

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

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 modélisé karstique de surface dans le calcaire : lapiaz (calcaire urgonien du Vercors) ↓



Solubilité dans l'eau :

- calcite (CaCO_3) : 0,2 g/l
- gypse (CaSO_4) : 2 g/l
- chlorure de sodium (NaCl) : 360 g/l

GYPSE

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

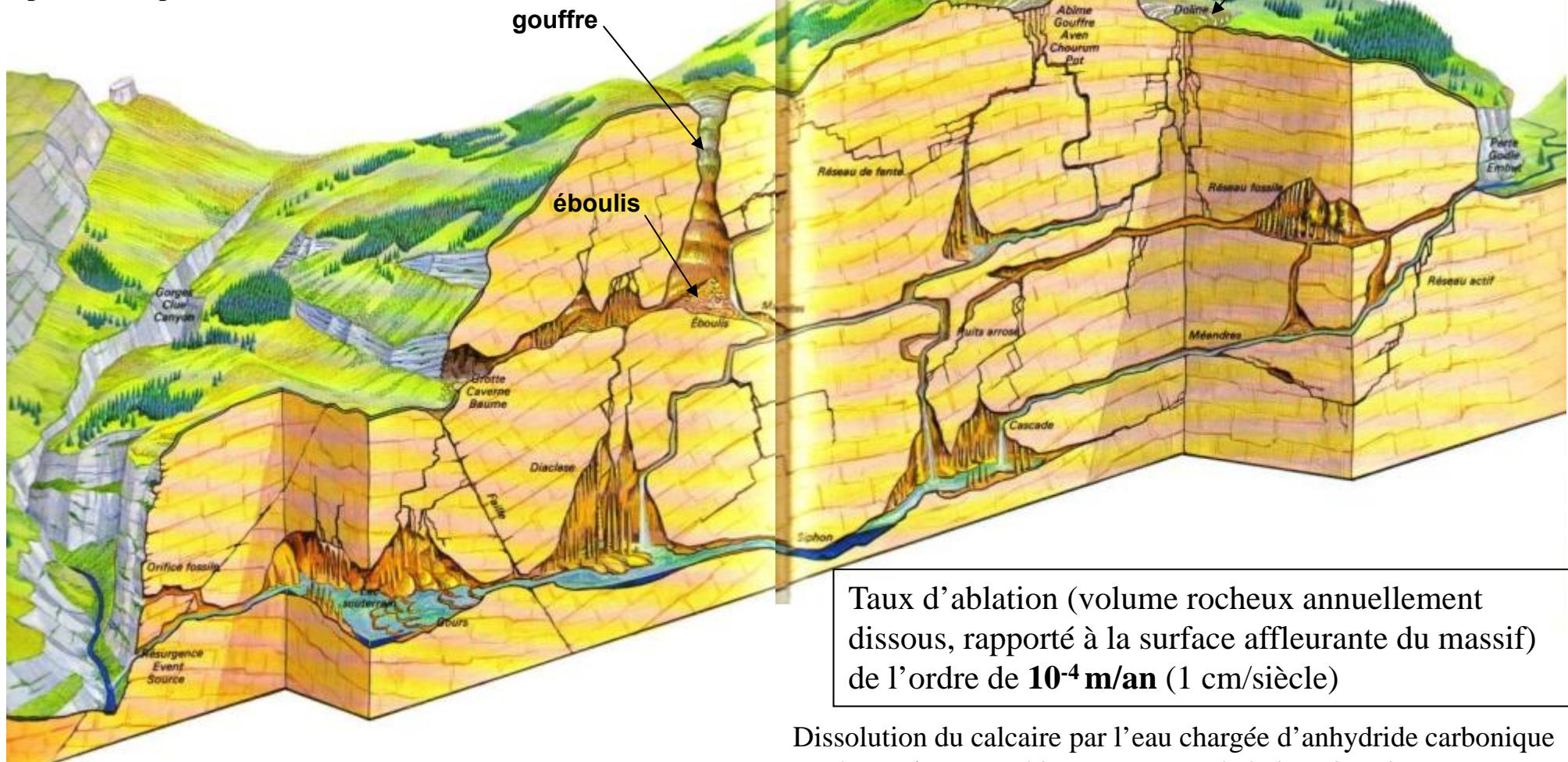
Exemple de modélisé karstique de surface dans le gypse : entonnoir de dissolution (gypse triasique) ↓



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.



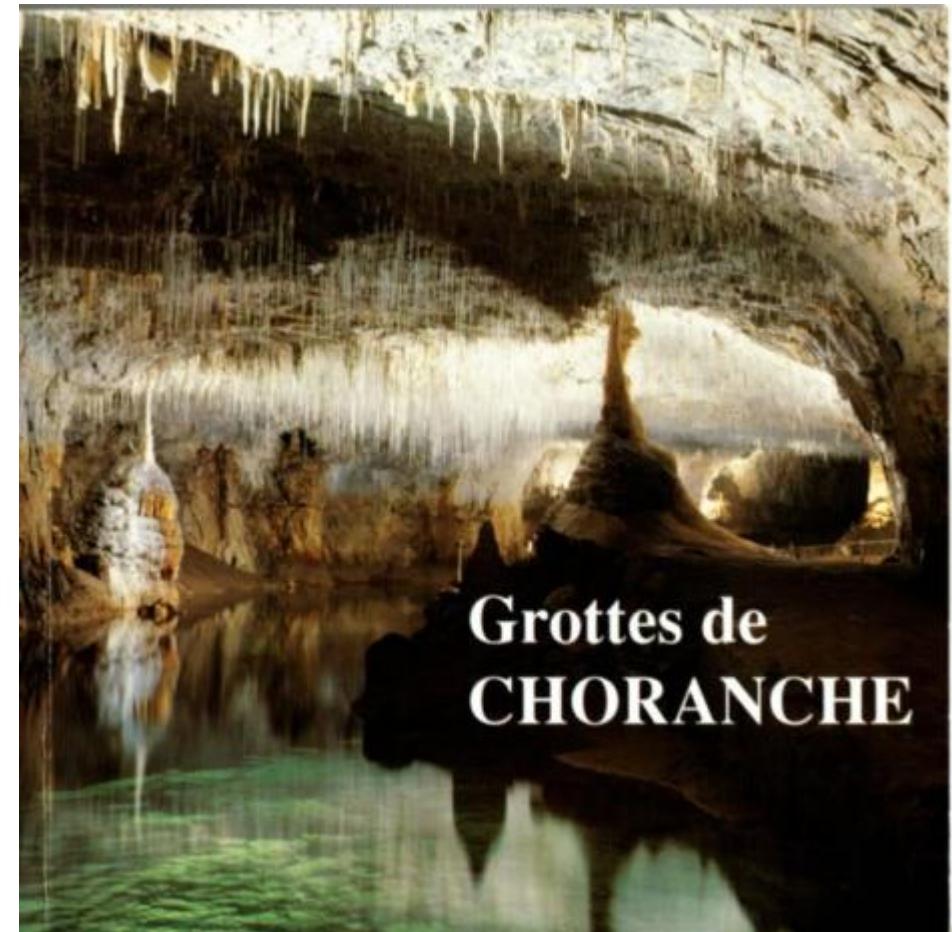
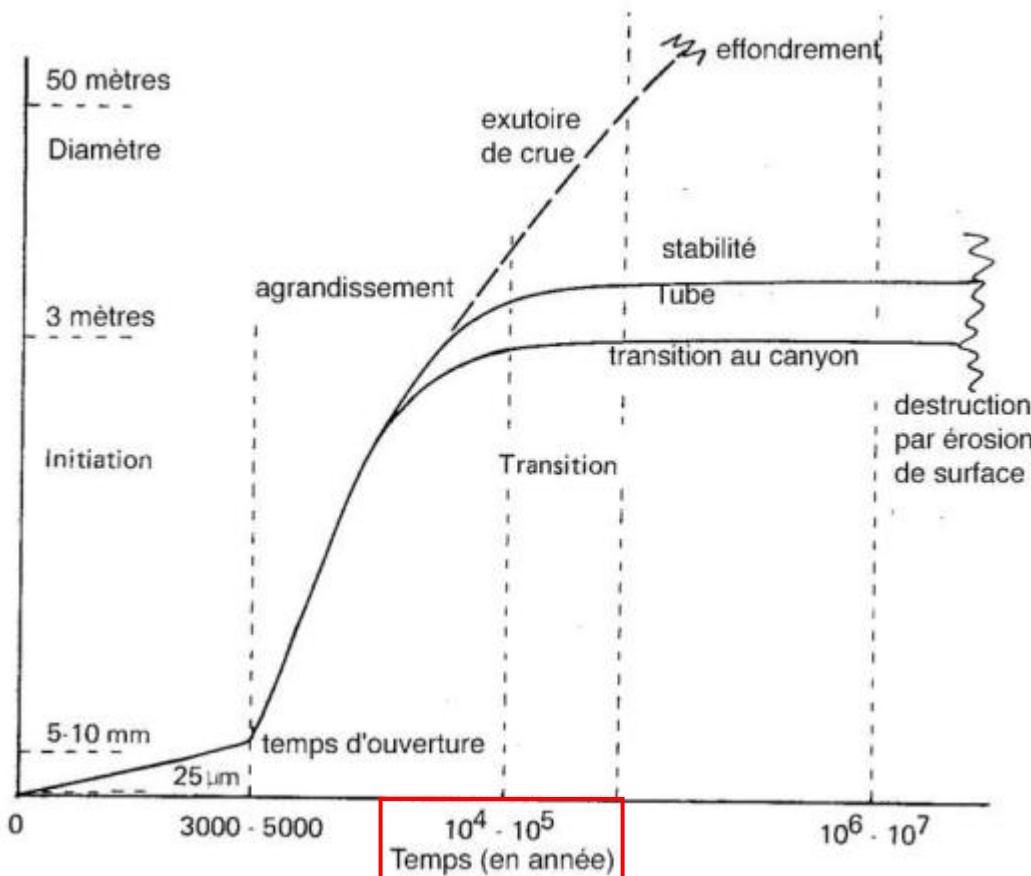
(d'après P. Minvielle, Grottes et canyons, Denoël, 1977)

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

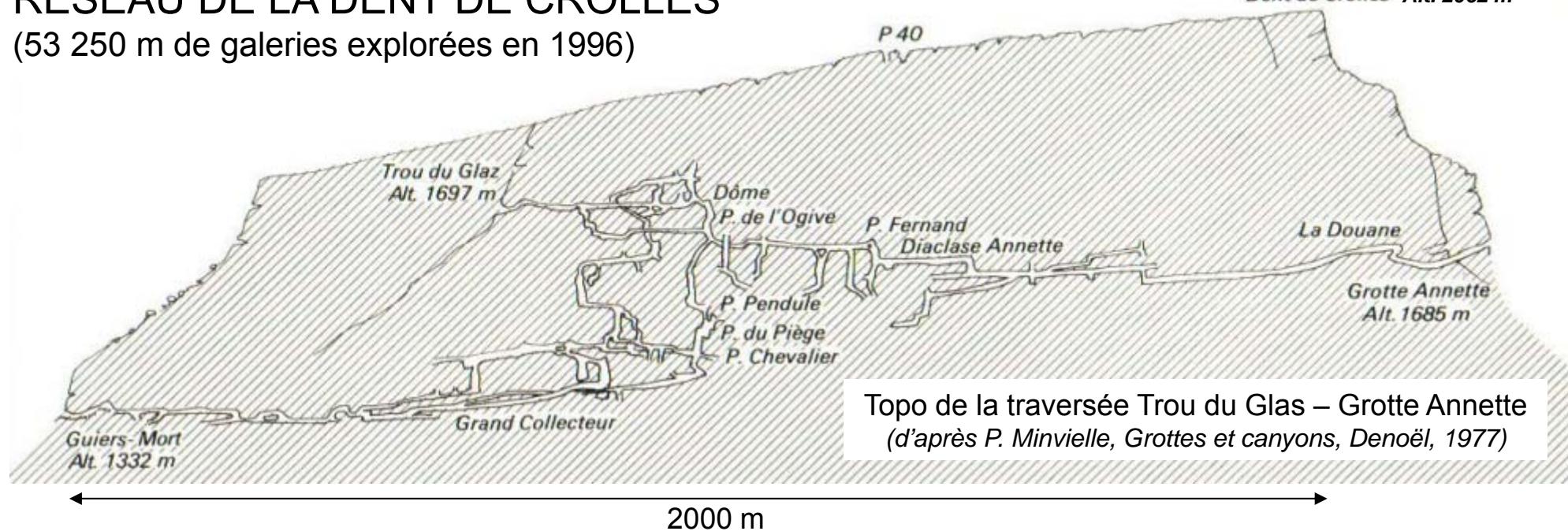
Temps de formation des conduits karstiques dans le calcaire (d'après White)



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

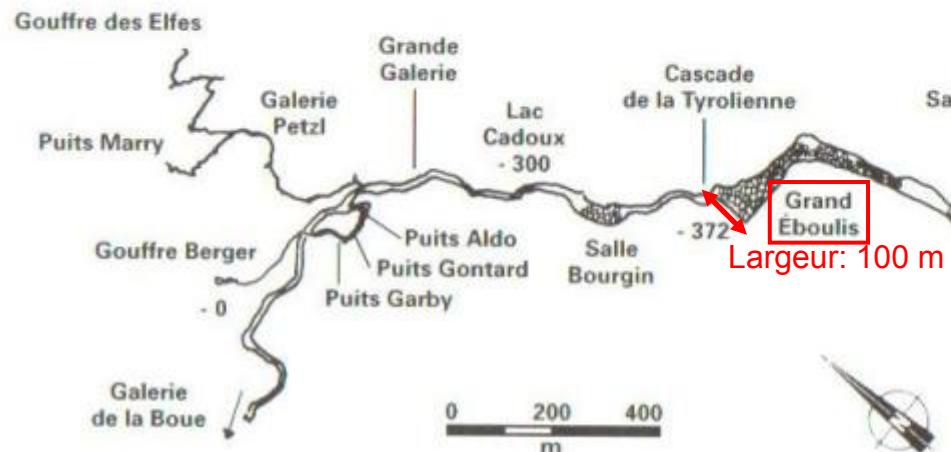
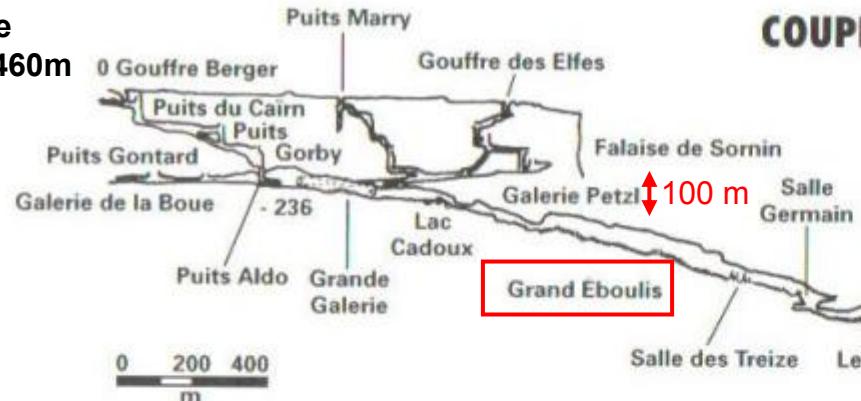


EXEMPLES DE GRANDES CAVITES KARSTIQUES

Gouffre Berger (Engins, massif du Vercors)

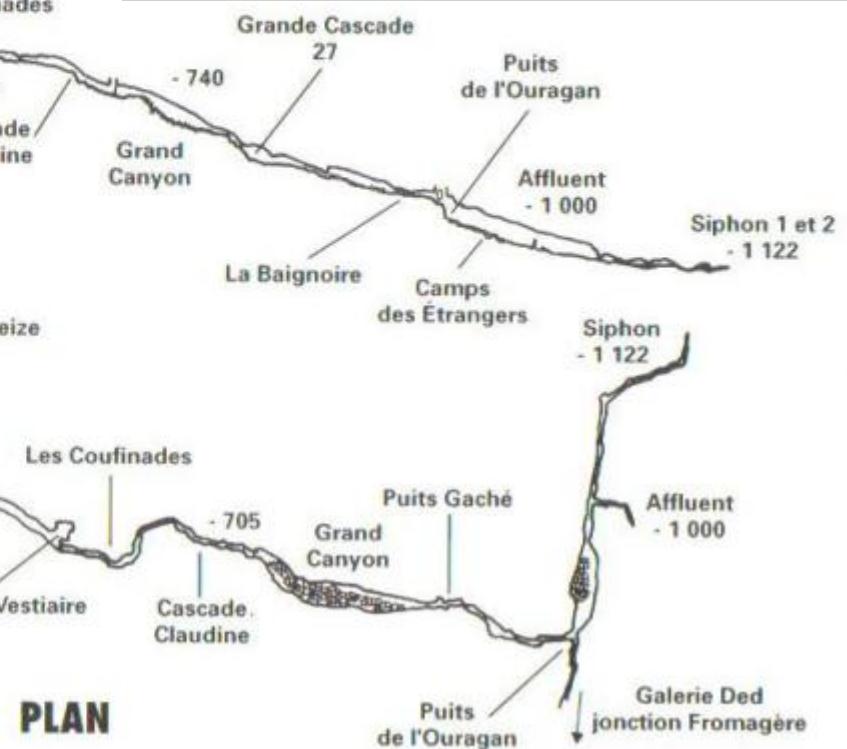
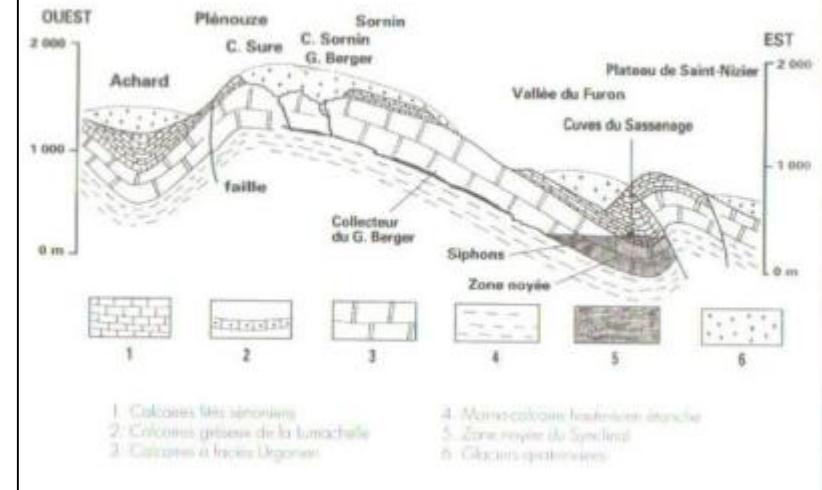
Entrée

