat à un opérateur.

• **CARRIERES** : Extraction de matériaux « **non concessibles** » (matériaux intervenant dans la construction, comme le calcaire, le gypse, l'ardoise, l'argile, ...). Seulement surveillée par l'Etat.

Dans les deux cas, l'extraction peut se faire à **ciel ouvert** ou en **souterrain**.

Le terme de carrière est parfois utilisé pour désigner toute exploitation à ciel ouvert.

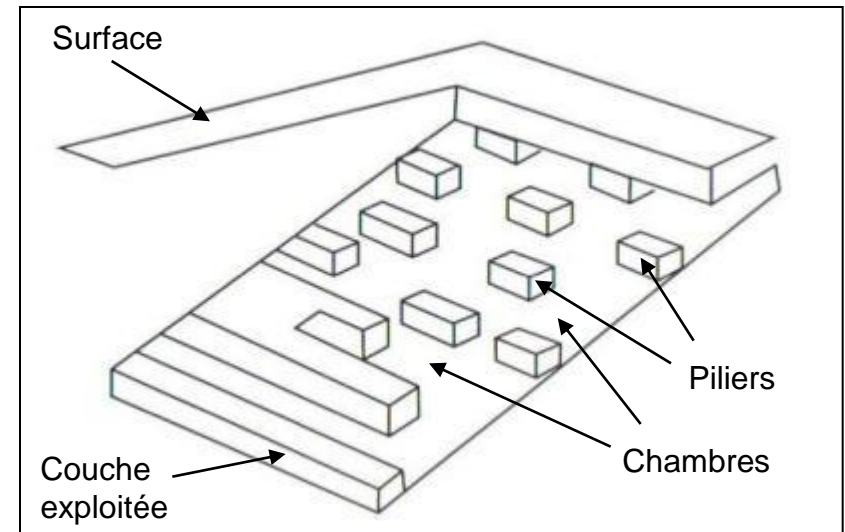




# METHODES D'EXPLOITATION DES MINES ET CARRIERES

Méthodes d'exploitation partielle :  
**chambres et piliers**

Des piliers sont abandonnés entre les chambres dans le but de maintenir la stabilité des terrains sus-jacents et d'empêcher les affaissements de surface.

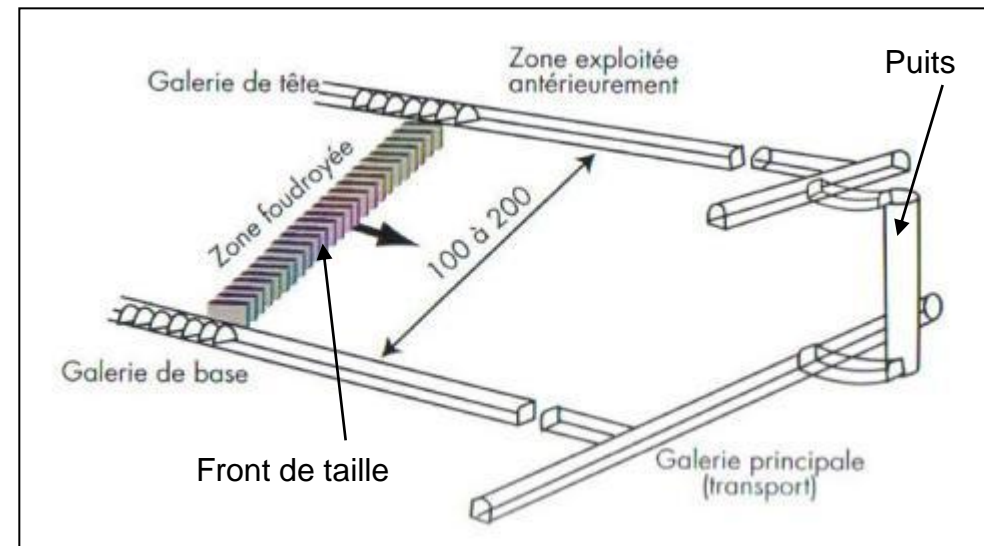


(extrait du Manuel de mécanique des roches, CFMR, Ecole des Mines de Paris)

Méthodes d'exploitation totale :  
**foudroyage ou remblayage**

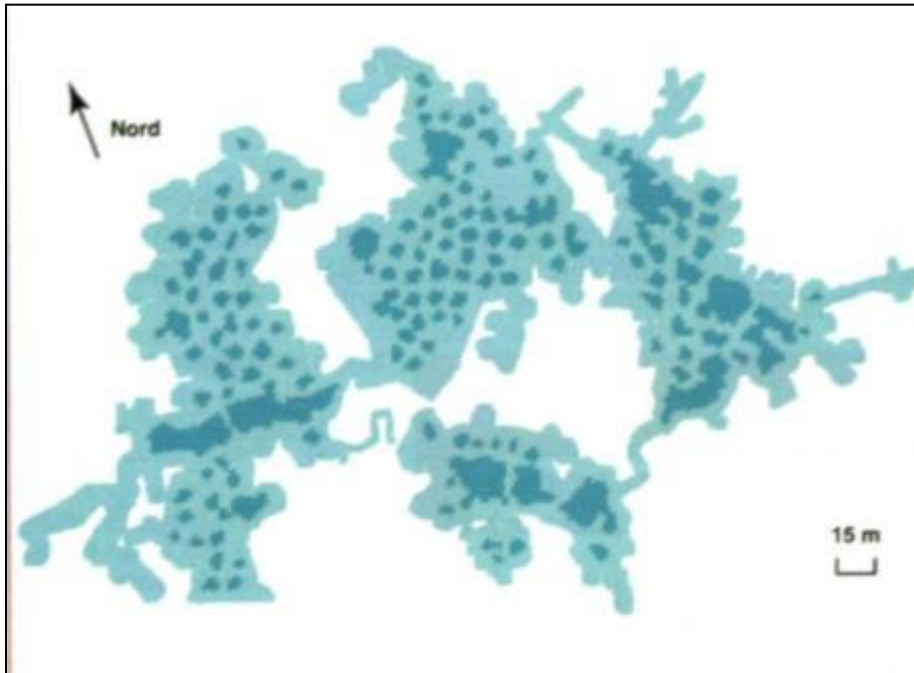
L'extraction complète du matériau à exploiter entraîne la dislocation et l'éboulement des terrains surplombant les cavités créées : c'est le foudroyage.

Ce processus peut être limité en remplissant dès que possible les cavités : c'est le remblayage





# EXPLOITATION PAR CHAMBRES ET PILIERS



Exploitation par chambres et piliers irréguliers (carrière de gypse de Roquevaire, Bouches-du-Rhône). Piliers en foncé, partie exploitée en plus clair.

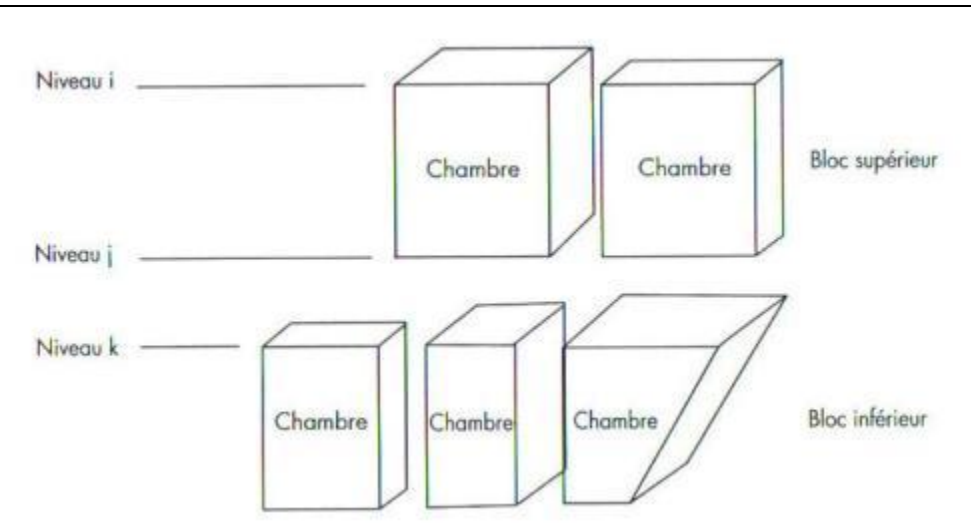
*(extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC)*



Carrière de calcaire exploitée par chambres et piliers (carrière de la Maladrerie à Caen).

*(extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC)*

# EXPLOITATION PAR CHAMBRES ET PILIERS

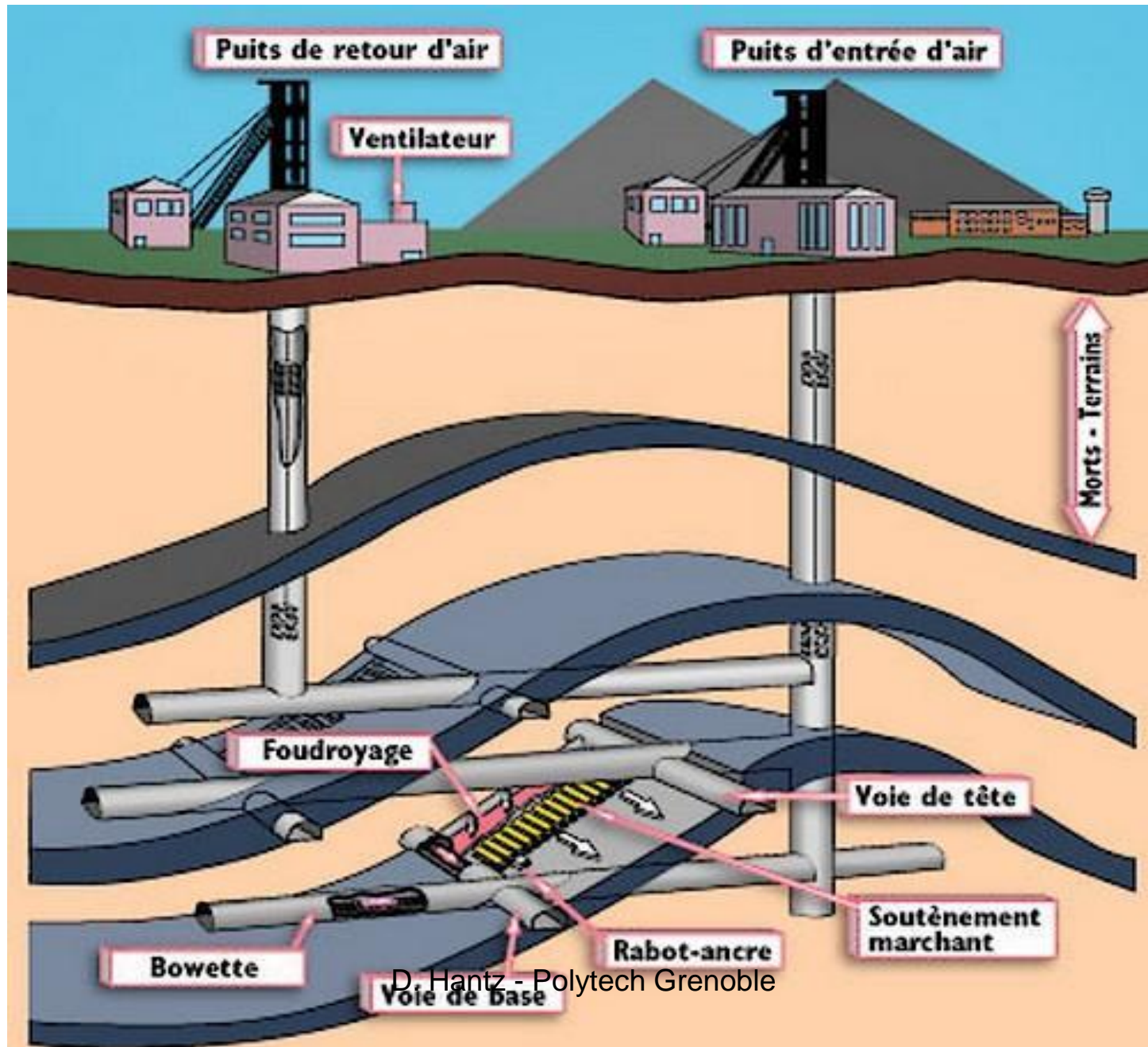


Chambres dans un filon ou une couche verticale.  
(*extrait du Manuel de mécanique des roches, CFMR, Ecole des Mines de Paris*)



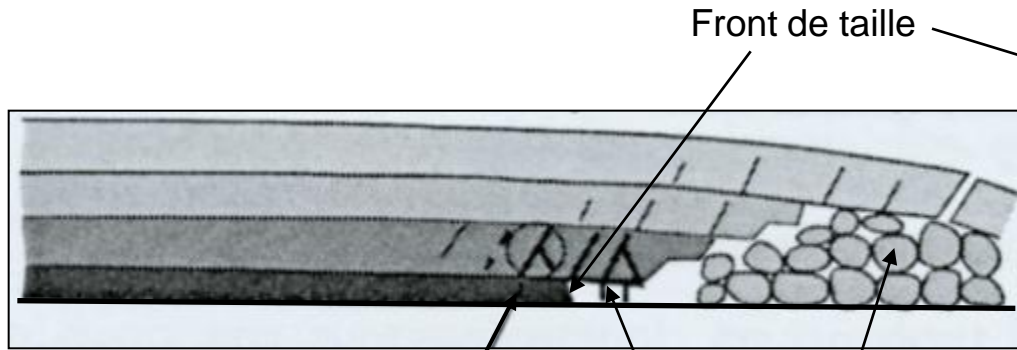
Chambre d'exploitation dans une ardoisière d'Anjou, exploitée par la méthode descendante.  
(*extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC*)

# EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE





# EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE

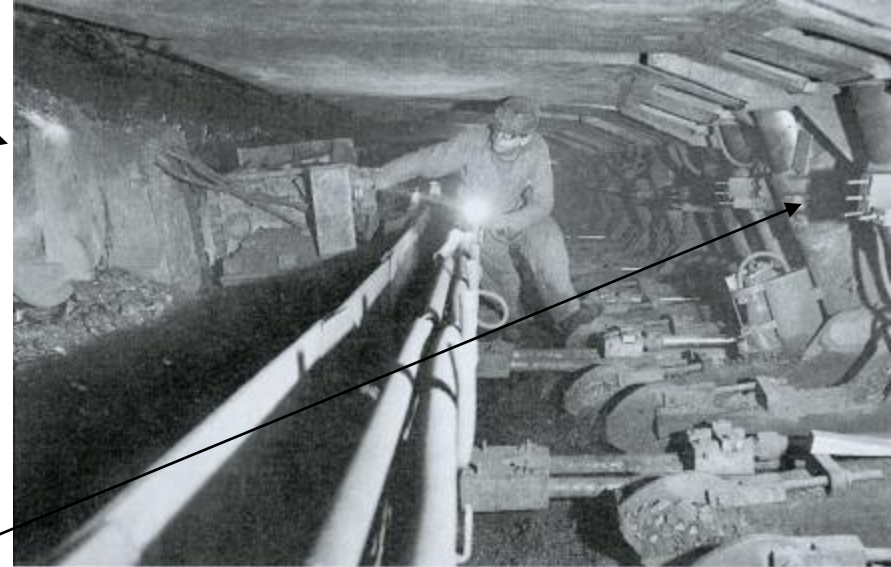


Couche de charbon exploitée

Front de taille

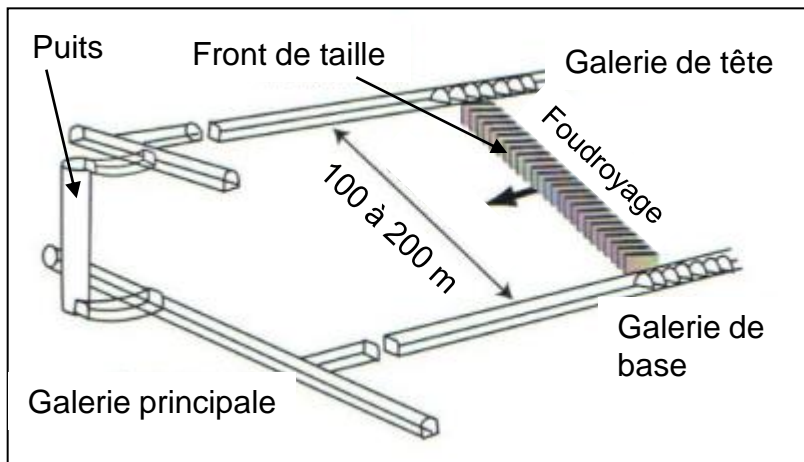
Foudroyage

Soutènement hydraulique



(a)

Photos K. Bentham / B. Gallant, CANMET



Puits

Front de taille

Galerie de tête

Foudroyage

100 à 200 m

Galerie de base

Galerie principale

Haveuse

Convoyeur

Hantz - Polytech Gr



(b)



# CAVITES VOLCANIQUES

Formation d'un tunnel de lave  
(Piton de la Fournaise, Ile de La  
Réunion)





# CAVITES VOLCANIQUES

Formation d'un tunnel de lave  
(Piton de la Fournaise, Ile de La  
Réunion)





## CAVITES VOLCANIQUES (Ile de La Réunion)





## CAVITES VOLCANIQUES (Ile de La Réunion)



## **2. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS ET DES MECANISMES DE RUPTURE DES CAVITES**

2.1. CONVERGENCE ET REDISTRIBUTION DES CONTRAINTES

2.2. RUPTURE EN COMPRESSION

2.3. RUPTURE DU TOIT EN FLEXION OU PAR FLAMBAGE

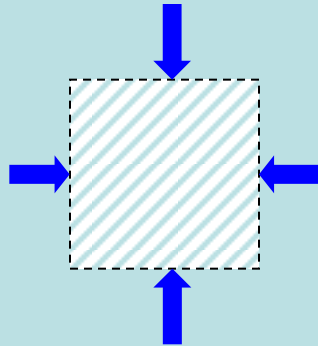
2.4. CHUTES DE BLOCS PREDECOUPEES

2.5. EVOLUTIONS POSSIBLES DE L'INSTABILITE

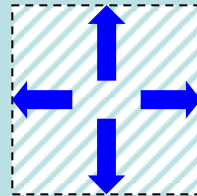
# CONVERGENCE DUE A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU

Surface

## ETAT INITIAL SANS CAVITE

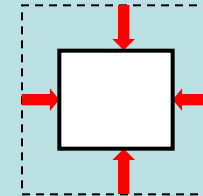


Contraintes exercées par le terrain sur un volume rocheux (dues au poids du terrain et aux forces tectoniques)



Contraintes exercées par le volume rocheux sur le terrain environnant

## APPARITION DE LA CAVITE



Ces contraintes sont annulées par la disparition du volume rocheux, ce qui entraîne la **convergence** du terrain

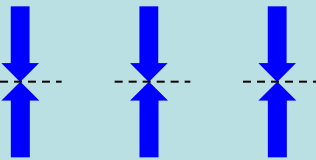


# REPORT DE CHARGE DU A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU

Surface

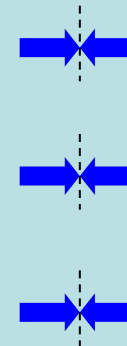
ETAT INITIAL SANS CAVITE

h



La contrainte verticale est due au poids  
du terrain (de poids volumique  $\gamma$ ) :

$$\sigma_v = \gamma h$$

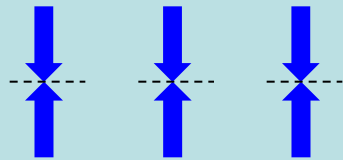


La contrainte horizontale dépend du  
comportement du terrain et des  
conditions aux limites latérales

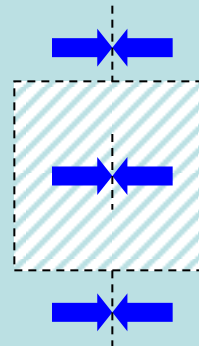
# REPORT DE CHARGE DU A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU

Surface

## ETAT INITIAL SANS CAVITE

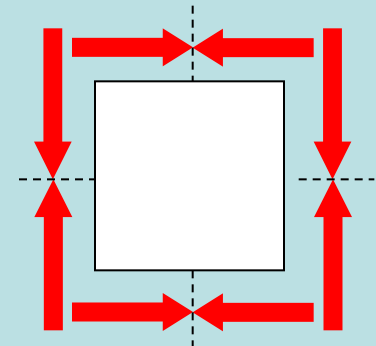


Contrainte verticale  
initiale :  $\sigma_v = \gamma h$



Contrainte horizontale  
initiale

## APPARITION DE LA CAVITE



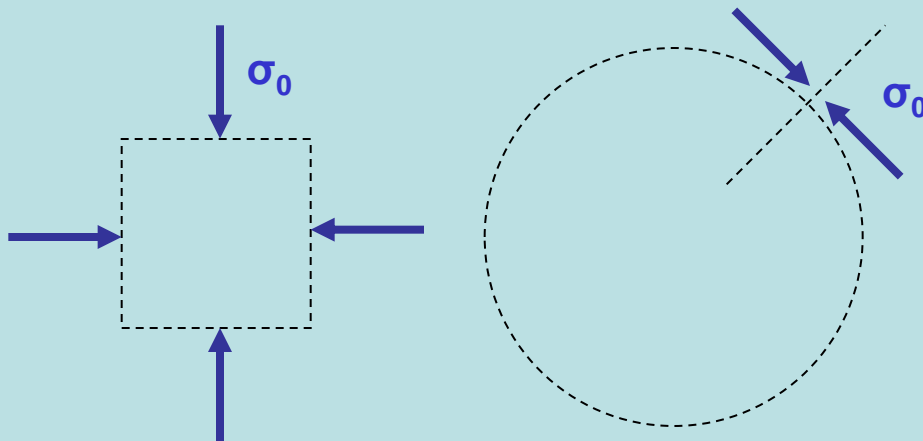
Les contraintes qui étaient  
supportées par le volume  
rocheux disparu sont  
reportées près des parois

Remarque : pour une galerie circulaire, avec un état de contrainte initial hydrostatique, la contrainte parallèle à la paroi est le double de la contrainte régnant initialement dans le terrain;

# REPORT DE CHARGE AUTOUR D'UNE GALERIE CIRCULAIRE DANS UN TERRAIN ELASTIQUE AVEC ETAT DE CONTRAINTE INITIAL HYDROSTATIQUE

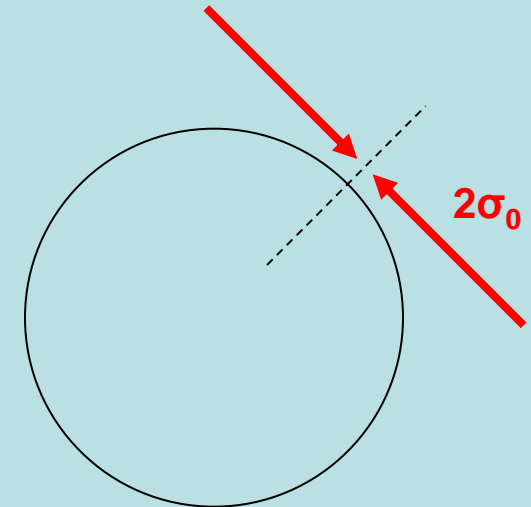
## ETAT INITIAL SANS CAVITE

Etat de contrainte hydrostatique  
(sur n'importe quelle facette, s'exerce une  
contrainte normale et de même valeur  $\sigma_0$ )



## APPARITION DE LA CAVITE

L'état de contrainte au voisinage de la  
galerie n'est plus hydrostatique :  
la contrainte normale à la paroi est nulle,  
la contrainte tangente est doublée.



