

Faculté  
Polytechnique

# RISSC

Et si la terre risquait  
de s'effondrer sous nos pieds ?

Prof. Fanny Descamps, Service de Génie Minier

# WalOnMap, la Wallonie à la carte

WalOnMap - Toute la wallonie à la carte

RÉDUIRE LA CARTE

Localiser

Adresse...

Infos

Légende

StreetView

Mesurer

Dessiner

Imprimer

Créer un rapport

Partager

Mes cartes

Vues prédéfinies

Autres cartes

Fond de plan et voyage dans le temps

Ajouter des données :

Catalogue du Géoportail

Données externes

Ma sélection (1) **Vider**

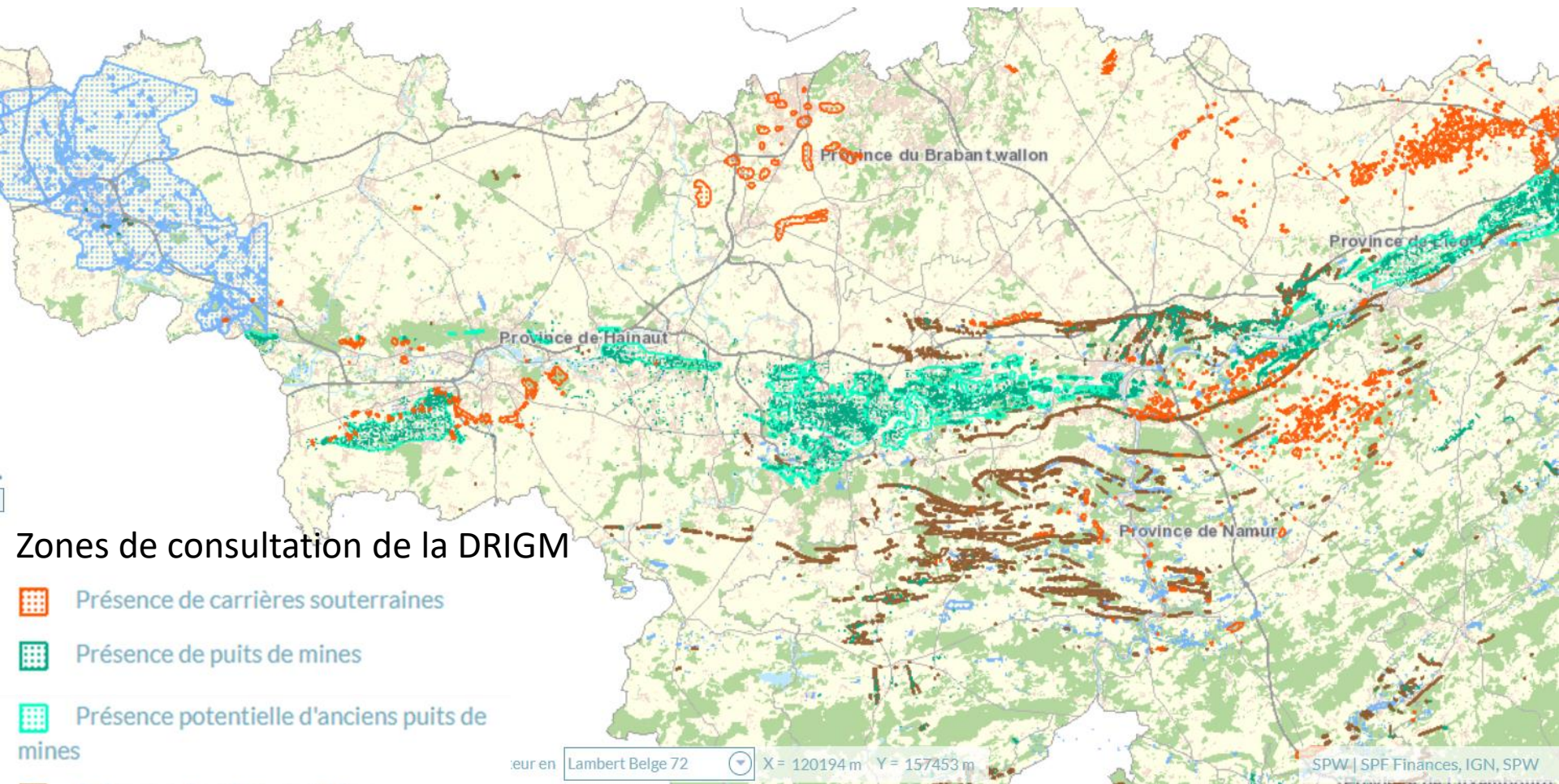
Zones de consultation de la DRIGM - Série

1:1200000 40 km

Coordonnées du pointeur en Lambert Belge 72 X = -66498 m Y = 110930 m

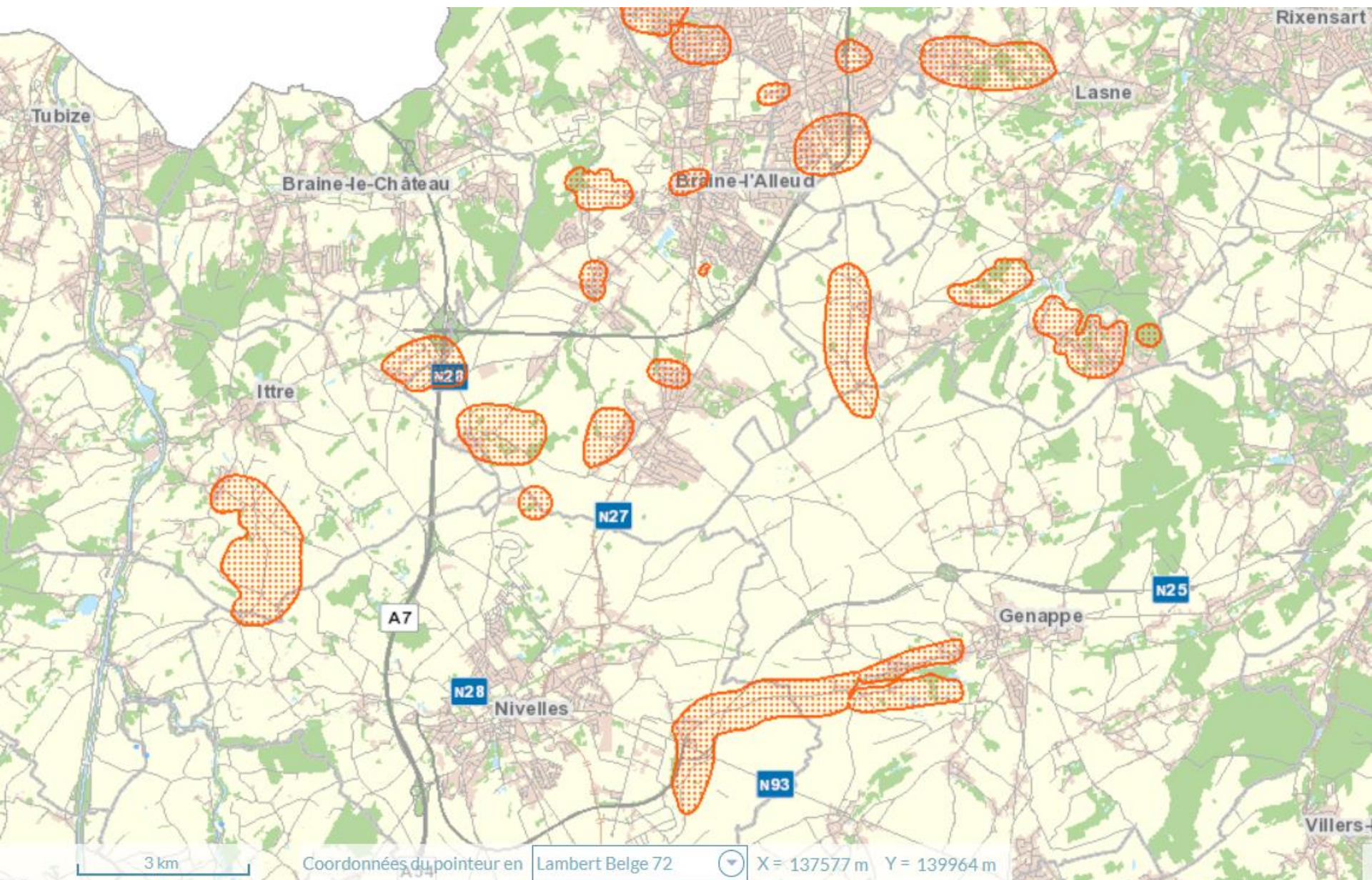
SPF Finances, IGN, SPW

# Différents objets du sous-sol wallon



Zones de consultation de la DRIGM

- Présence de carrières souterraines
- Présence de puits de mines
- Présence potentielle d'anciens puits de mines
- Présence de minières de fer
- Présence de karst

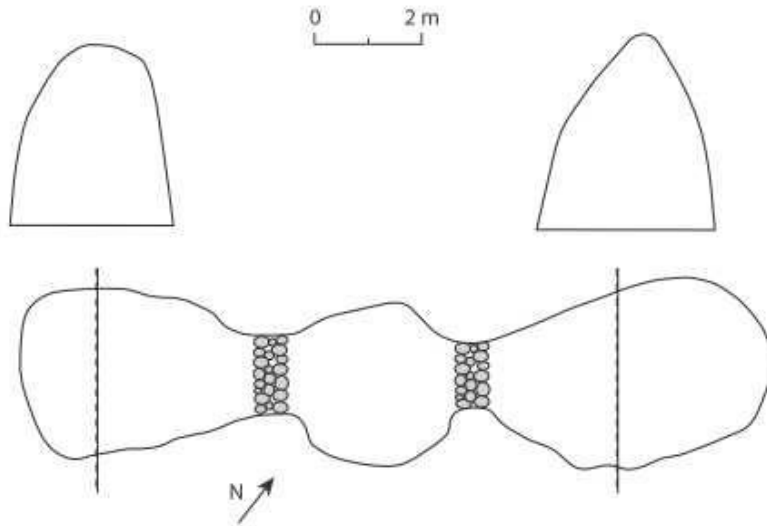
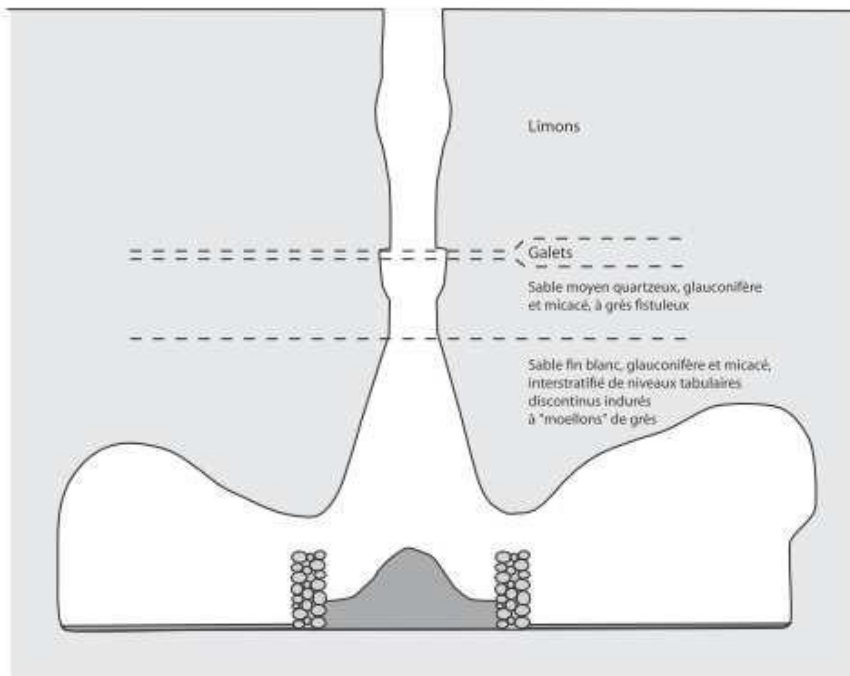


# Carrières de sables et grès du Brabant Wallon

- Sables calcaireux du Lutétien (Tertiaire; 40-48 Ma)
- Grès calcaireux de même âge
- Aussi carrières de « pierre de Gobertange » (+ à l'Est)
- Exploitation par courtes galeries divagantes ou tournantes (1,5 à 2 m de hauteur pour 1 à 1,5 m de largeur) autour d'un puits (diam. 1 à 1,5 m)
- Profondeur au toit : 5 à 20 m
- Effondrements :
  - fréquents
  - 1,5 à 2 m de diamètre pour 6 m de profondeur
  - jusqu'à plus de 5 m de diamètre pour 1,5 m de profondeur

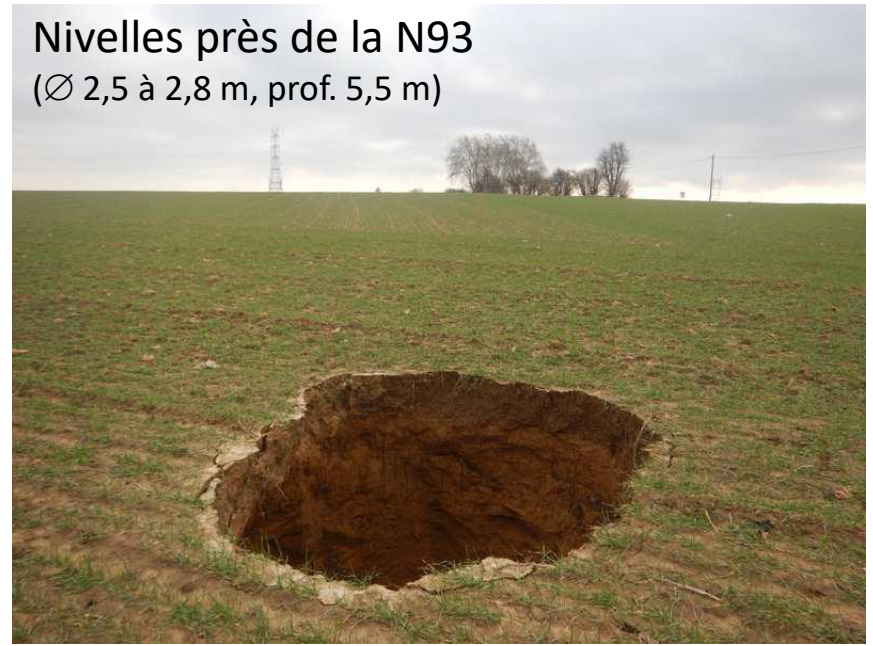
ÉPOQUE		PÉRIODE	ÈRE
	HOLOCÈNE	QUATERNAIRE	CÉNOZOÏQUE
	PLÉISTOCÈNE		
	PLIOCÈNE	NÉOGÈNE	
	MIOCÈNE		
	OLIGOCÈNE	PALÉOGÈNE	
	ÉOCÈNE		
		CRÉTACÉ	
		JURASSIQUE	
		TRIASIQUE	
		PERMIEN	
	SUPÉRIEUR	CARBONIFÈRE	PALÉOZOÏQUE (PRIMAIRE)
	INFÉRIEUR		
	SUPÉRIEUR ET MOYEN	DÉVONIEN	
	INFÉRIEUR		
		SILURIEN	
		ORDOVICIEN	
		CAMBRIEN	

Pacyna, 2019



Coupe et plan d'une carrière souterraine de sables calcaires lutétiens à Waterloo (Funcken et Vrielynck, SPW).

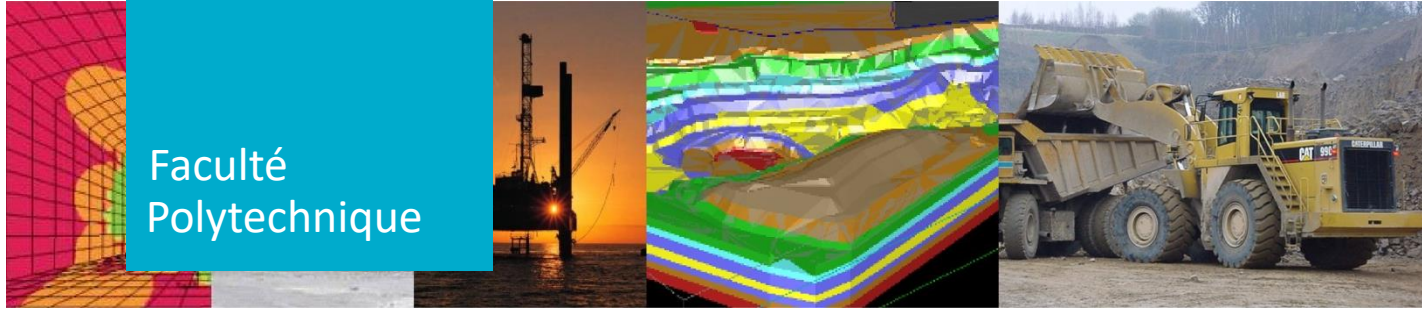
Nivelles près de la N93  
( $\varnothing$  2,5 à 2,8 m, prof. 5,5 m)



(photos F. Van Dijck, SPW-CACEff, 2019)

# RISSC : et si la terre risquait de s'effondrer sous nos pieds ?

- Qu'y a-t-il sous vos pieds, à Nivelles ?
- Projet RISSC
- Inventaire des cavités souterraines
- Mécanismes de rupture possibles
- Effets en surface
- Quelle approche scientifique du problème ?



