

# Risques géotechniques et comportement **à long terme** des mines fermées

Marwan AL HEIB, Isabelle VUIDART et Vincent RENAUD

Ineris



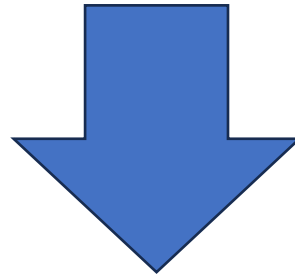
# Plan

- Introduction
- Conséquences des mines fermées/abandonnées
- Mécanique des roches et risques géotechniques des mines fermées
- Analyse prédictive d'un effondrement généralisé : cas d'Angevillers
  - Description du site
  - Mouvements observés
  - Modélisations numériques à l'échelle du site
  - Analyse des premiers résultats
  - Bilan/Discussion
- Conclusion

# Mine fermée / Mine Abandonnée

**Mine fermée** : est un site qui a fait l'objet des travaux de mise en sécurité, après l'arrêt/l'abandon de l'exploitation. La fermeture d'une mine est réglementée.

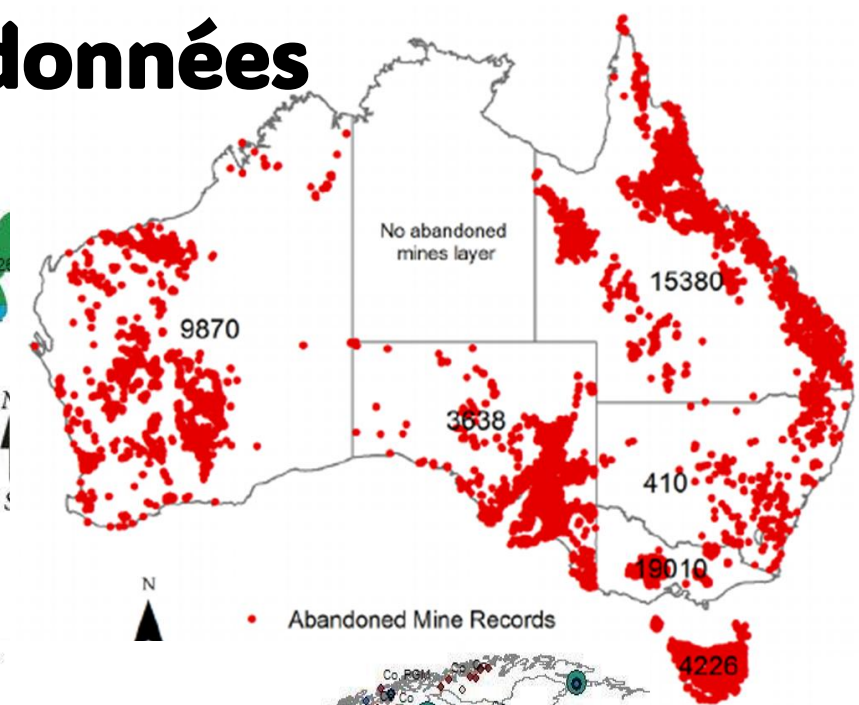
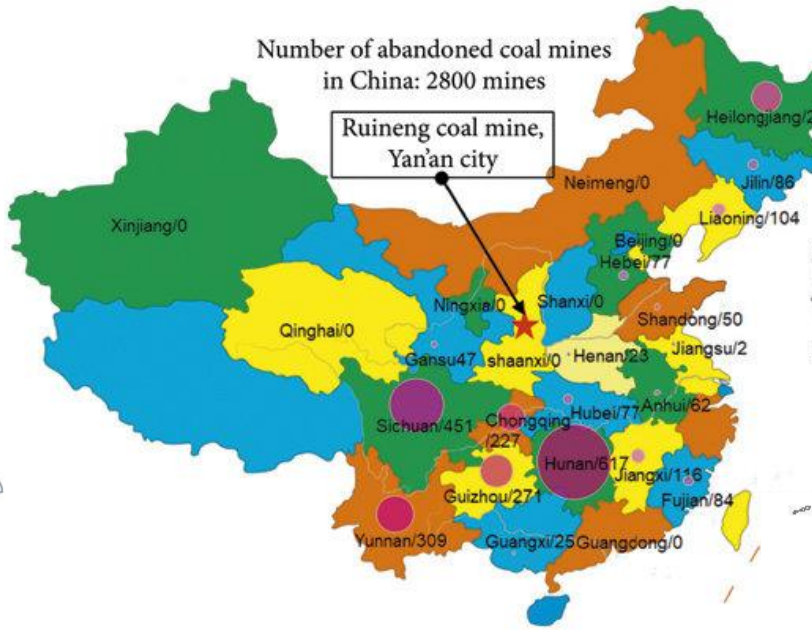
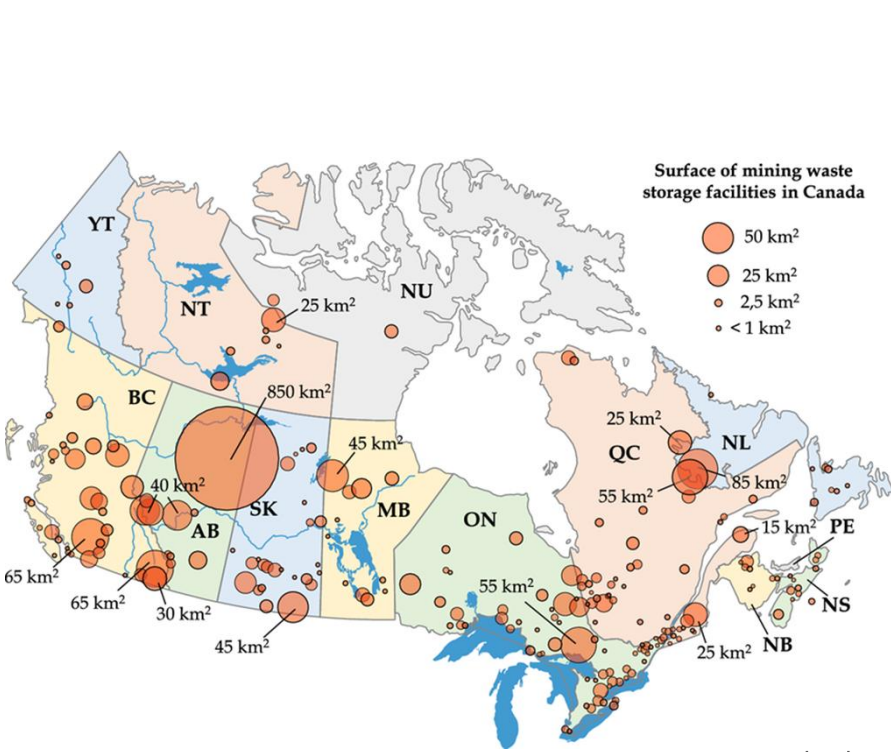
**Mine abandonnée** : est un site où l'exploitant a cessé l'activité sans mettre en place les mesures nécessaires pour sécuriser ou remettre en état l'environnement.



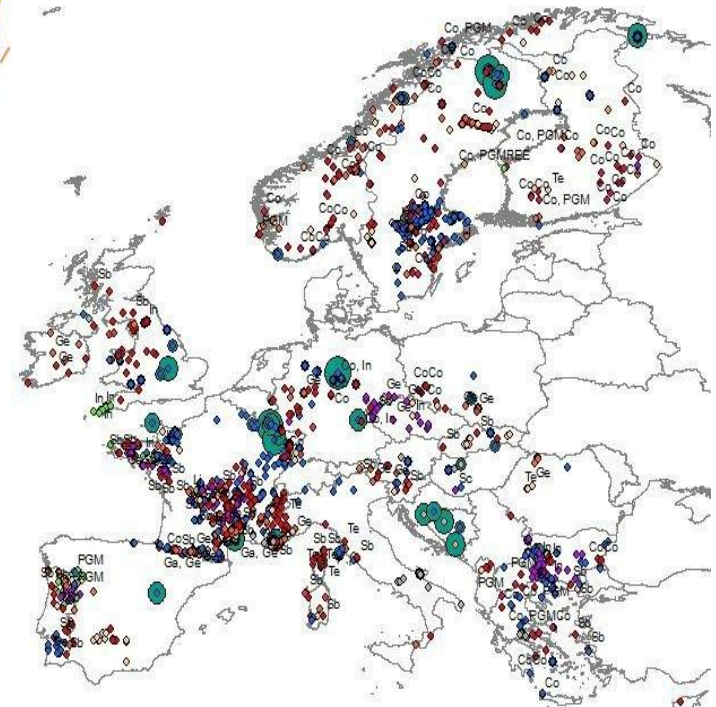
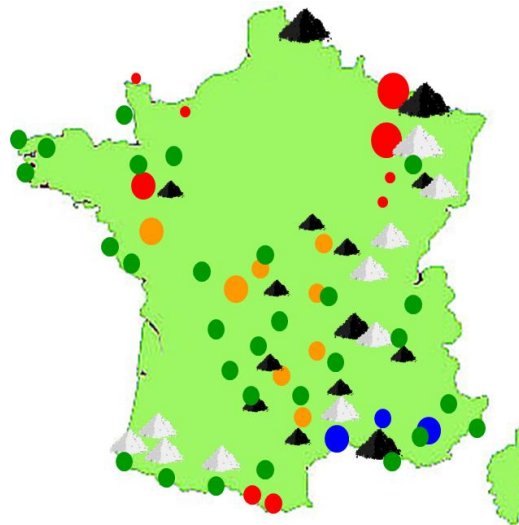
**Mine abandonnée** = laissée telle quelle → potentiellement **dangereux**.

**Mine fermée** = **site sécurisé**, **risques résiduels identifiés et partagés**, et **surveillés**.

# Exploitations minières / Mines abandonnées



- Charbon
- Sel
- Fer
- Aluminium
- Uranium
- Autres métaux



# Conséquences des mines fermées ou abandonnées

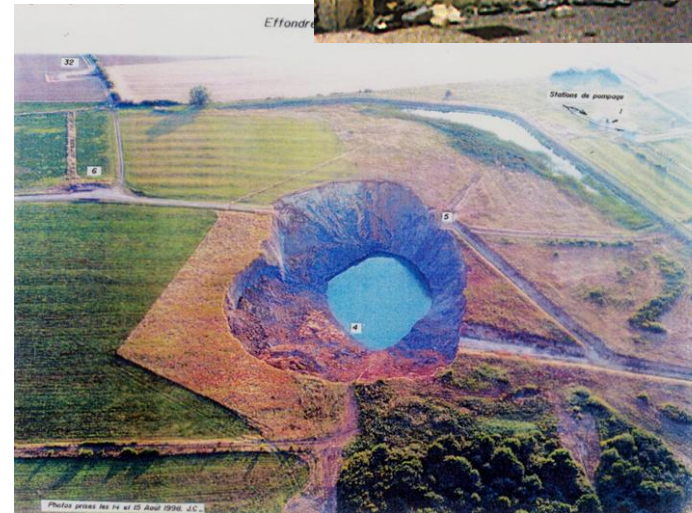
Type de mine	Risques associés	Niveau global de risque résiduel
Souterraines	Mouvements de terrains (MVT), inondations Gaz, incendies Drainage acide, pollution et risque sanitaire Effondrements rapides, dissolution	★★★★★
Ciel ouvert	Instabilités, pollution des eaux de lacs	★★★
Sites avec digues / résidus miniers	Ruptures/effondrements catastrophiques potentielles, impact environnemental	★★★★★

# Mouvements de terrains et dommages

- Affaissements
- Effondrements
- Fontis
- Crevasses
- Autres formes de MVT

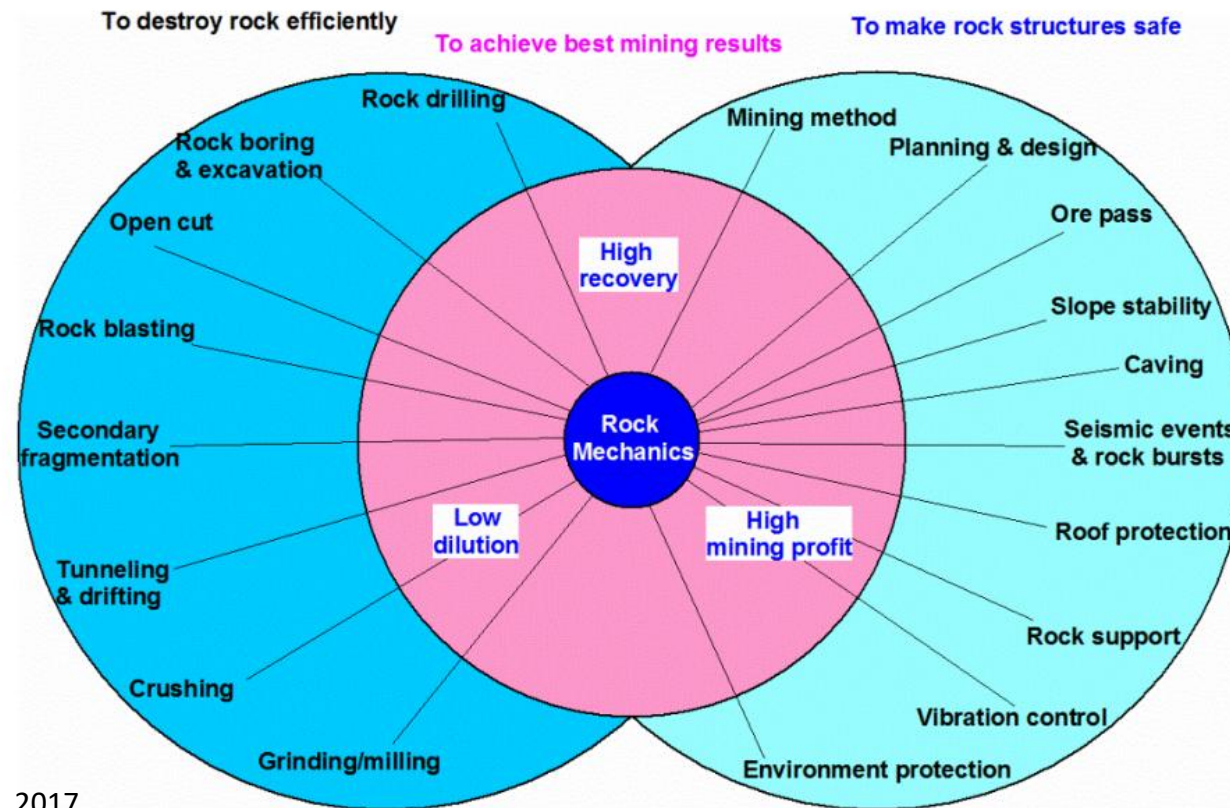


05/06/2026



# Planification :

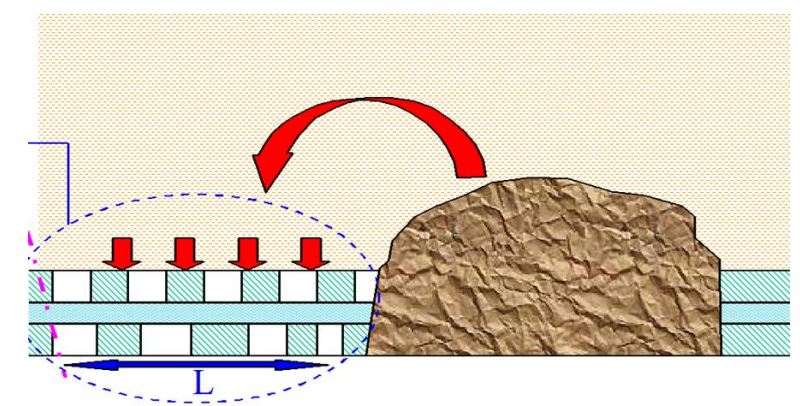
La **mécanique des roches** est utile et nécessaire pour la conception **et le dimensionnement** des ouvrages miniers, **et pour évaluer la stabilité** des excavations (chambres souterraines , talus...)



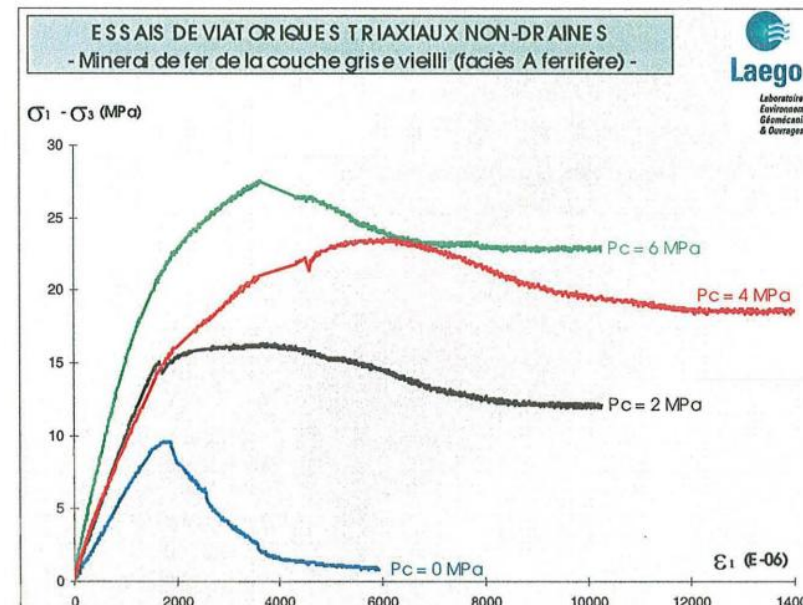
Zhang, 2017

# Comportement à LT des ouvrages miniers « abandonnés ou fermés » dépend de :

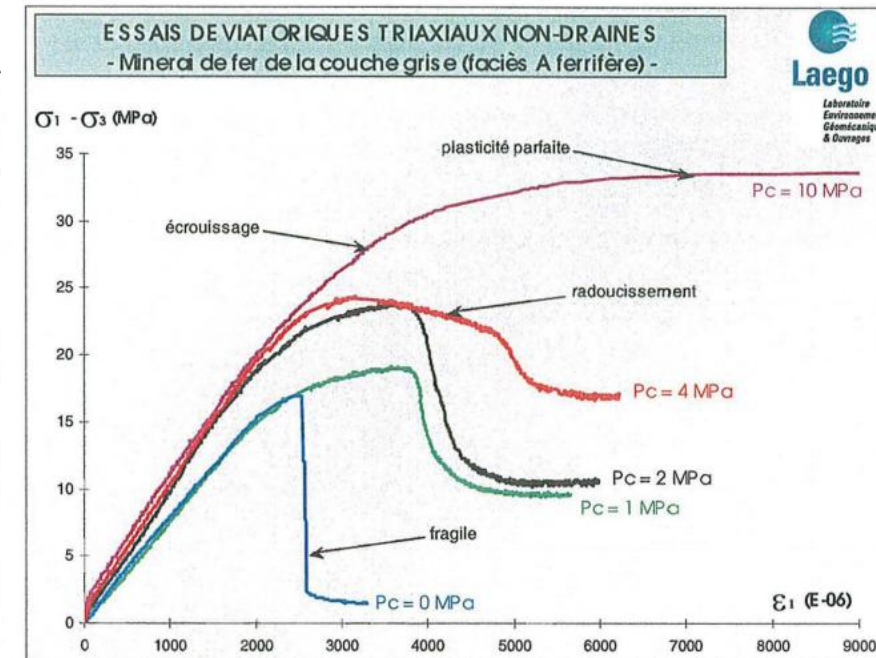
- Méthode d'exploitation
- Géologie du gisement
- Effet du temps « vieillissement / fatigue »
- Effet du temps « fluage »
- Effet de l'eau (des eaux)
- Effet de la consolidation
- Effet d'échelle



Transfert de charge



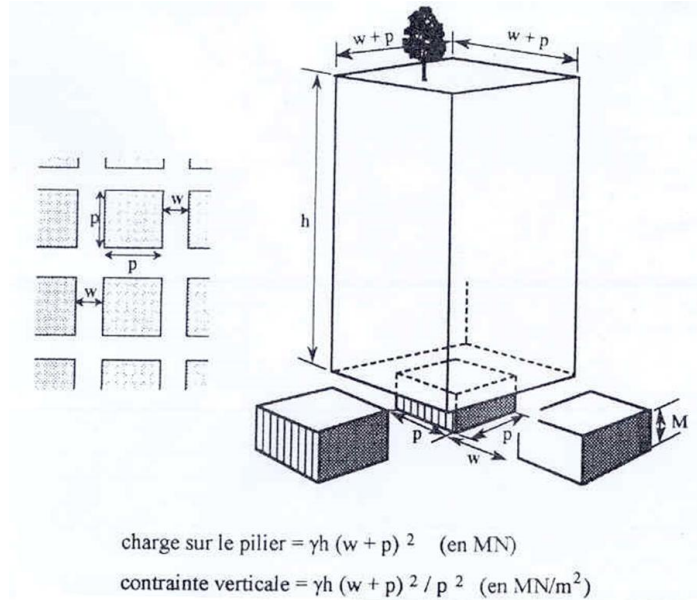
Minerai vieilli



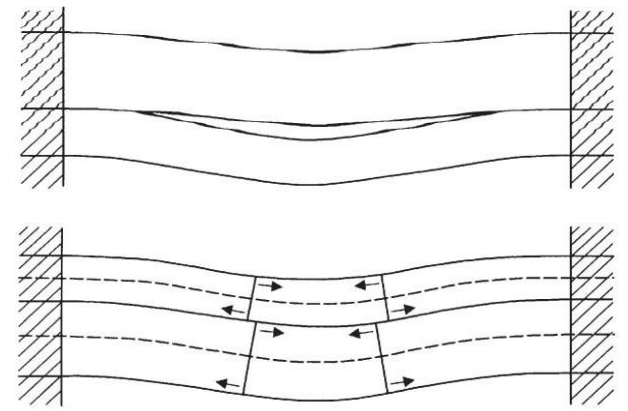
Minerai non vieilli

# Méthodes de calcul

- Méthodes analytiques simples :
- Méthodes analytiques-empiriques :
- Méthodes numériques (2D, 3D) :
  - Milieu continu / discontinu
  - Comportement élastique
  - Comportement élastoplastique
  - Comportement post-rupture
  - Comportement visqueux (fluage)
  - Couplage H-M
  - Etc.

