Avec le soutien du Fonds européen de développement régional

Avec le soutien de la Wallonie

Orateur : Michel Dubois
Université de Lille / LGCgE

RISSC
Les mécanismes de dégradation d'une carrière souterraine

Introduction

1. Redistribution des contraintes naturelles :
   - augmentation des contraintes dans les piliers
   - flexion du toit et du mur de la carrière
2. Sensibilité des roches à des agents externes :
   - eau (surface, nappe phréatique)
   - air (gaz, conditions d'oxydo-réduction)
   - variations météorologiques (température)
   - activités anthropiques de surface
3. Besoin de prédire le comportement d'une cavité souterraine

Approche générale

La prévision du comportement d'une cavité souterraine dépend de plusieurs approches :

Observations : inspection
(Gaëtan Cheppe)

Instrumentation
(Jean-Marc Watelet)

Expérimentation, modélisation
(T. Georgieva, F. Descamps)

Compréhension des mécanismes

Interreg France-Wallonie-Vlaanderen
UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE
RISSC

Facteurs d'évolution (1)

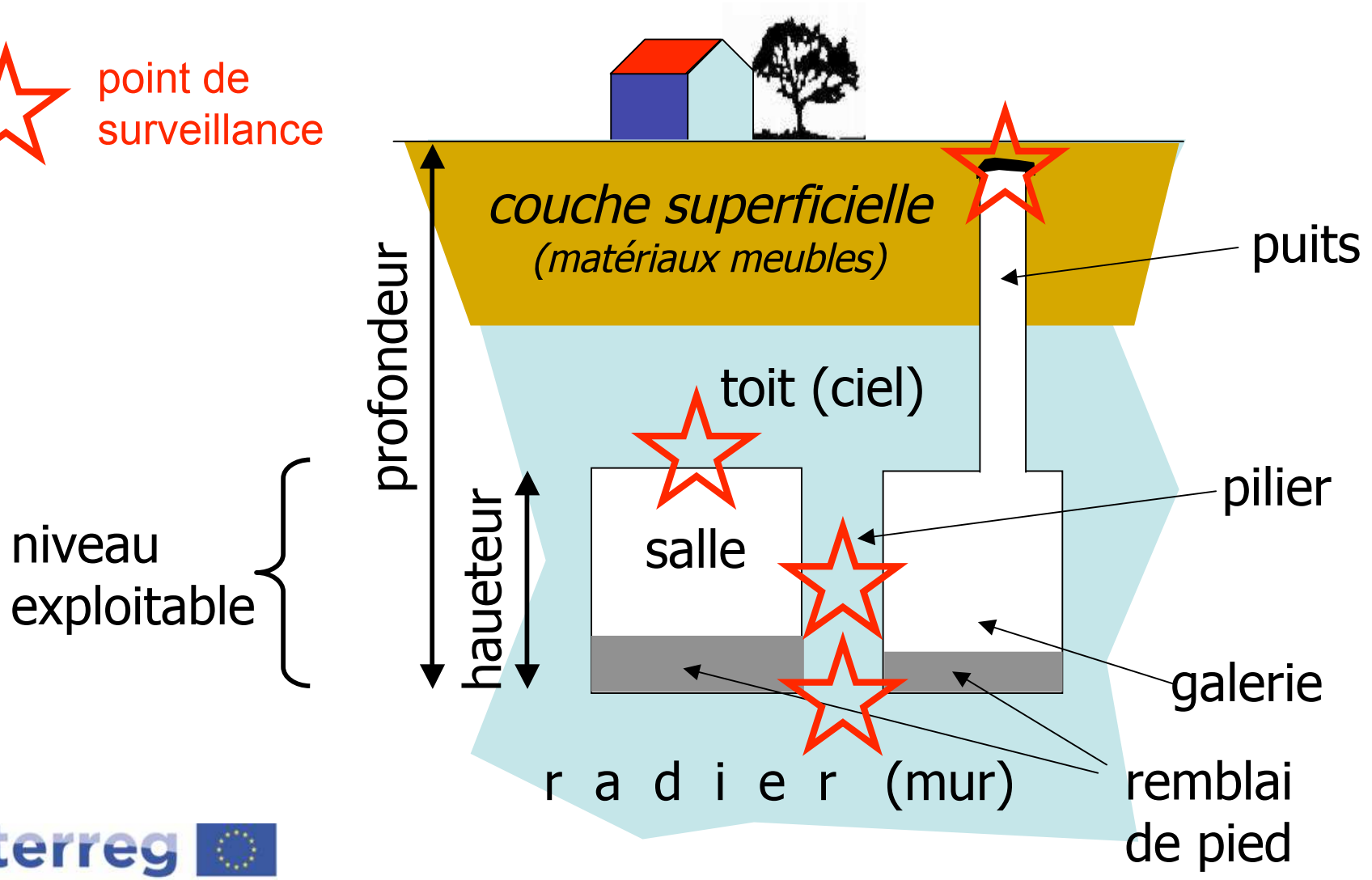
1. Caractéristiques du massif rocheux
   - propriétés mécaniques : compétence de la roche
   - stratigraphie (alternances, variations de faciès)
   - état de la fracturation (diaclases, failles, ...)
   - géométrie : profondeur, pendage
   - hydrogéologie
   - topographie
2. Facteurs bio-physico-chimiques :
   - physiques : nature des contraintes
   - chimiques : altération des matériaux (humidité)
   - biologiques

Facteurs d'évolution (2)

3. Techniques d'exploitation et histoire :
   - ancienneté et durée de l'exploitation ; reprises
   - techniques d'exploitation
   - importance de l'exploitation : défruitement (% surfacique d'exploitation)
   - consolidations anciennes
4. Facteurs extérieurs :
   - urbanisation, activités de surface
   - interactions avec les eaux de surface
   - accidents