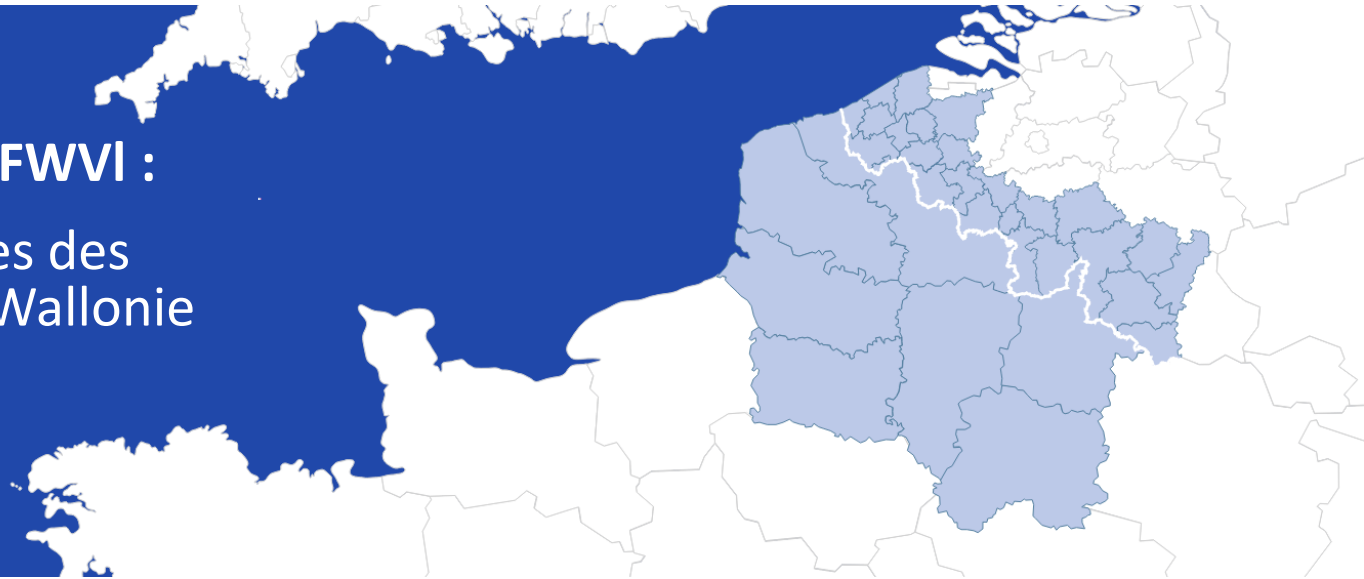
# Le projet RISSC



# Projet RISSC

Programme Interreg FWVI :

zones transfrontalières des  
Hauts-de-France, de Wallonie  
et de Flandre



**Interreg**

France-Wallonie-Vlaanderen



UNION EUROPÉENNE  
EUROPESE UNIE

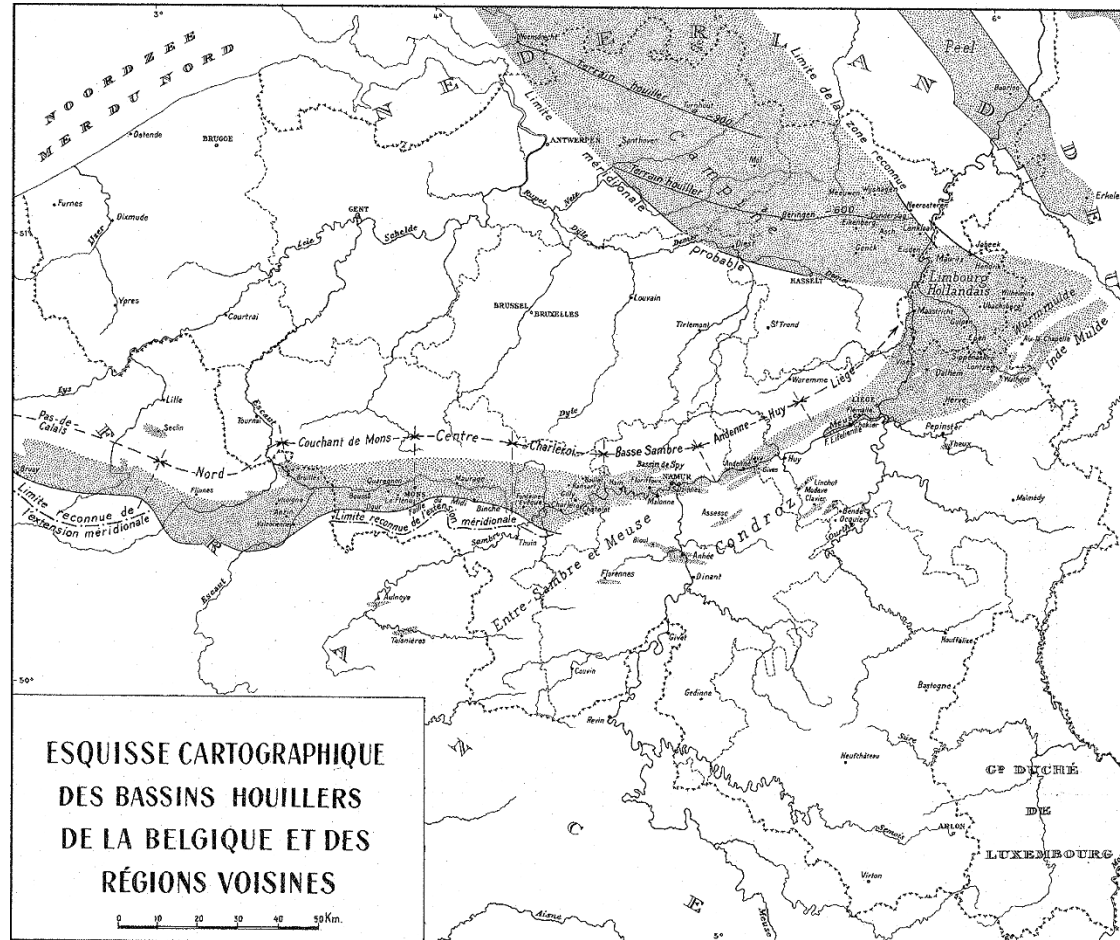
**RISSC**

Améliorer la prévention et la gestion  
des risques liés à la présence  
de cavités souterraines  
en Wallonie et Hauts-de-France



# Un projet tranfrontalier

- Wallonie & Hauts-de-France : géologie et histoire industrielle communes
- Conséquence : nombreux vides souterrains d'origine anthropique ou naturelle
- Quel problème ? Menace pour la sécurité des personnes, les biens immobiliers, les projets d'aménagement et l'attractivité socio-économique de certains territoires



# Projet RISSC : les missions



Objectif 1 : Caractériser le risque souterrain



Objectif 2 : Réduire voire contrer le risque



Objectif 3 : Apporter un soutien technique

# 4 modes d'action

## 1. L'amélioration des connaissances

- Inventaire des cavités et définition du type de cavités
- Volet technique : compréhension des mécanismes d'effondrement, influence des travaux miniers sous-jacents des cavités

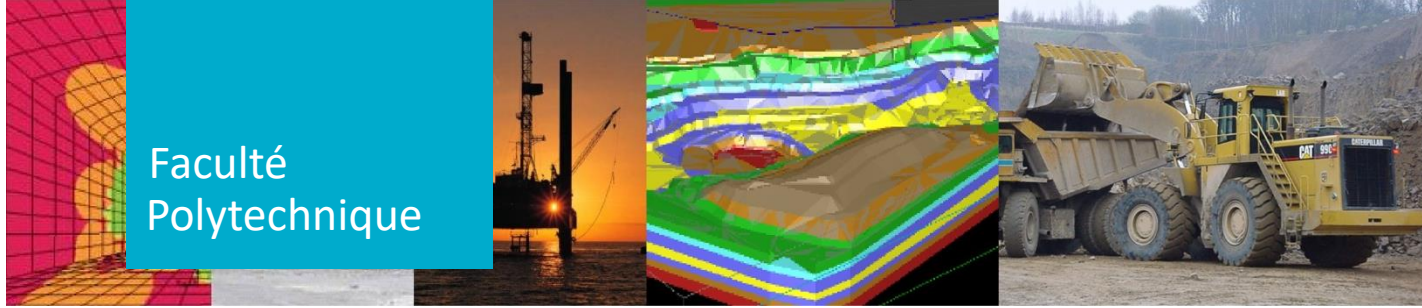
## 2. La gestion technique du risque = réduction du risque

- Techniques de mise en sécurité des cavités
- Méthodes de surveillance des cavités

## 3. La gestion réglementaire du risque = optimiser l'urbanisation en prenant en compte le risque « cavités »

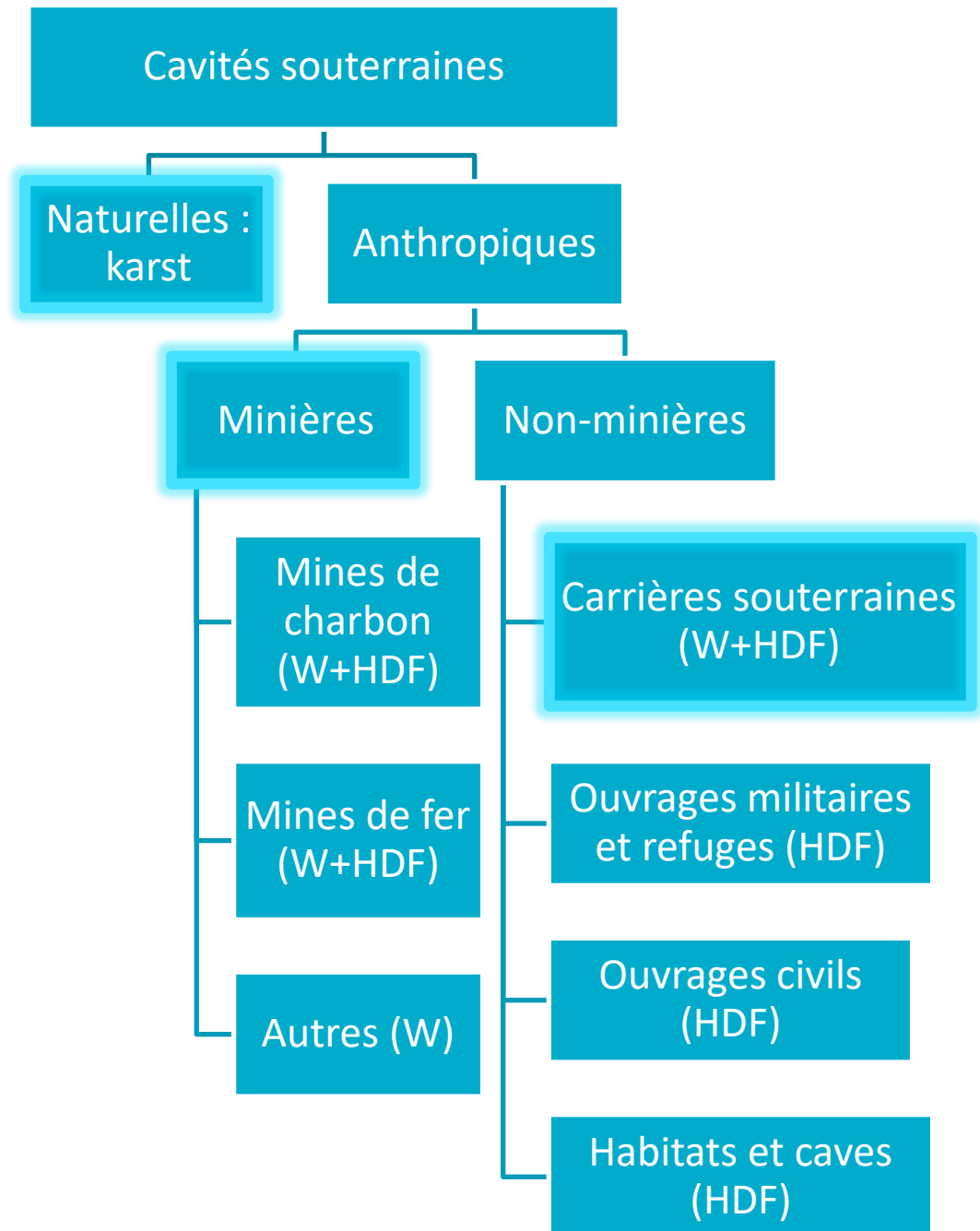
- Comparaison des cadres réglementaires
- Amélioration des pratiques