Alt. 1460m



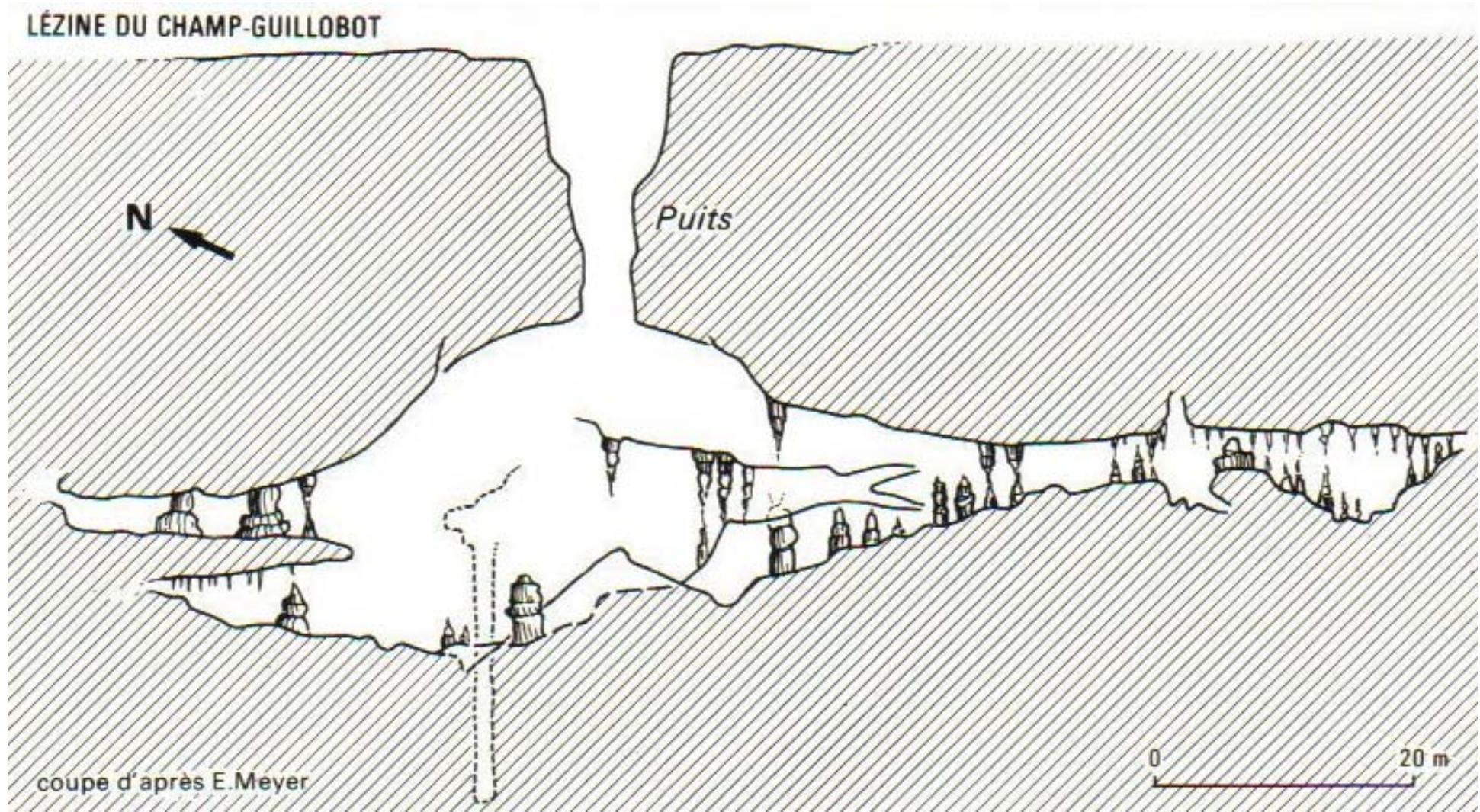
Autre exemple, dans le Gouffre de la Pierre Saint-Martin (Pyrénées) : Salle de la Verna, en forme de demi-sphère de 220 m de diamètre et 170 m de hauteur

COUPE GÉOLOGIQUE SORNIN - CUVES DE SASSENAGE LORS DES ÉPISODES FROIDS QUATERNAIRES



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

EXEMPLE DE GOUFFRE (POLIGNY, JURA)



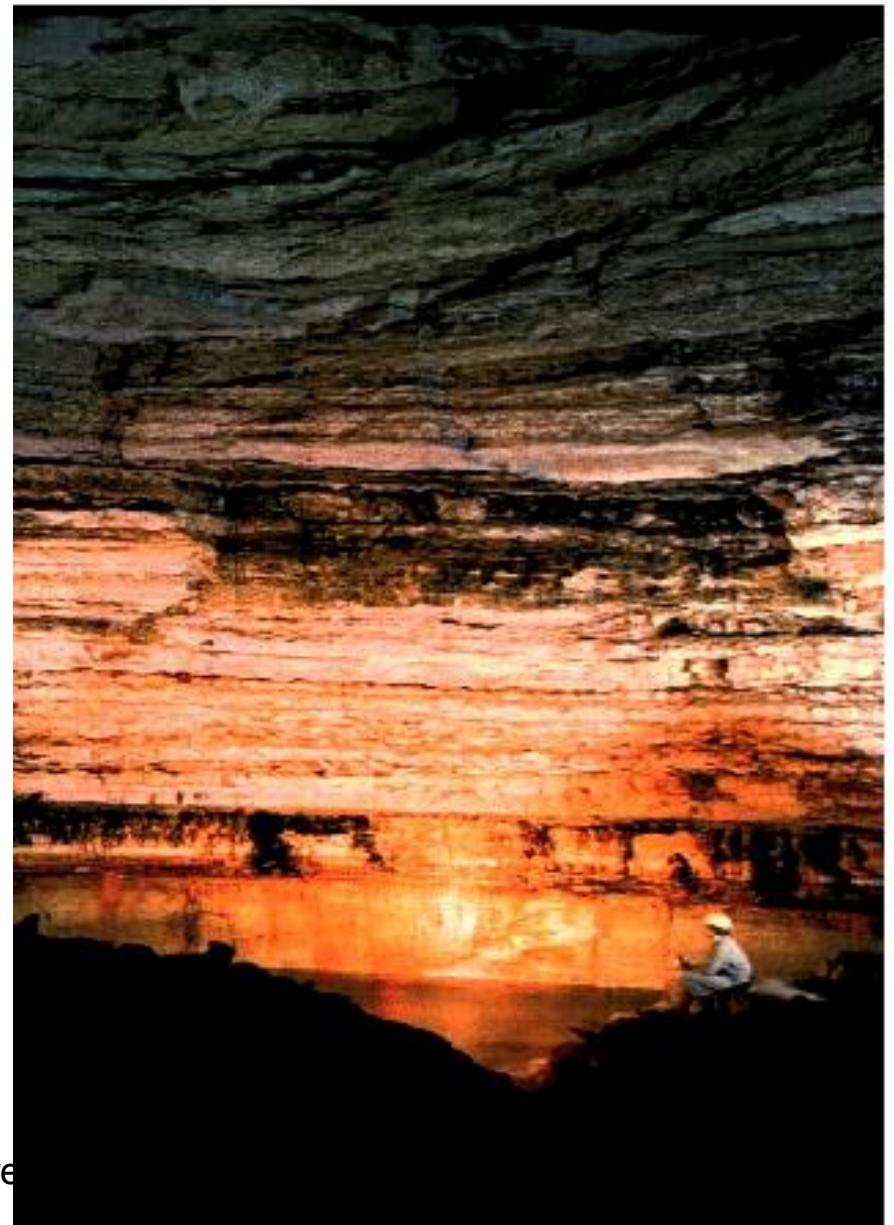
DISSOLUTION DU GYPSE

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**

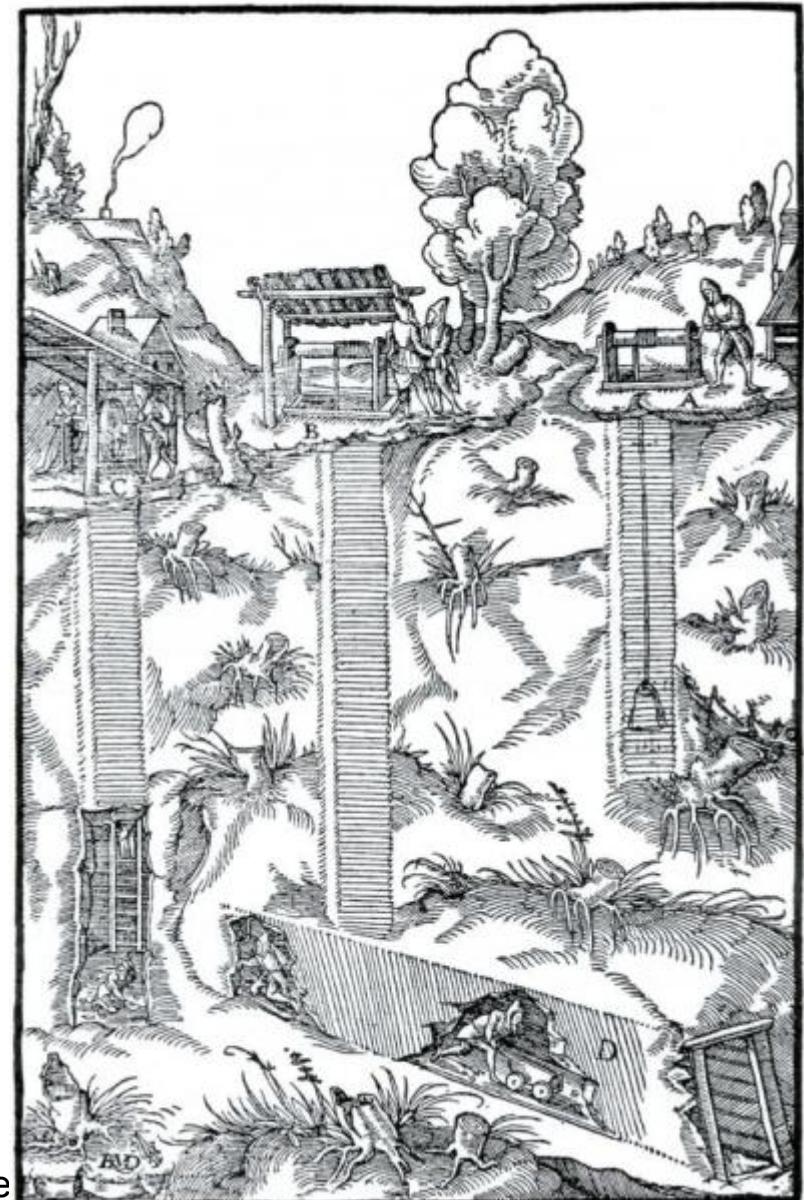
Gravure représentant des puits verticaux et une galerie venant du jour, extraite de "De re metallica", d'Agricola (1556).

• **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**.

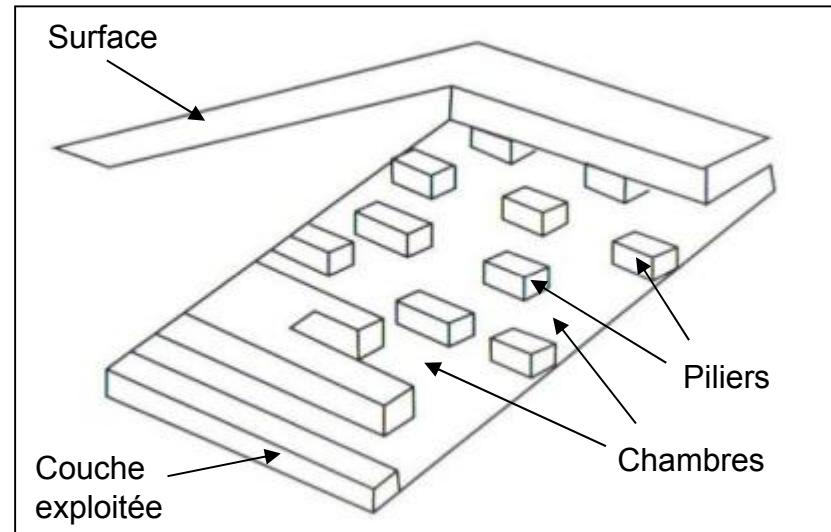
Le terme de carrière est parfois utilisé pour désigner toute exploitation à ciel ouvert.



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.

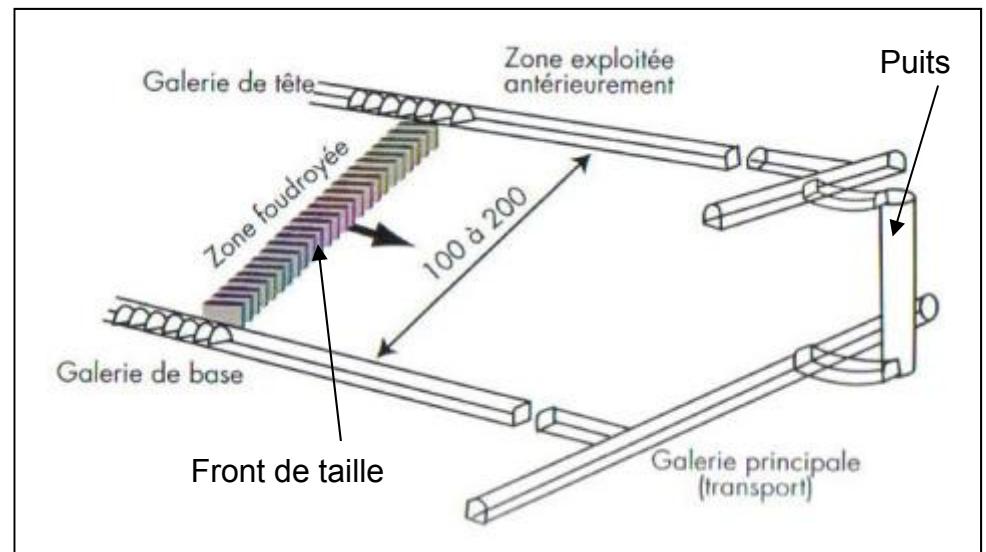


(extrait du *Manuel de mécanique des roches*, CFMR, Ecole des Mines de Paris)

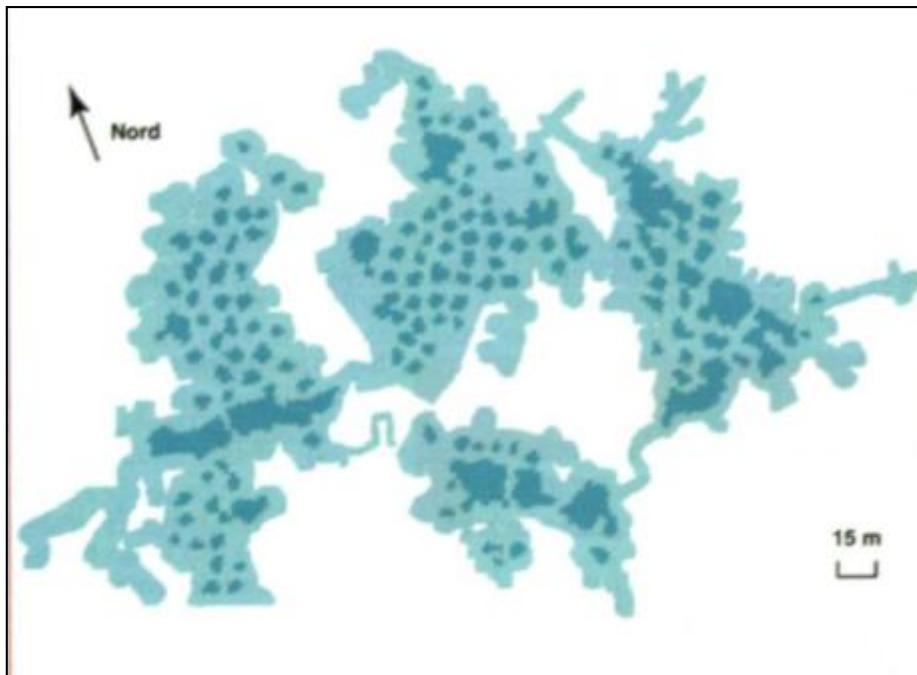
Méthodes d'exploitation totale : foudroyage ou remblayage

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

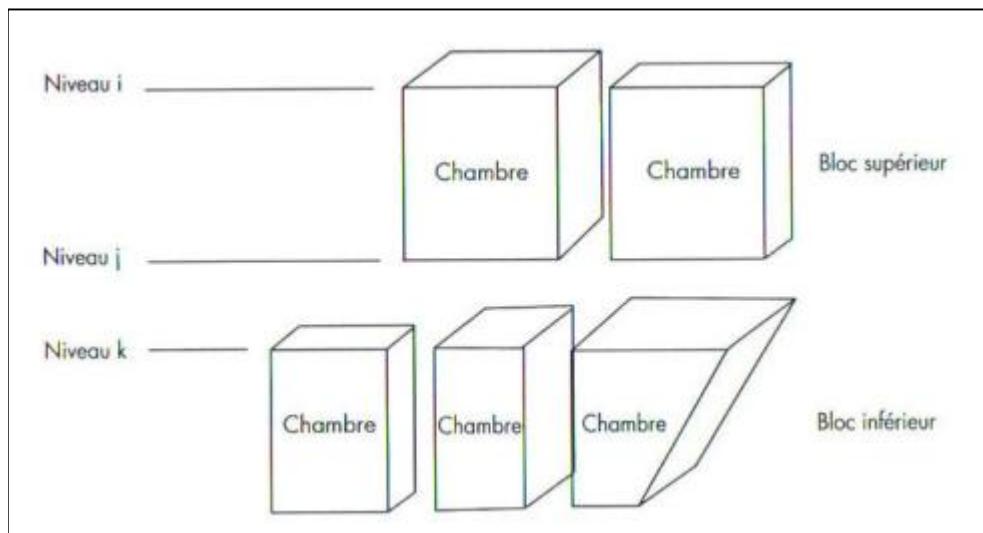


Exploitation par chambres et piliers irréguliers (carrière de gypse de Roquevaire, Bouches-du-Rhône). Piliers en foncé, partie exploitée en plus clair.
(extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC)