Les points de faiblesse

point de surveillance



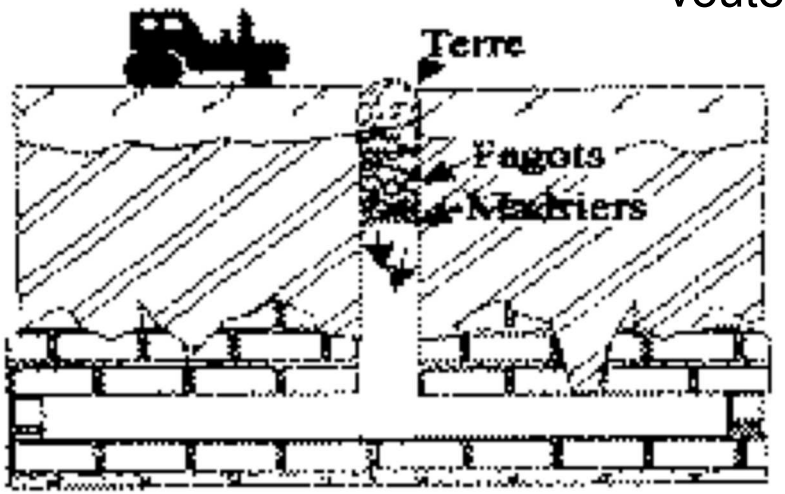
Nature des accidents

1. Progressifs, brutaux
2. Accidents localisés :
   - ruptures de voûtes de catiches
   - rupture du toit (chute de toit, remontée de voûte, fontis)
   - rupture de piliers
   - effondrement des voûtes de chambres
   - rupture du radier (poinçonnement)
3. Accidents généralisés

Ruptures ponctuelles

1. Effondrement d'un bouchon de puits et débourrage
2. Pose de grillages autour des têtes de catiches (prévention des accidents)

Effondrement de la voûte



Bouchon de puits

Ouverture d’un puits

Ouverture en surface d’un trou de 1 à 2 m de diamètre

Amorce de l’ouverture d’un puits

Ouverture d’un puits

Ruptures ponctuelles

1. Chute de toit : délitement de dalles du ciel
2. Ciel insuffisamment solide (+ diaclases)
3. Localisés à l'intersection des galeries où les portées sont les plus importantes
4. Evolution vers les processus de remontée de voûte et fontis

Chute de toit

Remontée de voûte et fontis

1. Remontée de voûte :
   – éboulement initié au ciel de la carrière, ce qui entraîne la formation d'un vide qui remonte progressivement vers la surface

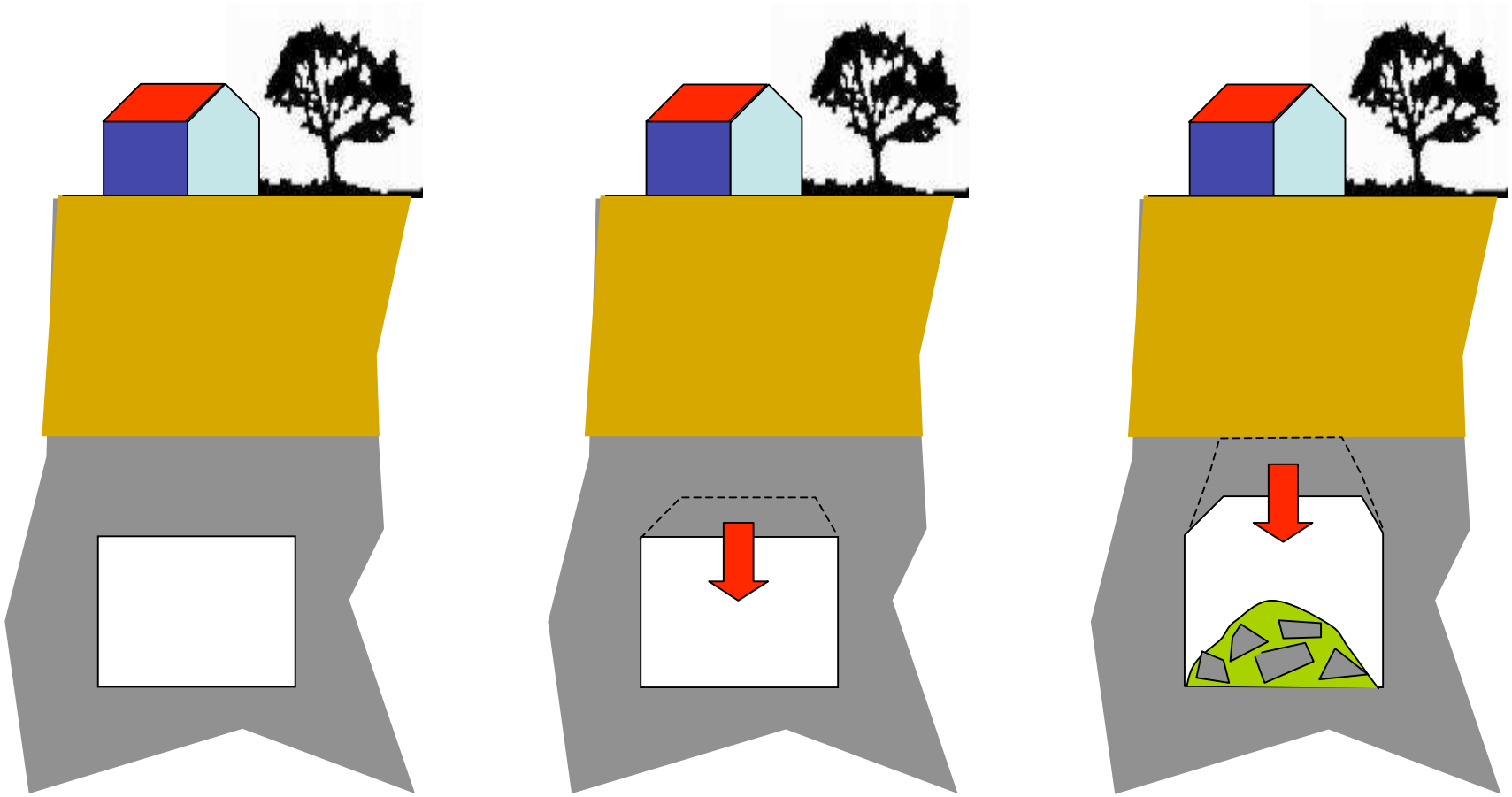
2. Fontis
   – affaissement soudain du sol qui résulte de la remontée en surface d'un éboulement du toit d'une excavation souterraine de faible profondeur