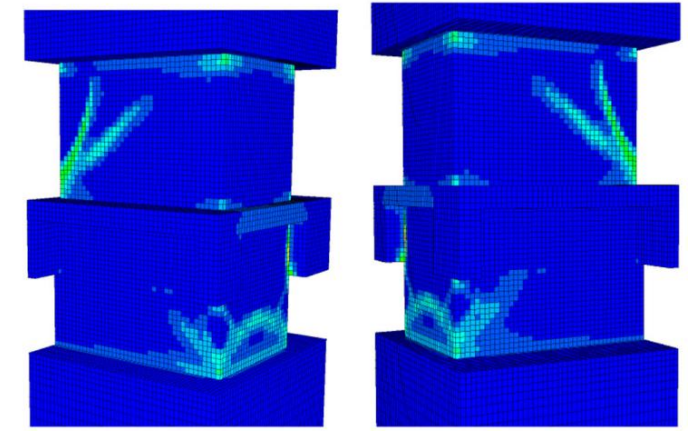
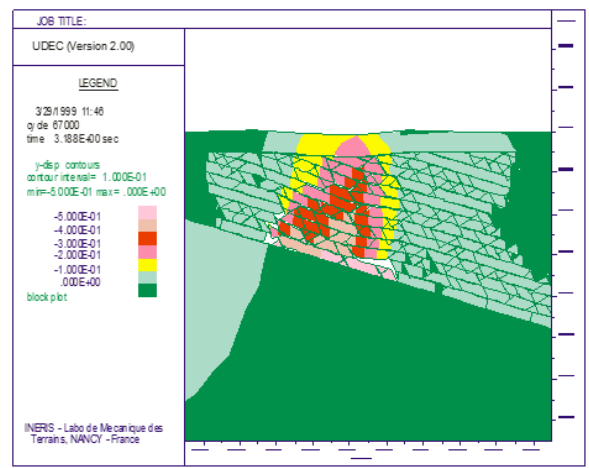


$$\eta = \alpha \frac{\gamma a^4}{E_m t^2}$$

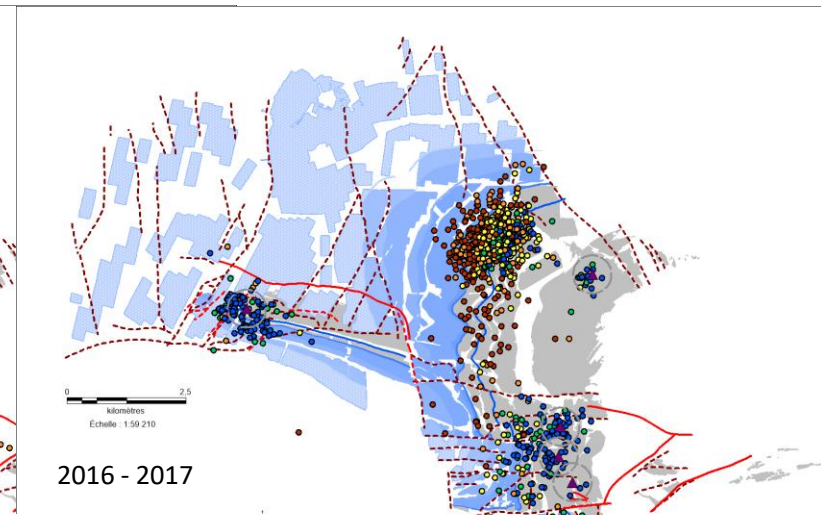
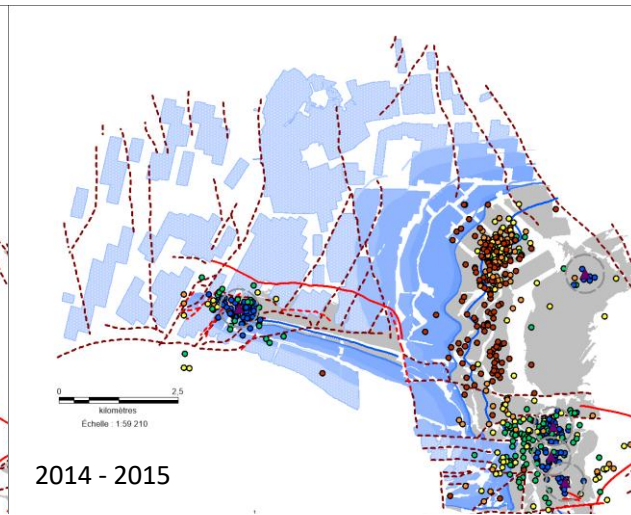
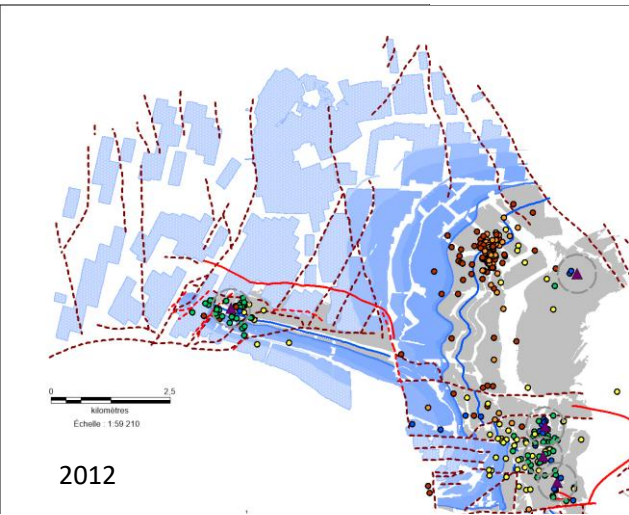
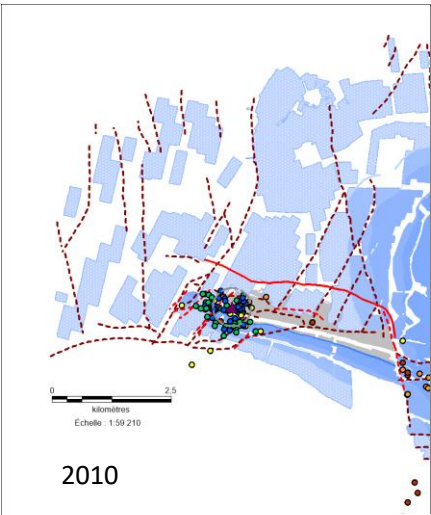
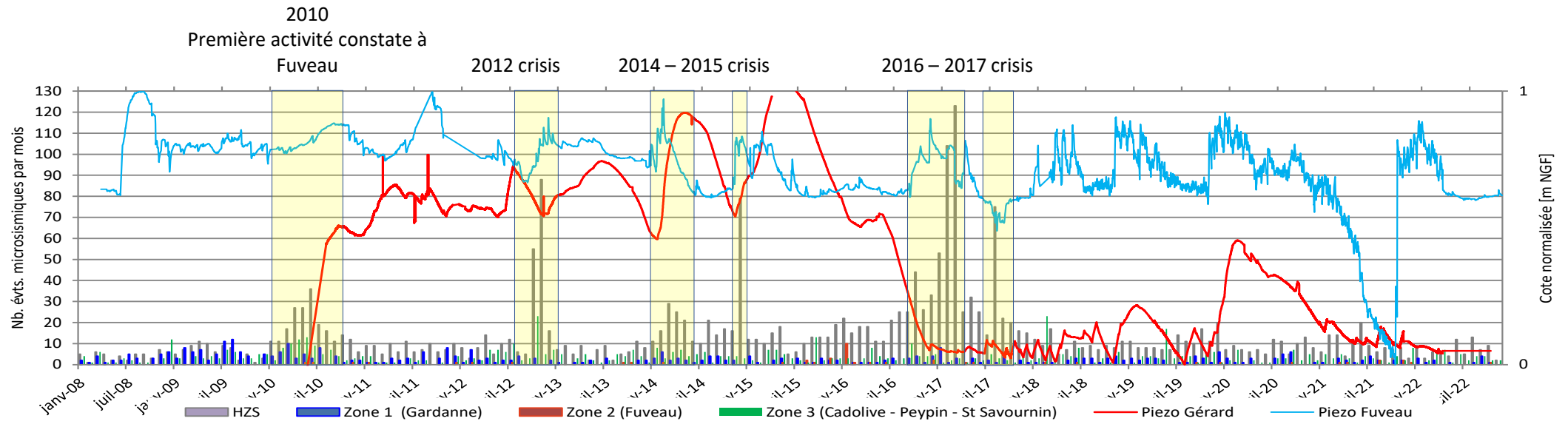


$$\eta = \alpha \frac{\gamma (t_1 + t_2) a^4}{E_{m1} t_1^3 + E_{m2} t_2^3}$$

$\eta$  = rigidité équivalente du toit

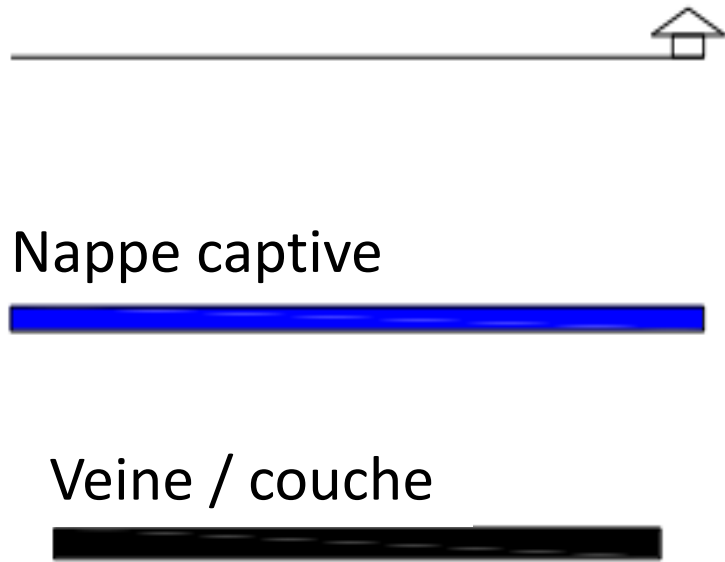


# Effet de l'eau : mesures et analyse

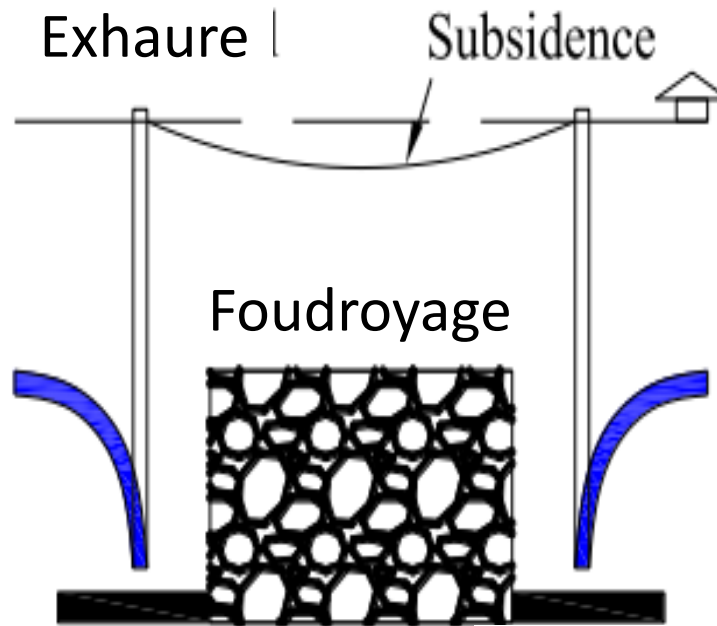


**La variation de niveau de l'eau contrôle la sismicité**

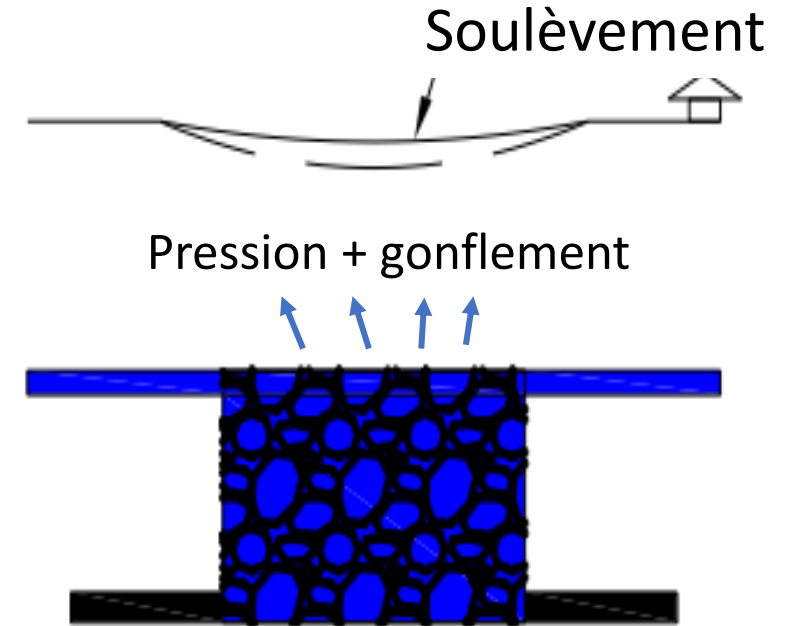
# Prédiction des mouvements en surface : creusement et ennoyage



(a) Etat initial



(b) Creusement



(c) Ennoyage

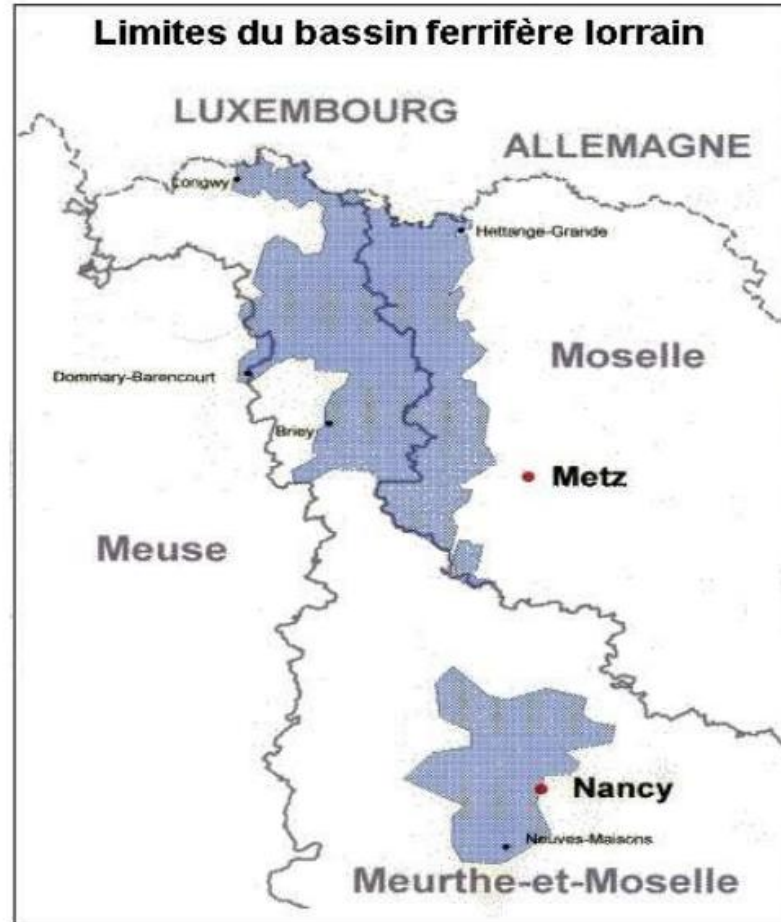
# Synthèse

<b>Problèmes post-miniers</b>	<b>Contribution de la mécanique des roches</b>
<b>Effondrements / fontis</b>	Modèles de rupture, propagation, stabilité
<b>Affaissements résiduels / Surrections</b>	Prévision/détermination des zones d'affaissement
<b>Remontées d'eau</b>	Comportement HM couplé : contraintes effectives + eau
<b>Dégradations des piliers</b>	Modèles de comportement/résistance à long terme
<b>Sécurisation</b>	Dimensionnement de comblement
<b>Reconversion</b>	Analyse de stabilité pour futurs projets

# Prédiction d'un effondrement généralisé

## Cas du stot d'Angevillers

L'effondrement généralisé, est un **effondrement en masse**, est le plus souvent initié par une rupture en **chaîne des piliers** de l'exploitation, caractérisé par une zone d'exploitation avec un **taux de défrètement élevé**, mais pas uniquement.



- Le bassin ferrifère s'étend sur 120 km du nord au sud et sur 30 km d'ouest en est

Il est divisé en deux parties principales :

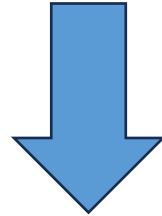
- le bassin de Briey-Longwy-Thionville au nord, qui couvre 1300 km<sup>2</sup>
- le bassin de Nancy au sud, qui couvre 380 km<sup>2</sup>

Pour information, le bassin ferrifère c'est :

- 50 400 ha influencés par les exploitations minières
- 40 000 km de galeries
- 1 milliard de m<sup>3</sup> de vides résiduels
- 250 millions de m<sup>3</sup> d'eau pompés et rejetés dans le milieu naturel par an pendant l'extraction du minerai
- 165 communes concernées par les travaux miniers

# Objectifs

- Rétro-analyser l'effondrement au fond et l'affaissement en surface sur la commune d'Angevillers (2009) ;
- Capitaliser sur les enseignements relatifs à des modélisations numériques (complexes) ;
- Contribuer à améliorer le diagnostic d'effondrement au fond pour le BFL (établir un critère d'occurrence d'un effondrement valide pour les **70 cas recensés**).



