

STABILITE DES CAVITES SOUTERRAINES

1: Introduction

2: Contraintes et déformations élastiques autour des cavités

3: Cavités dans un milieu élasto-plastique

4: Déformations différées

5: Cavités dans un milieu stratifié

6: Cavités dans un milieu découpé en blocs

STABILITE DES CAVITES SOUTERRAINES

INTRODUCTION

1. DESCRIPTION DES CAVITES
2. DESCRIPTION DES DEFORMATIONS ET DES MECANISMES DE RUPTURE DES CAVITES
3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE
4. CONCEPTION DES CAVITES

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 (CaCO_3) : 0,2 g/l

• gypse (CaSO_4) : 2 g/l

• chlorure de sodium (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

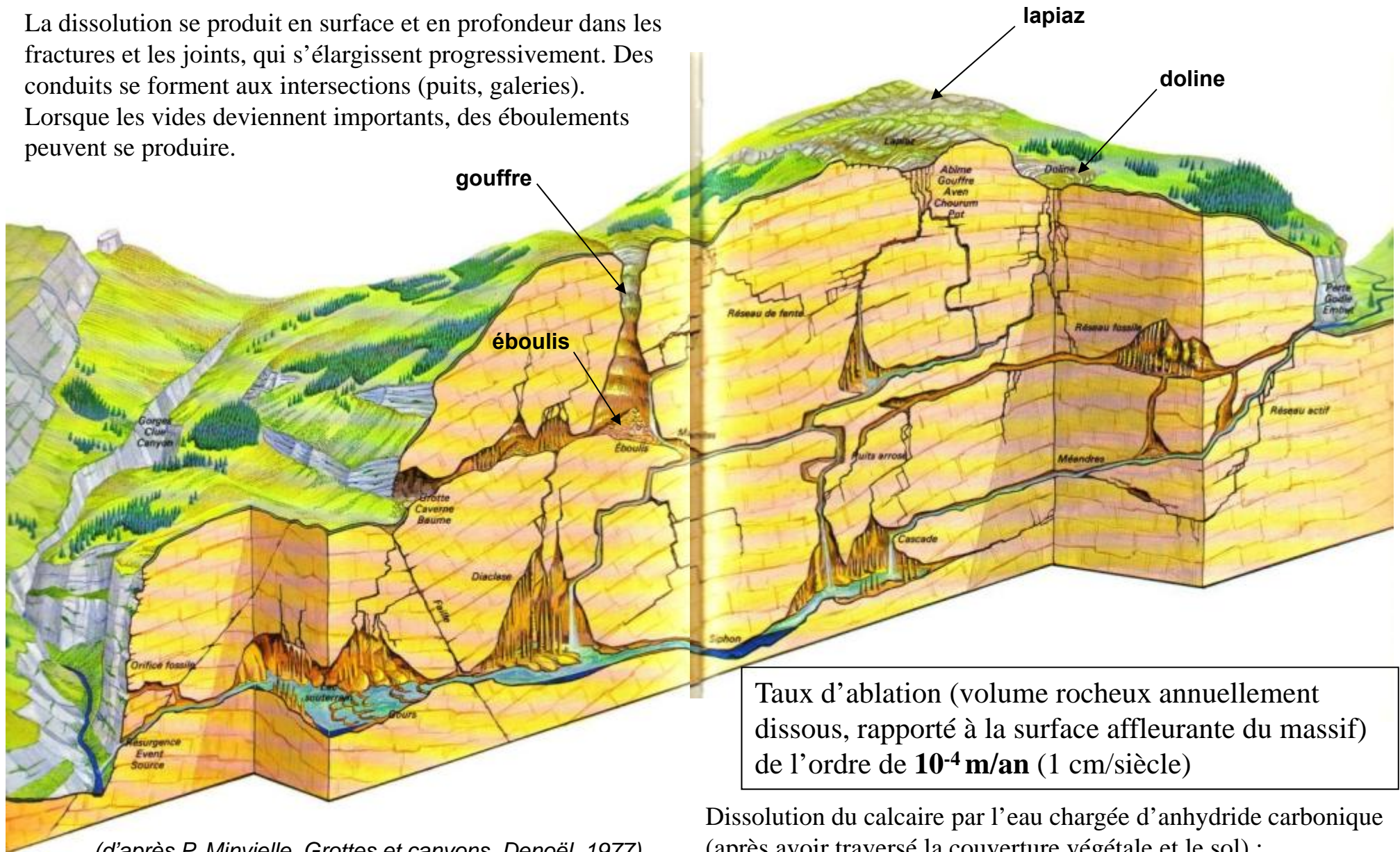
Ablation de **plusieurs mm par an** pour une couche de gypse baignée par une retenue

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



Modelé 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.



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

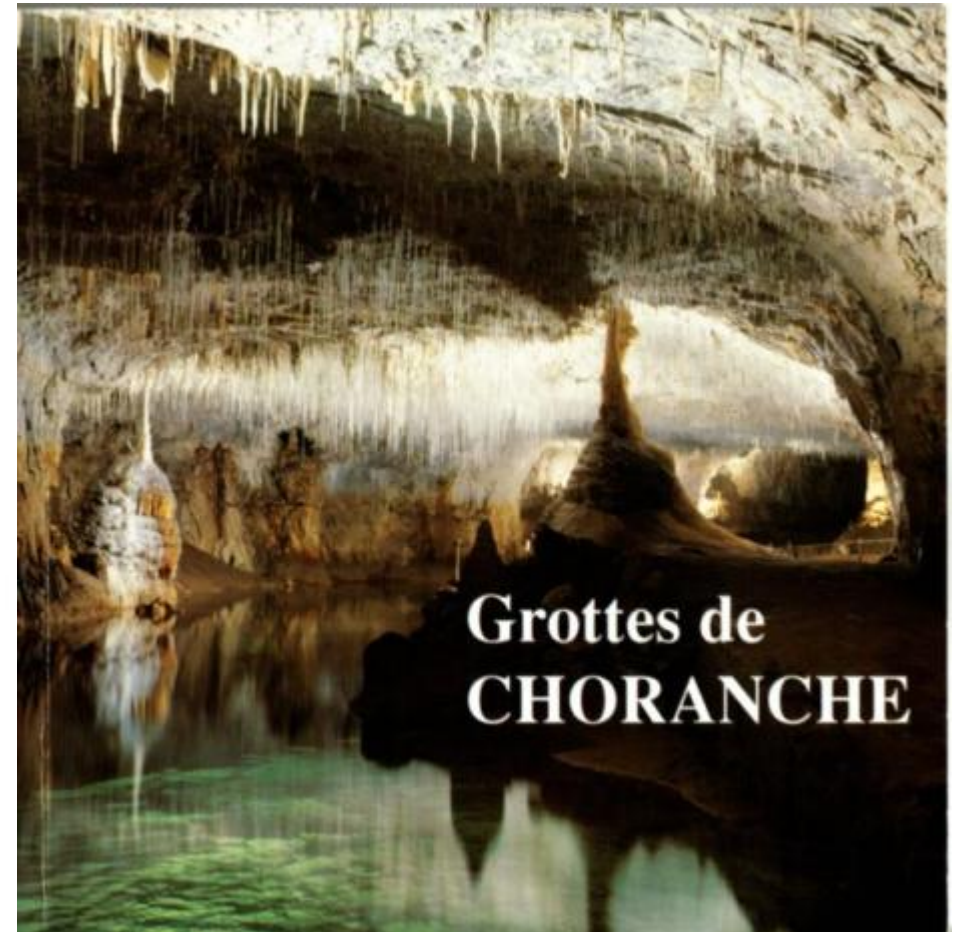
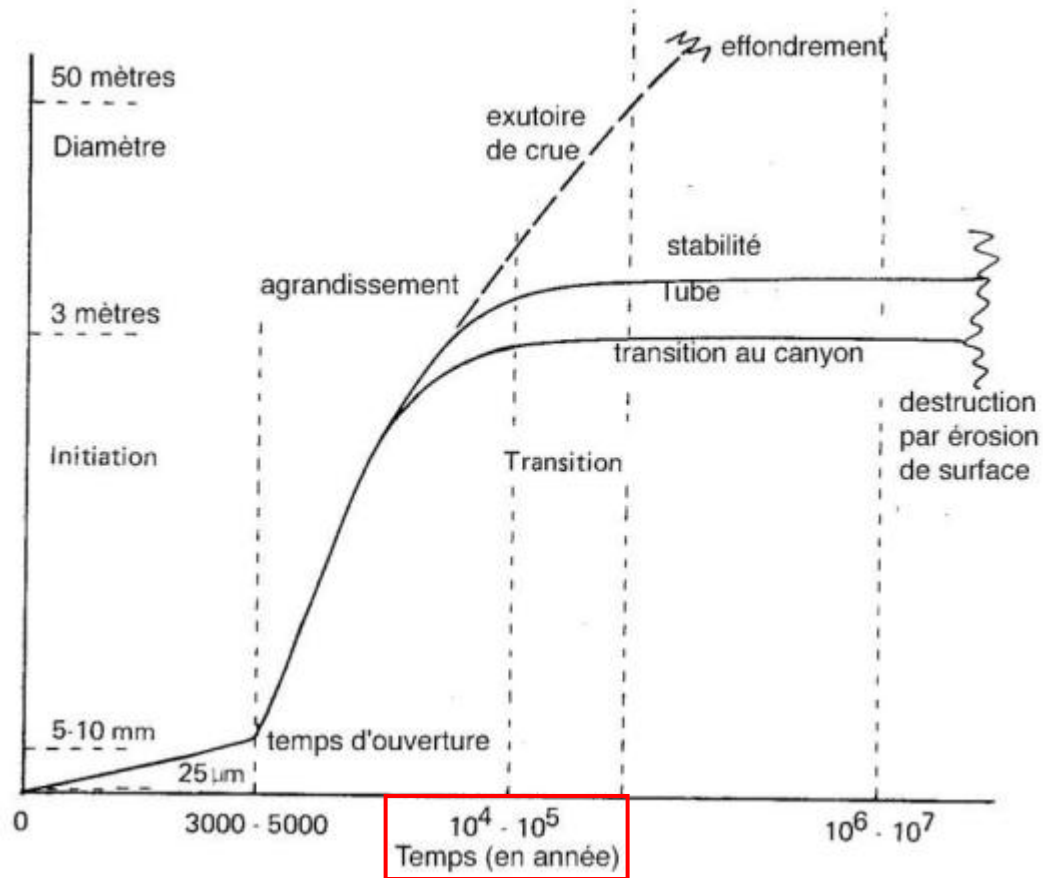
Taux d'ablation (volume rocheux annuellement dissous, rapporté à la surface affleurante du massif) de l'ordre de **10^{-4} m/an** (1 cm/siècle)

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

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

DISSOLUTION DU CALCAIRE

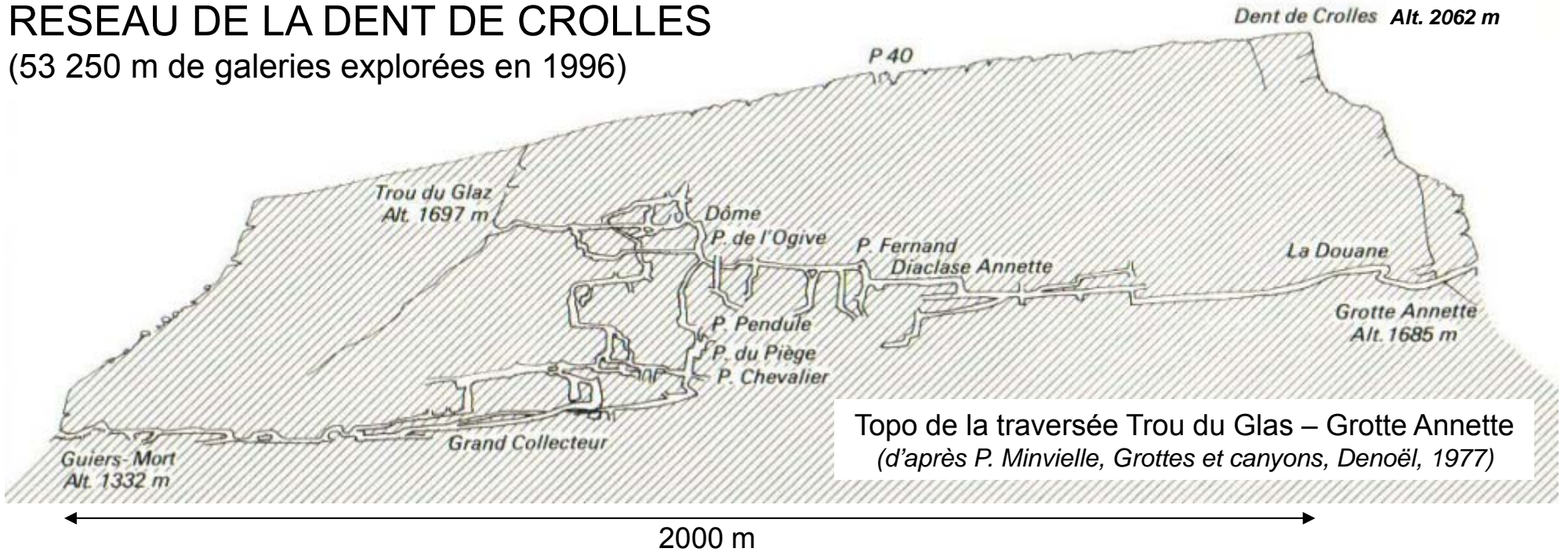
Temps de formation des conduits karstiques dans le calcaire (d'après White)



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

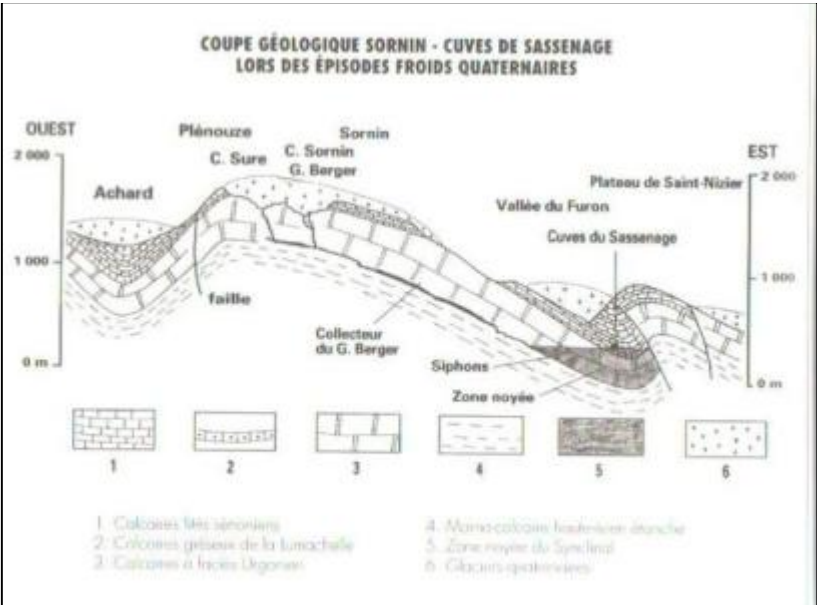
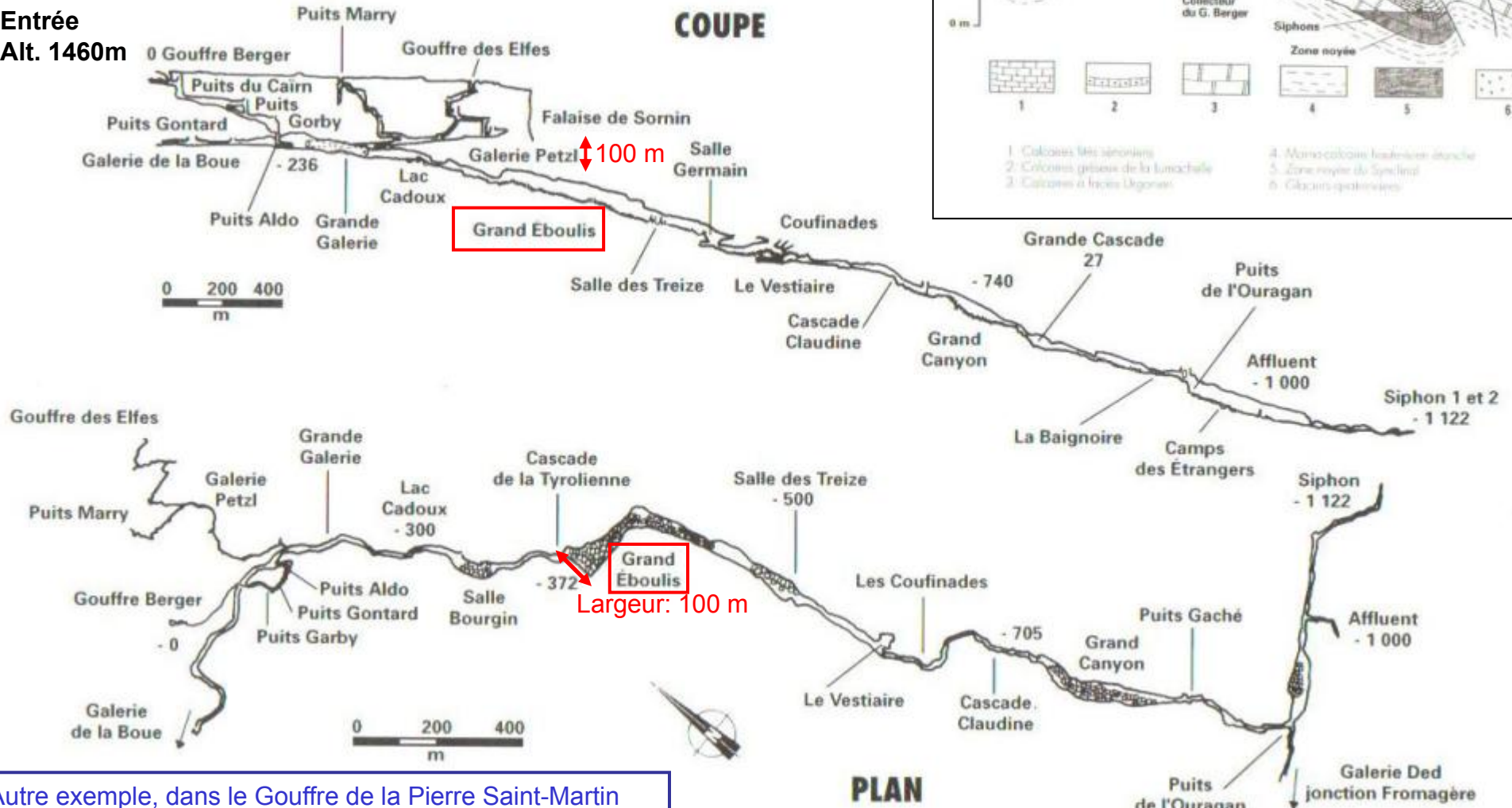


cliché M.GIDON

EXEMPLES DE GRANDES CAVITES KARSTIQUES

Gouffre Berger (Engins, massif du Vercors)