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

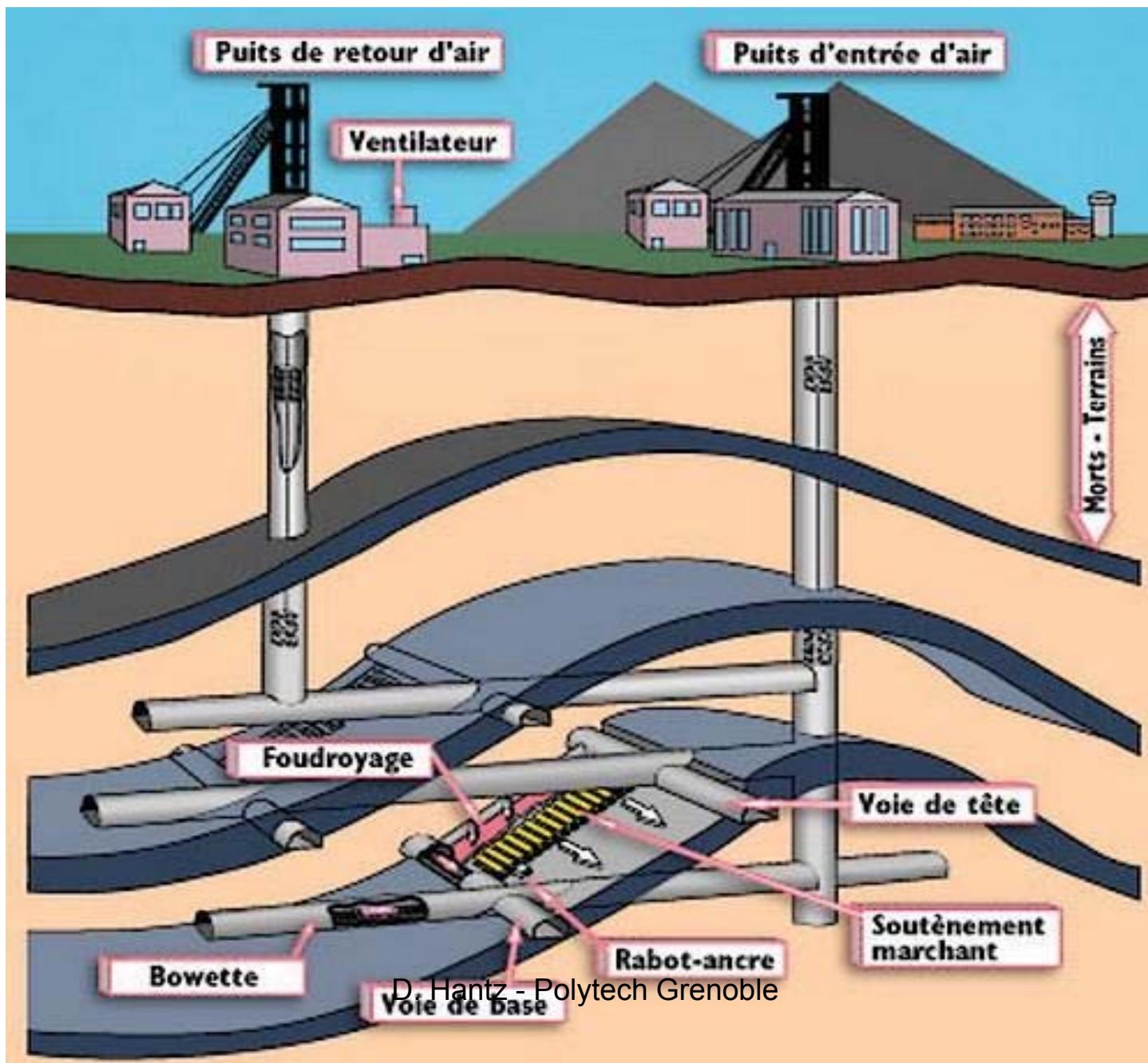


Chambres dans un filon ou une couche verticale.
(*extrait du Manuel de mécanique des roches, CFMR, Ecole des Mines de Paris*)

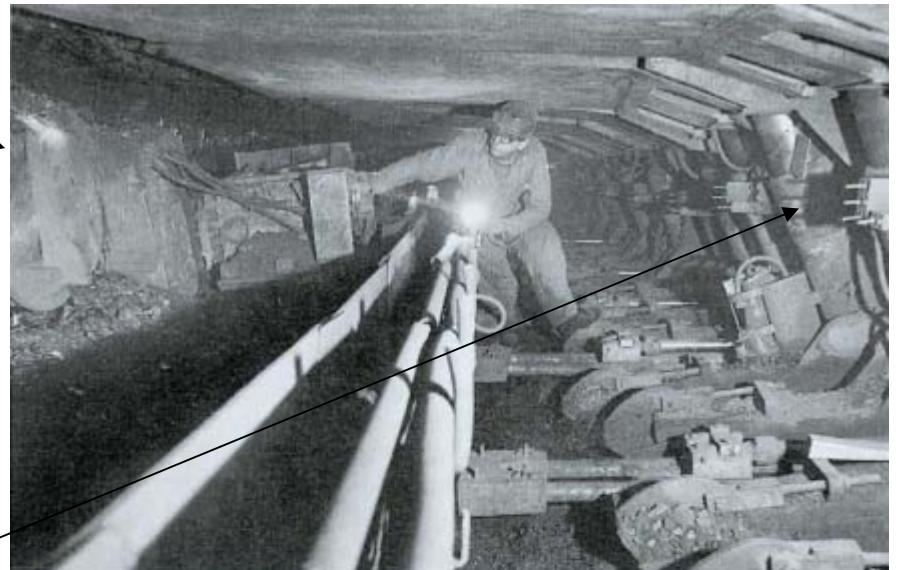
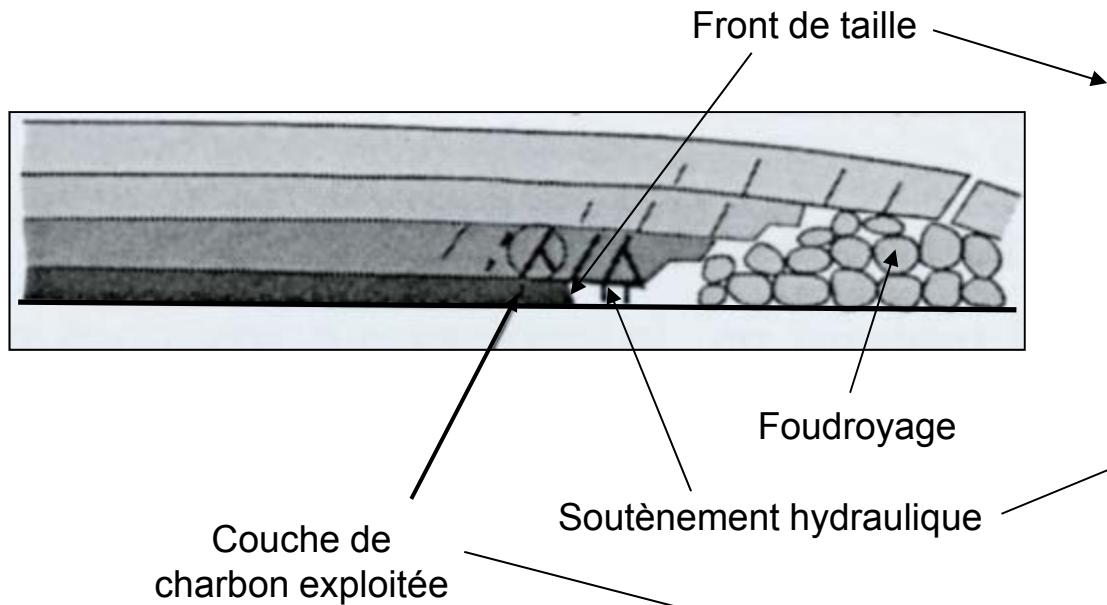


Chambre d'exploitation dans une ardoisière d'Anjou, exploitée par la méthode descendante.
(*extrait de Evaluation des aléas liés aux cavités souterraines, INERIS, LCPC*)

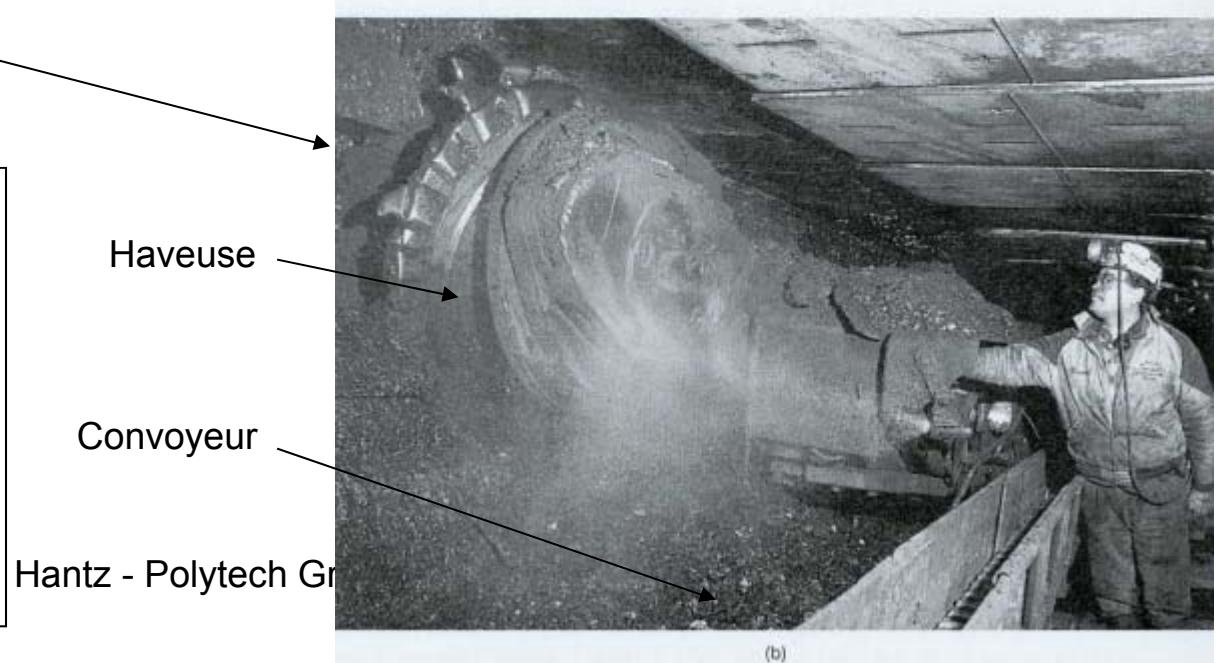
EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE



EXPLOITATION TOTALE PAR LONGUE TAILLE



Photos K. Bentham / B. Gallant, CANMET



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)



2012

19

CAVITES VOLCANIQUES (Ile de La Réunion)



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

2.1. CONVERGENCE

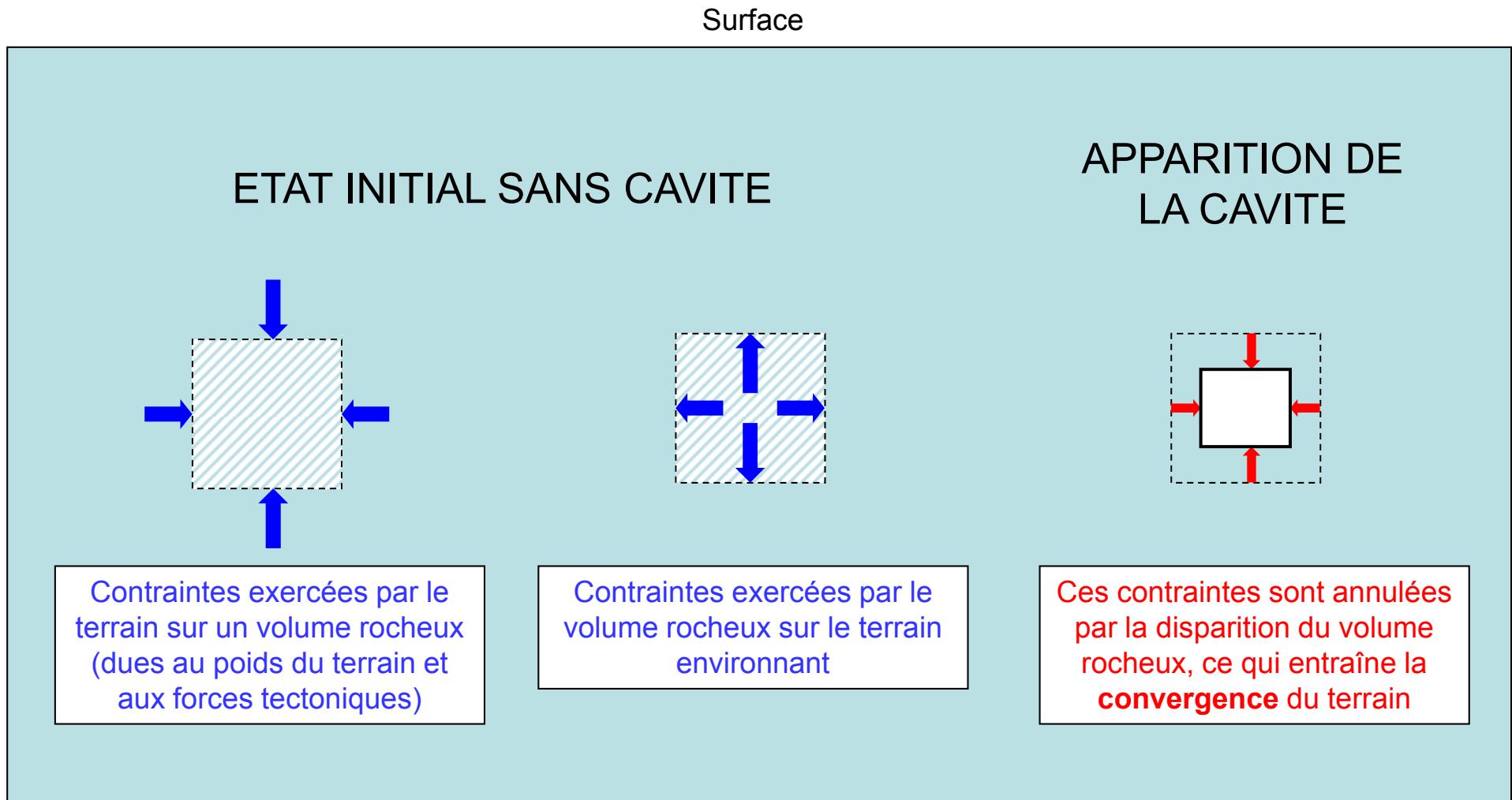
2.2. REPORT DE CHARGE ET RUPTURE EN COMPRESSION