## 4. La diffusion des connaissances = sensibilisation et formation du public

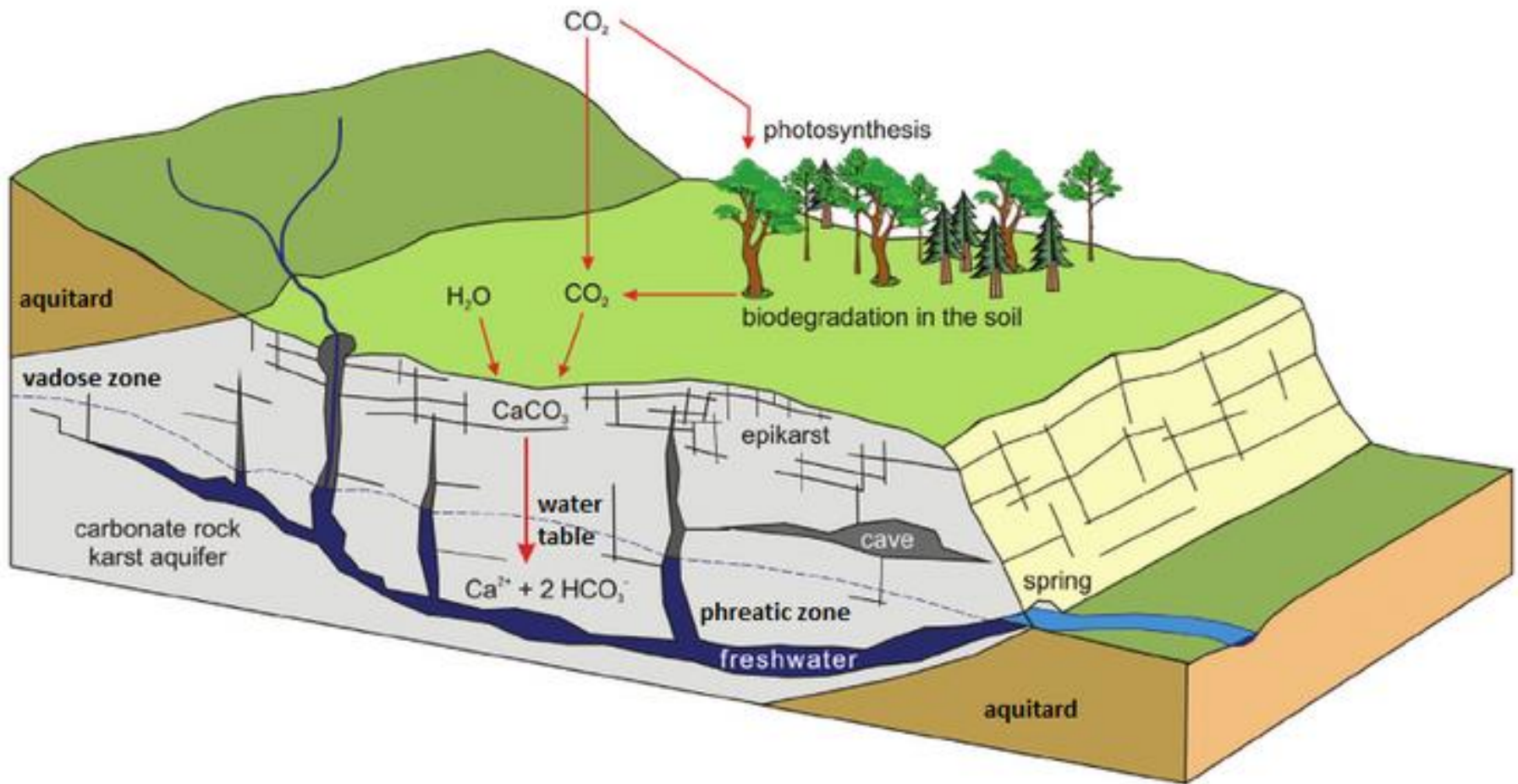


# Quelles cavités souterraines ?

# Inventaire des cavités souterraines

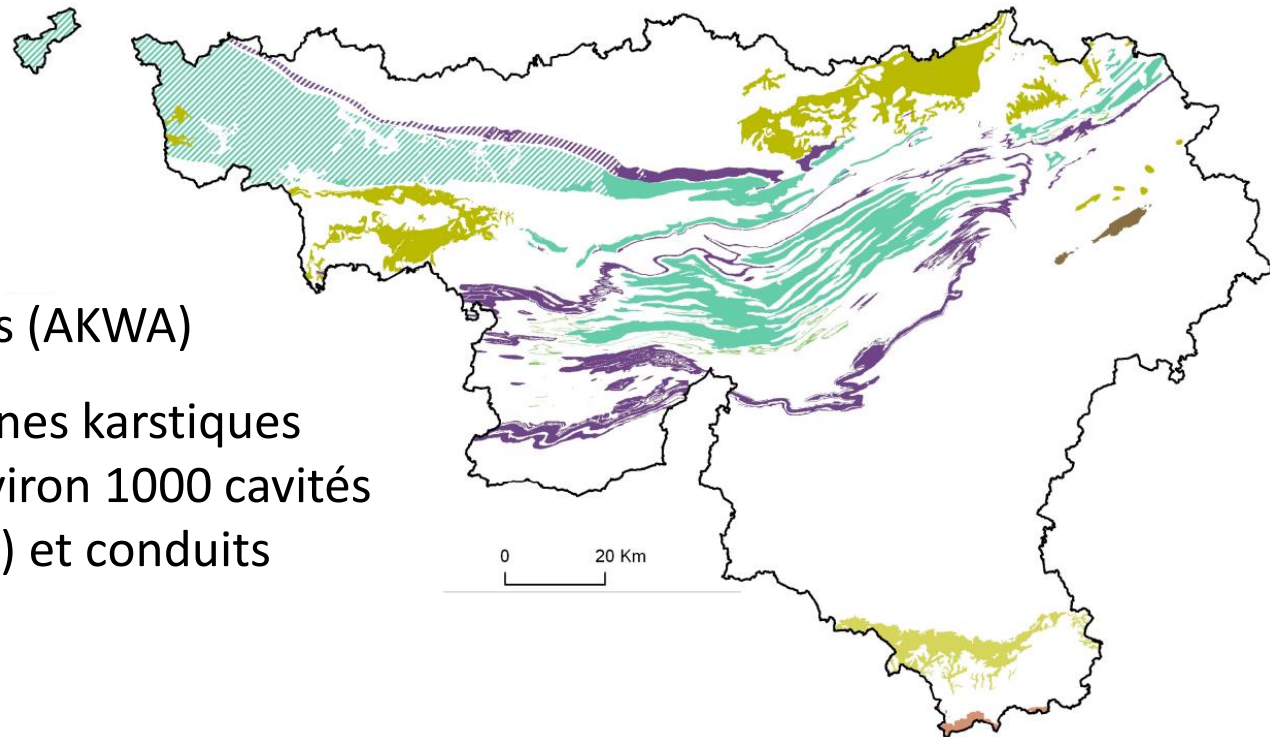


# Cavités naturelles: les karsts



# Cavités naturelles : les karsts

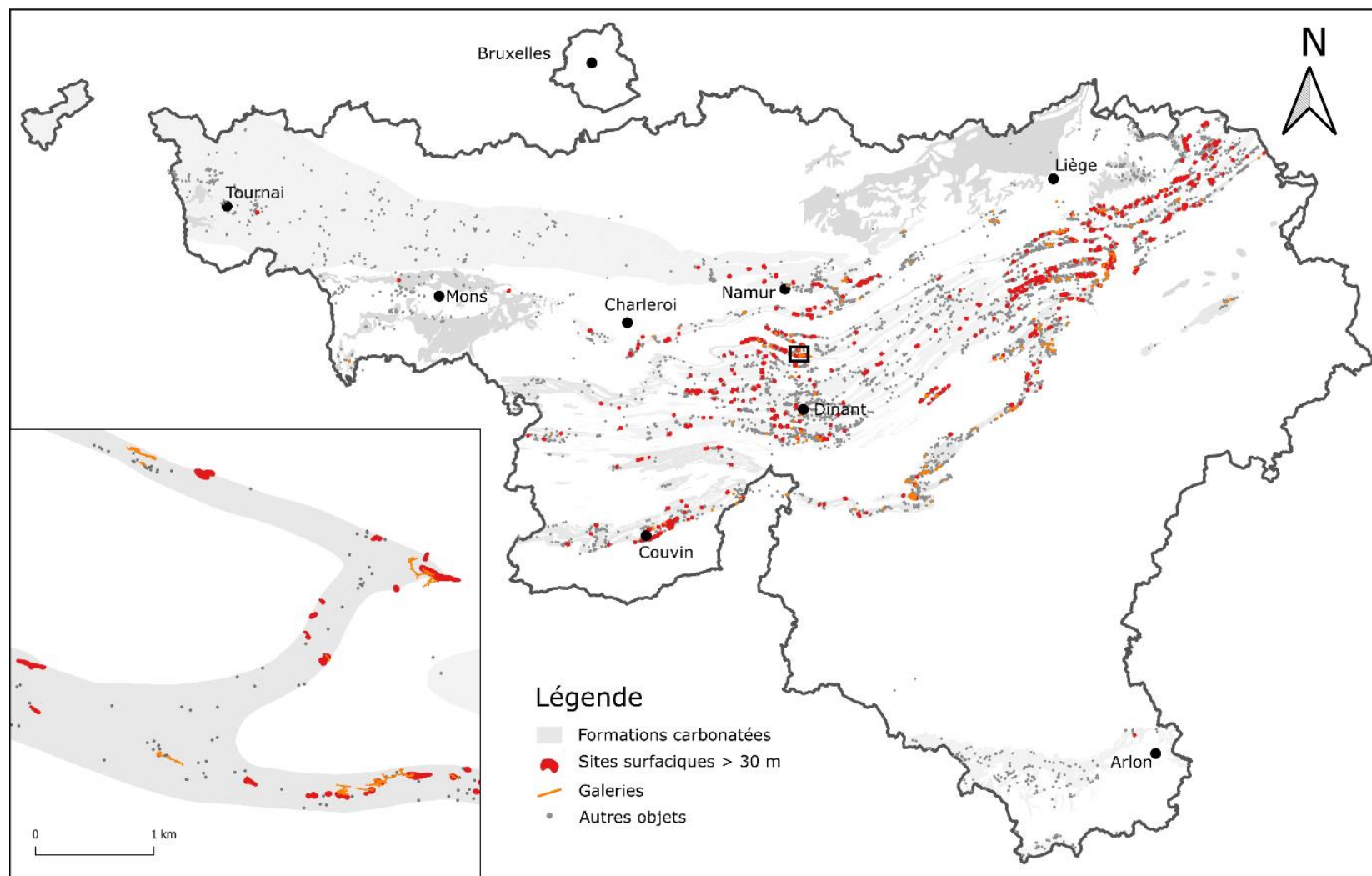
- Essentiellement en Wallonie : les formations carbonatées couvrent + de 30% du territoire
- + de la moitié des communes wallonnes concernées



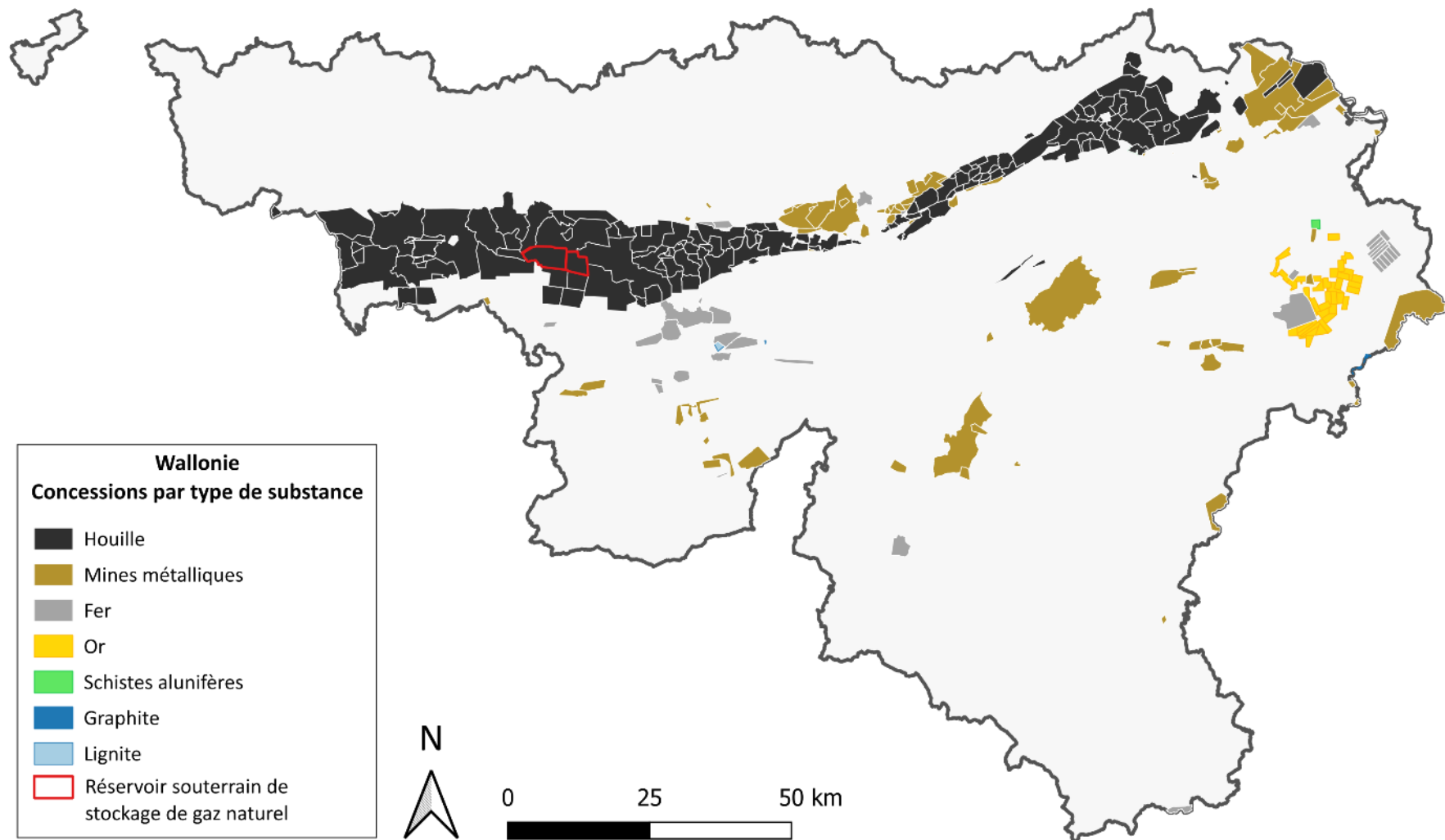
- Inventaire très précis (AKWA)
- + de 6000 phénomènes karstiques répertoriés dont environ 1000 cavités (grottes pénétrables) et conduits ouverts



# Sites karstiques en Wallonie



# Cavités minières en Wallonie

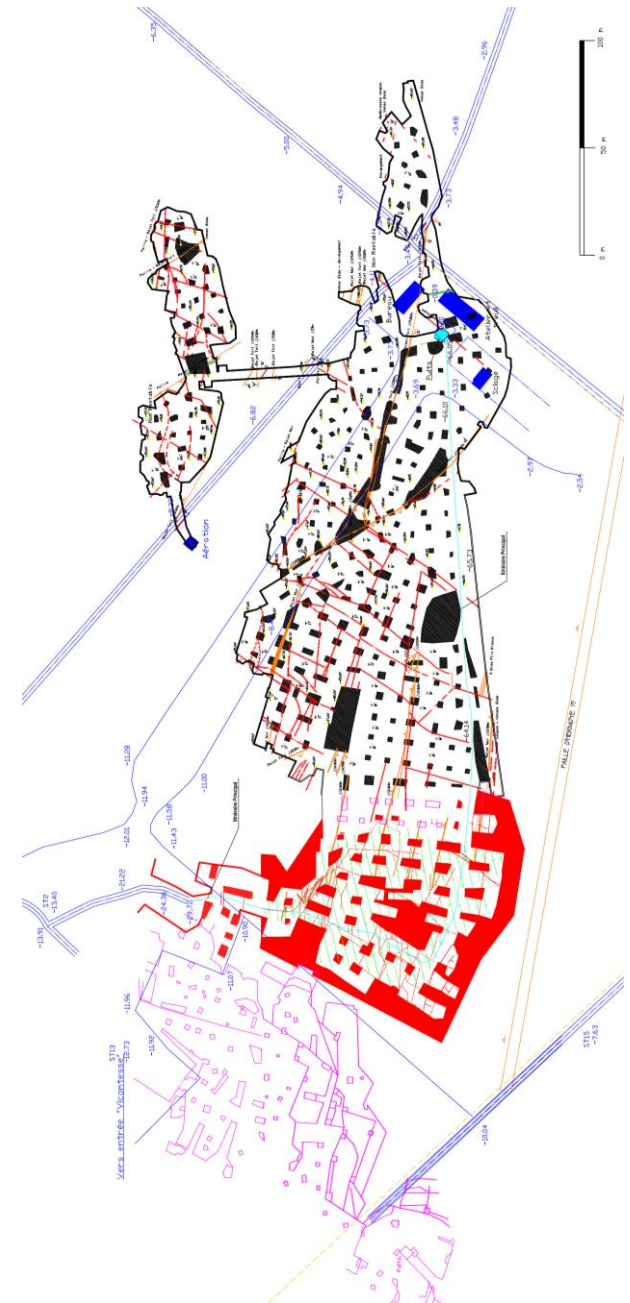


# Mine ou carrière : pourquoi est-ce important ?

- Pas le même régime légal
- Code civil (art. 552): le propriétaire de la surface est propriétaire de son sous-sol sans limitation de profondeur, dans sa totalité, à l'exception des gisements miniers concédés et des travaux qui en dépendent. Le sous-sol n'appartient donc pas à l'État belge, ni aux Régions, mais bien à ceux qui possèdent la surface à l'aplomb.
- Mines : substances définies par la loi (houille, fer, Pb, Zn, etc.); concession octroyée au propriétaire de la surface ou à un tiers choisi par le Gouvernement -> responsabilité du concessionnaire + surveillance par la DRIGM (Administration des Mines)
- Carrières : autres matériaux (craie, calcaire, sable, etc.); appartient au propriétaire de la surface; soumis à Permis Unique depuis 2004

# Carrières souterraines en Wallonie

Aujourd'hui, 1 seule carrière souterraine :  
la carrière de Golzinne, près de Namur,  
qui exploite le Noir de Mazy

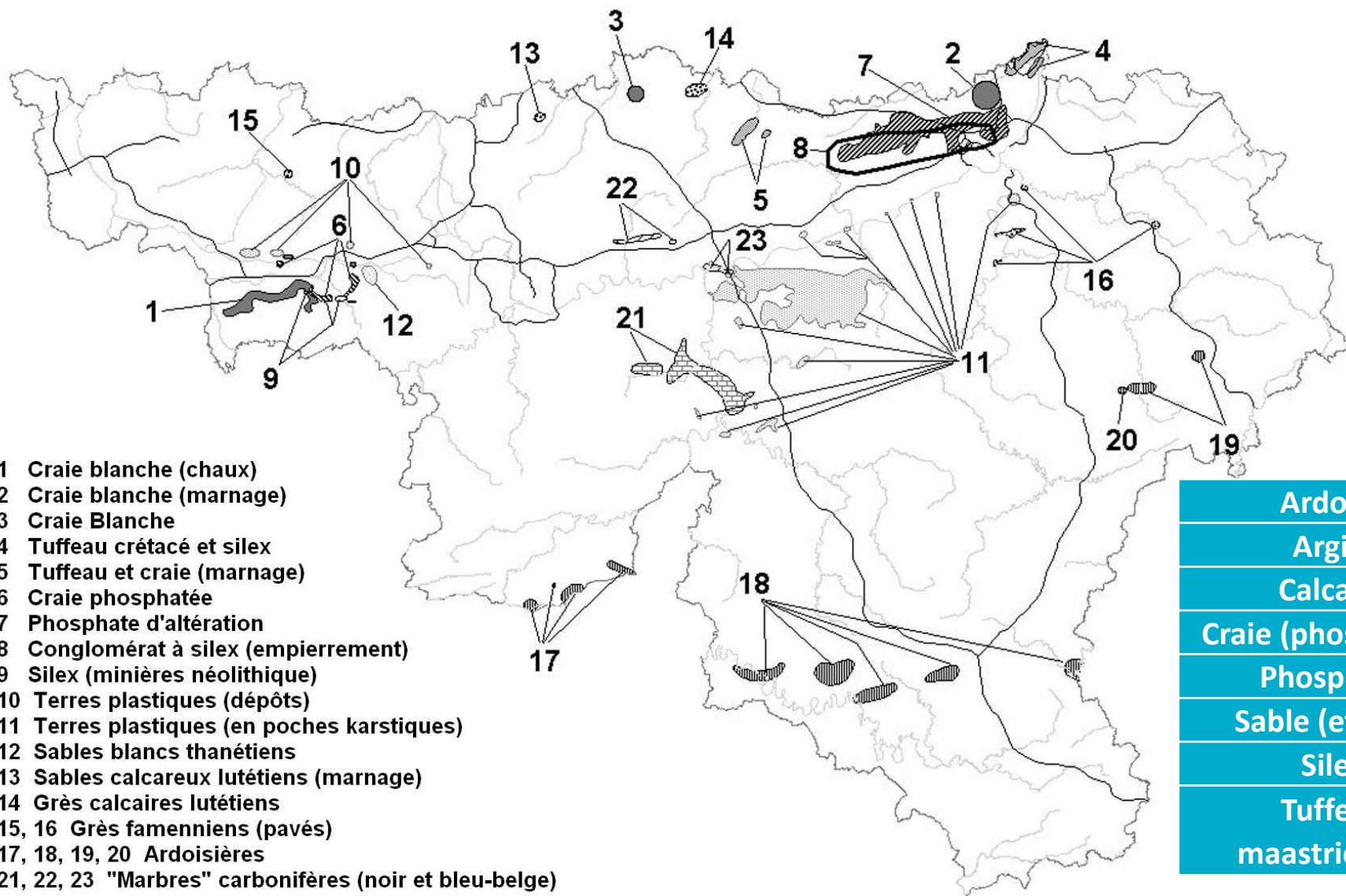


# Carrières souterraines en Wallonie

- Avant 1852 :
  - Exploitation libre (pas de traces administratives)
  - Plus de 500 carrières connues sur base d'indices (accidents, point géologique, histoire locale, carrière accessible,...)
- A partir de 1852 : déclaration d'ouverture
- A partir de 1935 :
  - Tenue de plans obligatoire
  - Près de 4.500 carrières connues après 1852

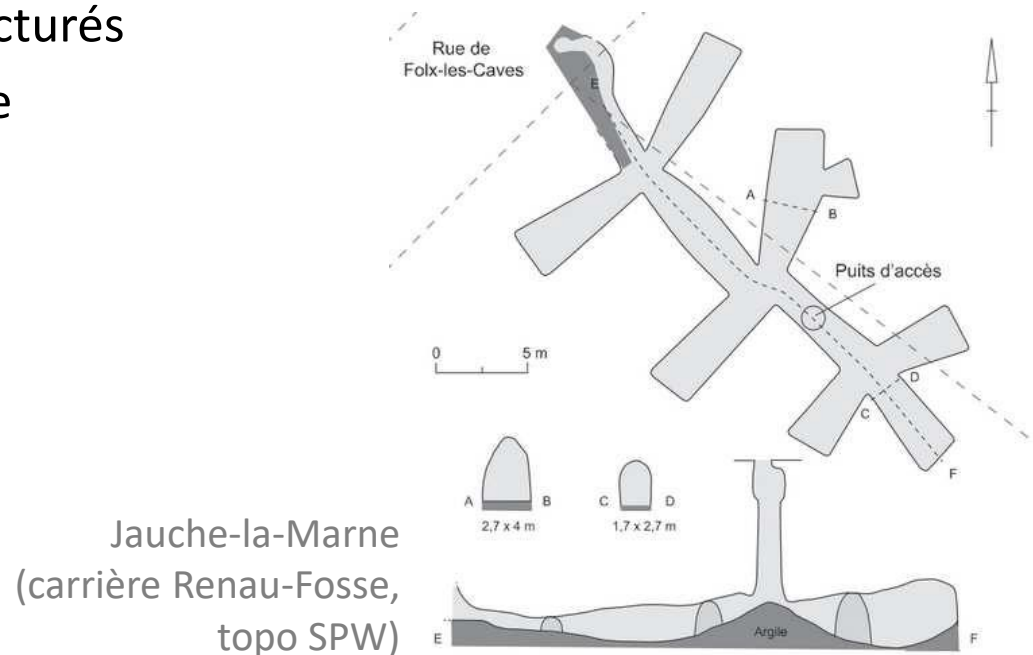
➡ Témoins des richesses de notre sous-sol  
mais aussi un passé à gérer

En Wallonie, les carrières souterraines représentent  
une superficie de 6291 ha et 94 communes sont concernées