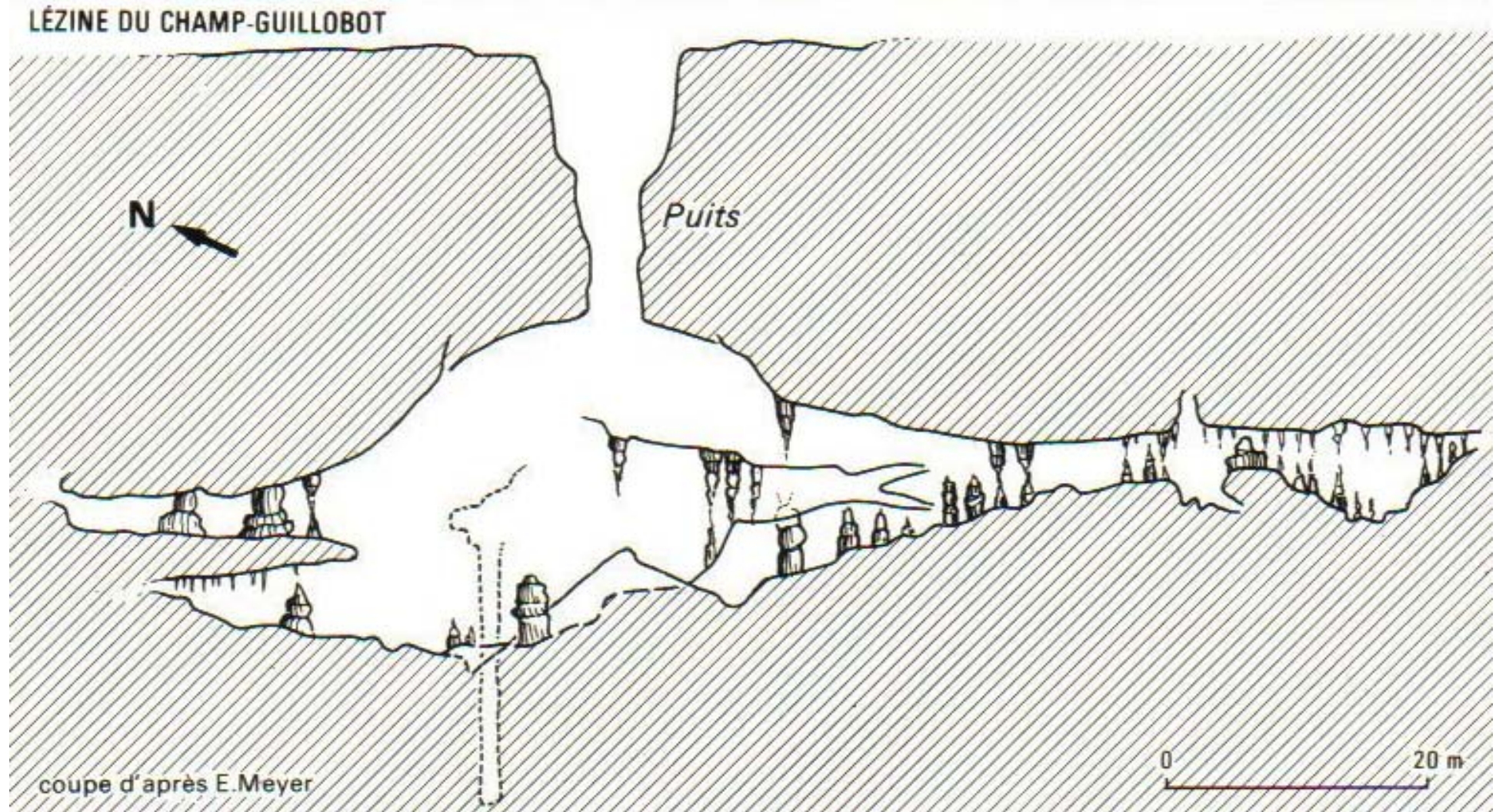
Entrée
Alt. 1460m



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)



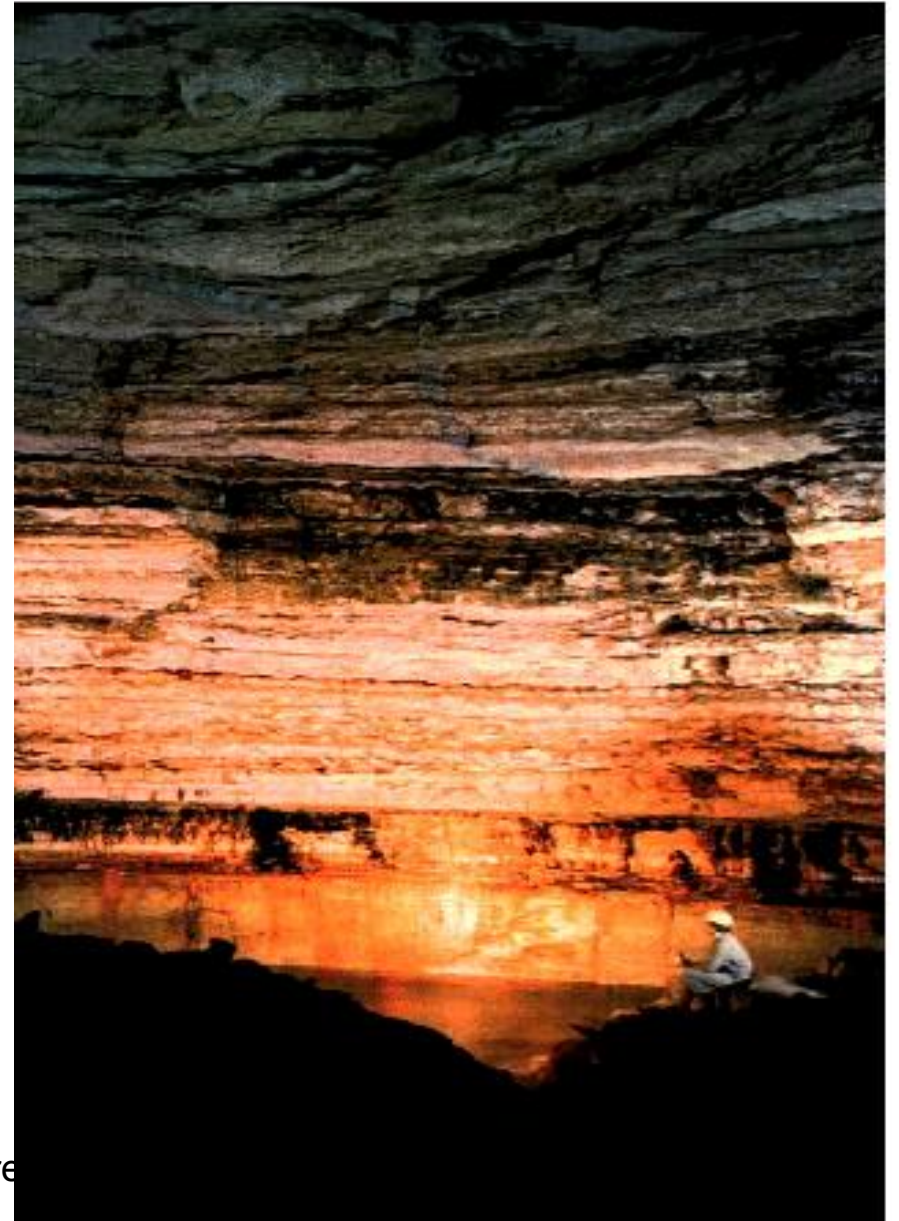
DISSOLUTION DU GYPSE

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 m³), 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 m³ de vides en un siècle.



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**.

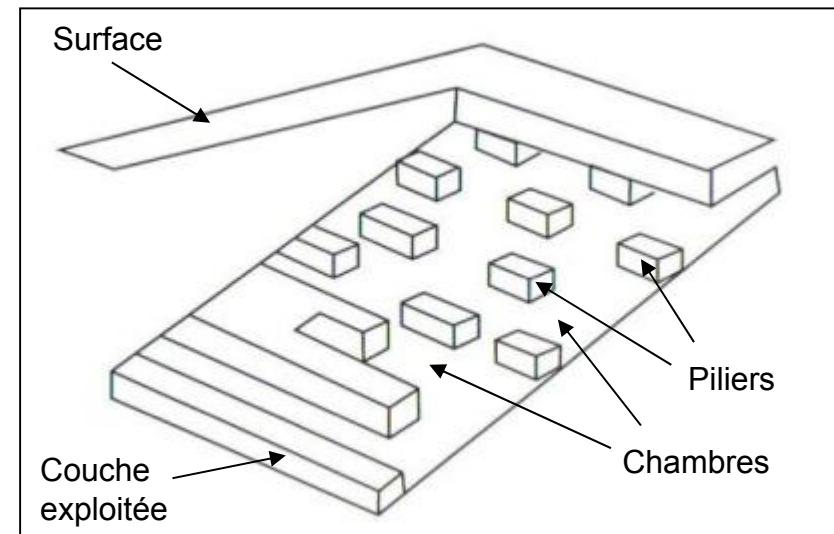
Le terme de carrière est parfois utilisé pour désigner toute exploitation à ciel ouvert.



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.

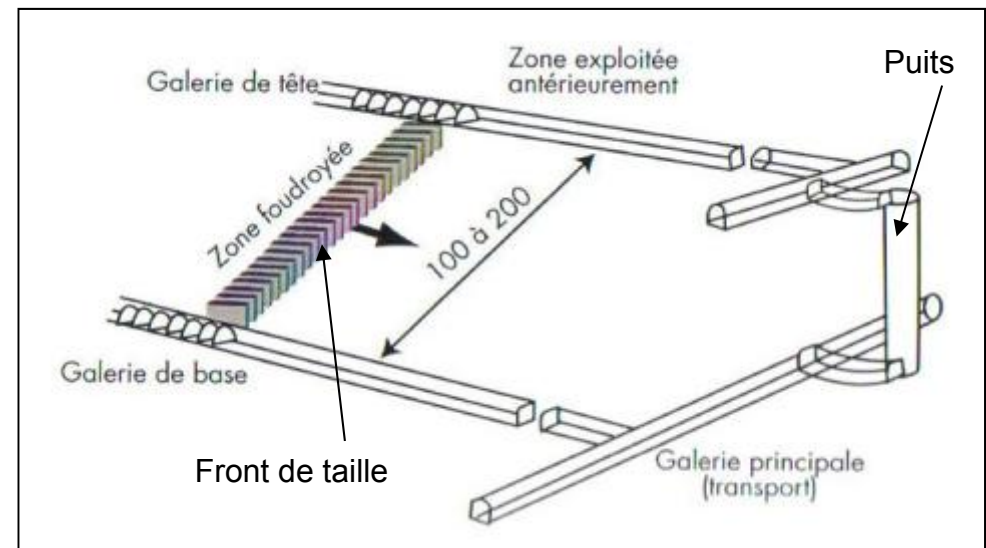


(extrait du Manuel de mécanique des roches, CFMR, Ecole des Mines de Paris)

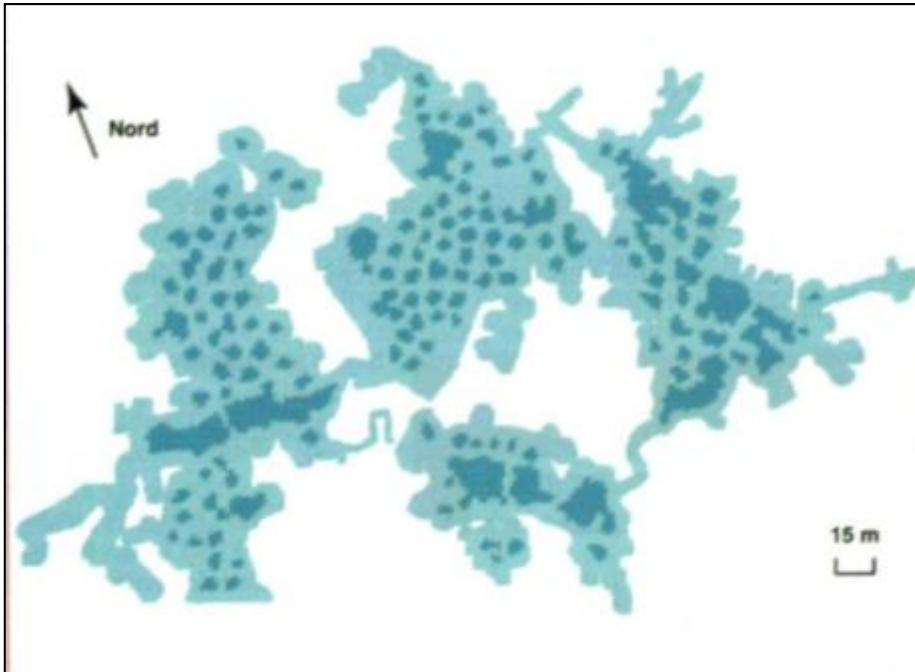
Méthodes d'exploitation totale : **foudroyage ou remblayage**

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

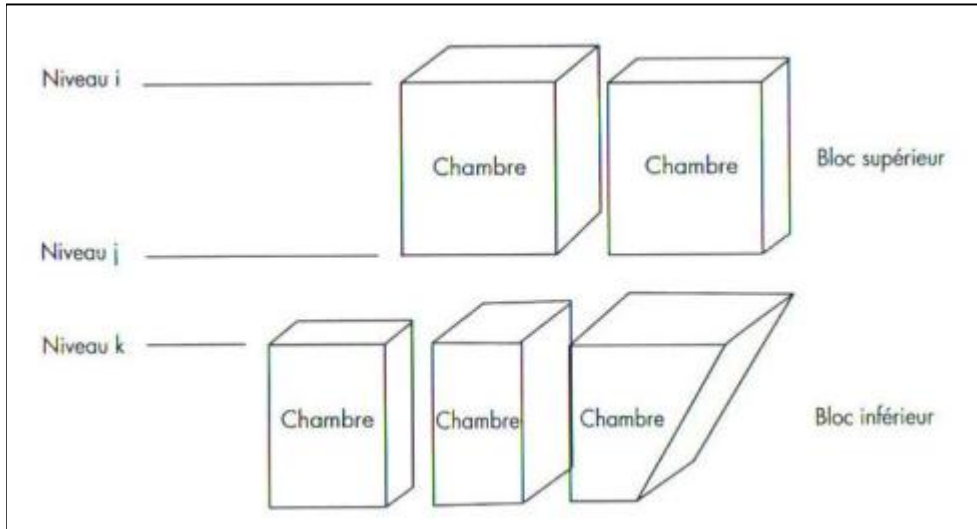


Exploitation par chambres et piliers irréguliers (carrière de gypse de Roquevaire, Bouches-du-Rhône). Piliers en foncé, partie exploitée en plus clair.
(*extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC*)



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

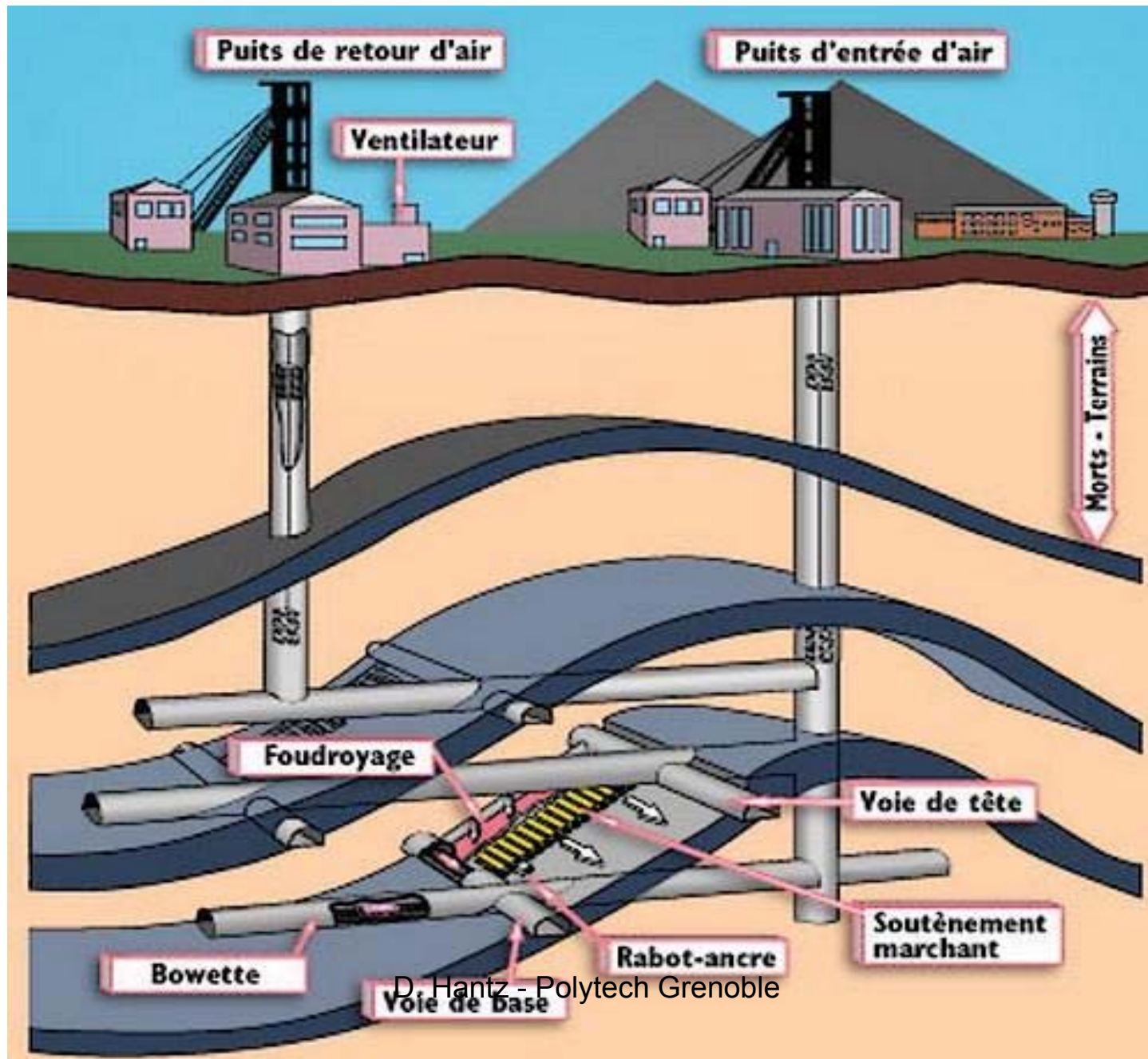


Chambres dans un filon ou une couche verticale.
(*extrait du Manuel de mécanique des roches, CFMR, Ecole des Mines de Paris*)