2.3. RUPTURE DU TOIT EN FLEXION

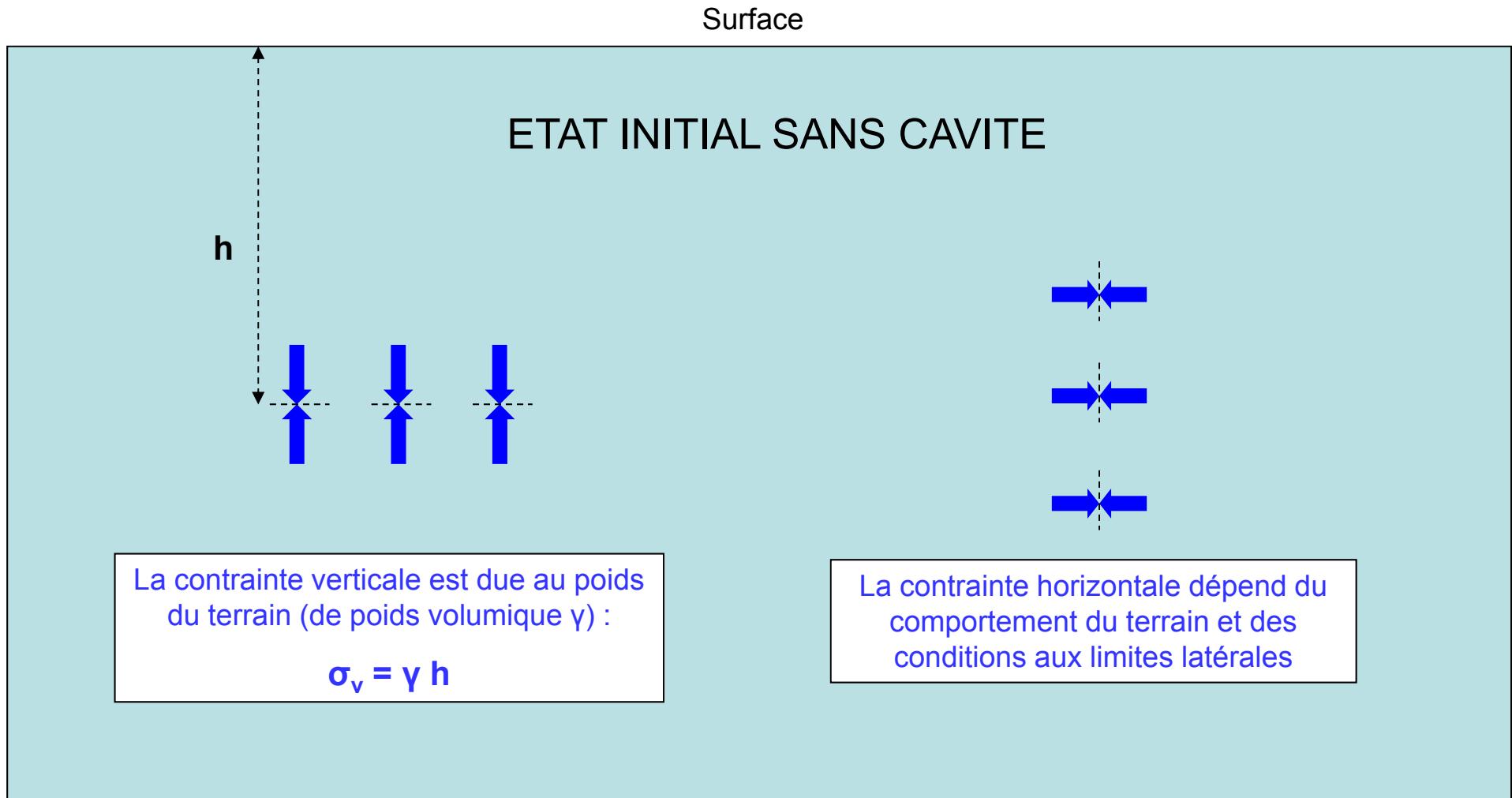
2.4. CHUTES DE BLOCS PREDECOUPEES

2.5. EVOLUTIONS POSSIBLES DES CAVITES

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

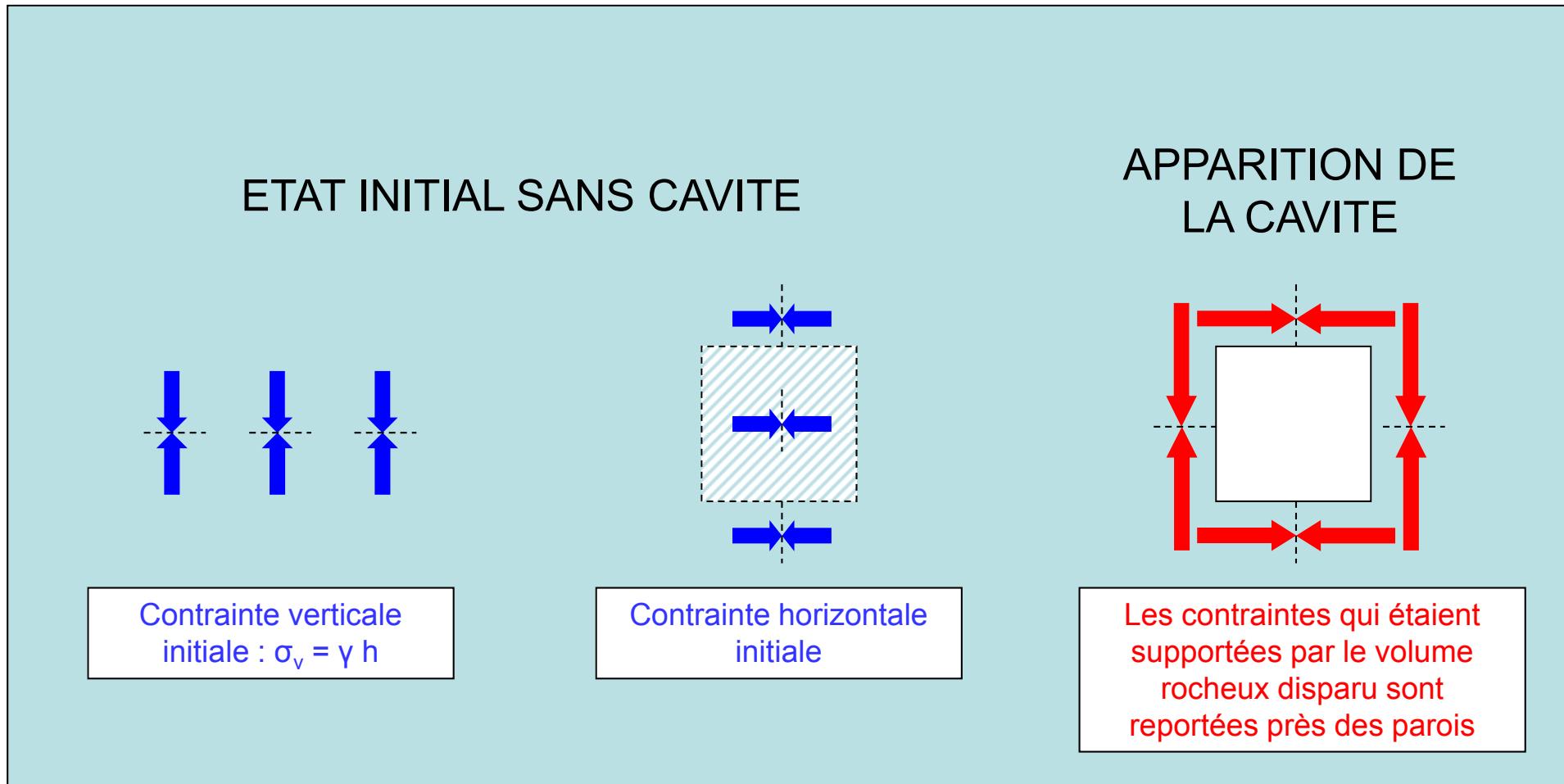


REPORT DE CHARGE DU A L'APPARITION D'UNE CAVITE DANS UN TERRAIN CONTINU



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

Surface

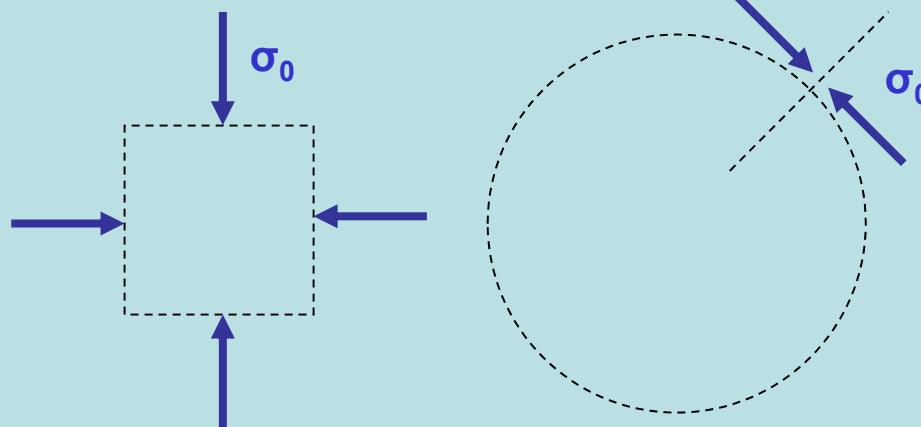


Remarque : pour une galerie circulaire, avec un état de contrainte initial hydrostatique, la contrainte parallèle à la paroi est le double de la contrainte régnant initialement dans le terrain;

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

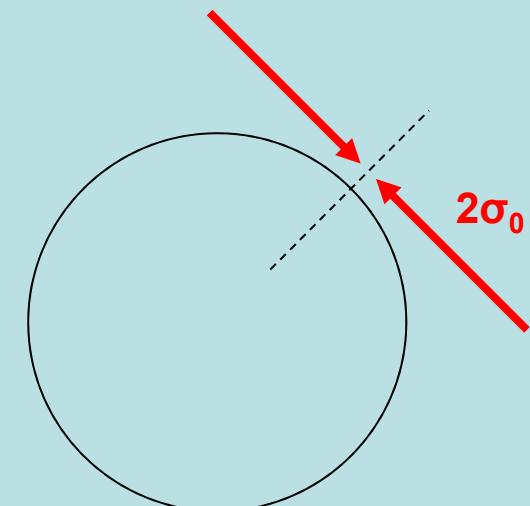
ETAT INITIAL SANS CAVITE

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

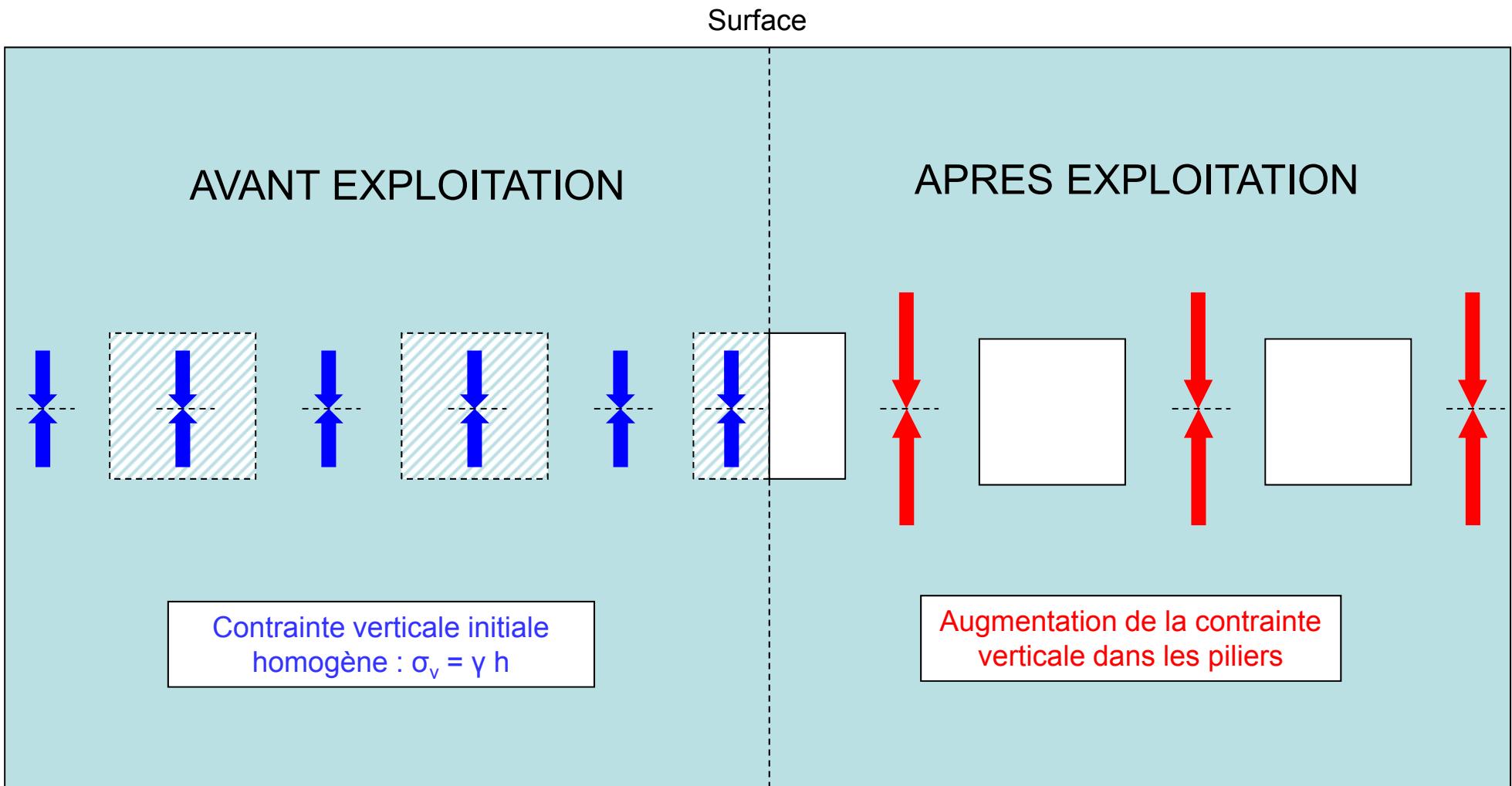


APPARITION DE LA CAVITE

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



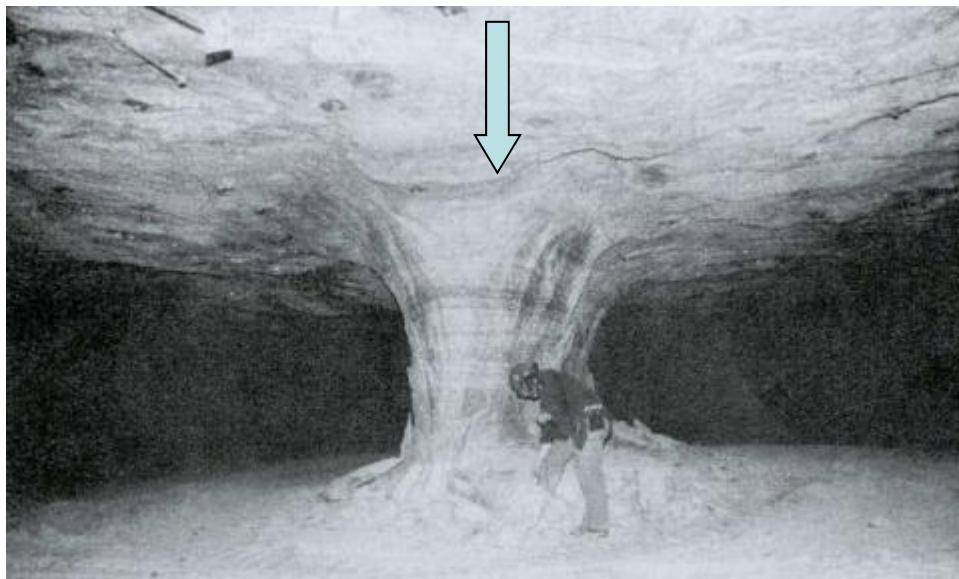
Force exercée sur l'ensemble de la surface exploitée : $\gamma h S_{\text{totale}} = \sigma_p S_{\text{piliers}}$

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

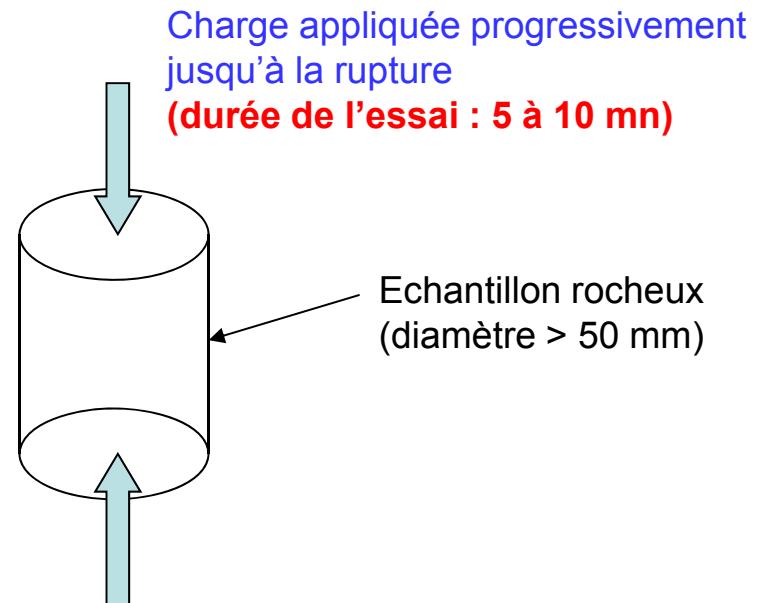
RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

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

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



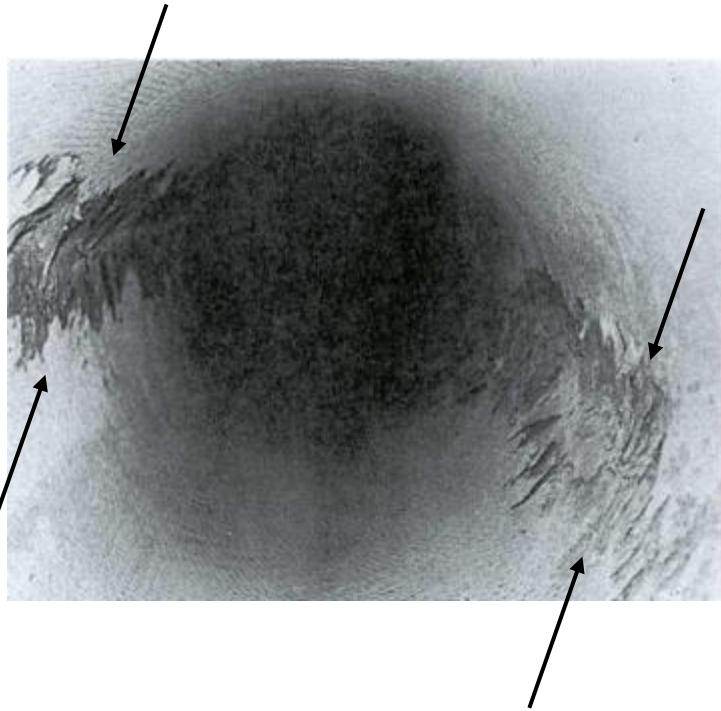
Pilier dans une mine de sel
(photo US National Committee on Tunnelling Technology)



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

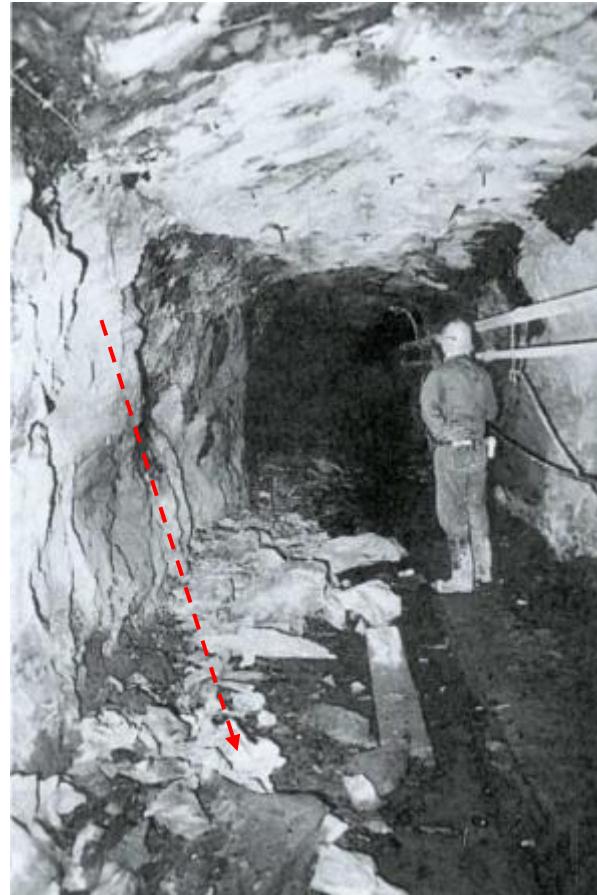
RUPTURE PAR EXCES DE COMPRESSION

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

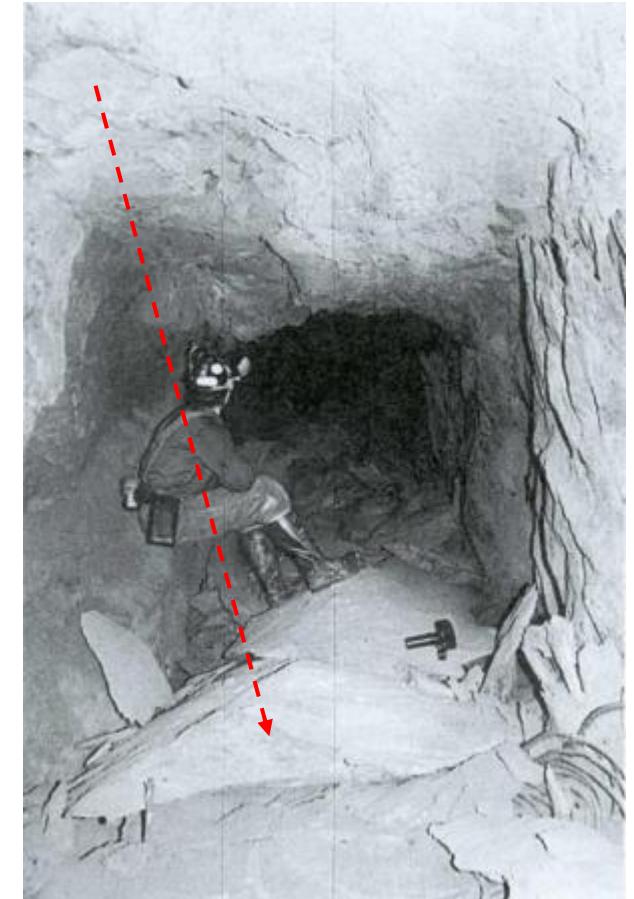


Ecaillage à la paroi d'un forage. Les flèches représentent la direction de compression maximale.

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



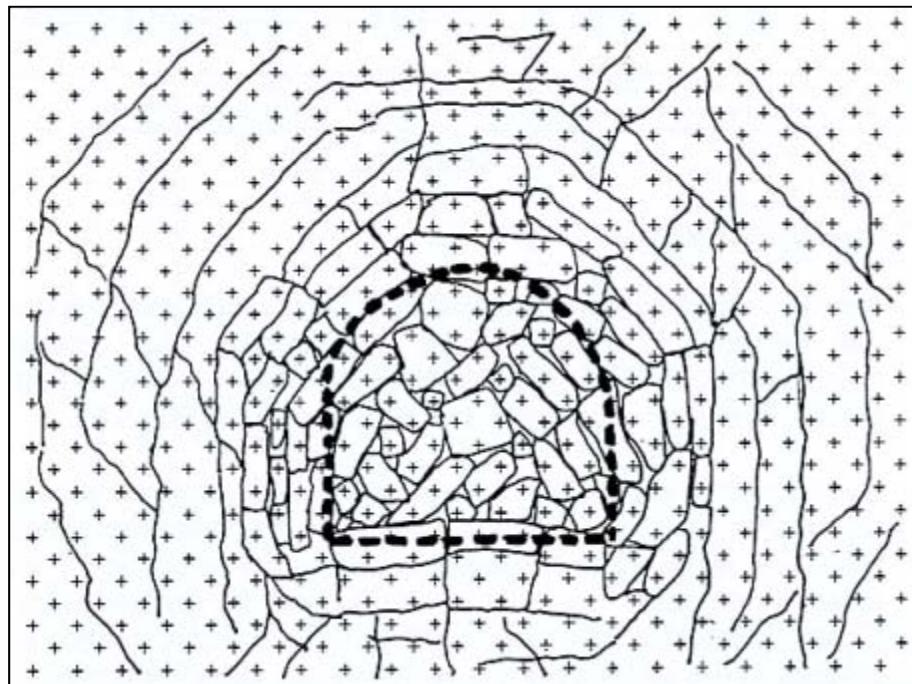
Ecaillage à la paroi d'une galerie dans de la quartzite à 1500 m de profondeur. L'excès de contrainte est dû à une chambre à gauche de la photo.