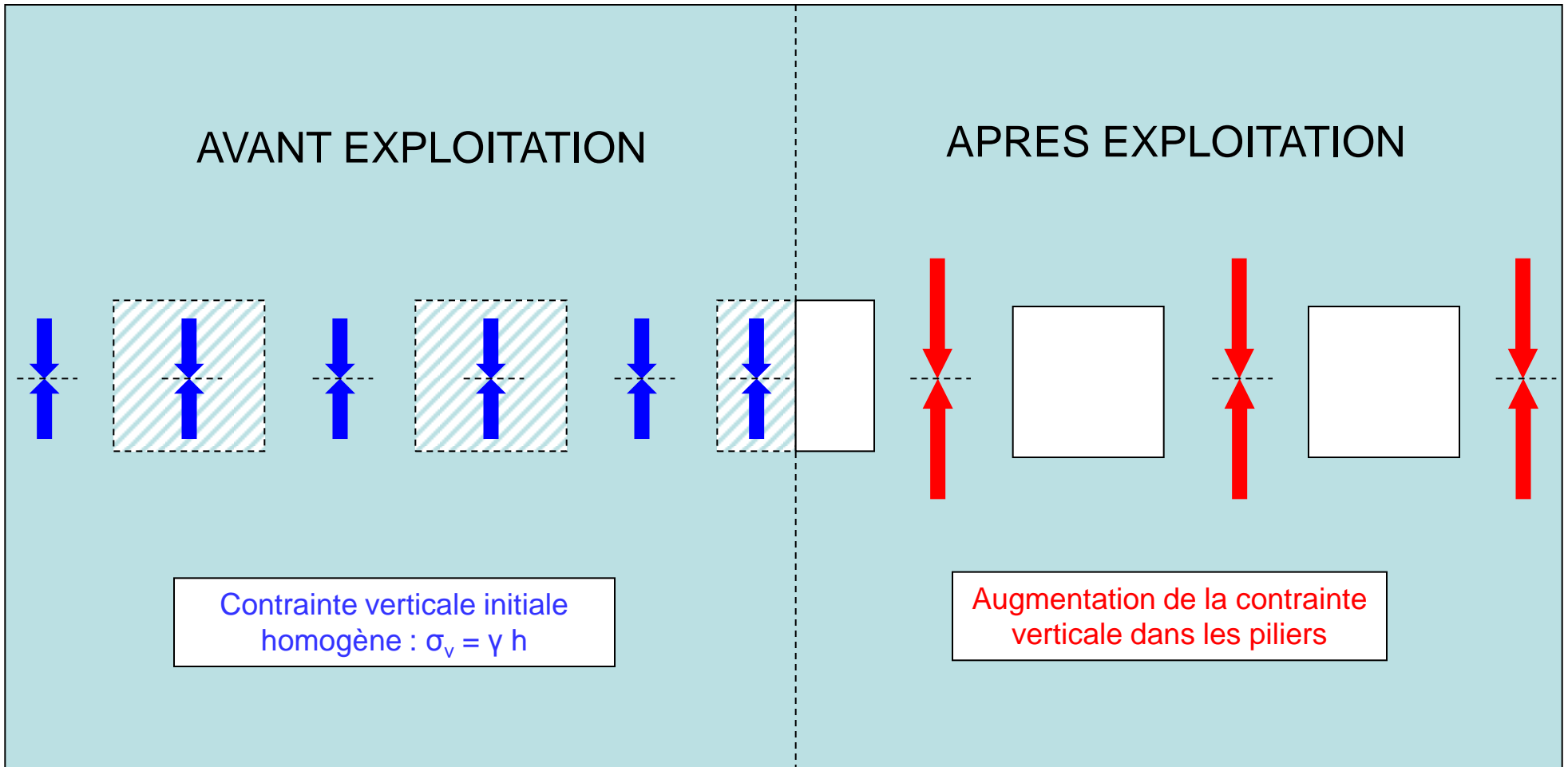


# REPORT DE CHARGE SUR DES PILIERS

Surface

AVANT EXPLOITATION

APRES EXPLOITATION



Contrainte verticale initiale  
homogène :  $\sigma_v = \gamma h$

Augmentation de la contrainte  
verticale dans les piliers

Force exercée sur l'ensemble de la surface exploitée :  $\gamma h S_{\text{totale}} = \sigma_p S_{\text{piliers}}$

d'où la contrainte moyenne dans les piliers :  $\sigma_p = \gamma h S_{\text{totale}} / S_{\text{piliers}}$

## 2. DESCRIPTION DES MOUVEMENTS ET DES MECANISMES DE RUPTURE DES CAVITES

En résumé, le creusement d'une cavité se traduit par une annulation des contraintes normales à la paroi. Il en résulte :

- une **convergence** des parois
- une **redistribution des contraintes** (augmentation des contraintes parallèles aux parois)

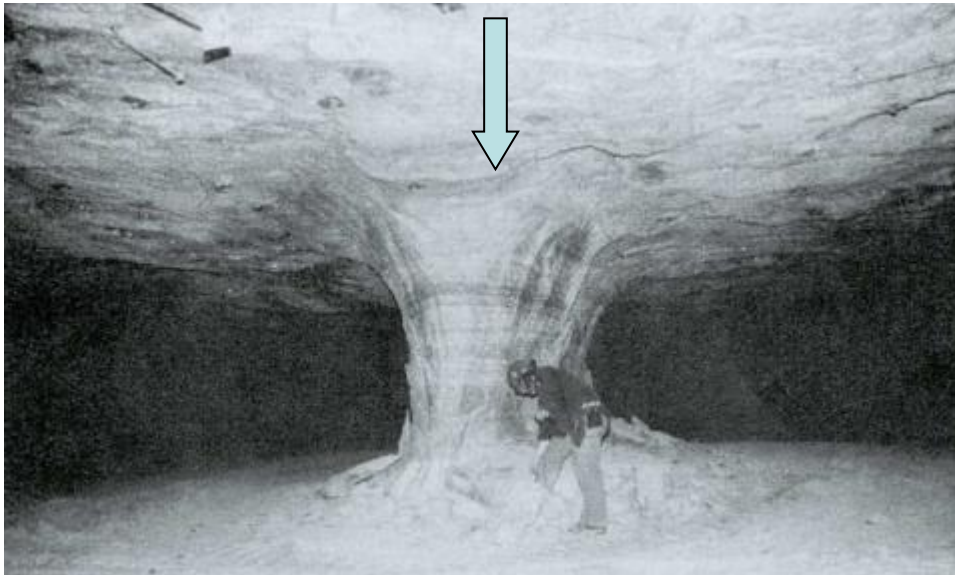
Cette redistribution **peut** conduire à des **ruptures** de différents types :

- rupture par excès de compression
- rupture par flexion des bancs
- rupture par flambage des bancs
- rupture par chute des blocs

*L'étude géotechnique d'un projet de cavité a pour objectif principal d'éviter ces ruptures.*

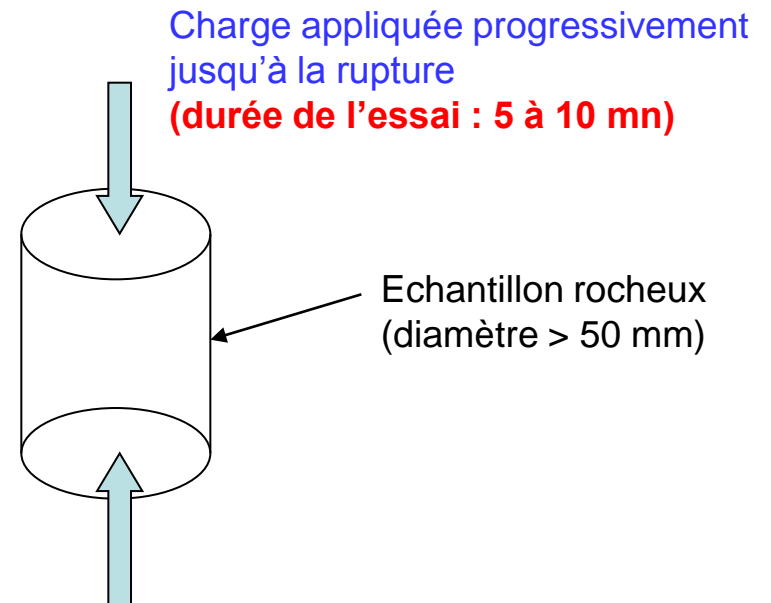
# RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

Le report de charge entraîne la rupture de la roche, si sa **résistance en compression simple** (ou uniaxiale) est atteinte.



Pilier dans une mine de sel  
(photo US National Committee on Tunneling Technology)

Cette résistance peut être déterminée en laboratoire en soumettant un échantillon de roche à un état de contrainte uniaxial (essai de compression uniaxiale).

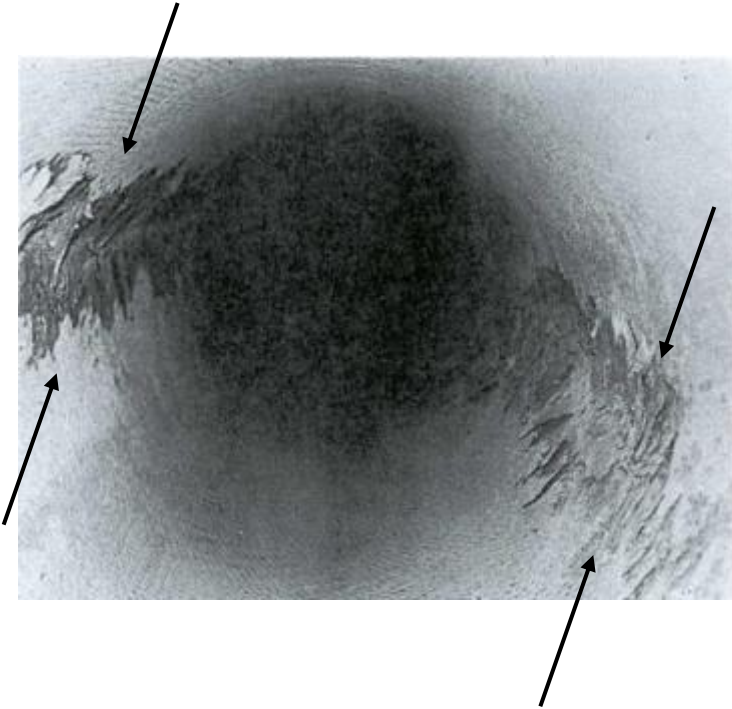


**Résistance en compression uniaxiale**  
de la roche (**à court terme**) =  
charge à la rupture / section de l'échantillon



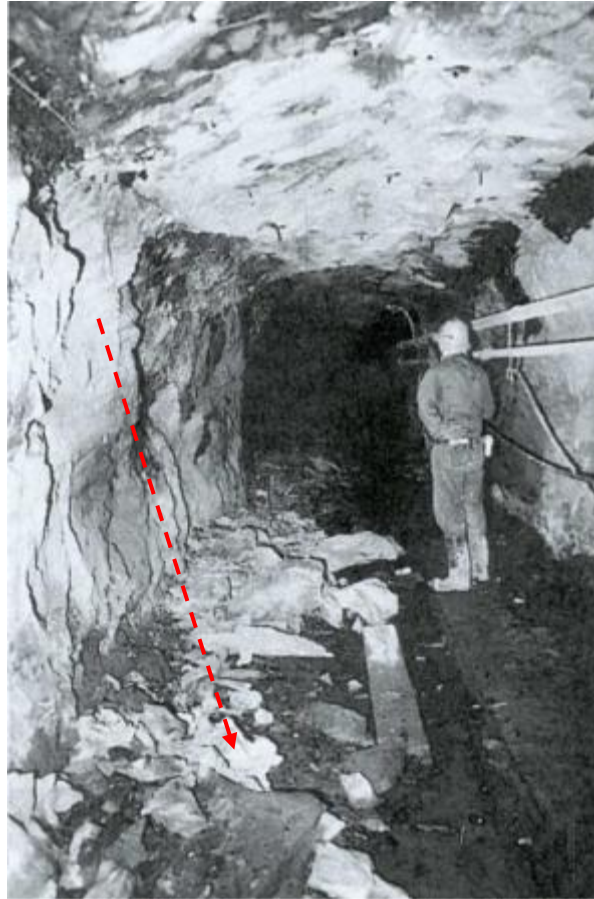
# RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

Dans les roches massives résistantes, la rupture se traduit par de l'écaillage en paroi

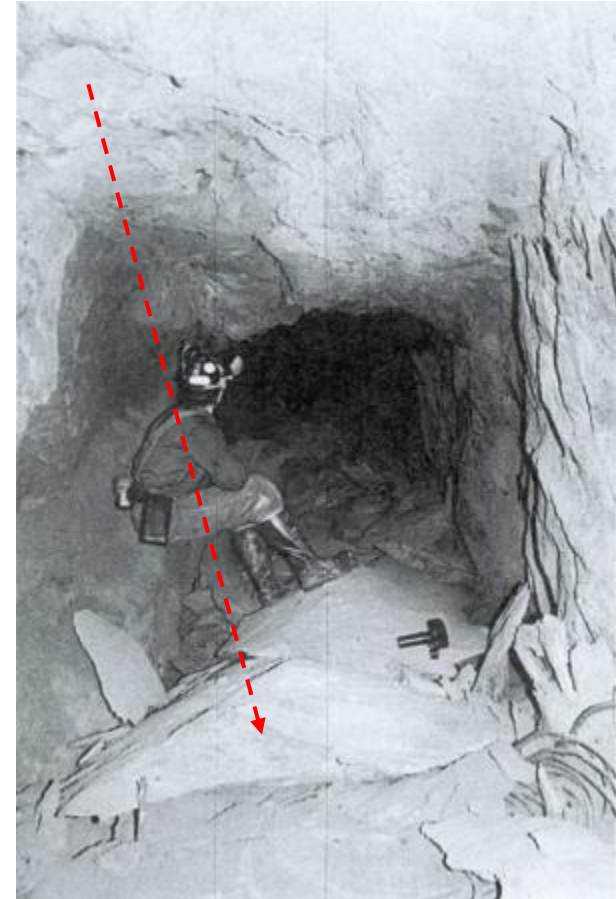


Ecaillage à la paroi d'un forage. Les flèches représentent la direction de compression maximale.

(photos extraites de Hoek, Kaiser et Bawden, *Support of underground excavations in hard rock*, Balkema, 1995)  
2012



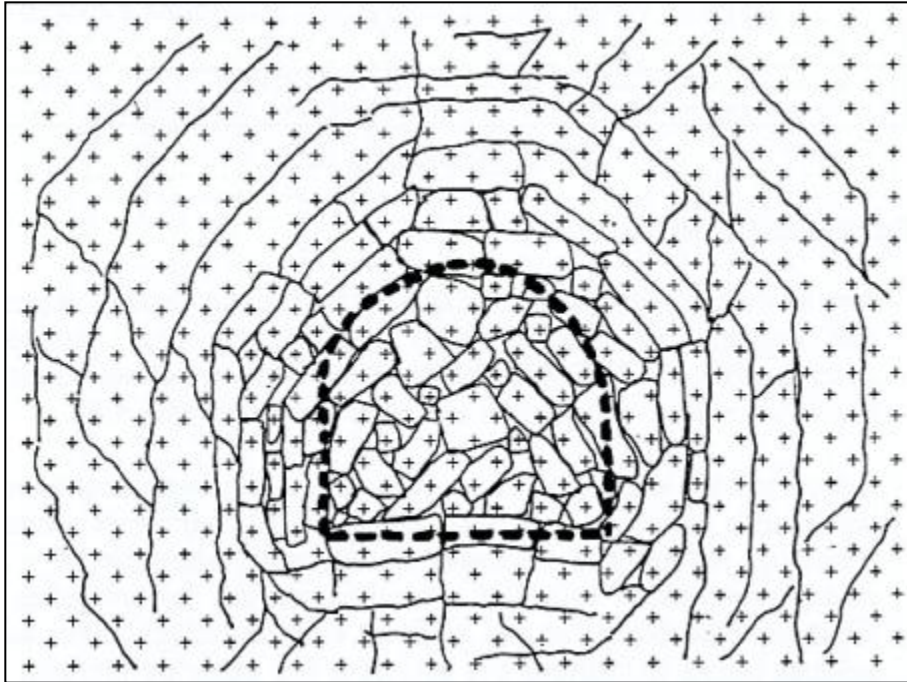
Ecaillage à la paroi d'une galerie dans de la quartzite à 1500 m de profondeur. L'excès de contrainte est dû à une chambre à gauche de la photo.



Ecaille tombée du toit d'une galerie soumise à de fortes contraintes

# RUPTURE GENERALISEE PAR EXCES DE COMPRESSION

Sans soutènement, la rupture peut se propager jusqu'à la fermeture de la galerie.

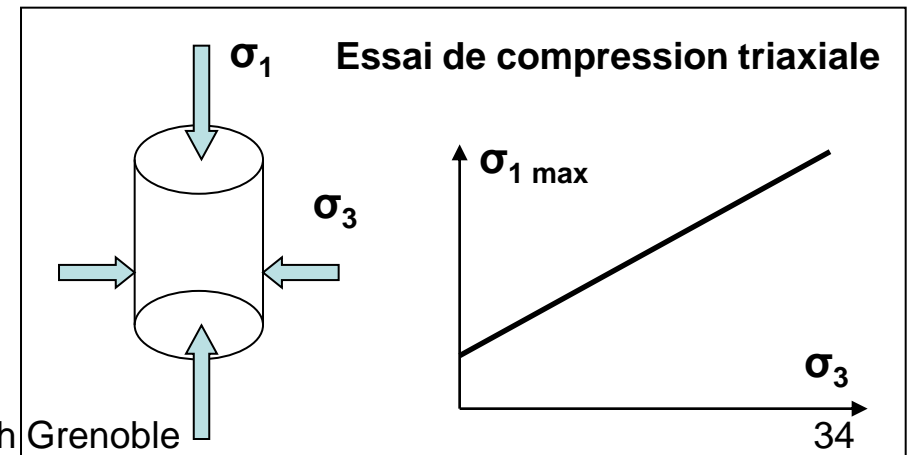


(extrait de Fine, le soutènement des galeries minières, Armines, 1993)

Une pression de confinement ( $\sigma_3$ ) permet de limiter la zone en rupture et la convergence. Sur la photo à droite, cette pression est apportée par des boulons. La convergence verticale est tout de même de plus de 2 m.

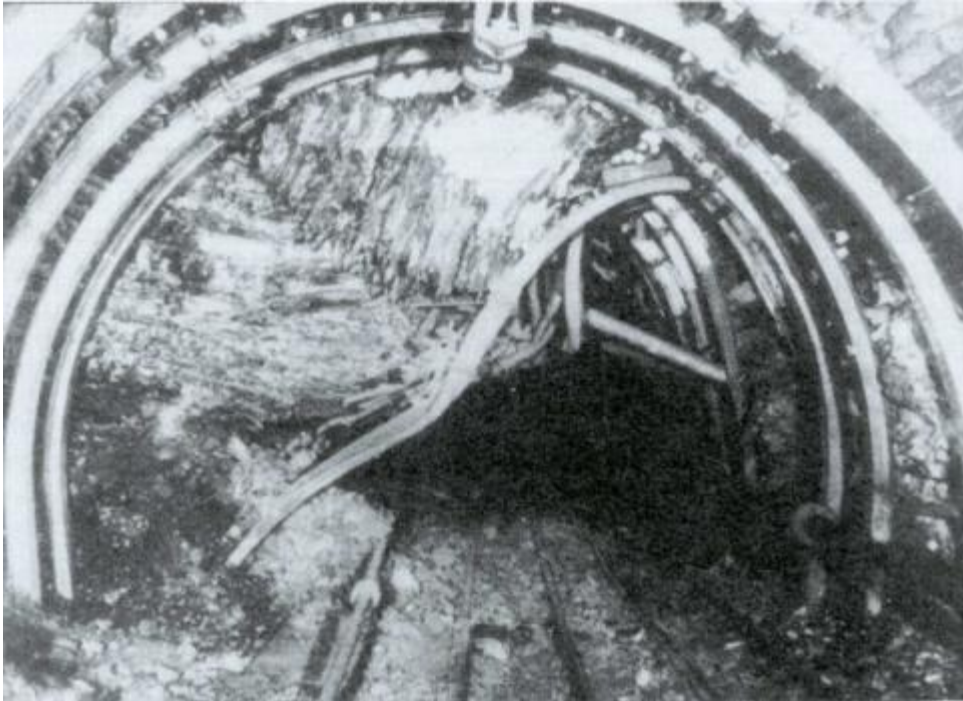


(photo Mount Isa Mines)





# RUPTURE PAR FLAMBAGE DANS UN MASSIF STRATIFIE



Remise à section d'une galerie minière affectée par le flambage des lits schisteux (*Revue de l'industrie minière*).



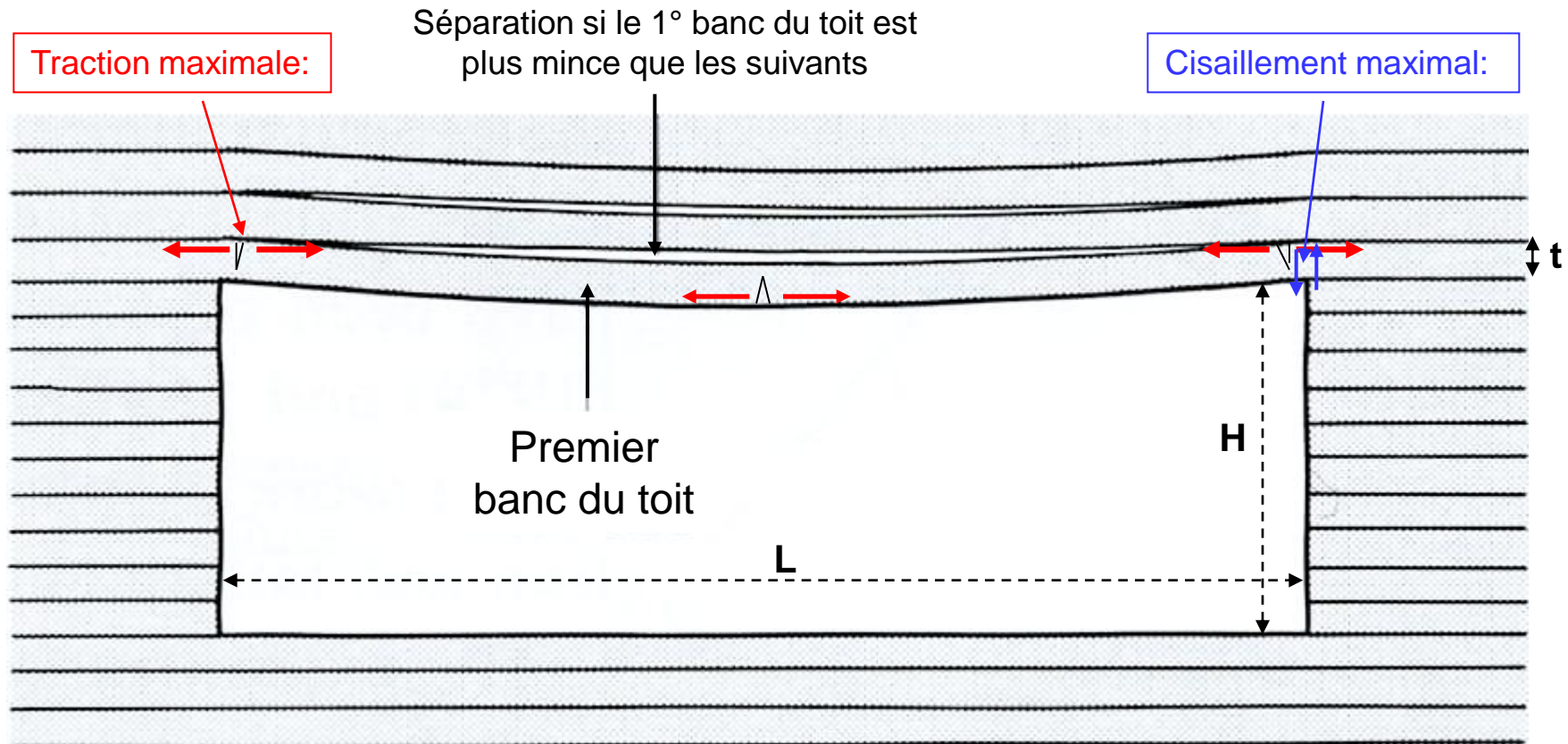
Flambage du mur dans une galerie minière polonaise, à 955 m de profondeur, et réalisation d'une contre-voûte (*photos B. Kozek et P. Gluch*)

Contrainte théorique provoquant le flambage d'une plaque de longueur  $L$ , d'épaisseur  $t$  et de module  $E$ , encastée à ses extrémités :

$$\sigma_{\max} = (\pi^2 E t^2) / (3 L^2)$$



# RUPTURE DU TOIT PAR FLEXION EN TERRAIN STRATIFIE HORIZONTALEMENT



Les valeurs de la traction maximale et du cisaillement maximal sont données par la théorie des poutres :

$$\sigma_{\max} = \gamma L^2 / 2 t ; \tau_{\max} = \gamma L / 2 ; \gamma \text{ étant le poids volumique du terrain.}$$

La rupture se produit généralement par traction.