Remontée de voûte et fontis

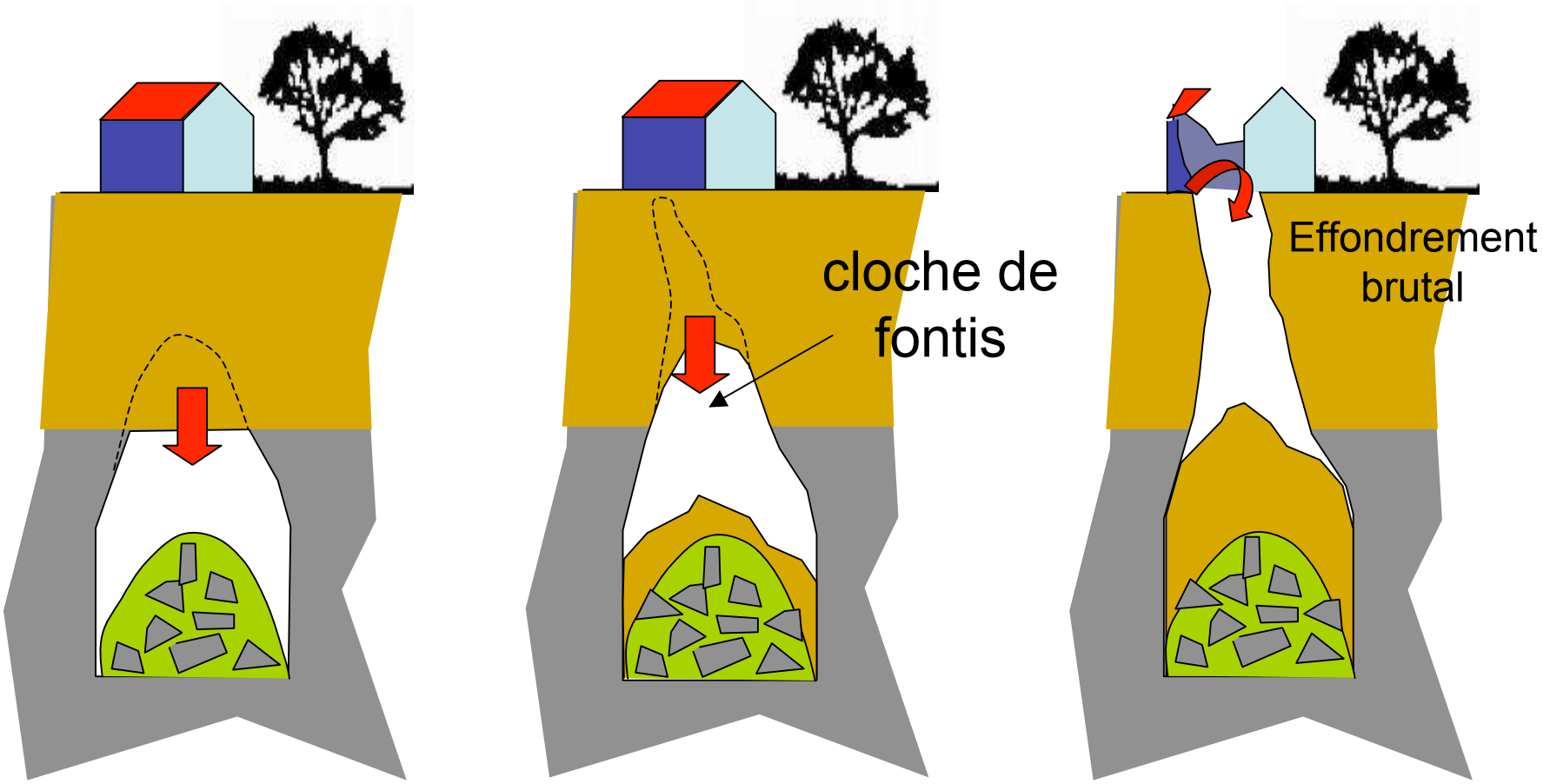
Remontée de voûte dans une galerie

Fontis

Mode de formation d’un fontis



Mode de formation (2)



Désordres localisés sur piliers

1. Ruptures liées à :
   - surcharge importante (défruitement important)
   - présence de diaclases, failles

Diaclases et failles

Couloir de diaclases

Faille subverticale avec stries (déplacement)

Fractures naturelles :

- diaclases (~1,50 m) ou couloirs
- failles subverticales

Interreg France-Wallonie-Vlaanderen UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE

RISSC

Désordres localisés sur piliers

1. Ruptures liées à :
   - surcharge importante (défruitement important)
   - présence de diaclases, failles
2. Evolution :
   - apparition de fissures dans les angles
   - epaufrures dans les angles, chutes de plaques sur les face ; forme des piliers en diabolo
   - réduction de la surface efficace du pilier
   - ruine du pilier

Ruptures de pilier(s)

Ecaillage de la base d'un pilier (Lezennes)

Désquamation (Lezennes)

Ruptures de pilier(s)

Pilier sous-dimensionné

Evolution en diabolo (Lille-Hellemmes)

Présence de déchets

1. La présence de déchets (construction) génère des poussées horizontales sur les piliers qui modifient les contraintes
2. Quand ce n'est pas des déchets organiques ou des eaux usées ...

A PROSCRIRE !!!