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.

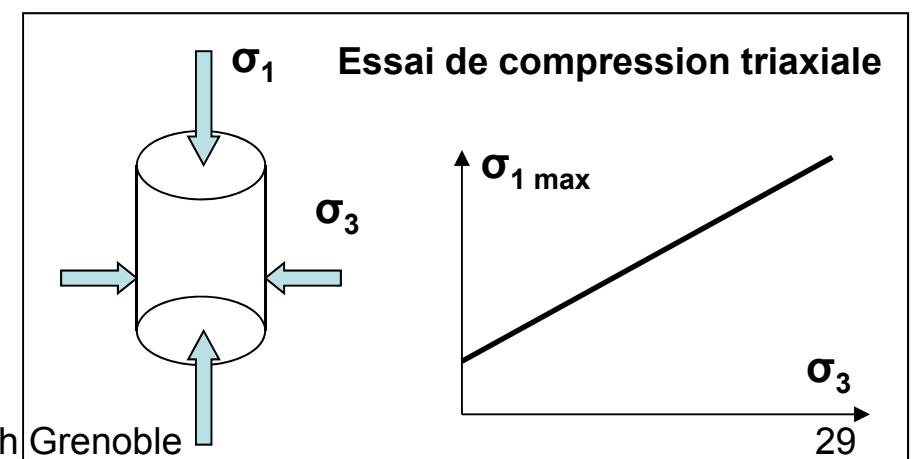


(extrait de Fine, le soutènement des galeries minières, Armines, 1993)

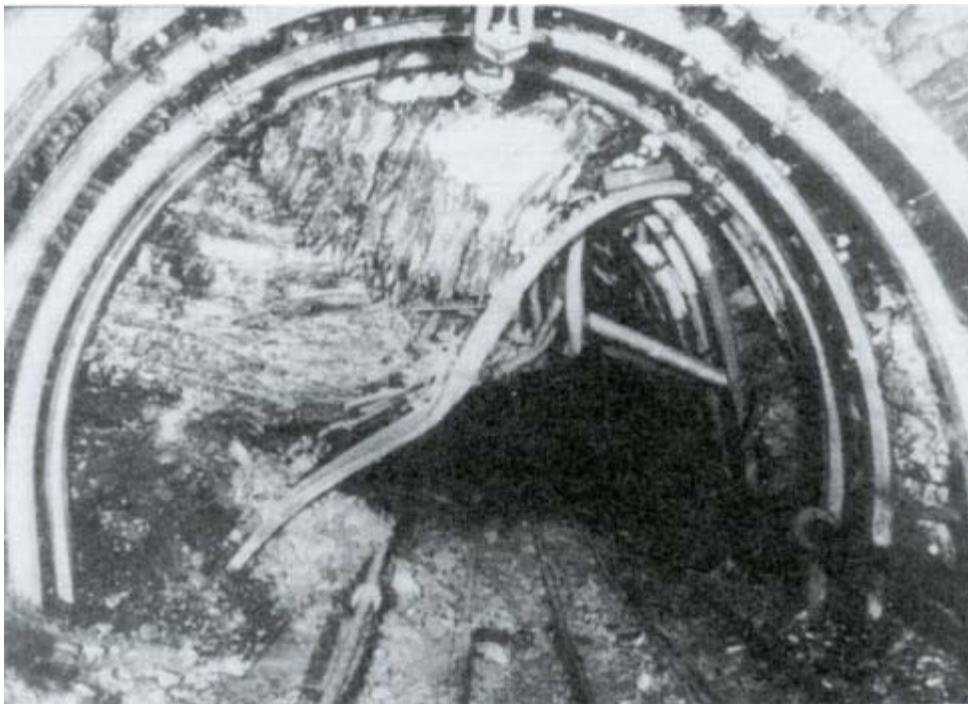
Une pression de confinement (σ_3) permet de limiter la zone en rupture et la convergence. Sur la photo à droite, cette pression est apportée par des boulons. La convergence verticale est tout de même de plus de 2 m.



(photo Mount Isa Mines)



RUPTURE PAR FLAMBAGE DANS UN MASSIF STRATIFIÉ



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

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

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

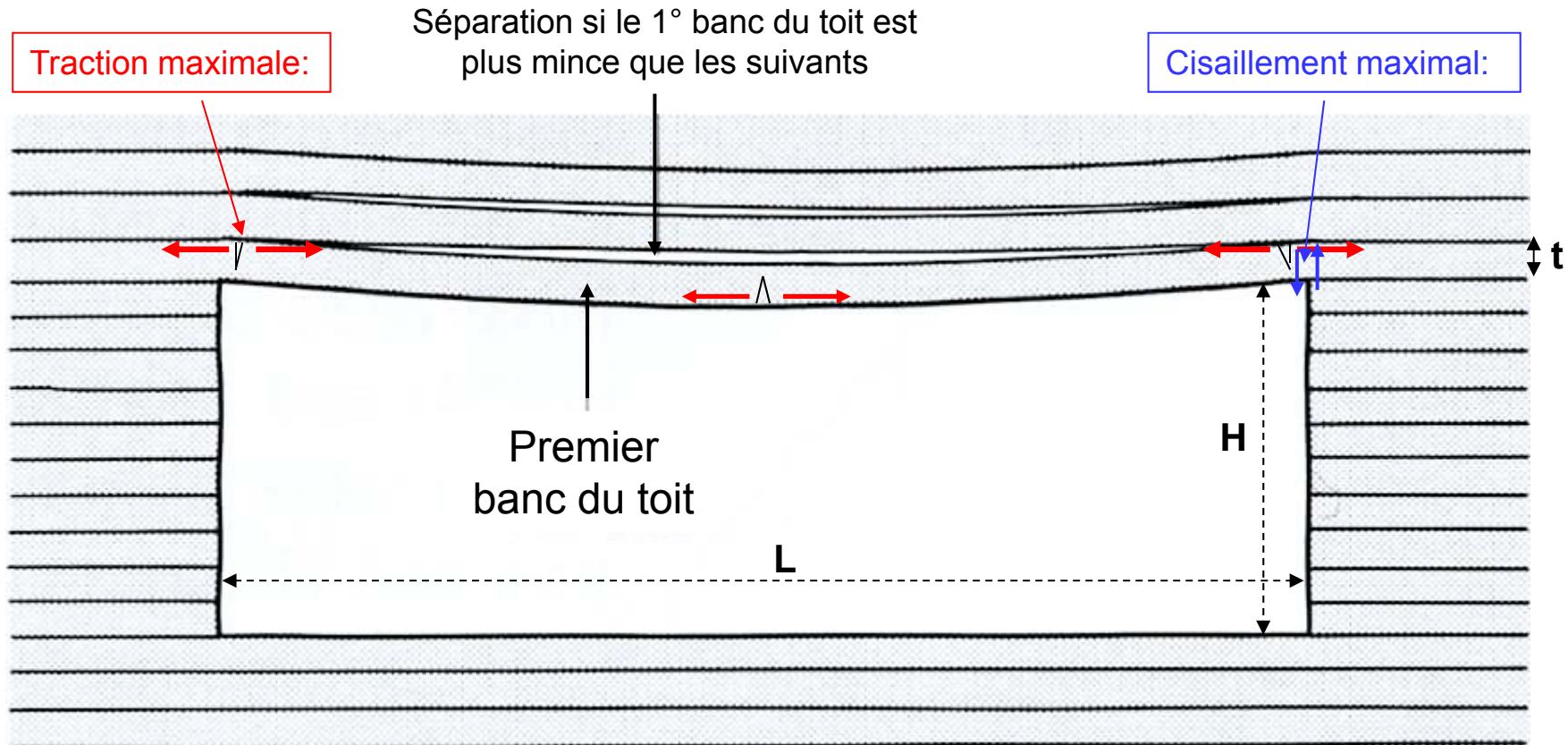
2012

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 STRATIFIÉ 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.

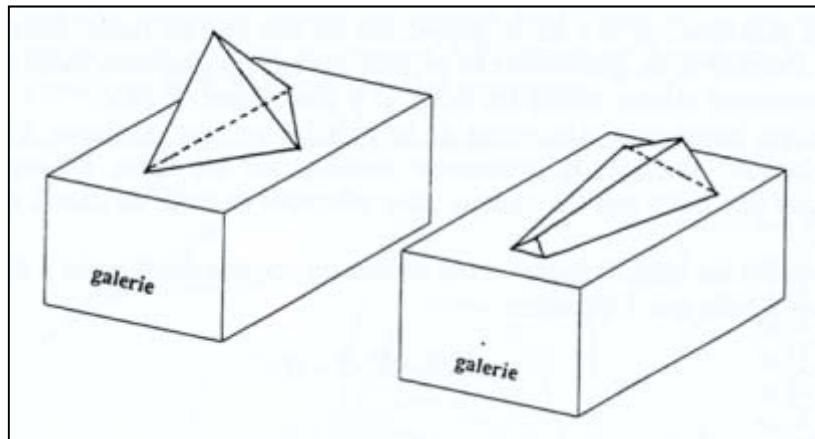
RUPTURE DU TOIT PAR FLEXION EN TERRAIN STRATIFIÉ HORIZONTALEMENT



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 PREDECoupes

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).

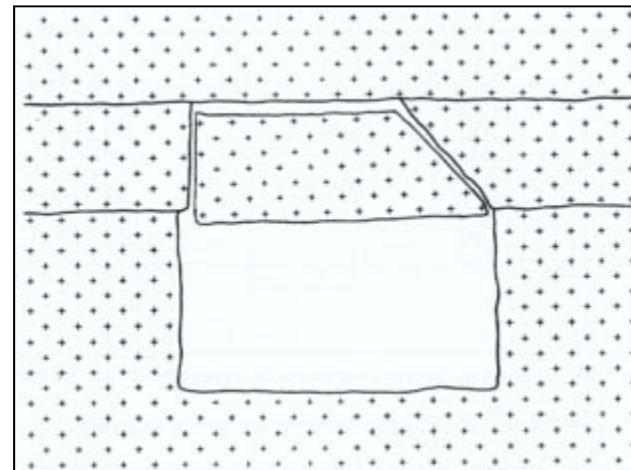


Formes usuelles de blocs dans un massif fracturé (tétraèdre et pentaèdre).

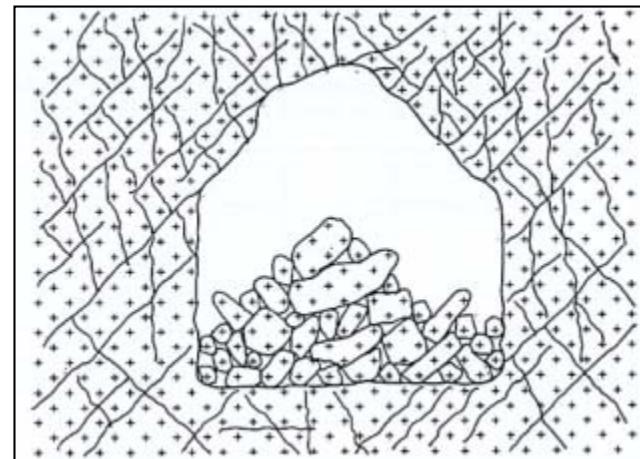
(schémas extraits de *Fine, le soutènement des galeries minières, Armines, 1993*)

2012

D. Hantz - Polytech Grenoble



Forme usuelle de bloc dans des bancs subhorizontaux



Eboulement dans un massif intensément fracturé

33

CHUTE DE BLOCS PREDECoupes



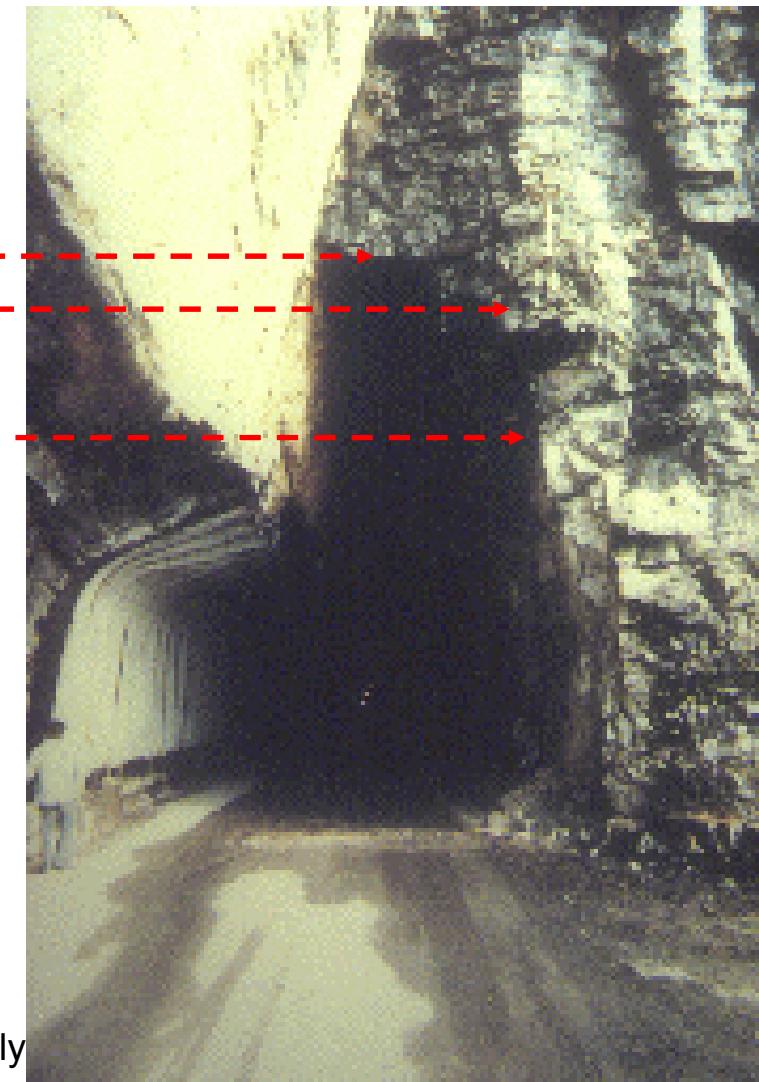
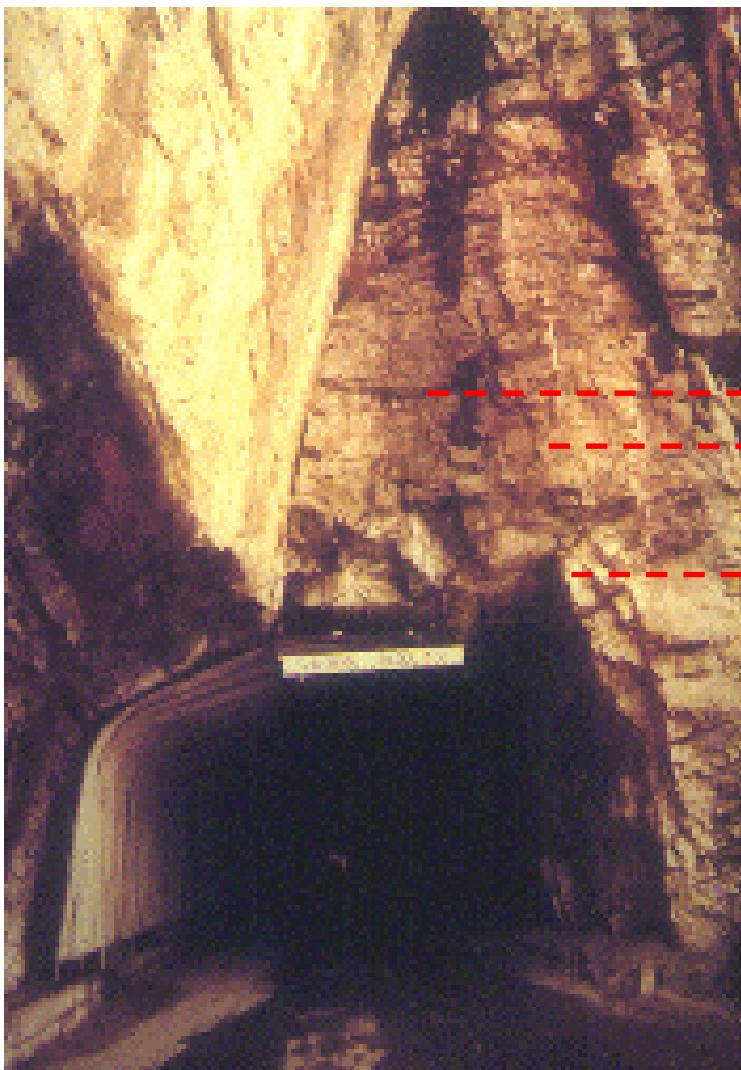
201

