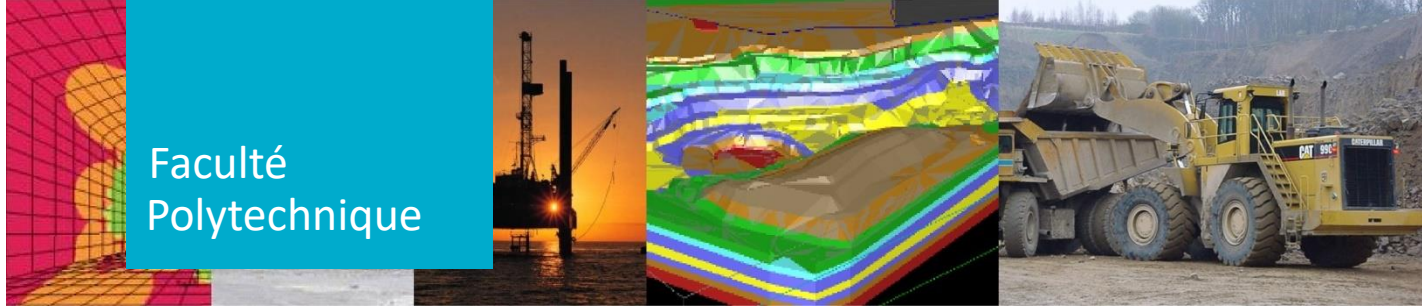




La géomécanique

Des bases de la physique

à la planification d'exploitations

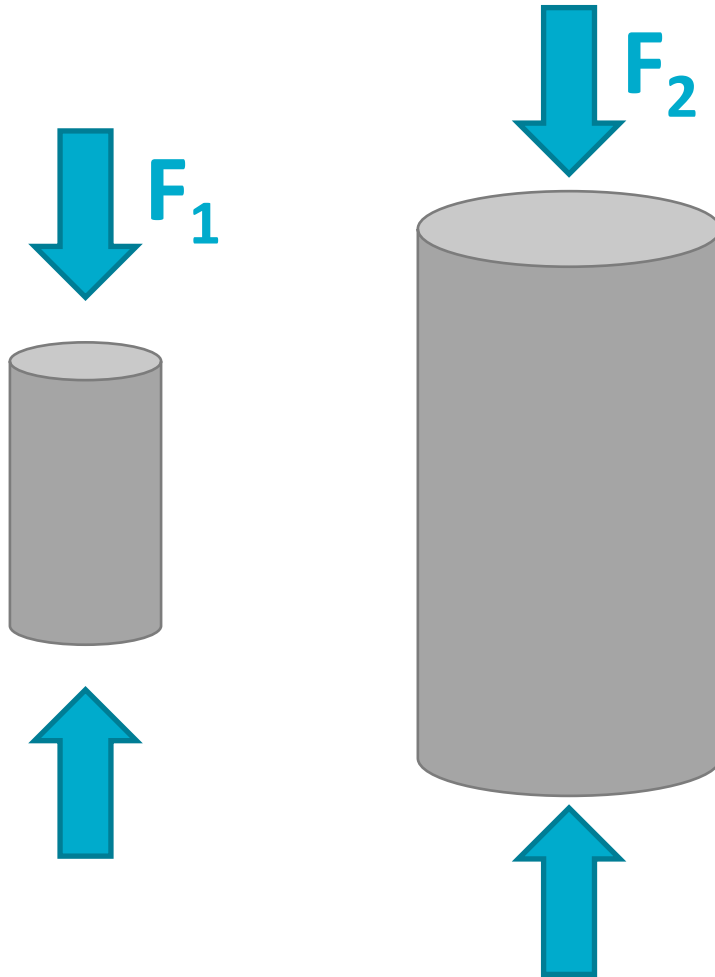
Prof. Fanny Descamps, Dr Ir Nicolas Gonze, Ir Tégawendé Nikiema, Julien Vergari
Service de Génie Minier

La géomécanique

Des bases de la physique à la planification d'exploitations

- Concepts physiques de base : contraintes et déformation
- Notions avancées : lois de comportement
- En pratique : l'expérimentation, étape essentielle
- Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur
- Vers la planification d'exploitations

Concepts physiques de base



Faudra-t-il la même force pour casser les 2 échantillons?

Non, parce qu'ils n'ont pas la même section

Des mots connus :

- force [N]
- pression [Pa]

Un concept à retenir : contrainte [MPa]

The diagram shows a point O on a curved surface. A vector P is drawn perpendicular to the surface at O . A small area element δA is indicated on the surface near O . A vector δF is shown acting on this area element. To the right of the diagram is the equation for pressure:

$$p_{OP} = \lim_{\delta A \rightarrow 0} \frac{\delta F}{\delta A}$$

Concepts physiques de base

Résistance :

$$R_c = \frac{F_{max}}{S}$$

Quelle force pour casser un échantillon
dont $R_c = 200 \text{ MPa}$?

Diamètre : 4 cm $\rightarrow S = 12.56 \text{ cm}^2$

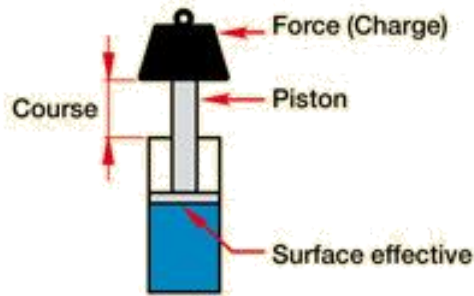
$$F = \sigma \times S = 251 \text{ kN}$$