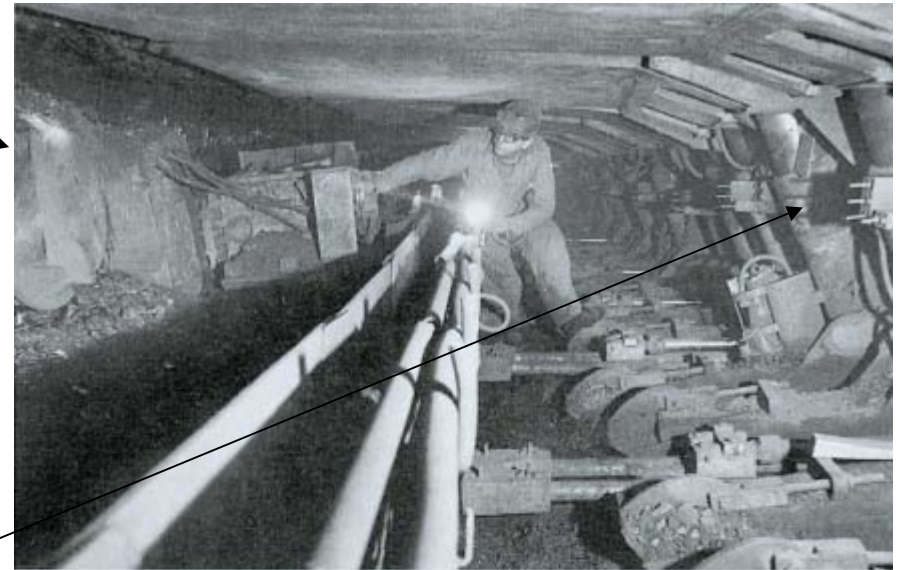
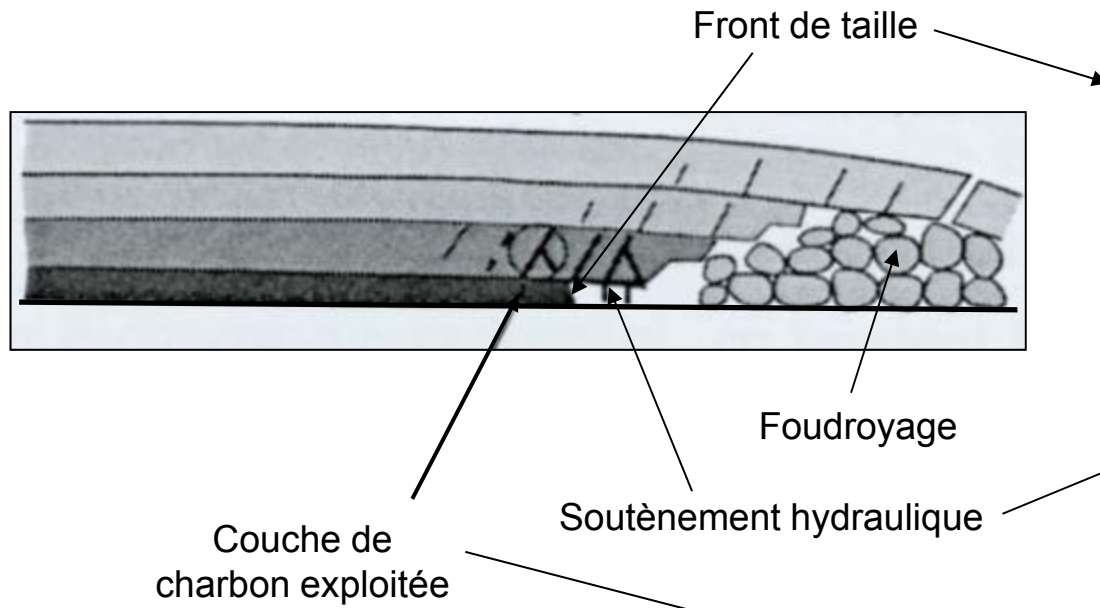


Chambre d'exploitation dans une ardoisière d'Anjou, exploitée par la méthode descendante.
(*extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC*)

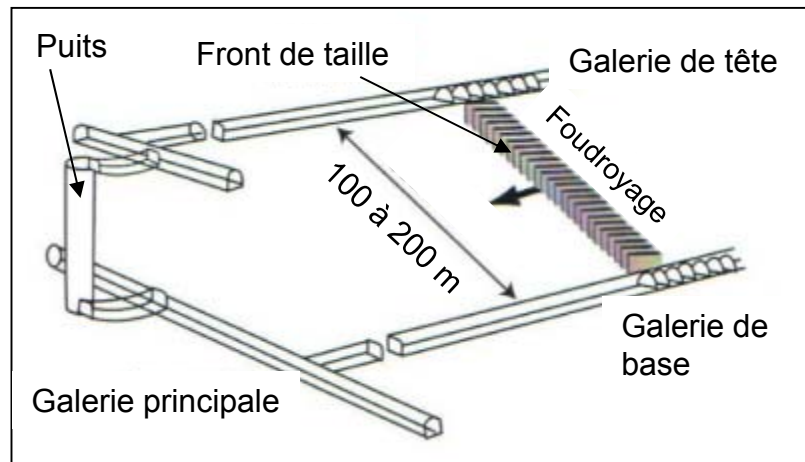
EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE



EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE



(a) Photos K. Bentham / B. Gallant, CANMET



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

2.2. REPORT DE CHARGE ET RUPTURE EN COMPRESSION

2.3. RUPTURE DU TOIT EN FLEXION

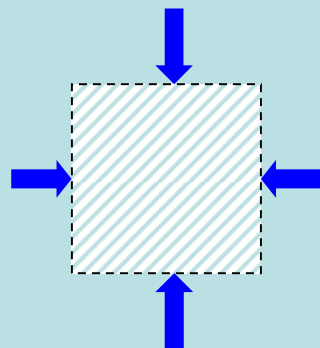
2.4. CHUTES DE BLOCS PREDECOUPES

2.5. EVOLUTIONS POSSIBLES DES CAVITES

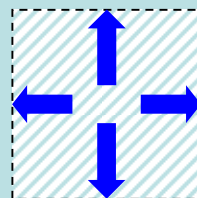
CONVERGENCE DUE A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU

Surface

ETAT INITIAL SANS CAVITE

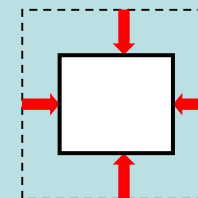


Contraintes exercées par le terrain sur un volume rocheux (dues au poids du terrain et aux forces tectoniques)



Contraintes exercées par le volume rocheux sur le terrain environnant

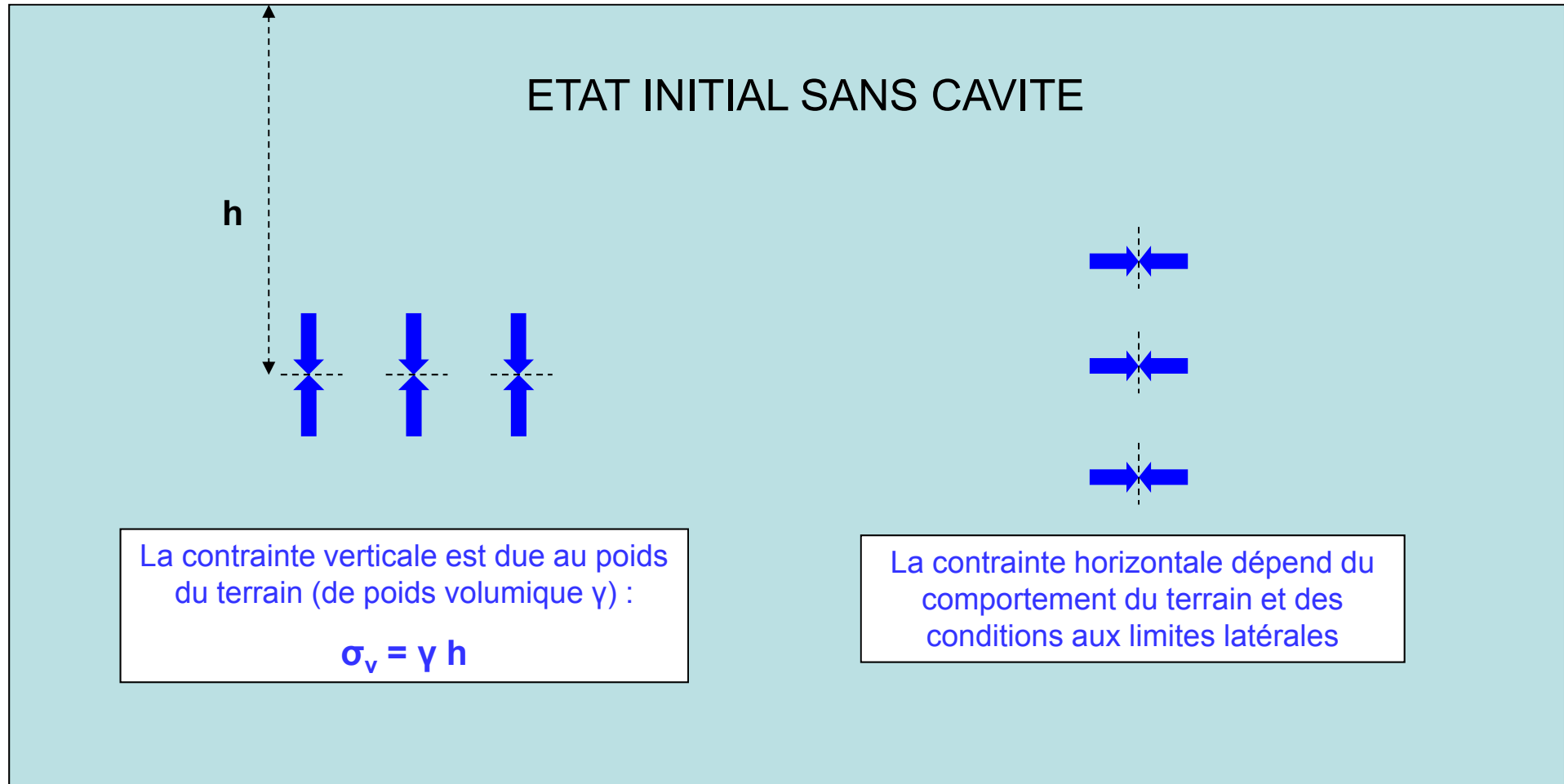
APPARITION DE LA CAVITE



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

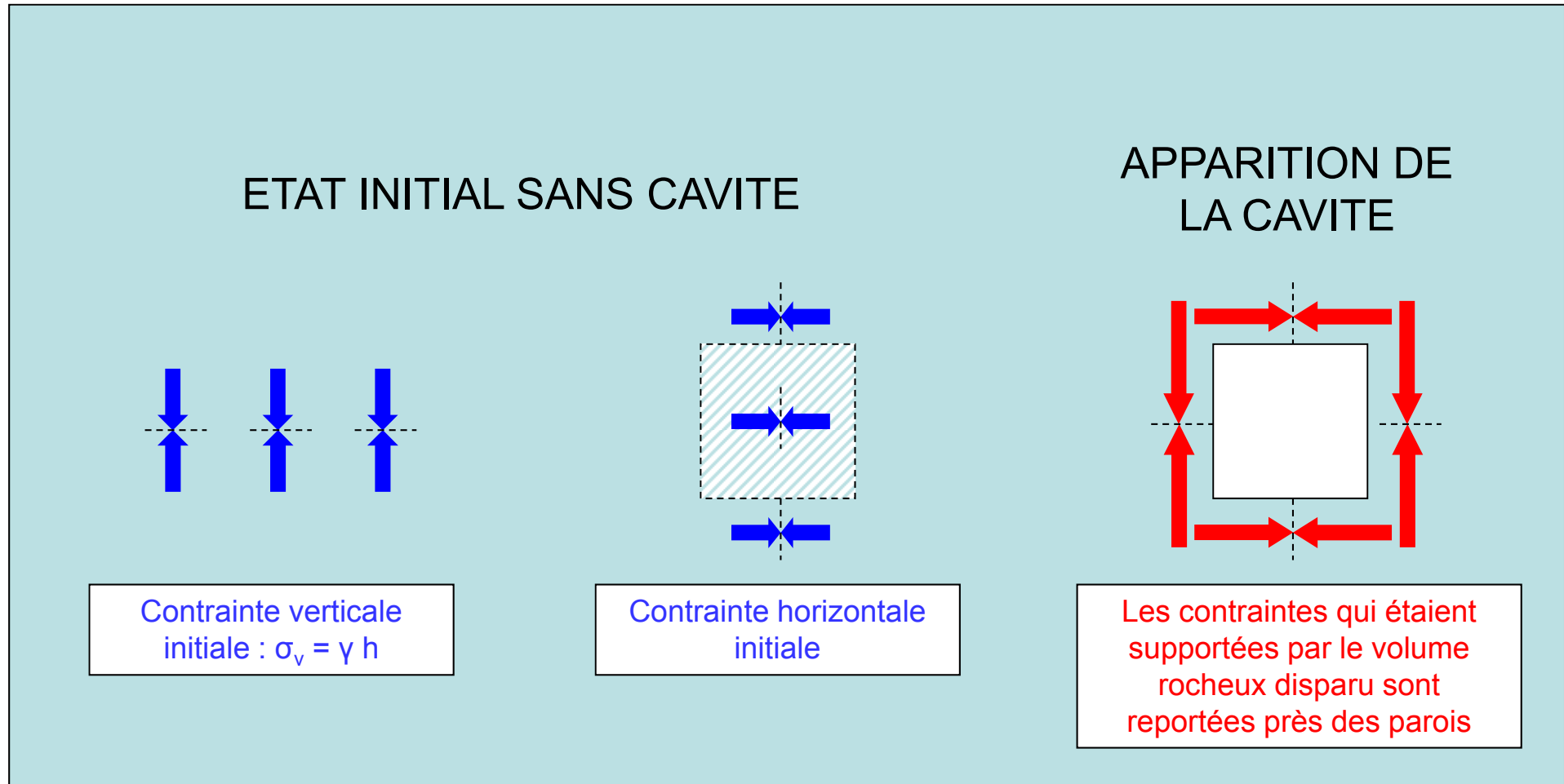
REPORT DE CHARGE DU A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU

Surface



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

Surface

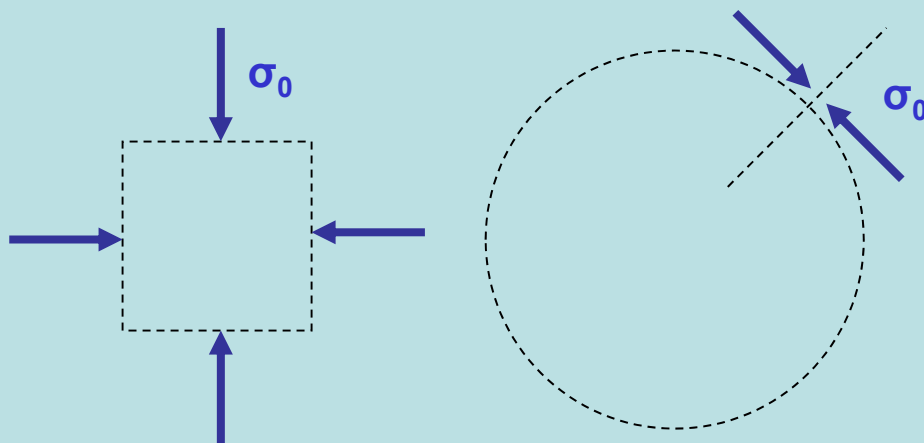


Remarque : pour une galerie circulaire, avec un état de contrainte initial hydrostatique, la contrainte parallèle à la paroi est le double de la contrainte régnant initialement dans le terrain;

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

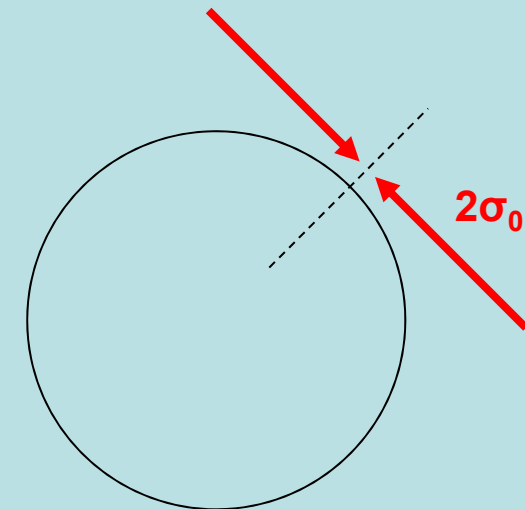
ETAT INITIAL SANS CAVITE

Etat de contrainte hydrostatique
(sur n'importe quelle facette, s'exerce une contrainte normale et de même valeur σ_0)