Remarque : la contrainte horizontale (compression) réduit la traction et joue donc dans un sens favorable, sauf si elle est suffisamment élevée pour provoquer un flambage.

## RUPTURE DU TOIT PAR FLEXION EN TERRAIN STRATIFIE HORIZONTALEMENT

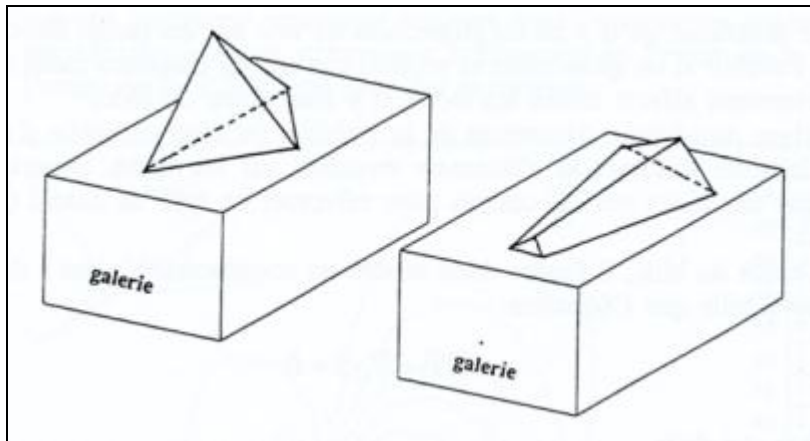


2012 Chute de toit dans une carrière de gypse triasique du Jura. Les étais en bois soutiennent difficilement la dalle de toit. (extrait de *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, INERIS, LCPC).



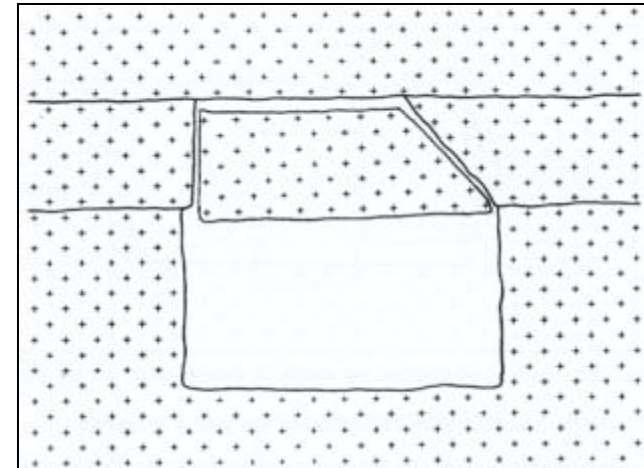
# CHUTE DE BLOCS PREDECOURPES

Ce type de rupture peut se produire lorsque les **discontinuités** (ou **joints**) du massif rocheux prédécoupent des blocs pouvant se détacher du toit ou des parois. L'identification de ces blocs a priori nécessite une étude de la **structure** du massif rocheux (orientation, étendue, espacement, morphologie des joints).

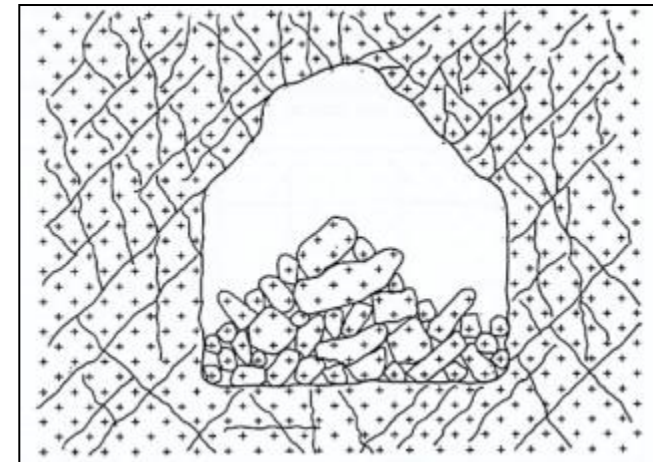


Formes usuelles de blocs dans un massif fracturé (tétraèdre et pentaèdre).

(schémas extraits de *Fine, le soutènement des galeries minières, Armines, 1993*)



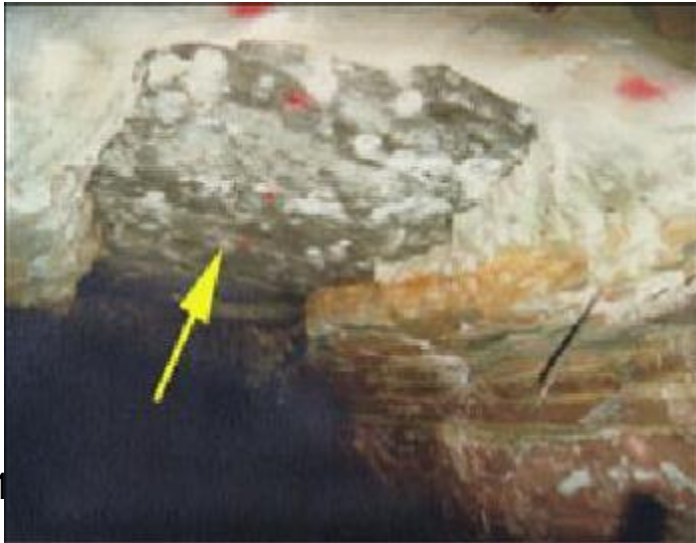
Forme usuelle de bloc dans des bans subhorizontaux



Eboulement dans un massif intensément fracturé



# CHUTE DE BLOCS PREDECOUPEES



# CHUTE DE BLOCS PREDECoupES



Photos prises en 1977 et 1980  
(AFTES, Catalogue des désordres en  
ouvrages souterrains) D. Hantz - Poly

# 3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE

3.1. TASSEMENTS

3.2. EFFRONDREMENTS

3.3. AFFAISSEMENTS



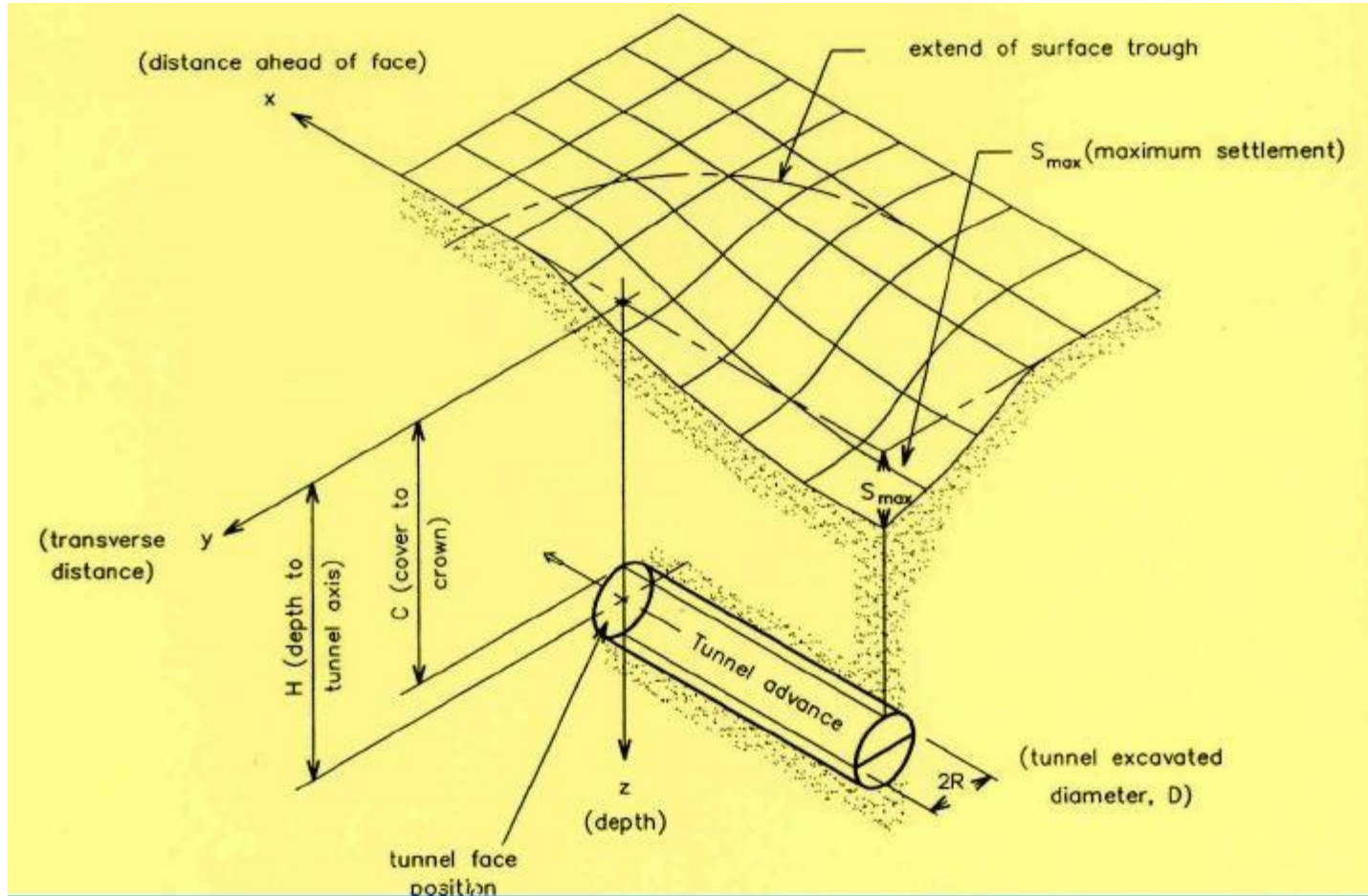
# 3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE

## 3.1. TASSEMENTS

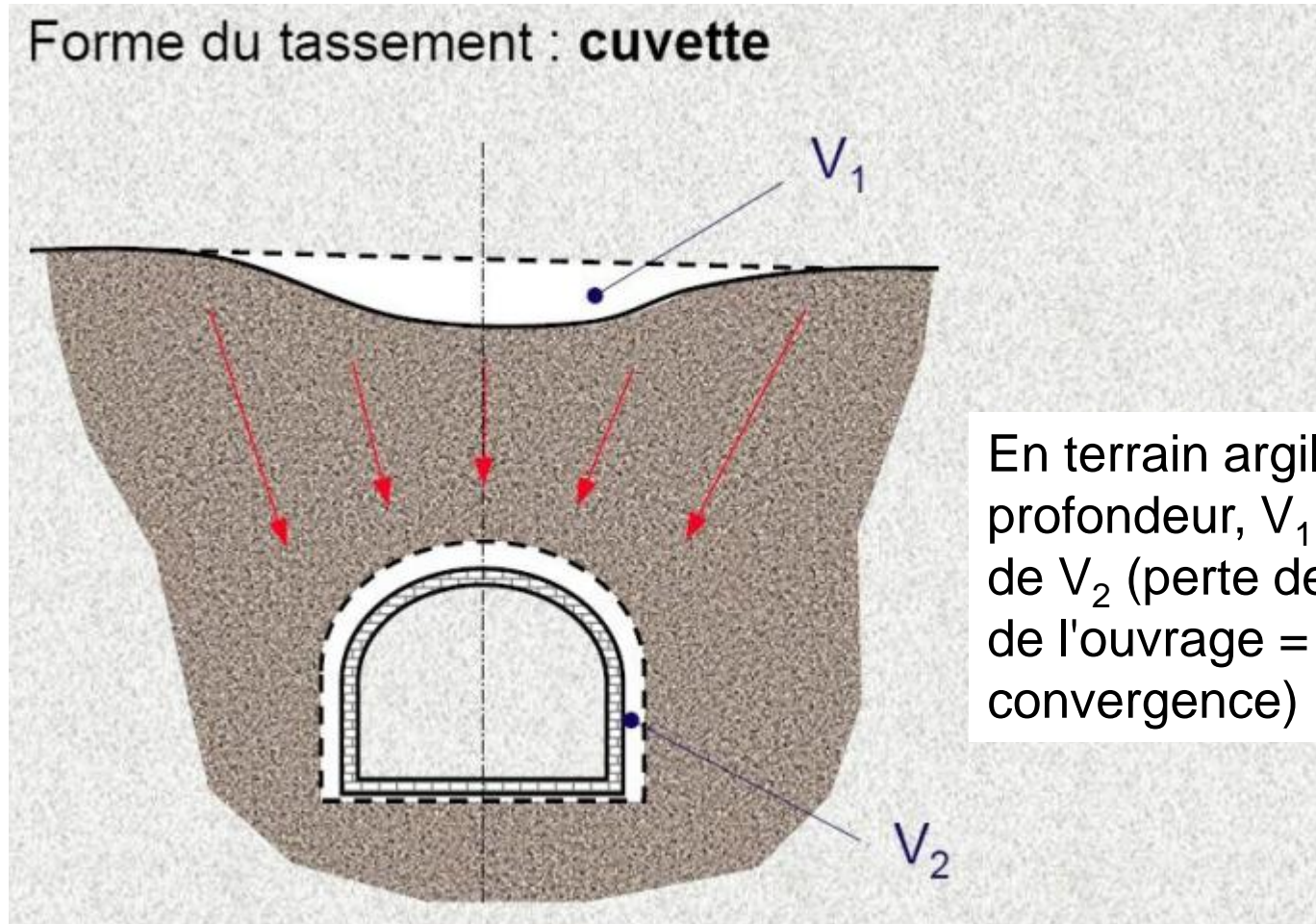
- En théorie, la convergence des parois d'une cavité, même stable, induit des déplacements en tout point du massif rocheux, jusqu'en surface.
- Mais en pratique, le déplacement en surface (**tassement**) n'est perceptible que si la cavité est à une profondeur suffisamment faible.

*Le suivi géotechnique a pour but de vérifier que les tassements sont conformes aux prévisions.*

# TASSEMENTS EN SURFACE

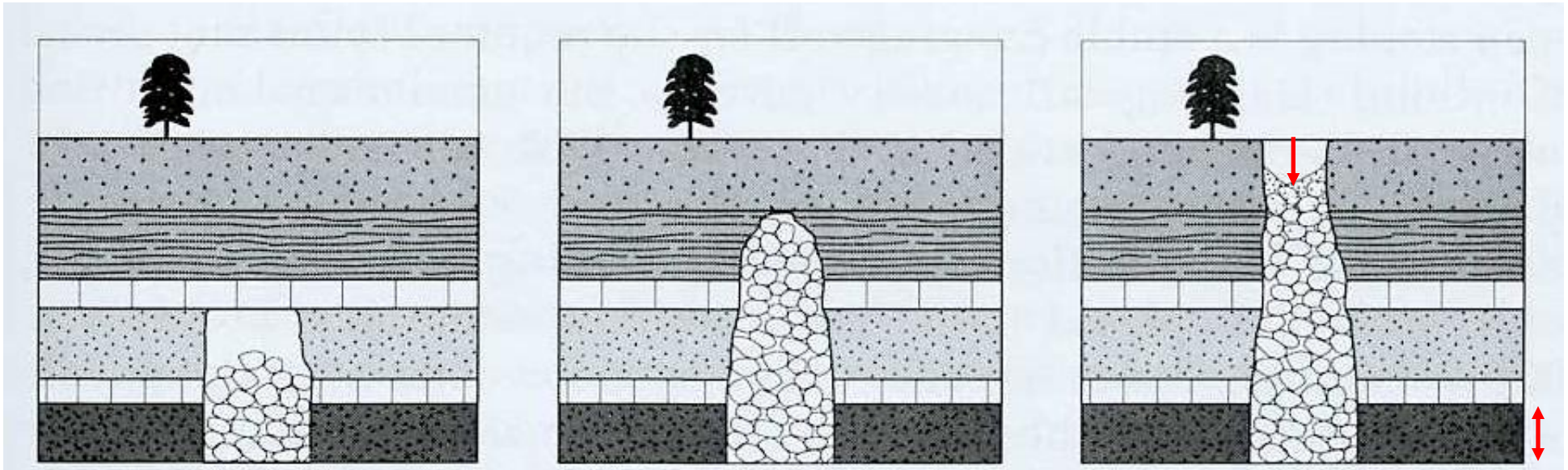


# TASSEMENTS EN SURFACE





# EVOLUTIONS POSSIBLES DE L'INSTABILITE



Stabilisation grâce à un banc résistant (ou par formation d'une voûte)

Stabilisation grâce au foisonnement

Propagation de la rupture jusqu'à la surface

## Stabilisation

Le déplacement dû à la création de la cavité diminue lorsque la distance à celle-ci augmente. Si la cavité est suffisamment profonde, il est négligeable en surface. Sinon, il s'y produit un petit déplacement appelé tassement (cas des tunnels à faible profondeur dans les sols).

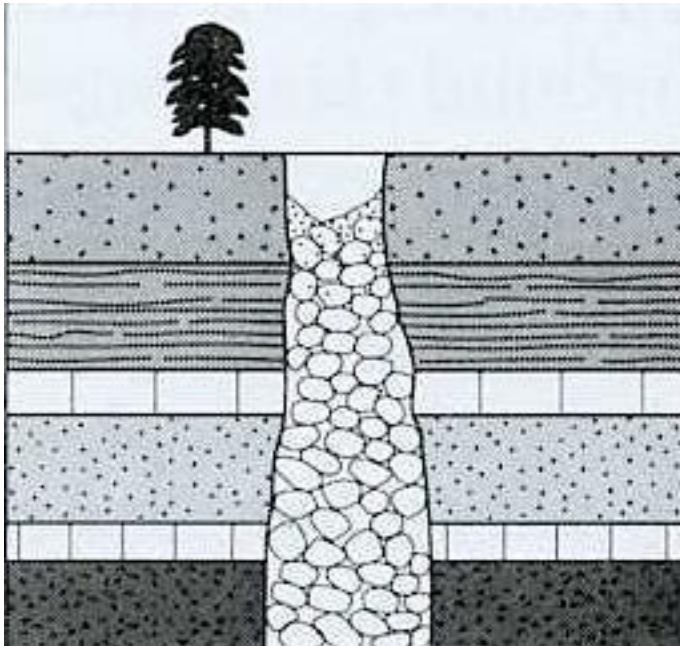
(schéma : Karfakis, 1986, Chimney subsidence – a case study, 27th U.S. Symp. Rock Mech.)

## Propagation

Le mouvement en surface est de l'ordre de grandeur de la hauteur de la cavité initiale. Il peut se produire brutalement, comme dans le cas représenté ci-dessus, ou progressivement.

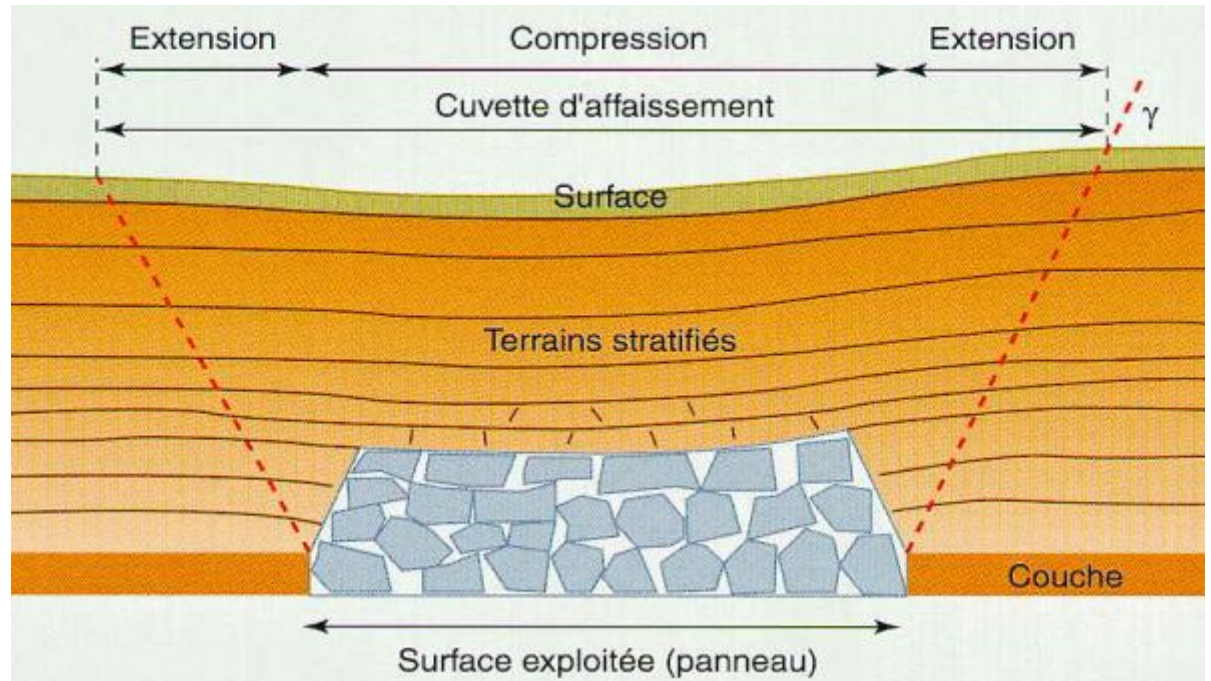
# MOUVEMENTS DE SURFACE DUS À DES CAVITÉS

Effondrement  
brutal et localisé



Formation d'un fontis

Affaissement  
progressif et continu



Affaissement dû à une exploitation minière (d'après document INERIS)

(échelles très différentes)



Effondrement survenu en mars 1986 sur le campus de l'université d'Orléans la Source,  
dû à une cavité karstique dans le calcaire de Beauce





Effondrement dû à une cavité naturelle dans le gypse triasique,  
survenu le 26/08/2001 à Saint-Pierre d'Allevard (Isère)



Diamètre : 150 m  
Profondeur : 50 m

# EFFONDREMENT DÙ A UNE CAVITE DE DISSOLUTION DANS DU GYPSE



L'effondrement de Prunières, situé sur la route menant à l'alpage du Sénépy (Matheysine, Isère) a commencé le 08/09/1984 avec un diamètre de 4m, et s'est agrandi les mois suivants pour atteindre, en mars 1985, un diamètre de 20 m et une profondeur de 35 m.



En juin 1985, le trou a été comblé en déversant 10 000 m<sup>3</sup> de matériaux, et la route a été rétablie.