Matériel spécifique :
vérin hydraulique

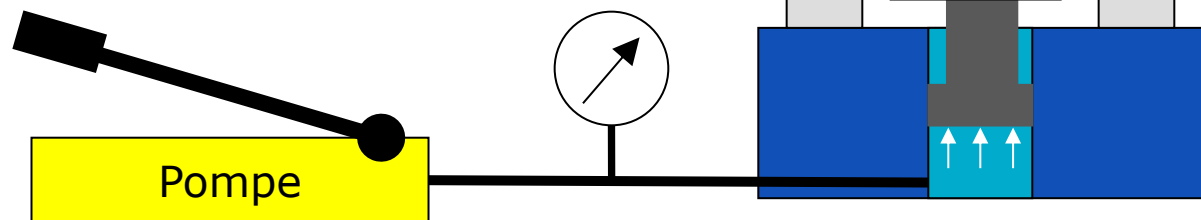
Résistance en compression simple [MPa]	Terme descriptif
$\sigma_c > 200$	Très élevée
$60 < \sigma_c < 200$	Elevée
$20 < \sigma_c < 60$	Modérée
$6 < \sigma_c < 20$	Faible
$\sigma_c < 6$	Très faible

Concepts physiques de base

Principe du vérin hydraulique



$$\text{Force} = \text{Presson de travail hydraulique} \times \text{Surface effective du vérin}$$

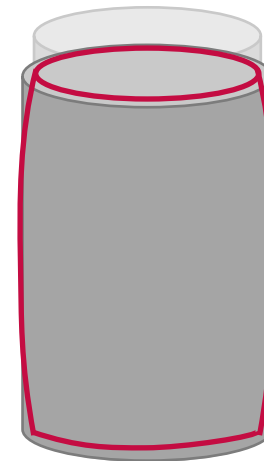
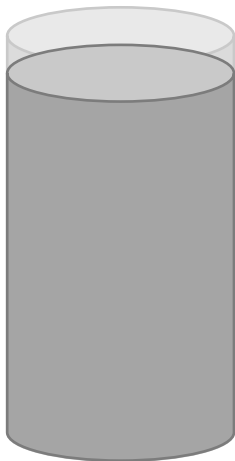
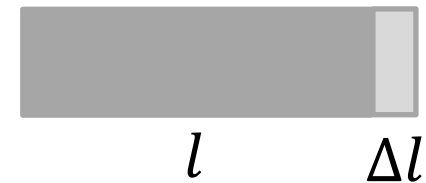


Principe d'une presse de compression

Concepts physiques de base

Déformation :

- Si je comprime l'échantillon, il va se raccourcir
- Exprimé simplement : $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$
- En réalité, c'est un peu plus compliqué

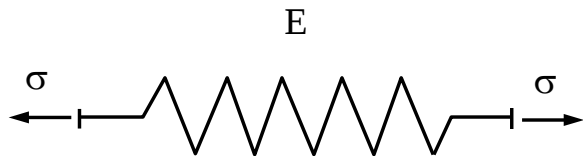


Raccourcissement + Déformation radiale + Effets d'extrémités

Notions avancées : lois de comportement

- Problèmes traités sont 3D
- Contraintes, déformations ne sont pas des scalaires mais des tenseurs
- On cherche une expression mathématique pour modéliser la relation entre contraintes et déformations

- Modèle très simple : le ressort



$$\sigma = E \varepsilon$$

Mais ça marche en 1D !

- Une vision plus réaliste pour les problèmes 3D :

$$[\sigma] = \lambda \operatorname{tr}[\varepsilon] [1] + 2G [\varepsilon]$$

→ J'exprime les contraintes en fonction des déformations (ou l'inverse)

$$[\varepsilon] = \frac{1 + \nu}{E} [\sigma] - \frac{\nu}{E} \operatorname{tr}[\sigma] [1]$$

→ J'ai besoin de 2 paramètres pour caractériser le comportement

Notions avancées : lois de comportement

Mais on doit aussi pouvoir tenir compte :

- De la nature **poreuse** des roches

$$[\sigma] = [\sigma_0] + \lambda_u \operatorname{tr} [\varepsilon] [1] + 2G [\varepsilon] + bM \frac{m}{\rho_0^{fl}} [1]$$

$$p = p_0 + M \left(b \operatorname{tr} [\varepsilon] + \frac{m}{\rho_0^{fl}} \right)$$

- De la dépendance au **temps** (comportements visqueux)

$$[\sigma] = \lambda \{ \operatorname{tr} [\varepsilon] + \theta_\lambda \operatorname{tr} [\dot{\varepsilon}] \} [1] + 2G \{ [\varepsilon] + \theta_G [\dot{\varepsilon}] \}$$

- De **déformations irréversibles**

$$|\sigma| < \sigma_E \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varepsilon_e = \frac{\sigma}{E}$$

$$|\sigma| \geq \sigma_E \quad \rightarrow \quad \varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + g(\sigma)$$

Notions avancées : lois de comportement

Et modéliser le comportement à la rupture sous différentes sollicitations

Généralités | Modèles courants | Données | Construction des enveloppes | Effets de p et T | **Modèle 3D**

Vers un modèle de la surface de charge

- Fonction octaédrique de Willam-Warnke :

$$\Psi(\theta) = \frac{2(1-\beta^2) \cos(\pi/3 - \theta) + (2\beta - 1) \sqrt{4(1-\beta^2) \cos^2(\pi/3 - \theta) + 5\beta^2 - 4\beta}}{4(1-\beta^2) \cos^2(\pi/3 - \theta) + (2\beta - 1)^2}$$

avec $\beta = \frac{q_{extension}}{q_{compression}}$

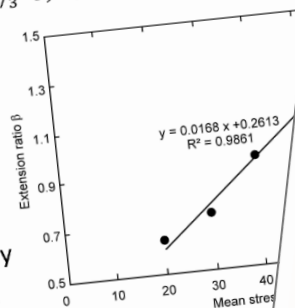
- Evolution du ratio d'extension :

$$\beta(p) = \beta_1 + \beta_2 p$$

- Fonction méridienne de type Cam-Clay
Modifié avec résistance à la traction :