antz - Polytech C



34

CHUTE DE BLOCS PREDECoupes



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

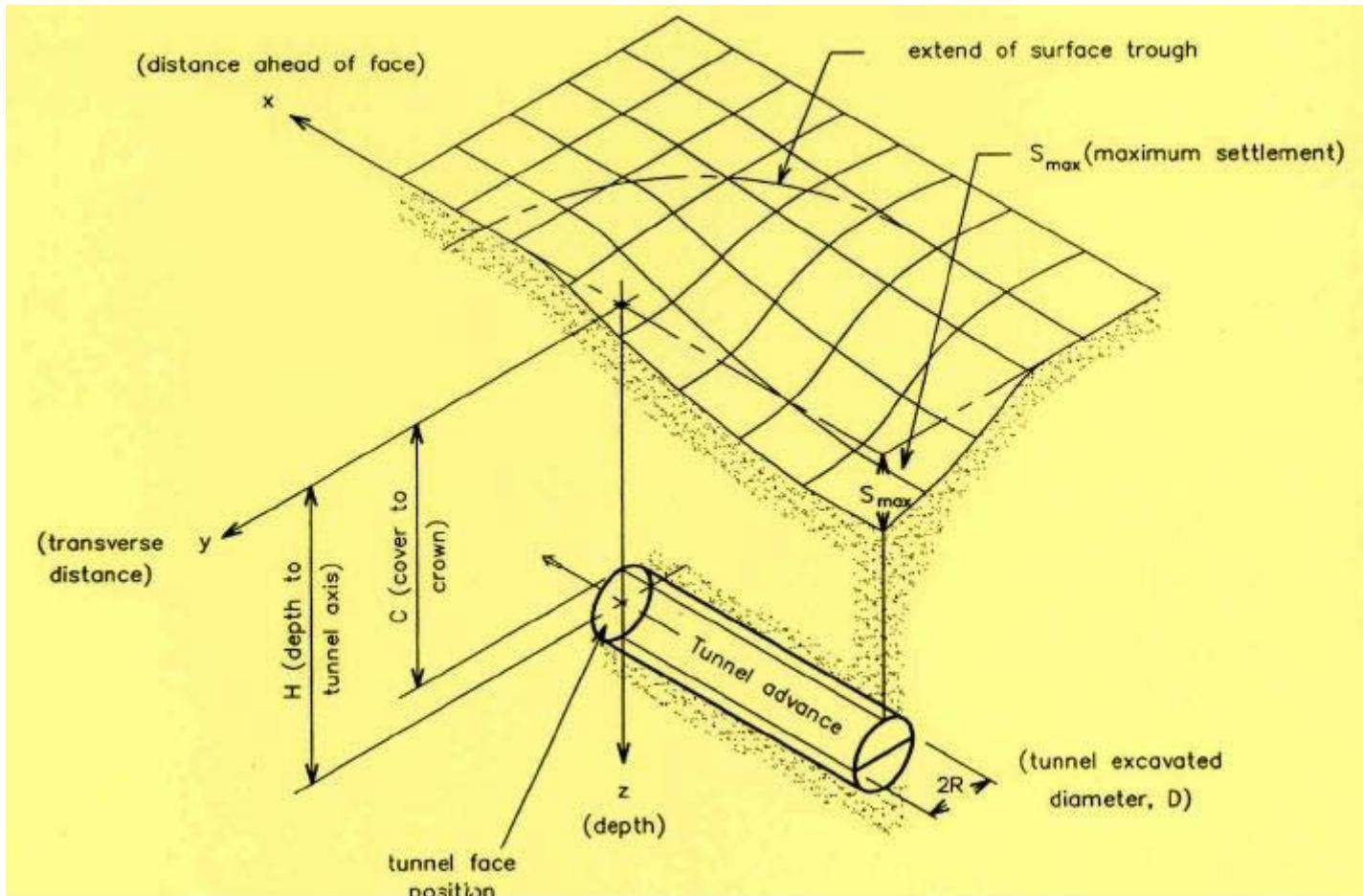
3. MOUVEMENTS DE TERRAIN EN SURFACE

3.1. TASSEMENTS

3.2. EFFRONDREMENTS

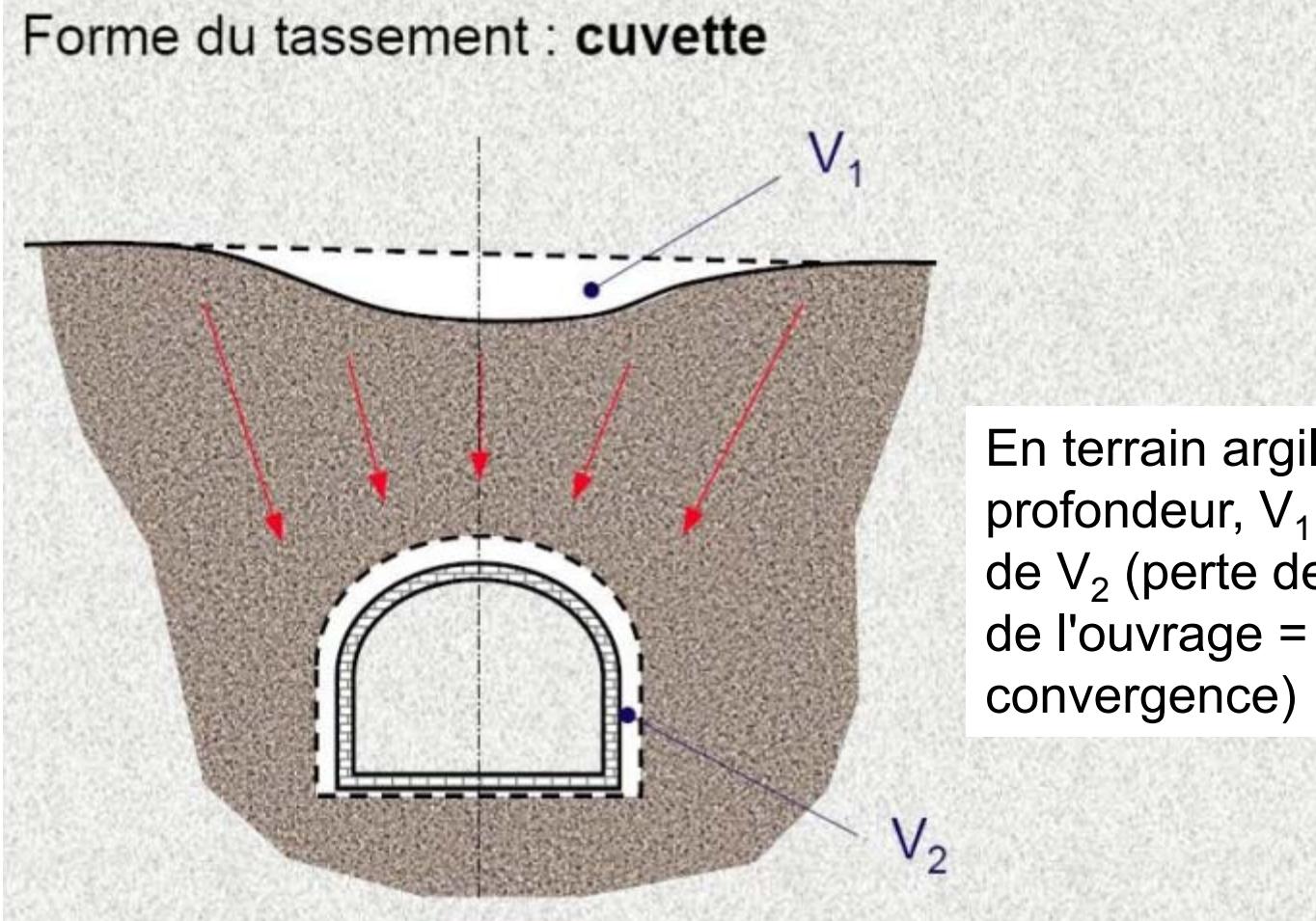
3.3. AFFAISSEMENTS

TASSEMENTS EN SURFACE



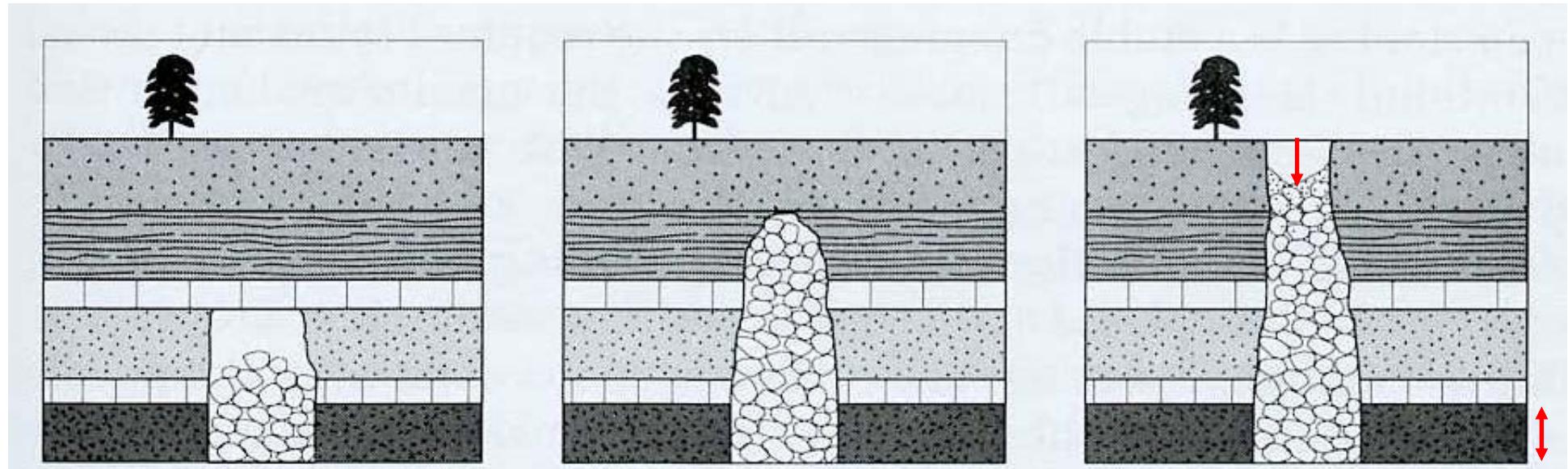
TASSEMENTS EN SURFACE

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

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.)

Stabilisation grâce au foisonnement

Propagation de la rupture jusqu'à la surface

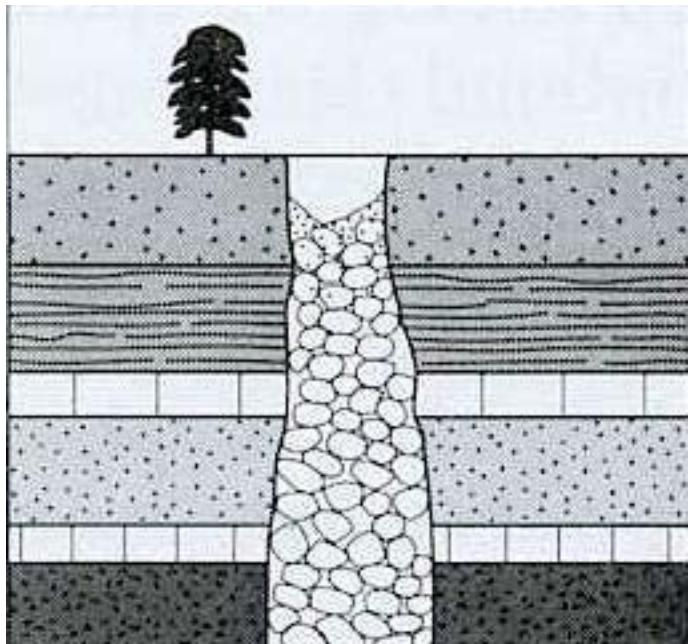
Propagation

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.

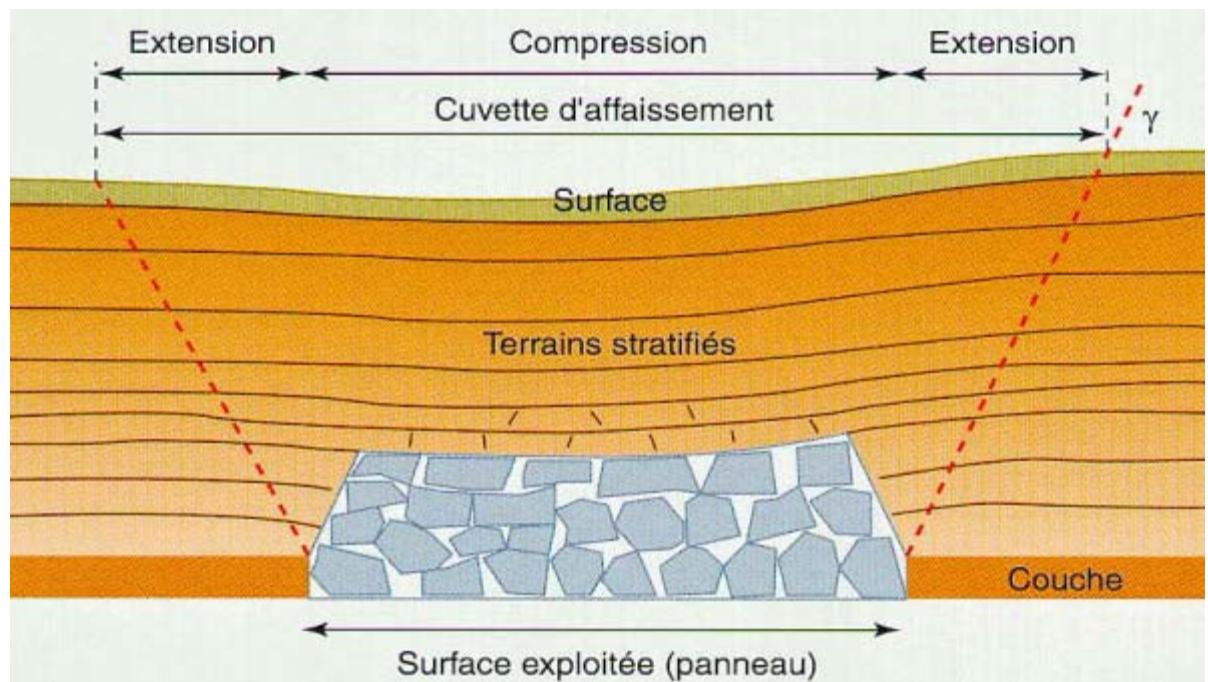
MOUVEMENTS DE SURFACE DUS À DES CAVITÉS

Effondrement
brutal et localisé

Affaissement
progressif et continu



Formation d'un fontis



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



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



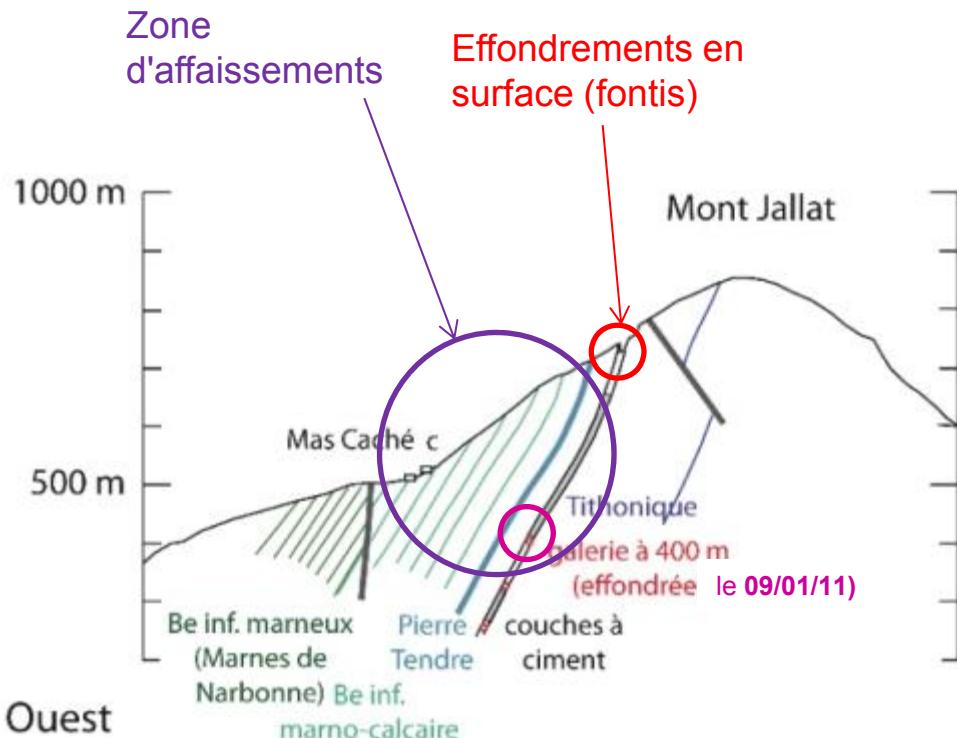
2012

D. Hantz - Polytech Grenoble

Diamètre : 150 m
Profondeur : 50 m

42

Effondrements et affaissements au Mont Jalla



Effondrements et affaissements au Mont Jalla

Effondrement de 1987, réactivé en 2011

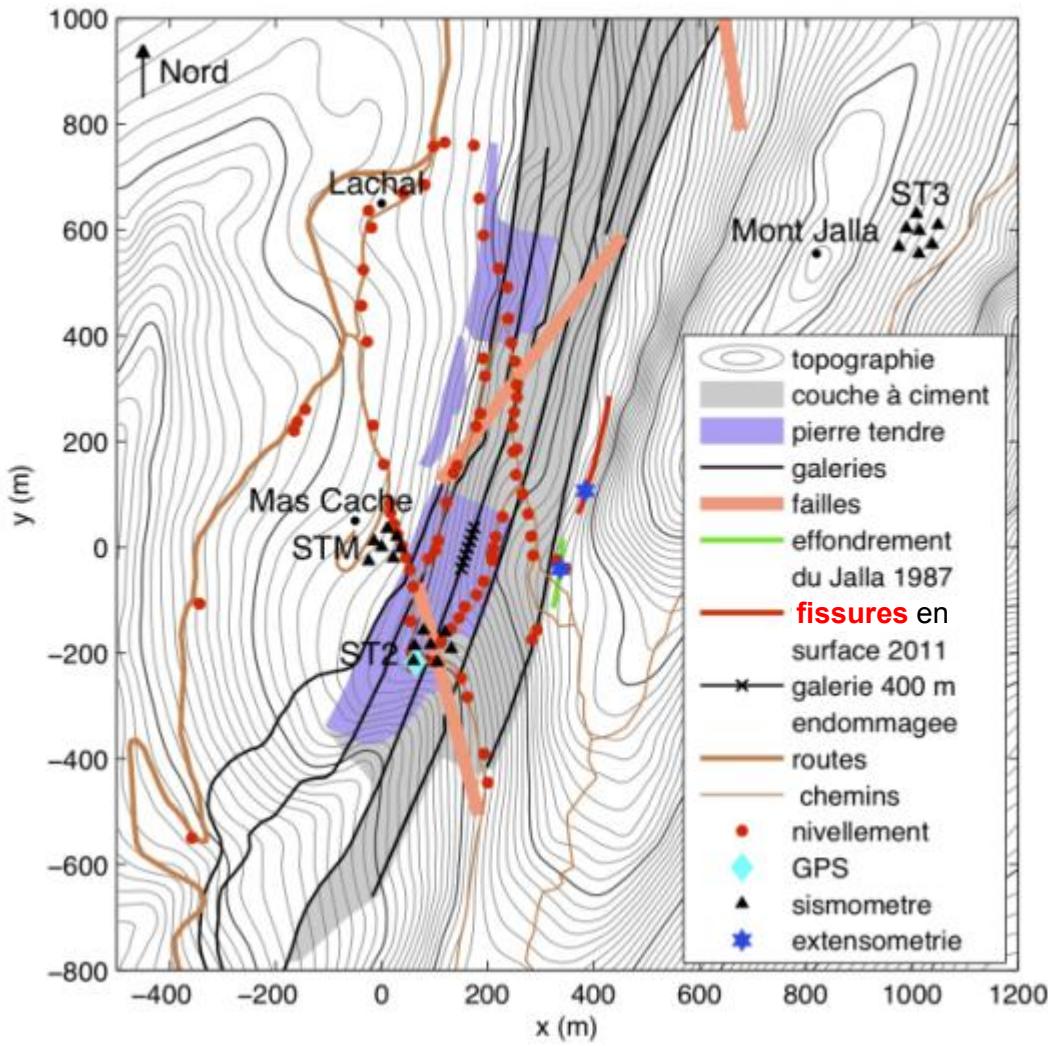


Effondrement de janvier 2011



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 DÛ A UNE CAVITE DE DISSOLUTION DANS DU GYPSE

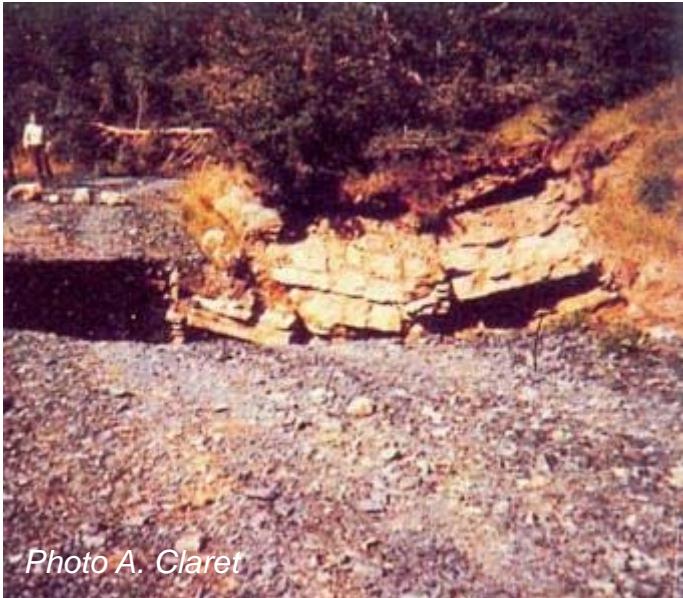


Photo A. Claret



Photo L. Besson

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.