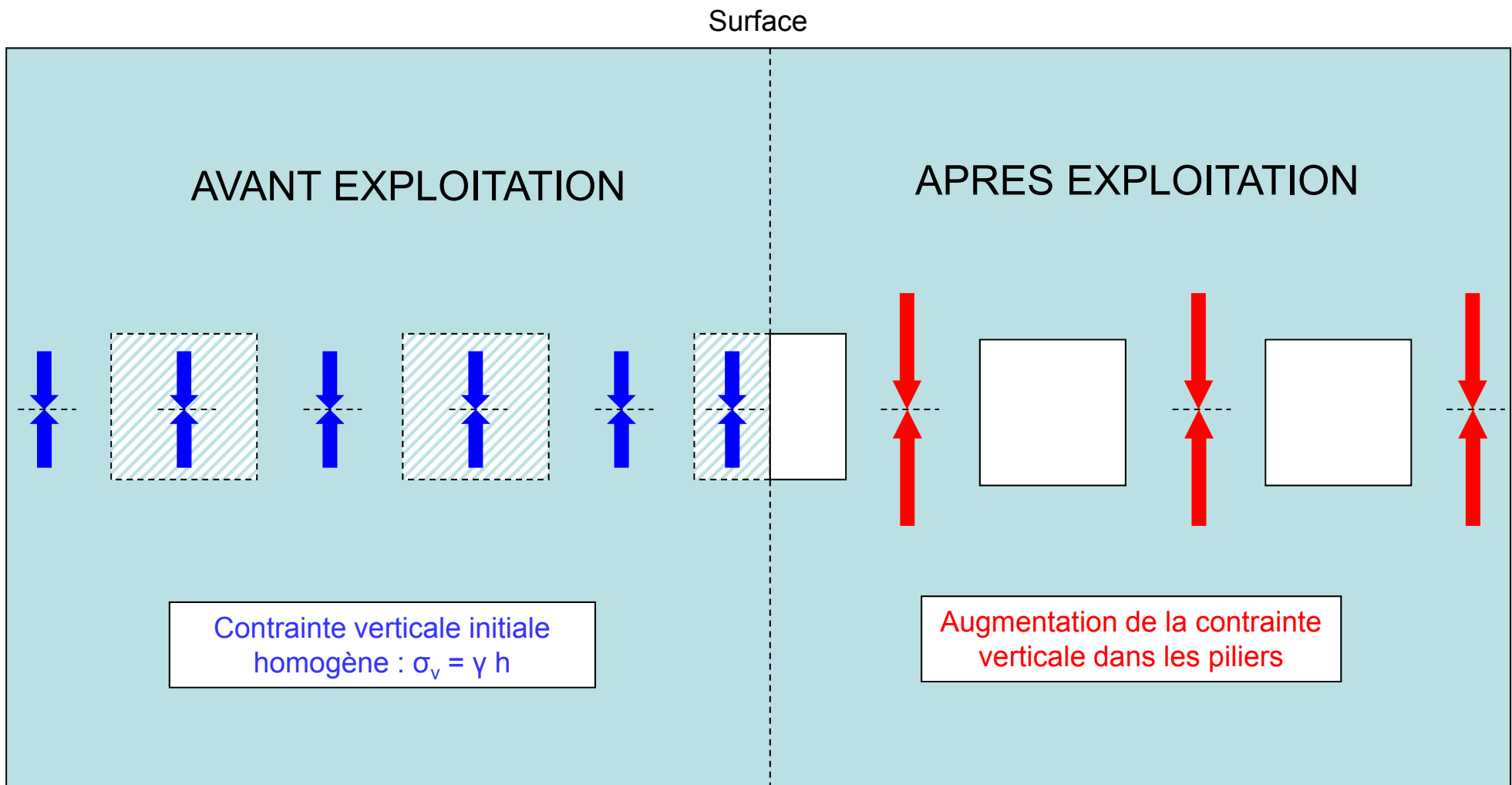


APPARITION DE LA CAVITE

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

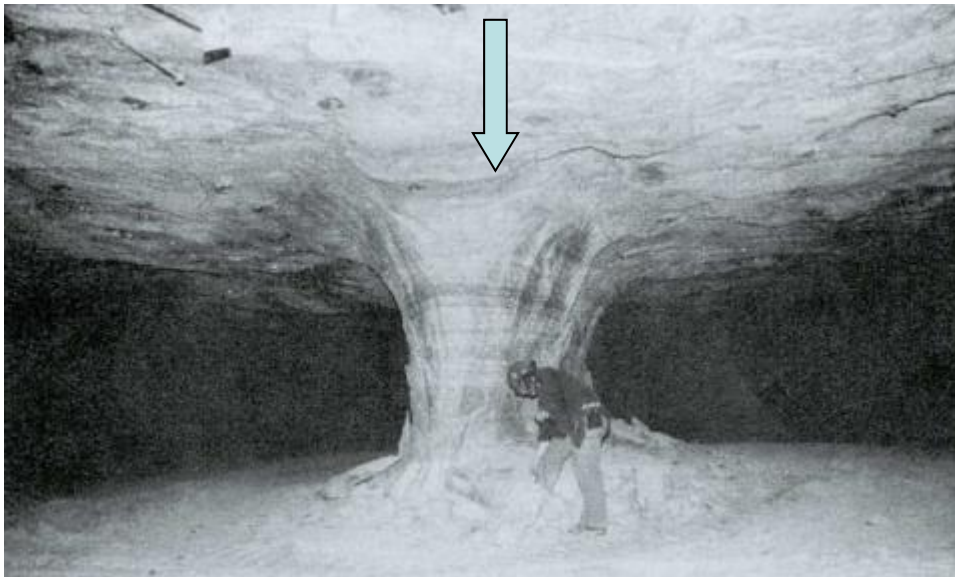


Force exercée sur l'ensemble de la surface exploitée : $\gamma h S_{\text{totale}} = \sigma_p S_{\text{piliers}}$

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

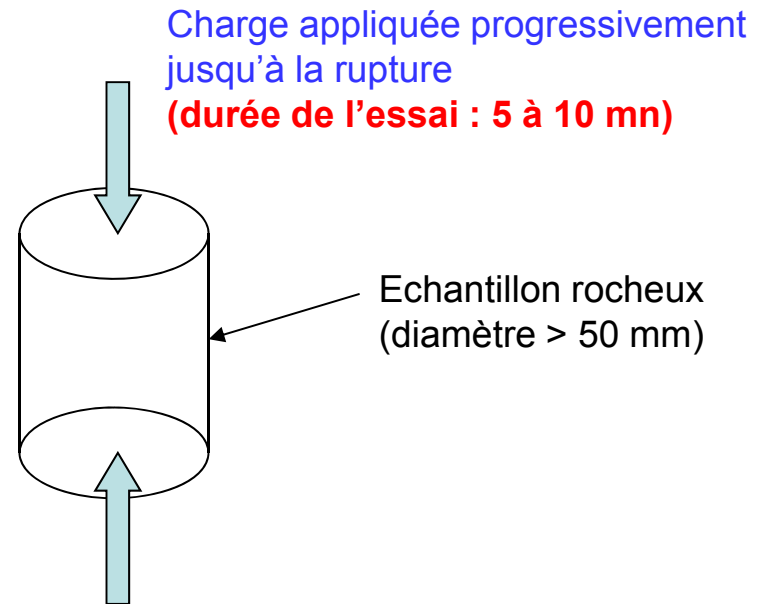
RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

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)

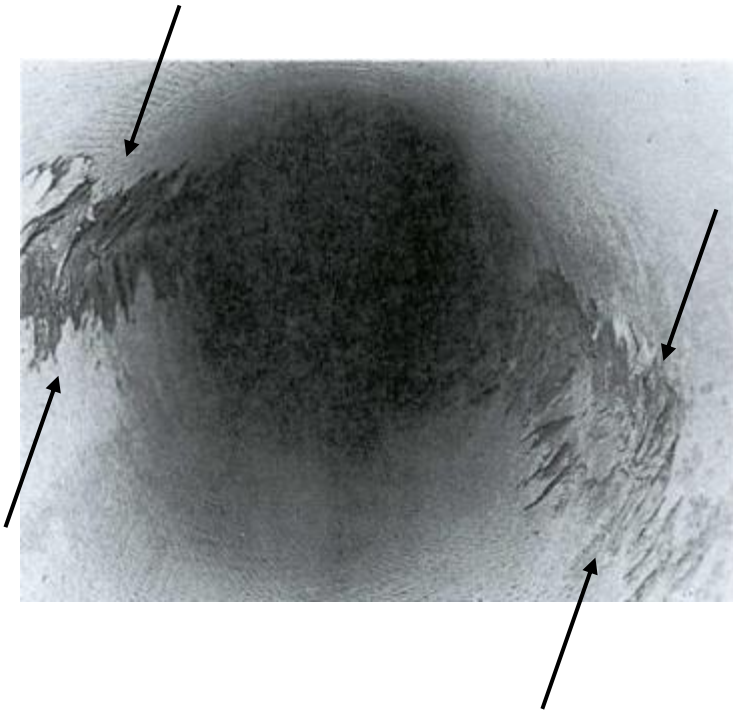
Cette résistance peut être déterminée en laboratoire en soumettant un échantillon de roche à un état de contrainte uniaxial (essai de compression uniaxiale).



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

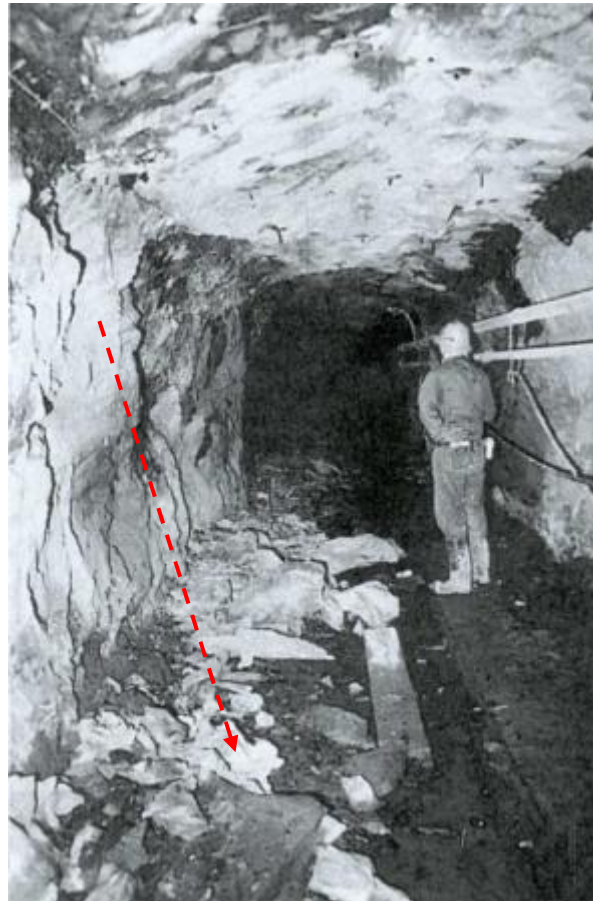
RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

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

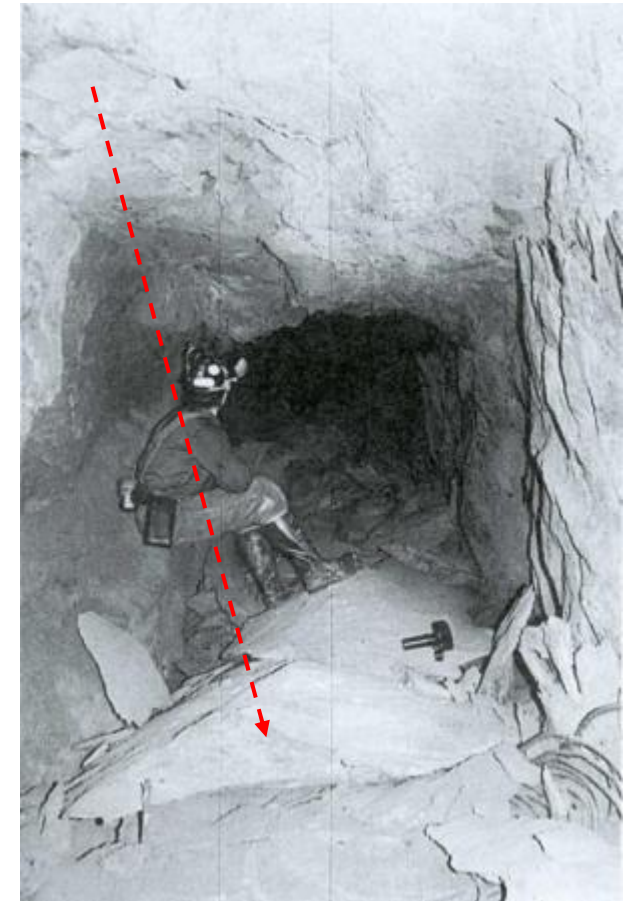


Ecaillage à la paroi d'un forage. Les flèches représentent la direction de compression maximale.

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



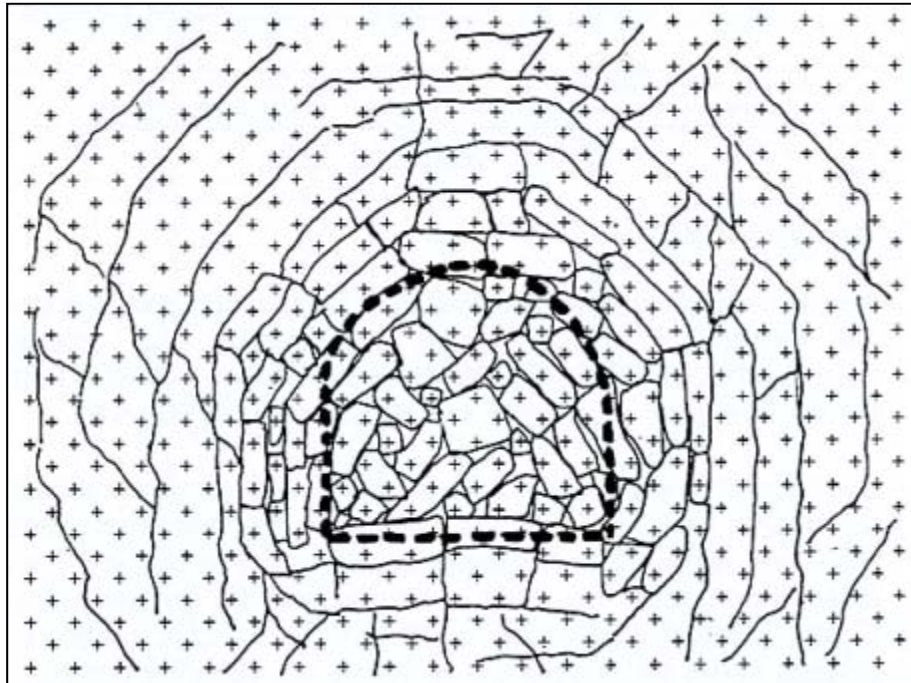
Ecaillage à la paroi d'une galerie dans de la quartzite à 1500 m de profondeur. L'excès de contrainte est dû à une chambre à gauche de la photo.



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.

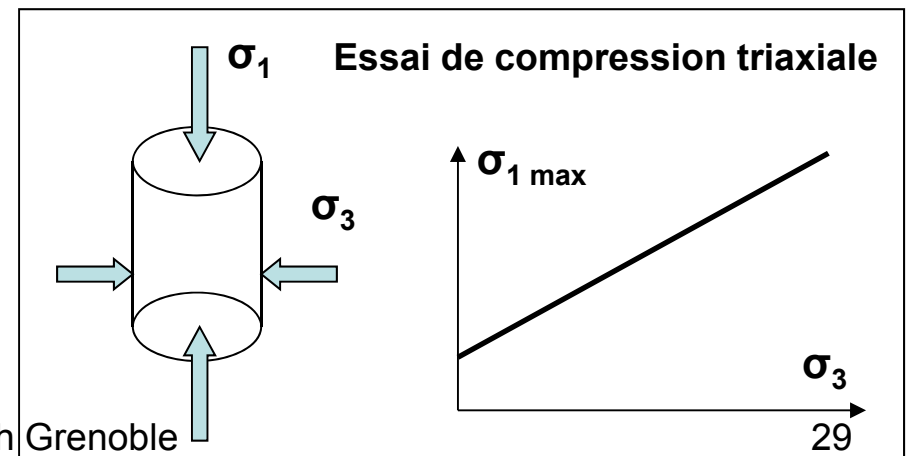


(extrait de Fine, le soutènement des galeries minières, Armines, 1993)

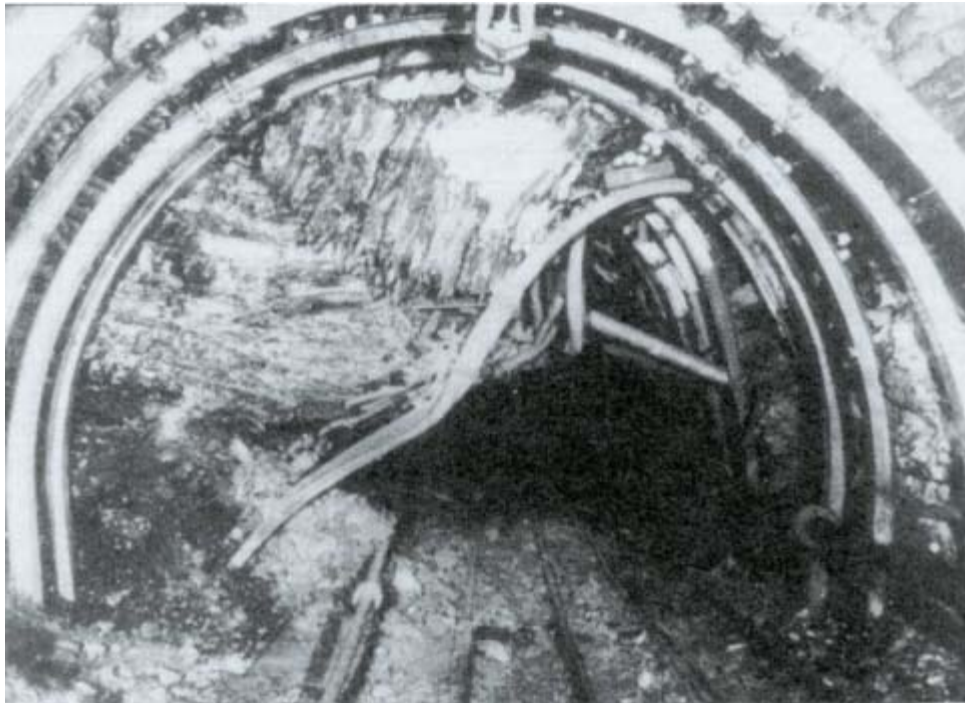
Une pression de confinement (σ_3) permet de limiter la zone en rupture et la convergence. Sur la photo à droite, cette pression est apportée par des boulons. La convergence verticale est tout de même de plus de 2 m.



(photo Mount Isa Mines)



RUPTURE PAR FLAMBAGE DANS UN MASSIF STRATIFIE



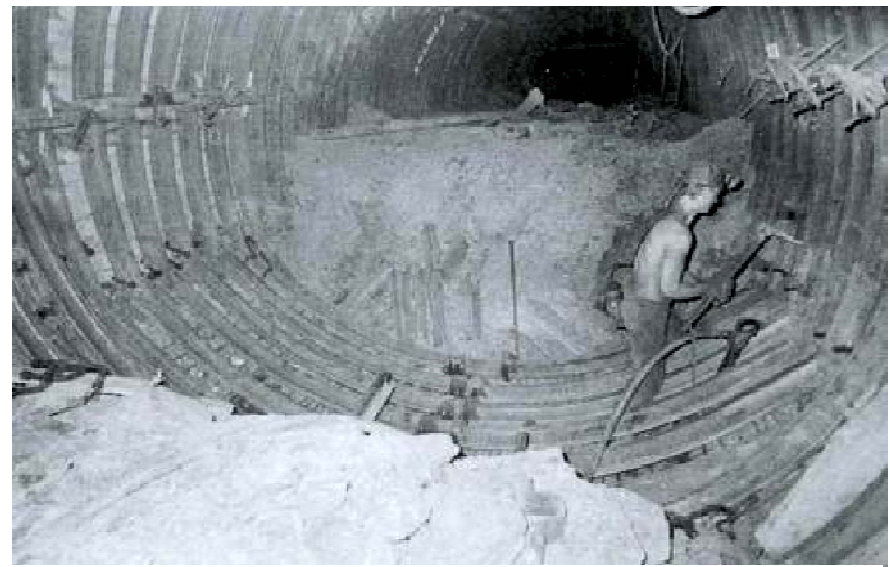
Remise à section d'une galerie minière affectée par le flambage des lits schisteux (*Revue de l'industrie minière*).