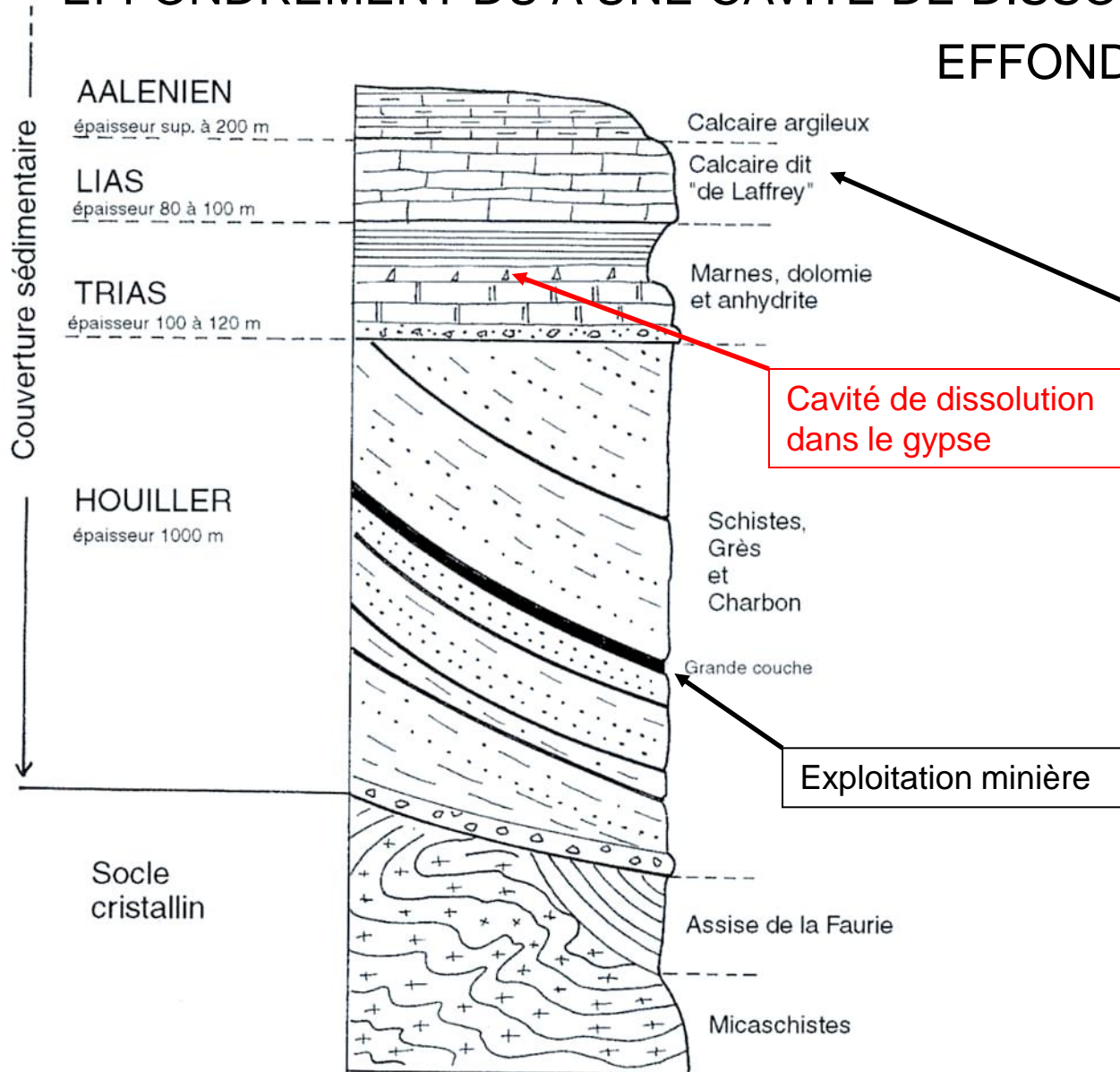


En juillet 1987, le remblai avait totalement disparu, probablement entraîné par des circulations souterraines.



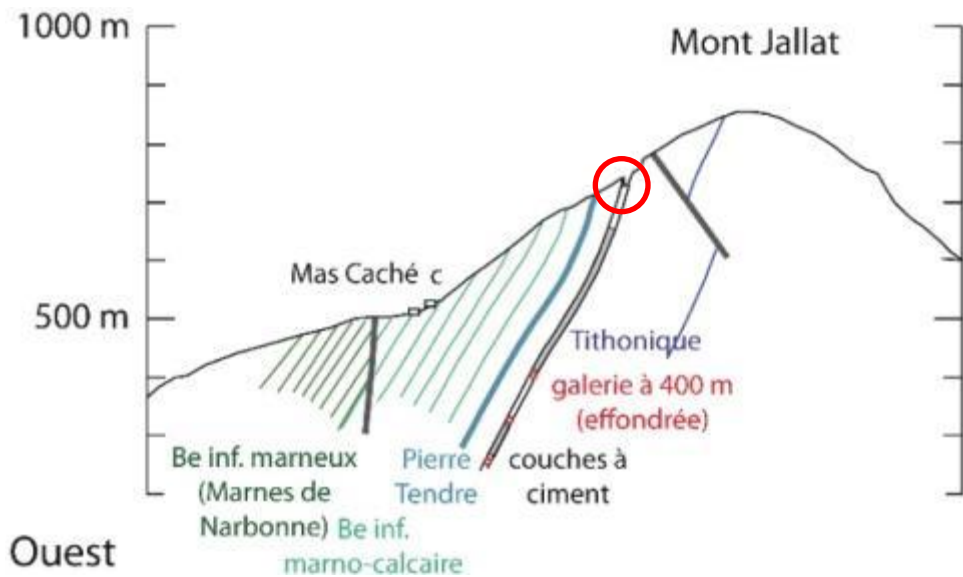
# EFFONDREMENT DÙ A UNE CAVITE DE DISSOLUTION DANS DU GYPSE

## EFFONDREMENT DE PRUNIERE

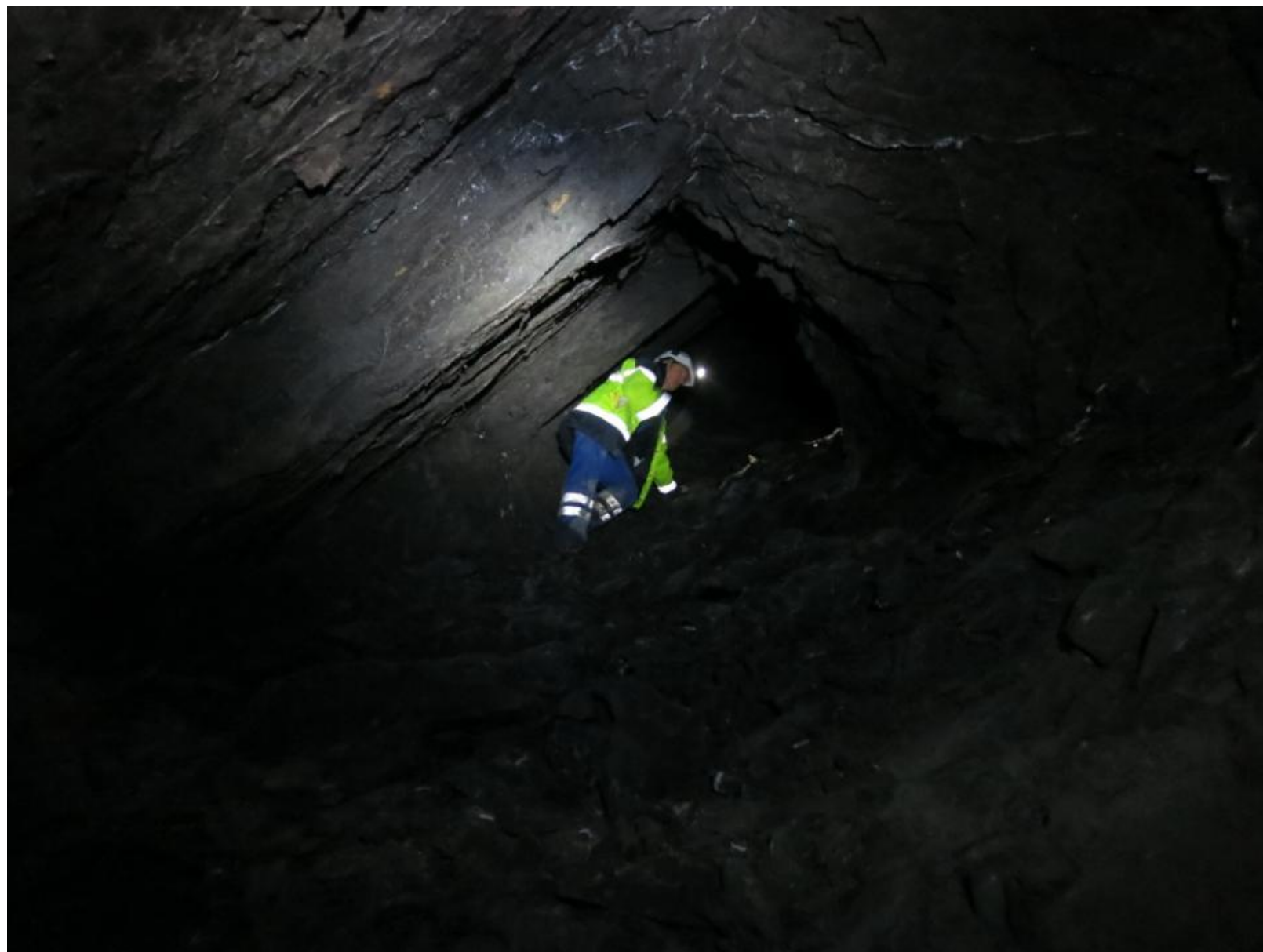


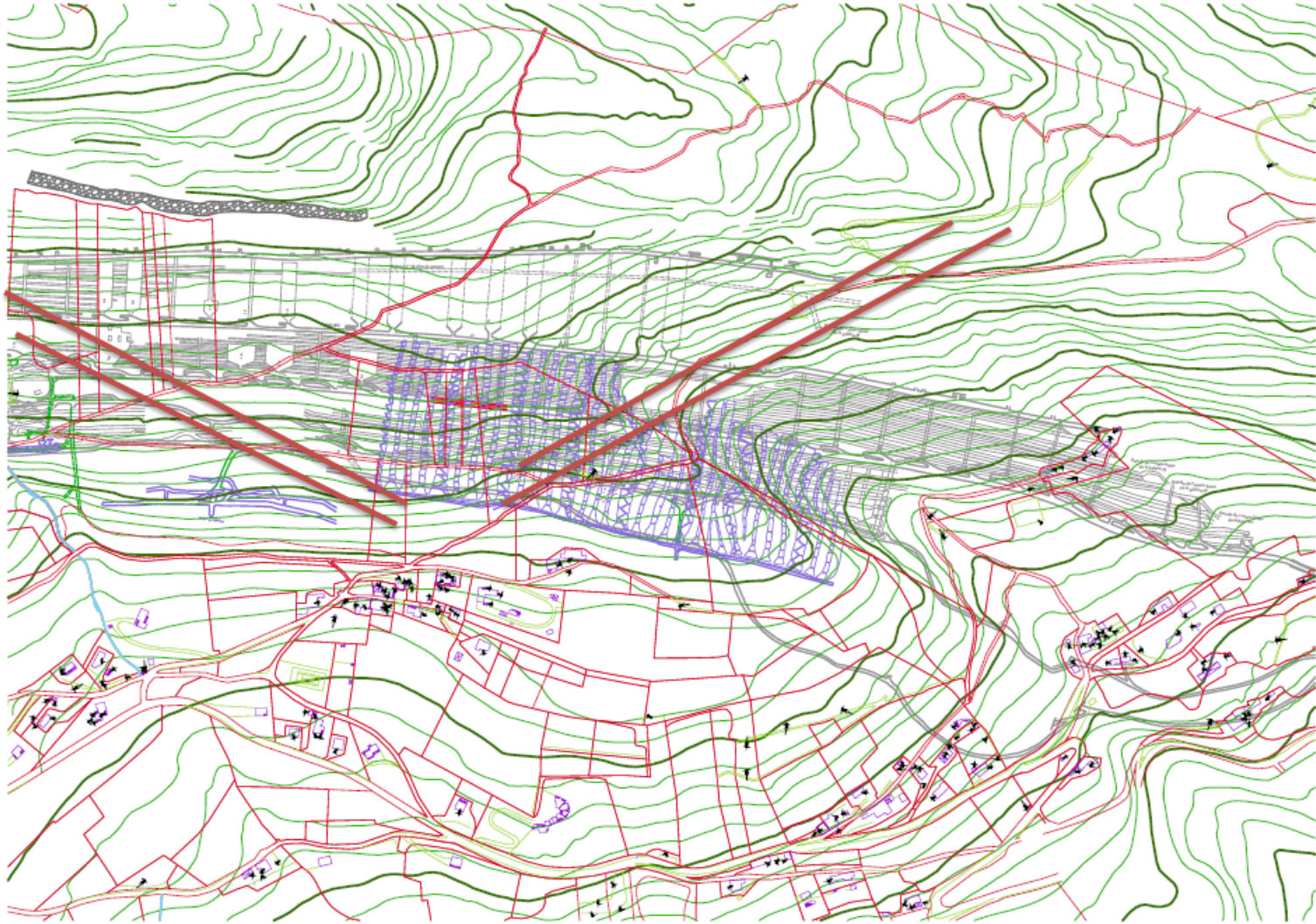


# Effondrements et affaissements au Mont Jalla



Carrière des Combes (niveau 230) : une des couches exploitées, le Petit Banc







Carrière des Combes (niveau 230) : soutirage au pied d'une chambre exploitée





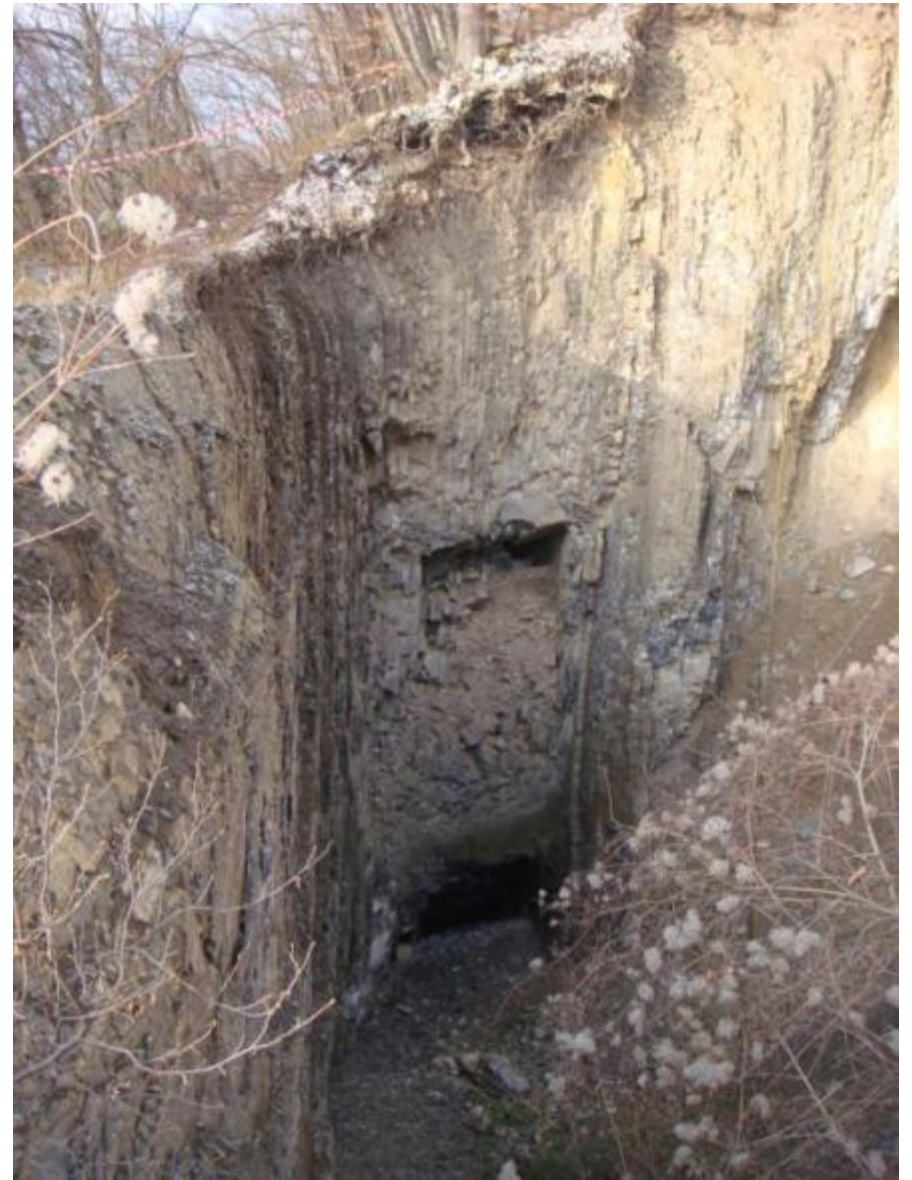


# Effondrements et affaissements au Mont Jalla

Effondrement de 1987, réactivé en 2011



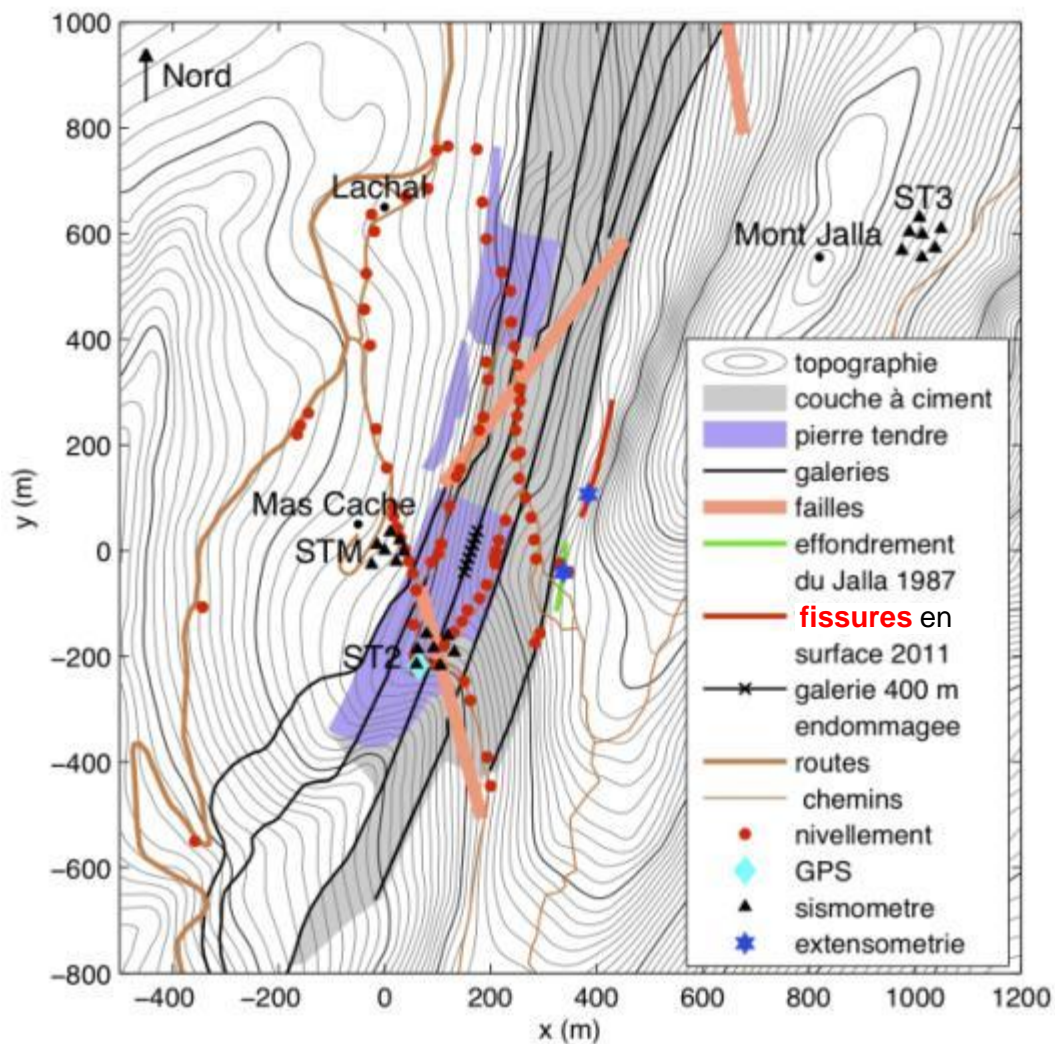
Effondrement de janvier 2011





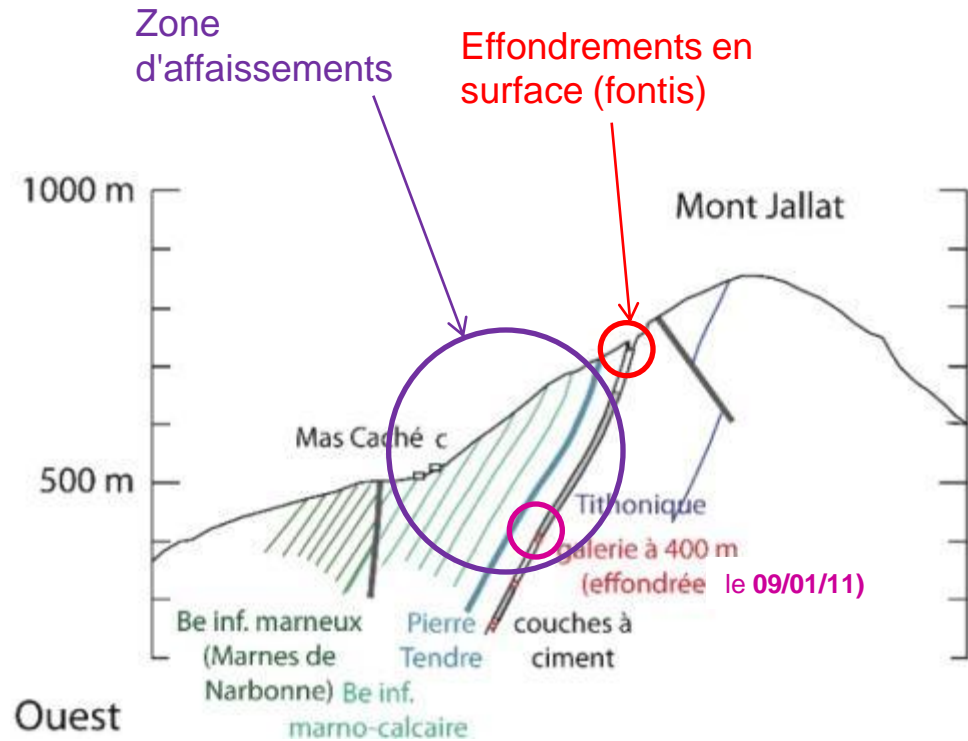
# Effondrements et affaissements au Mont Jalla

Fissures en surface  
(limite amont de la zone d'affaissement)





# Effondrements et affaissements au Mont Jalla



# Effondrements et affaissements au Mont Jalla

Dégâts aux bâtiments suite à l'effondrement souterrain de janvier 2011  
(zone d'affaissement en surface)

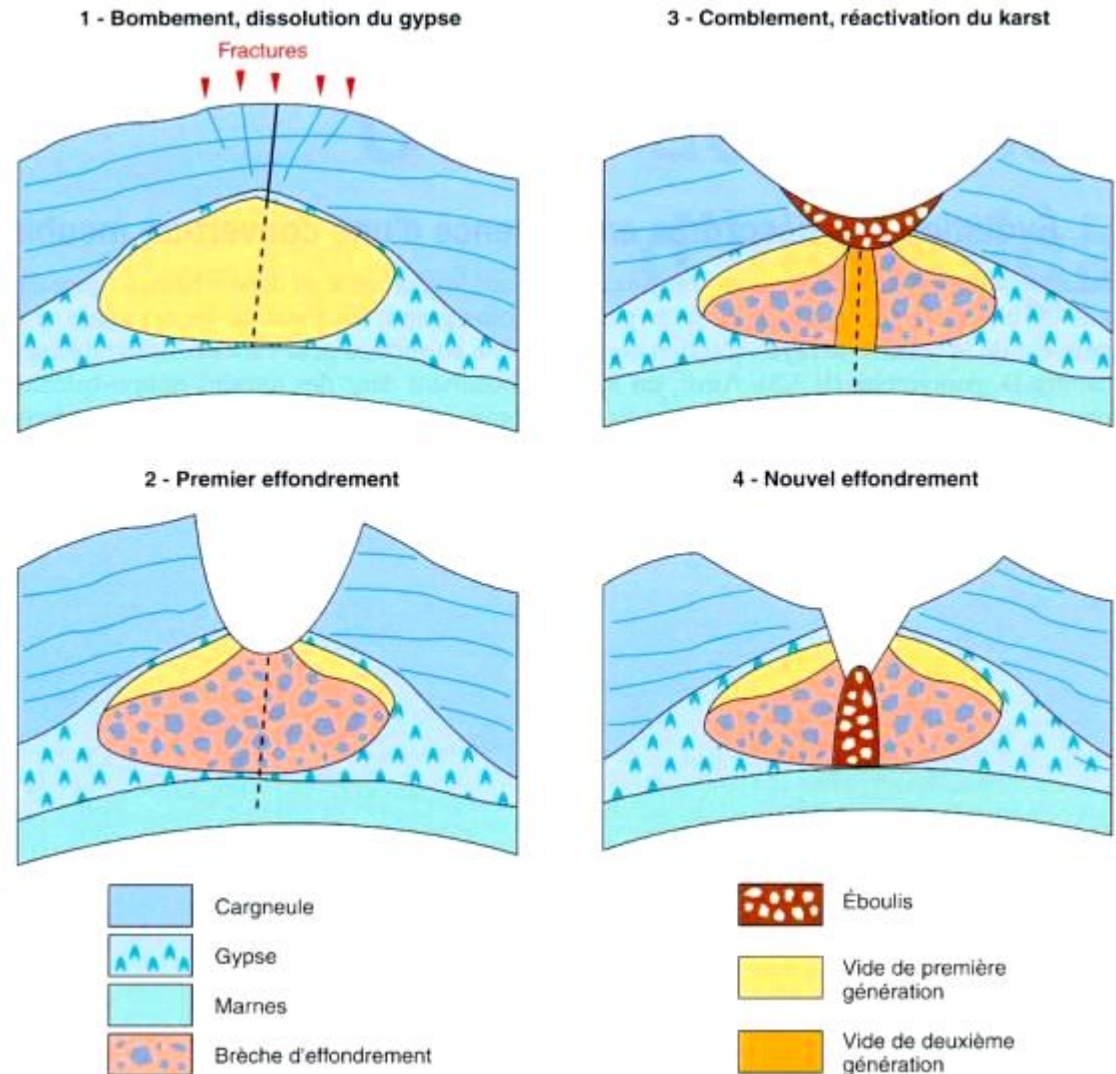




# EFFONDREMENT DÙ A UNE CAVITE DE DISSOLUTION DANS DU GYPSE



Fontis de plus de 100 m de diamètre, dû à un effondrement de l'ordre de 60 000 m<sup>3</sup> dans le gypse triasique (Bargemon, Var).