**Modèle 3D grande échelle – différentes hypothèses /  
prise en compte des failles majeurs**

# Analyse réalisée sur 16 cas de BFL : approche d'expert(s)

Nom	Nb de couches exploitées	Type de phénomène
Roncourt 1999	1	Affaissement progressif
Moutiers 1997	1	Affaissement progressif
Crusnes 1977	1	Affaissement progressif
Auboué 1972	2	Affaissement progressif
Auboué- R. Metz 1996	2	Affaissement progressif
Ville-Au-Montois avril 1985	1	Affaissement progressif
Auboué-Coinville 1996	1	Affaissement progressif
Jarny 1949	1	Affaissement progressif
Rochonvillers 1974	1	Effondrement brutal
Rochonvillers 1973	1	Effondrement brutal
Sainte Marie 1932	1	Effondrement brutal
Escherange 1919	1	Effondrement brutal
Roncourt 1959	2	Effondrement brutal
Roncourt 1954	2	Effondrement brutal
Moutiers 1940	2	Effondrement brutal
Audun-le-Tiche 1902	2	Effondrement brutal

**Effondrement du  
stot (piliers, zone  
de protection)  
d'Angevillers 2009**

**Pose beaucoup de  
questions**

# Données du stot

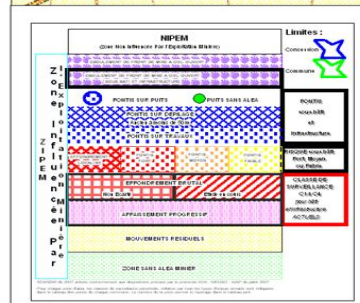
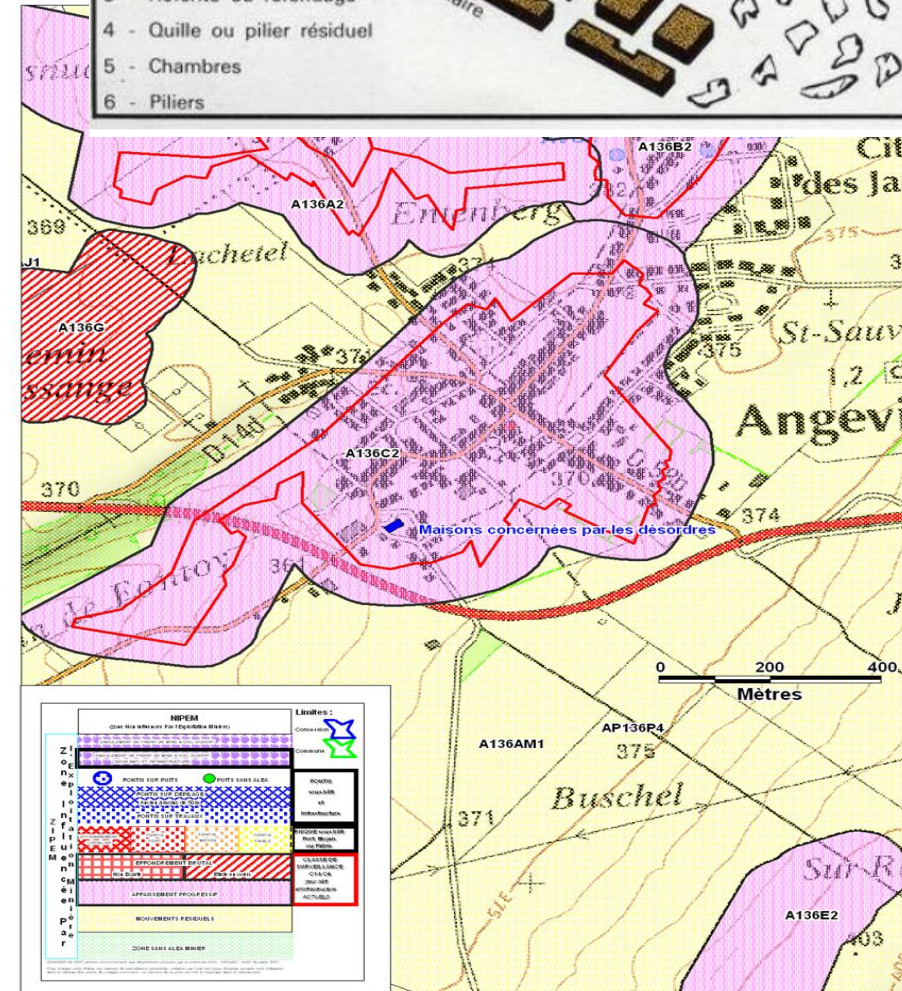
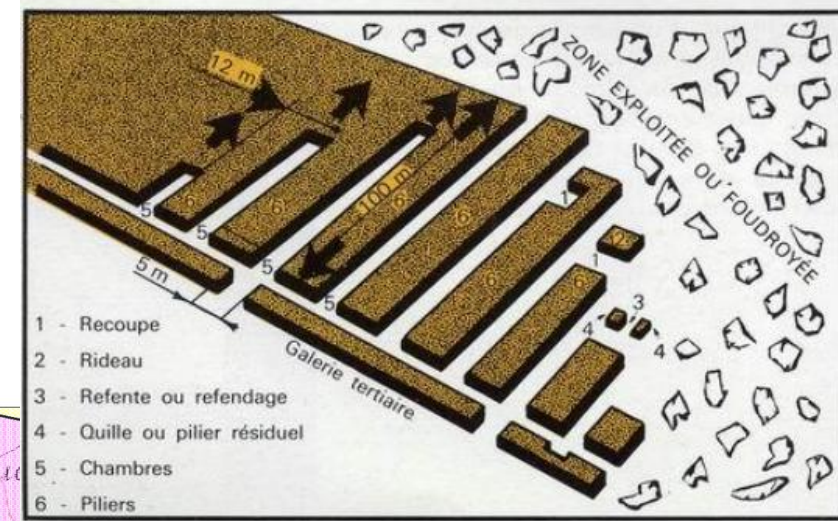
Méthode d'Exploitation par dépilage sauf le stot de protection du village , du puits Armand et quelques galeries d'infrastructure (Zone A136C2)

Stot de protection du village :

- Exploitation en couche grise (quelques traçages en couche jaune) entre 1905 et 1932
- Secteur envoyé au sud-est de la zone
- Sur-contrainte des piliers liée à la présence de dépilages tout autour du stot

L'analyse menée a montré que les stots de protection étaient potentiellement instables et **qu'un aléa affaissement progressif de niveau faible devait être retenu**

Le 12 octobre 2009 : Apparition de désordres sur deux maisons jumelées



# Les désordres observés rue de Fontoy et Clos des Groseilliers



- Fissures millimétriques à centimétriques sur la façade
- Fissures du carrelage et dans certains cloisons ou au plafond dans les habitations

← Désordres au 429 rue de Fontoy

↓ Désordres au Clos des Groseilliers

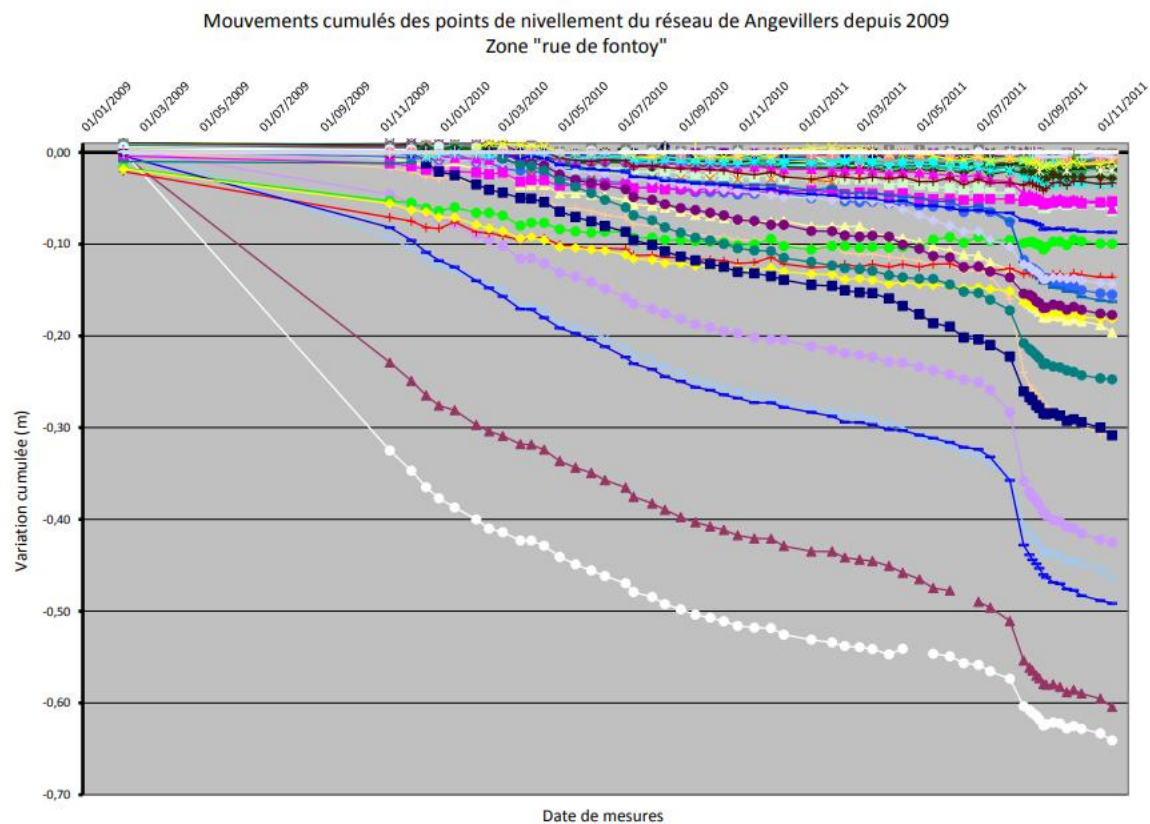


→ Désordres au 73 Clos des Groseilliers

← Désordres au 435 rue de Fontoy

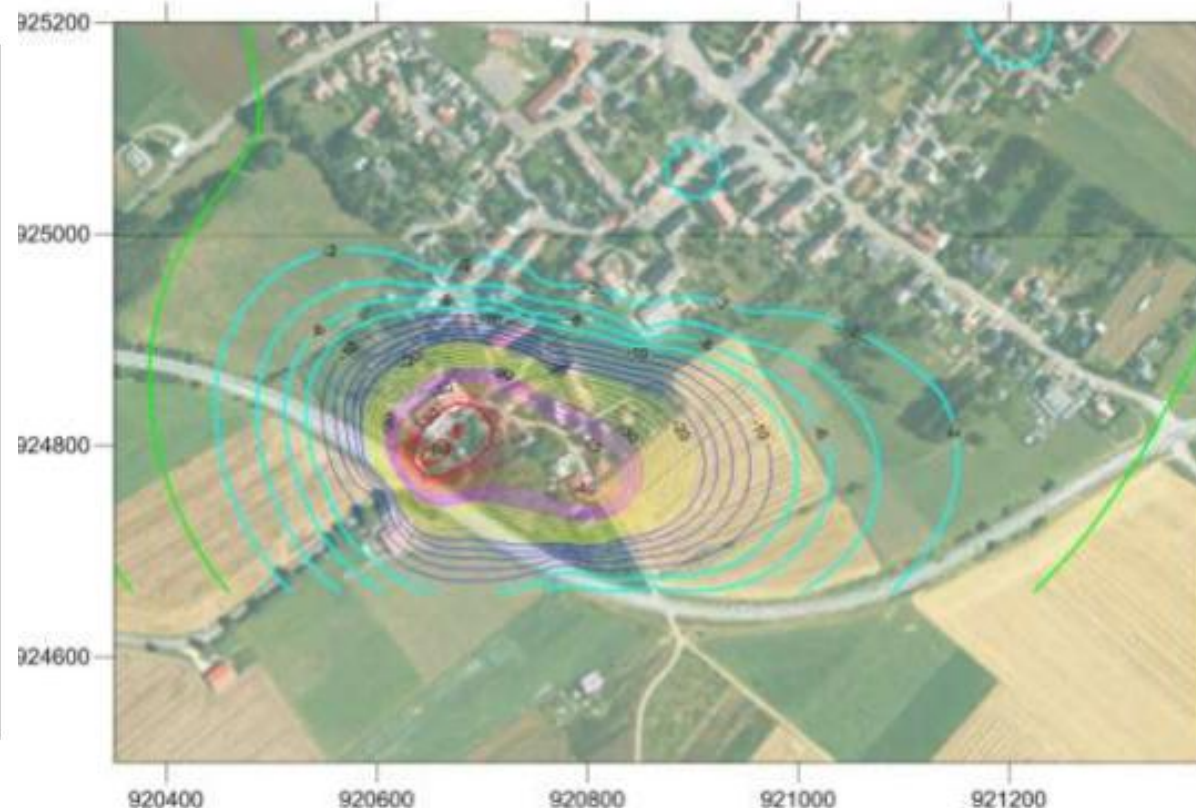


# Evolution des mouvements de surface



- R096
- R096bis
- R097
- R098
- R099
- R100
- R101
- R102
- R103
- R104
- R105
- R106
- R107
- R108
- R109bis
- R110
- R111
- R112
- R113
- R114
- R115bis
- R116
- R117
- R118
- R119
- R120
- R120bis
- R121
- R121bis
- R121d
- R122bis
- R123bis
- R124
- R125
- R126
- R127
- R128
- R129
- R130
- R130bis
- R131b
- R132b
- R133
- R133bis
- R134
- R135
- R136
- R137
- R138
- R138b
- R139
- R140

ANGEVILLERS - Valeurs d'iso-affaissement en centimètres  
entre août 2007 et novembre 2011

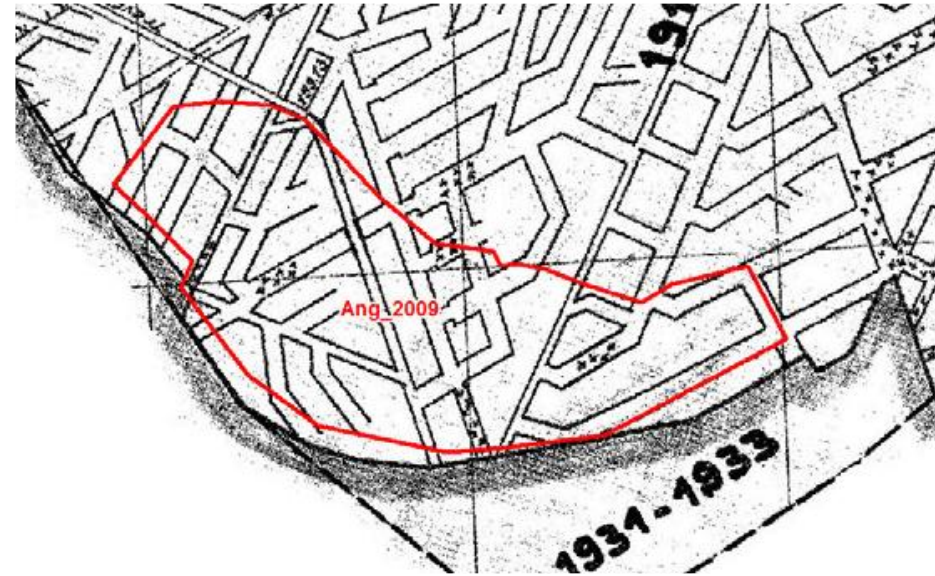
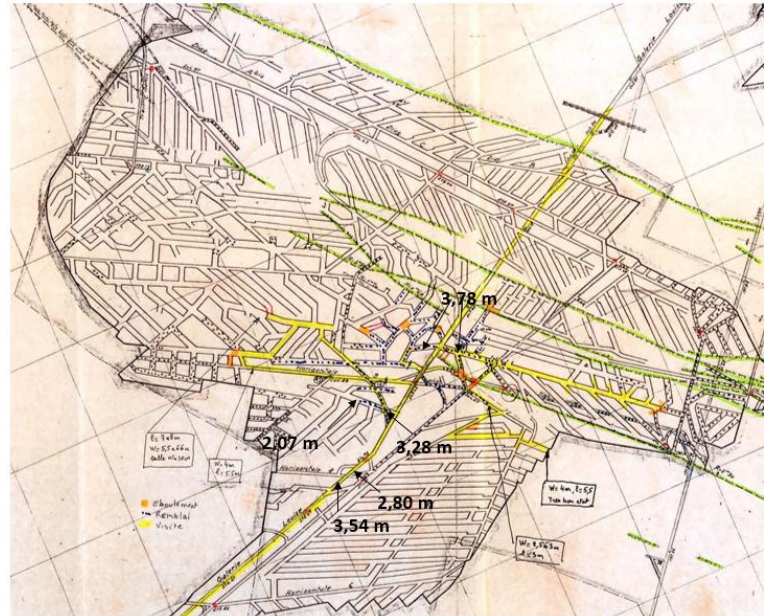


# Géométrie

Couche	Ouverture (m)	Largeur galerie (m)	Largeur pilier (m)	Longueur pilier (m)	Taux défruitement	Coefficient majoration	Contrainte (bars)	Profondeur (m)	Anti-élancement
grise	5	6	11	40	44	1,2	93	175	2,2