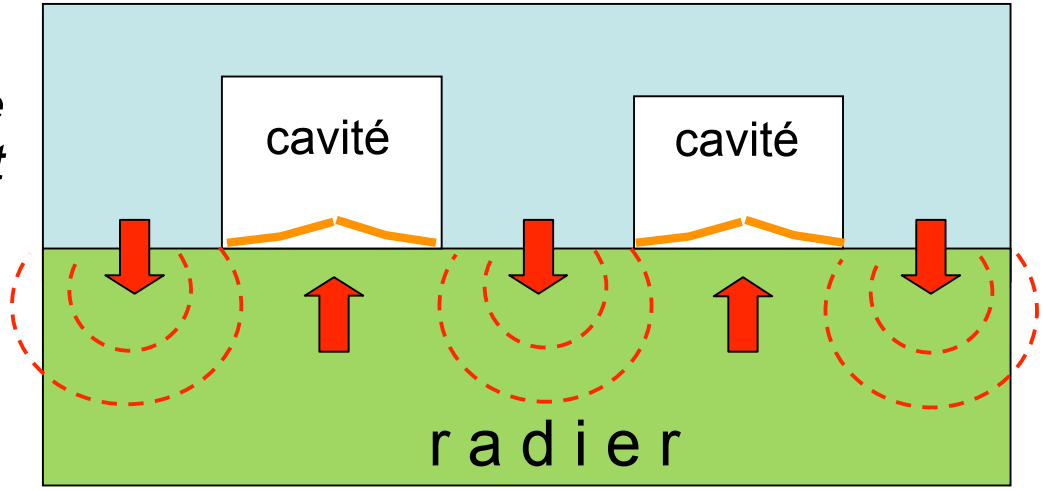
Puits remblayé en partie par des briques (Lille-Hellemmes)

Rupture de radier

1. Niveau plus ou moins résistant
2. Dans le cas d'un mur peu épais ou déformé :
   – poinçonnement

Le radier (mur) des carrières de Lille (Lezennes)

Phénomène de poinçonnement



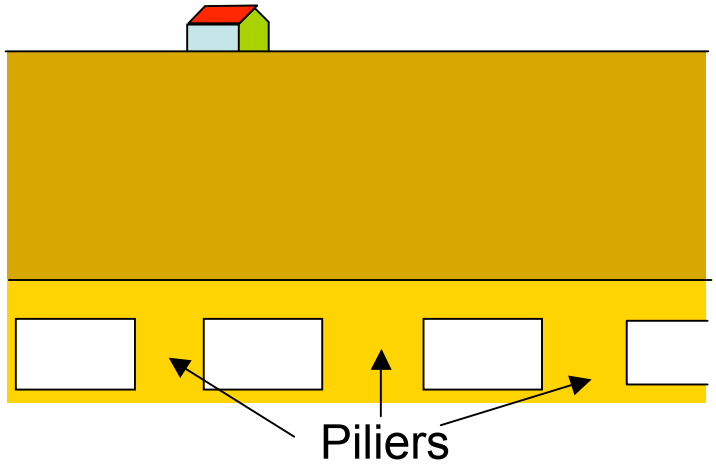
Interreg France-Wallonie-Vlaanderen
UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE
RISSC

Effondrement généralisé

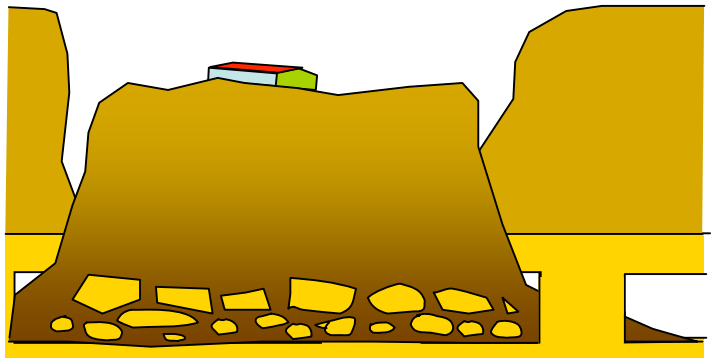
1. Rupture des piliers : une charge trop importante est reversée vers les piliers voisins
   - rupture à la compression
   - rupture par cisaillement
   - flambage : flexion d'un pilier
2. Rupture généralisée du toit :
   - écrasement des piliers et effet de souffle
   - génèse de secousses sismiques
   - descente en bloc de l'ensemble du recouvrement

Effondrement généralisé

1. Les efforts du pilier effondré ou affaibli sont répartis sur les piliers voisins
2. Effondrement généralisé et brutal parfois sur plusieurs hectares



Avant effondrement



Après effondrement généralisé

Cas de Clamart (92)

Site « Histoire de Clamart »

- Clamart et Issy-les-Moulineaux (1961)
- 21 †, 50 blessés
- 3 ha, 6 rues effondrées

Interreg France-Wallonie-Vlaanderen — UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE

RISSC

Effondrement généralisé

Pennsylvania Quarry
29 juillet 2004

Instabilité de versants

1. Dans le cas d'une carrière ouverte en falaise ou en coteau
2. Décompression du versant => fractures
3. Cas de la Malogne à Mons, pas à Lille (pas de topographie)