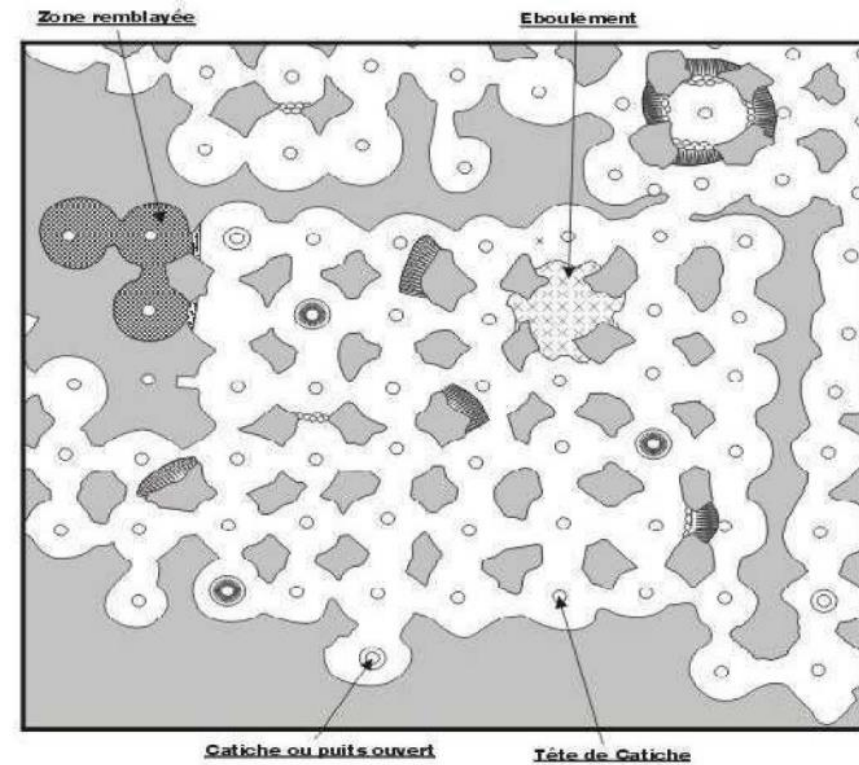
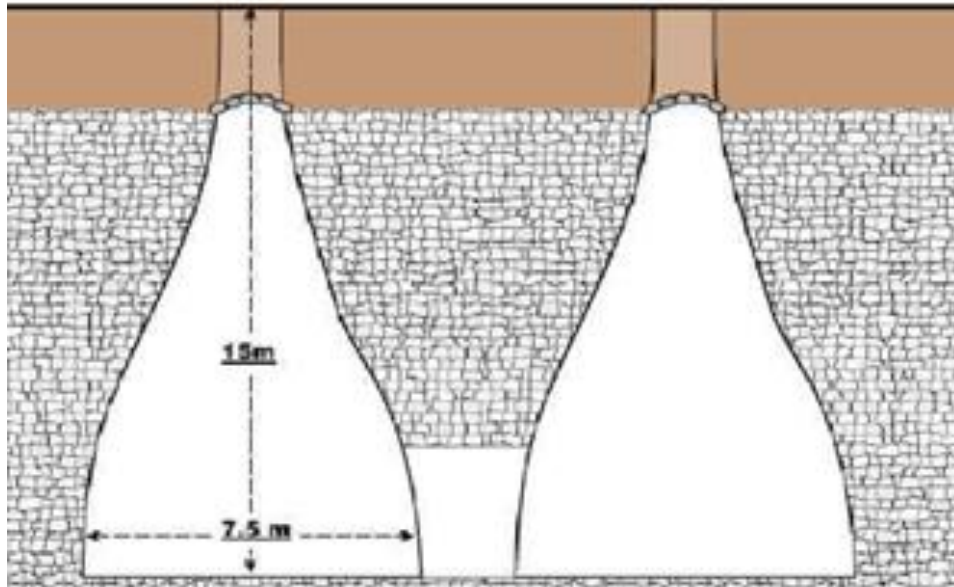
# Carrières souterraines de craie

- Craie, craie phosphatée, marnières
- Production de chaux, pour l'amendement des cultures ou pour l'industrie
- Dans les zones rurales mais aussi à proximité des grandes villes
- Différentes techniques d'exploitation ; 2 exemples particuliers :
  - Chambres et piliers ± structurés
  - Catiches ou puits-bouteille
- De très petites à très grandes
- Accès : puits ou descenderie



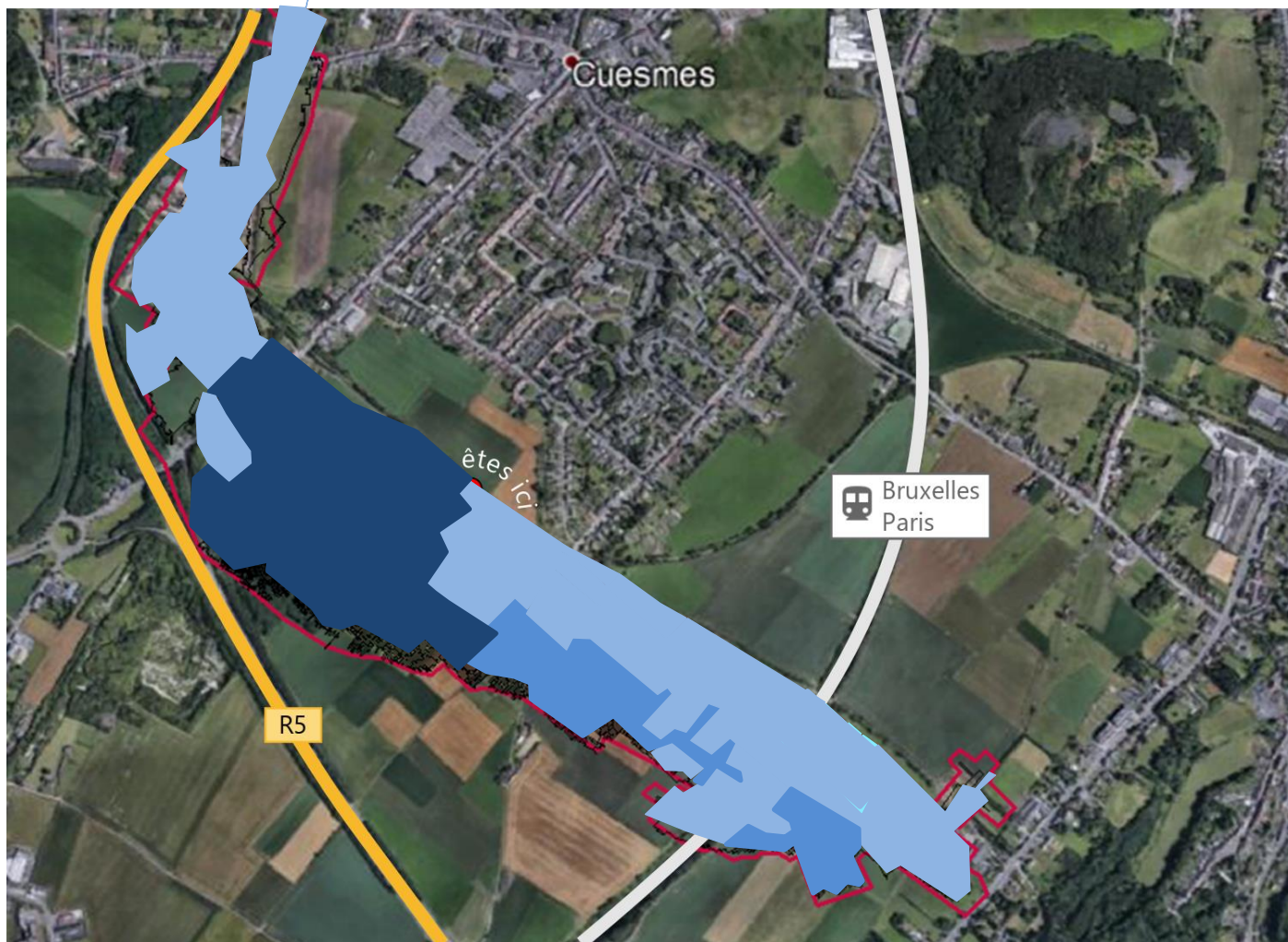
Jauche-la-Marne  
(carrière Renau-Fosse,  
topo SPW)

# Catiches en région lilloise





# Chambres et piliers dans la craie phosphatée à Mons



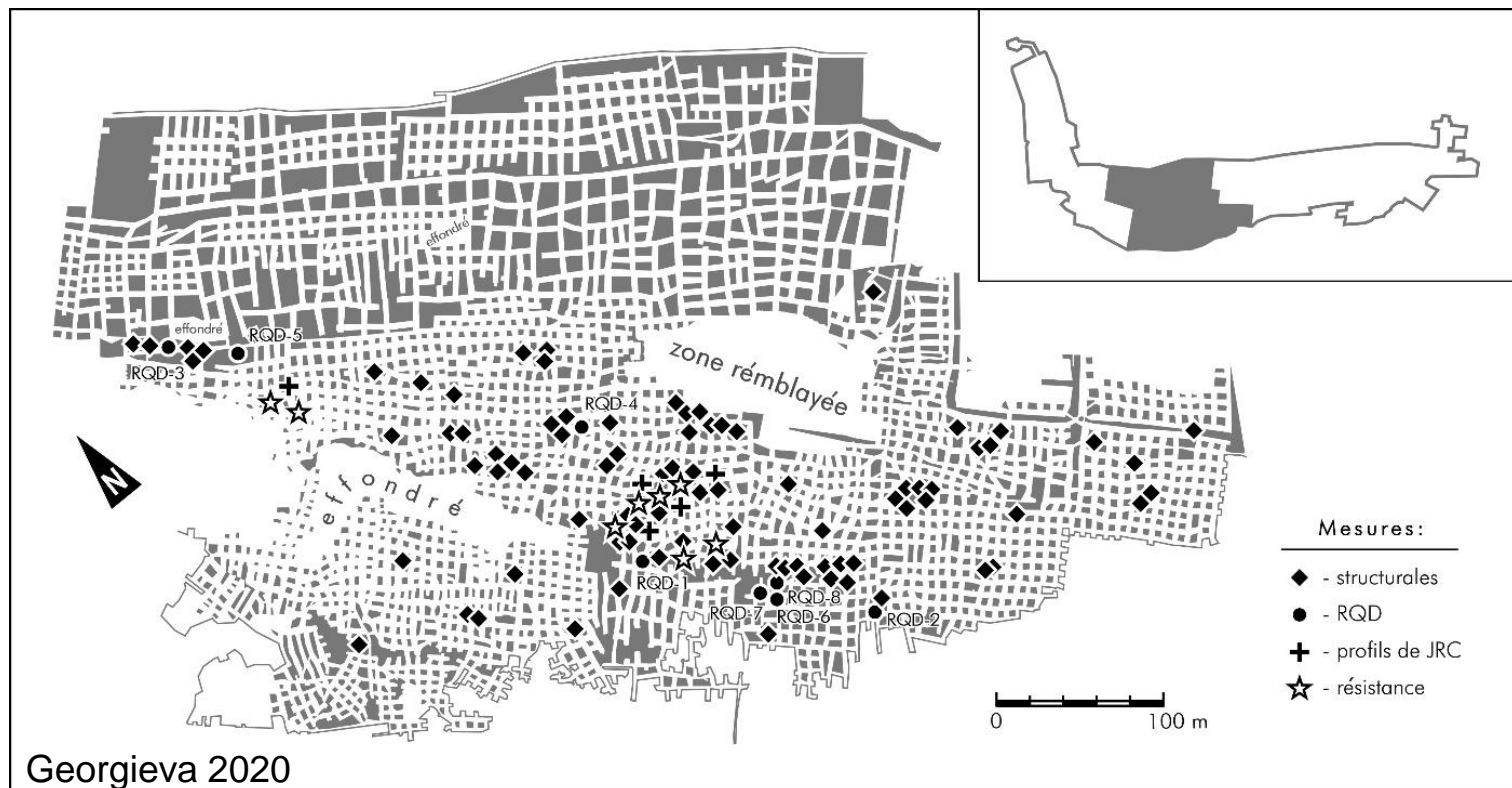
# La Malogne : plan d'exploitation

Entre 1877 et 1925

Craie phosphatée

Surface totale : 67 ha

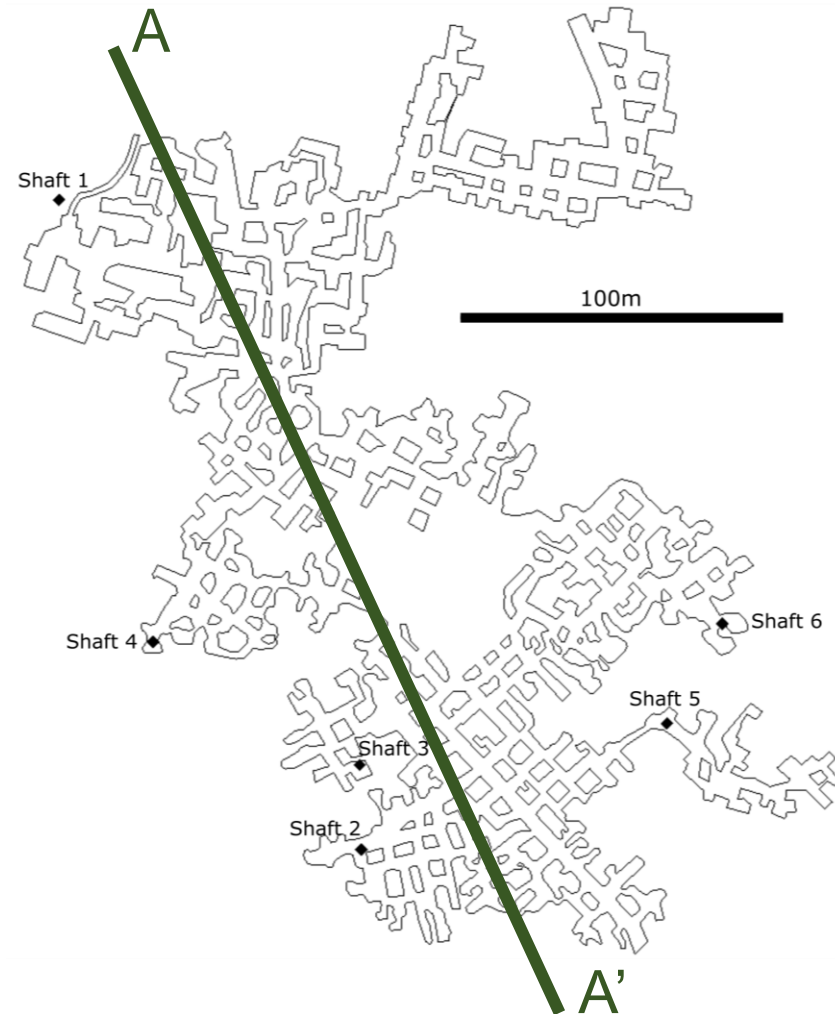
- H chambres : 4-4.5 m, jusqu'à 9 m
- Largeur des chambres : 4 à 5 m
- Largeur des piliers : 3.5 à 4.5 m
- Profondeur : entre 13 m et 25 m

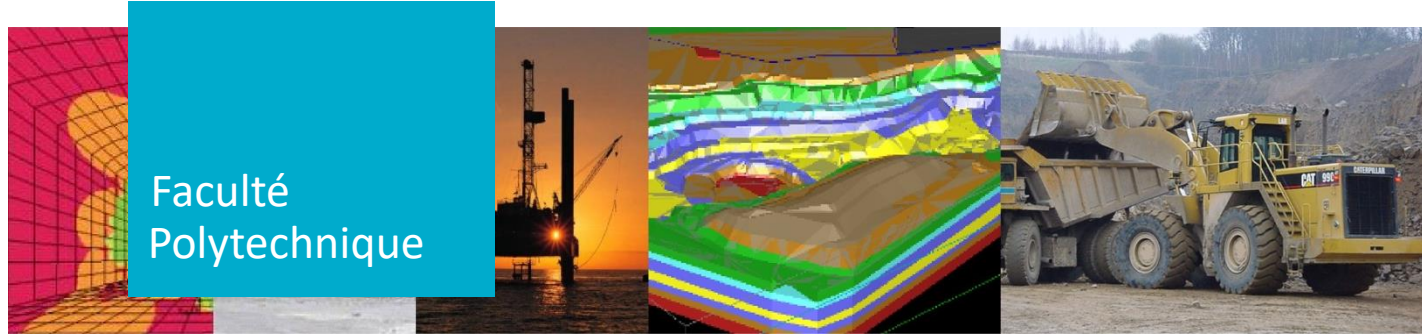


# Chambres et piliers

## Trou Loulou à Eben-Emael

- Exploitation au 16<sup>ème</sup> -17<sup>ème</sup> siècle
- Tuffeau de Gulpen
- Géométrie irrégulière des chambres et piliers
- Hauteur : 4.3m en moyenne, max. 10m
- Largeur des chambres : 8 m
- Largeur des piliers : 6m
- Profondeur : 10 à 30 m



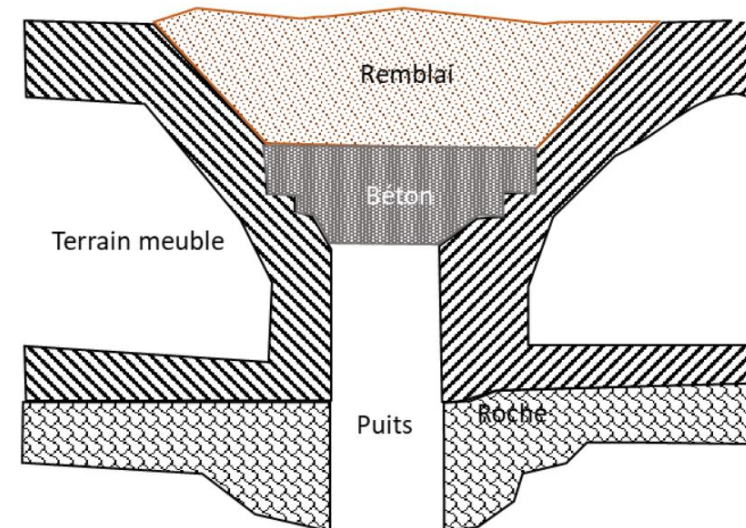
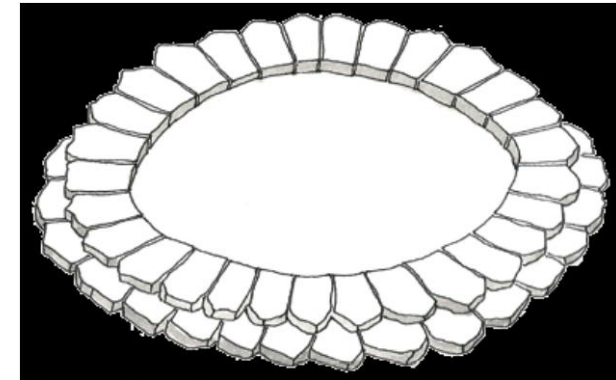
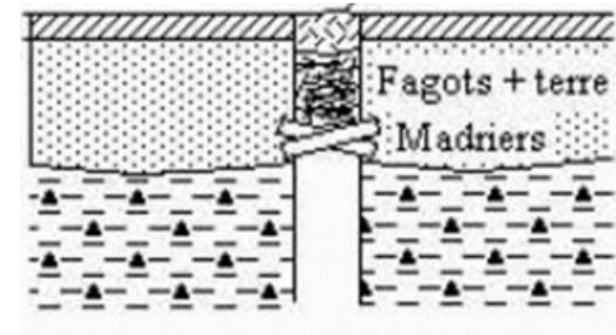


# Quels mécanismes d'instabilité pour quel type de cavité ?

# Cas des puits

Après exploitation, les puits sont fermés et abandonnés.