Hypothèse d'évolution de la cavité (d'après Pothérat, 1977)

# EFFONDREMENTS DUS A DES CARRIERES SOUTERRAINES



Effondrement d'une marnière le 31/03/2001 à 22h45, faisant une victime, surprise sur le pas de sa porte (Neuville-sur-Authon, Eure)  
(archives protection civile 27)

On estime à plus de 100 000 le nombre de marnières dans les deux départements de l'Eure et de la Seine Maritime (exploitées depuis plusieurs siècles pour la pierre à bâtir et l'amendement des terres)

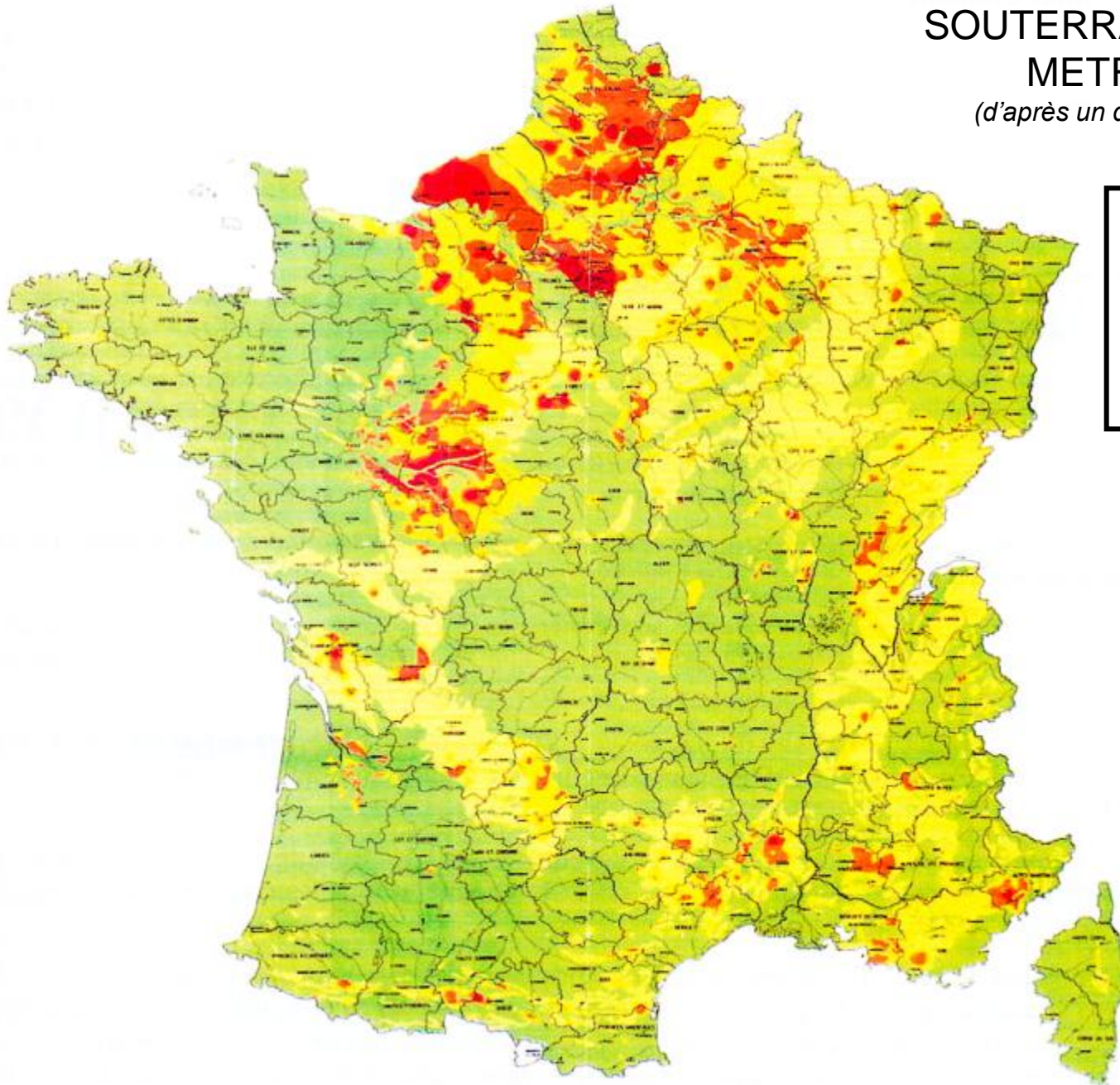


Marnière à Venon, Eure (archives DDE 27)



# CARTE DE L'ALEA LIE AUX CAVITES SOUTERRAINES EN FRANCE METROPOLITAINE

(d'après un document BRGM de 1994)



**Risque associé :** ces dernières années, en France, 1 à 2 décès par an ont été causés par des phénomènes d'effondrement (*Les mouvements de terrain, MEDTL, 2011*)

## Niveau de l'aléa

-  Très fort (TF)
-  Fort (F)
-  Moyen (M)
-  Faible (f)
-  Très faible à nul



# EFFONDREMENT GENERALISE DE CARRIERE SOUTERRAINE

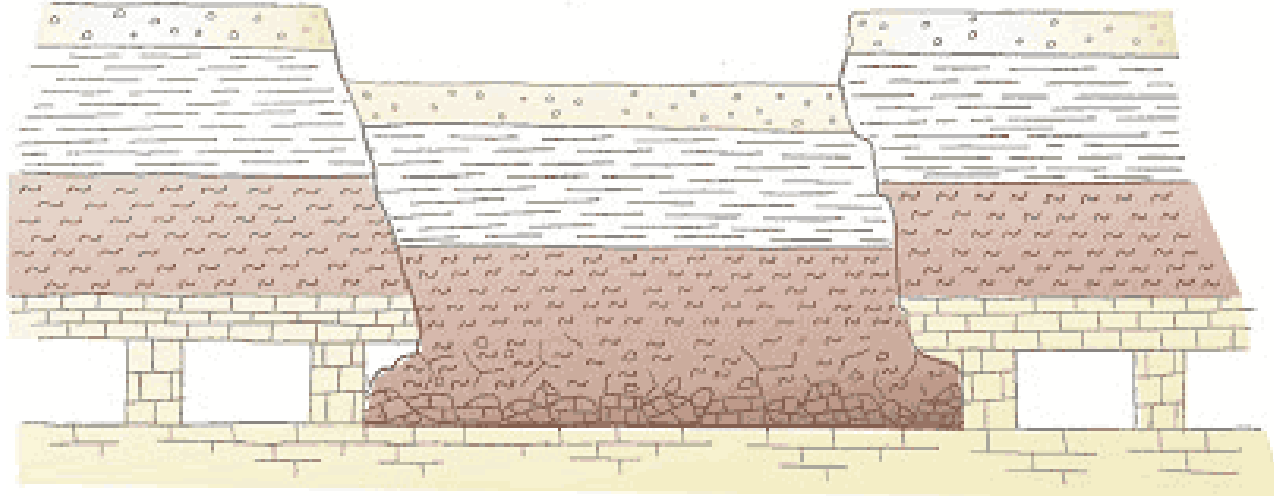


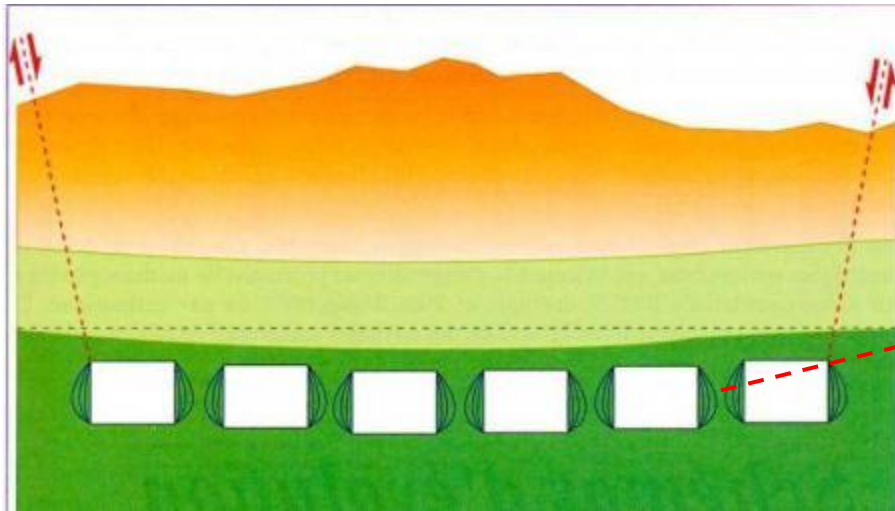
Schéma d'un effondrement généralisé de carrière (document BRGM)

Quelques exemples tragiques d'effondrements généralisés :

- **Vieux-Ports (37) - 1800 : 26 morts ;**
- **Chancelade (24) - 1885 : 13 morts ;**
- **Pantin (93) -1889 : 3 morts ;**
- **Clamart-Issy-les-Moulineaux (92) – 1961 (ancienne carrière de craie): 21 morts, 36 blessés, 200 sinistrés;**
- **Champagnole (39) - 1964 : 6 morts**

# PILIERES SOUMIS A UN EXCES DE COMPRESSION

En bas : piliers fortement dégradés dans une carrière de craie, dont la rupture peut entraîner un **effondrement généralisé** comme celui de la photo du haut (vallée de la Vienne).



# EFFONDREMENTS DUS A DES CARRIERES SOUTERRAINES

## La catastrophe de Clamart



Le 1<sup>er</sup> juin 1961, un énorme grondement souterrain se fait entendre et, quelques instants plus tard, six hectares de carrière de craie s'effondrent sur une hauteur de deux à quatre mètres à la limite des communes de Clamart et

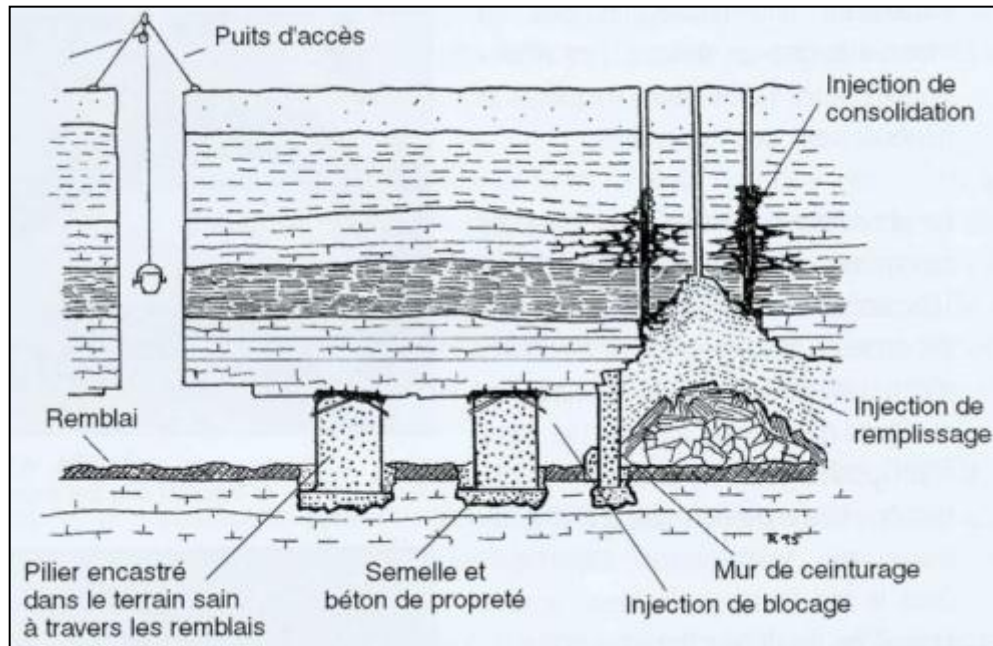
d'Issy-les-Moulineaux. Six rues disparurent et le terrain du stade d'Issy-les-Moulineaux fut transformé en paysage lunaire. On dénombra 21 morts, 45 blessés, plus de 273 sinistrés et 23 immeubles détruits.

*(Les mouvements de terrain, MEDTL, 2011)*

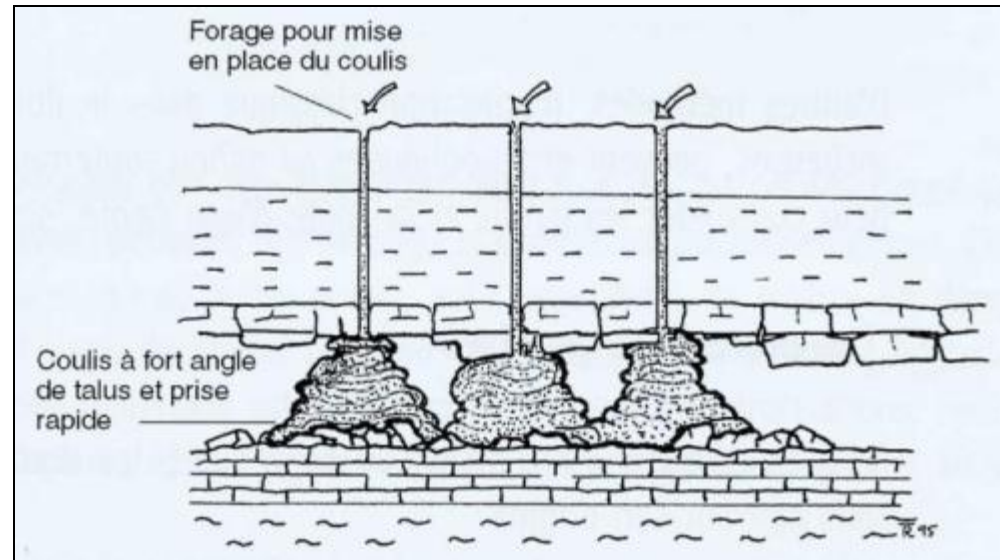


# PROTECTION CONTRE LES EFFONDREMENTS

## RENFORCEMENT PAR PILIERS

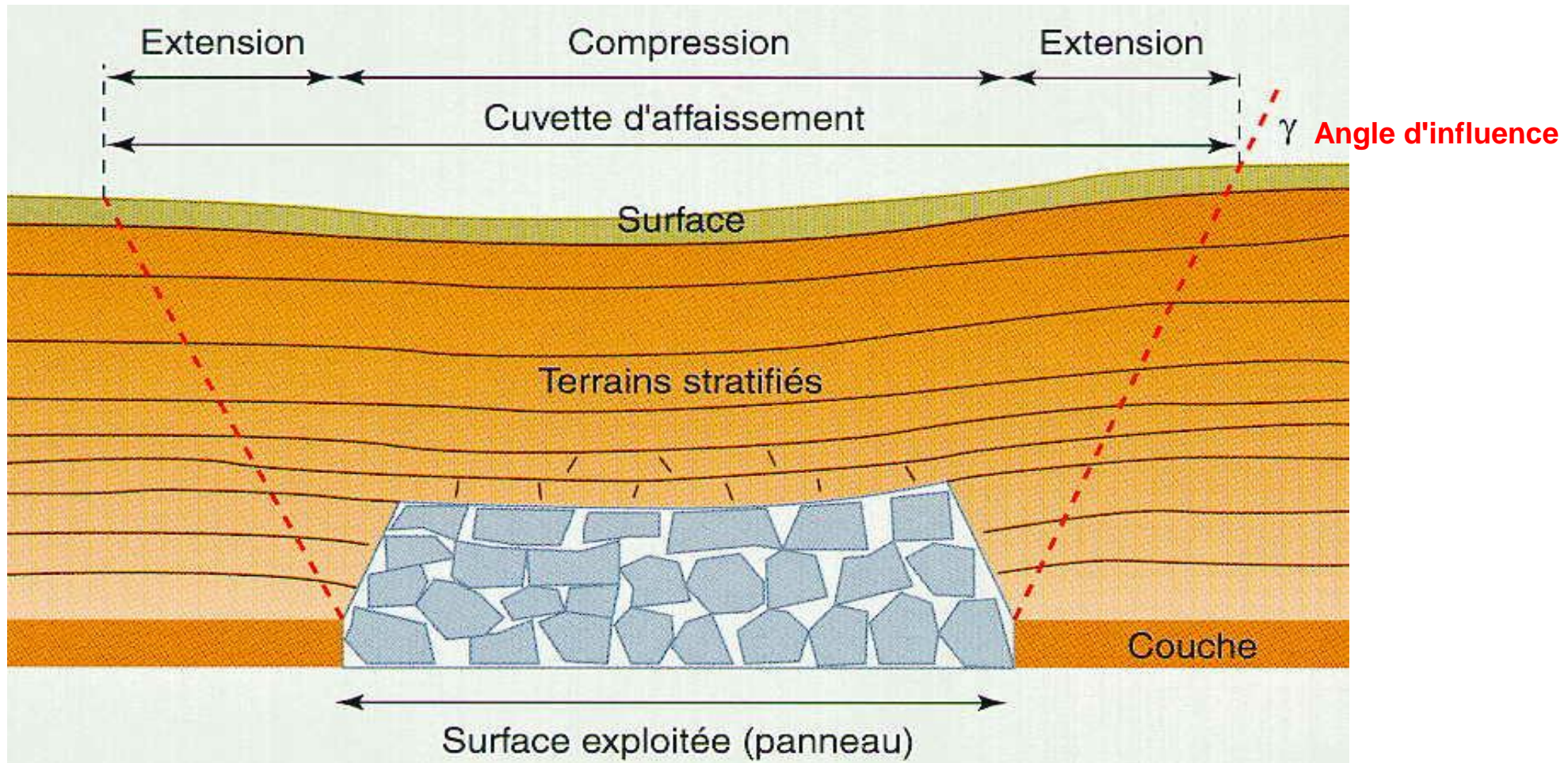


## RENFORCEMENT PAR PLOTS DE COULIS



*d'après ministère de l'environnement, 1985*

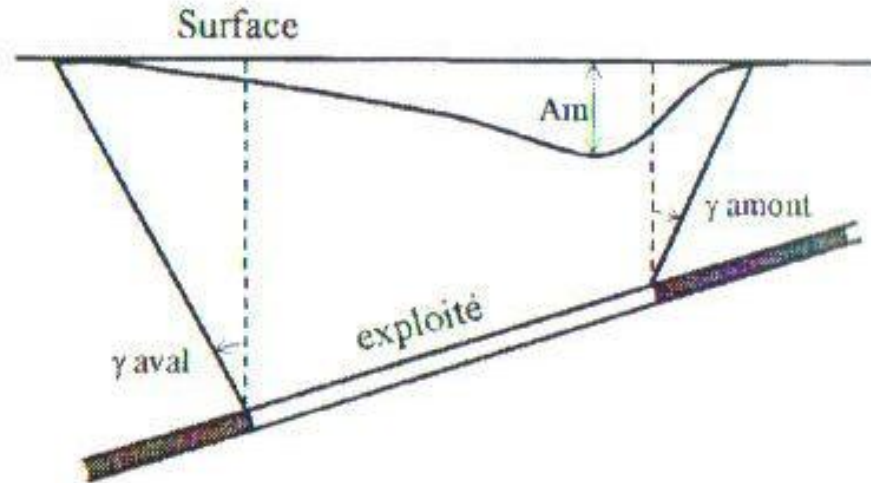
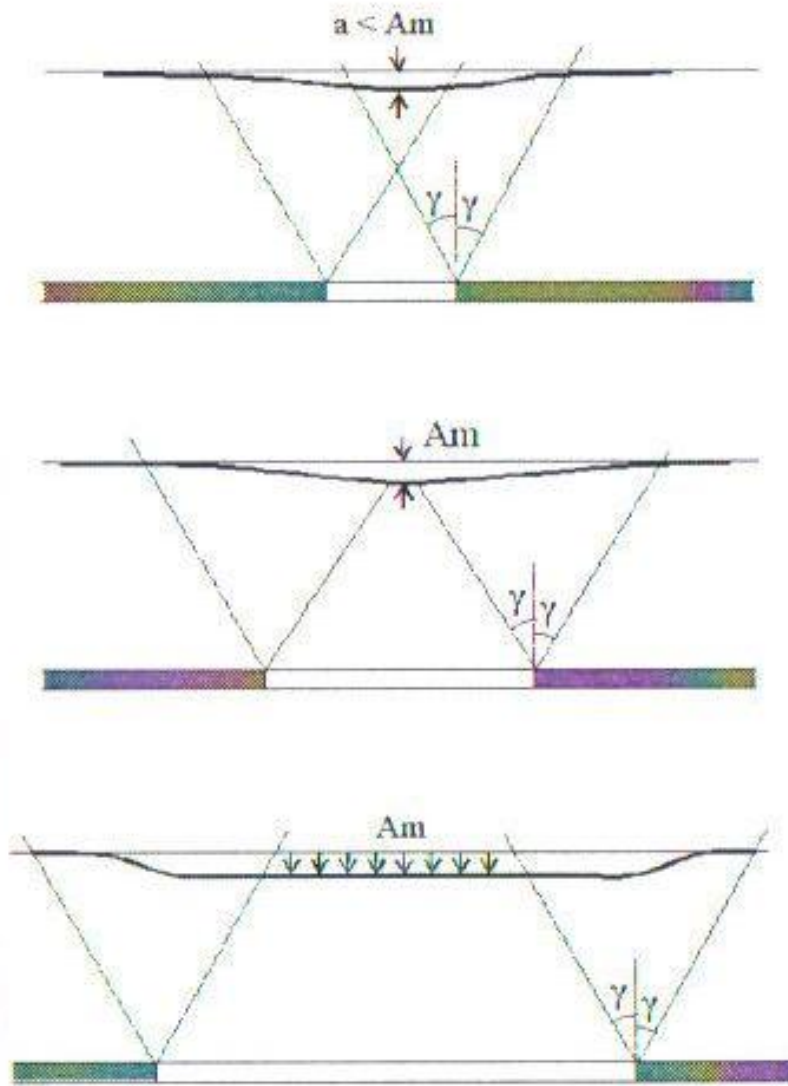
# AFFAISSEMENTS



Affaissement du à une exploitation minière (d'après document INERIS)