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

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

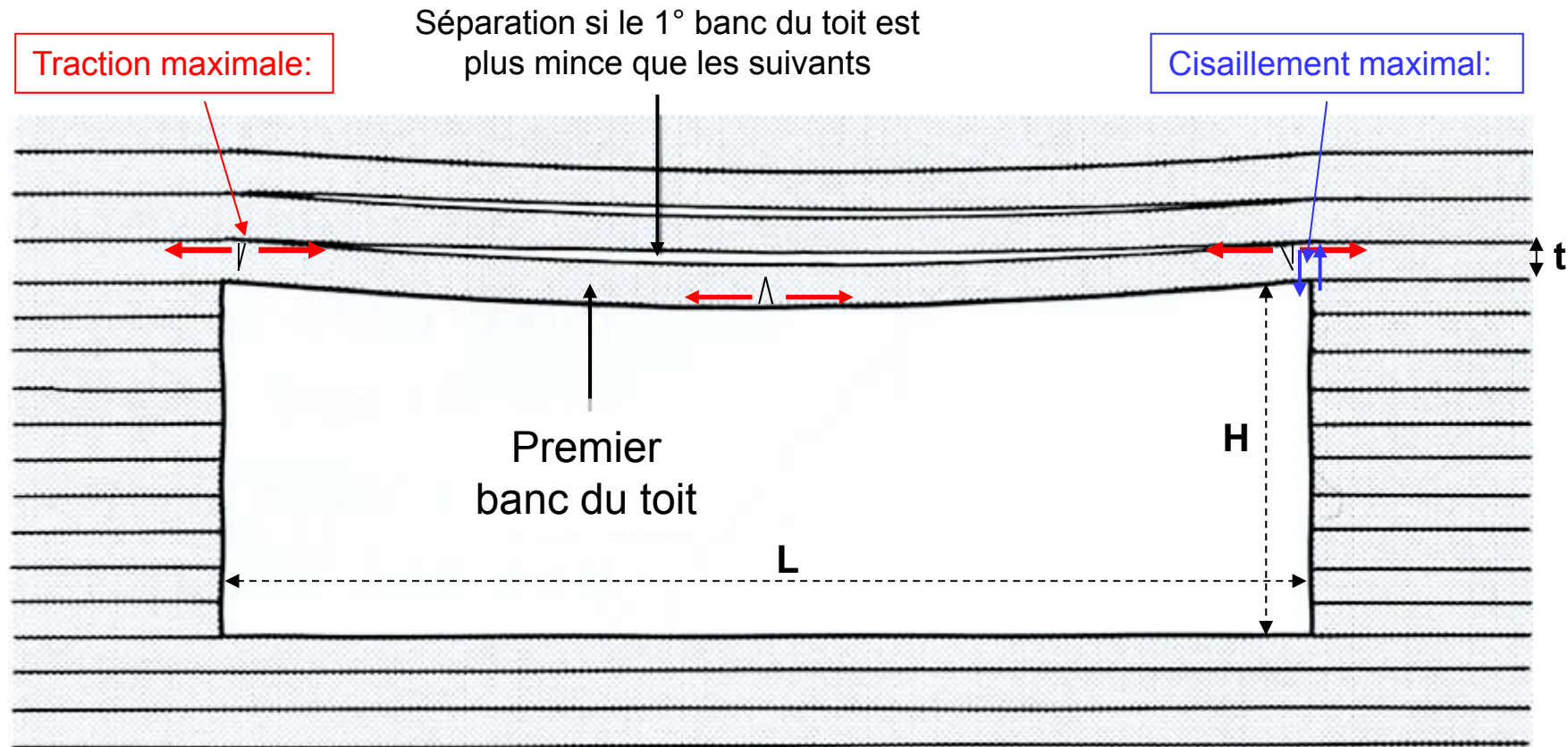
2012

D. Hantz - Polytech



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*)

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.

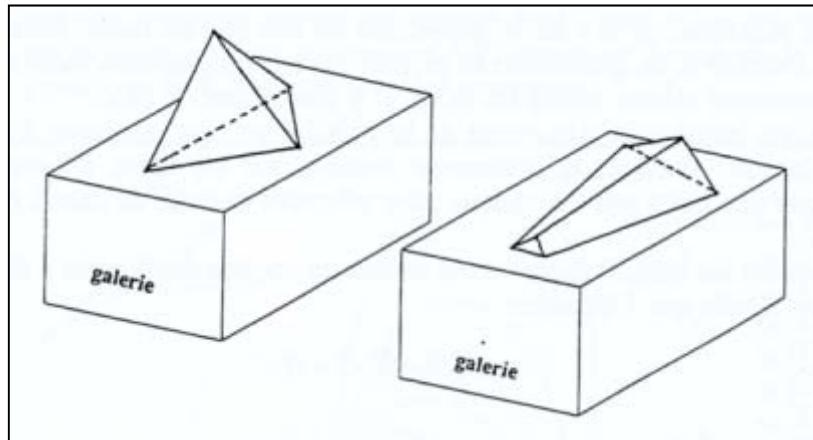
RUPTURE DU TOIT PAR FLEXION EN TERRAIN STRATIFIE HORIZONTALEMENT



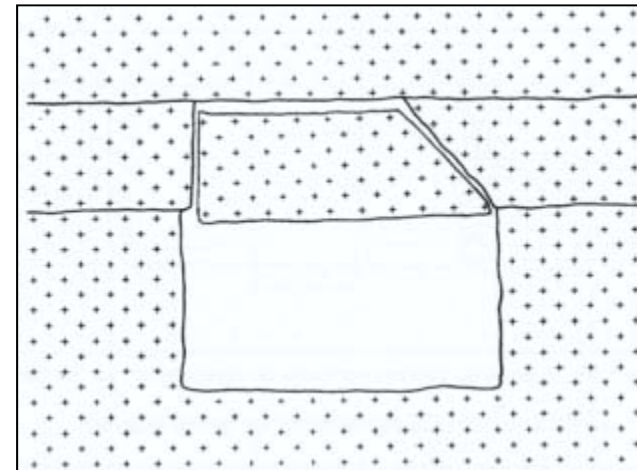
2012 Chute de toit dans une carrière de gypse triasique du Jura. Les étais en bois soutiennent difficilement la dalle de toit. (extrait de *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, INERIS, LCPC).

CHUTE DE BLOCS PREDECOURPES

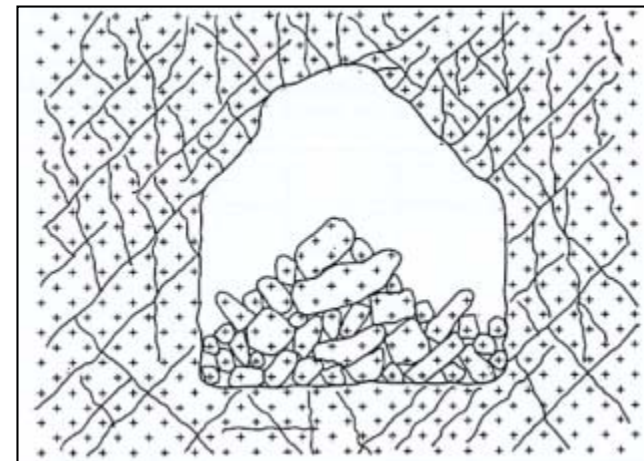
Ce type de rupture peut se produire lorsque les **discontinuités** (ou **joints**) du massif rocheux prédecoupent des blocs pouvant se détacher du toit ou des parois. L'identification de ces blocs a priori nécessite une étude de la **structure** du massif rocheux (orientation, étendue, espacement, morphologie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



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



Forme usuelle de bloc dans des bancs subhorizontaux



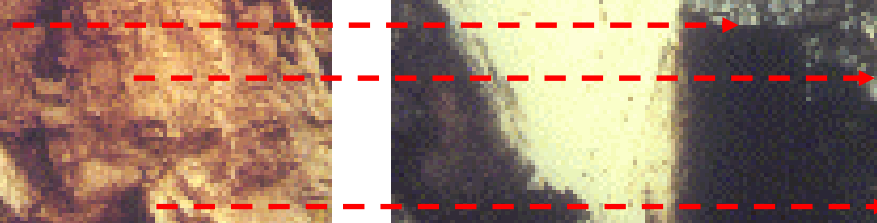
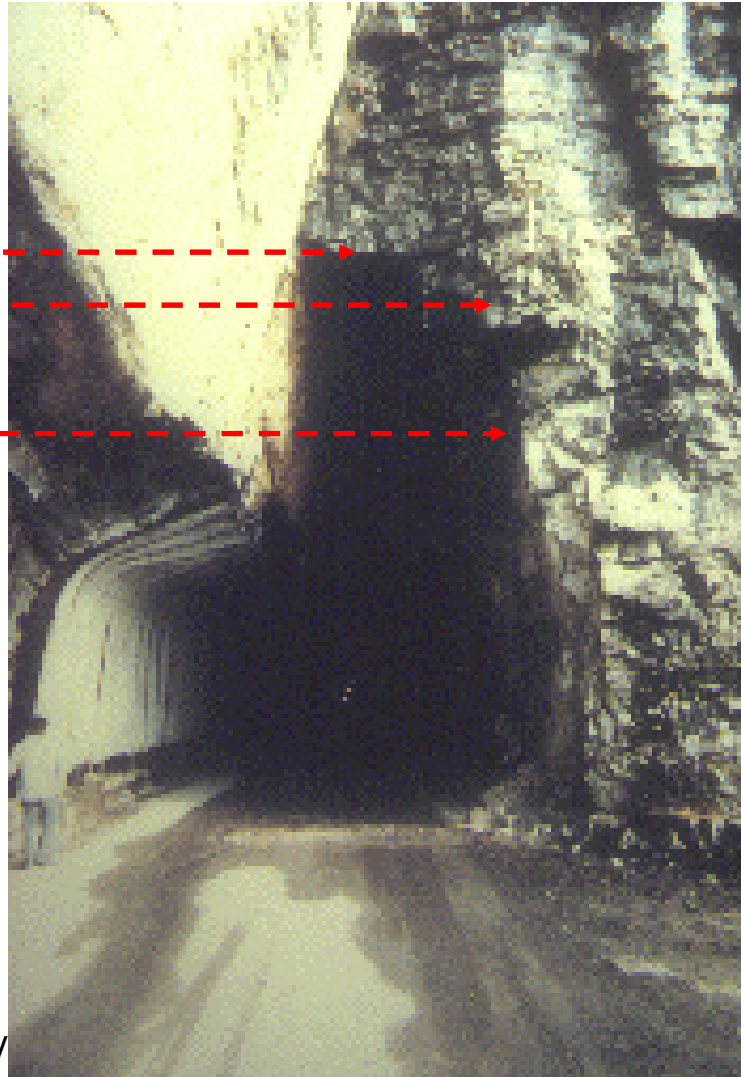
Eboulement dans un massif intensément fracturé

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

CHUTE DE BLOCS PREDECOUPEES



CHUTE DE BLOCS PREDECOUPEES



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

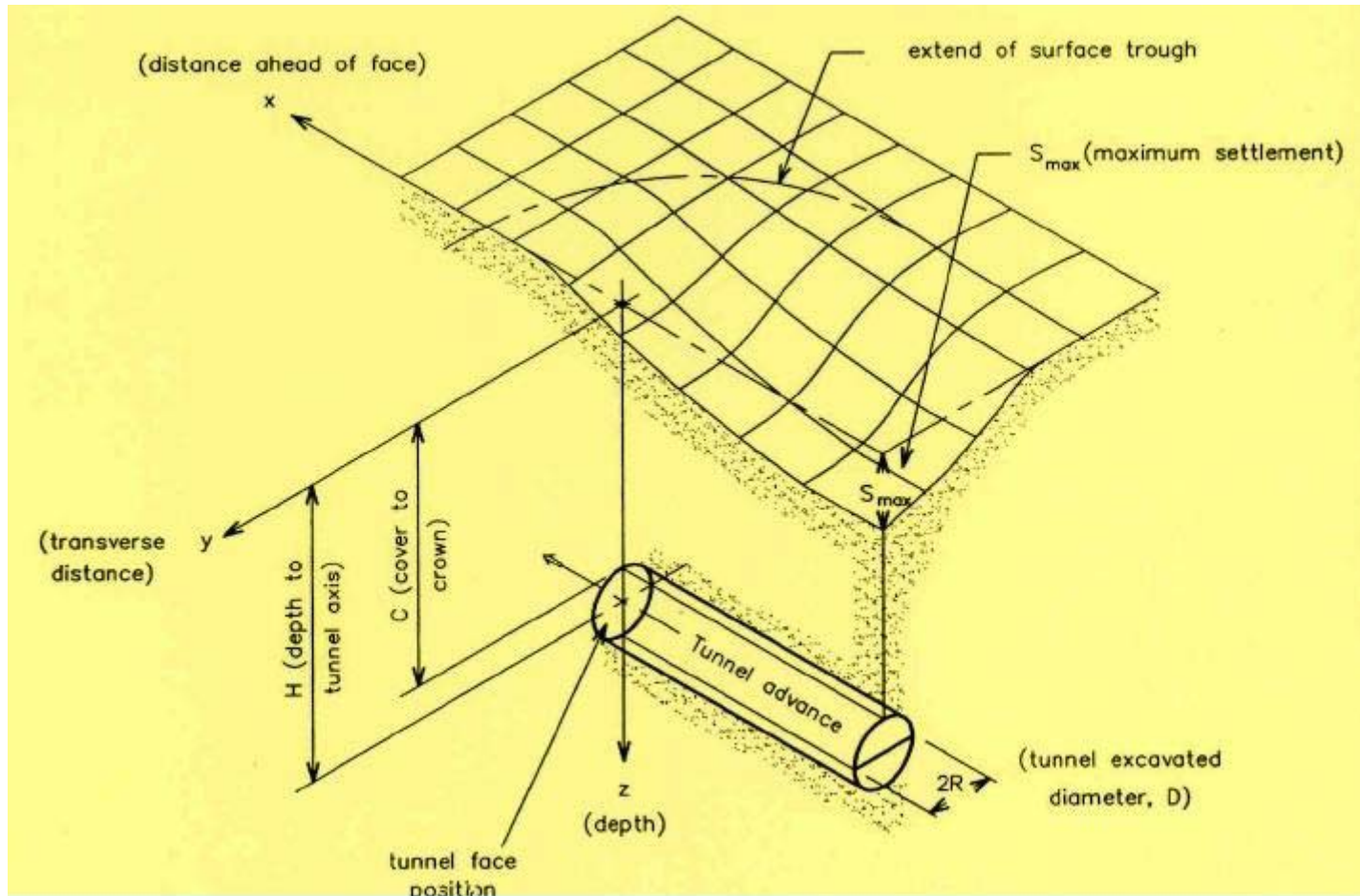
3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE

3.1. TASSEMENTS

3.2. EFFRONDREMENTS

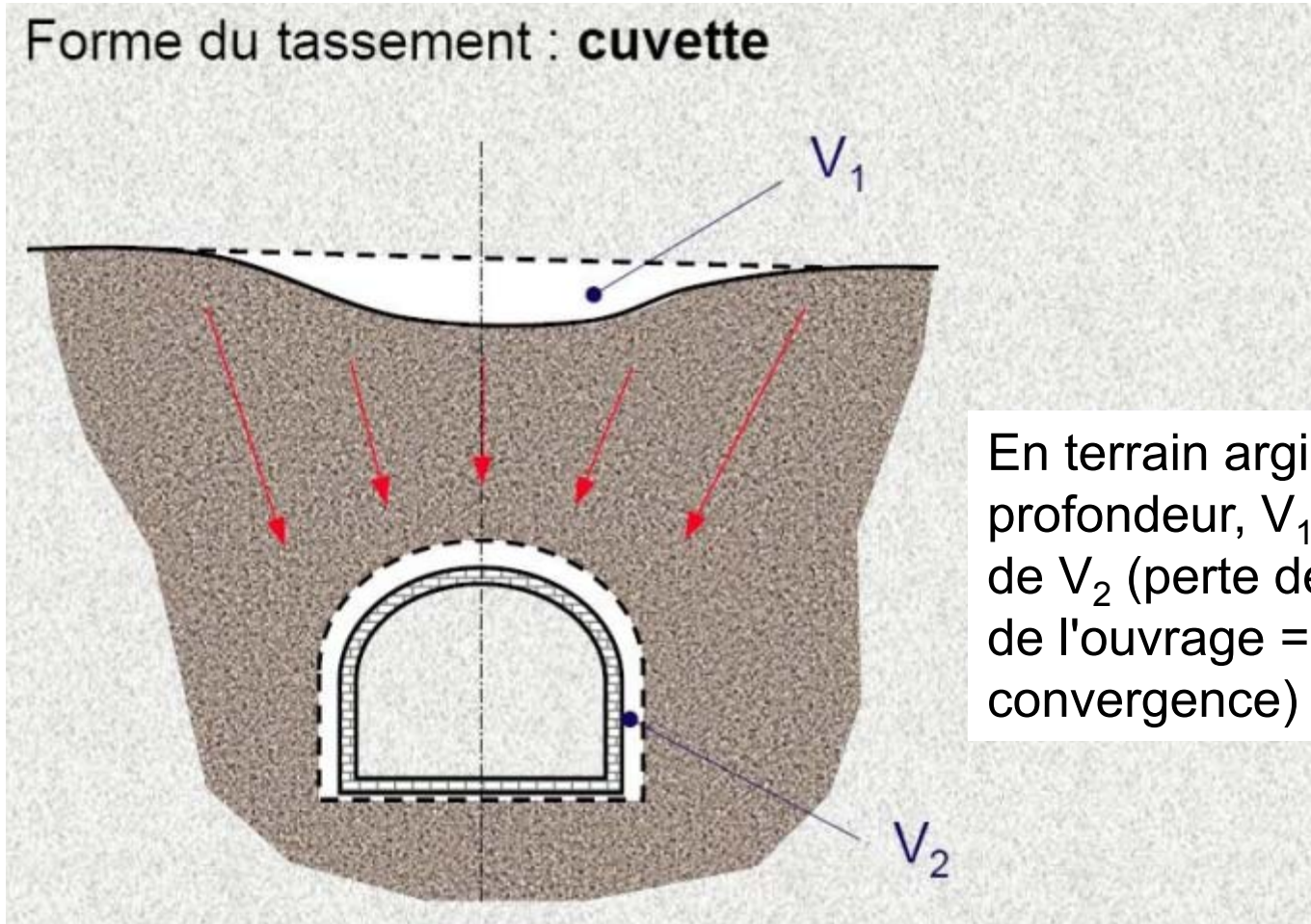
3.3. AFFAISSEMENTS

TASSEMENTS EN SURFACE



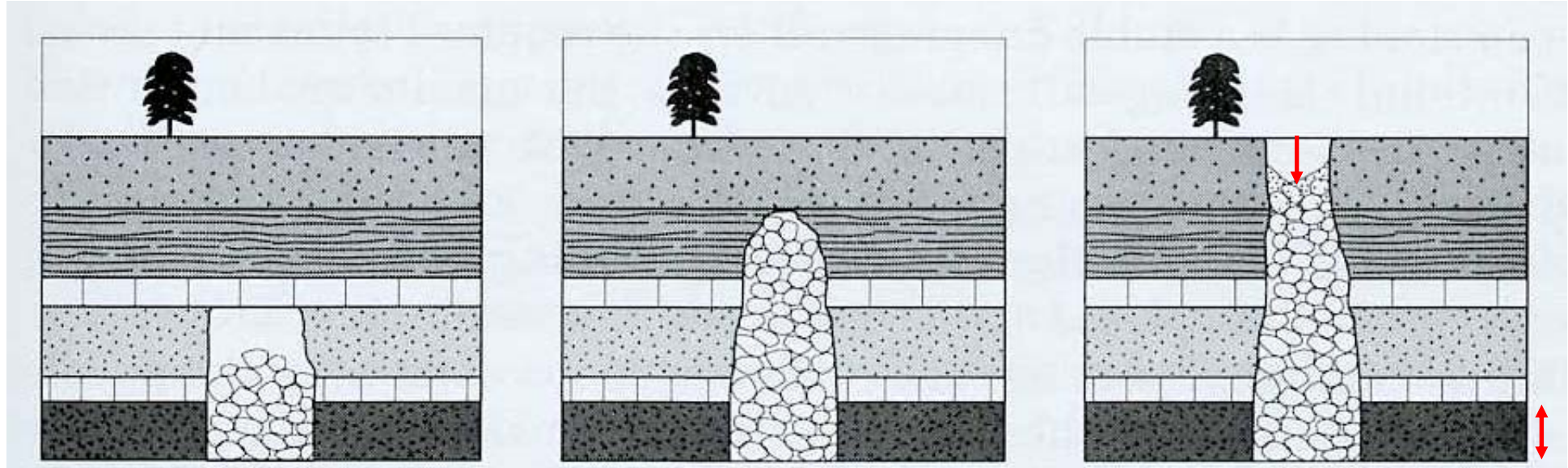
TASSEMENTS EN SURFACE

Forme du tassement : **cuvette**



En terrain argileux à très faible profondeur, V_1 est très proche de V_2 (perte de volume autour de l'ouvrage = intégration de la convergence)