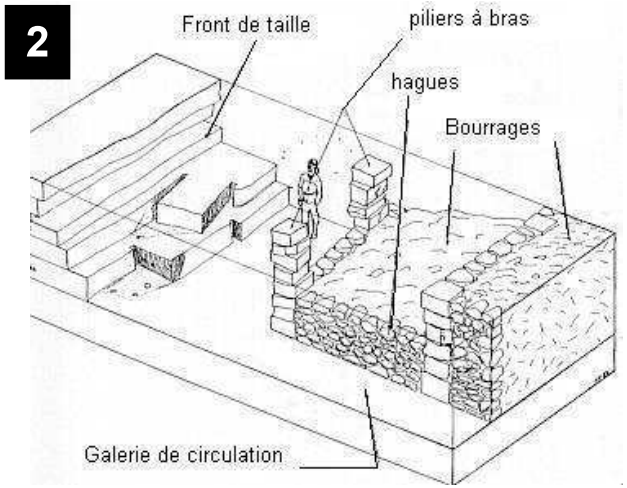
Rôle du mode d'exploitation

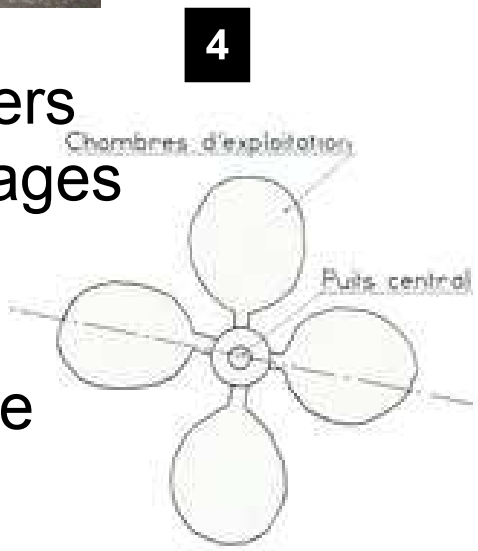
1. Différentes typologies (D. Pacyna et C. Lefebvre) : chambres et piliers, hagues et bourrages, catiches, marnières, carrière de gypse ; mines

.../...

Typologie des carrières

1. Chambres et piliers
2. Hagues et bourrages
3. Catiche
4. Marnière
5. Carrière de gypse





Carrière de gypse (Avron, 93)

Interreg France-Wallonie-Vlaanderen UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE

RISSC

Rôle du mode d'exploitation

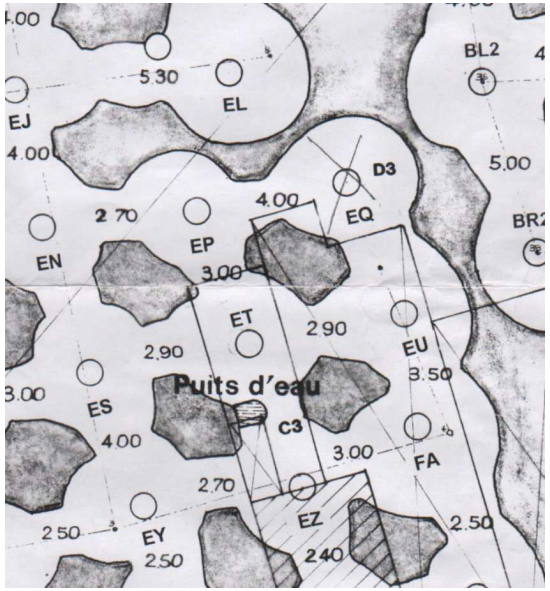
1. Différentes typologies (D. Pacyna et C. Lefebvre) : chambres et piliers, hagues et bourrages, catiches, marnières, carrière de gypse ; mines
2. Piliers tournés : en théorie, conservation infinie
   - en pratique : nombreux effondrements
     - deux facteurs géométriques :
       - épaisseurs de murs (sections des piliers)
       - largeur des galeries (portées)
     - état du ciel, surcharges
   - effondrements localisés à généralisés

Modes d'exploitation (2)

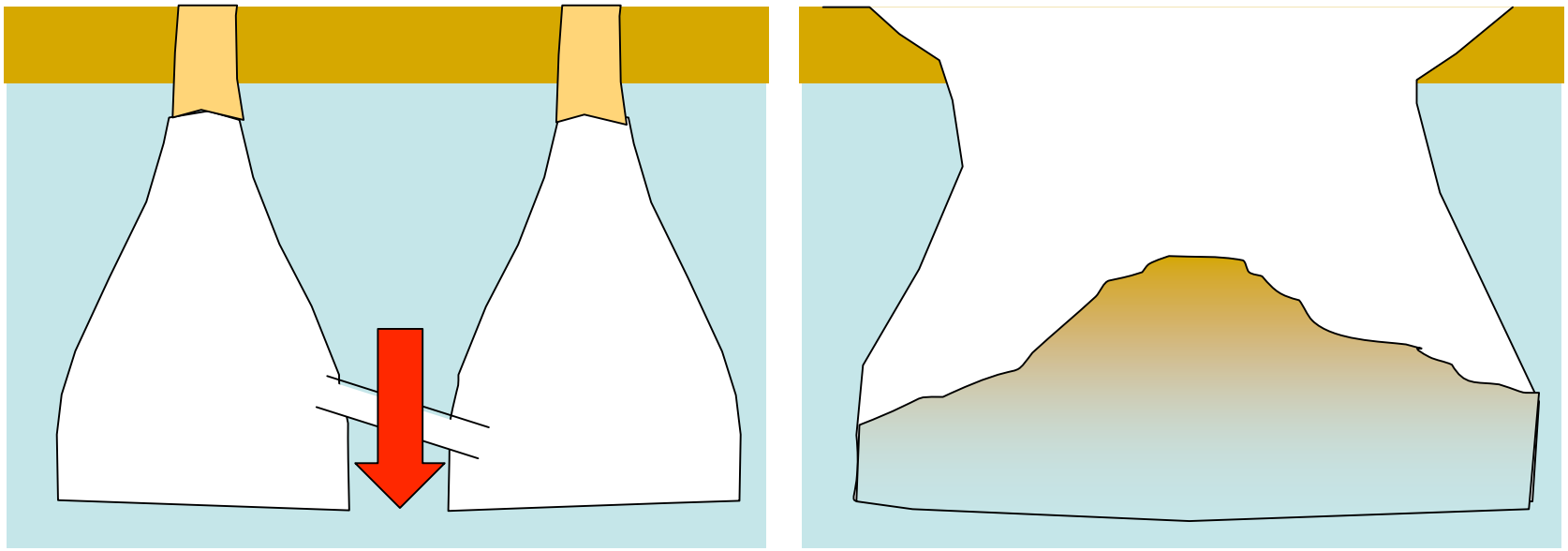
3. Hagues et bourrages :
   - tassement d'ensemble
   - compression des remblais
   - quelques vides liés :
     - au tassement
     - aux espaces non comblés initialement
   - fontis sans conséquences
     - vides rares
     - vides se comblent par le matériau écroulé
     - éboulements locaux et circonscrits