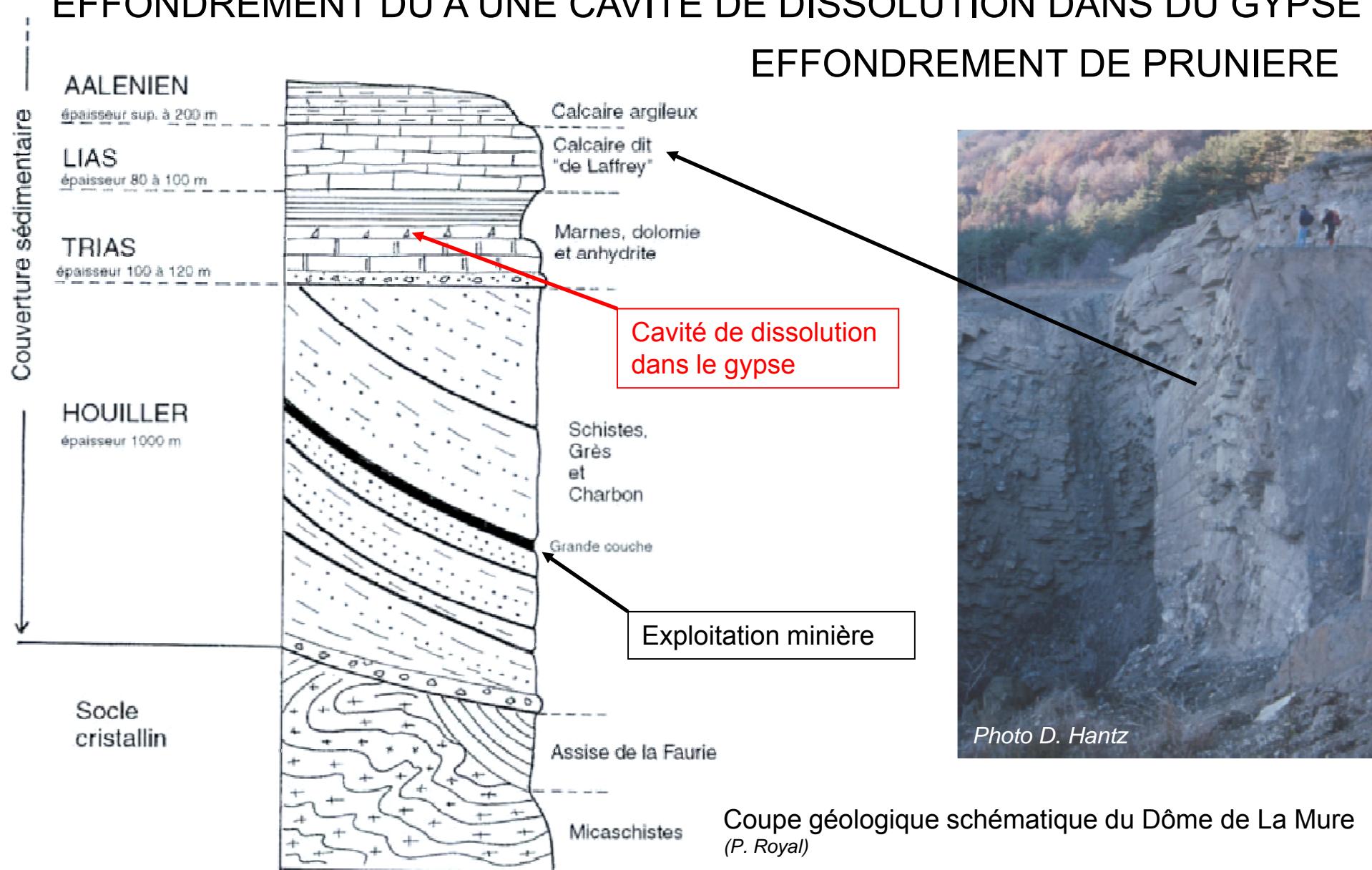


Photo D. Hantz

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

EFFONDREMENT DÛ A UNE CAVITE DE DISSOLUTION DANS DU GYPSE

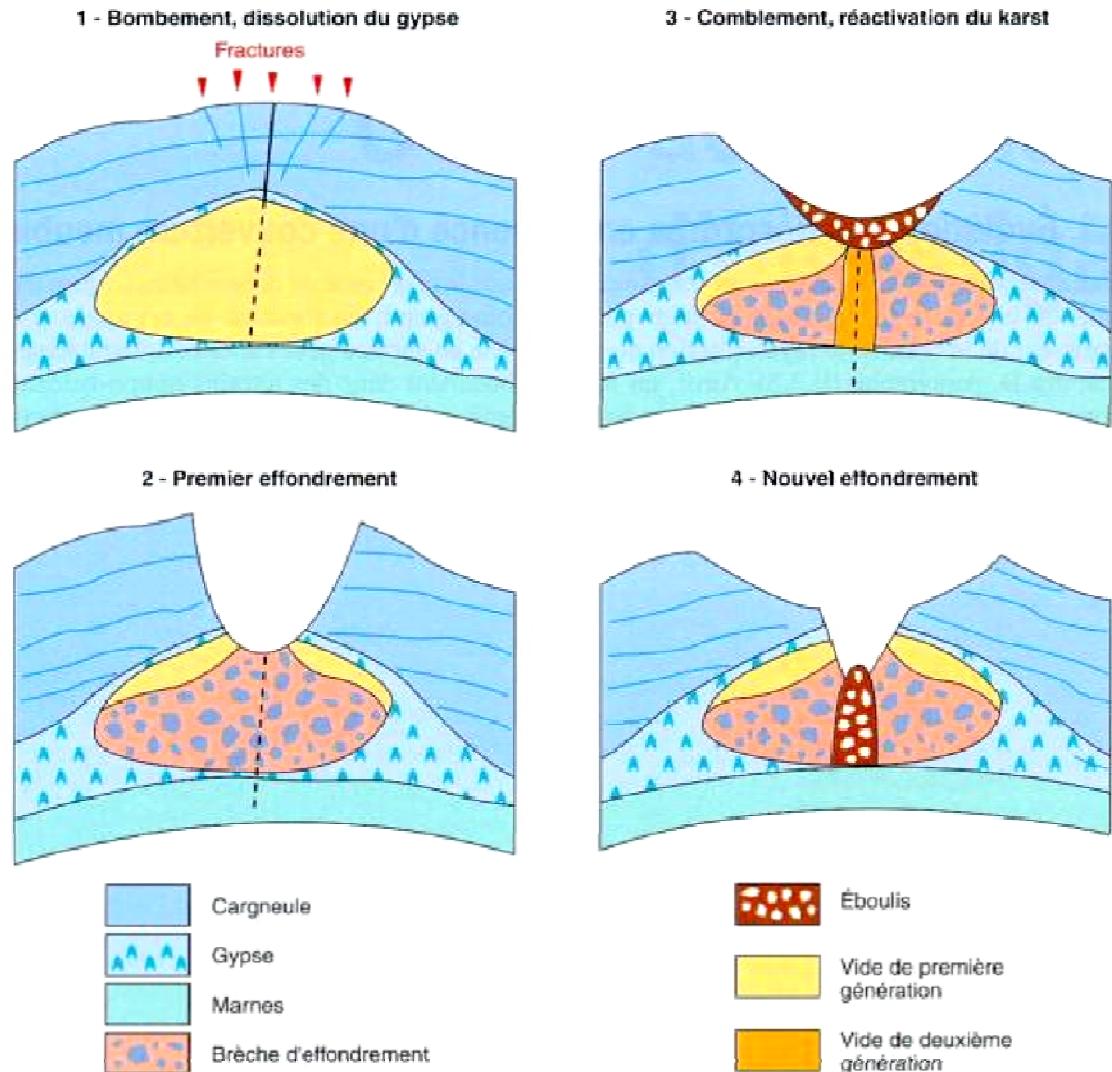
EFFONDREMENT DE PRUNIERE



EFFONDREMENT DÛ 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).



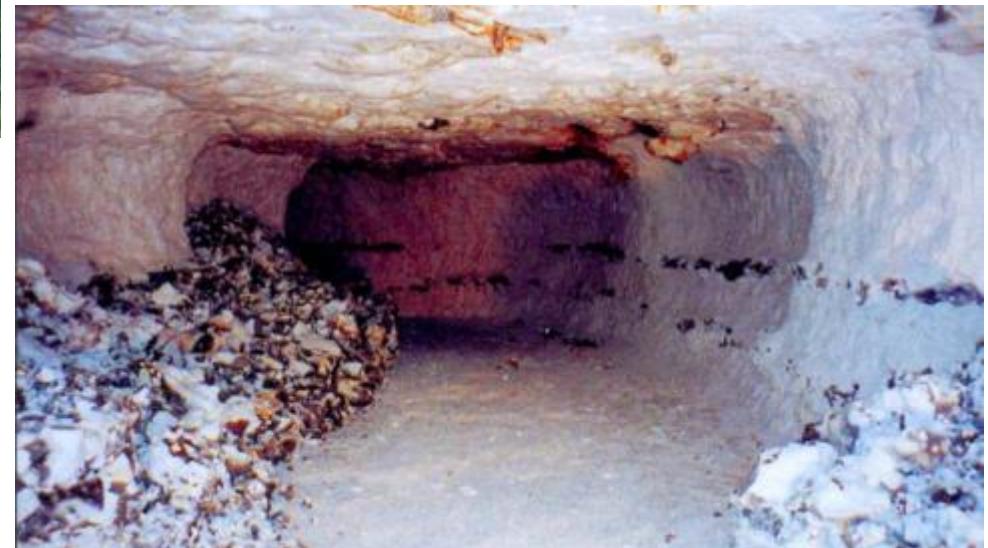
Hypothèse d'évolution de la cavité (d'après Pothérat, 1977)
D. Hantz - Polytech Grenoble

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)

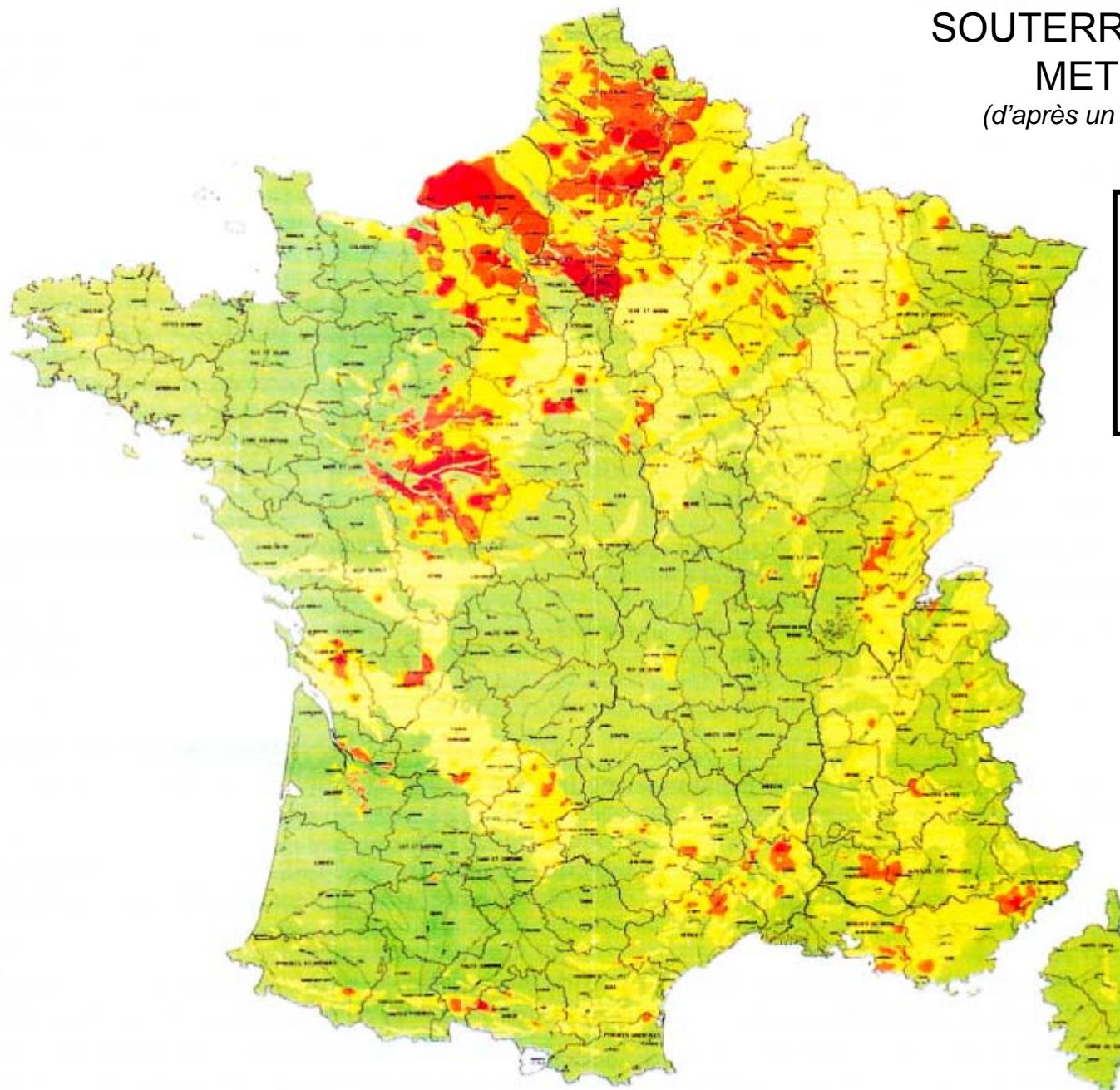
On estime à plus de 100 000 le nombre de marnières dans les deux départements de l'Eure et de la Seine Maritime (exploitées depuis plusieurs siècles pour la pierre à bâtir et l'amendement des terres)



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)



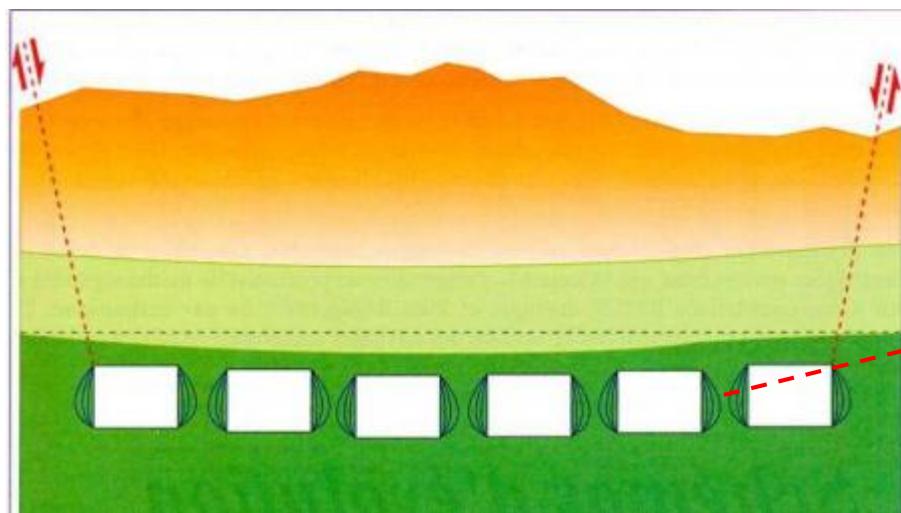
Risque associé : ces dernières années, en France, 1 à 2 décès par an ont été causés par des phénomènes d'effondrement
(Les mouvements de terrain, MEDTL, 2011)

Niveau de l'aléa

- Very high risk (Très fort (TF)): Red
- High risk (Fort (F)): Orange
- Medium risk (Moyen (M)): Yellow
- Low risk (Faible (f)): Light yellow
- Very low risk (Très faible à nul): Green

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

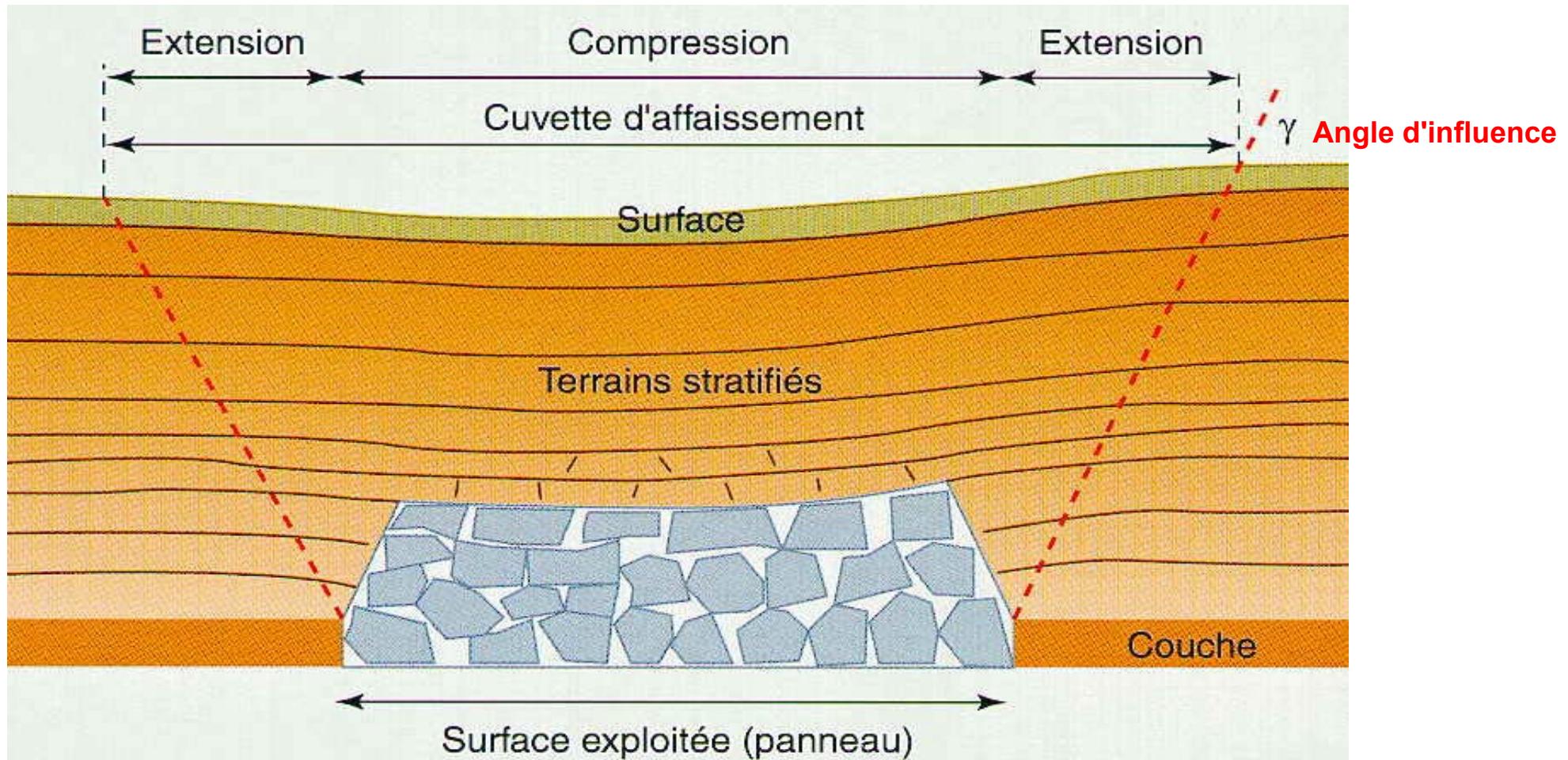
La catastrophe de Clamart



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.