$$q(p) \equiv q = M \sqrt{p^*(p_0^* - p^*)}$$

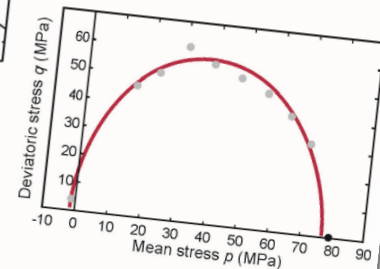
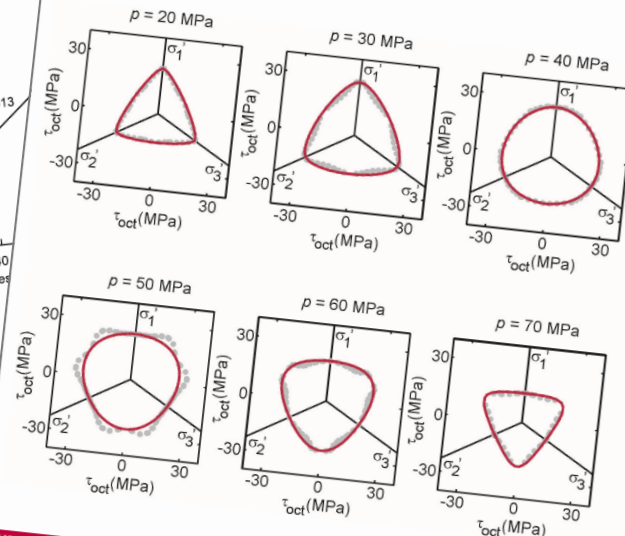
$$p^* = p + a$$



Généralités | Modèles courants | Données | Construction des enveloppes | Effets de p et T | **Modèle 3D**

Exemple du calcaire de Sorcy

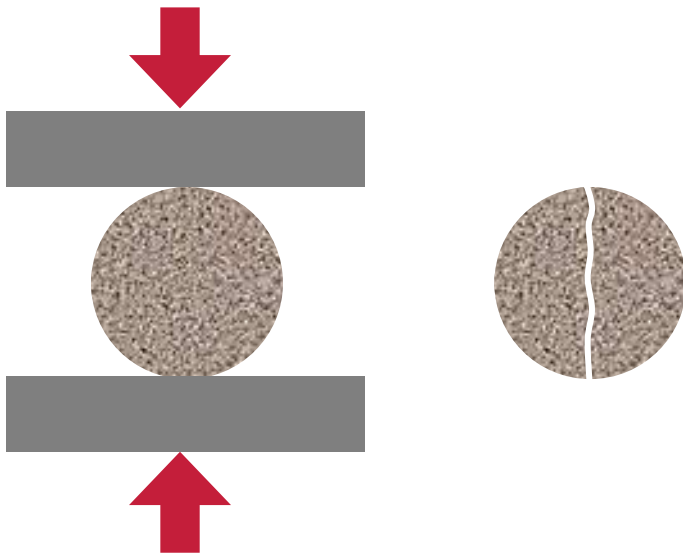
ification de la présentation : 02/05/2022



Les modèles se compliquent alors

Comportement en traction

- Traction indirecte ou brésilienne
- Rupture selon un plan de symétrie de l'échantillon



$$R_t = \frac{-2F}{\pi DH}$$

- D , diamètre de l'échantillon
- H , hauteur de l'échantillon
- F , force appliquée

La géomécanique

Des bases de la physique à la planification d'exploitations

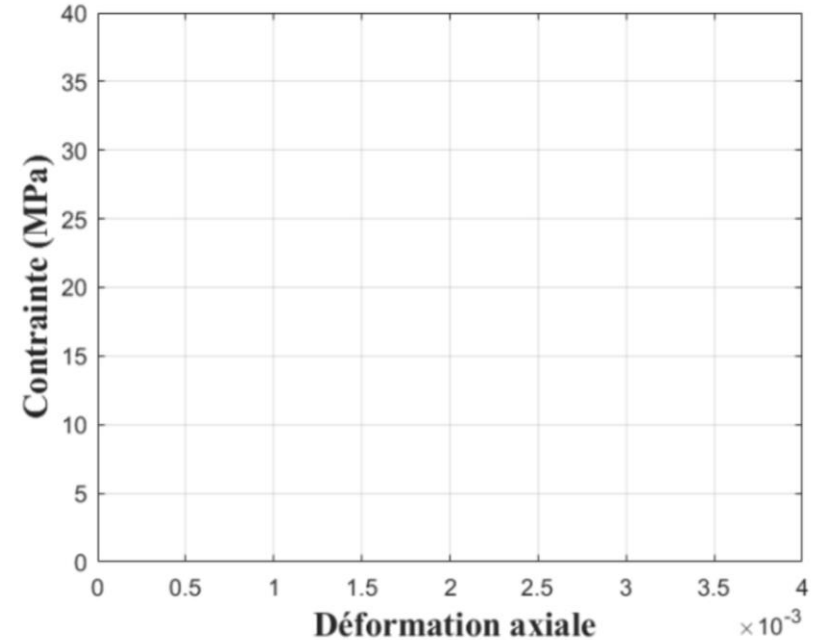
- Concepts physiques de base : contraintes et déformation
- Notions avancées : lois de comportement
- En pratique : l'expérimentation, étape essentielle

➡ Direction : LABORATOIRE

- Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur
- Vers la planification d'exploitations