Cas des catiches

Exemple de plan de catiches



4. Chambres et piliers
   – paramètres : surcharge et espacement des puits/chambres



Processus de ruine d'une exploitation en catiches

Les marnières

1. Problème épineux en H^{te} Normandie
2. Exploitations du XVII au XIX^{ème} siècles
3. Locales, pas de mémoire
4. Effet désastreux dû au ruissellement

Exemple d'effondrement d'une ancienne marnière

Carrières de gypse

1. Qualités mécaniques médiocres
   – fontis fréquents (gravité proportionnelle à la hauteur des vides)
2. Dissolution rapide des niveaux de gypse
3. Poinçonnement

Grand fontis sur le plateau de Frépillon (95)

Cas des mines

1. Affaissements progressifs et prévisibles
2. Possibilités d'évacuer
3. Mouvements qui s’estompent dans le temps :
   - maximum : première année
   - pendant 5 ans
   - au-delà : plus discernables du bruit de fond
4. Situations diverses :
   - charbon : veines peu épaisses
   - fer (Lorraine) : galeries de 4 m et +

Cas des mines : affaissement

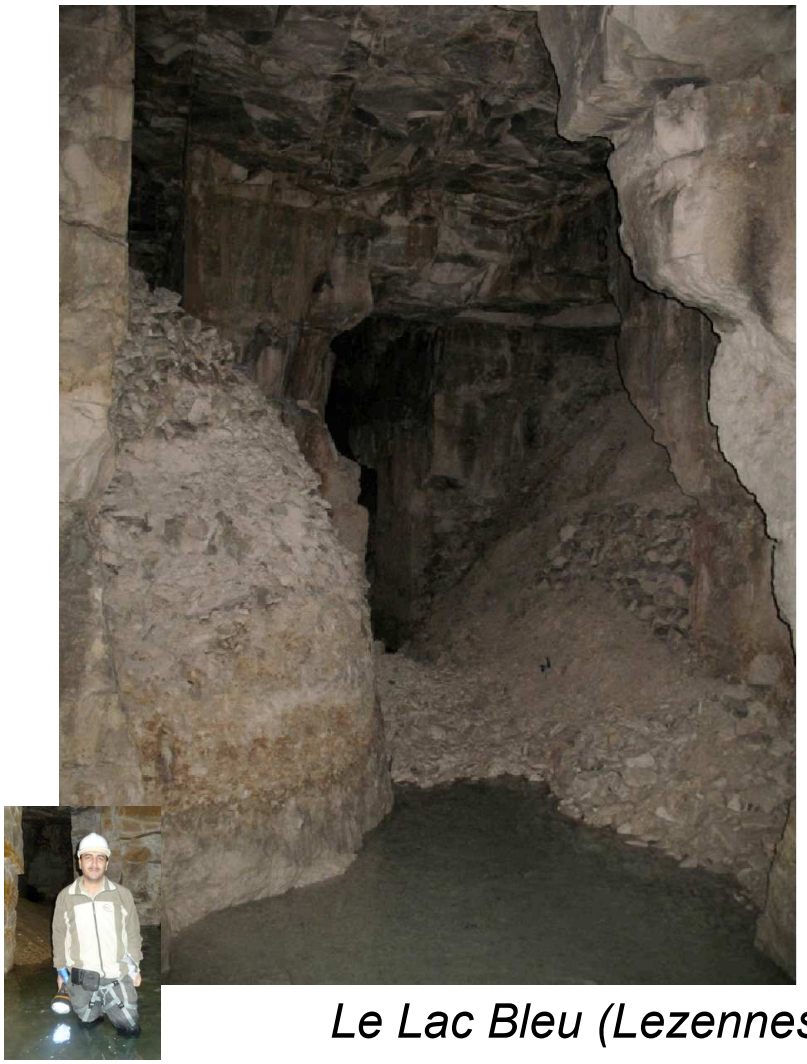
1. Mouvement progressif : tassement souple des terrains subjacents en gardant leur continuité
2. Zones exploitées de grandes profondeurs (de plus de 50 mètres à plusieurs centaines de mètres
3. Dépression topographique (« cuvette d'affaissement »)

Affaissement (Grenay)

Dépression topographique (Loos-en-G.)

Ennoyage

1. Remontée de la nappe phréatique

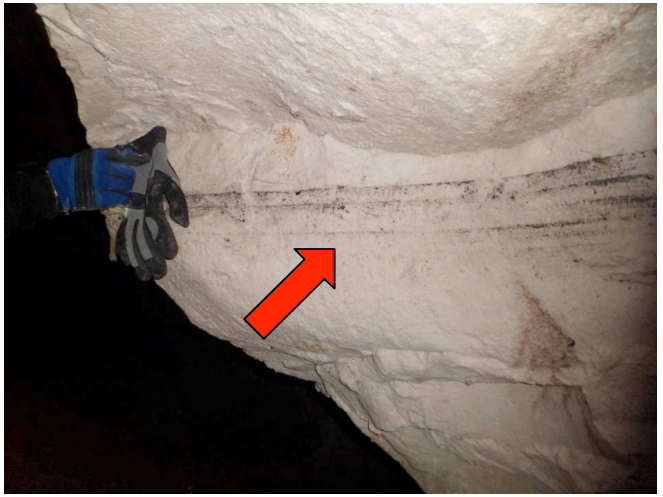


Le Lac Bleu (Lezennes)

Carrière de la Malogne (Mons)