# AFFAISSEMENTS

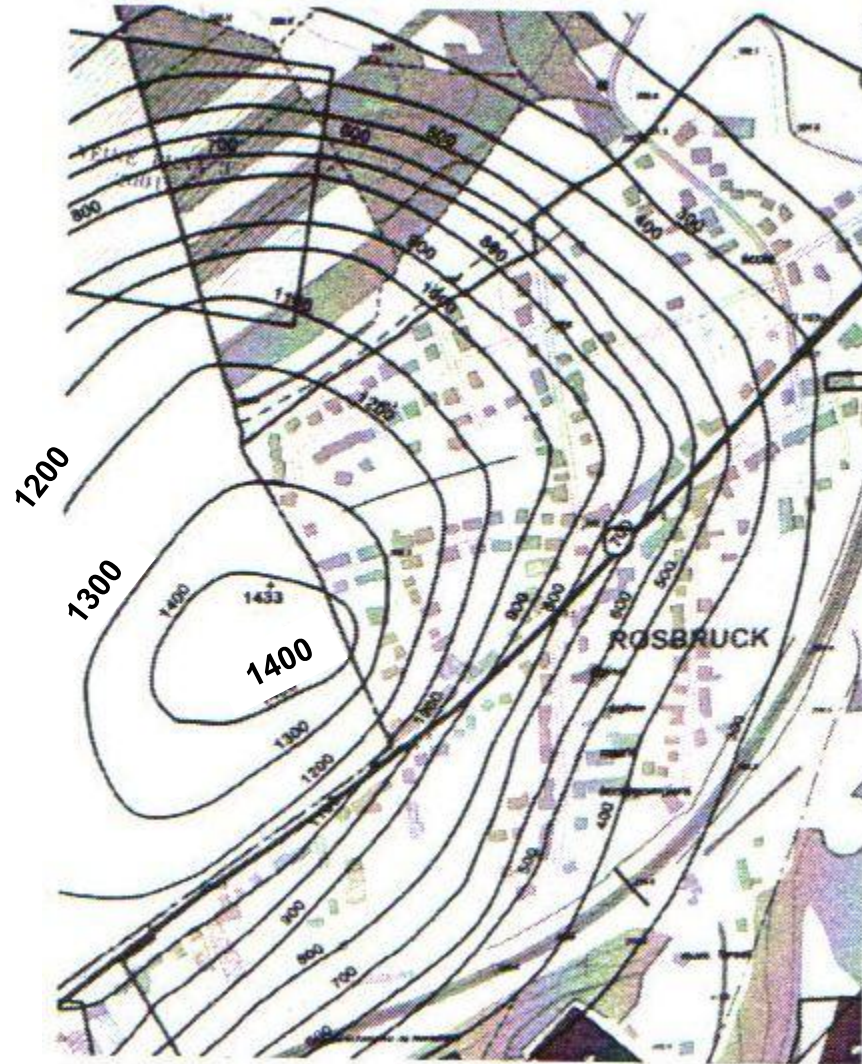


**a – Géométrie d'une cuvette d'affaissement minier au-dessus d'une exploitation totale, ou d'un ensemble de piliers effondrés en fonction de l'étendue exploitée.**

**b – Dissymétrie de la cuvette lorsque la couche est inclinée.**



# CUVETTE D'AFFAISSEMENT

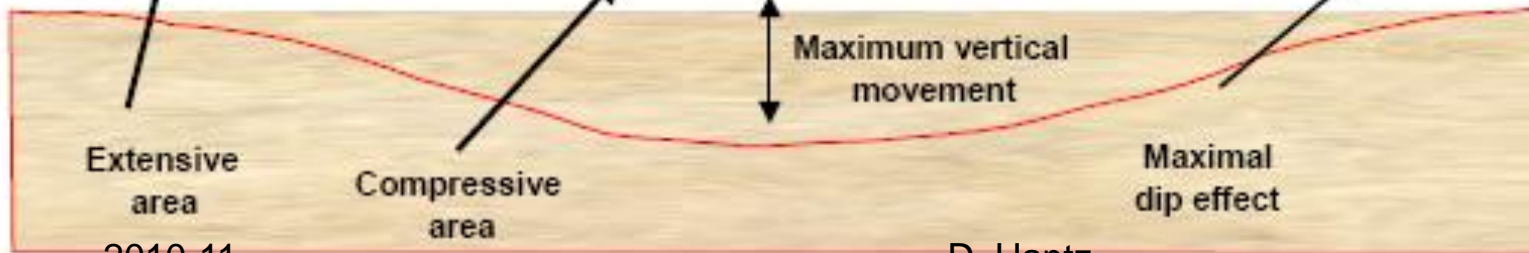
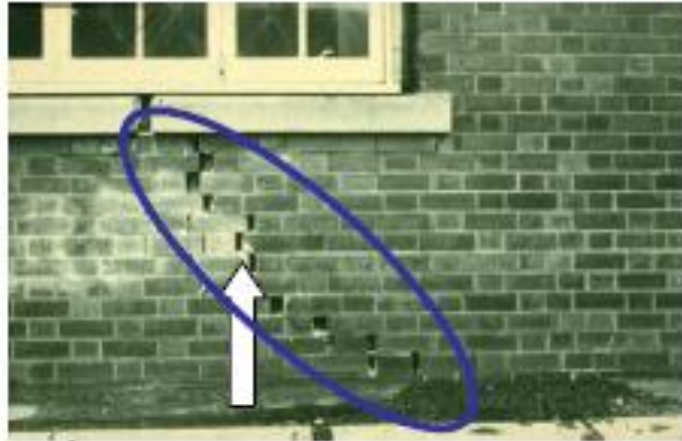


Courbes d'égal affaissement sous la ville de Rosbruck (en cm)

# AFFAISSEMENTS

## CONSEQUENCES D'UN AFFAISSEMENT

*(International Society for Rock Mechanics, Mine Closure Commission)*



Extensive area

2010-11

Compressive area

Maximum vertical movement

Maximal dip effect

D. Hantz

*Figure 4.2. Effects of subsidence on surface structures.*

# EFFONDREMENT DU A LA SUFFOSION

Il s'agit d'un phénomène d'érosion interne qui affecte principalement les sables et limons. Cela consiste en un entraînement des particules (d'abord assez fines) dans la masse de sol du fait de circulations rapides d'eau interstitielle. Le terrain est alors localement soustrait d'une partie de sa matrice fine, de véritables boyaux pouvant se développer (le diamètre de ces boyaux reste généralement modéré - diamètre décimétrique). Lorsque la taille de ces vides devient trop importante, des **effondrements brutaux** de terrain peuvent localement survenir entraînant souvent des désordres en surface. La suffosion peut être provoquée par une circulation naturelle d'eau, mais elle est plus fréquente au droit de canalisations enterrées fuyardes.

Effondrement d'une zone sous-cavée par suffosion  
(photo BRGM, <http://www.bdcavite.net>)





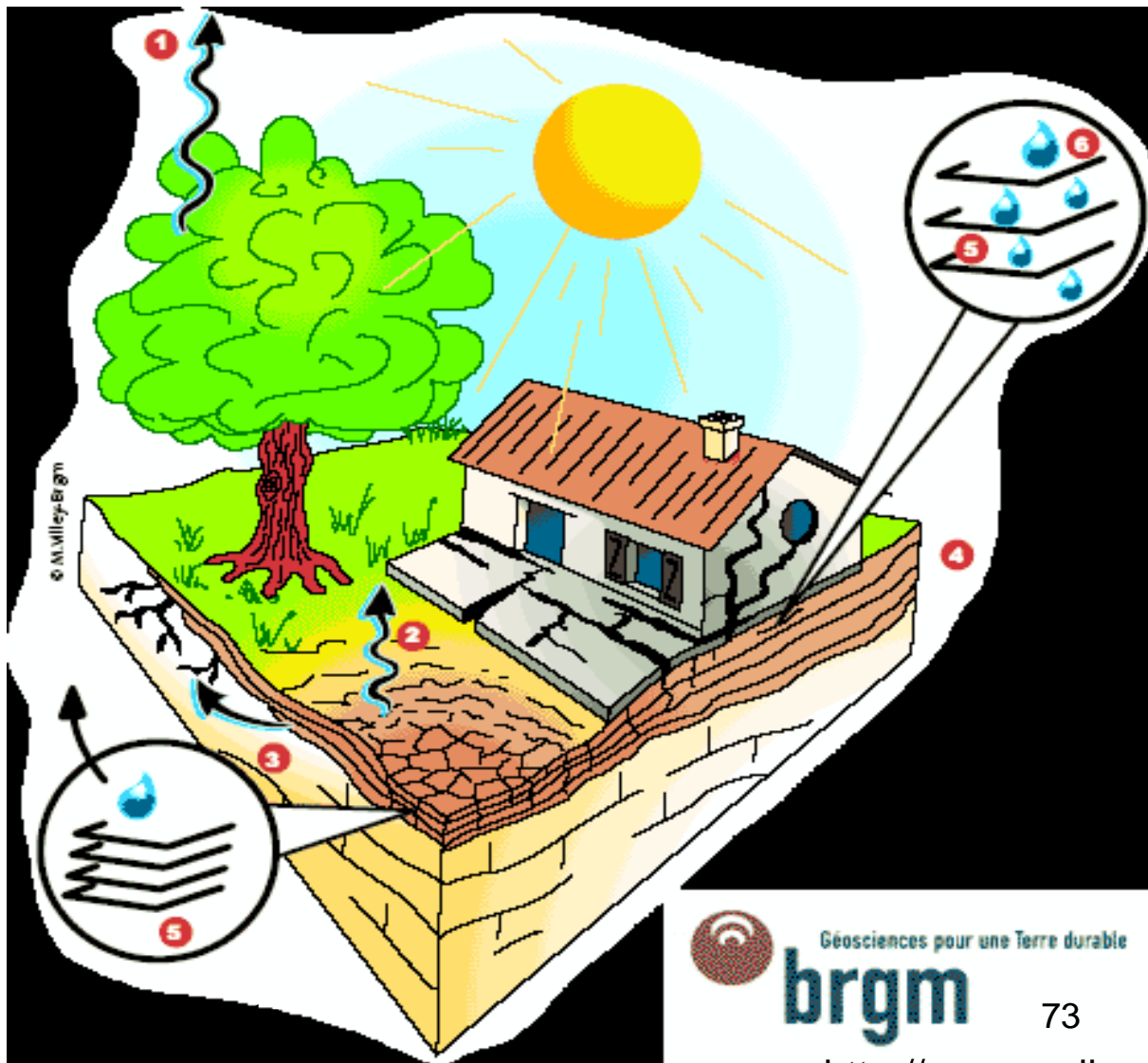
# EFFONDREMENT DU A LA SUFFOSION

Petit effondrement dû à la suffosion  
sur le domaine universitaire de Grenoble-St-Martin-d'Hère (septembre 2009)



## 4. TASSEMENT DU AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES

- (1) Evapotranspiration
- (2) Evaporation
- (3) Absorption par les racines
- (4) Couches argileuses
- (5) Feuilletés argileux
- (6) Eau interstitielle





# TASSEMENT DU AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES

Depuis la vague de sécheresse des années **1989-91**, le phénomène de retrait-gonflement a été intégré au régime des **catastrophes naturelles** mis en place par la loi du 13 juillet 1982. En l'espace de dix ans, ce risque naturel est devenu en France la **deuxième cause d'indemnisation** derrière les inondations, et le montant total des remboursements effectués à ce titre était évalué à la fin de l'année 2002 par la Caisse Centrale de Réassurance à environ **3,3 milliard d'euros**, ce qui correspond à plusieurs **centaines de milliers de maisons** sinistrées sur l'ensemble de la France depuis 1989.

## Dégats

- fissurations en façade
- distorsion des portes et fenêtres
- décollements entre éléments jointifs (garages, perrons, terrasses)
- dislocation des dallages et des cloisons
- rupture de canalisations enterrées



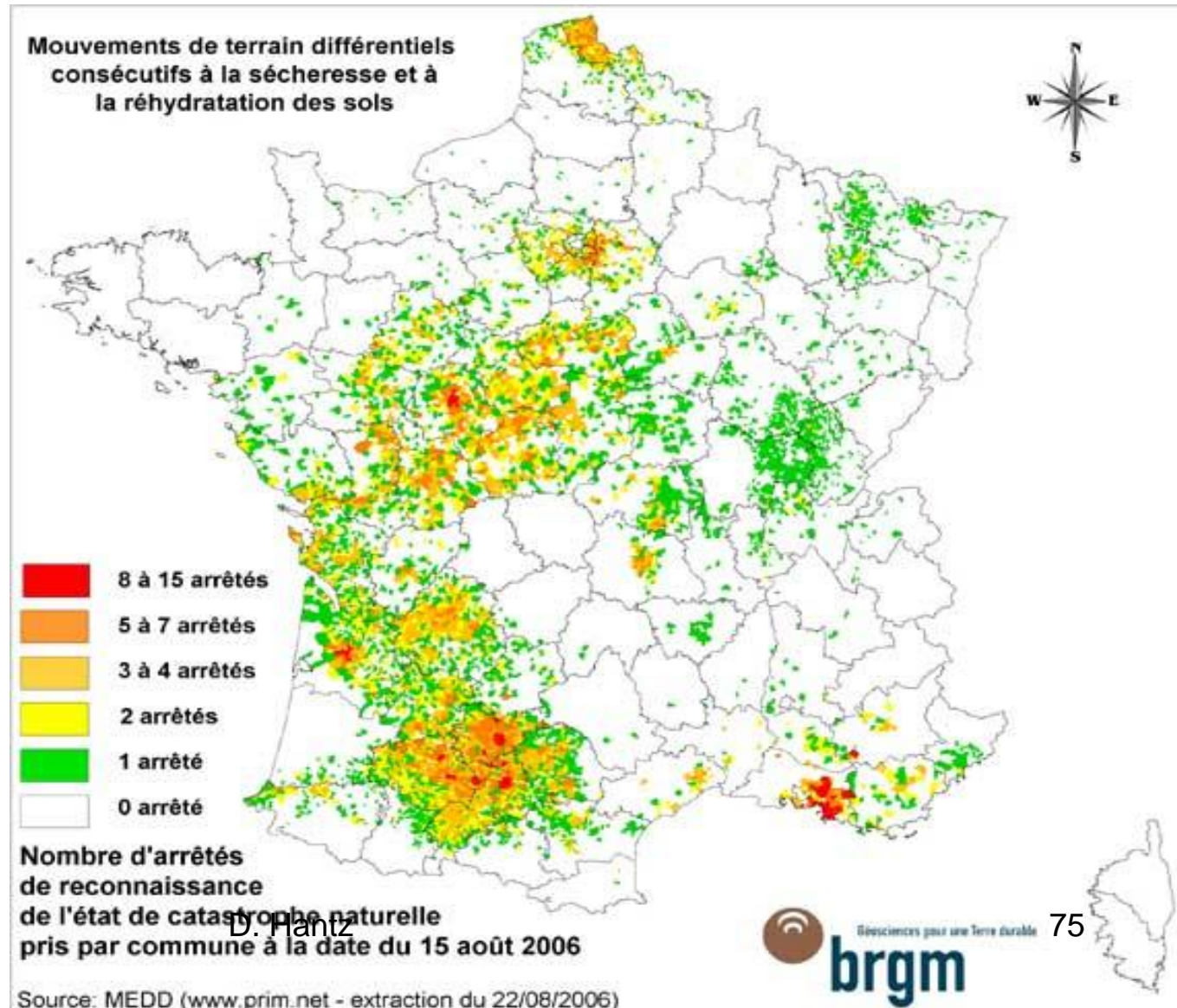
## Réparation

- supprimer la cause principale (arbre par exemple)
- reprise en sous-œuvre (par micro-pieux)
- rebouchage des fissures (avec un enduit souple)



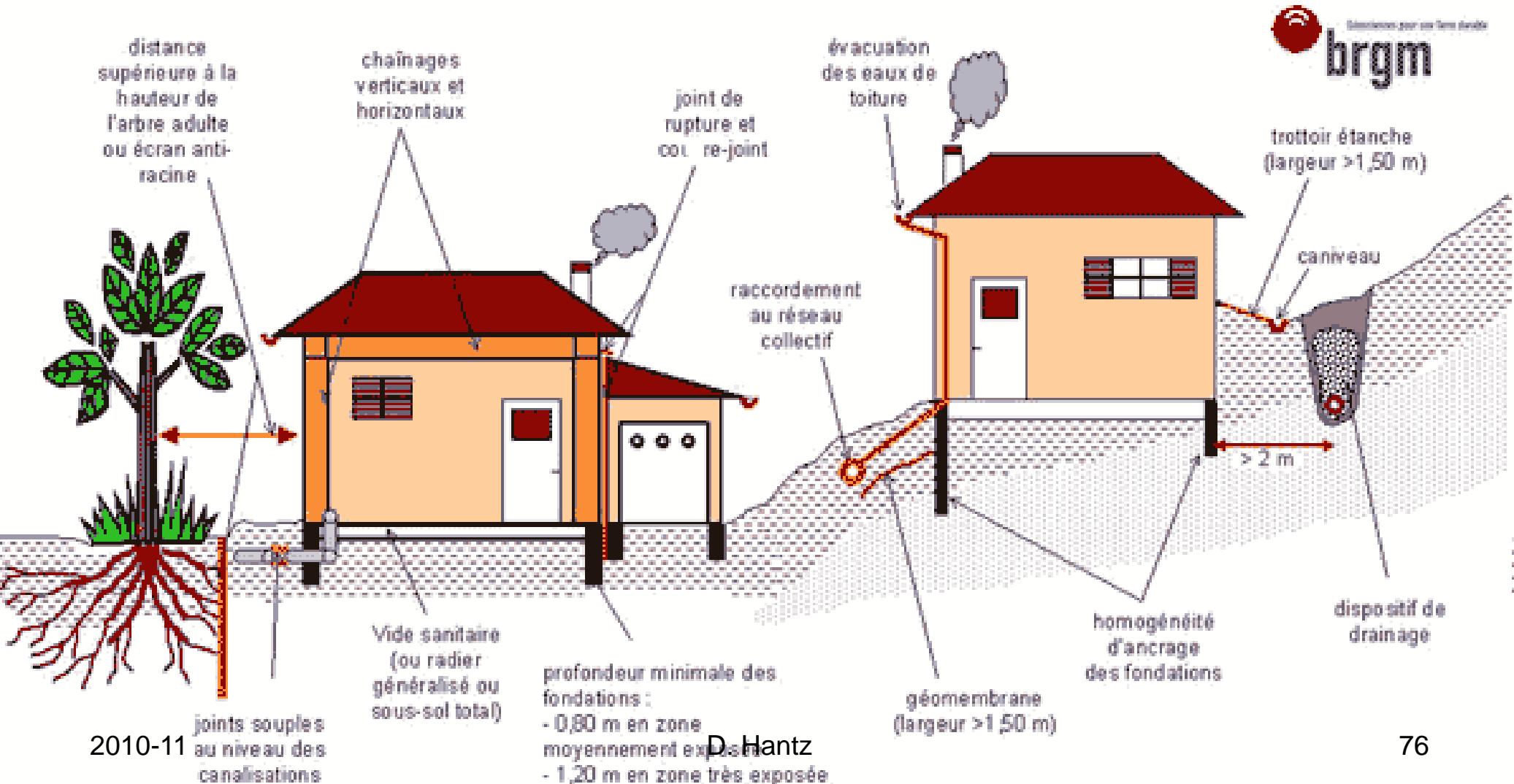
# TASSEMENT DU AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES

Depuis 1989, ce sont plus de **5 000 communes françaises**, réparties dans **75 départements**, qui ont été reconnues en état de catastrophe naturelle vis à vis du retrait-gonflement.



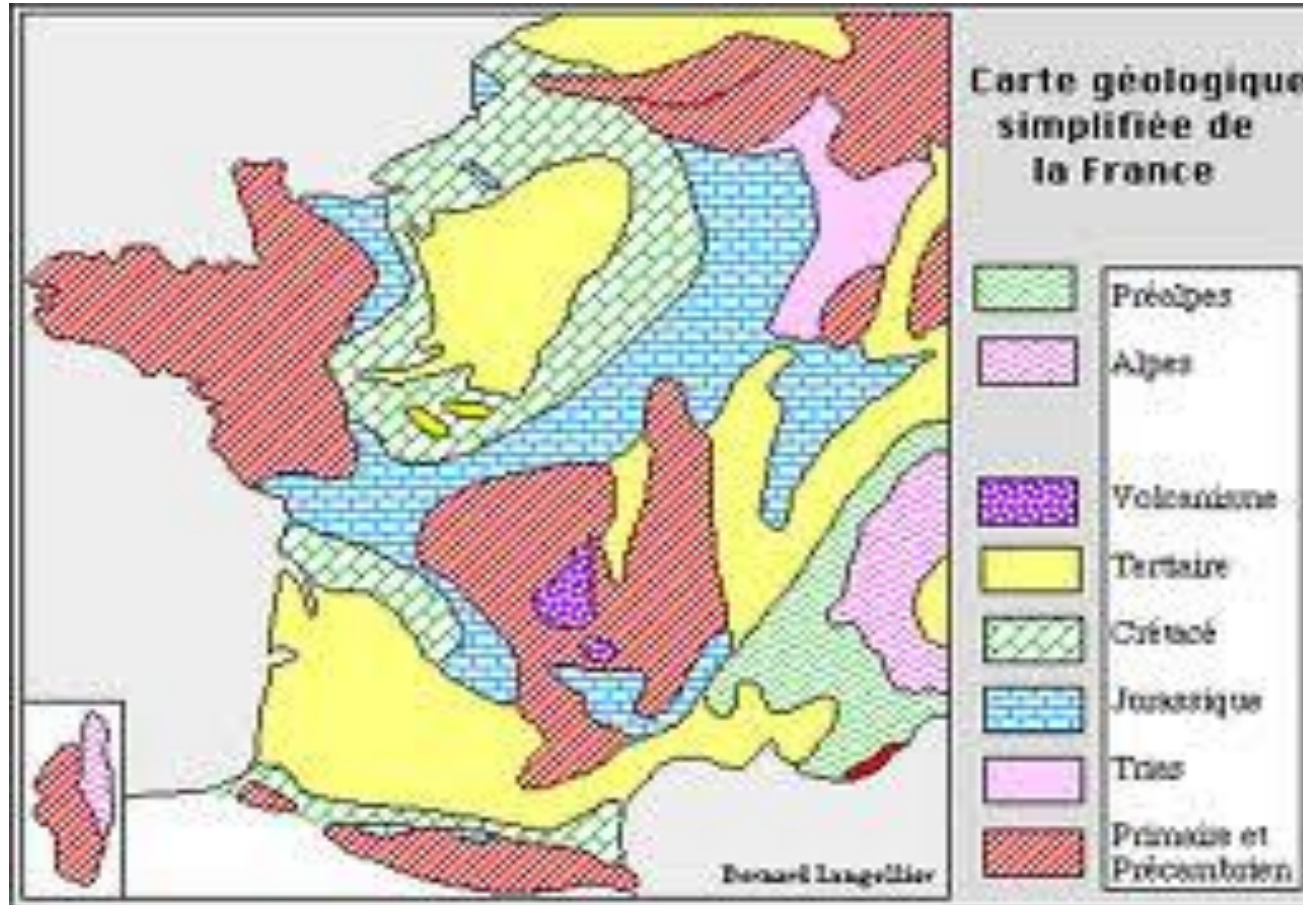
# TASSEMENT DU AU RETRAIT GONFLEMENT DES ARGILES

## Dispositions préventives



# GEOLOGIE DES MOUVEMENTS DE SUBSIDENCE

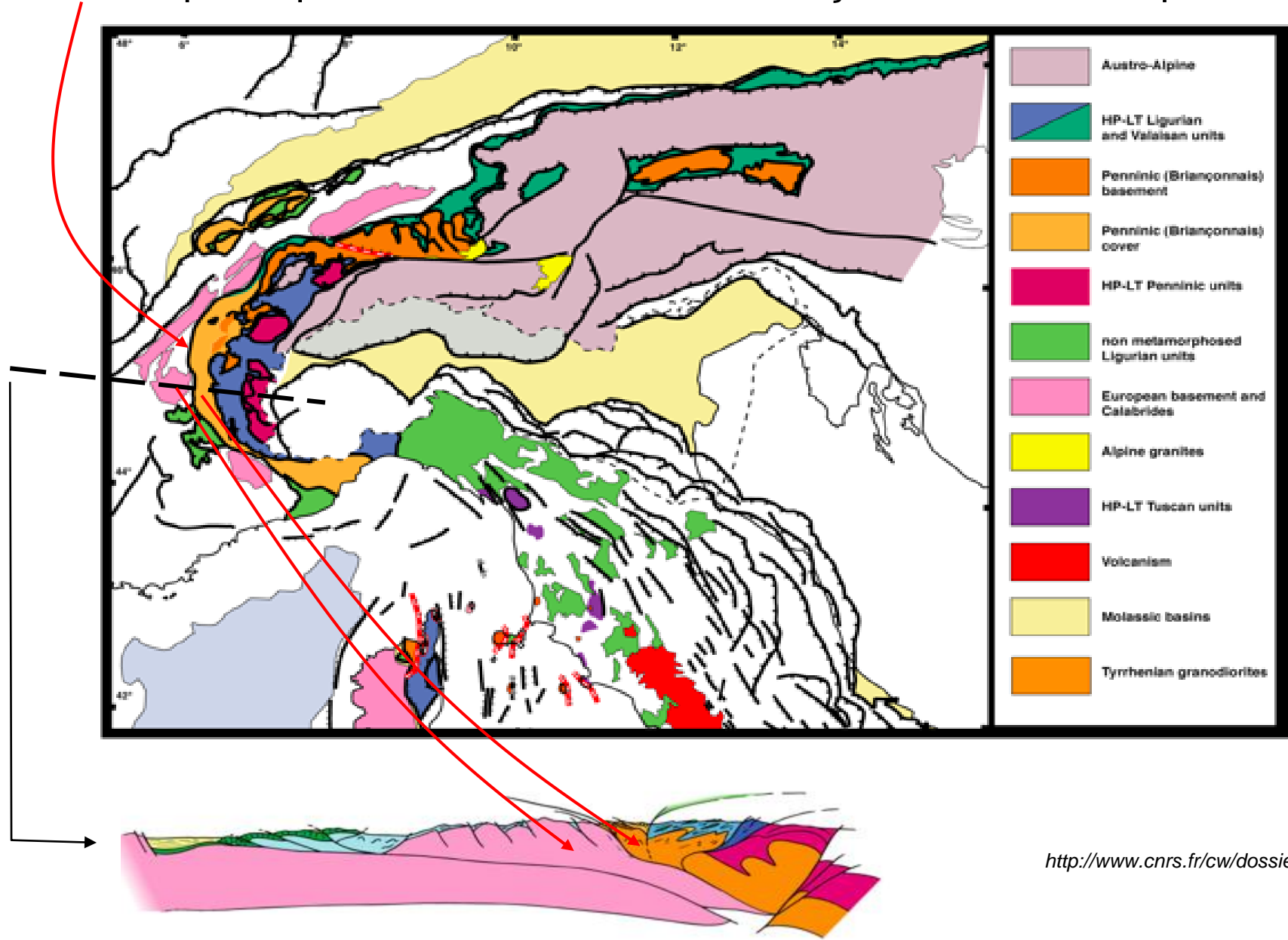
## Rappels de géologie de la France et des Alpes