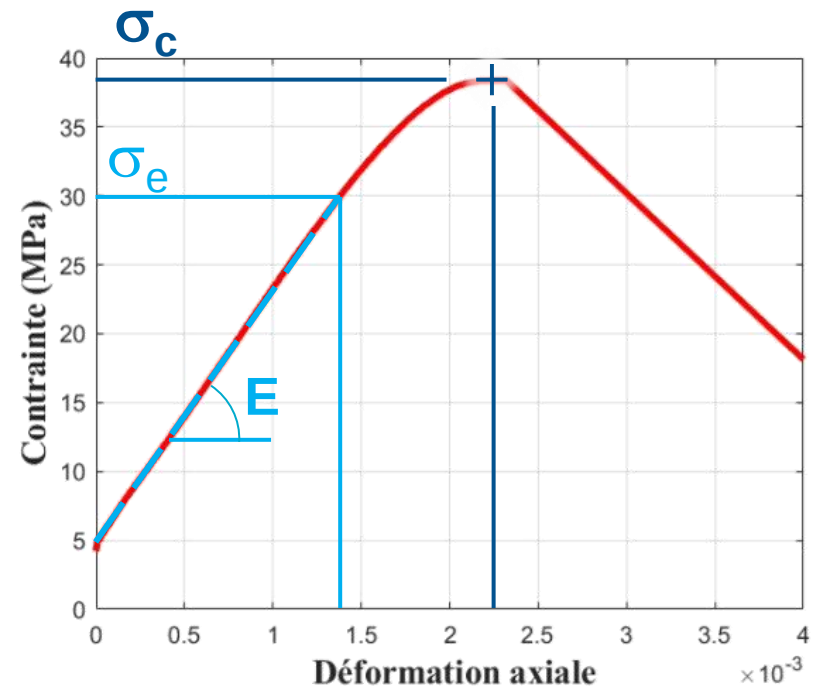
En pratique : l'expérimentation

Que s'est-il passé durant l'essai?



En pratique : l'expérimentation

Que peut-on en tirer?



La géomécanique

Des bases de la physique à la planification d'exploitations

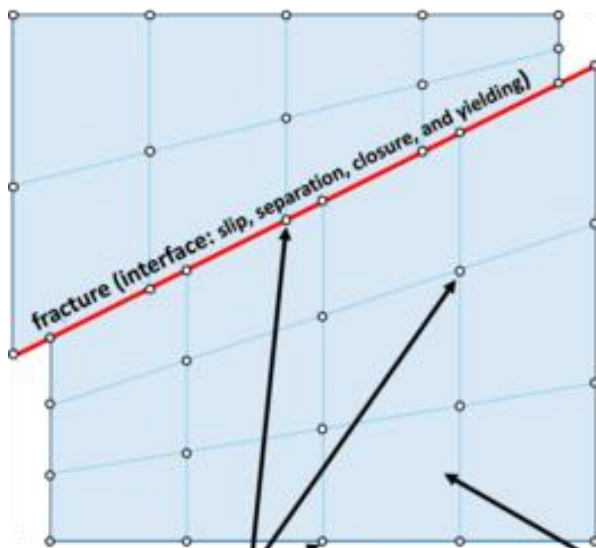
- Concepts physiques de base : contraintes et déformation
- Notions avancées : lois de comportement
- En pratique : l'expérimentation, étape essentielle

➡ Direction : LABORATOIRE

- Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur
- Vers la planification d'exploitations

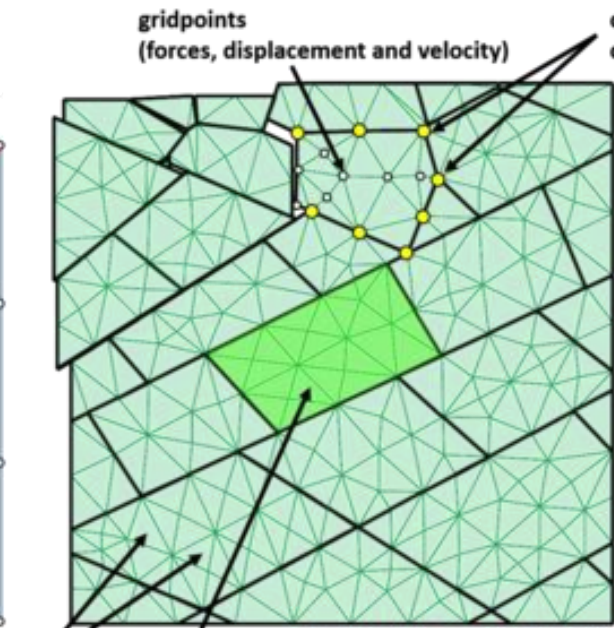
Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur

FLAC, FLAC3D, and FLAC/Slope
CONTINUUM



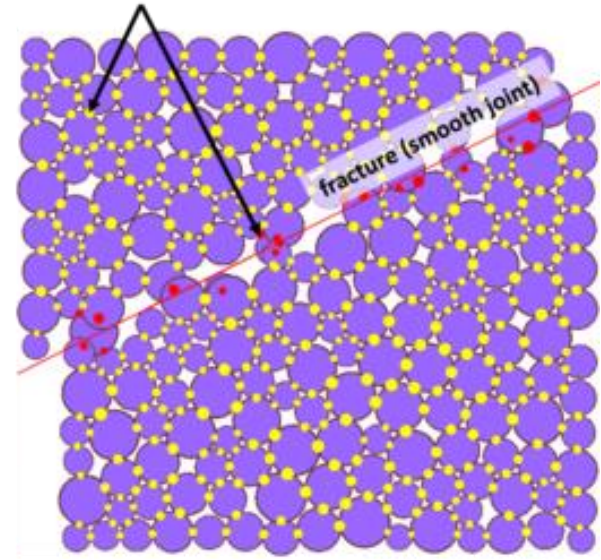
DEFORMABLE ZONES
zones (stress, strains and yielding)