Le radier

1. Battement de la nappe de plus d'un mètre
2. Modification des propriétés mécaniques des roches



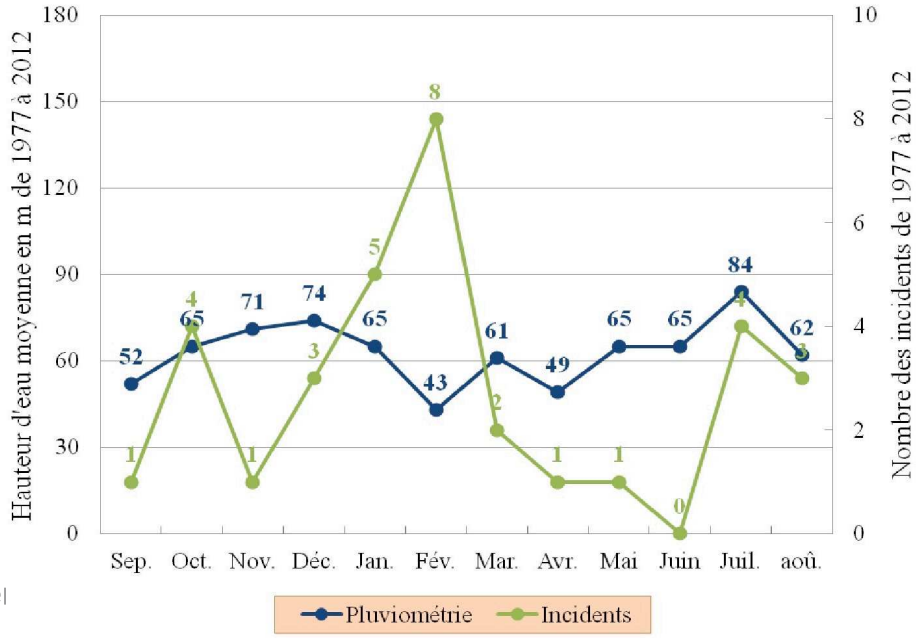
Les laisses des anciens niveaux d'eau

Interreg France-Wallonie-Vlaanderen UNION EUROPÉENNE EUROPESE UNIE
RISSC

L’hygrométrie

1. Sur plus d’une trentaine d’incidents recensés :
   – la majorité de ces incidents a eu lieu en janvier, février, juillet et octobre et particulièrement en janvier et février
2. Temps de réponse de l’ordre de 2 mois d’environ :
   – délai nécessaire pour causer la surcharge dans les terrains de recouvrement

Thèse Ramadan (2016)

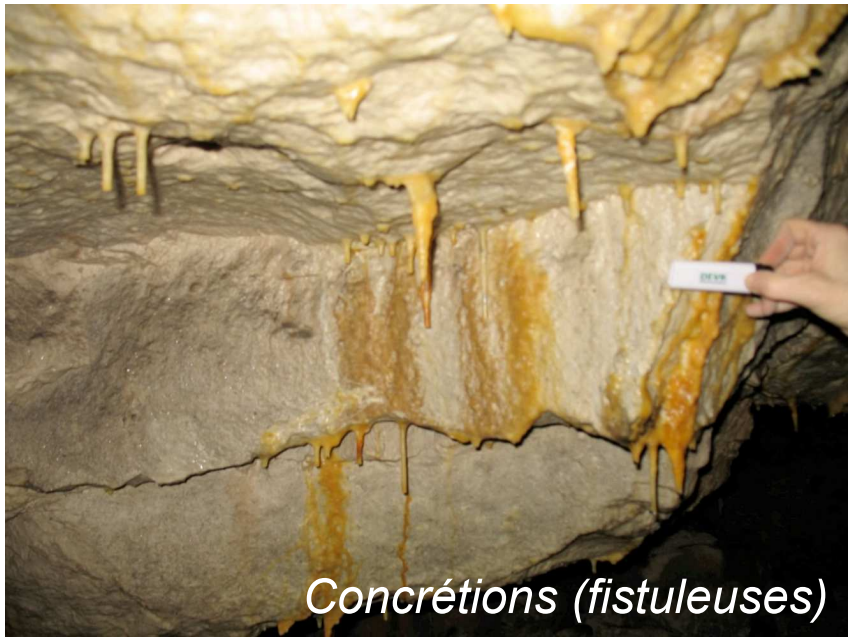


L'altération physicochimique

1. Equilibres chimiques H_2O-CO_2-$CaCO_3$:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O = Ca_2(HCO_3)_2$$

- si apport de CO_2 => dissolution et ↑ porosité
- si décomposition de HCO_3^-, précipitation de $CaCO_3$ (concrétionnement)