- **Remplissage** : total, partiel ou pas du tout
- **Bouchon** :
  - en surface ou sub-surface
  - ± élaboré, selon les régions et les époques
- Mécanismes de ruine possibles :
  - rupture de la tête de puits
  - déboufrage des remblais





2015  
Effondrement de la tête du puits  
Bure de Messe (Retinne)  
Concession Quatre-Jean et Pixherotte

Sources: SEROS



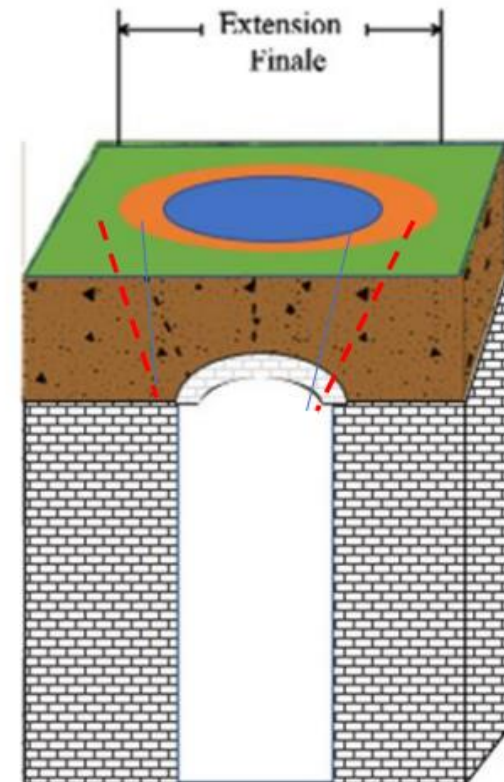
# Déboufrage de remblais

Souvent **effondrement localisé** :

- Initialement, extension de l'effondrement limitée au diamètre du puits
- Puis évolution en formant un entonnoir

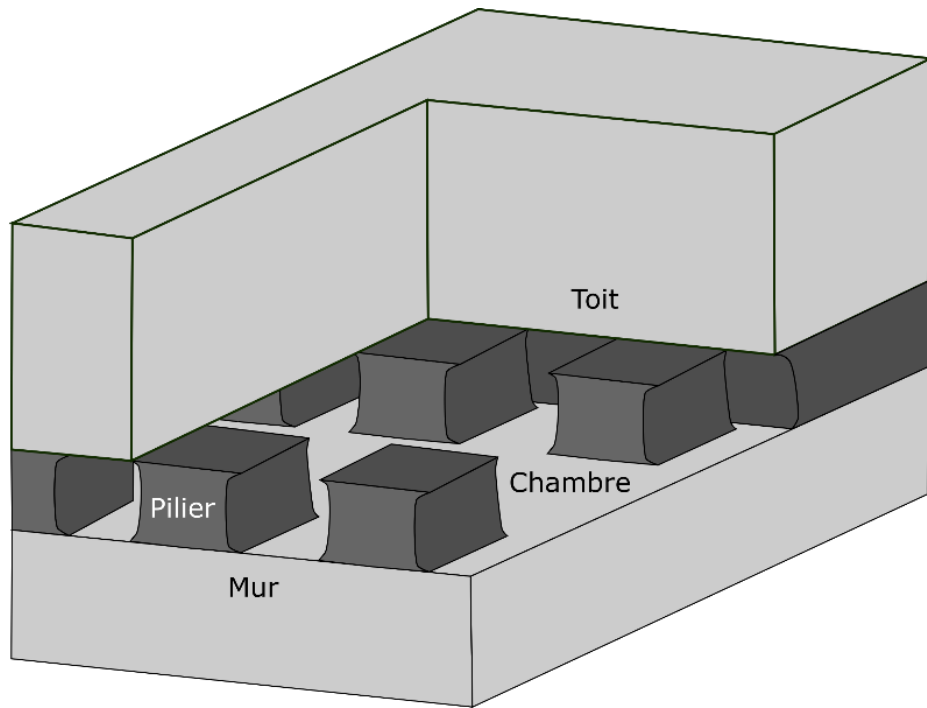
Parfois **affaissement** en surface :

- Cuvette d'affaissement à l'emplacement de l'ouvrage débouchant au jour
- Phénomène lent et progressif
- Amplitude de mouvement entre 0 et 0,5 m.
- Pas grave dans les zones peu urbanisées mais conséquences importantes pour une route ou un bâtiment



INERIS 2019

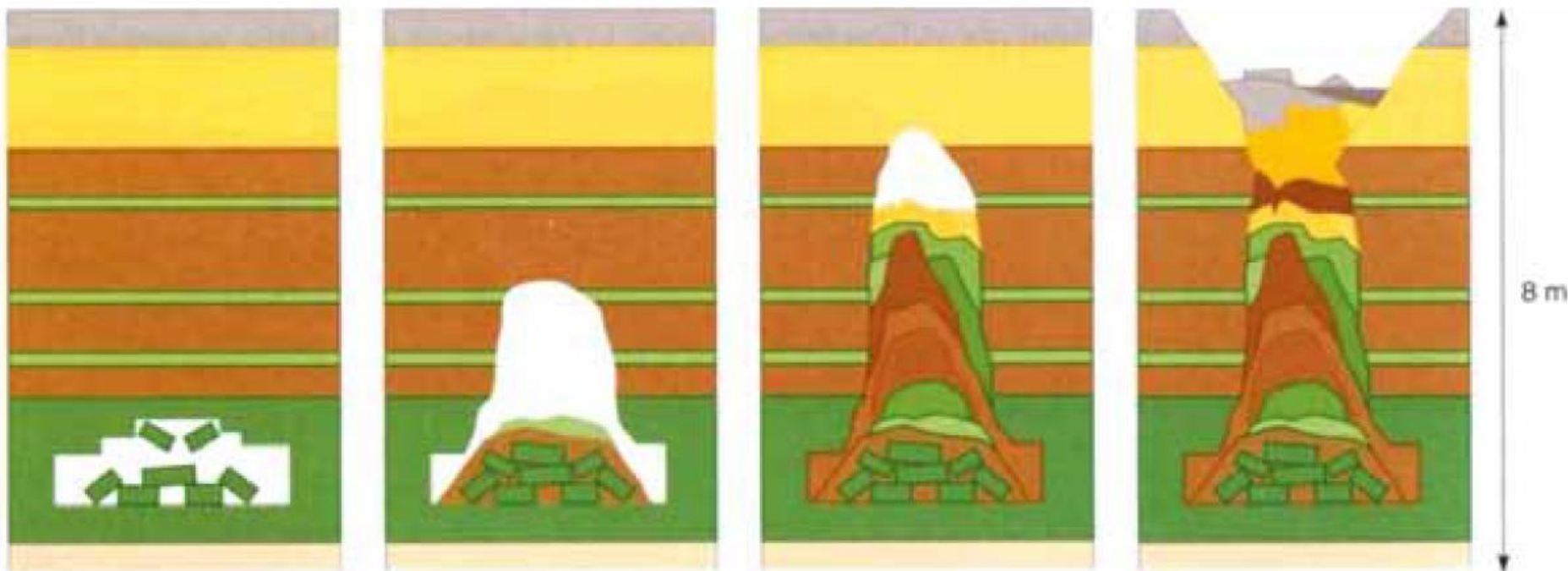
# Instabilités dans les carrières en chambres et piliers



- Ruptures **localisées** possibles
  - Au toit
  - Dans les piliers
  - Au mur (poinçonnement)
- Effondrement **généralisé**



# Rupture localisée au toit



Rupture de toit avec chutes de blocs dans une ancienne exploitation.

Début de formation d'une cloche de fontis. Un cône d'éboulis commence à se former.

La cloche de fontis continue à se développer vers la surface. Le cône d'éboulis a rempli la cavité souterraine.

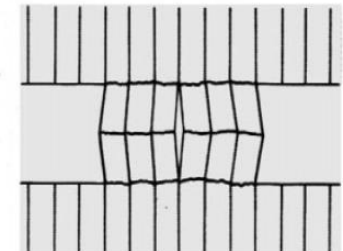
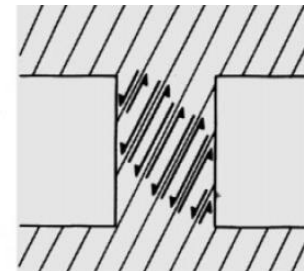
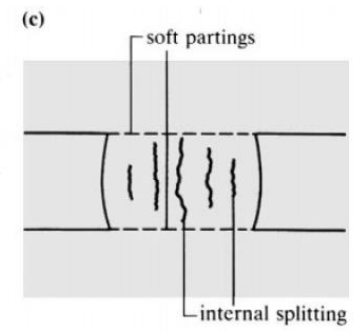
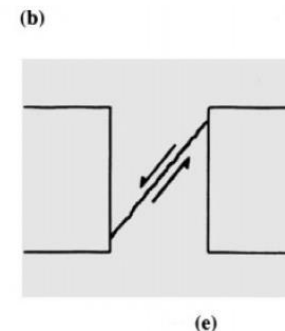
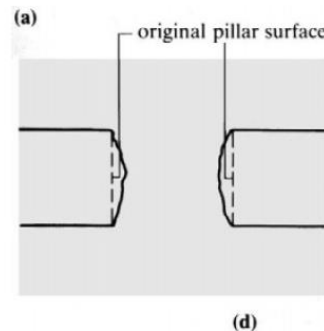
Suite à l'altération des terrains superficiels, le fontis prend une forme d'entonnoir stable.

Didier et Watelet 2012

# Rupture localisée des piliers

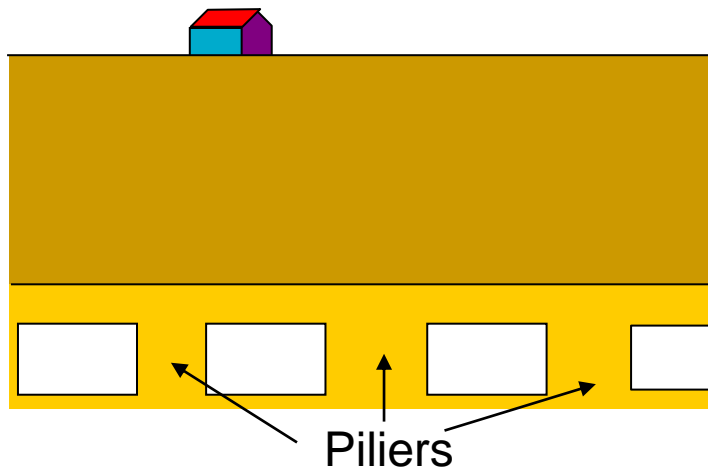
4 modes de rupture, parfois liés aux conditions géologiques :

- Ecaillage
- Cisaillement
- Fracturation
- Flambage

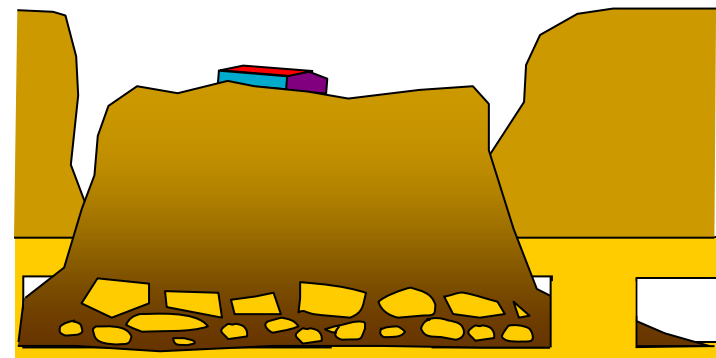


# Effondrement généralisé

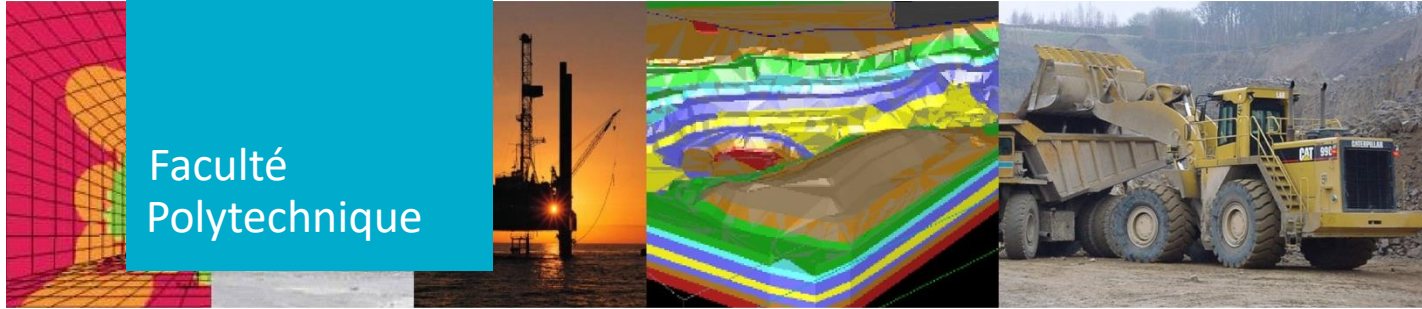
Les effondrements généralisés se manifestent lorsqu'une charge trop importante n'est plus supportée par un pilier affaibli ou déjà en ruine. La charge peut alors se reporter sur les piliers voisins qui, à leur tour, sont en surcharge. Cette configuration suppose également la présence d'un toit massif pouvant encaisser temporairement une déformation du massif et restituer brutalement l'énergie accumulée. La rupture des piliers produit un effet de souffle, avec des secousses sismiques.



Avant effondrement



Après effondrement généralisé

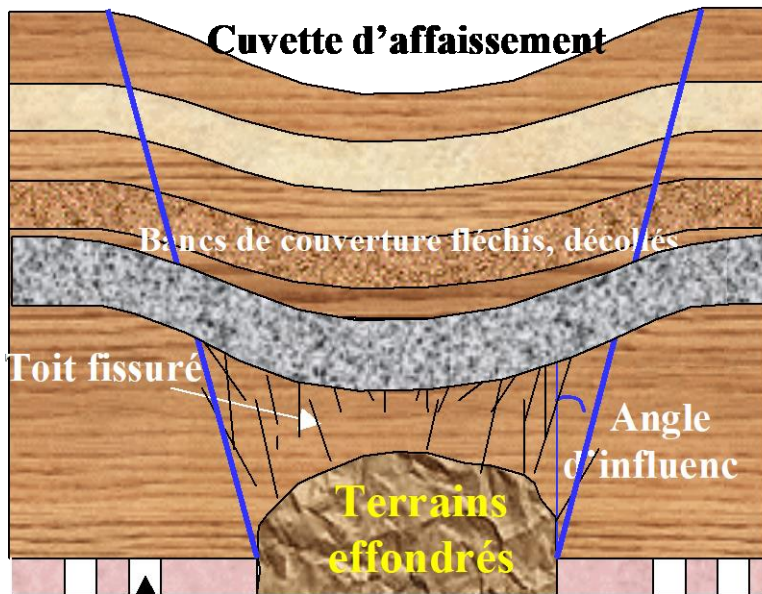


# Quels effets en surface ?

# Mouvements en surface

- **Tassement** : mouvement vertical de la surface du sol, de très faible ampleur (qqes cm à 1 dm); à l'inverse, gonflement (cas des argiles)
- **Affaissement** : dépression dans le paysage, plus ou moins étendue, aux bords souples et relevés (ex.: longue taille, tunnels)
- **Effondrement localisé** : forme de cratère, plus ou moins ouvert, d'un diamètre de un à plusieurs mètres (aplomb de la cavité), apparition brutale (ex.: fontis, rupture de tête de puits)
- **Effondrement généralisé** : rupture très rapide de tout ou partie d'une exploitation; profondeur : plusieurs mètres ; extension : plusieurs hectares (ex. chambres et piliers abandonnés)

# L'affaissement



Travaux miniers en place

Source: Geoderis

**Am** : affaissement maximum qui serait observé au centre de la cuvette (en m)

**Pm** : pente maximum que prendraient les terrains (en %)

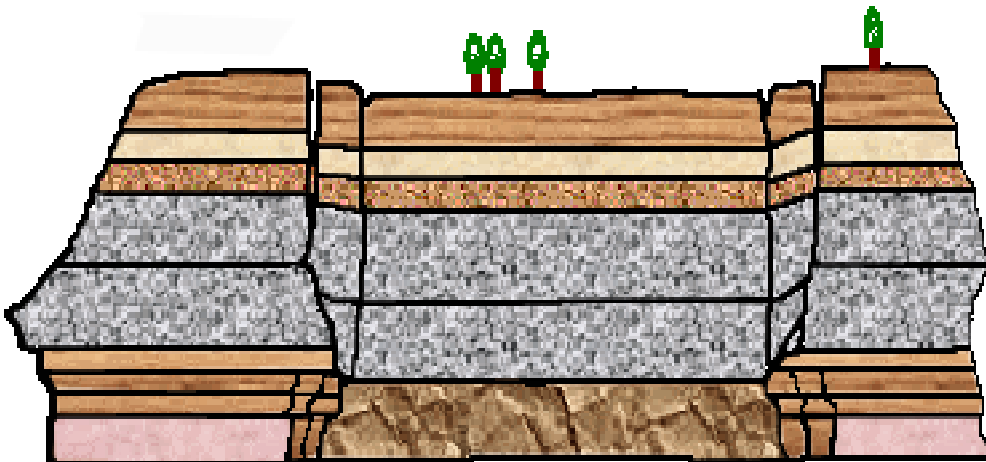
**Dm** : déformation maximum que pourraient subir les terrains (en mm/m).