EVOLUTIONS POSSIBLES DES CAVITES



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).

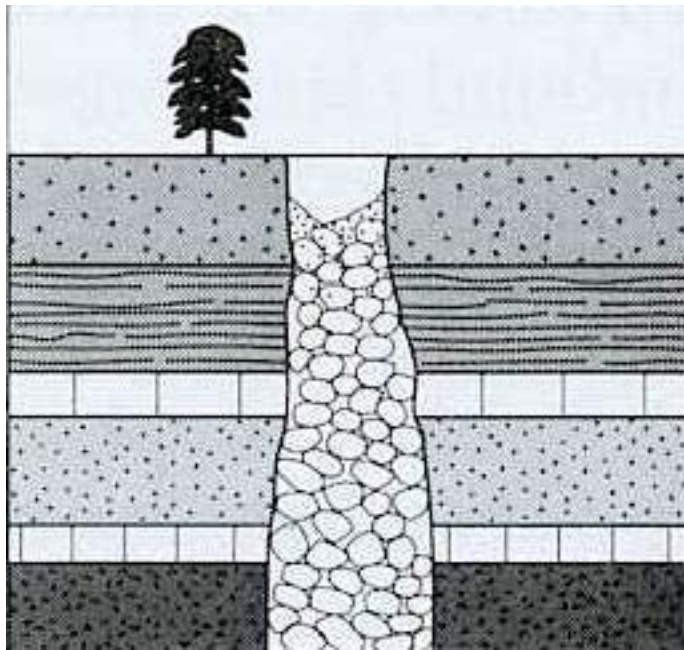
(schéma : Karfakis, 1986, *Chimney subsidence – a case study*, 27th U.S. Symp. Rock Mech.)

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.

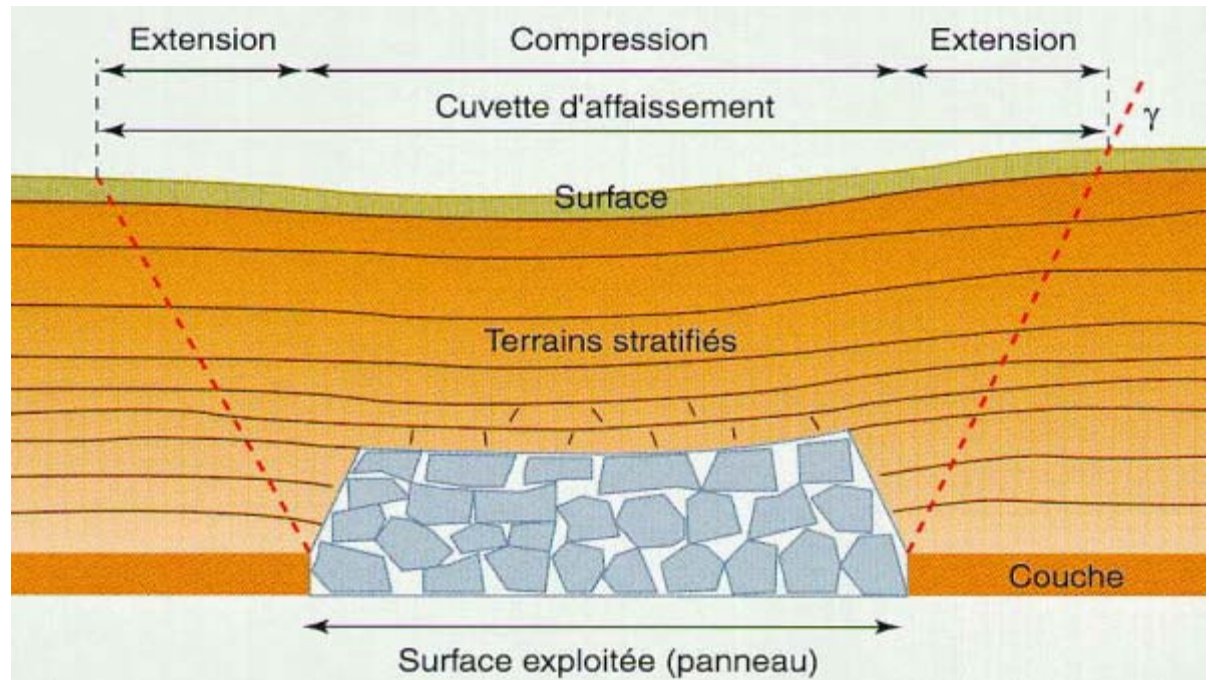
MOUVEMENTS DE SURFACE DUS À DES CAVITÉS

Effondrement
brutal et localisé



Formation d'un fontis

Affaissement
progressif et continu



Affaissement du 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



20

41

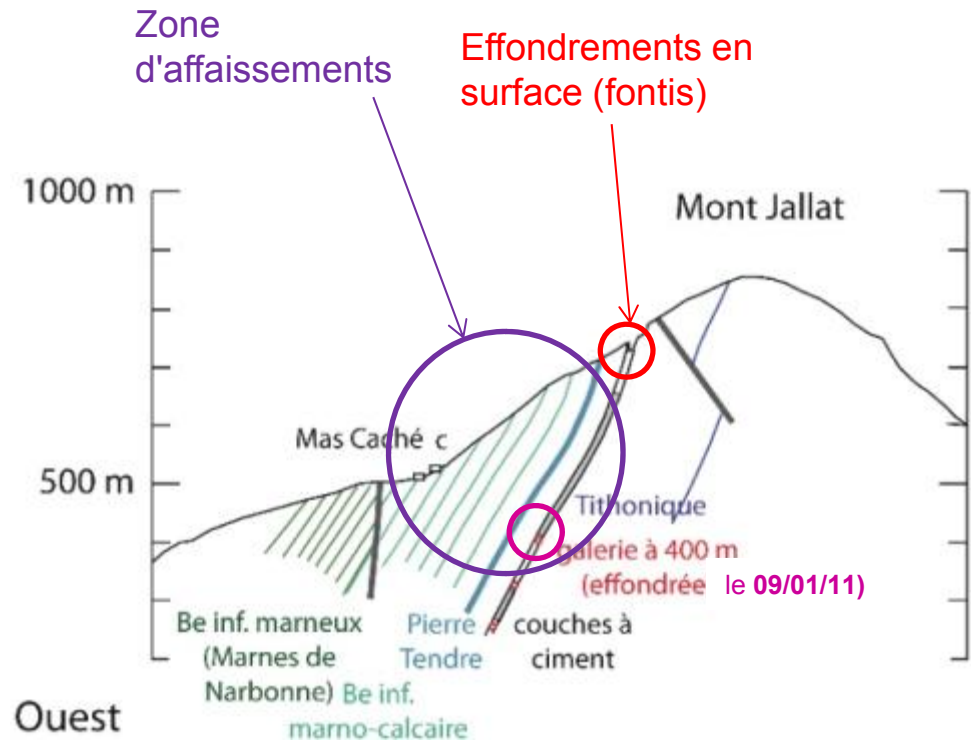
Photo P. Albéric, ISTO-CNRS, Université d'Orléans

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

Effondrements et affaissements au Mont Jallat

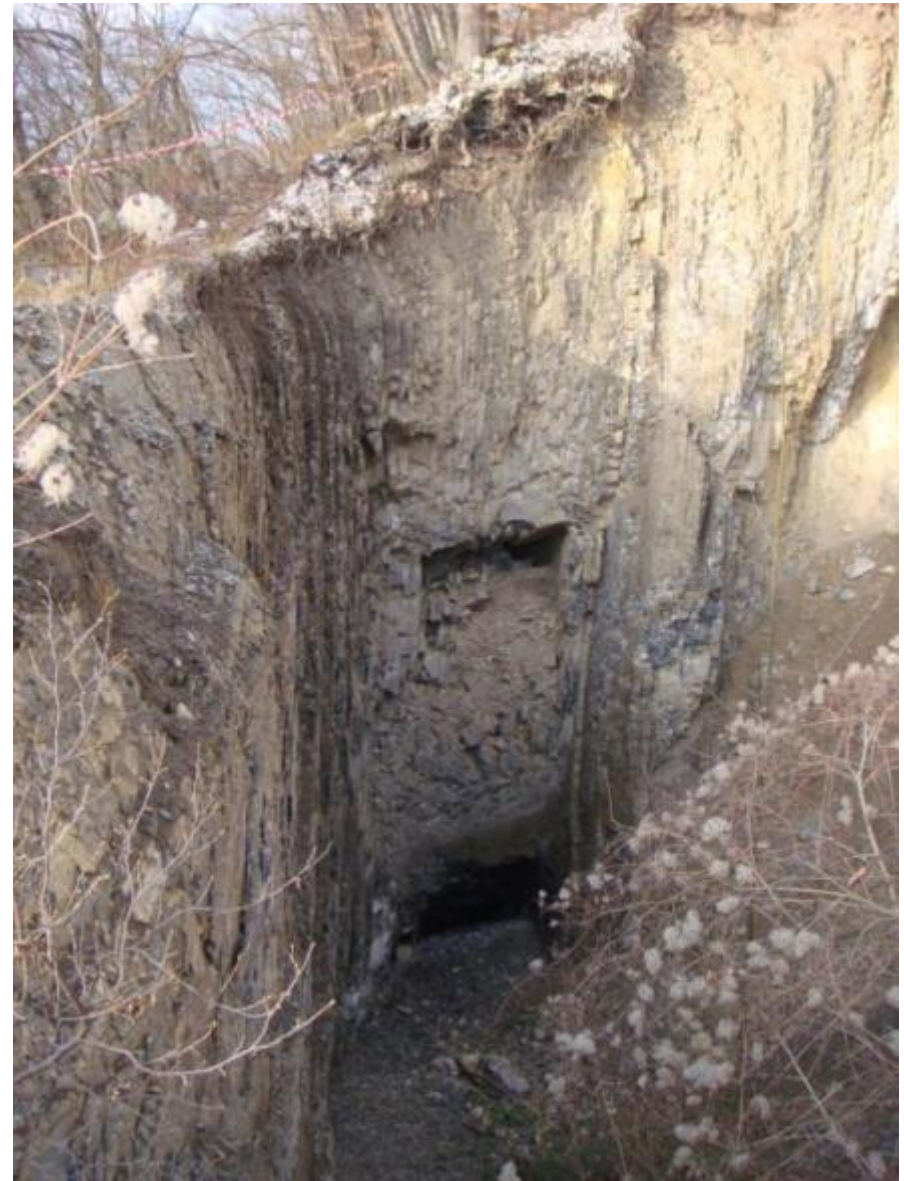


Effondrements et affaissements au Mont Jalla

Effondrement de 1987, réactivé en 2011

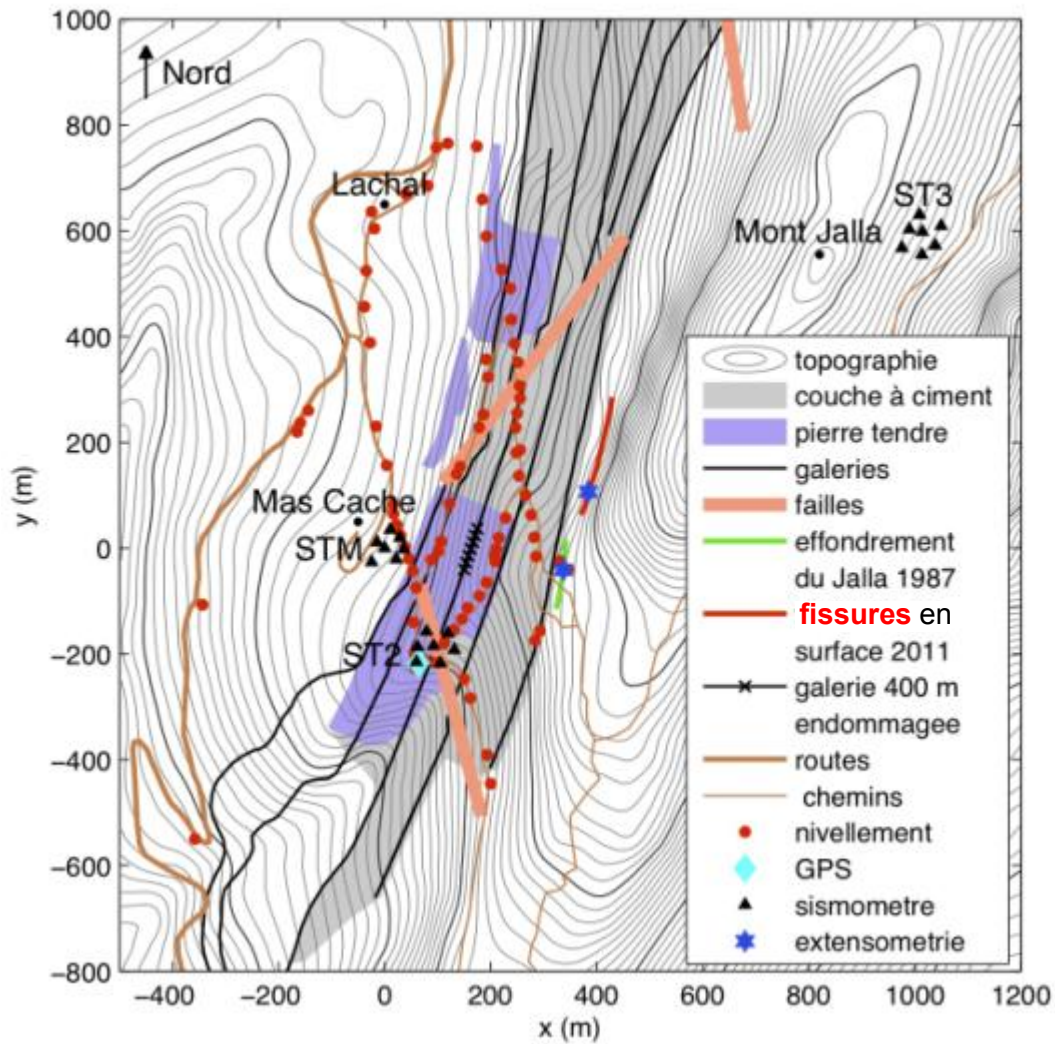


Effondrement de janvier 2011



Effondrements et affaissements au Mont Jalla

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



Effondrements et affaissements au Mont Jalla

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



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.