Autres effets de l'altération

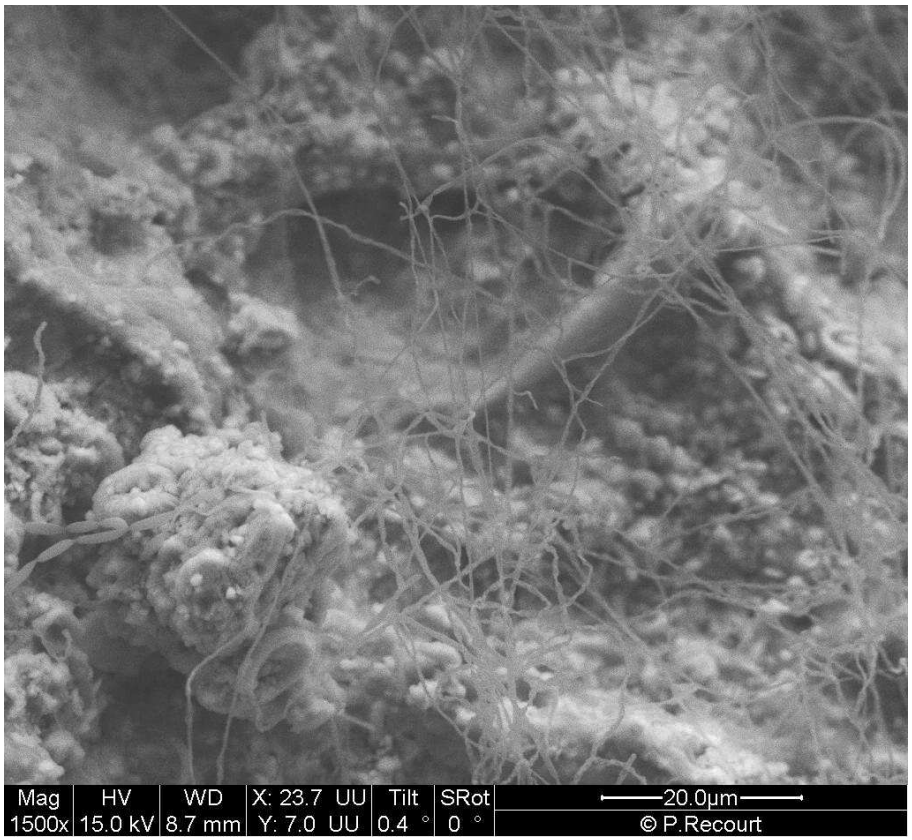
1. Hydratation des piliers :
   - ↓ résistance mécanique des roches
2. Percolation de l'eau : dissolution dans le toit, précipitation dans le mur
3. Succession de cycles d'hydratation / déshydratation dans les piliers
   - fissuration et désquamation, fatigue et fluage
4. Dépôt de sels dans la porosité des roches lors de l'évaporation) et gonflement
5. Présence d'eaux usées acides : dissolution

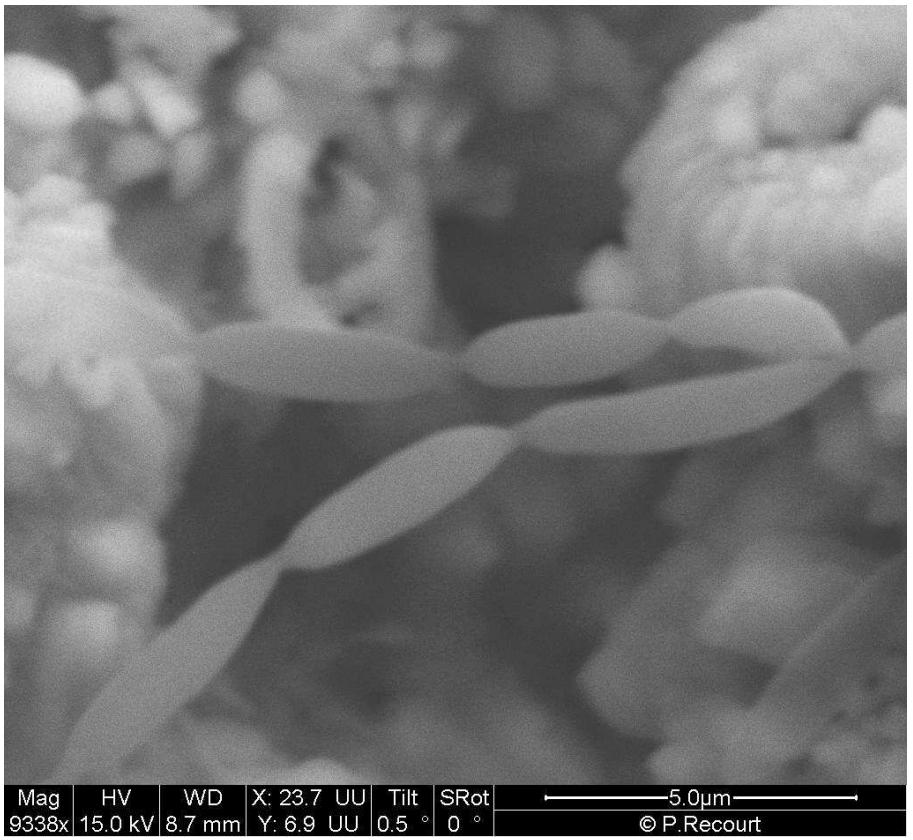
Activité organique

1. Parois recouvertes de diverses patines :
   - pellicule de carbonate (calcin) en surface
   - dépôts d'oxy-hydroxydes de fer (fer de la pyrite)
   - couches de quelques centaines de microns
2. Activités organiques :
   - chauves-souris
   - végétaux dont les racines pénètrent les puits (fragilisation des bouchons)
   - filaments bactériens ou champignons (?)

Activité organique

Filaments bactériens ou fongiques





Facteurs extérieurs

1. Facteurs météorologiques (température) :
   - à proximité des entrées extérieures
   - à proximité des bouchons de puits
2. Surcharges : constructions, urbanisation
3. Eau :
   - infiltrations, remontée de nappe, ennoyage
   - poids des terrains saturés en eau
4. Vibrations : routes, chemin de fer, chantiers, ...
5. Accidents : inondations, fuites, séismes, bombardements, ...

Renforcements anciens

1. Mise en place de systèmes de soutènement sommaires dans certaines galeries (près des entrées ou dans des zones habitées [guerre])

Aménagement d'une entrée (mur de briques et parpaings de craie)

Salle consolidée par des tubes métalliques (Hellemmes, guerre)

Conclusions

1. L'évolution des cavités souterraines est multifactorielle (géologie, histoire de l'exploitation, facteurs bio-physico-chimiques, environnement, ...)
2. Il y a donc lieu de caractériser le milieu et le matériau, de replacer la cavité dans son contexte naturel, anthropique et historique
3. La gravité principale (effondrement) est lié à la soudaineté de l'événement
4. 4 effondrements généralisés depuis 1871 (dont Clamart / Issy-les-Moulineaux)
5. Nécessité de surveiller et de comprendre

Orateur : Michel Dubois
Université de Lille / LGCgE

Merci pour votre attention

Avec le soutien du Fonds européen de développement régional