# L'effondrement brutal

Exploitation très « fragile »  
Taux de défrèvement élevé /  
piliers élancés

Bancs raides dans le  
recouvrement



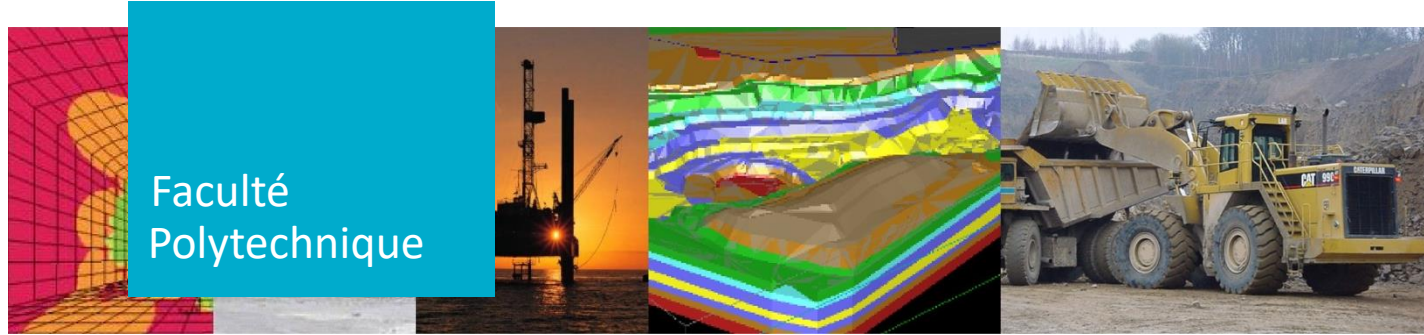
Source: Geoderis

# Effondrement généralisé

## La Malogne (Mons) en 2015



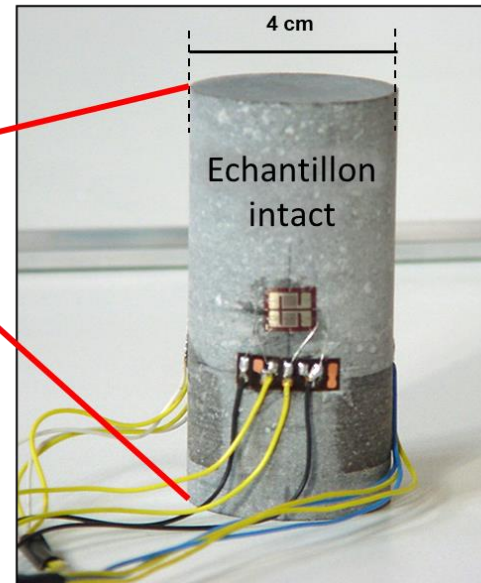




# Quelles approches scientifiques du problème ?

# Combiner différentes disciplines pour modéliser les phénomènes

- Caractérisation in situ et en laboratoire
- Identification du comportement mécanique des géomatériaux



➔ Loi de comportement

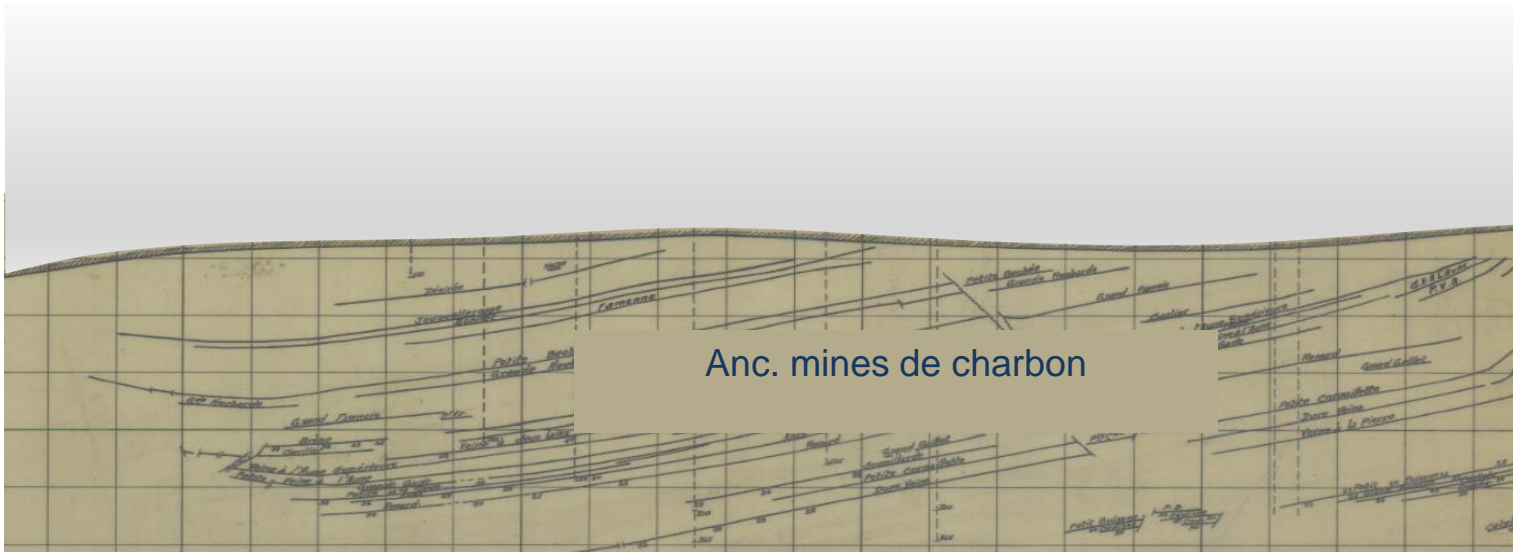
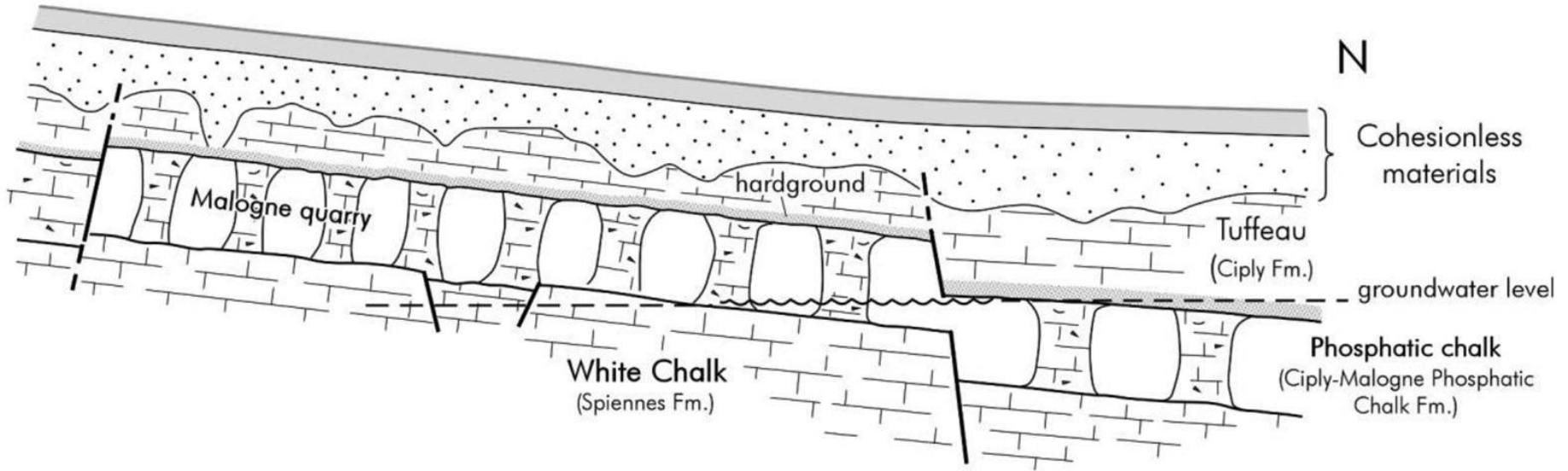
# Combiner différentes disciplines pour modéliser les phénomènes

- Caractérisation in situ et en laboratoire
- Identification du comportement mécanique des géomatériaux
- Modèles numériques géomécaniques pour étudier les mécanismes de ruine
- Cas particulier de l'influence minière sous-jacente

S

dry zone — | — tranzitional zone — | — water saturated zone —

N



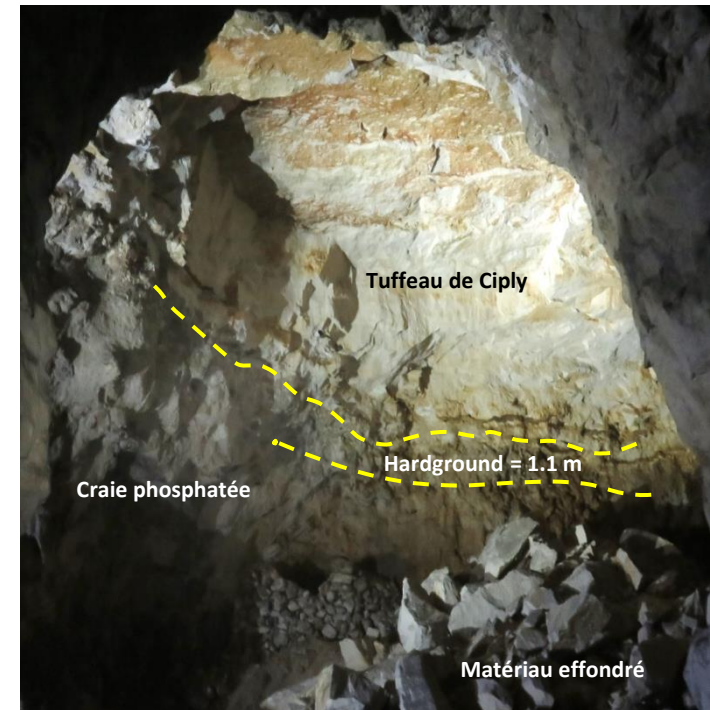
# Bref état des lieux

Site vaste et bien documenté

Phénomènes observés :

- Chutes de toit
- Eclatement de pilier
- Piliers en diabolo
- Karstification & oxydation

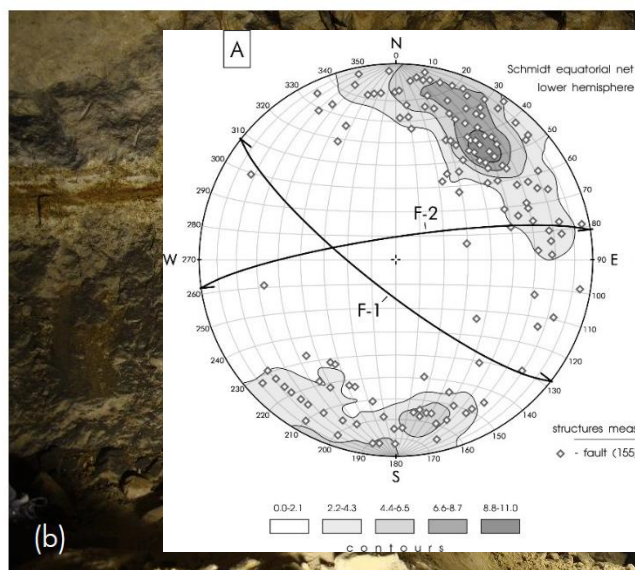
Cartographie



# Caractérisation du massif rocheux

Levé structural pour identifier les discontinuités dans le massif

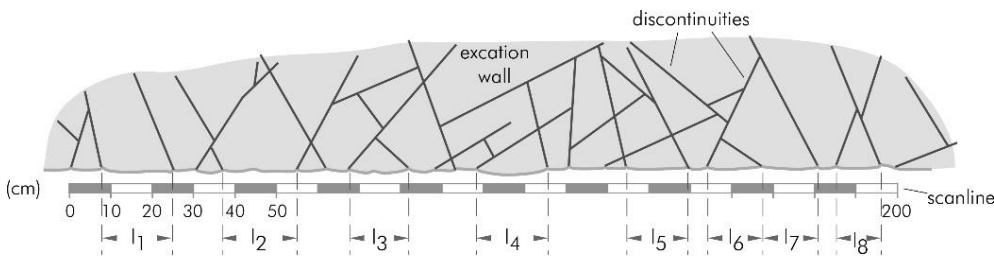
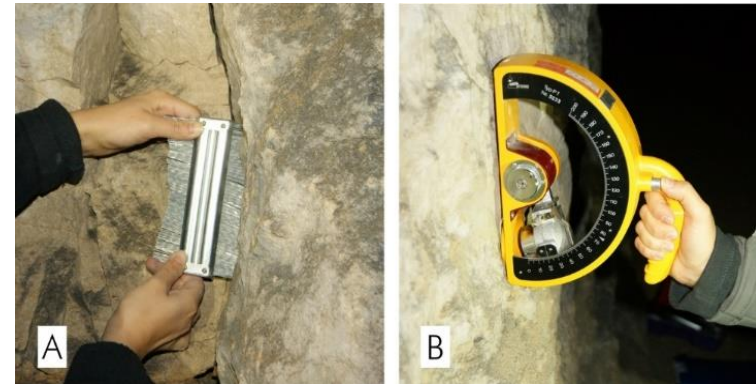
- 2 familles de failles F1 et F2
- 2 familles de joints



# Caractérisation du massif rocheux

Indices de qualité du massif (RQD, RMR, GSI)  
pour intégrer notamment :

- Espacement des discontinuités
- Résistance de la roche (mesures au marteau Schmidt)
- Nature des joints (rugosité)
- Présence d'eau



$$RQD_w = \frac{l_1 + l_2 + \dots + l_8}{\text{scanline length}} \times 100 (\%)$$



# Caractérisation en laboratoire

## Essais mécaniques

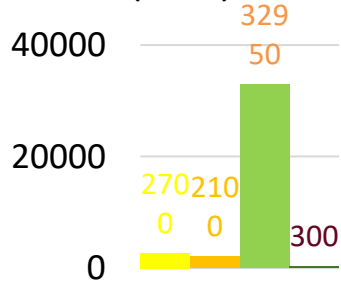
- Compression uniaxiale
- Traction brésilienne
- Essai polyaxial (HG)

## Objectifs :

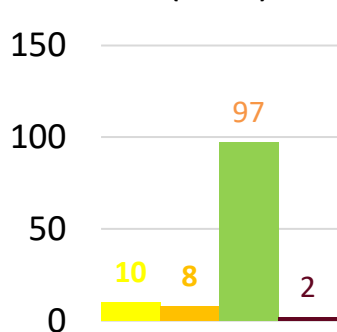
Décrire le comportement des matériaux sous sollicitations à l'aide d'un modèle mathématique

- ▶ Relation contraintes-déformations
- ▶ Domaine d'élasticité – Limite de plasticité/rupture

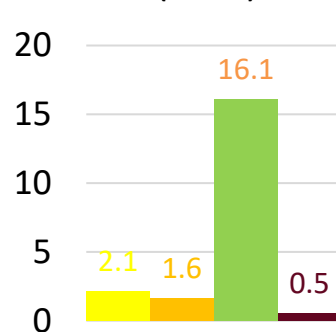
Module d'Young (MPa)



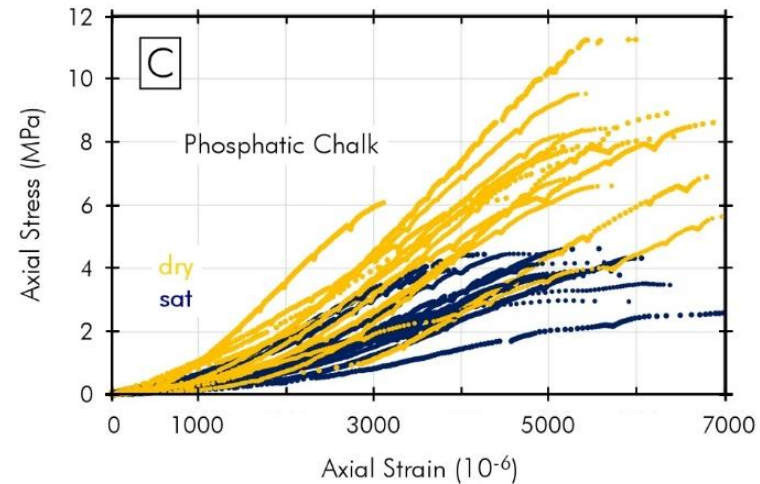
UCS (MPa)



Rt (MPa)



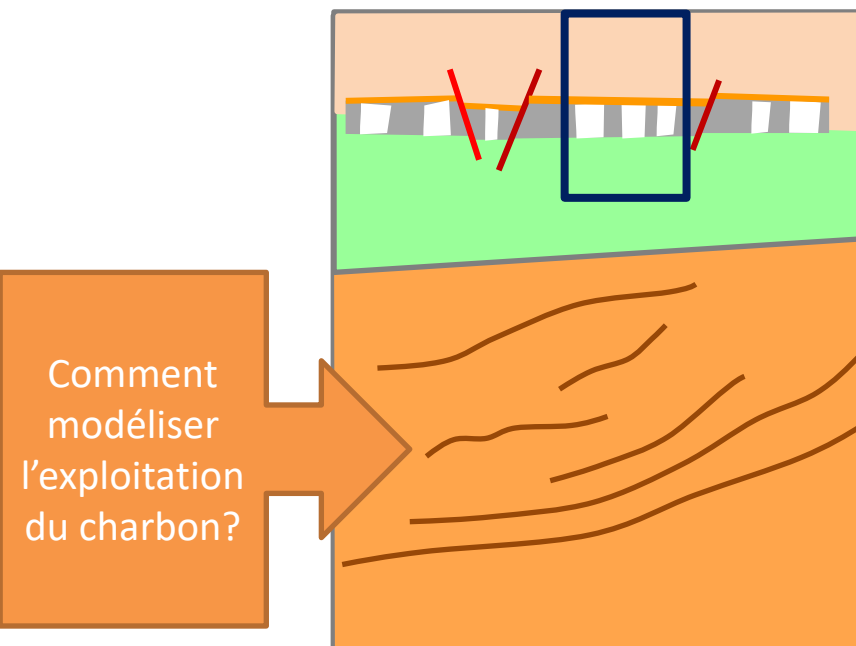
■ Craie blanche    ■ Craie phosphatée    ■ Hardground    ■ Tuffeau





# Construction d'un modèle numérique

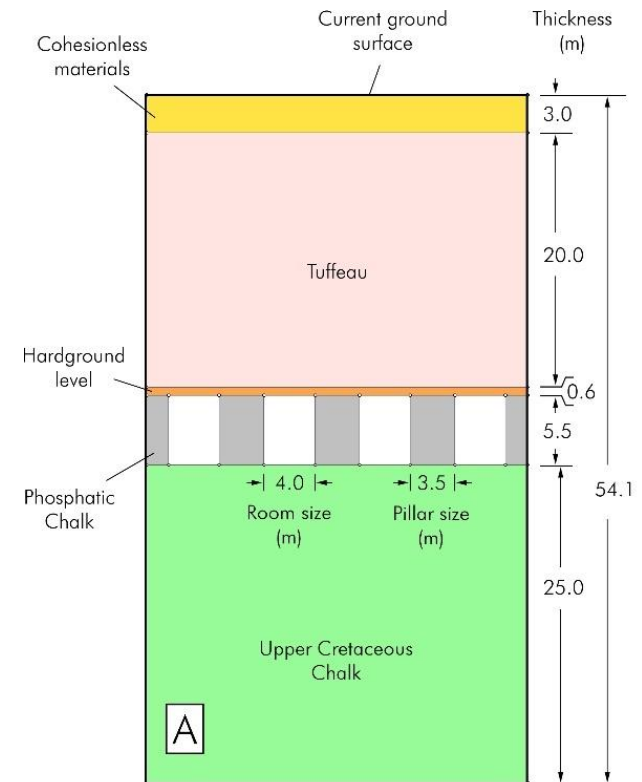
1. Modèle en grand avec la carrière de craie phosphatée et les veines de charbon