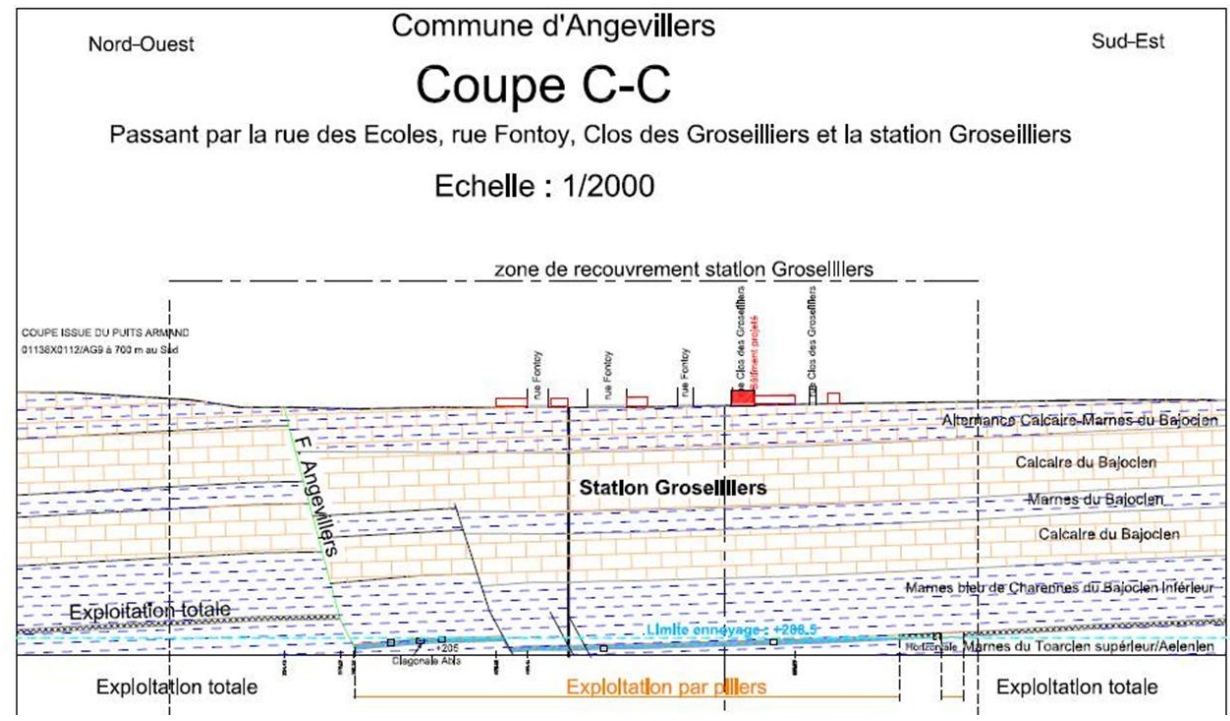
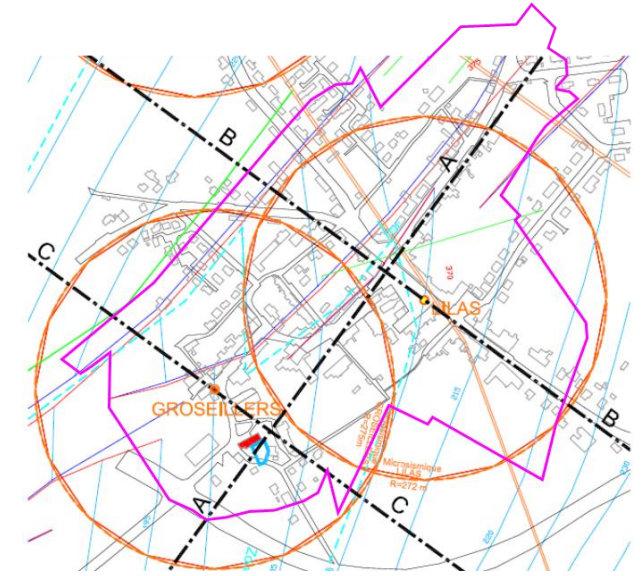
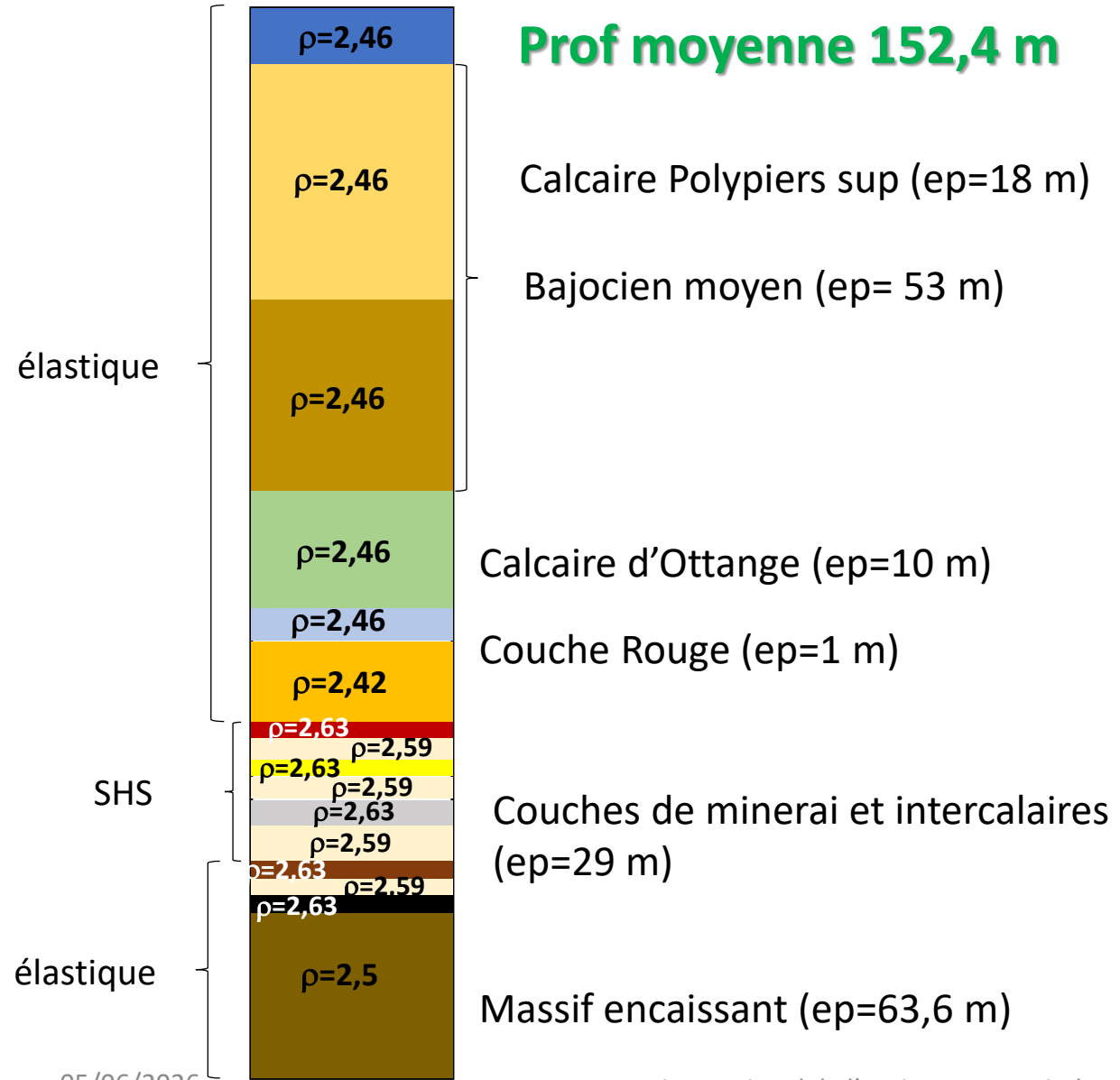
valeurs moyennes sur 12 piliers de la zone effondrée



Les travaux miniers concernés ont été envoyés à partir de fin 2007 jusqu'à la stabilisation en mars 2008 sous une colonne d'eau de 8 m en moyenne

# Log géologique consolidé

**Prof moyenne 152,4 m**

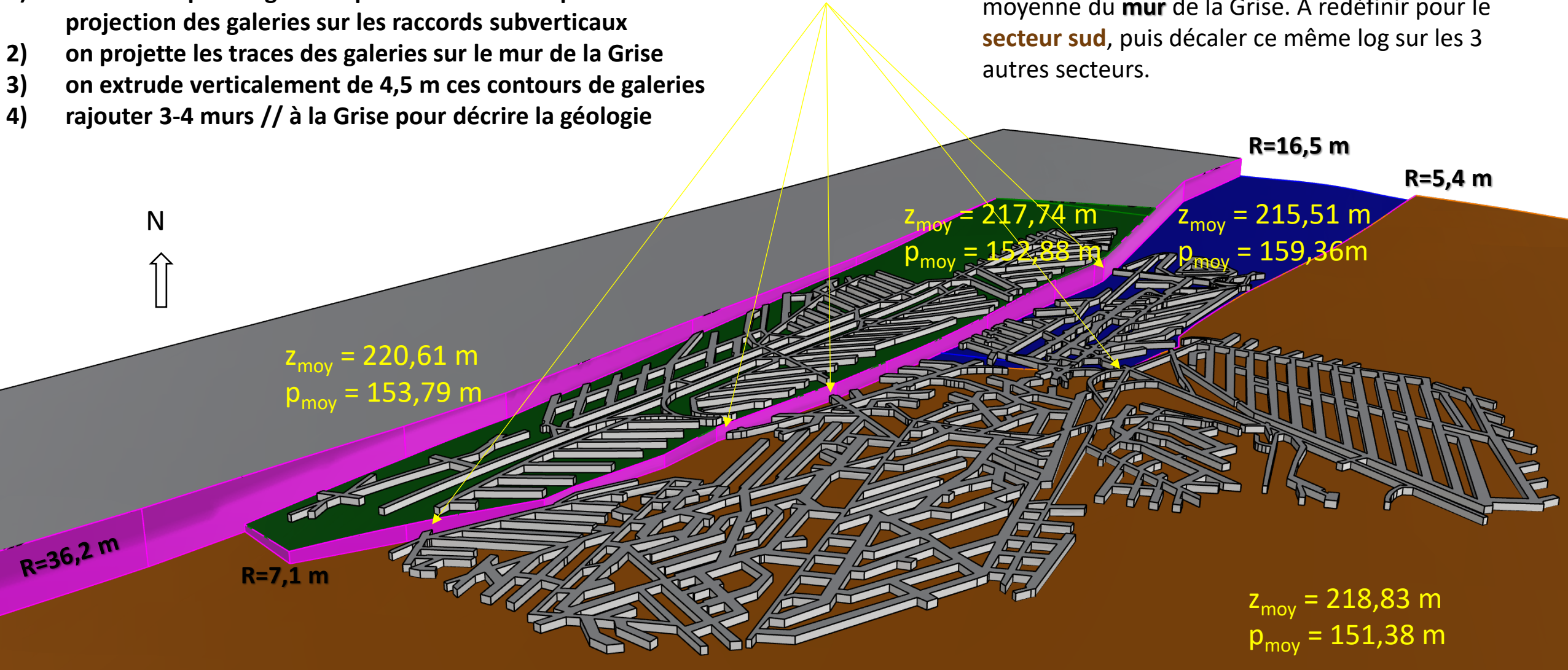


# Traçage des galeries dans les compartiments

## démarche :

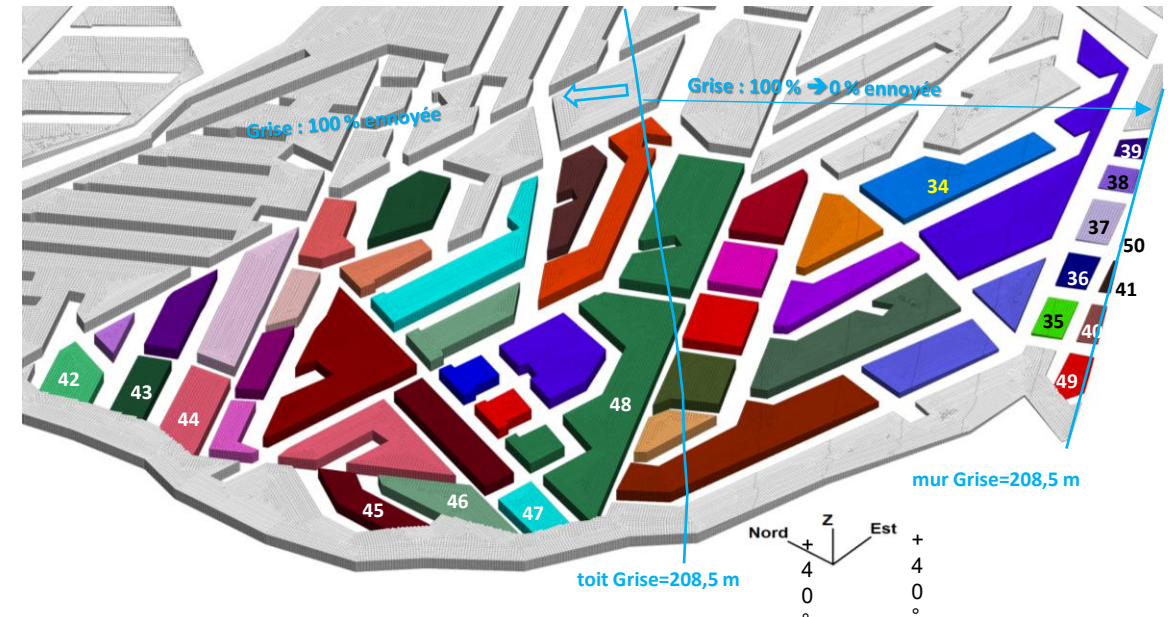
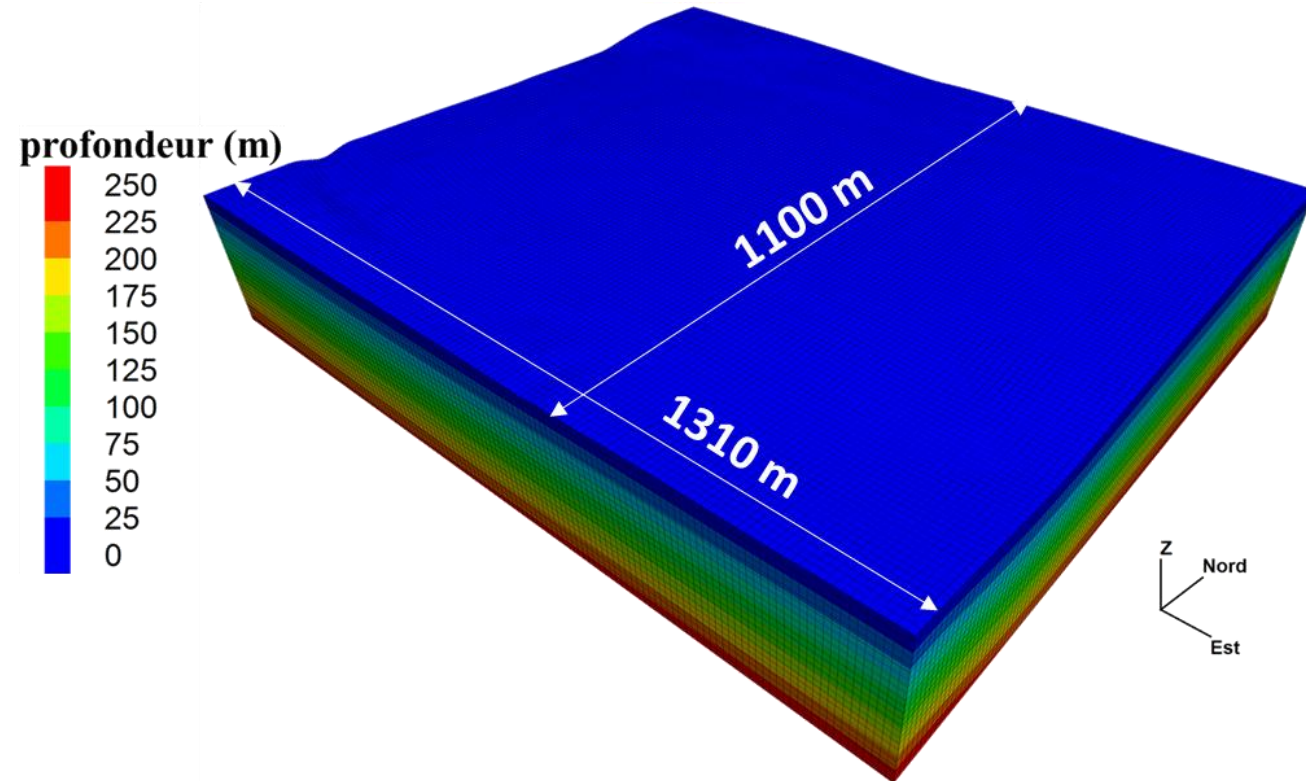
- 1) on redécoupe des galeries pour isoler les compartiments et éviter la projection des galeries sur les raccords subverticaux
- 2) on projette les traces des galeries sur le mur de la Grise
- 3) on extrude verticalement de 4,5 m ces contours de galeries
- 4) rajouter 3-4 murs // à la Grise pour décrire la géologie

Le log géologique est défini par rapport à l'altitude moyenne du **mur** de la Grise. A redéfinir pour le **secteur sud**, puis décaler ce même log sur les 3 autres secteurs.

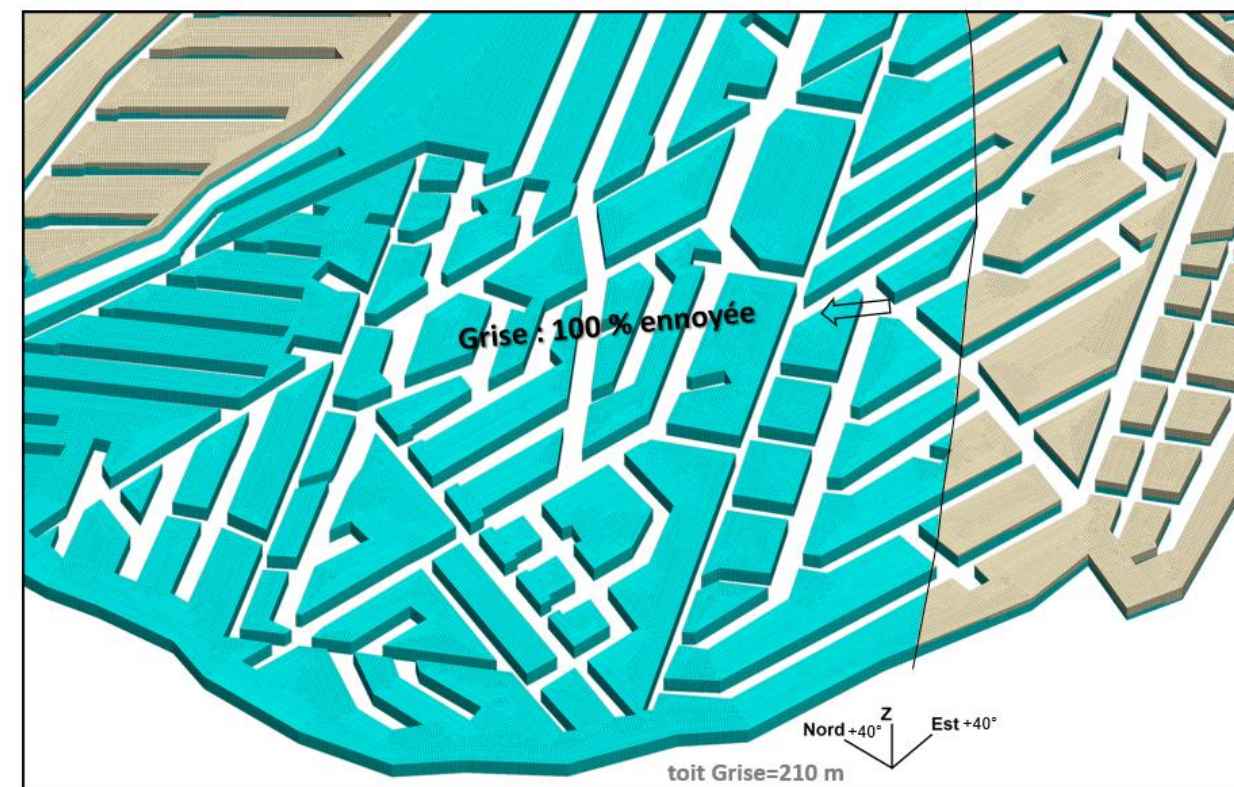


# Modèle 3D :

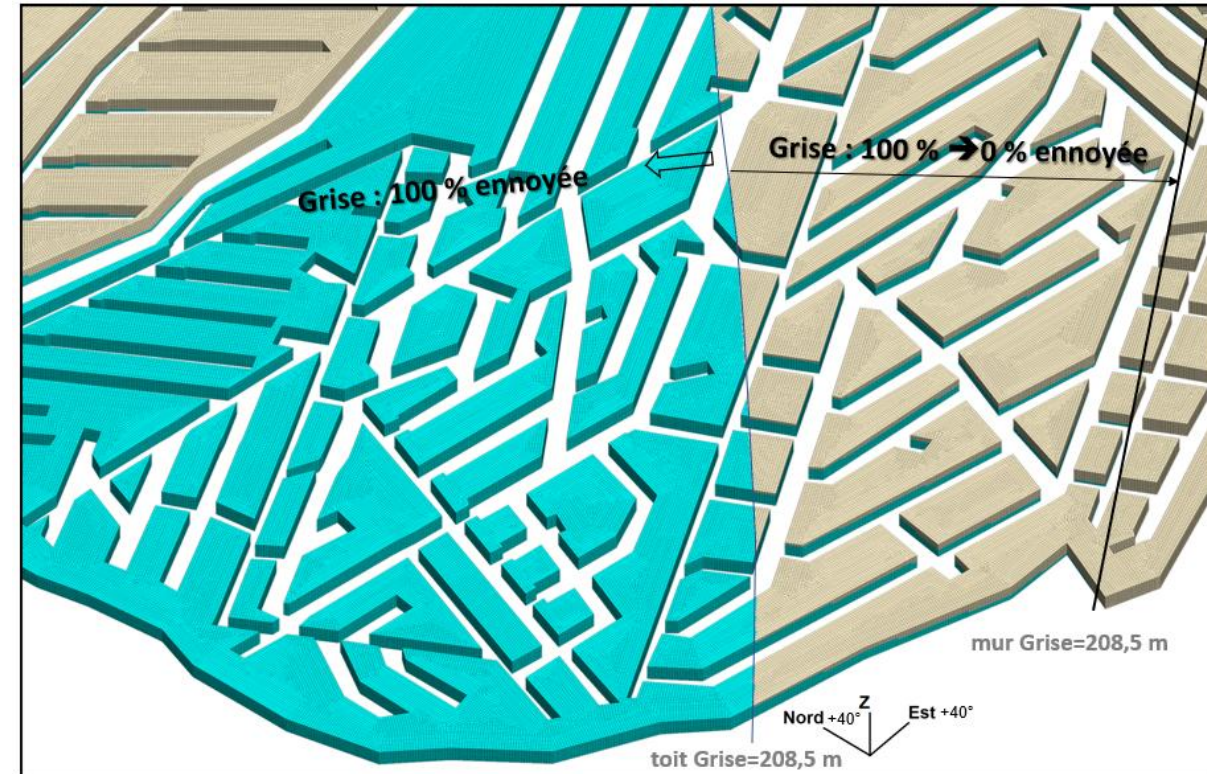
- Conditions aux limites : déplacements
- Chargement : poids propre