UDEC and 3DEC
DISCRETE - BLOCK



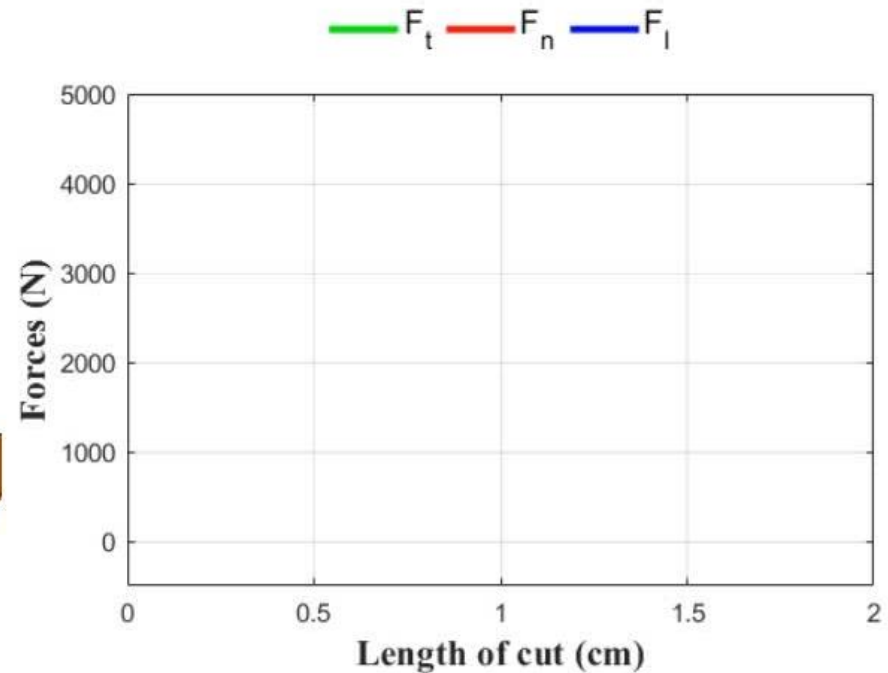
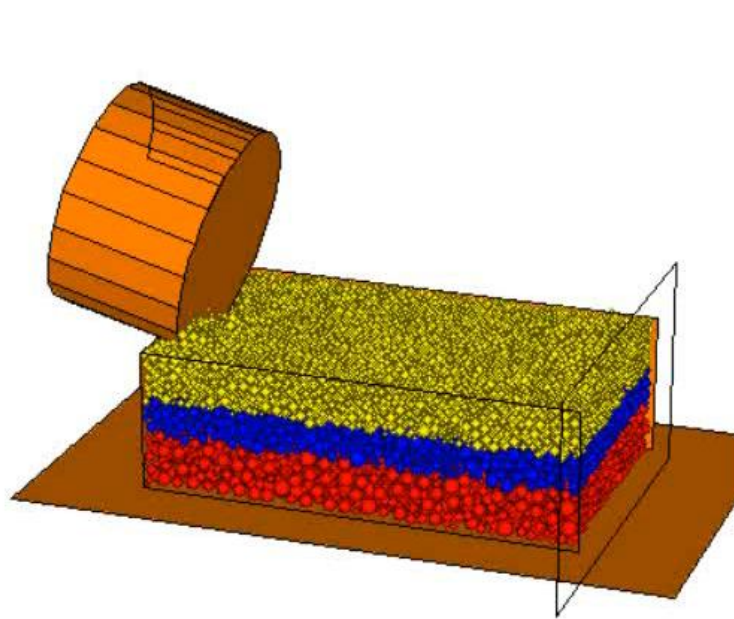
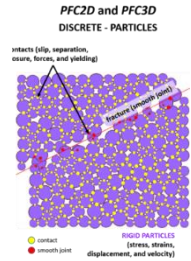
DEFORMABLE or RIGID BLOCKS (displacement and velocity)

PFC2D and PFC3D
DISCRETE - PARTICLES

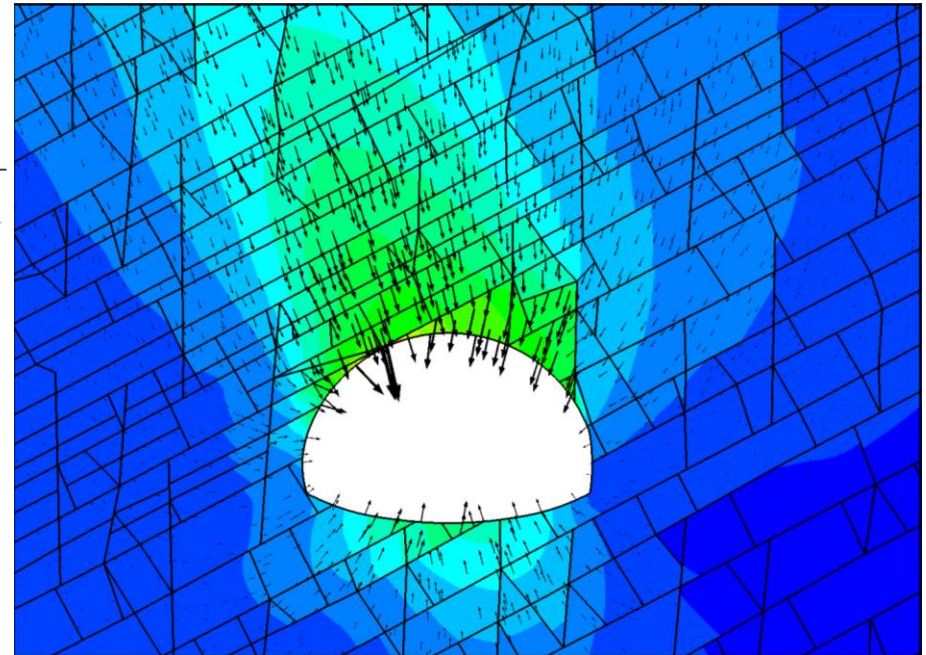
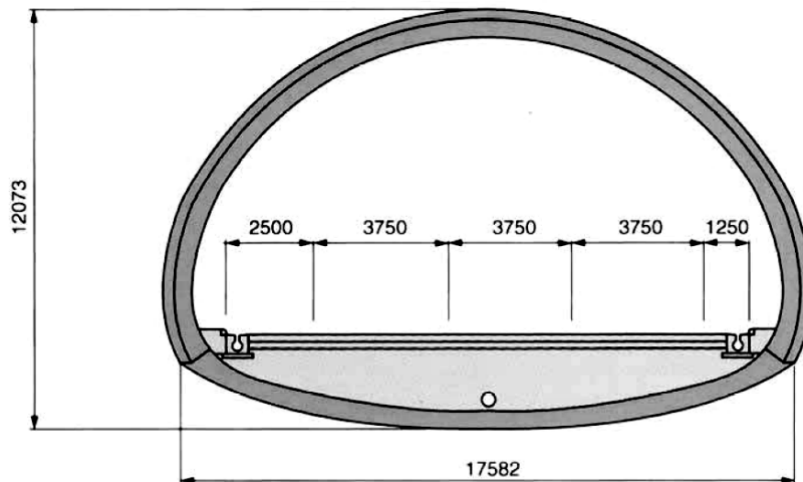
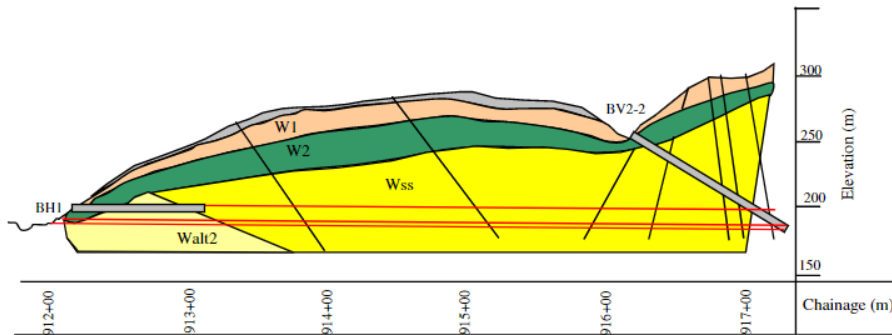
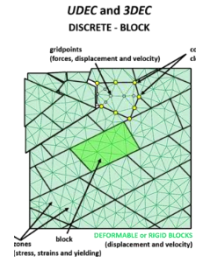