# Rappels de géologie alpine

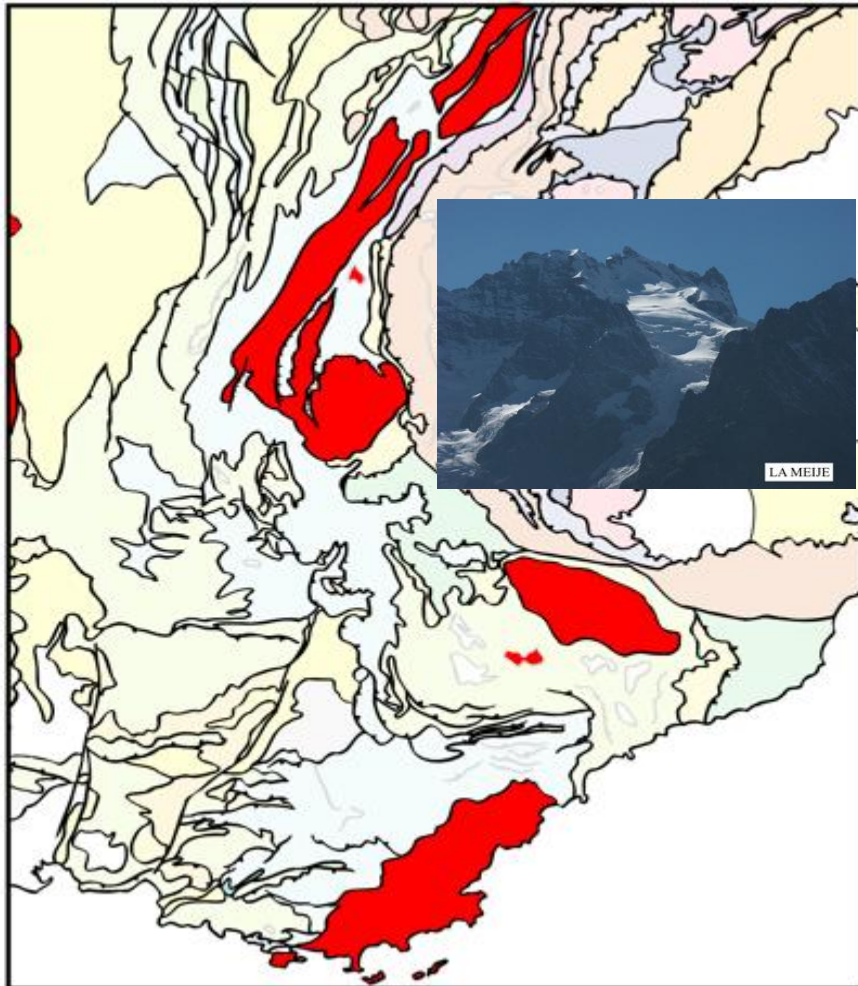
Front pennique : chevauchement du Briançonnais sur le Dauphinois



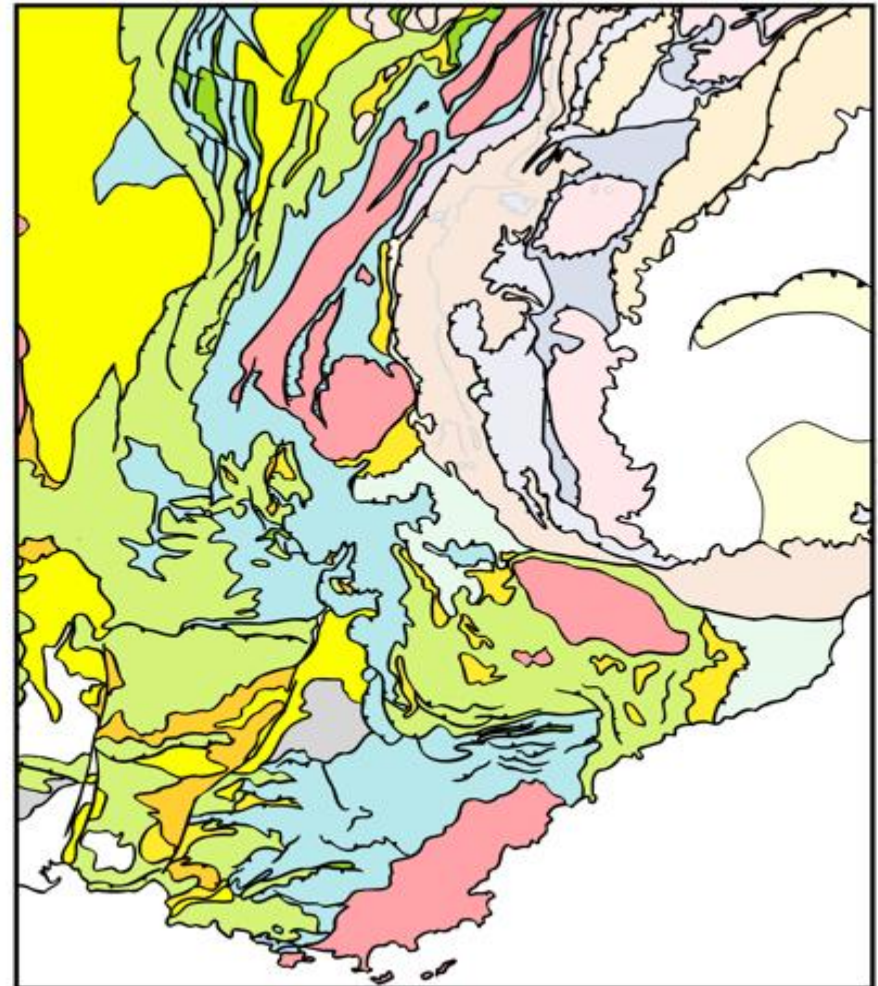
# Rappels de géologie alpine

## La zone dauphinoise

Le socle: les Massifs Cristallins externes



La couverture sédimentaire

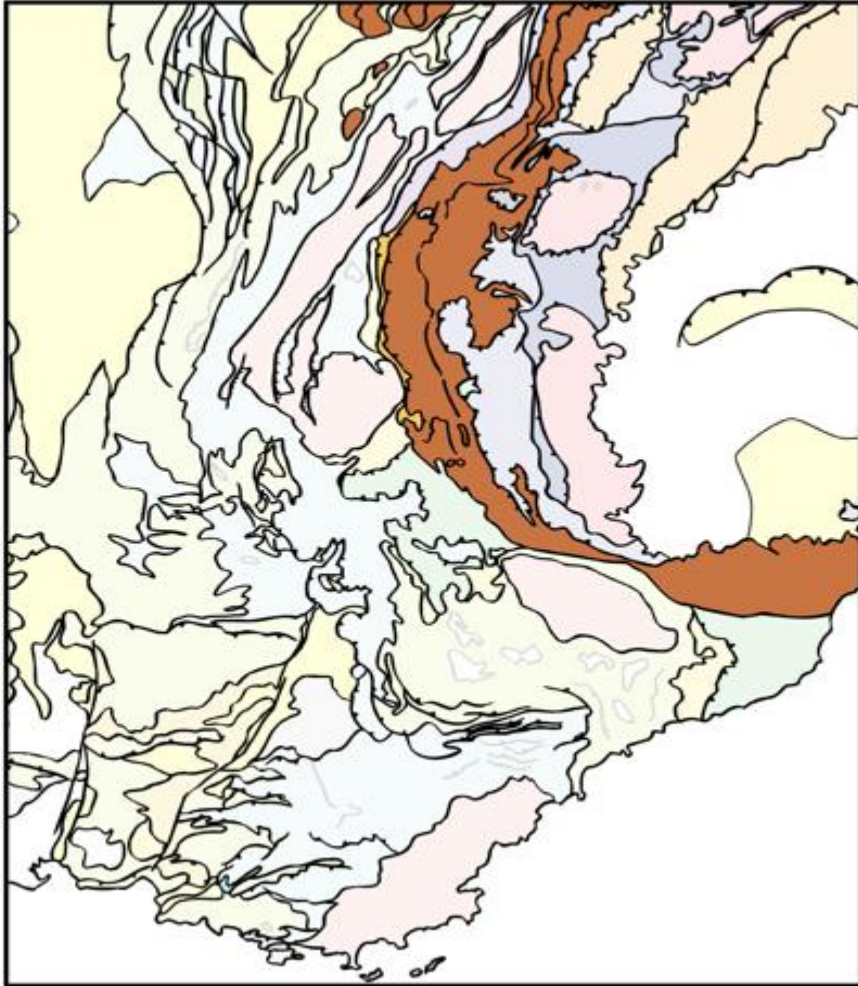




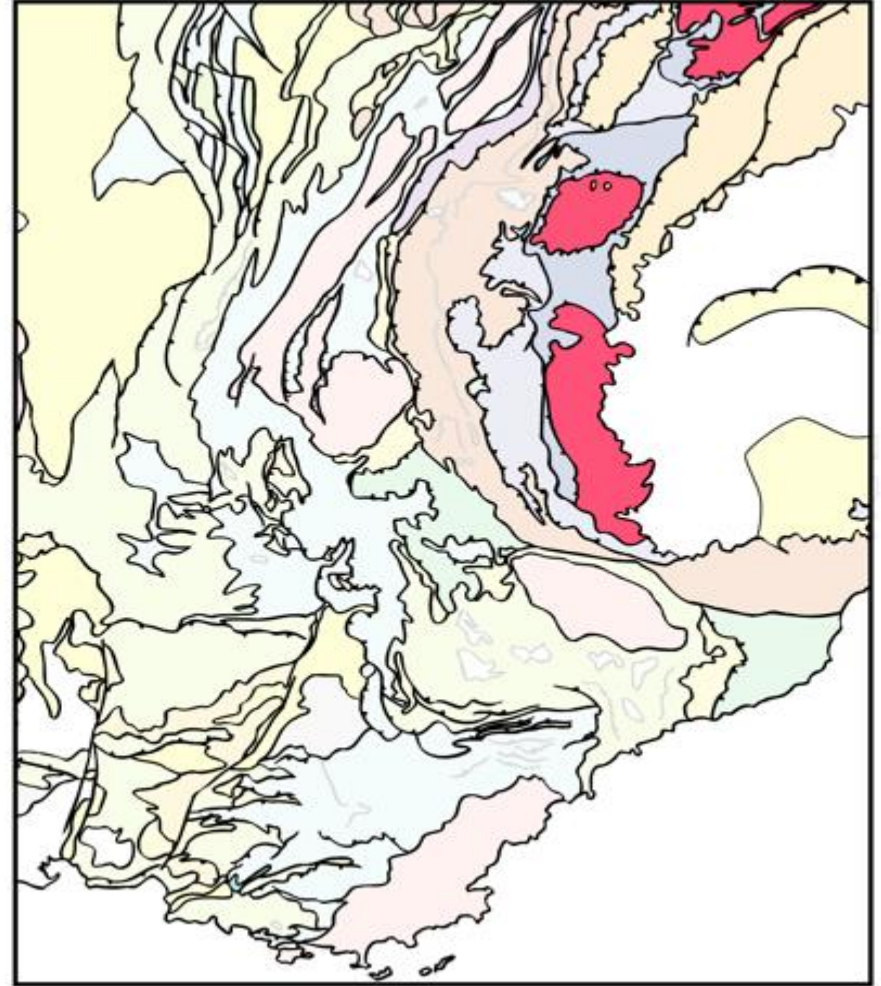
# Rappels de géologie alpine

## La zone briançonnaise

le Briançonnais externe, couverture et socle



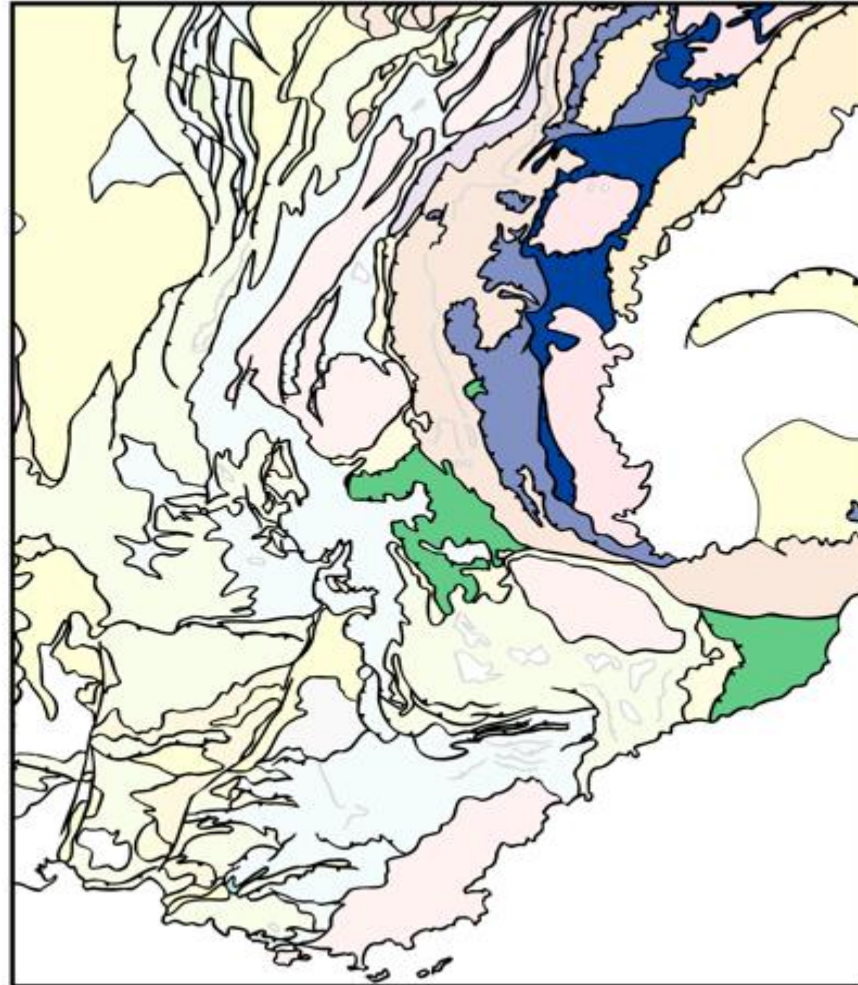
Le Briançonnais interne surtout du socle





# Rappels de géologie alpine

## Le domaine ligure

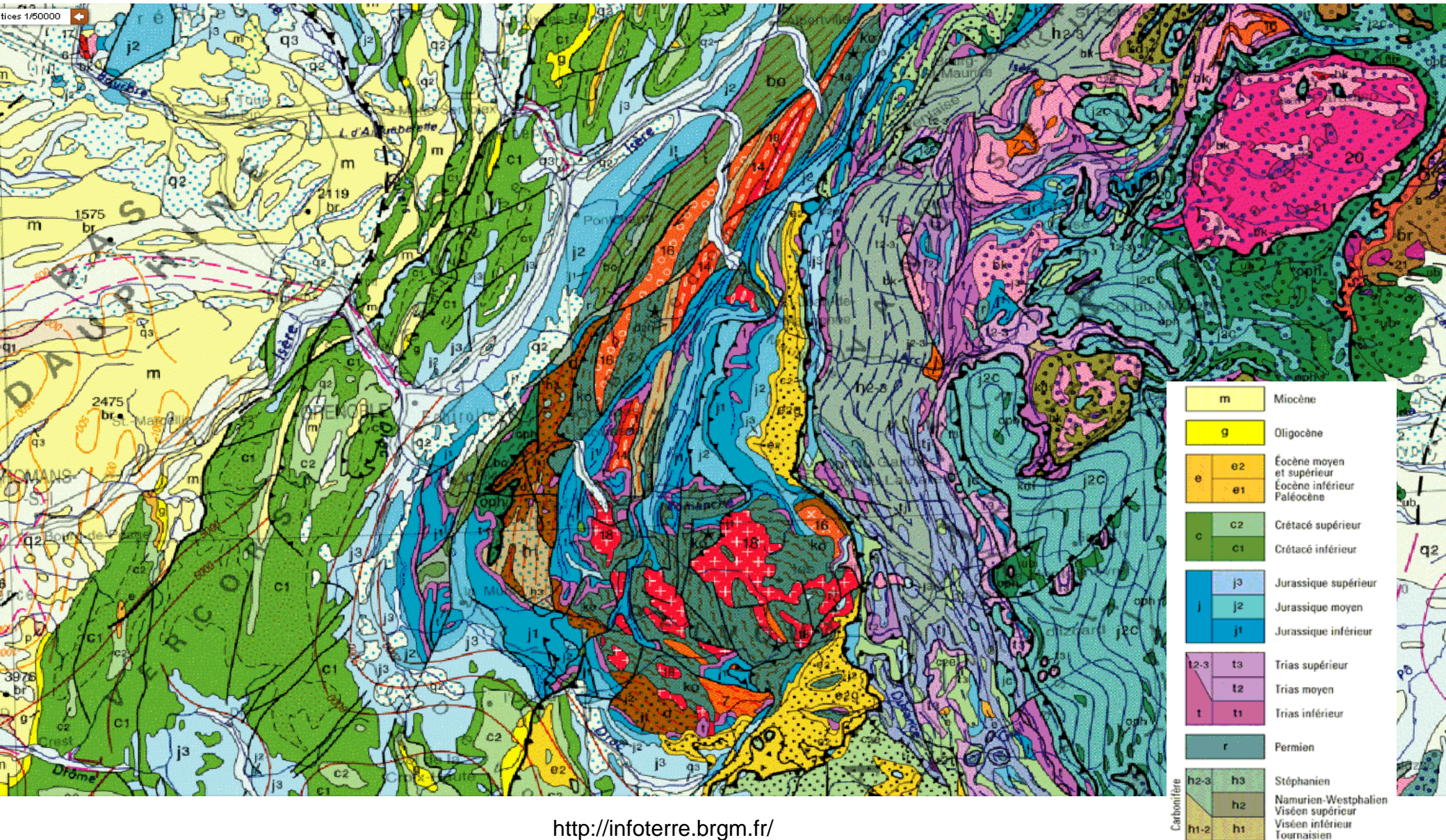


En vert, le Ligure non  
métamorphique :  
nappe du Flysch à  
Helminthoïdes et Chenaillet

En bleu le domaine ligure  
métamorphique :  
Schiste Bleu en bleu clair  
Eclogite en bleu foncé