# Prise en compte de l'ennoyage du stot : deux scenarios



z = 210 m



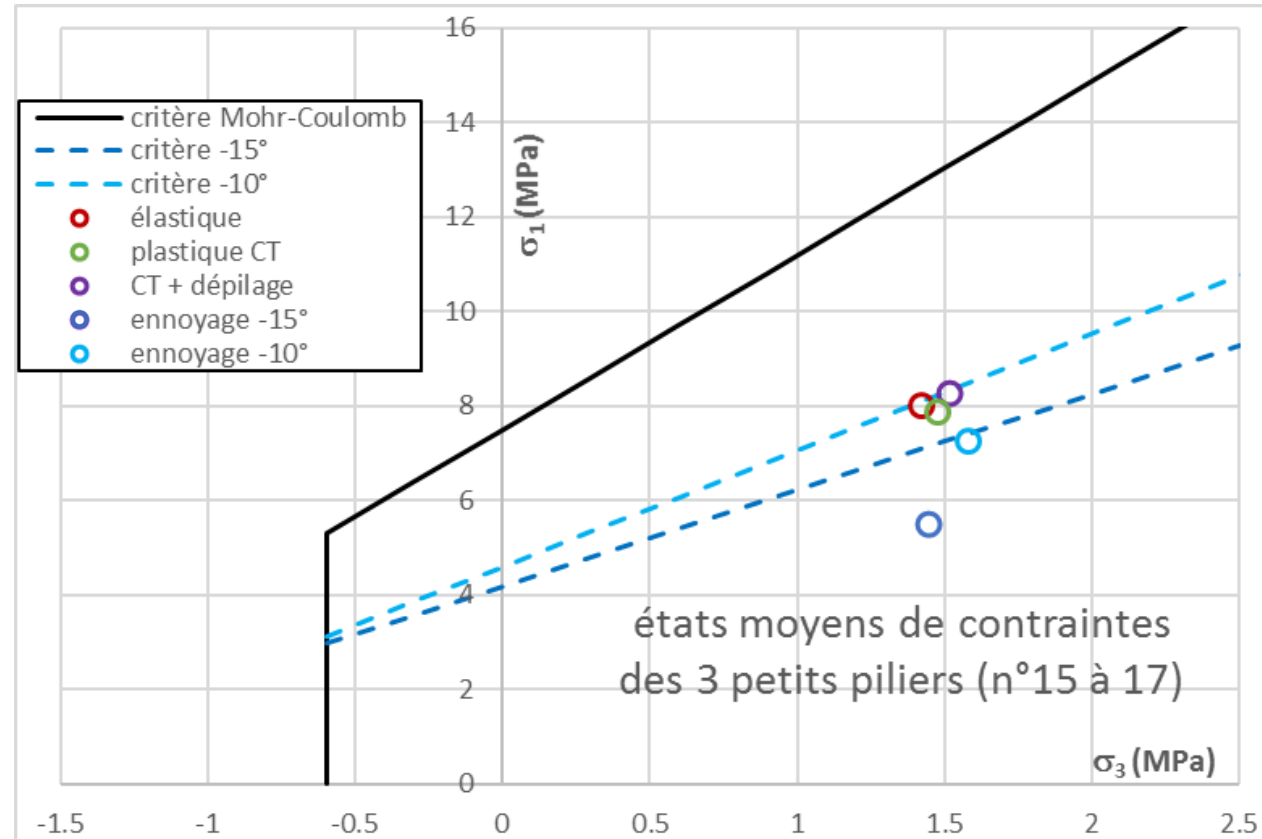
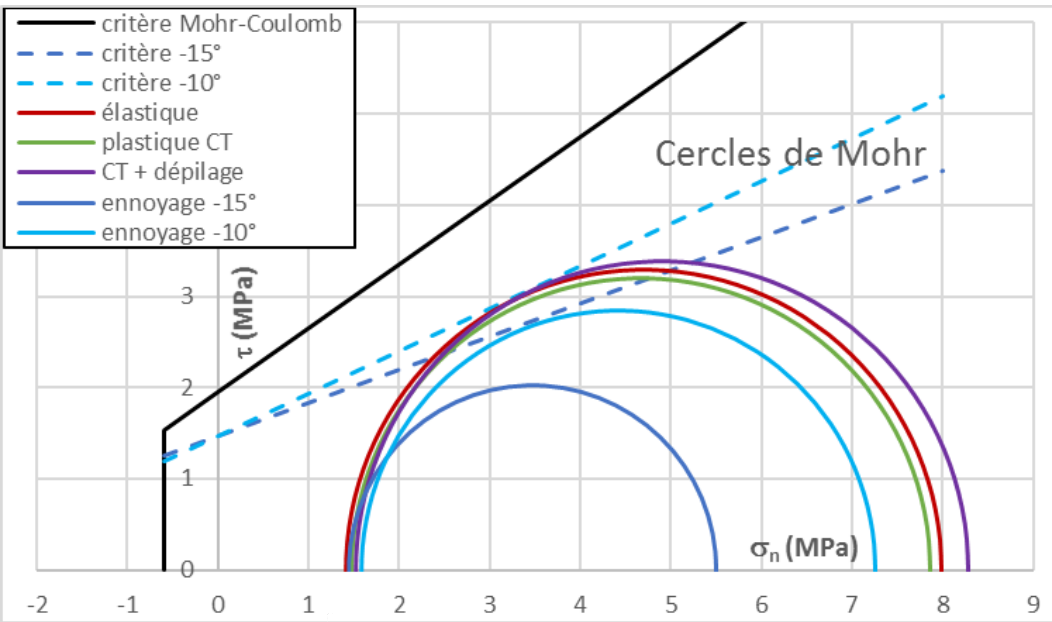
z = 208,5 m

Ennoyage : réduction de l'angle de frottement

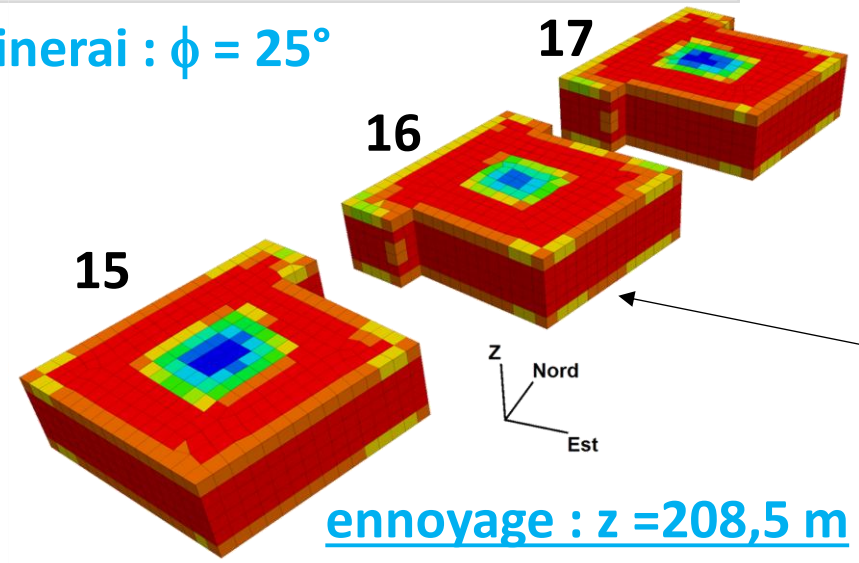
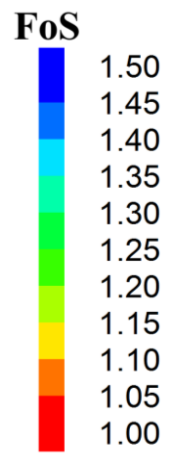
$$\phi = 25^\circ$$

$$\phi = 35^\circ$$

# Distances au critère de Mohr-Coulomb

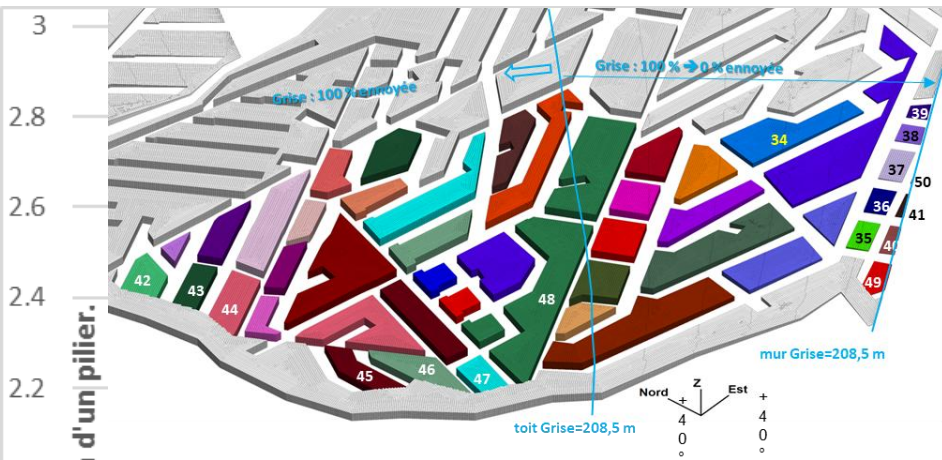


**FoS**  
mineral :  $\phi = 25^\circ$



$$FoS = \frac{\sigma_1^{\text{critère}} - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

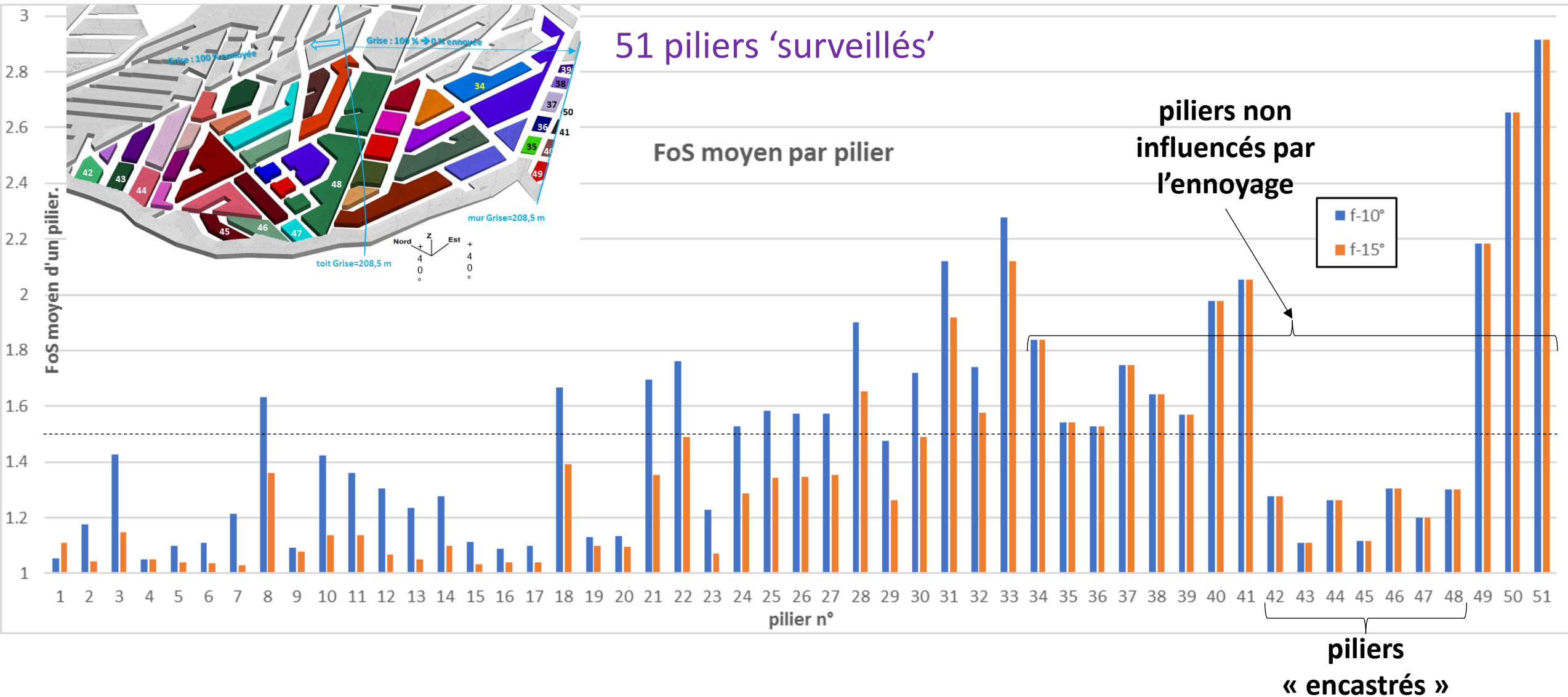
# Influence 'ennoyage' ( $\phi - x^\circ$ ) sur FoS moyen



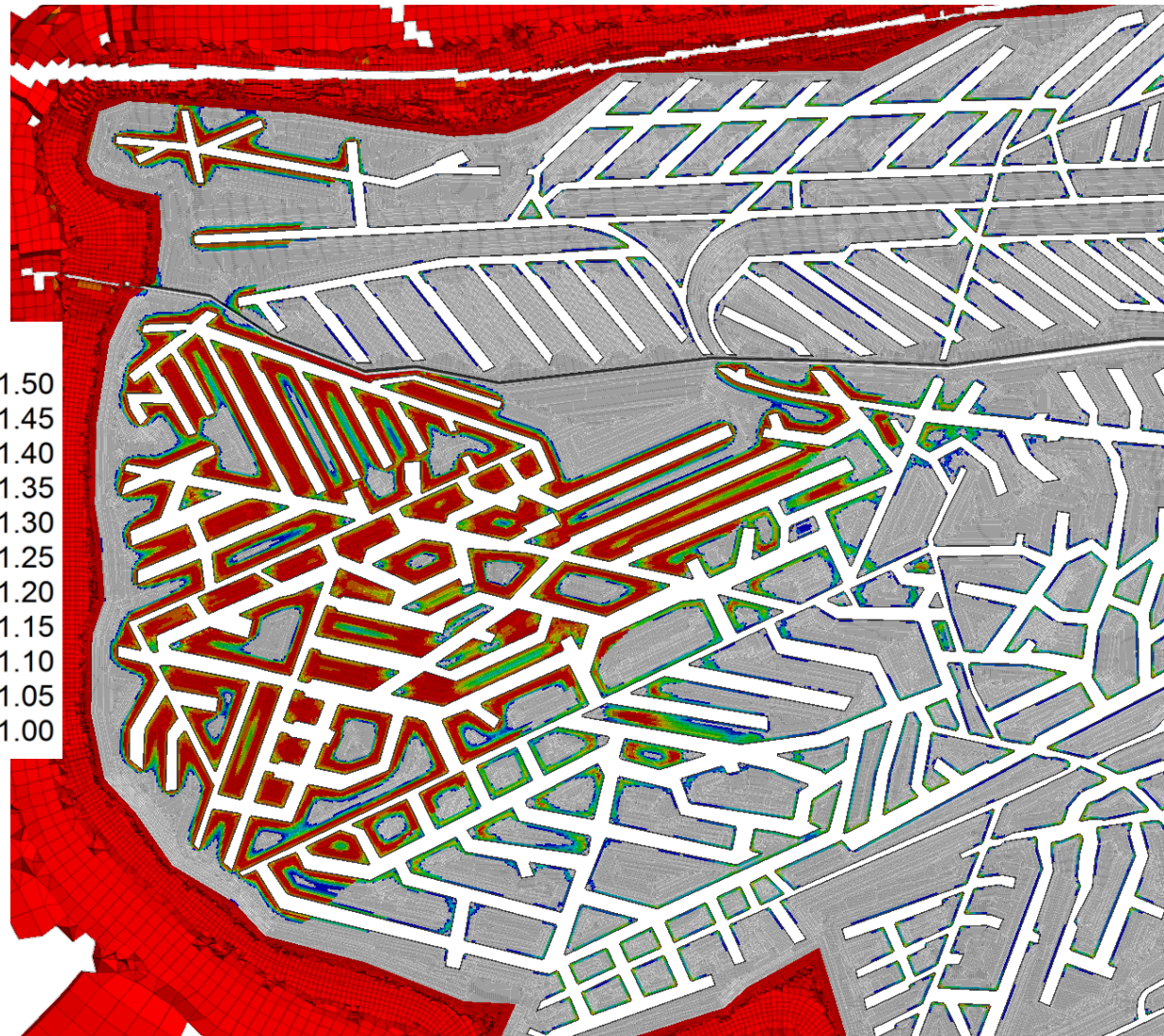
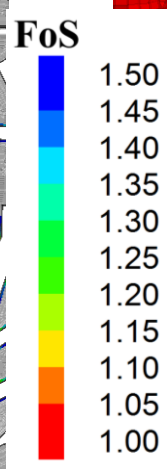
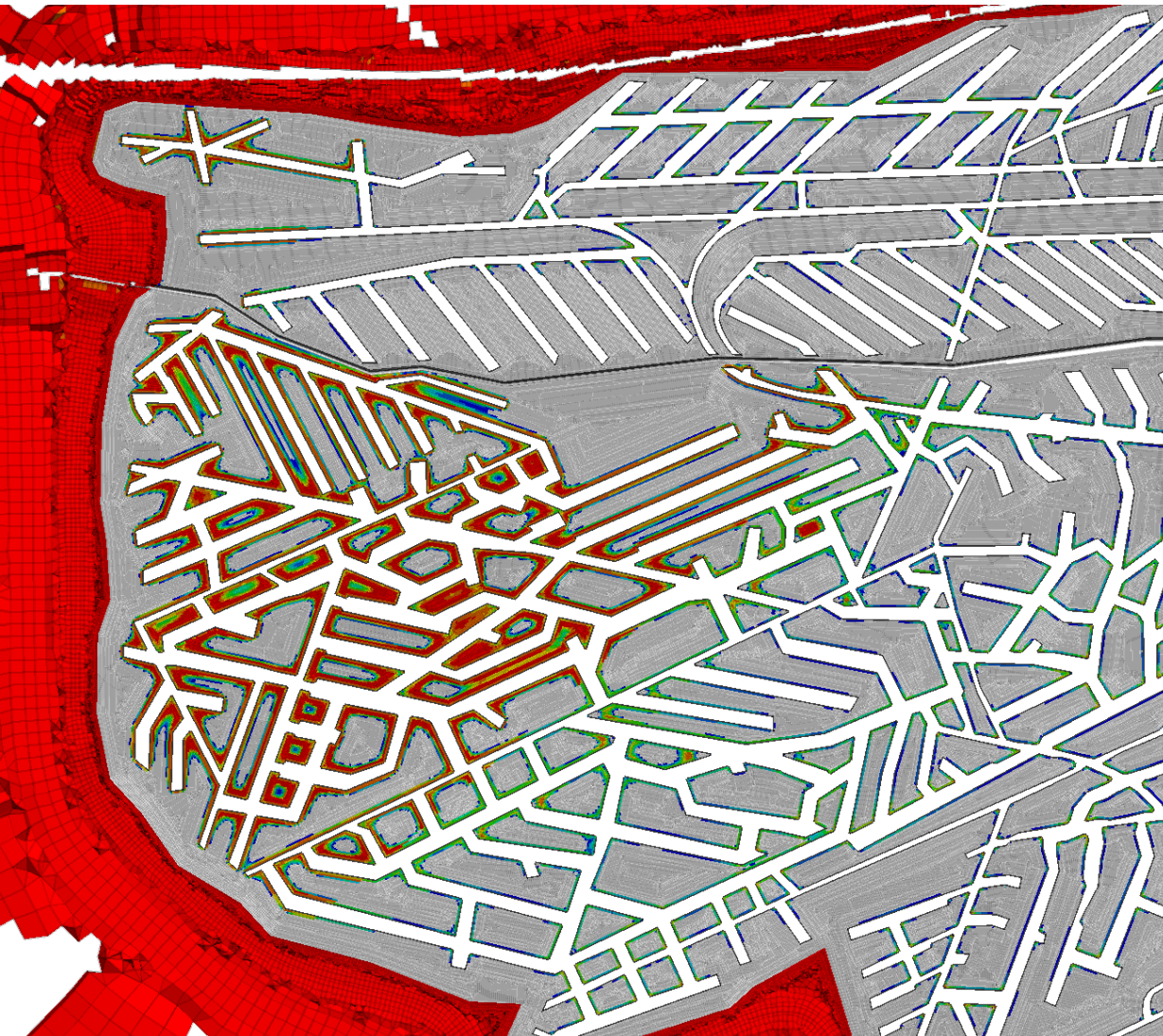
51 piliers 'surveillés'