contact
smooth joint

Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur

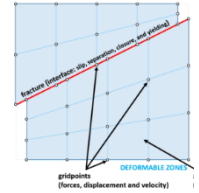


Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur



Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur

FLAC, FLAC3D, and FLAC/Slope
CONTINUUM

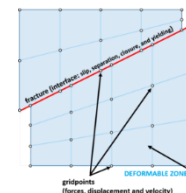


Carrières du Tournaisis



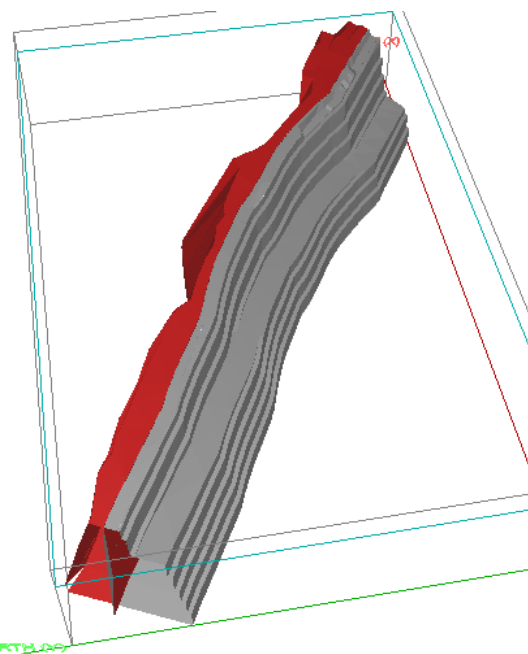
Mur entre Antoing et Milieu



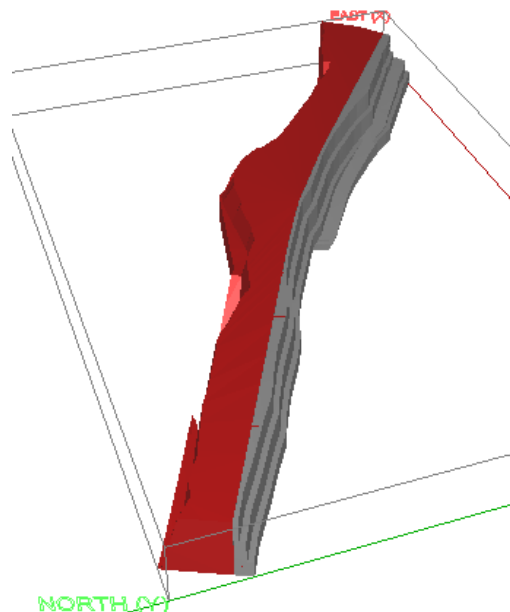


Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur

Simulation 1: Top = +30 m

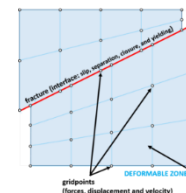


Simulation 2: Top = -60 m



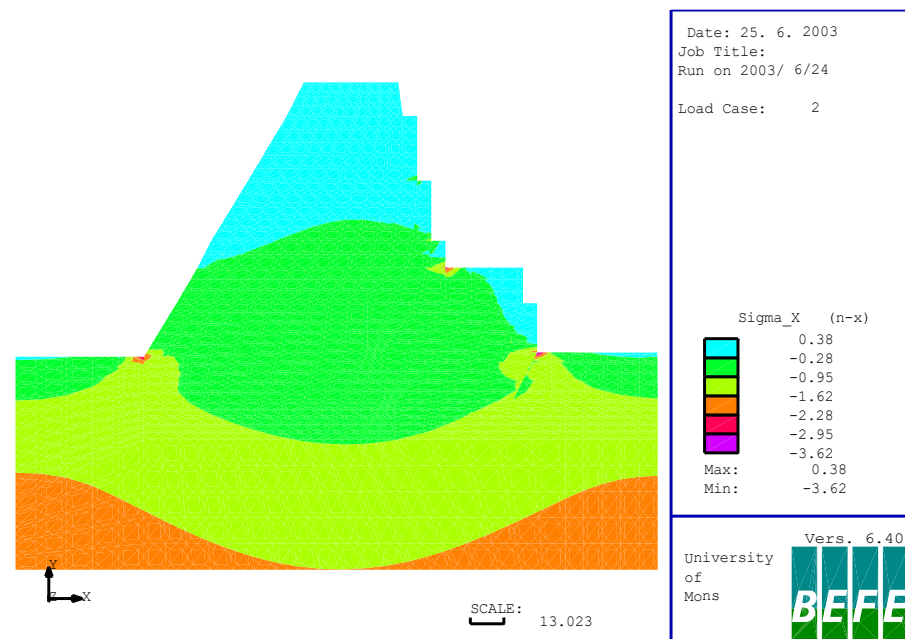