Conditions limites



2. Modèle local avec étude paramétrique des instabilités



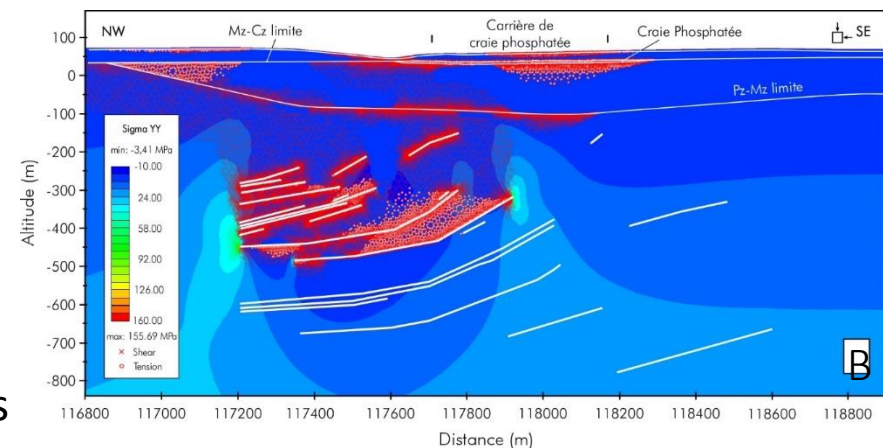
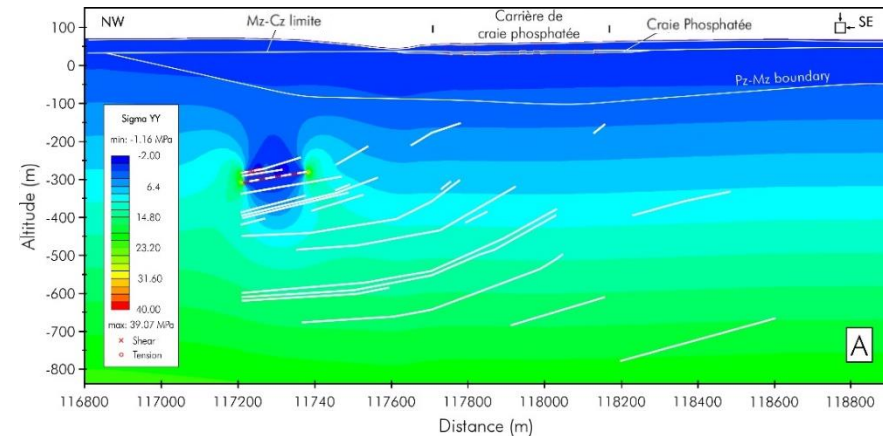
# Analyse FEM

## ■ T1 : exploitation du charbon selon séquence des plans miniers (1860-1877)

- Création de vides puis remplacement par un matériau « arrière-taille recompactée »
- Redistribution des contraintes
- Affecte surtout le houiller
- Peu d'effets en surface

## ■ T2 : exploitation de la craie et du charbon (1877-1925)

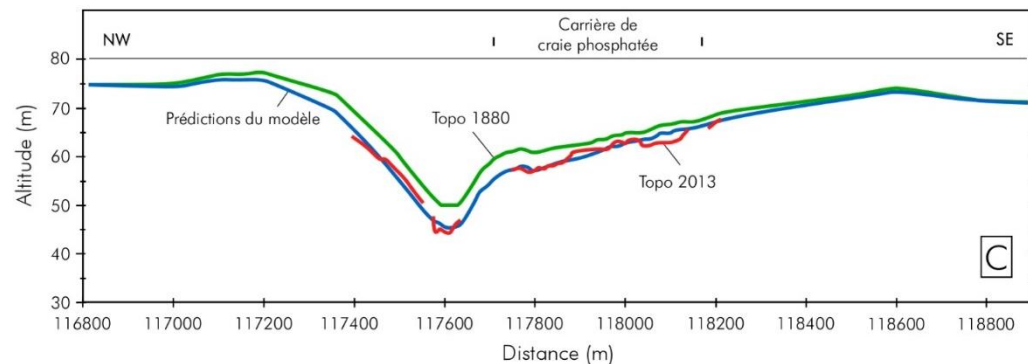
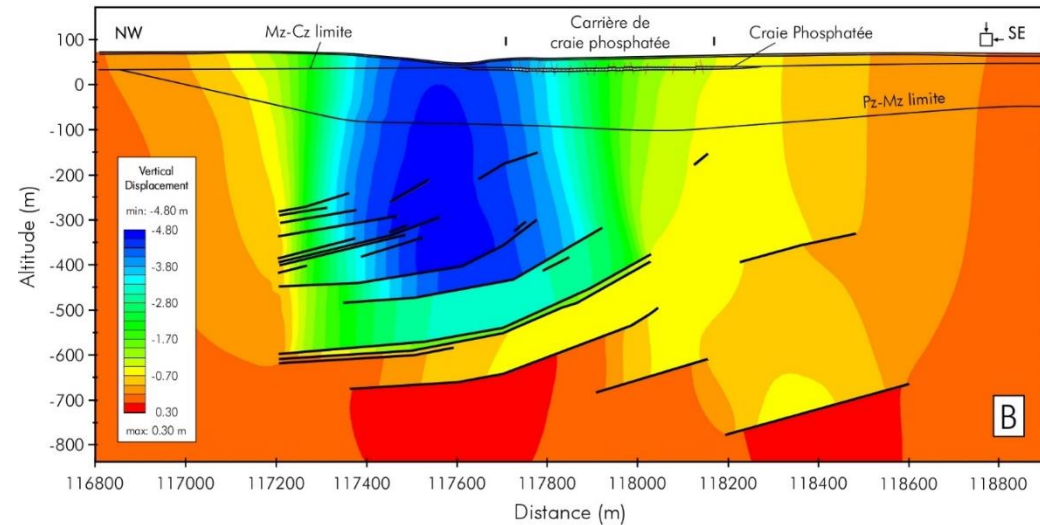
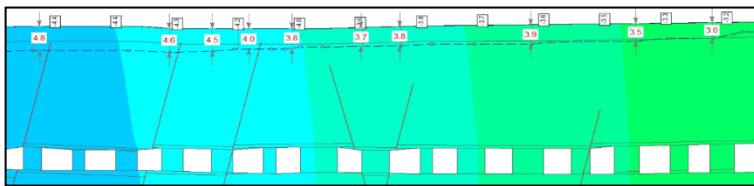
- Séquence inconnue dans la craie
- Conceptualisée en 3 phases
- Initiation et propagation de rupture au toit des veines, à travers interbanco (foudroyage)
- Zones plastiques dans intercalaires stériles
- Effets dans la craie



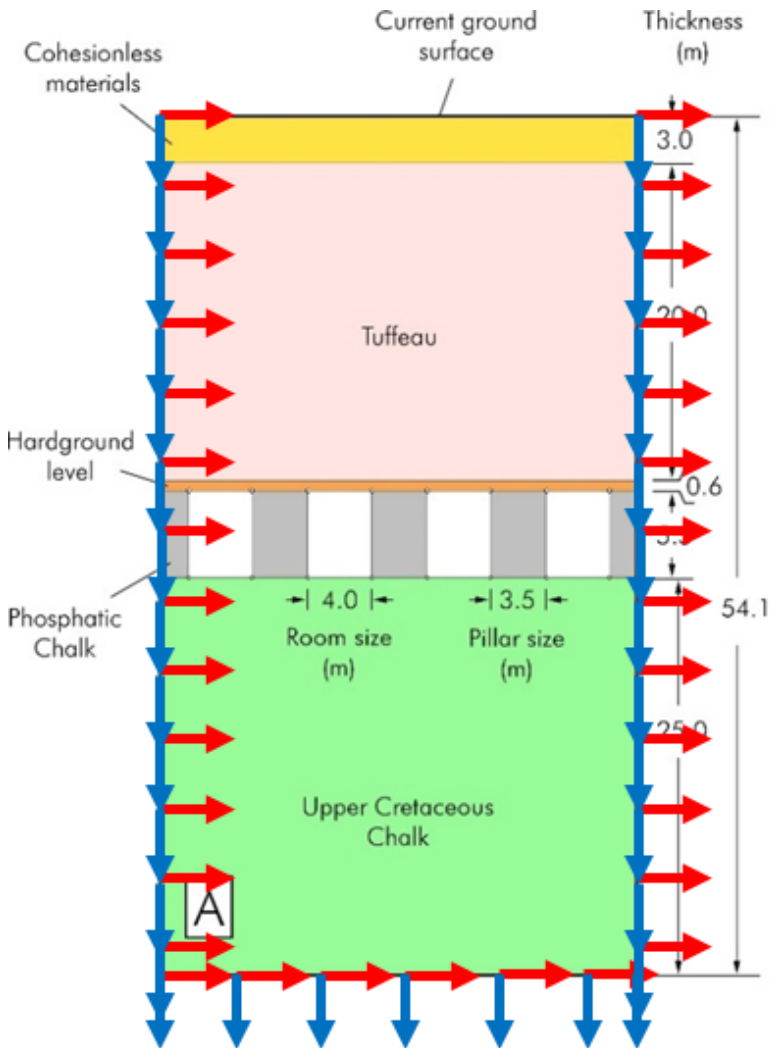
# Analyse FEM

- **T3 : exploitation du charbon**
- **Fin d'exploitation :**
  - Profil de subsidence asymétrique
  - Subsidence max. 4.8 m
  - // épaisseur cumulée de charbon exploité
  - Pas au droit de la carrière souterraine

## Zoom sur la Carrière de craie



# Passage à l'échelle locale

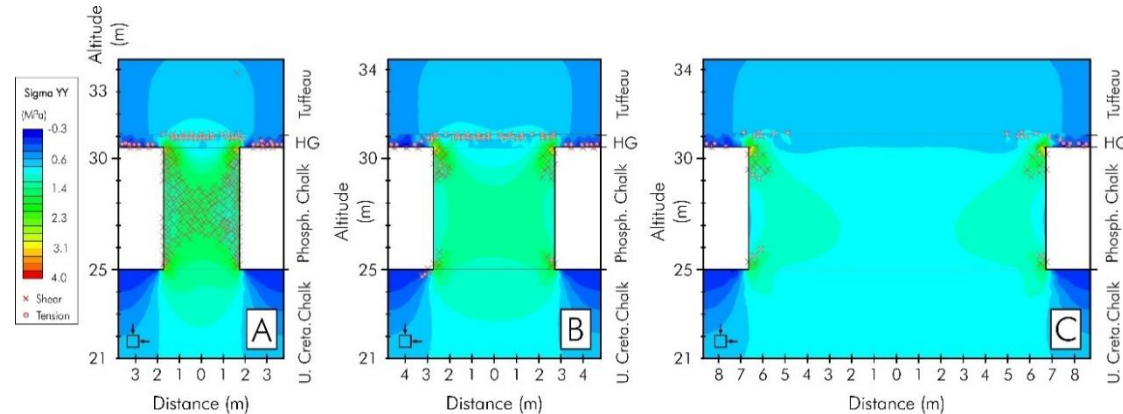


Les modèles précédents fournissent les conditions aux limites en termes de

- ↓ Déplacement vertical : -2.5 à -3m selon profil
- Déplacement horizontal : -1.3 à +0.6m selon profil

# Influence de différents paramètres

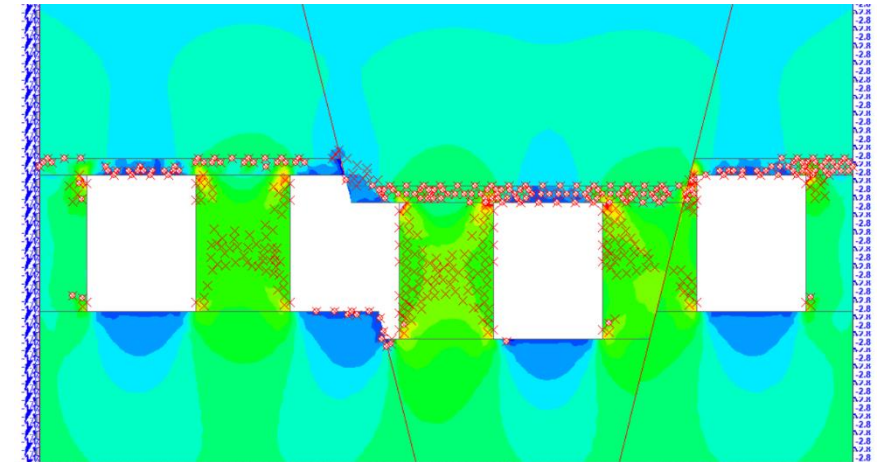
Taille des piliers



Lithologie (présence de hardground)

Présence de discontinuités

Effets combinés



# Aléa mouvement de terrain

**Période** de référence = siècle → dégradation des caractéristiques des massifs rocheux

**Intensité** du phénomène:

- ampleur des désordres
- impacts ou nuisances provoqués



hiérarchisation  
+  
potentiel de gravité

**Probabilité d'occurrence :**

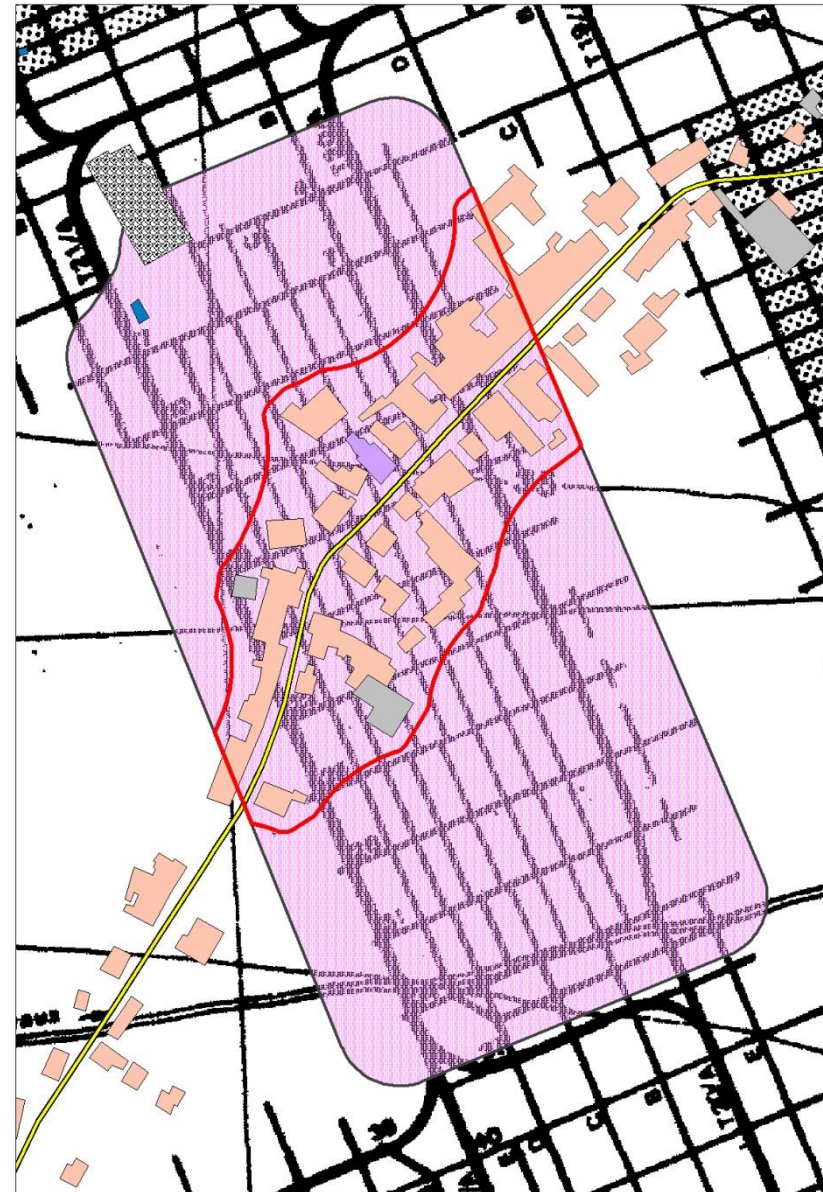
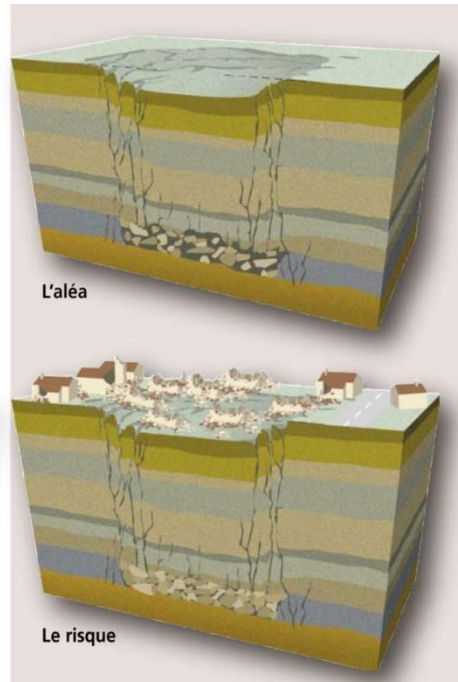
- difficile à quantifier
- approche qualitative: prédisposition (facteurs favorables ou défavorables)

**Aléa MVT = Intensité x Prédisposition**

# Risque

≠ aléa

Croisement entre l'aléa considéré et la vulnérabilité des enjeux actuels et futurs, potentiellement exposés (personnes, biens, activités, ...)