FoS moyen par pilier

piliers non influencés par l'ennoyage



# Coefficient de sécurité FOS (critère de Mohr-Coulomb)



$\phi = 25^\circ$

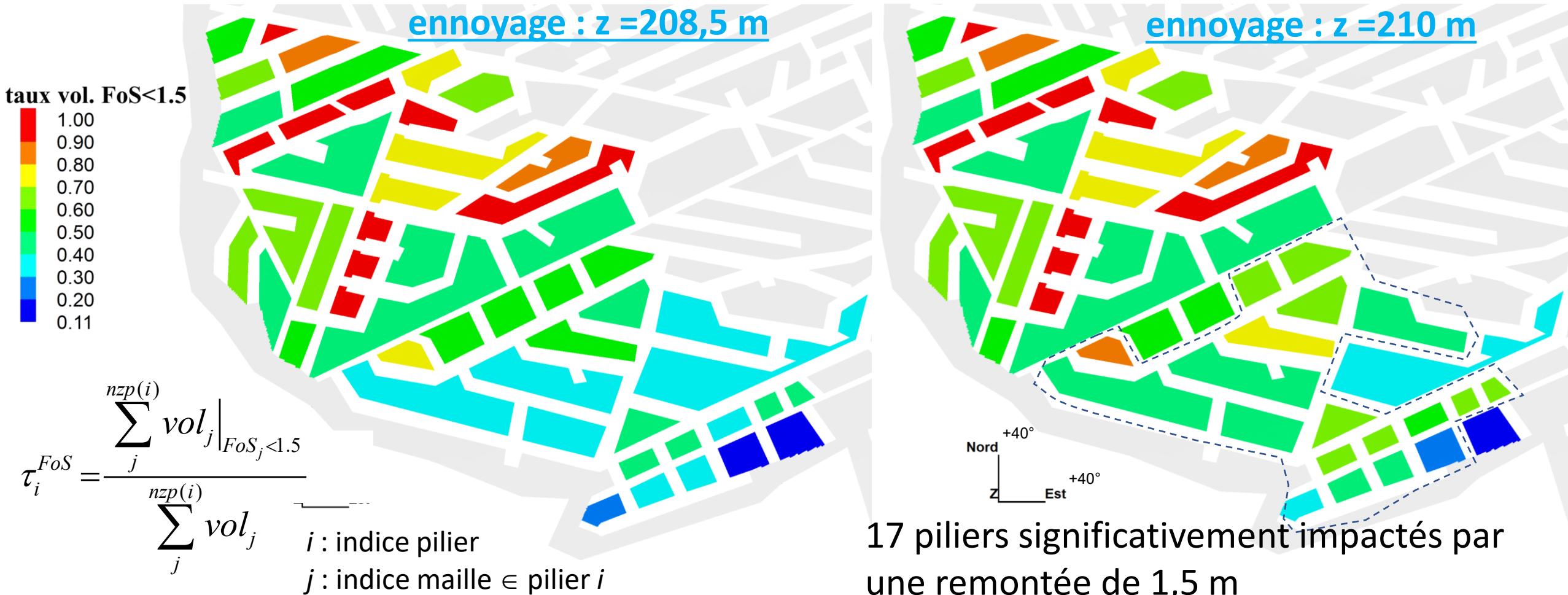
vue = toit de la Grise → pire à mi-hauteur de pilier

$\phi = 20^\circ$

# taux volumique de FoS par pilier

en simulant l'ennoyage avec  $\phi - 10^\circ$  (+C et  $R_t - 25\%$ ), 28 piliers ont plus de 50 % de leur volume avec  $FoS < 1,5$

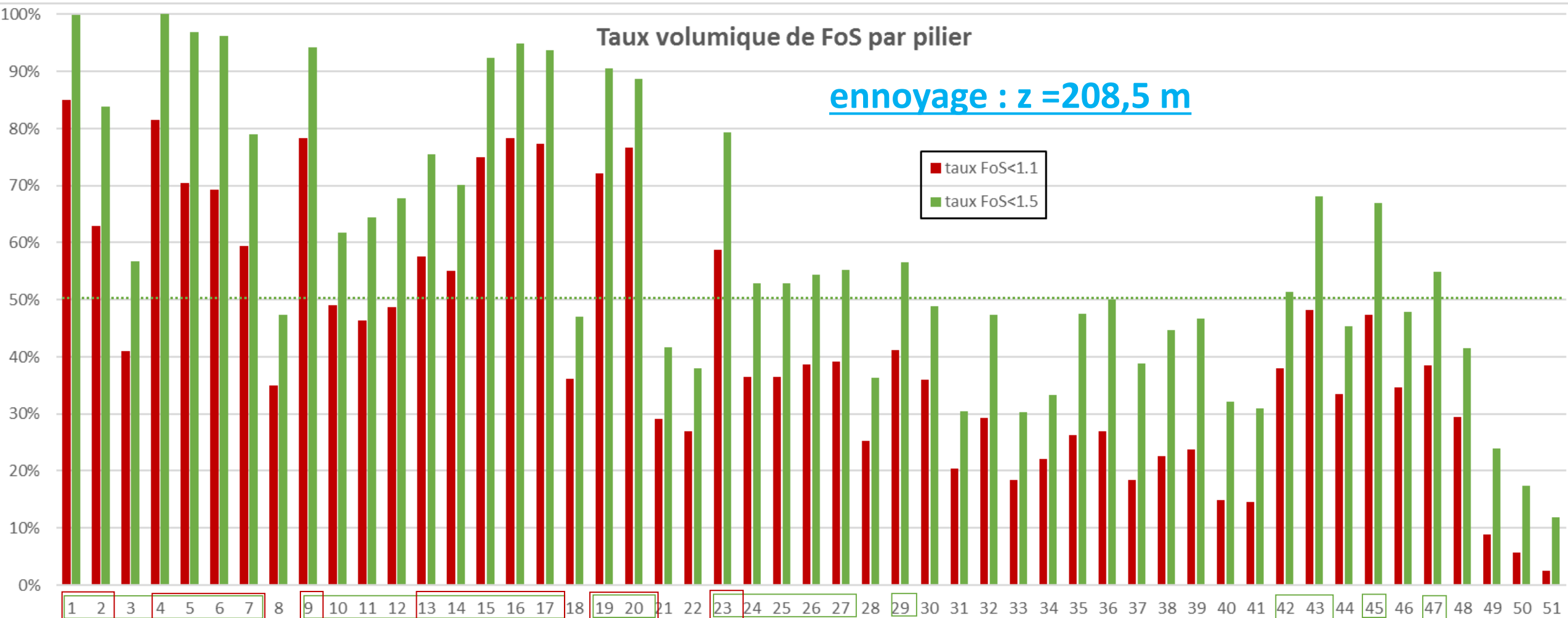
minerai :  $\phi = 25^\circ$



# taux volumique de FoS par pilier

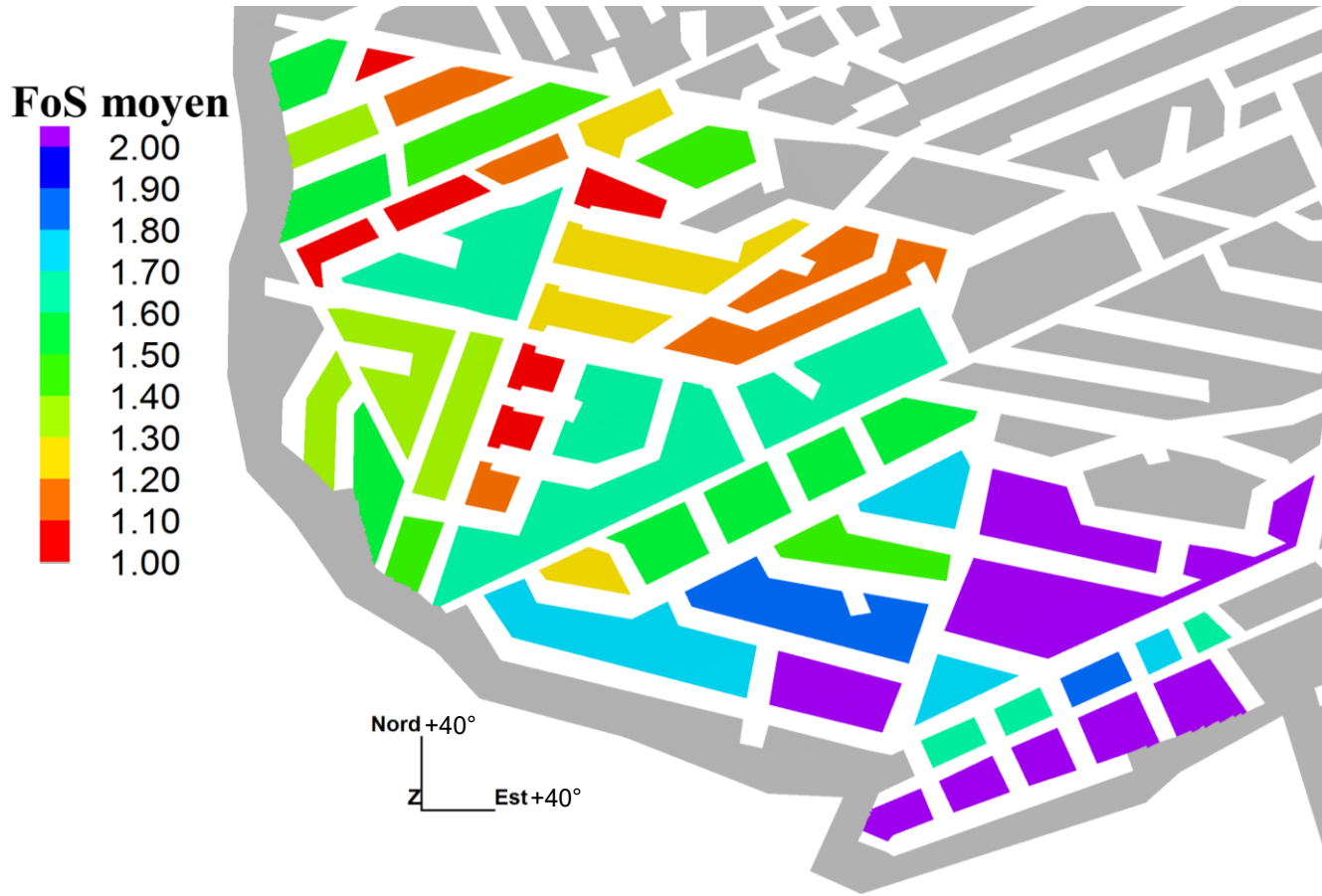
en simulant l'ennoyage avec  $\phi - 10^\circ$  (avec C et  $R_t - 25\%$ ), 28 piliers ont plus de 50 % de leur volume avec FoS < 1,5

$\phi = 25^\circ$



# effet de l'ennoyage sur le FoS moyen (pilier)

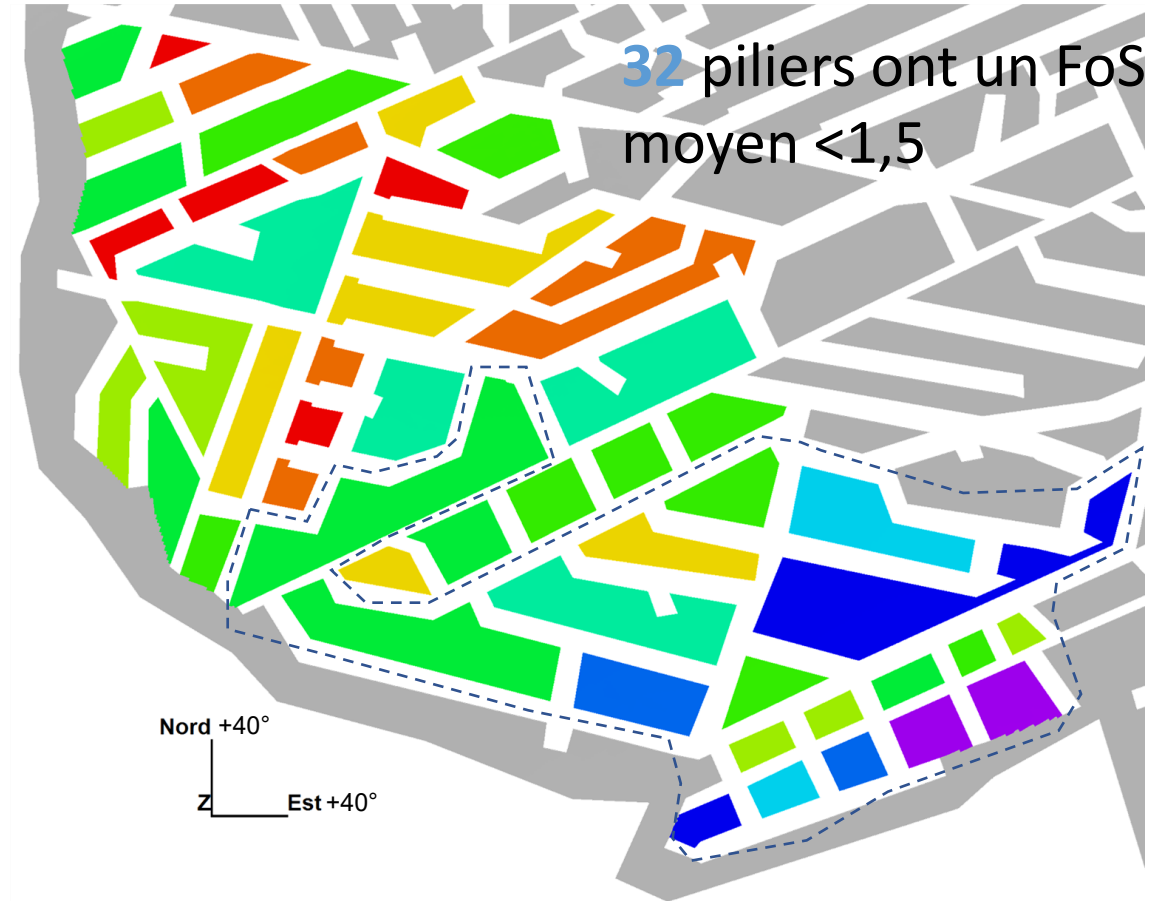
ennoyage : z = 208,5 m



**23** piliers ont un FoS moyen <1,5

**minerai :  $\phi = 25^\circ$**

ennoyage : z = 210 m



**32** piliers ont un FoS moyen <1,5

18 piliers significativement impactés par une remontée de 1,5 m

# Piliers avec $FoS < 1,5$ (moyenne ou 50% volume)

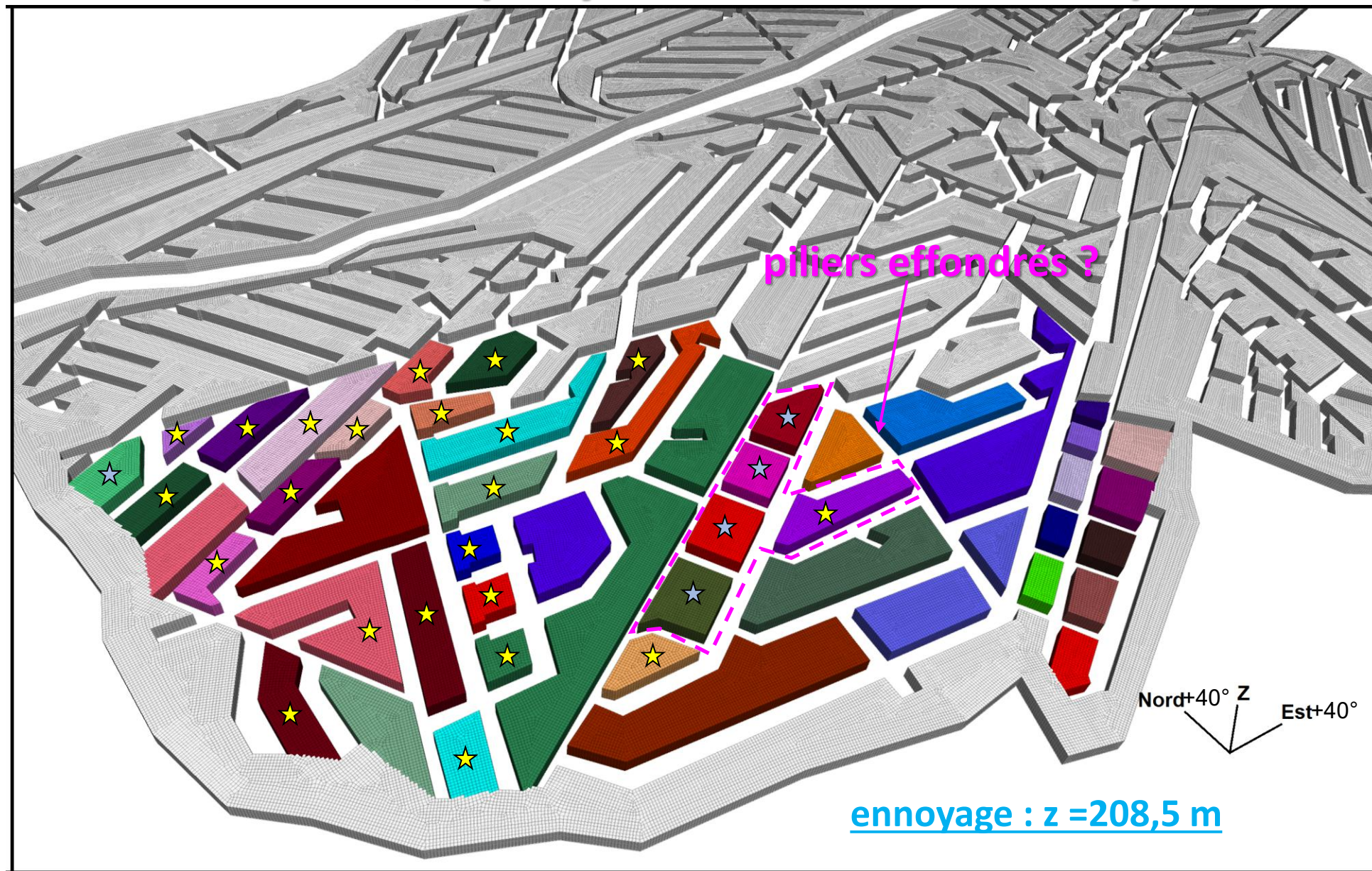
La diminution de  $\phi$  de  $10^\circ$  pour simuler l'envoyage permet de reproduire l'effondrement de 23 à 28 piliers en couche Grise, selon le critère adopté ( $FoS$  moyen ou taux volumique  $> 50\%$ )