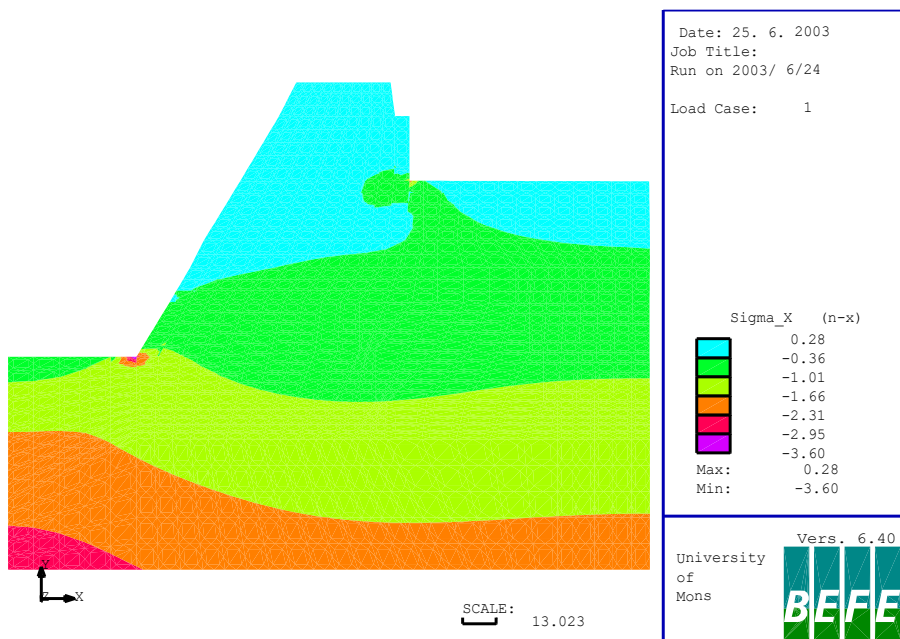
Mur entre Antoing et Milieu





Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur

Différents scénarios ont été étudiés en vue d'évaluer la stabilité des murs et définir leur profil optimal



La géomécanique

Des bases de la physique à la planification d'exploitations

- Concepts physiques de base : contraintes et déformation
- Notions avancées : lois de comportement
- En pratique : l'expérimentation, étape essentielle

➡ Direction : LABORATOIRE

- Modélisations numériques pour les calculs d'ingénieur
- Vers la planification d'exploitations

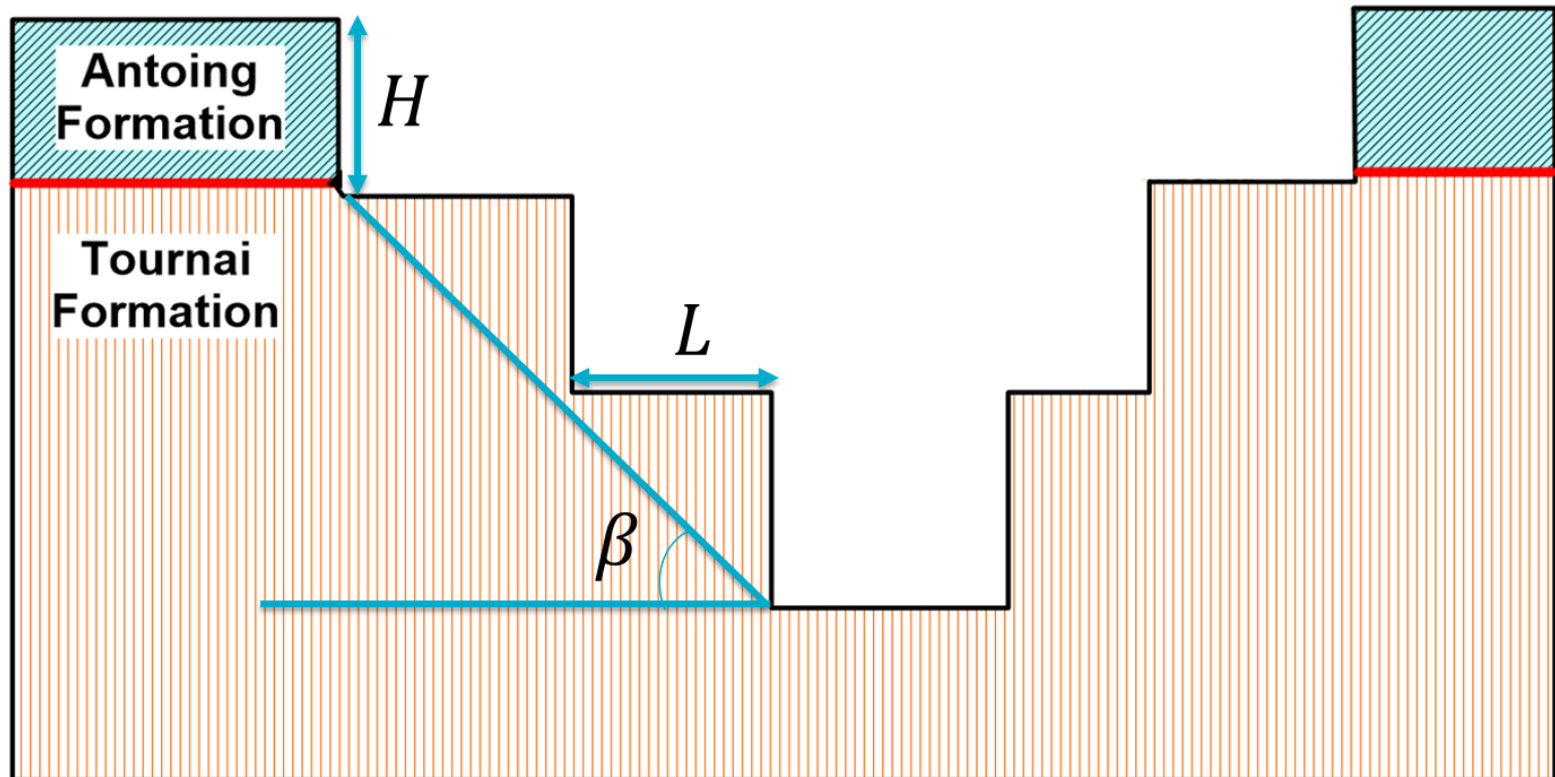
Planification d'exploitations: géométrie des ouvrages