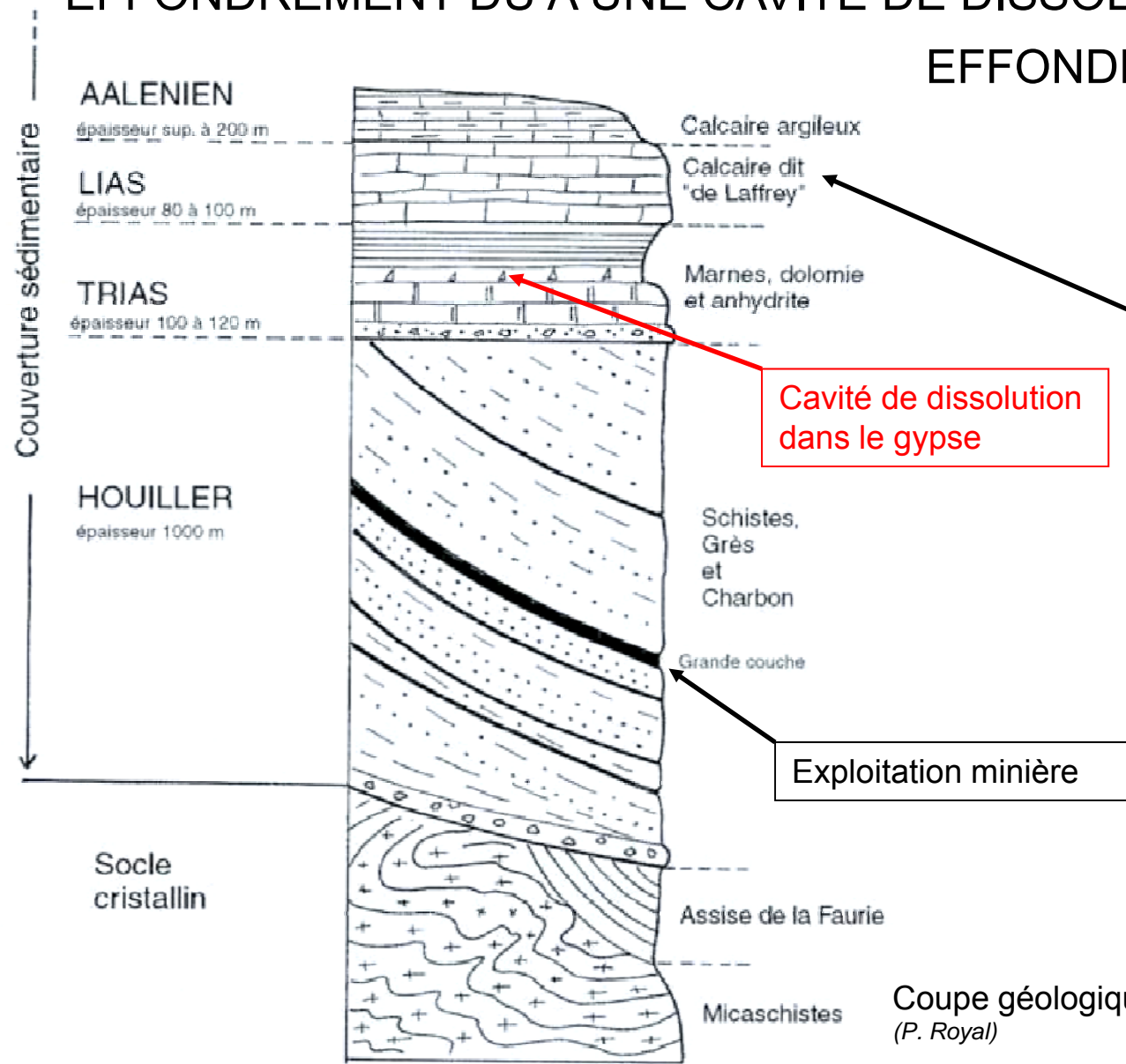
En juin 1985, le trou a été comblé en déversant 10 000 m³ de matériaux, et la route a été rétablie.



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

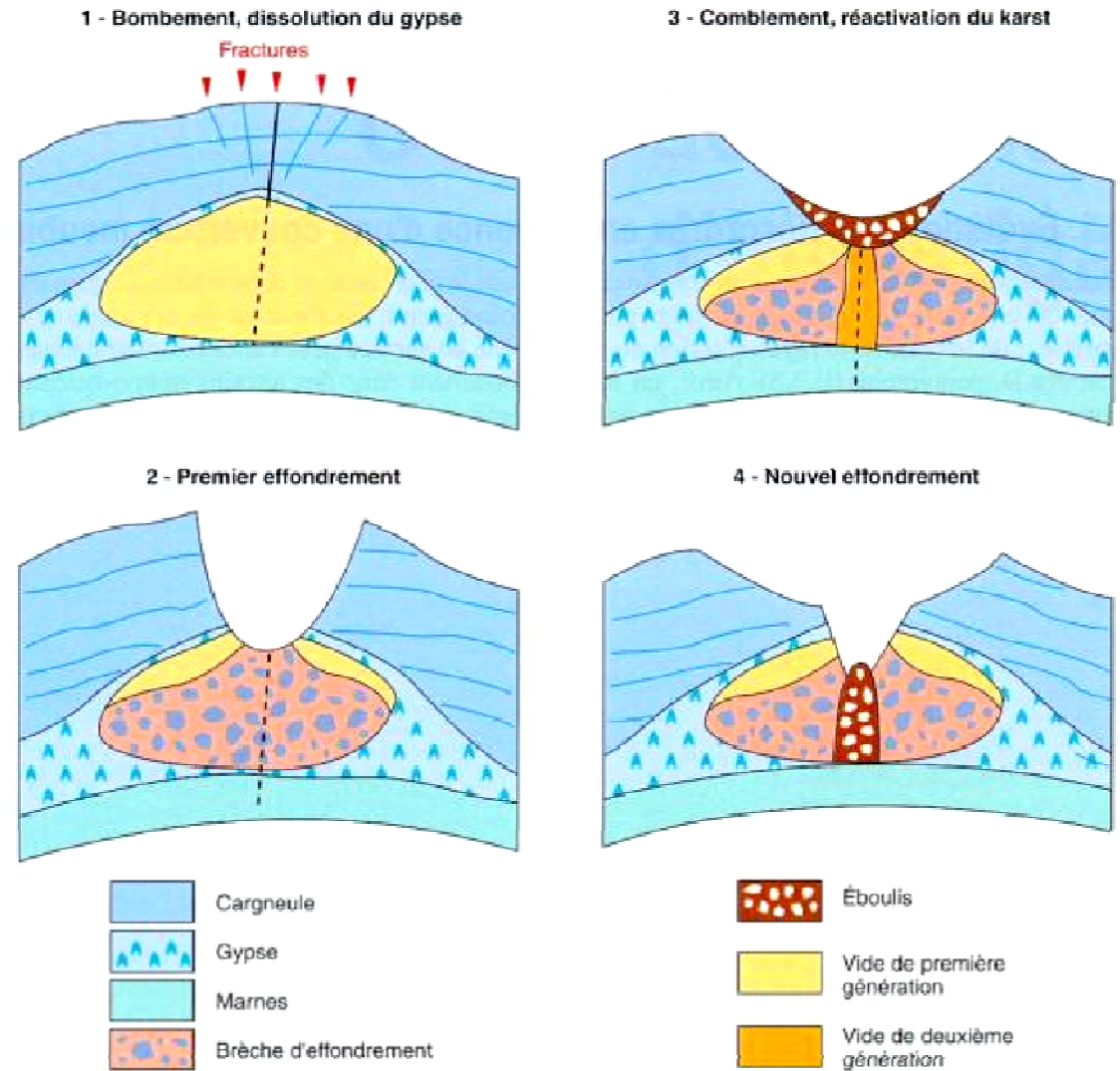


Coupe géologique schématique du Dôme de La Mure
(P. Royal)

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 m³ 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)

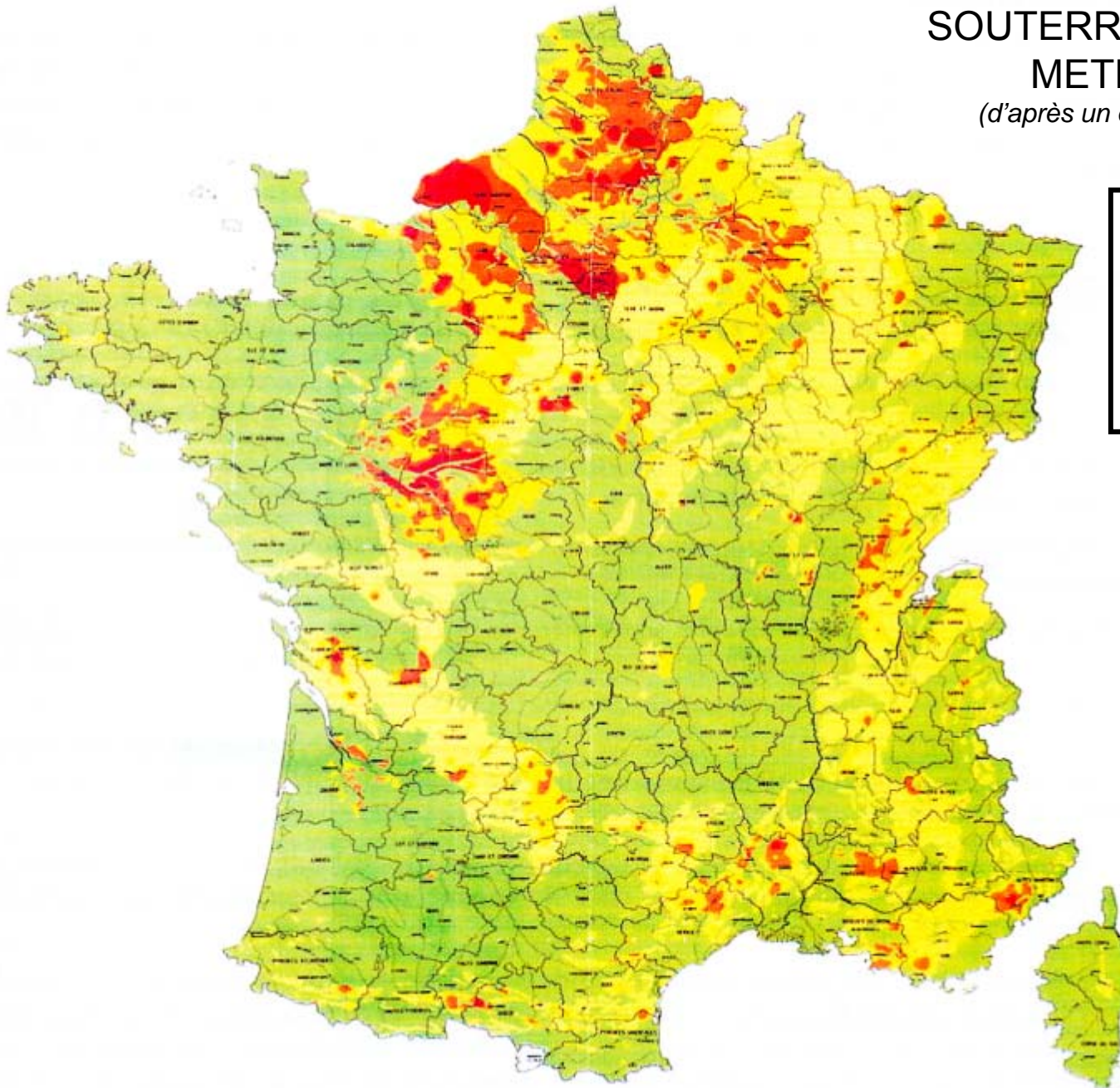


Marnière à Venon, Eure (archives DDE 27)

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)

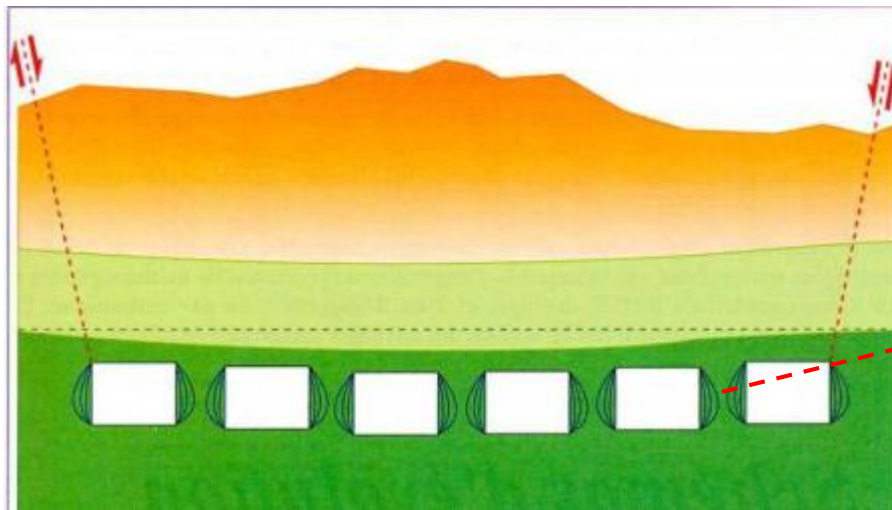


Niveau de l'aléa

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

PILIERS 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).



(extrait de *Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines*, INERIS, LCPC) 2012 D. Hantz - Pol

EFFONDREMENTS DUS A DES CARRIERES SOUTERRAINES

La catastrophe de Clamart

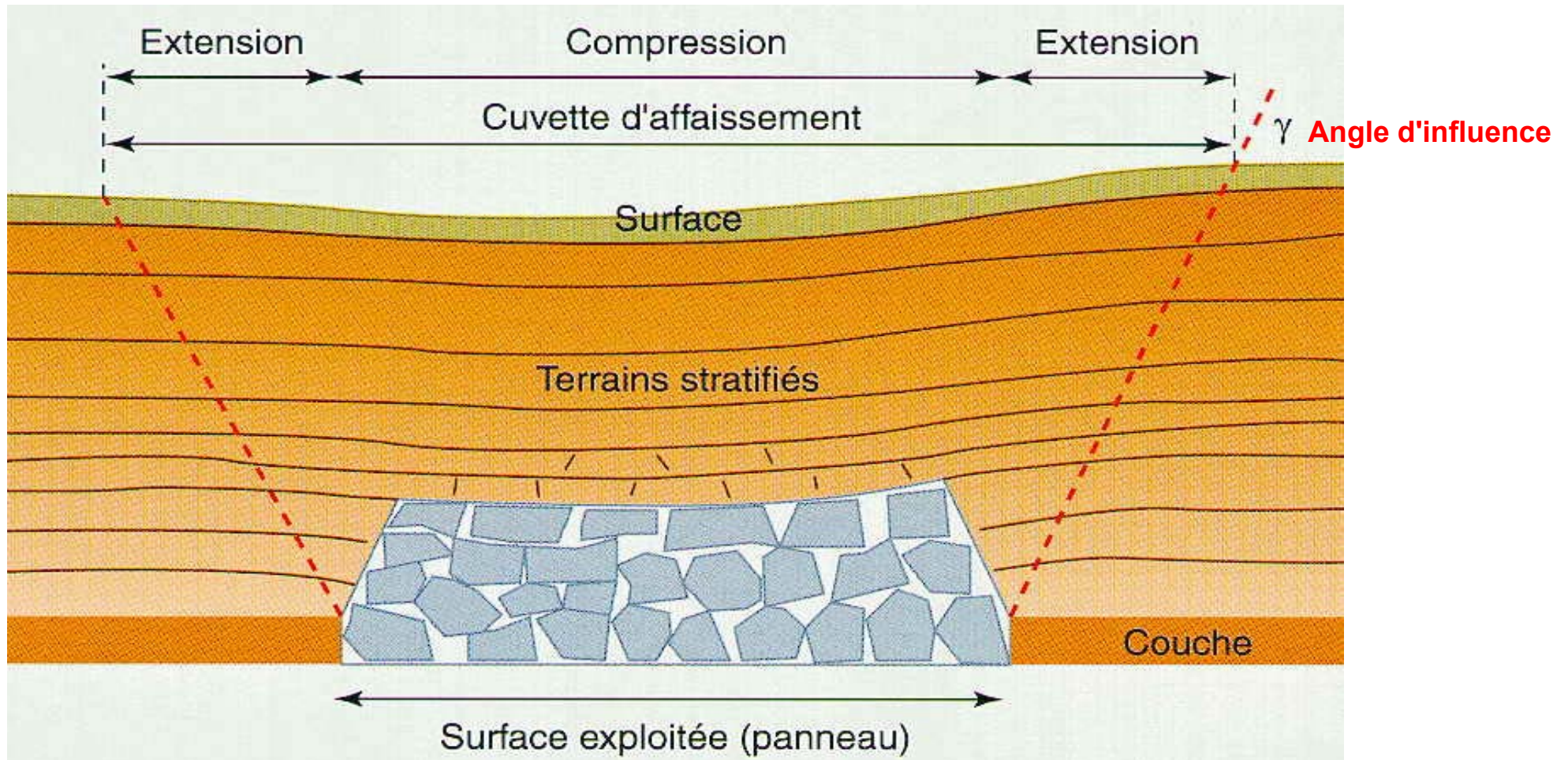


Le 1^{er} juin 1961, un énorme grondement souterrain se fait entendre et, quelques instants plus tard, six hectares de carrière de craie s'effondrent sur une hauteur de deux à quatre mètres à la limite des communes de Clamart et

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.

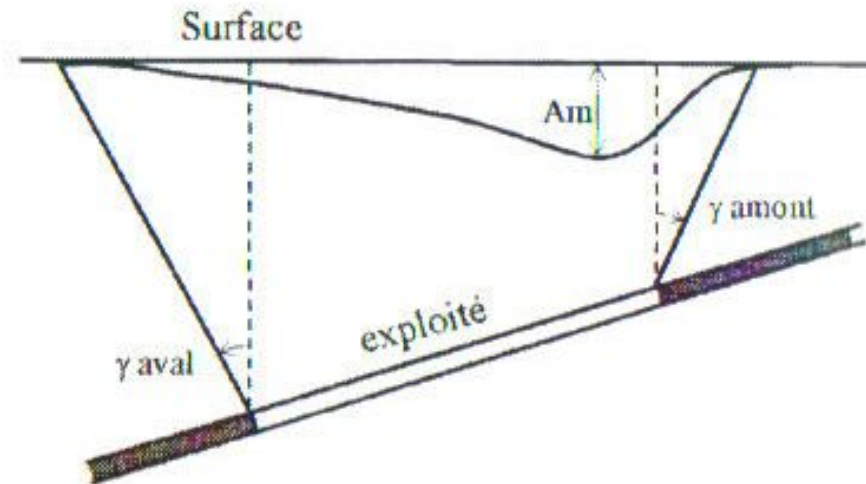
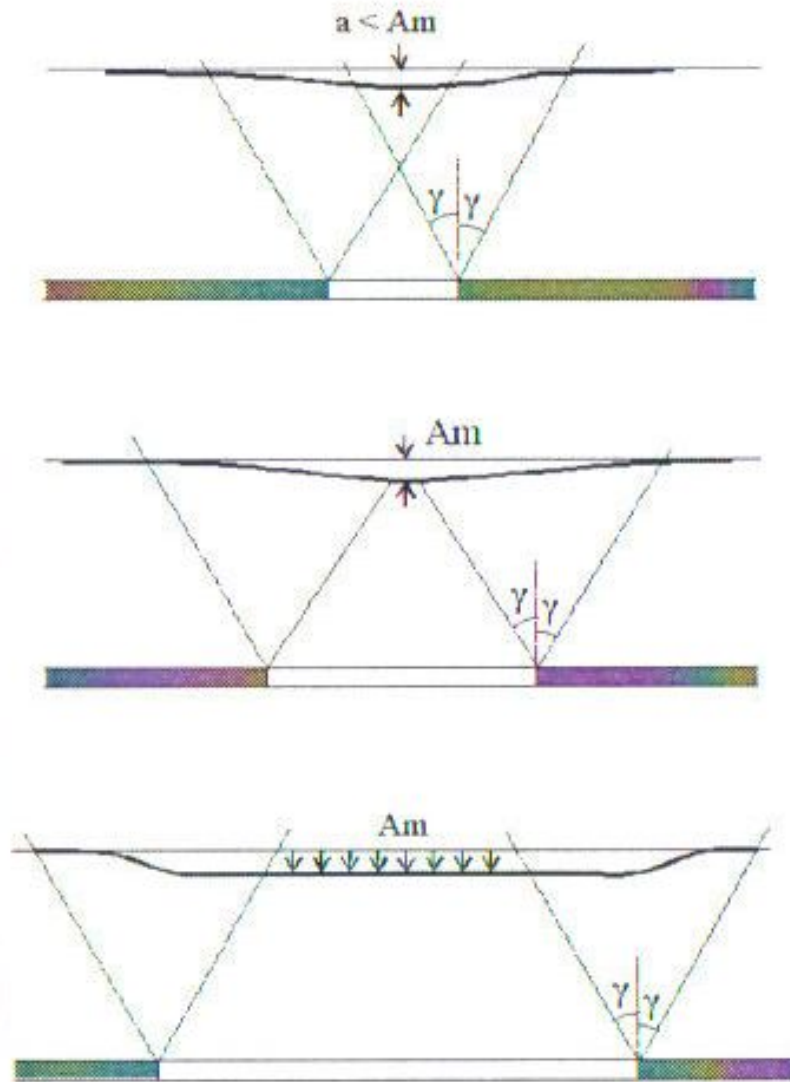
(Les mouvements de terrain, MEDTL, 2011)