critère 1 :  $FoS$  moyen  $< 1,5$

critère 2 :  $\tau^{FoS} < 1,5 > 50\%$

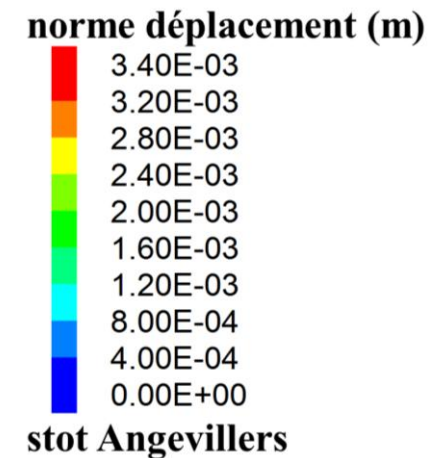
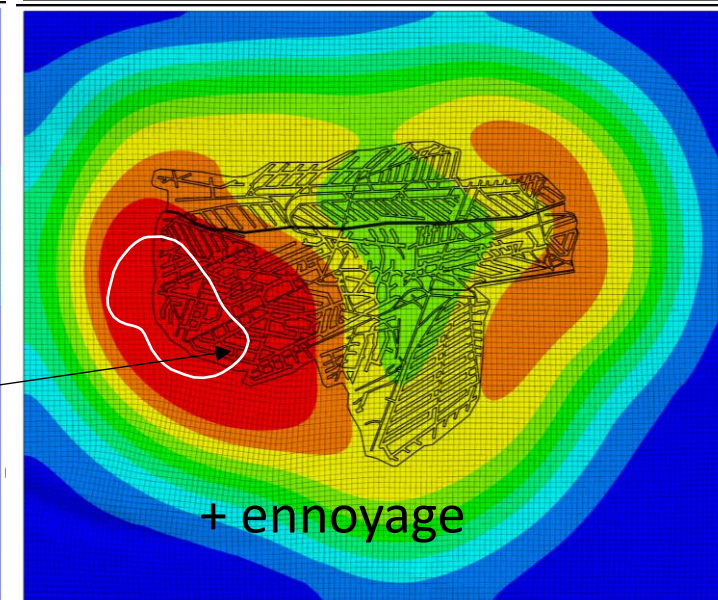
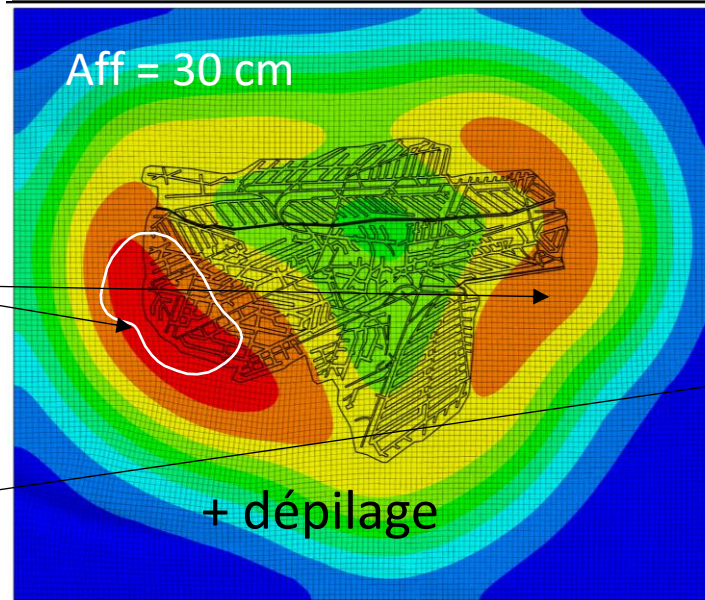
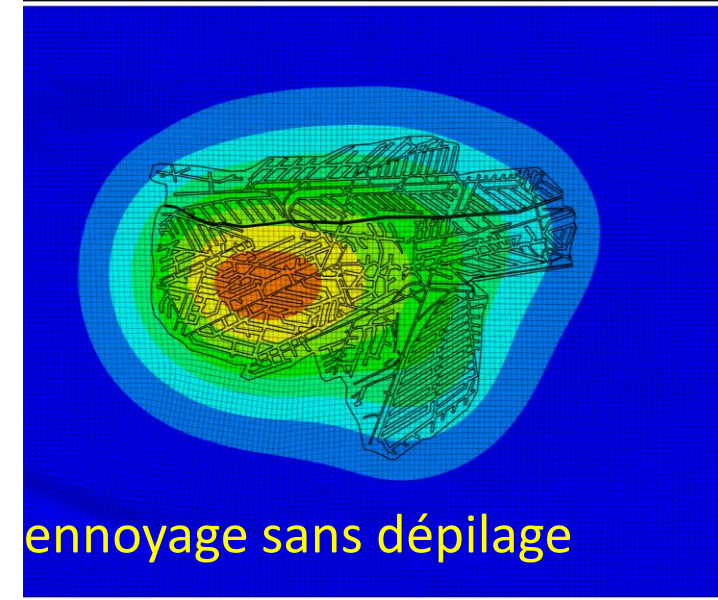
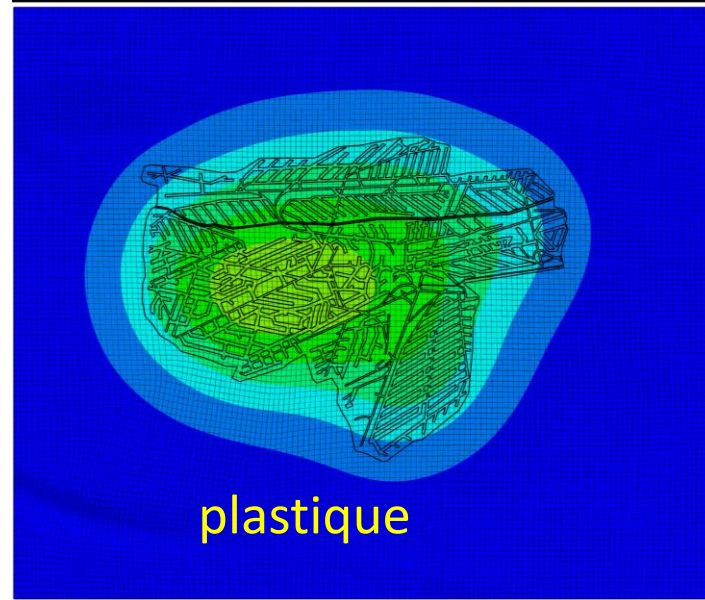
★ critères 1 & 2

☆ critère 2



# Déplacements (totaux) en surface

**MVT calculés confirment :  
effondrement de la partie  
ouest ennoyée**



$u$  induit par  
dépilage, surtout les  
zones + profondes  
( $\sigma >$ )

$u \nearrow$  dans la partie  
ennoyée

# Bilan

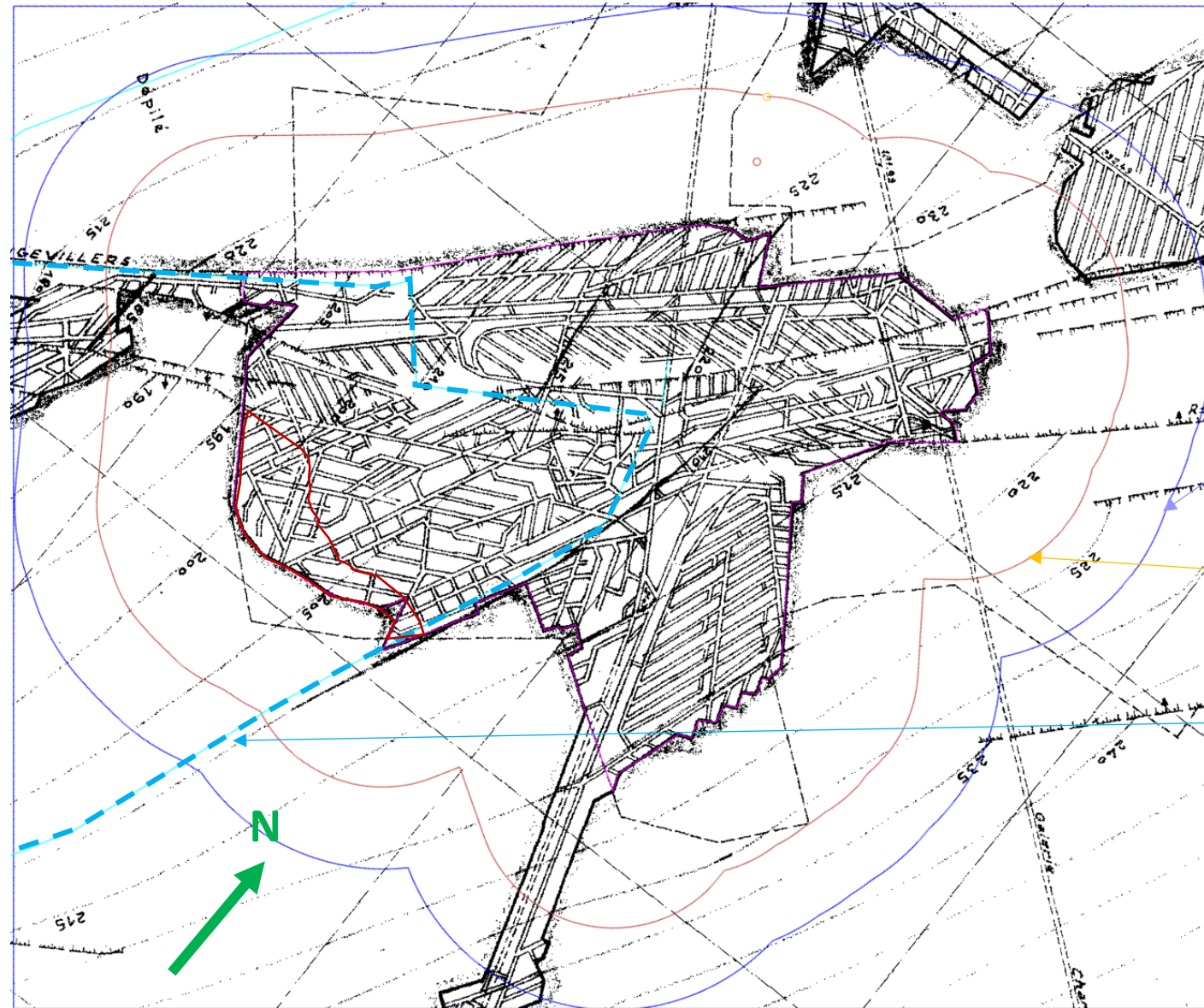
- L'ennoyage est simulé en dégradant les propriétés élastoplastiques des matériaux sous la cote d'ennoyage : -25 % pour C et Rt et -10° ou -15° pour  $\phi$  ( $\psi = 0$ ).
- Les résultats **montrent qu'une baisse de 10° pour  $\phi$  est suffisant** pour obtenir des taux volumiques de FoS < 1,5 supérieurs à 50 % pour 28 piliers du secteur effondré. Ce nombre passe à 32 si la nappe remonte de 1,5 m et la forme de l'affaissement est compatible avec effondrement de la partie ouest ennoyée.

# Conclusions

- Mécanique de roches une discipline indispensable pour l'analyse du comportement après fermeture des mines ;
- Défi pour étudier le comportement à LT et notamment l'interaction avec l'**EAU** ;
- Développement de modèles numériques des configurations complexes et couplages des différentes sollicitations ;
- Utilisation de l'AI pour améliorer la prédiction.

**Merci pour votre attention**

# Extensions du modèle



extensions horizontales du modèle : 1310 m x 1100 m

extension verticale :  $\approx 10 \text{ } \varnothing$  (50 m) en-dessous du mur de la Grise

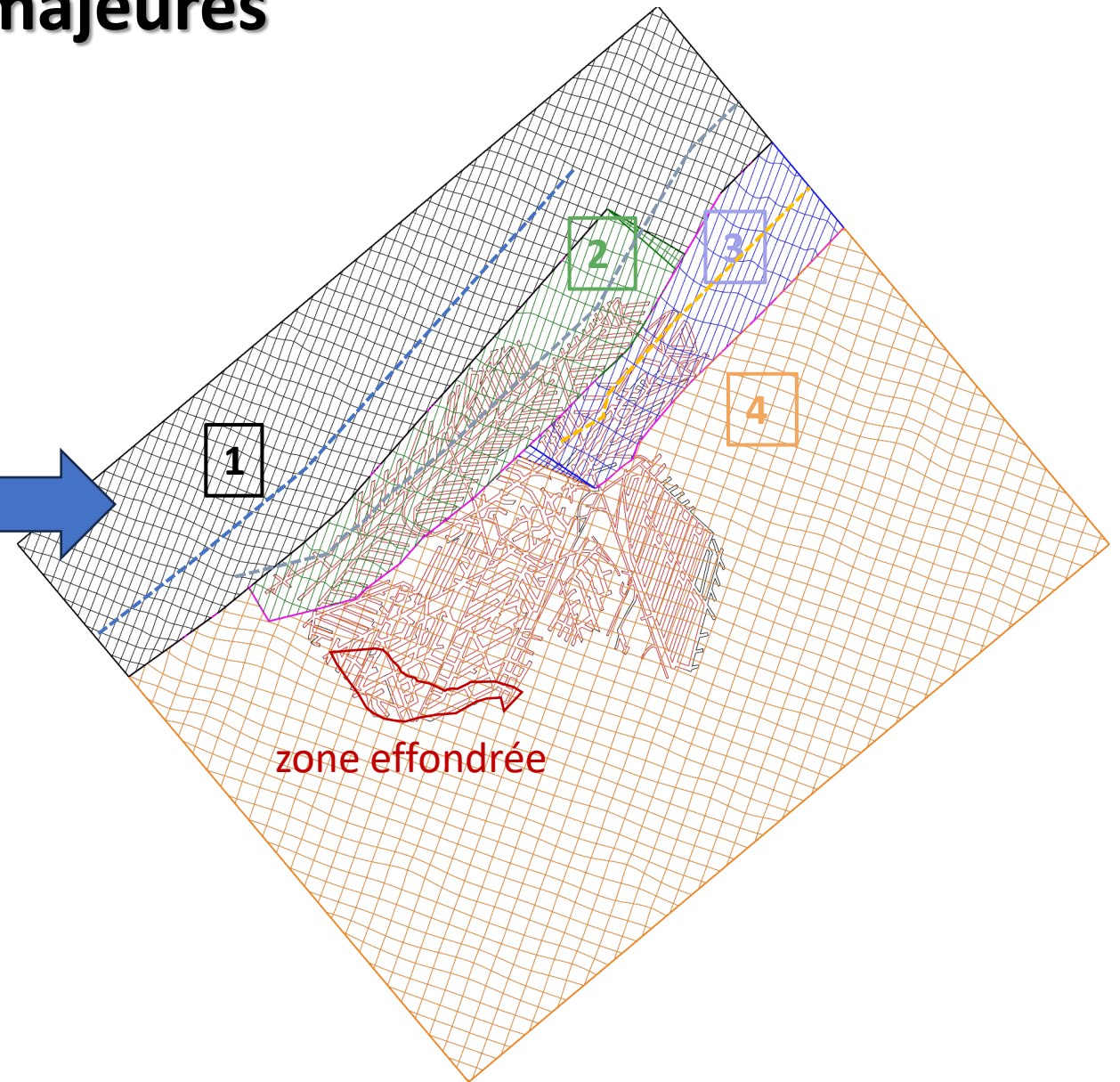
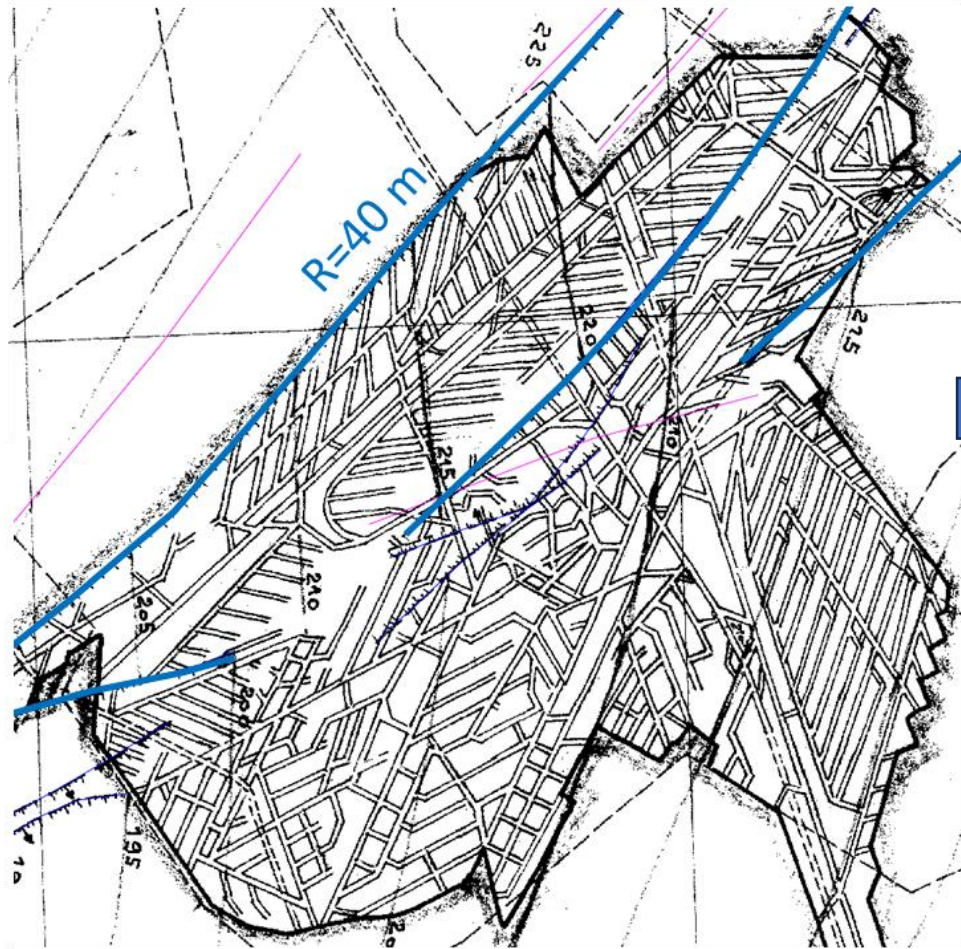
conditions aux limites (d=240 m)

limite influence dépilage (d=prof=150 m)

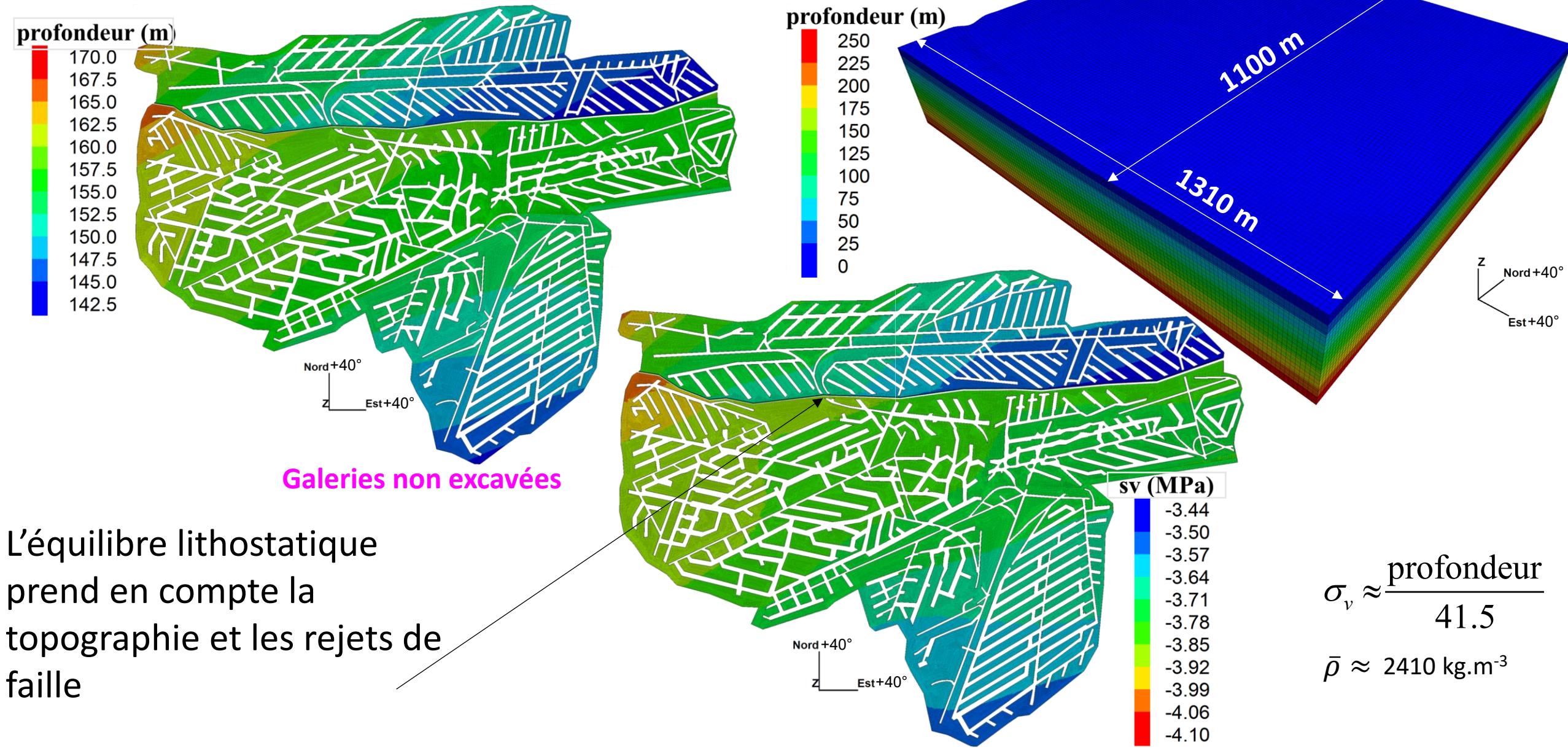
limite ennoyage (affaiblissement des propriétés dans la partie ennoyée ?)  $\approx$  cote 208,5 m