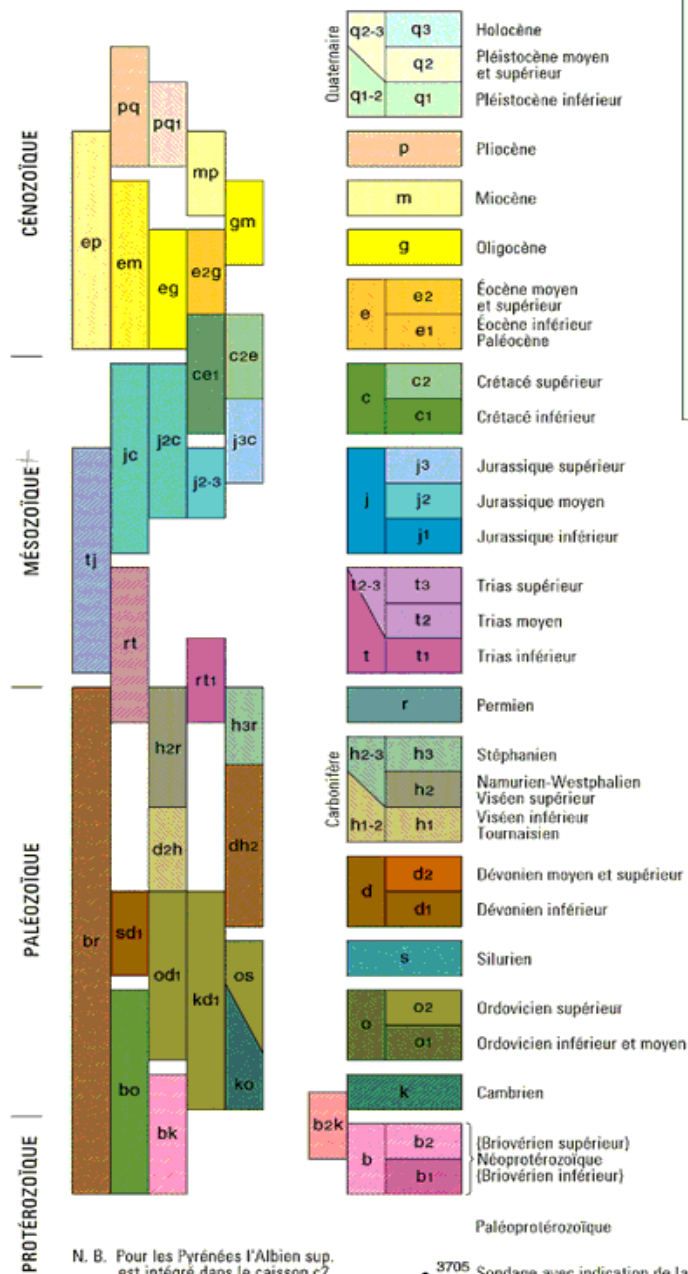
# La carte BRGM au 1/1 000 000



<http://infoterre.brgm.fr/>

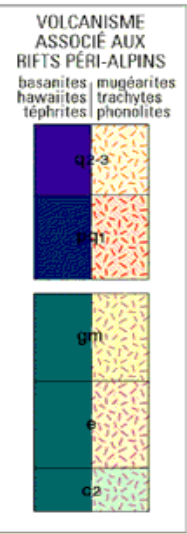


## STRATIGRAPHIE SÉDIMENTAIRE ET VOLCANISME

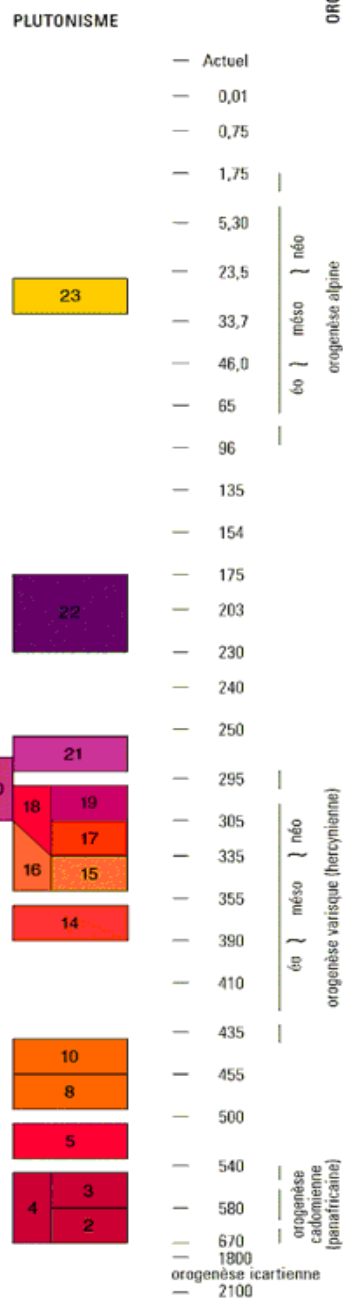


N. B. Pour les Pyrénées l'Albien sup. est intégré dans le caisson c2

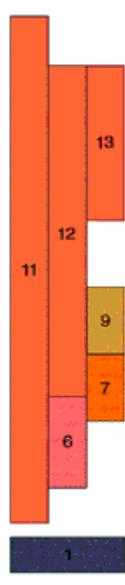
• 3705 br Sondage avec indication de la profondeur (en mètres) et du niveau atteint



## RADIOCHRONOLOGIE (en millions d'années) IUGS-UNESCO 2000, modifié



### ORTHOGNEISS



orogénèse alpine (0-65 Ma)

orogénèse varisque (hercynienne) (240-410 Ma)

orogénèse cadomienne (panafricaine) (540-670 Ma)



# INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES

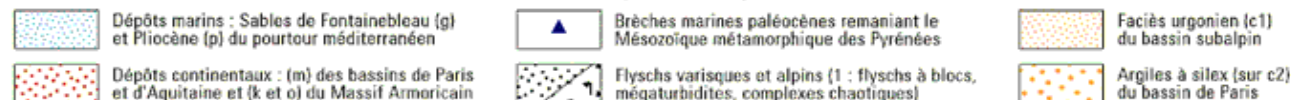
(figurées par des surcharges sur les couleurs)

## SÉDIMENTAIRE

### Faciès spéciaux du Quaternaire



### Autres Faciès à spécificité régionale



## MÉTAMORPHISME

Les caractères métamorphiques des terrains sont symbolisés par des figurés dont la couleur indique l'âge de l'orogénèse, la forme indique le faciès du métamorphisme, et l'orientation correspond à la principale foliation régionale

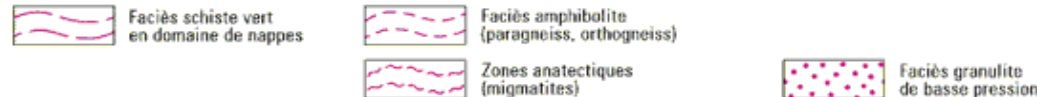


N. B. Dans les Alpes les faciès de haute pression sont privilégiés bien qu'ils soient généralement rétroformés

l'orogénèse néo-varisque est prise comme exemple

Faciès :

de basse et moyenne pression



de haute pression



## MAGMATISME

Les caractères magmatiques des terrains sont symbolisés par des figurés dont la couleur indique la nature chimique :

Volcanisme acide : bleu ; basique : vert

Plutonisme acide : blanc ; basique : noir

Le magmatisme carbonifère (h2, l7) est pris comme exemple

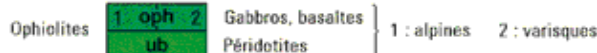
de marge active



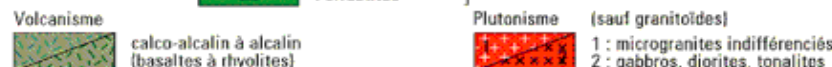
d'extension continentale



d'accrétion océanique



de collision continentale



### Granitoïdes des orogènes de collision

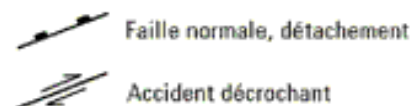


1 : Avec indication d'une foliation syn-à post-mise en place

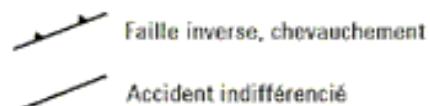
Formations particulières



## ÉLÉMENTS STRUCTURAUX

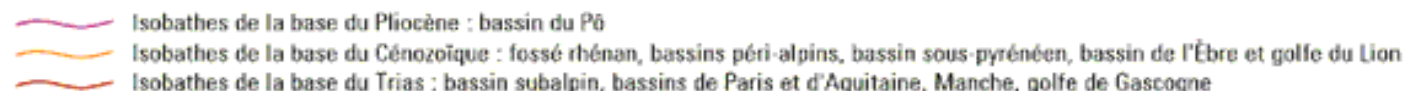


### Accidents et failles



en tiretés :  
accidents ou flexures  
masqués ou supposés

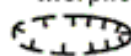
### Isobathes et structures profondes



### Morphologies et autres structures



Stratocône du Cantal



Caldeira volcanique probable



Impactite de Rochechouart



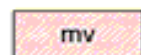
Incision messinienne



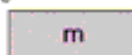
Paléodéfilé messinien

## MARGE CONTINENTALE

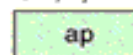
Les terrains sont figurés avec leur "couleur chronologique" atténuée ; s'y ajoutent les terrains suivants :



Complexe métamorphique indifférencié



Volcanisme sous-marin ligure



Substratum anté-pliocène indifférencié

N. B. Les failles et les figurés du métamorphisme et du magmatisme sont portés en teinte grise

### Morphologies et structures sous-marines



Bancs sableux



Cicatrices d'arrachement



Paléochenaux sous-marins



Dômes de sel



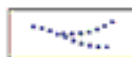
Masses glissées



Éventails sous-marins



Limite d'extension  
du sel messinien



Paléoréseau fluvial  
messinien du golfe du Lion



Extension sous couverture  
de la croûte océanique ligure



# Zones propices aux effondrements (exemple de la région grenobloise) Terrains gypseux du Trias

Allevard



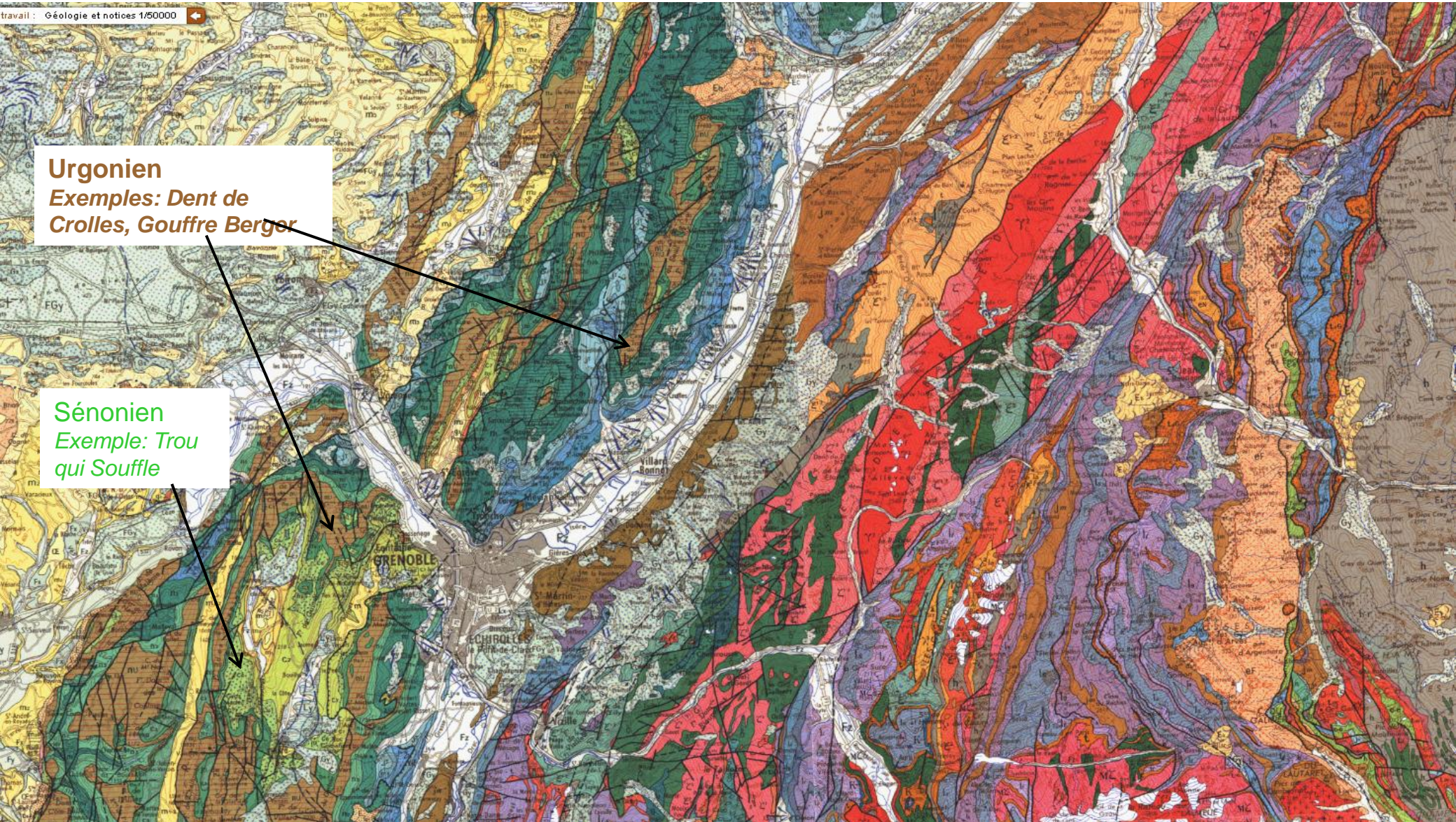
Houiller

La Mure

Carte BRGM au 1/250 000

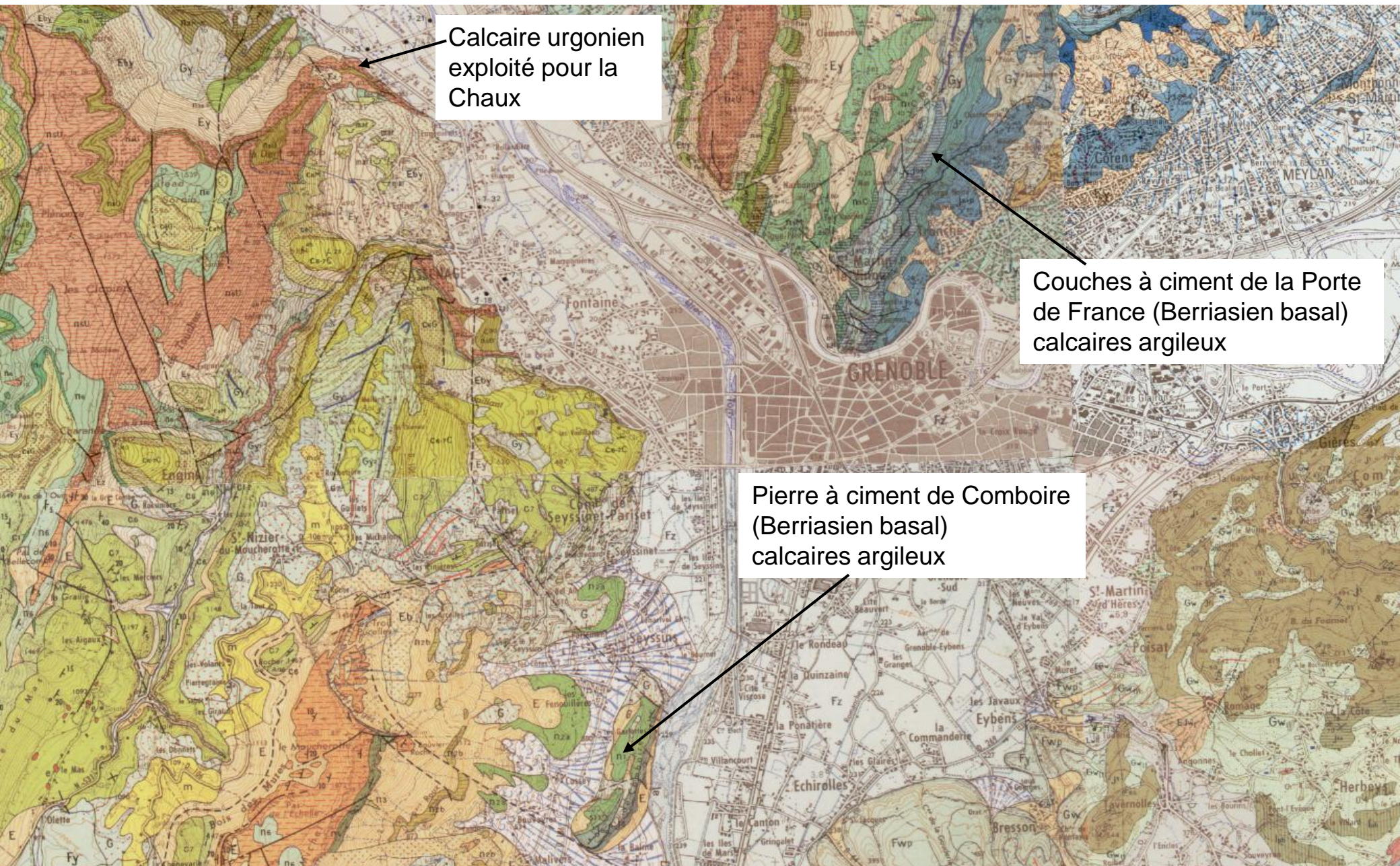


# Terrains calcaires favorables aux phénomènes karstiques (exemple de la région grenobloise)





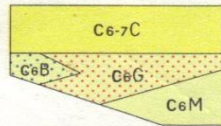
## Couches exploitées en carrière souterraine – Effondrements possibles



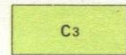


## TERRAINS MÉSOZOÏQUES

### Crétacé supérieur

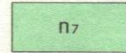


C6-7C – Calcaires à silex (Campanien terminal – Maestrichtien)  
 C6B – Lauzes à Bryozoaires (Campanien)  
 C6G – Lauzes gréséo-glaucnieuses (Campanien)  
 C6M – Lauzes marneuses (Campanien inf.)



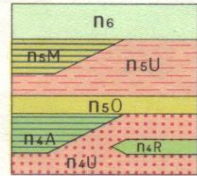
Calcaires blancs (Turonien)

### Crétacé inférieur



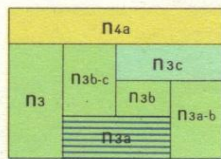
Grès verts albiens

### Complexe urgonien :



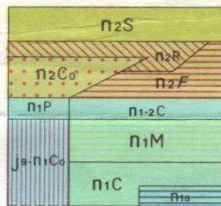
N6 – "Lumachelles" (Aptien)  
 N5M – Marnes à Orbitolines  
 N5U – Masse urgonienne supérieure (Bédoulien)  
 N5O – Calcaires roux à Orbitolines  
 N4A – Marnes à Annélides  
 N4R – Calcaires roux lités  
 N4U – Masse urgonienne inférieure (Barrémien)

### Néocomien supérieur :



N4a – Couches à Panopées (Hauterivien supérieur – Barrémien inférieur)  
 N3 – Hauterivien indifférencié  
 N3c – Marno-calcaires à Spatangues (Hauterivien supérieur)  
 N3b – Calcaires lités noirs (Hauterivien inférieur)  
 N3a – Couche glauconieuse et marnes (Hauterivien basal).

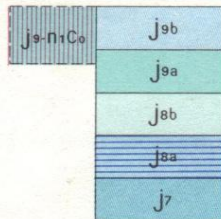
### Néocomien inférieur :



N2S – Calcaires à silex (Valanginien terminal)  
 N2R – Calcaires supérieurs du Fontanil (Valanginien)  
 N2Cσ – Calcaires coralligènes (Valanginien)  
 N2F – Calcaires inférieurs du Fontanil (Valanginien)  
 N1-2C – Calcaires du Chevallon (Berriasien supérieur)  
 N1P – "Purbeckien" : calcaires et marnes  
 N1M – Marnes de Narbonne (Berriasien)  
 N1C – Calcaires gris (Berriasien)  
 N1a – Couches à ciment de la Porte de France (Berriasien basal) : calcaires argileux

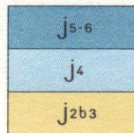
### Jurassique supérieur

#### Jurassique supérieur calcaire :



J9-N1Cσ – Calcaires coralliens de l'Echaillon (Tithonique – Berriasien)  
 J9b – Calcaires "tithoniques" supérieurs  
 J9a – Calcaires "tithoniques" moyens  
 J8b – Calcaires "tithoniques" inférieurs (Kimméridgien supérieur)  
 J8a – Couches de la galerie du S'-Eynard (Kimméridgien inférieur et moyen) : calcaires alternant avec des lits de marnes  
 J7 – "Séquanien" (Oxfordien terminal – Kimméridgien basal) : calcaires argileux

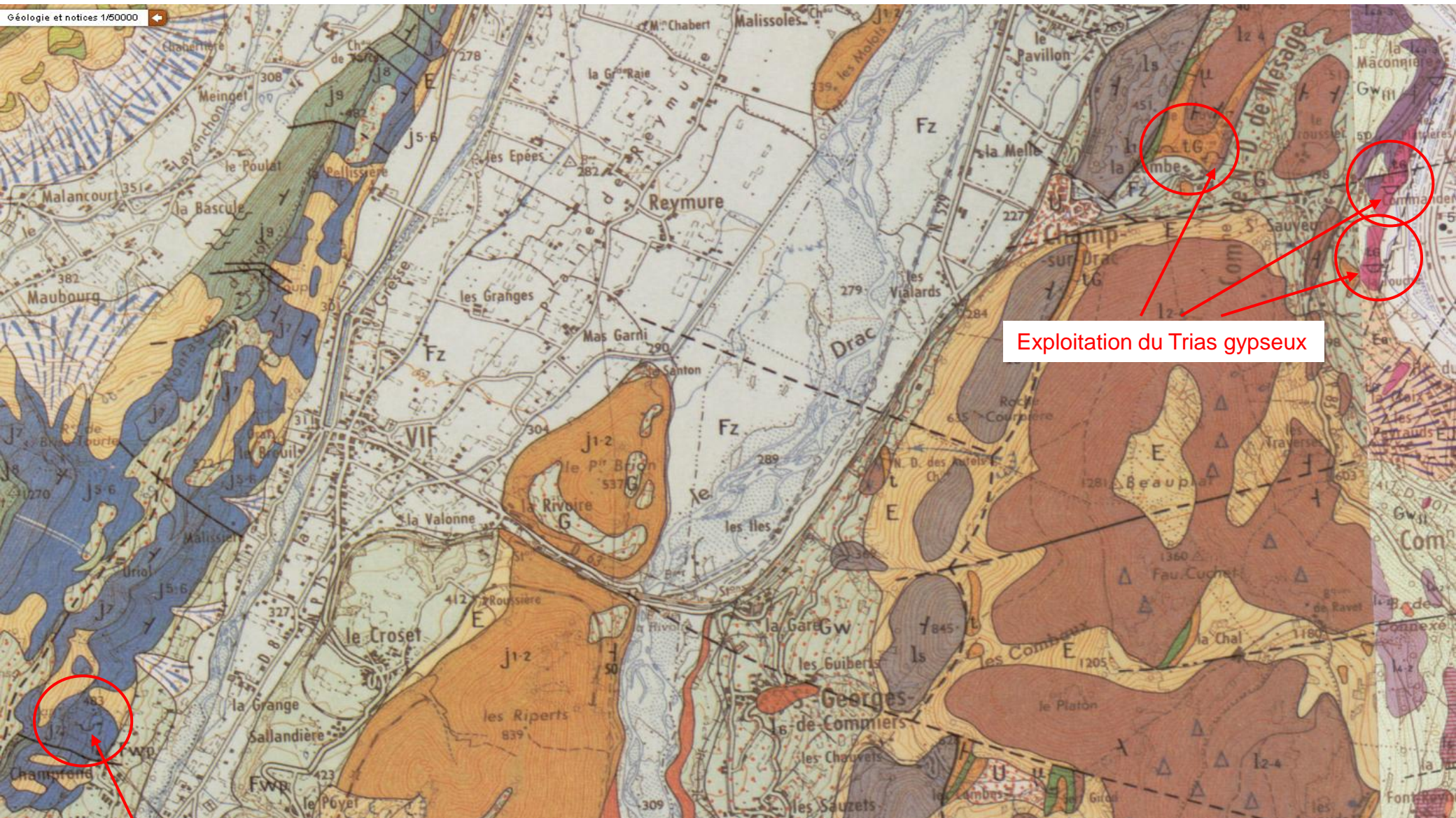
#### Jurassique supérieur marneux :



J5-6 – Marno-calcaires "argovo-rauraciens" (Oxfordien supérieur)  
 J4 – "Terres noires" (Oxfordien inférieur) : marnes noires  
 J2b3 – Calcschistes argileux noirs à Posidonomyes (Bathonien supérieur – Callovien)



# Couches exploitées en carrière souterraine (souterraine ou à ciel ouvert)



Exploitation du Trias gypseux

Pierre à ciment, Argovien-Rauracien



# Louis Vicat, inventeur du ciment moderne

C'est en **1812**, à l'occasion de la construction du pont de Souillac (Lot) que **Louis Vicat**, ingénieur des ponts et chaussées invente la "chaux hydraulique", mélange d'argile et de carbonate de chaux qui offre la grande propriété de faire prise sous l'eau en quelques jours.

Cette découverte va provoquer une véritable ruée vers la "pierre à ciment" et la région grenobloise offrant un calcaire argileux de bonne qualité, la nouvelle industrie va s'y implanter.

Dans la **vallée de la Gresse (au Sud de Grenoble)**, entre 1850 et 1860, on dénombre quatre grands centres d'exploitation; mais dans les années 1880 deux cimentiers prendront le pas sur leurs concurrents :

- Le premier, Joseph Vicat, est le fils du célèbre inventeur. Il a construit une première usine au Genevrey de Vif en 1857 pour la fabrication des ciments artificiels à prise lente (Portland) d'après les procédés indiqués par son père. En 1882, il fait bâtir, au même endroit, une nouvelle usine qui permet la double cuisson.
- Le Second, Anatole Berthelot, vient cette même année 1882 s'installer au Champa (commune du Gua), tout près de la carrière souterraine dont il est l'exploitant depuis douze ans.

Source : <http://mairie-de-le-gua.pagesperso-orange.fr/histoire.html>

Voir aussi : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment#Historique>