AFFAISSEMENTS



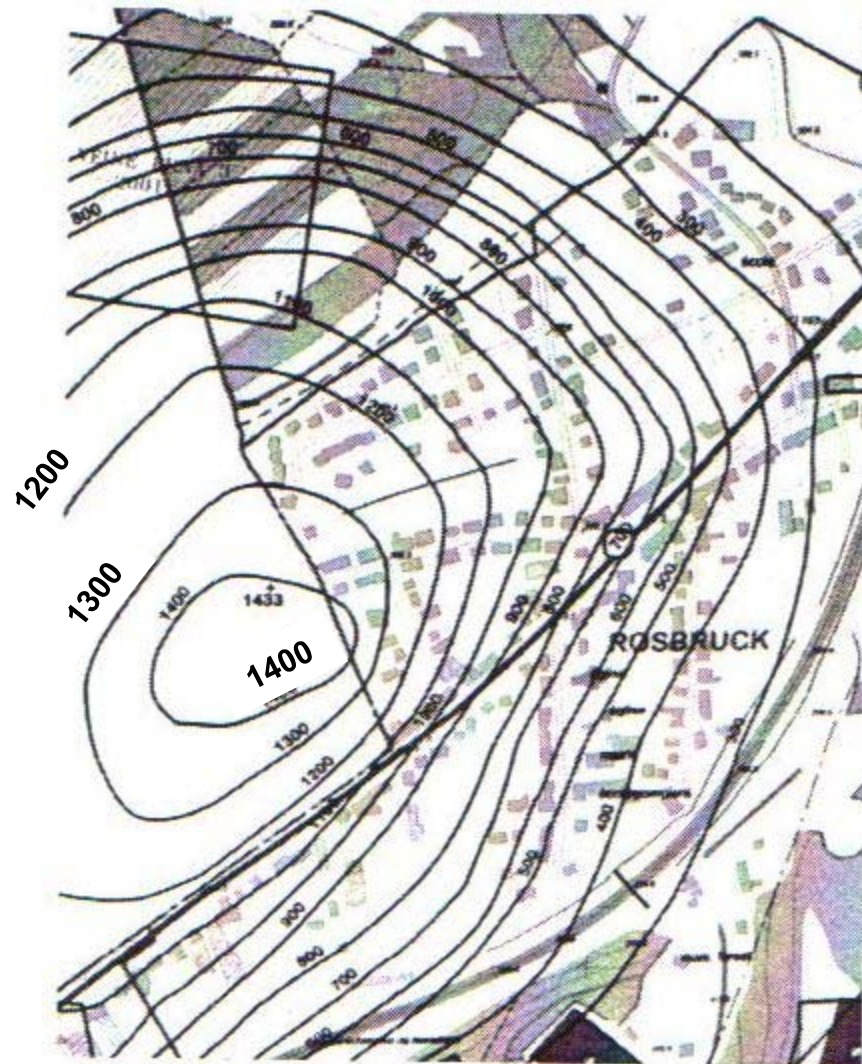
Affaissement du à une exploitation minière (d'après document INERIS)

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

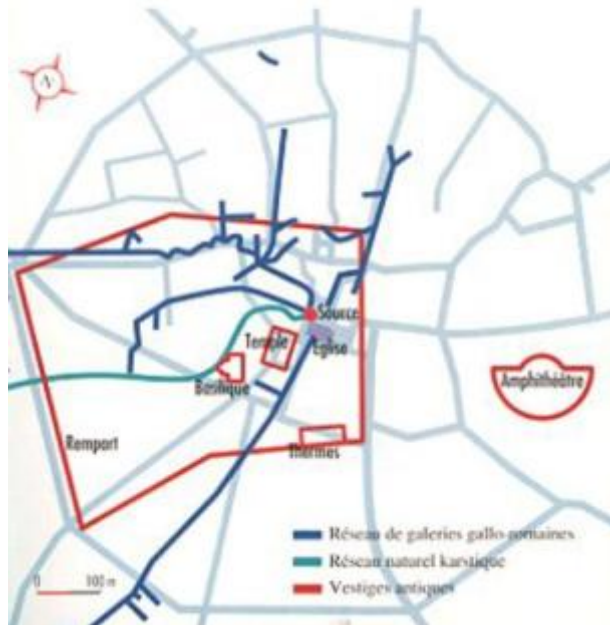


Courbes d'égal affaissement sous la ville de Rosbruck (en cm)

L'ART DE L'INGENIEUR

Sanctuaire gallo-romain de Grand (Vosges)

15 km de galeries d'amenée d'eau et 350 puits entre 4 et 12 m de profondeur
Adaptation aux conditions géologiques



2012



D. Hantz - Polytech Grenoble

Voûte en moellons

Banc calcaire en place

Paroi en moellons

Eau



57

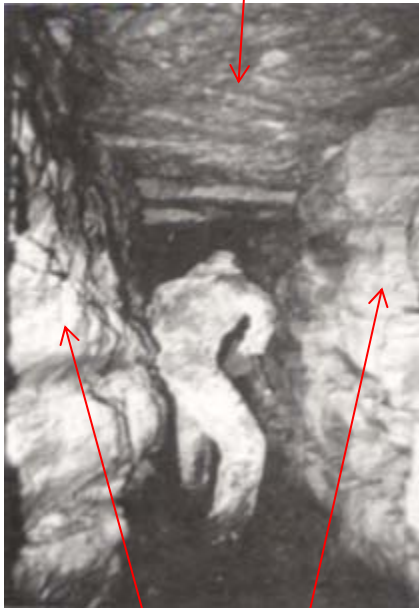
L'ART DE L'INGENIEUR

Sanctuaire gallo-romain de Grand (Vosges)

15 km de galeries hydrauliques entre 4 et 12 m de profondeur

Adaptation aux conditions géologiques

Banc calcaire en place



Dalles équarries bloquées sur les parements



Calotte brute dans le calcaire en place



Soutènement des bases de piliers avec des entretoises en pierre



Parement brut dans des calcaires marneux

L'ART DE L'INGENIEUR

Galeries hydrauliques à Lyon dans les argiles et sables mio-pliocènes



Renforcement des galeries dans les zones sensibles

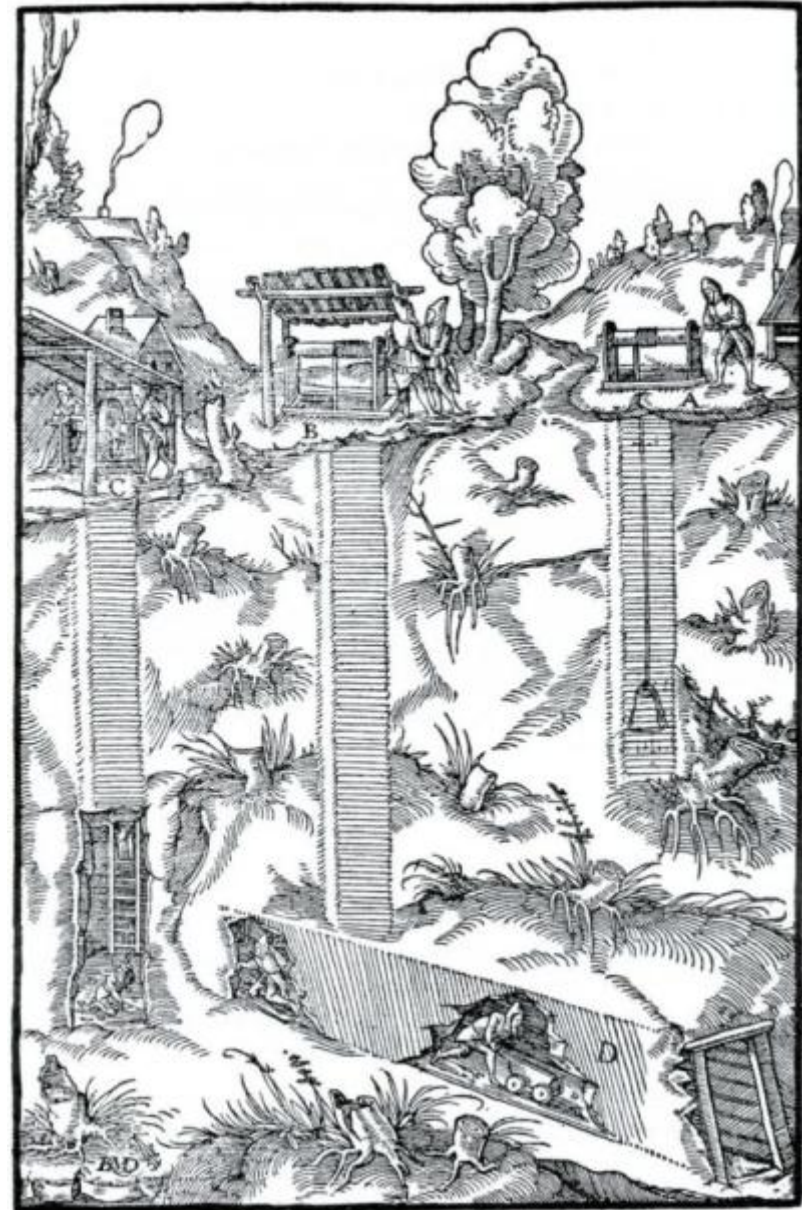


D. Hantz - Polytech Grenoble

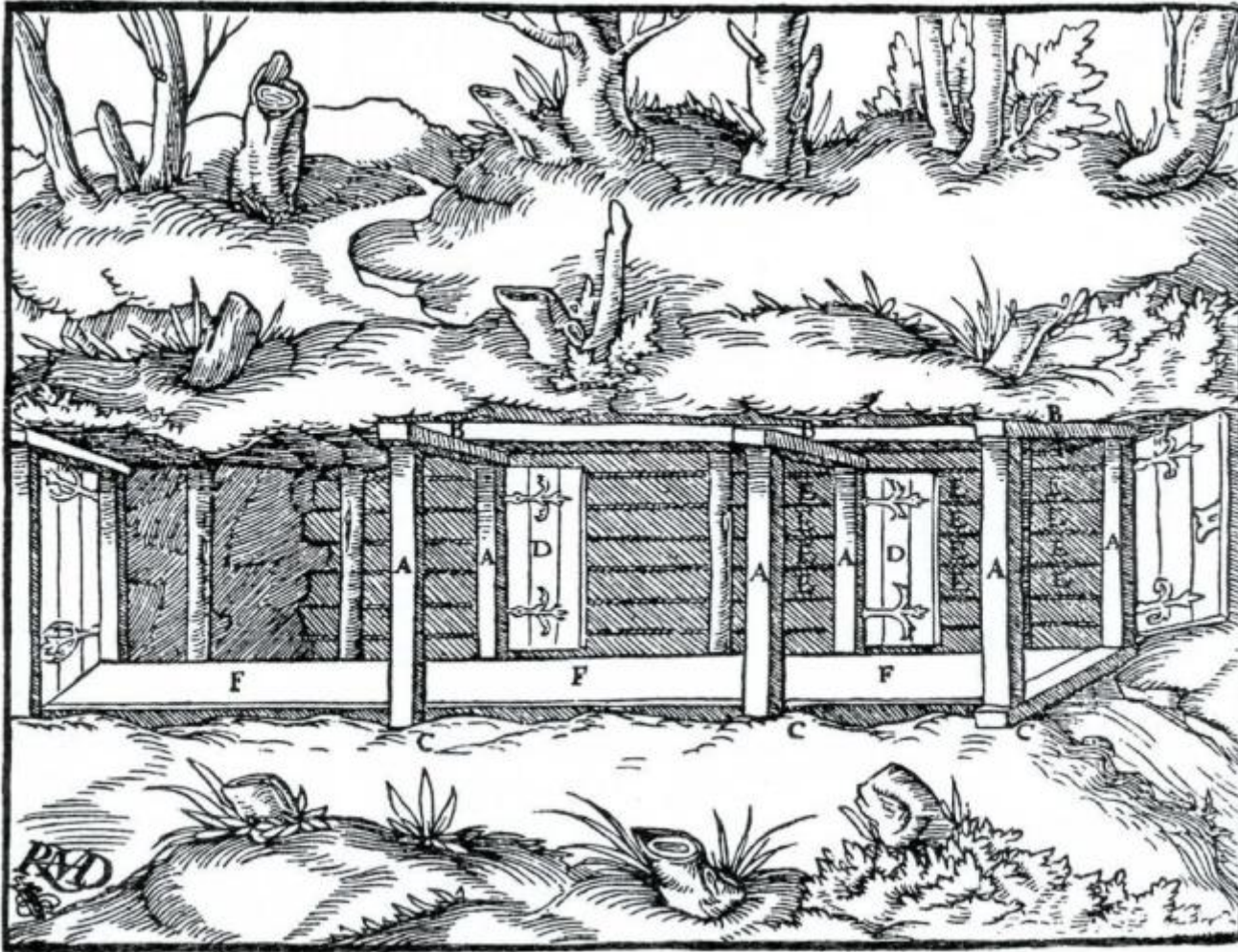


L'ART DE L'INGENIEUR

1556 : premier traité d'exploitation des mines
"De re metallica" d'Agricola



L'ART DE L'INGENIEUR



Boisage d'une galerie

A : butte

B : chapeau

C : semelle

D : porte

E : garnissage
(bois fendu)

F : rigole d'écoulement
des eaux

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX (RMR)

1. Paramètres

Paramètre		Domaine des valeurs						
1	Résist. Compr. simple (MPa)	> 250	100 - 250	50 - 100	25 - 50	10	3	<3
	Note	15	12	7	4	-25	-10	0
2	Coefficient RQD	90 - 100	75 - 100	50 - 75	25 - 50	< 25		
	Note	20	17	13	8	3		
3	Espacement des joints	> 2 m	0,6 - 2 m	20 - 60 cm	6 - 20 cm	< 6 cm		
	Note	20	15	10	8	5		
4	Caractéristiques des discontinuités	- très rugueuses - ouverture < 0,1 mm - non persistantes - épontes non altérées	- très rugueuses - ouverture < 0,1 mm - non persistantes - épontes légèrement altérées	- légèrement rugueuses - ouverture < 0,1 mm - persistantes - épontes très altérées	- épontes lisses - ouverture 1 - 5 mm - persistantes - remplissage < 5 mm	- ouverture > 5 mm - persistantes - remplissage > 5 mm		
	Note	30	25	20	10	0		
5	Venues d'eau	l/min par 10 m tunnel	aucune	< 10 l/min	< 25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min	
		Conditions générales	Complètement sec	humide	saturé	eau sous pression modérée	eau sous forte pression	
	Note	15	10	7	4	Hw < 10 m	Hw 10 à 100 m	Hw > 100 m

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX (RMR)

2. Effet de l'orientation et du pendage des discontinuités

Orientation perpendiculaire à l'axe du tunnel				Orientation parallèle à l'axe du tunnel		Pendage 0 - 20° indépendamment de l'orientation
Avancement avec pendage		Avancement contre pendage				
Pendage 45 - 90°	Pendage 20 - 45°	Pendage 45 - 90°	Pendage 20 - 45°	Pendage 45 - 90°	Pendage 20 - 45°	
Très favorable	Favorable	Moyen	Défavorable	Très favorable	Moyen	Défavorable
0	-2	-5	-10	0	-5	-12

3. Note finale de qualité du massif rocheux

Note finale	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Classe n°	I	II	III	IV	V
Description	Excellente	Bonne	Moyenne	Mauvaise	Très mauvaise

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX (RMR)

*Tableau 1.1.b - Recommandations pour l'excavation et le soutènement de tunnels au rocher fondées sur la valeur RMR
Tunnel à section en fer à cheval de 10 m d'ouverture excavé par abatage à l'explosif (d'après Bieniawski, 1989).*

RMR	Mode d'excavation	Mode de soutènement		
		Boulonnage	Béton projeté	Cintres métalliques
RMR 81-100 Classe I	Creusement en pleine section Pas d'avancement : 3 m	Boulonnage local	Aucun	Aucun
RMR 61-80 Classe II	Creusement en pleine section Pas d'avancement : 1,5 m-3 m Soutènement complet à 20 m du front	Boulonnage en voûte, 3 m de longueur, espacement de 2,5 m avec un treillis soudé localement	50 mm en voûte si nécessaire	Aucun
RMR 41-60 Classe III	Creusement en demi-section Pas d'avancement : 1,5 m-3 m en demi-section supérieure Soutènement mis en place à une distance inférieure à 20 m du front	Boulonnage systématique, 4 m de longueur, espacement de 1,5 à 2 m en voûte et sur les piédroits avec treillis soudé en voûte	50 mm à 100 mm en voûte et 30 mm sur les piédroits	Aucun
RMR 21-40 Classe IV	Creusement en demi-section Pas d'avancement : 1,5 m-3 m en demi-section supérieure Soutènement mis en place au fur et à mesure de l'avancement à une distance inférieure à 10 m du front	Boulonnage systématique, 4 m de longueur, espacement de 1 à 1,5 m en voûte et sur les piédroits avec treillis soudé	100 mm à 150 mm en voûte et 100 mm sur les piédroits	Cintres légers à moyens espacés de 1,5 m si nécessaire
RMR < 20 Classe V	Creusement en section divisée Pas d'avancement : 0,5 m-1,5 m pour la galerie de tête Soutènement mis en place au fur et à mesure de l'avancement Mise en place de béton projeté dès que possible	Boulonnage systématique, 5 m à 6 m de longueur, espacement de 1 à 1,5 m en voûte et sur les piédroits avec treillis soudé Boulonnage en contre-voûte	150 mm à 200 mm en voûte et 150 mm sur les piédroits 50 mm sur le front	Cintres moyens à lourds espacés de 0,75 m avec blindage métallique et enfilage Contre voûte nécessaire