secteur exploité en **couche grise**  $\approx$  800 m NE-SO x 600 m NO-SE

# Prise en compte des failles majeures

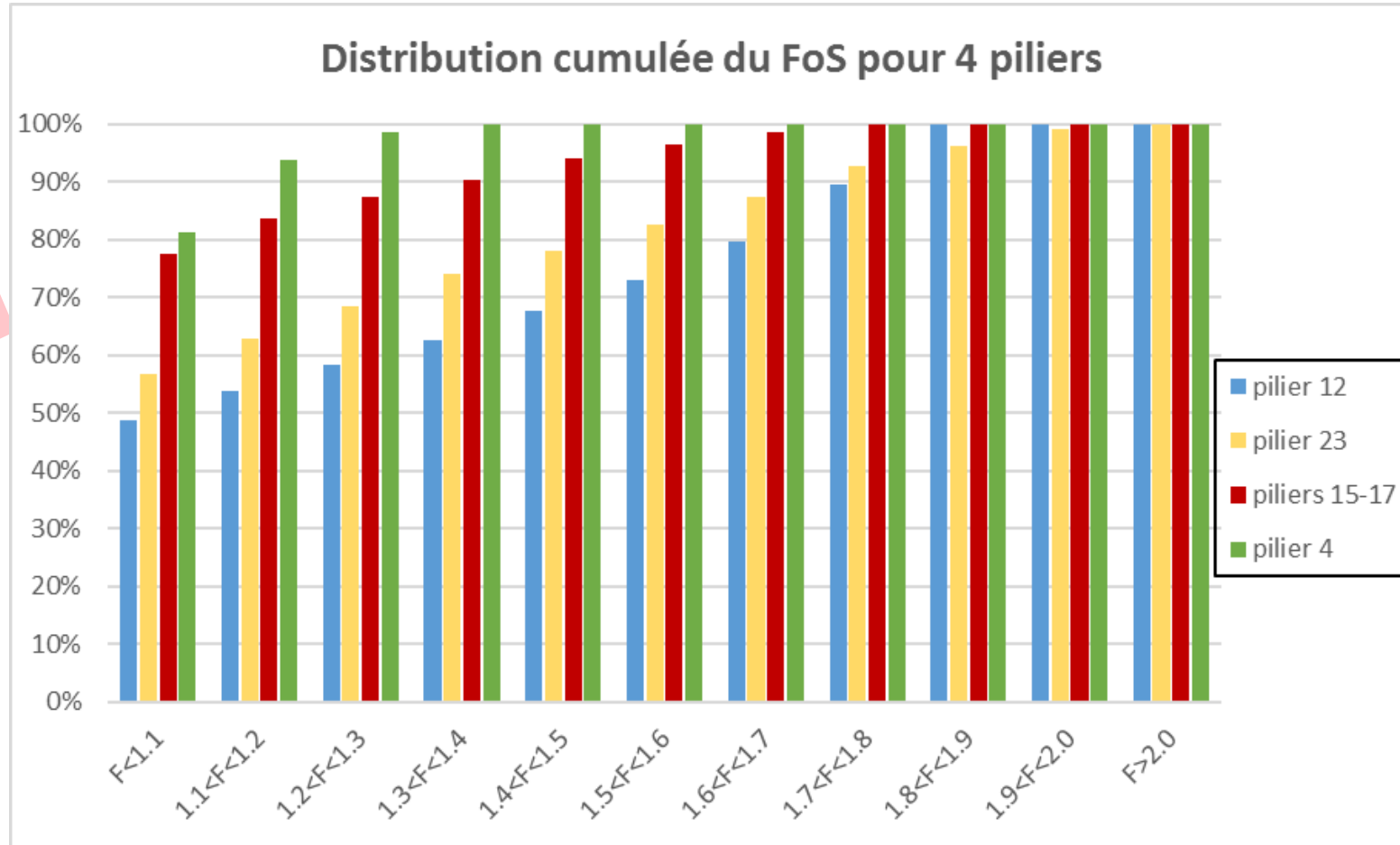
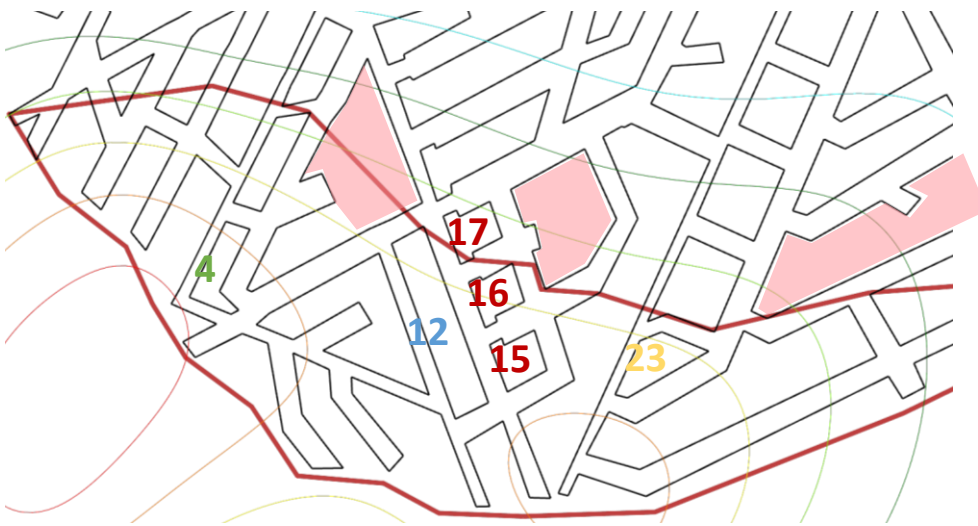


# Equilibre lithostatique



# Distribution cumulée du FoS dans les piliers

mineral :  $\phi = 25^\circ$



important de choisir le seuil de FoS pour un critère de rupture des piliers → toutes les distributions sont ≠ (le tiercé à FoS<x est ≠ de celui pour FoS<x+Δx)

# Evaluation des aléas MVT - géoscience

Des **mouvements de terrain** sont associés à des **caractéristiques** intrinsèques liées à l'exploitation et à l'environnement.

Les facteurs **géologiques, géotechniques et hydrogéologiques**, jouent un rôle essentiel dans la compréhension des phénomènes et leur évolution dans l'espace et dans le temps.

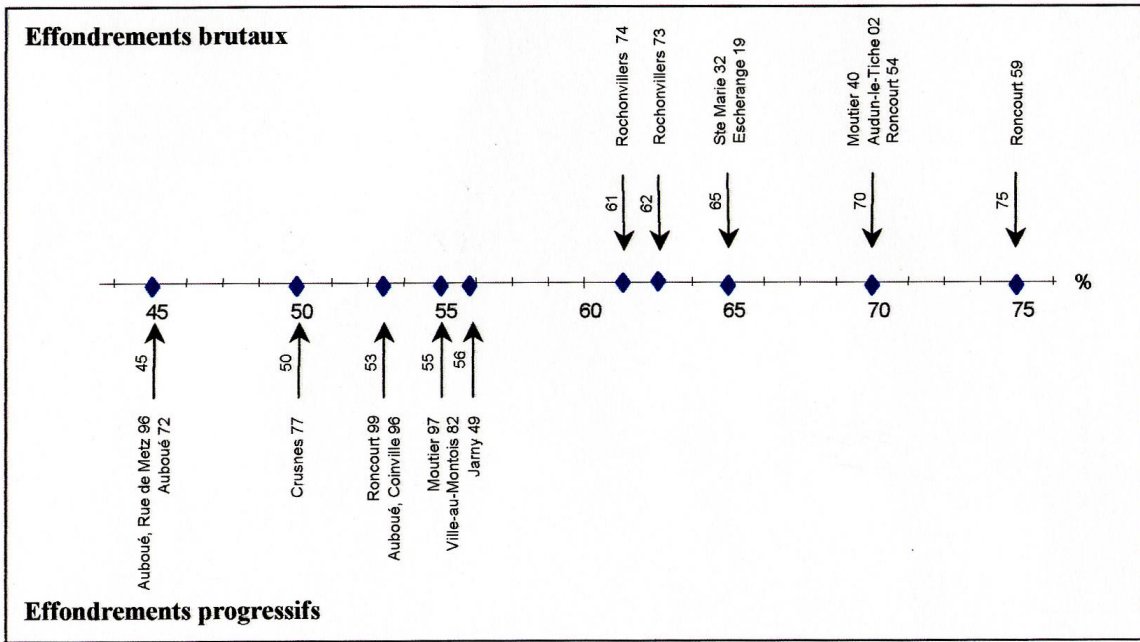
**L'eau** est un facteur déterminant, jouant plusieurs rôles, souvent complexes.

**Malgré des progrès significatifs, il est difficile d'expliquer ou prédire les mouvements de terrains, et les conséquences induites. Quelques pistes de recherche sont proposées.**



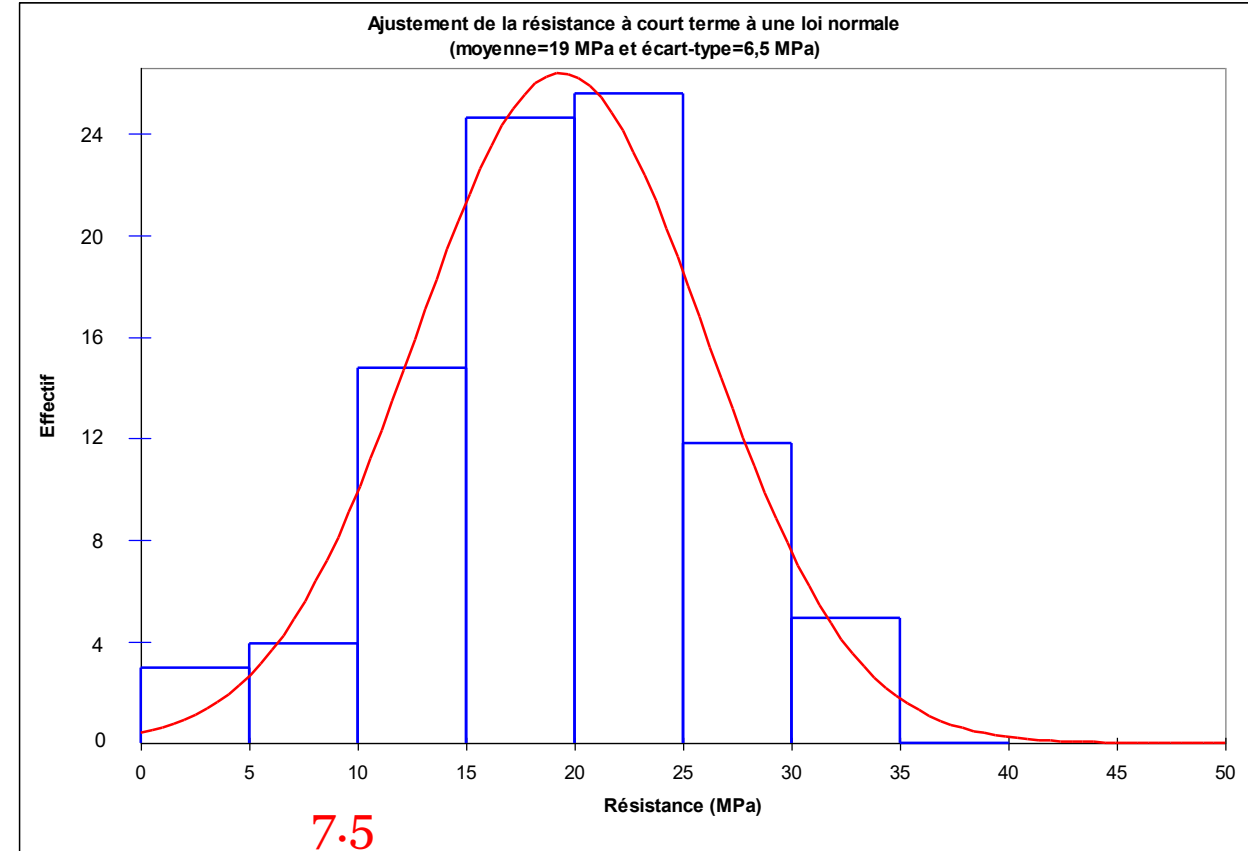
# Méthodes de calcul : analyse statistique et AI ?

## -Méthodes analytiques-empiriques :



Taux de défrètement équivalent des zones effondrées.

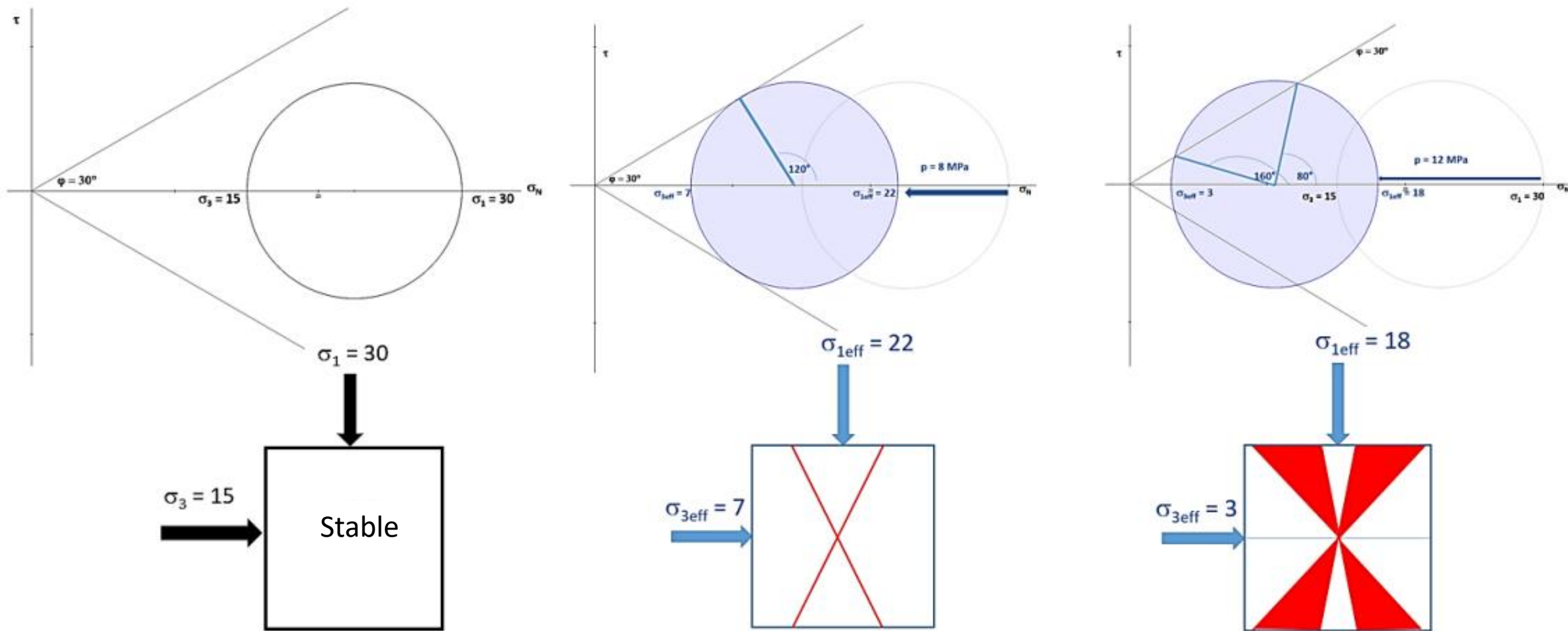
- Effondrement  $\tau > 60\%$  ?
- Constitution de l'échantillon
- Liaison entre variables



Moyenne 19 MPa

Ecart-type : 6,5 MPa

# Méthodes de calcul : effet de l'eau



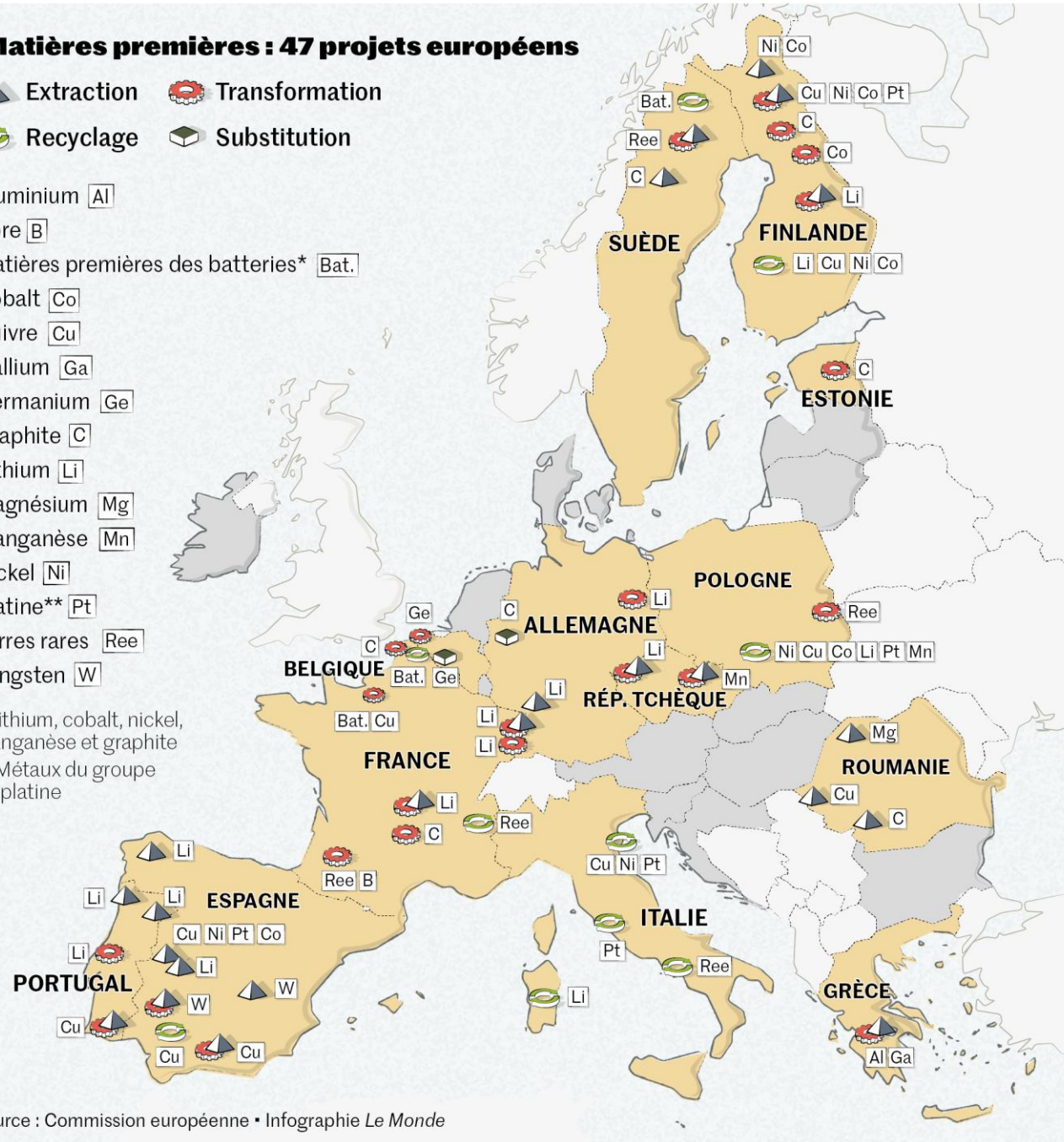
Effet de la pression de l'eau sur la formation des discontinuités / discontinuités existantes. Les plans rouges indiquent les plans de rupture

**Matières premières : 47 projets européens**

-  Extraction
-  Transformation
-  Recyclage
-  Substitution

- Aluminium Al
- Bore B
- Matières premières des batteries\* Bat.
- Cobalt Co
- Cuivre Cu
- Gallium Ga
- Germanium Ge
- Graphite C
- Lithium Li
- Magnésium Mg
- Manganèse Mn
- Nickel Ni
- Platine\*\* Pt
- Terres rares Ree
- Tungsten W

\* Lithium, cobalt, nickel,  
manganèse et graphite  
\*\* Métaux du groupe  
du platine



Source : Commission européenne • Infographie *Le Monde*