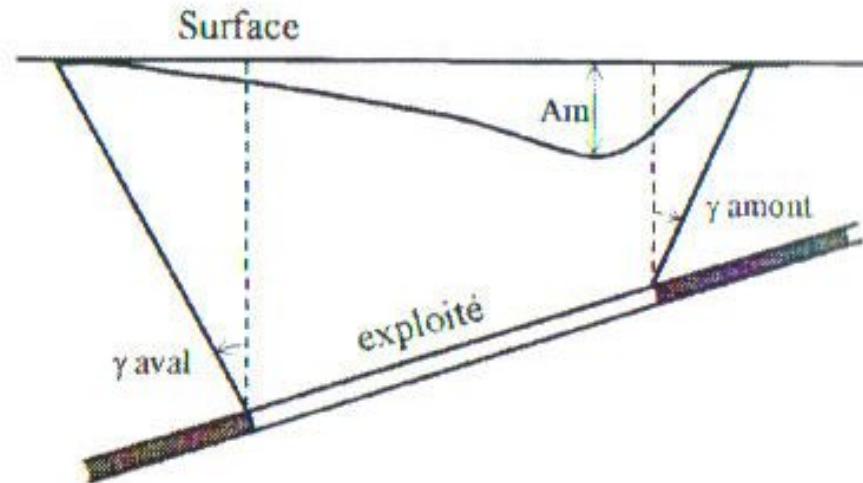
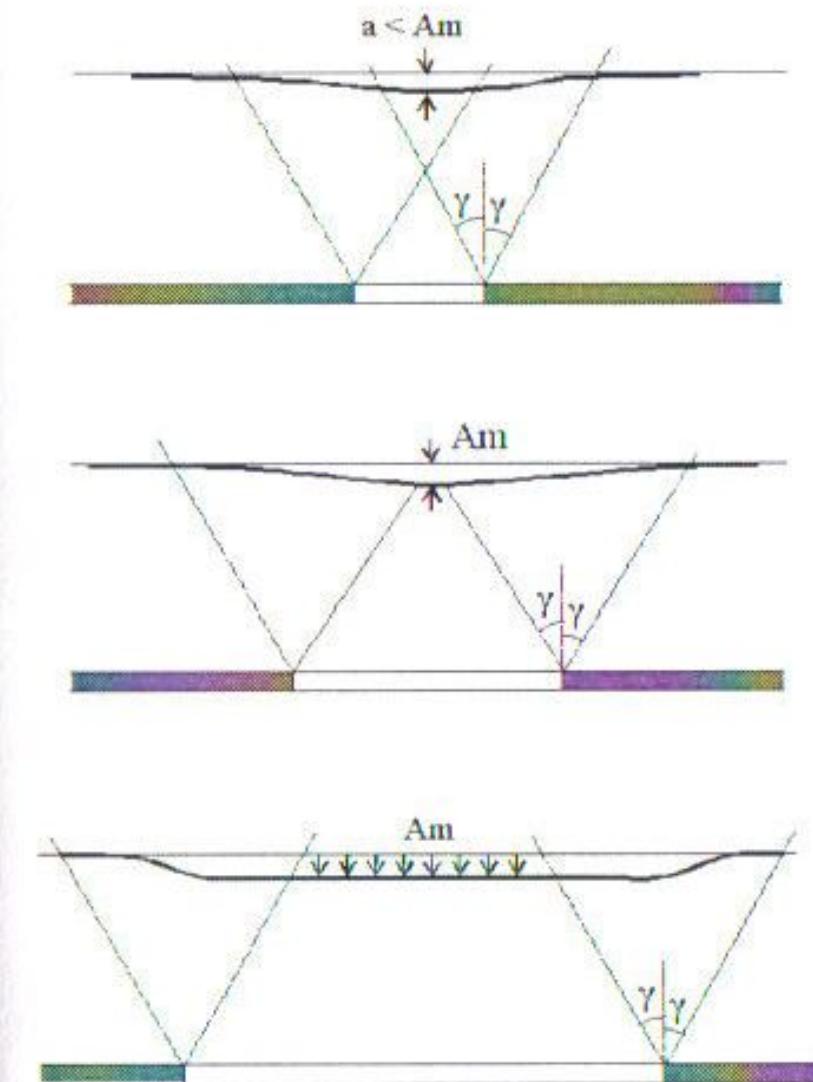
(Les mouvements de terrain, MEDTL, 2011)

AFFAISSEMENTS



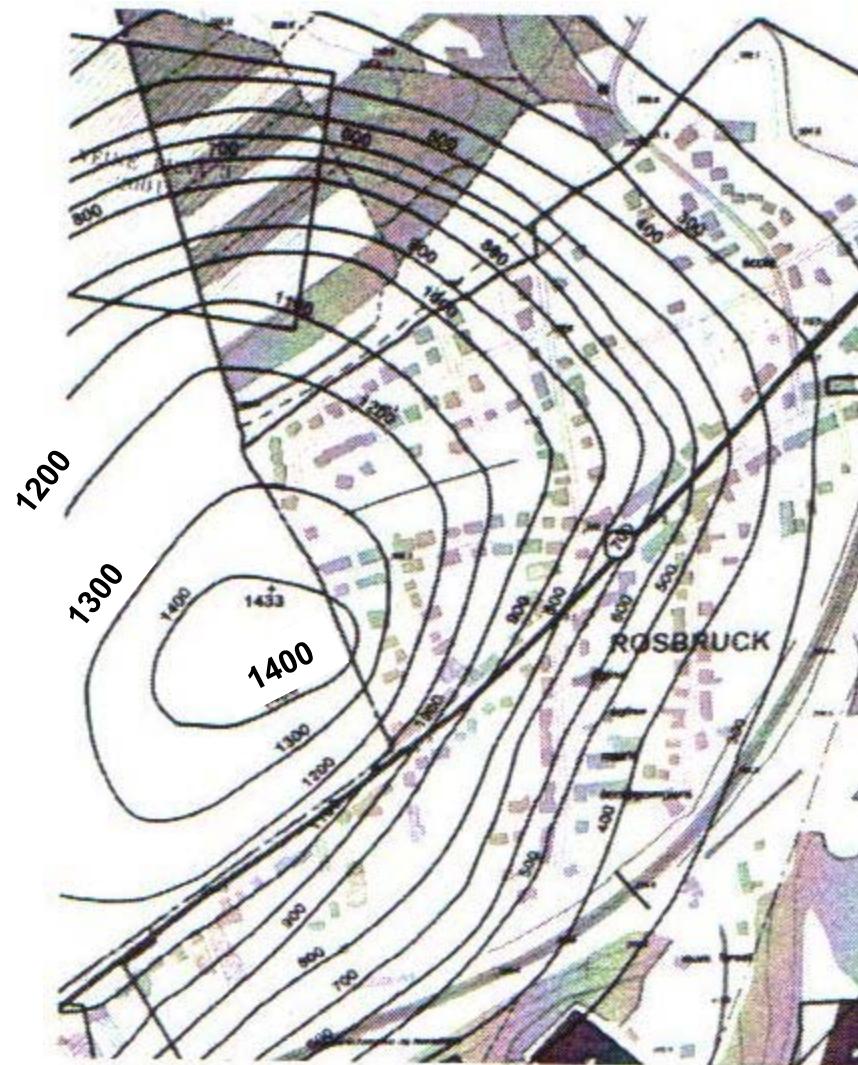
Affaissement du à une exploitation minière (d'après document INERIS)

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



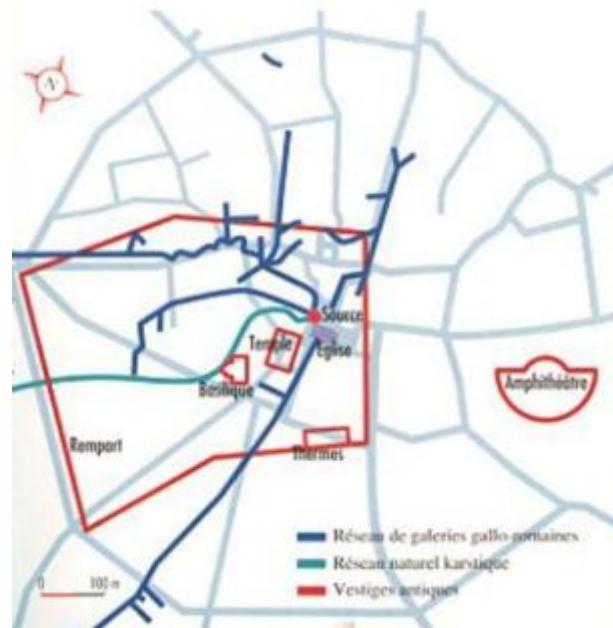
Courbes d'égal affaissement sous la ville de Rosbruck (en cm)

L'ART DE L'INGENIEUR

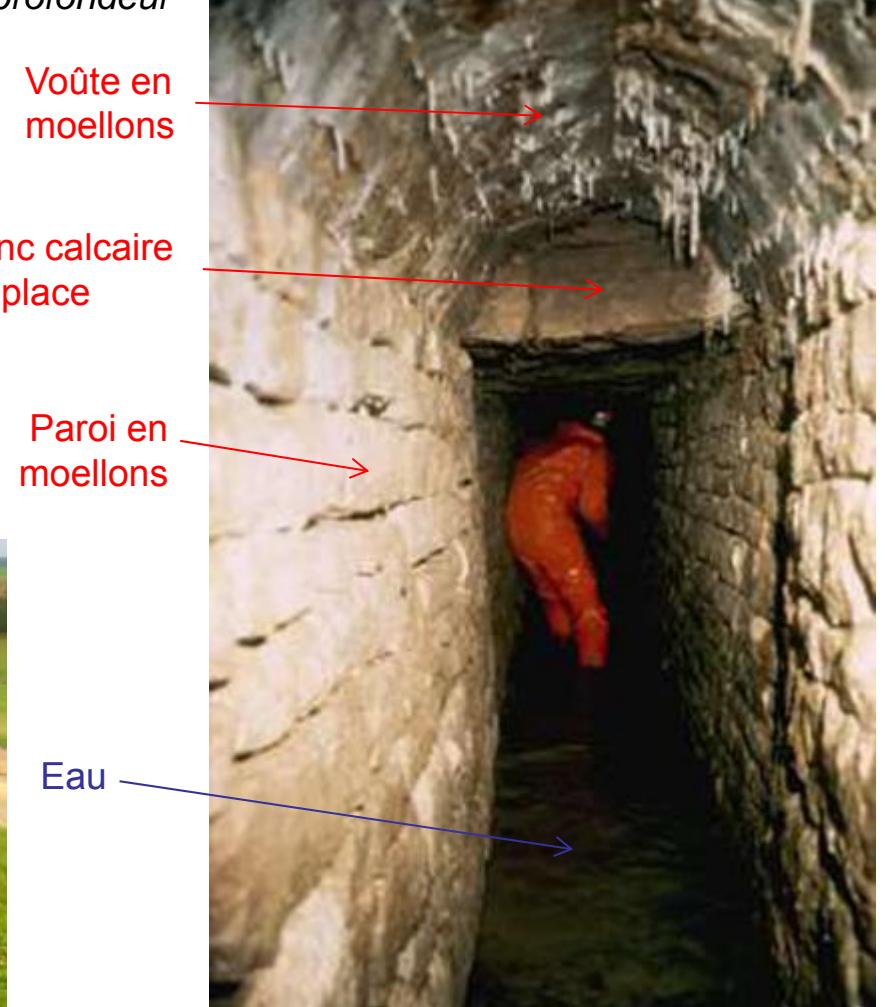
Sanctuaire gallo-romain de Grand (Vosges)

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

Adaptation aux conditions géologiques



D. Hantz - Polytech Grenoble



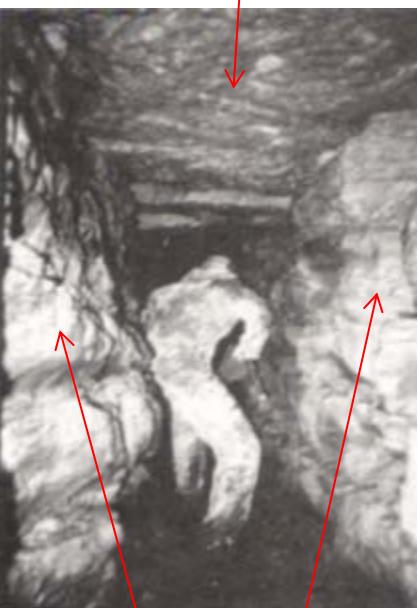
L'ART DE L'INGENIEUR

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 piédroits 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

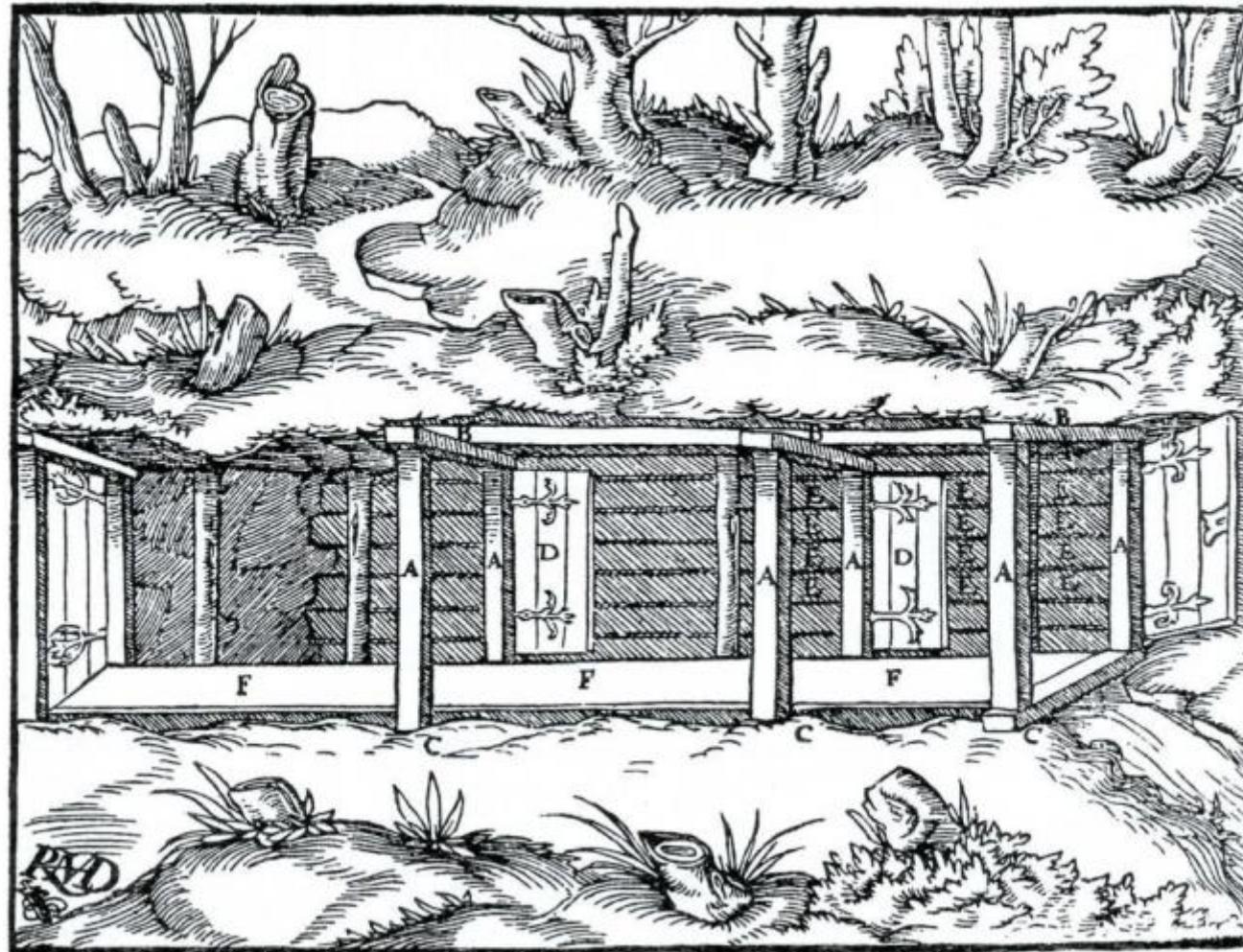


L'ART DE L'INGENIEUR

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 | |
| 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 Hw < 10 m | eau sous forte pression Hw 10 à 100 m | |
| | Note | 15 | 10 | 7 | 4 | | 0 | |

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° |
|---|------------------|---------------------------|------------------|---|------------------|---------------------------------|
| Avancement avec pendage | | Avancement contre pendage | | | | indépendamment de l'orientation |
| 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 | Excellent | Bonne | Moyenne | Mauvaise | Très mauvaise |

CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX (RMR)

*Tableau 1.I.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 |