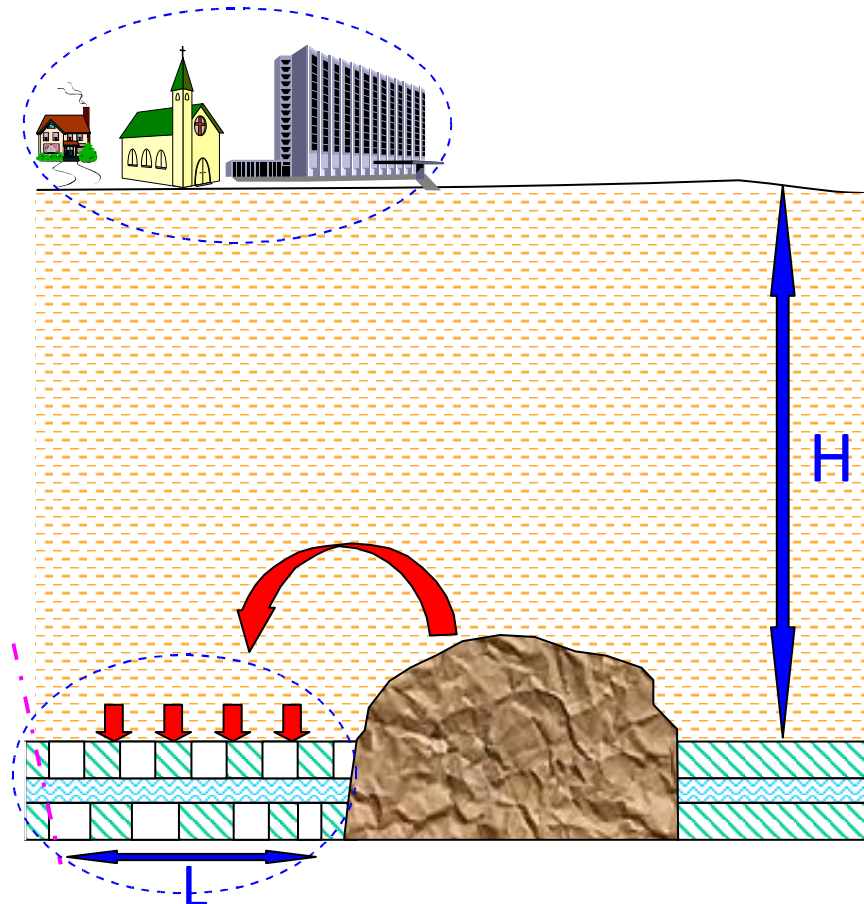


Source : GEODERIS (BFL 2015)

# Analyse du risque sur le Bassin Ferrifère Lorrain

## 2. Sensibilité de la surface

- Affaissement
- Profondeur H
- Etendue
- Vulnérabilité

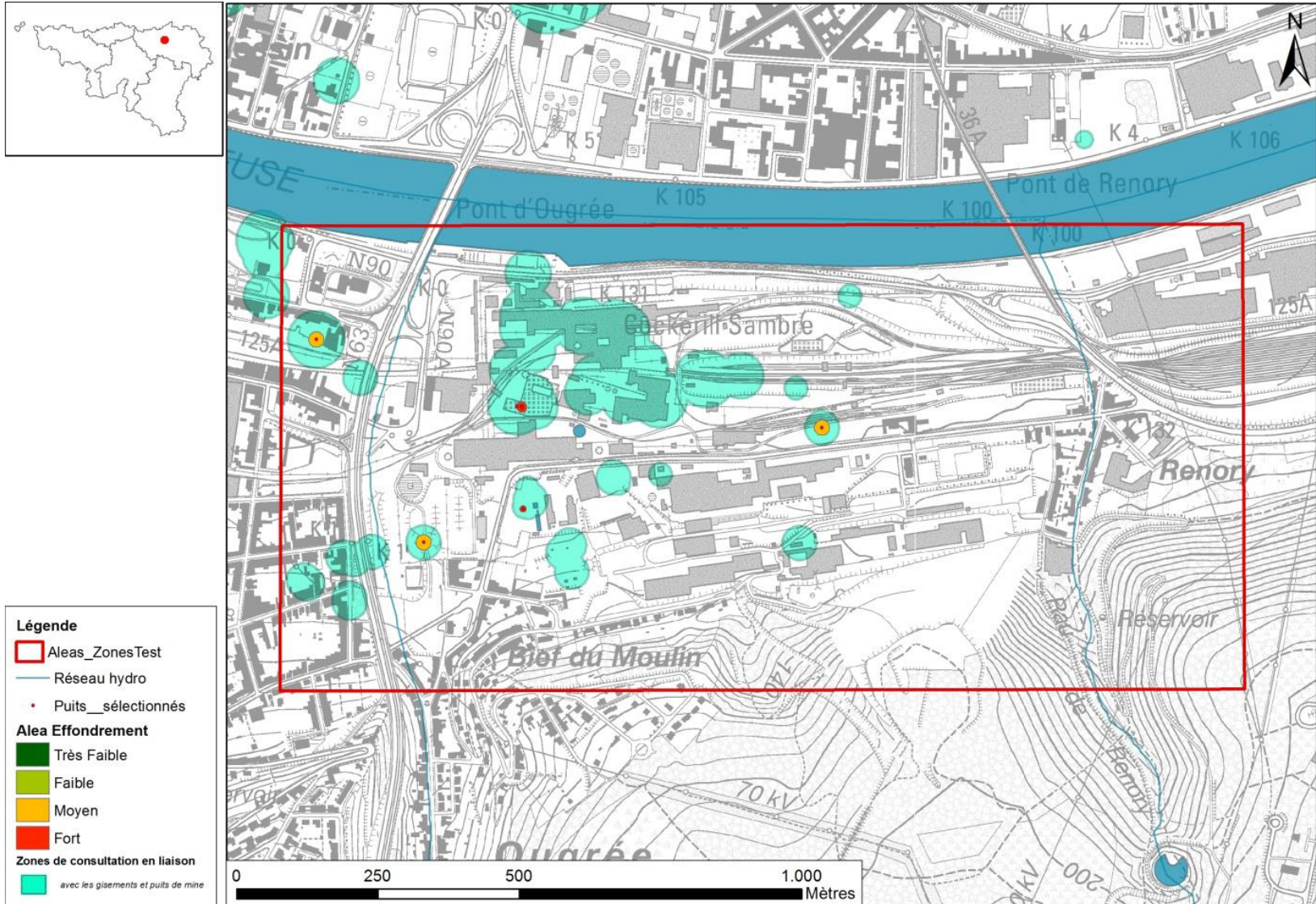


## 1. Probabilité de rupture

- Contraintes
- Faille
- Taille, forme des piliers
- Superposition
- Sensibilité à l'eau (marnes)

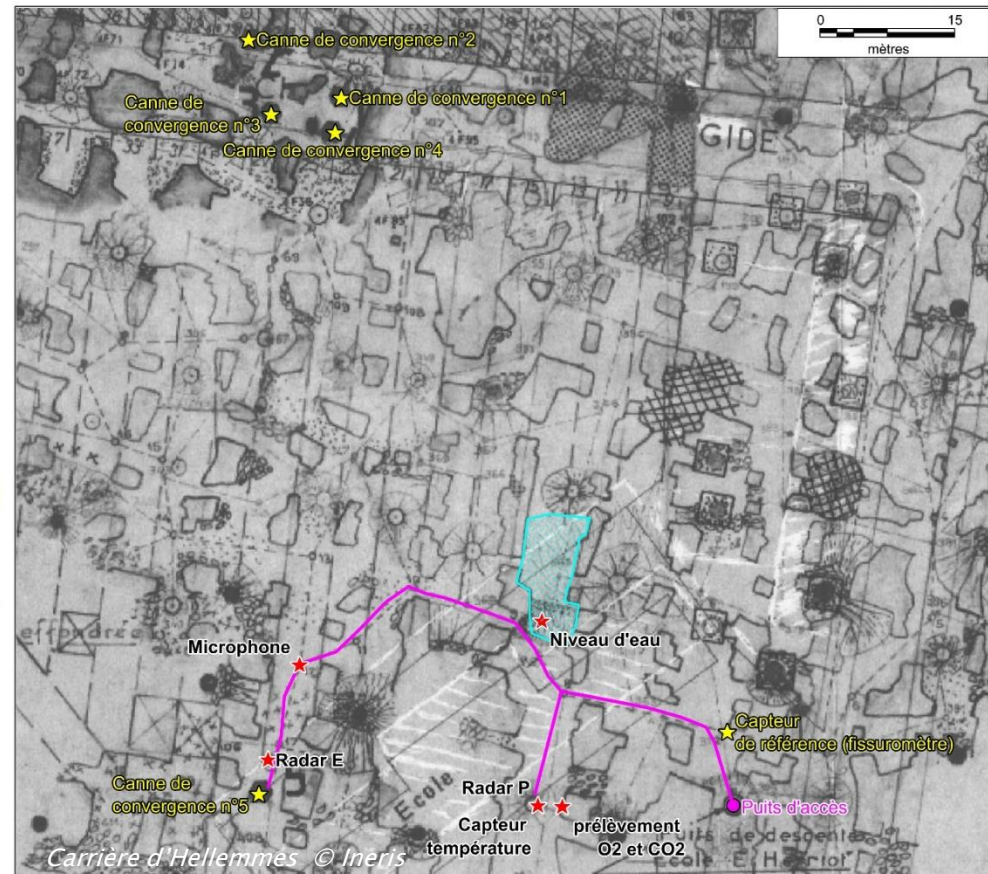
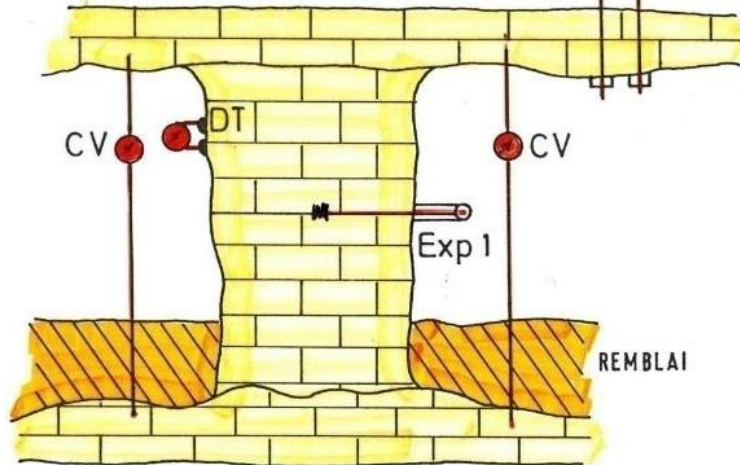


# Puits de mine en Wallonie : zones de consultation vs carto d'aléa



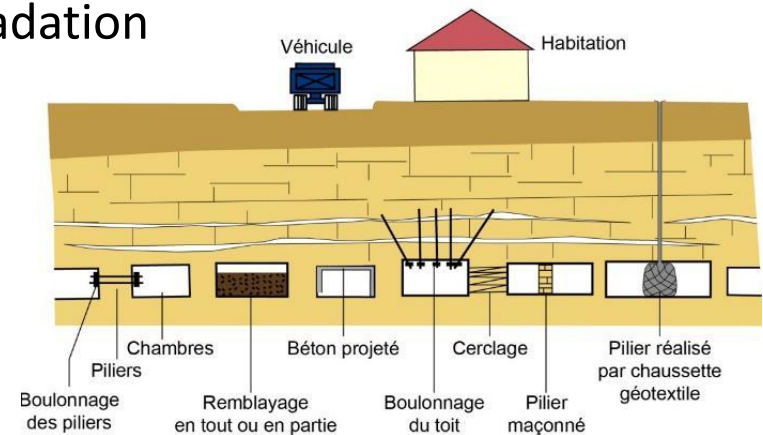
# Surveillance ou monitoring

Instrumentation : mesure de déplacements, de pressions +  $t^{\circ}$ , humidité, gaz

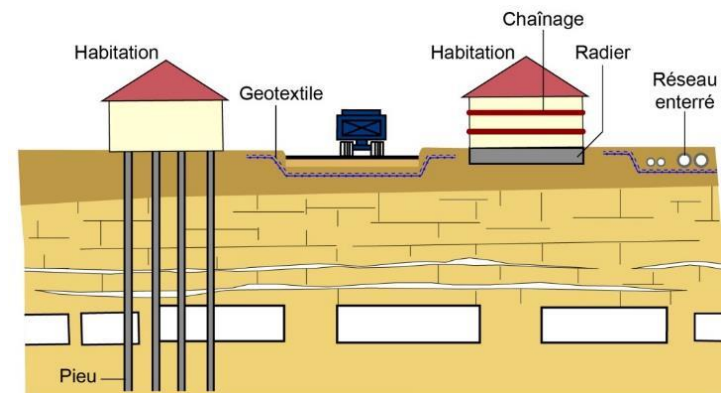


# Comment traiter une cavité ?

- Diagnostic : origine et mécanisme de dégradation
- Niveau de sécurité recherché ?
  - aléas redoutés ?
  - que peut-on admettre en surface ?
- Destination du site ?
  - prévention
  - réhabilitation de la surface
  - conserver la cavité ouverte
- Configurations du site ?
  - accessibilité
  - emprise/volume à traiter
  - présence d'eau
  - ...



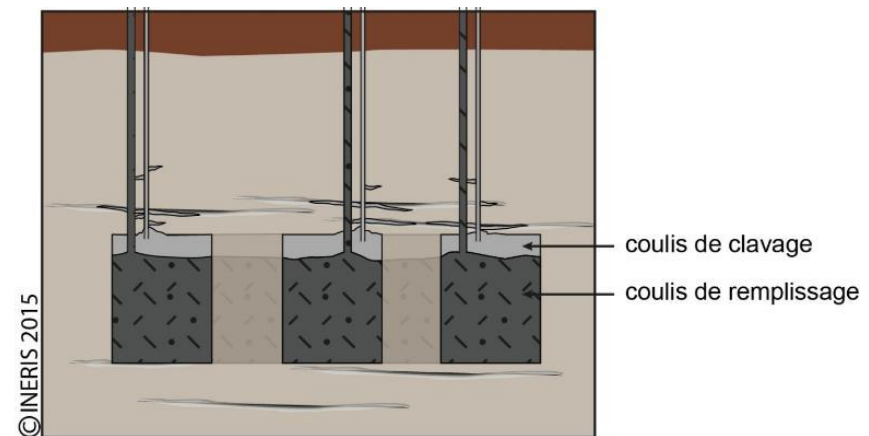
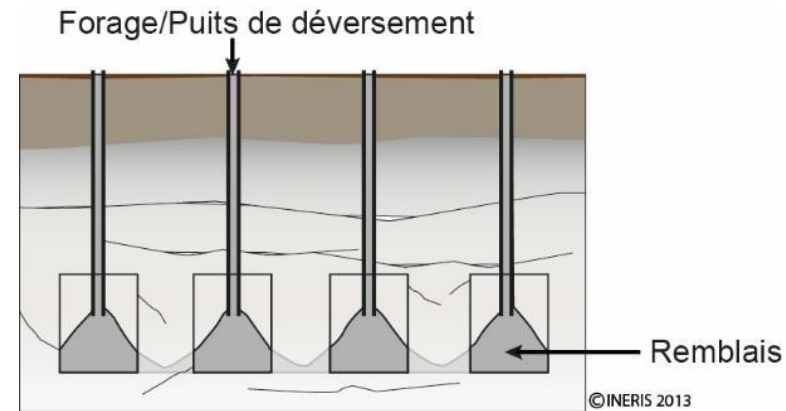
Méthodes « actives »



Méthodes « passives »

# Comblement de la cavité

- Objectif : conforter et réduire les vides résiduels
- **Par déversement gravitaire depuis la surface** : remplir la cavité avec un matériau grossier et inerte
- **Par injections depuis la surface** : consolider des matériaux effondrés ou combler des vides par injection sous pression de produits

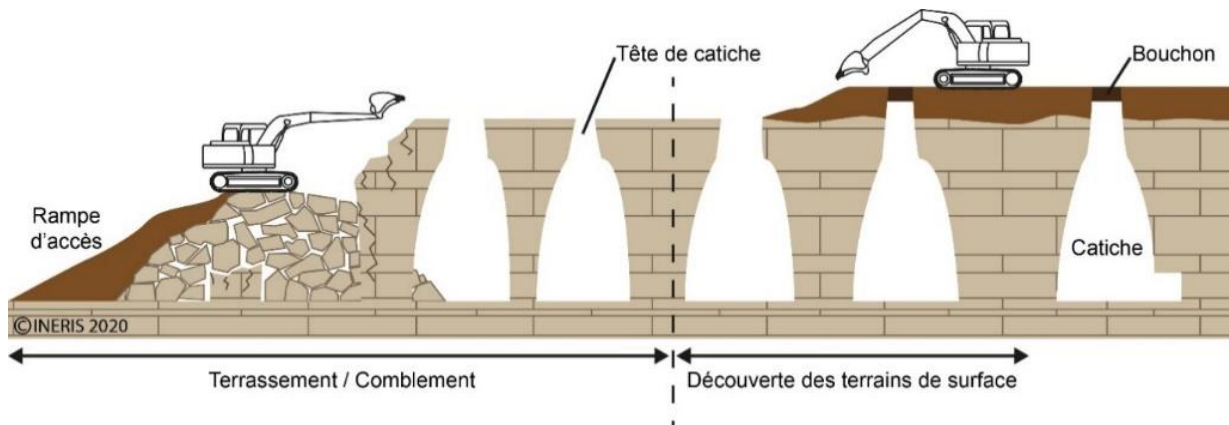
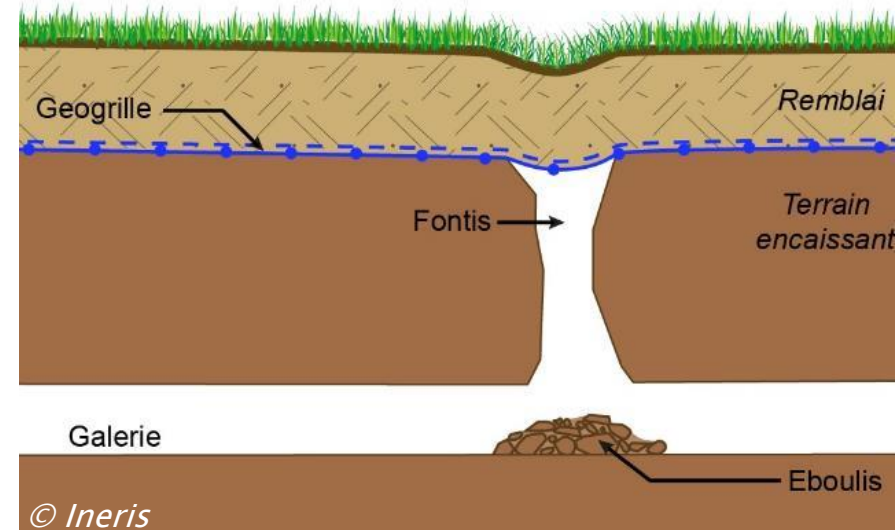


*Barrage béton (Cuesmes) © L. Funcken*



# Solutions alternatives au comblement par du béton

Béton mousse © Aerolithys



# Valorisation des cavités

## Une autre approche de la gestion du risque ?!

- Stockage
  - Aliments (vins, fromages, champignons...)
  - Civil ou militaire
  - Archives ou données numériques
  - Matières énergétiques ou ressources en eau
  - Déchets : stériles d'exploitation, ménagers
- Activités touristiques et patrimoniales
  - Musées souterrains
  - Parcours découvertes
  - Salles de spectacle ou d'exposition
  - Parcours/activités « sportives » (escape-game)
  - Sites à vocation pédagogique





Grottes du Han@walloniebelgiquetourisme.be



Data center DEEP (enia.fr)



Plateforme pédagogique et expérimentale de l'Ineris



# Envie de creuser la question ?

- <https://geoportail.wallonie.be/walonmap>
- <http://geologie.wallonie.be/home.html>
- <https://www.interreg-fwvl.eu/>
- <https://www.rissc-interreg.eu/>