- Fosse de la carrière d'Antoing
- Bancs d'exploitation disposés en gradins
- Rampes d'accès



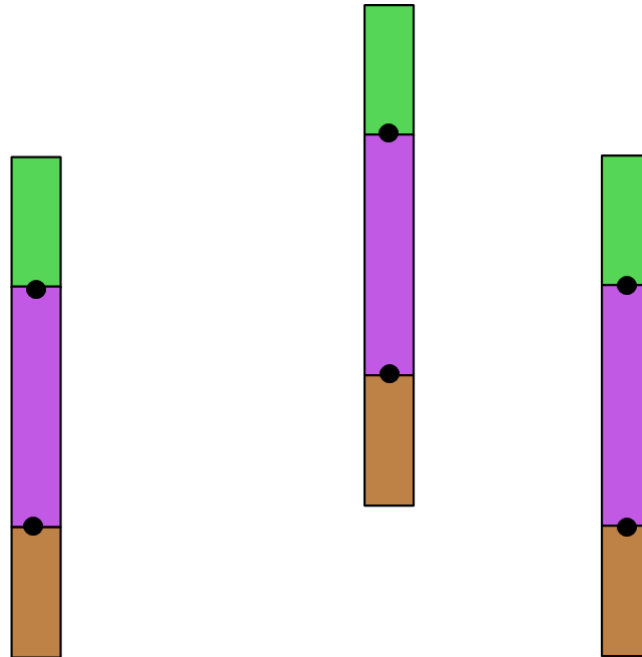
Planification d'exploitations: géométrie des ouvrages

- Paramètres de la fosse déterminés par la géomécanique
- Principalement H , L , β



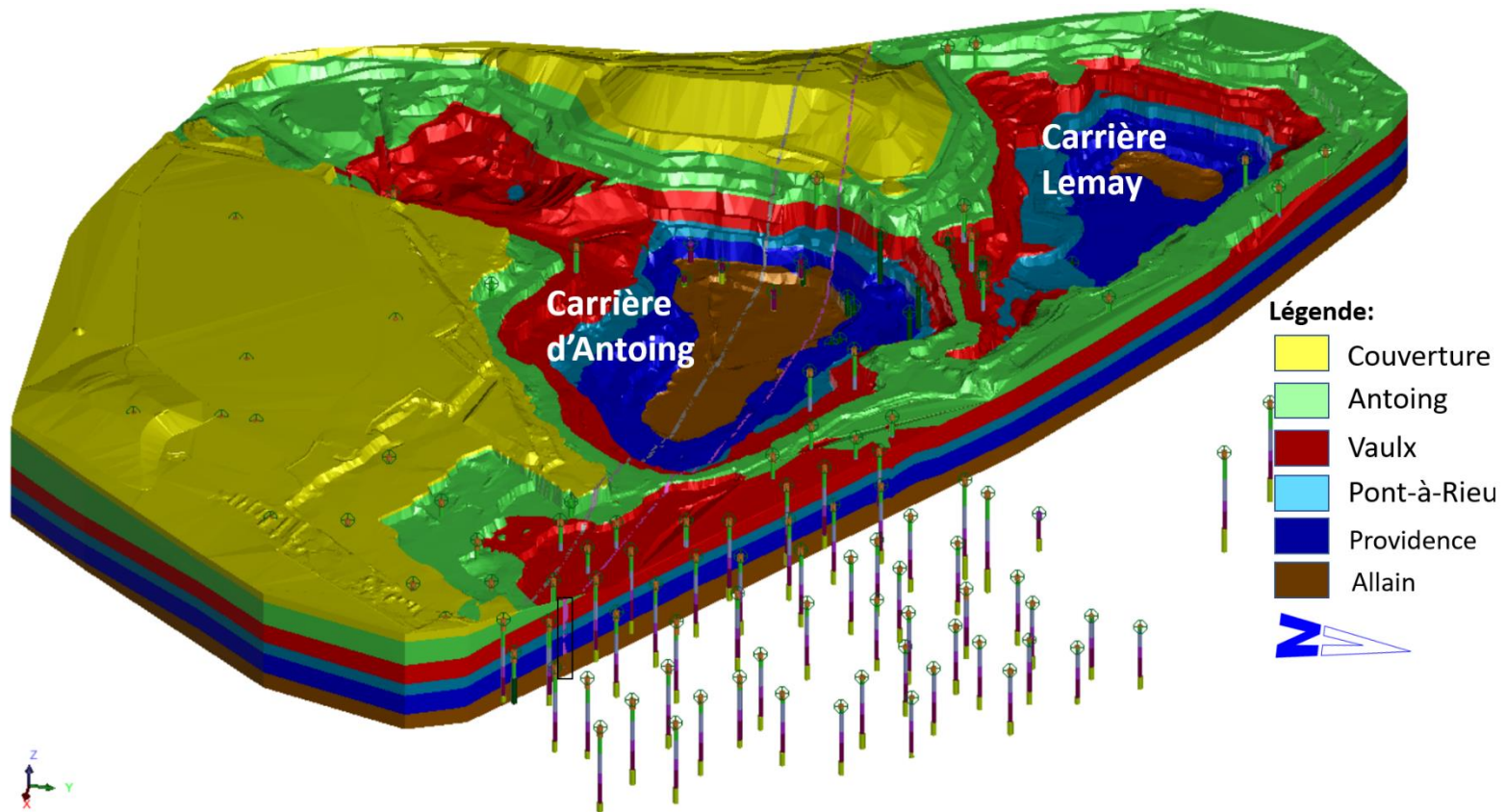
Planification d'exploitations: modélisation géologique

- Interpolations des informations
- Construction de surfaces limites
- Construction de volumes géologiques
- Intégrations de la surface du sol: la topographie



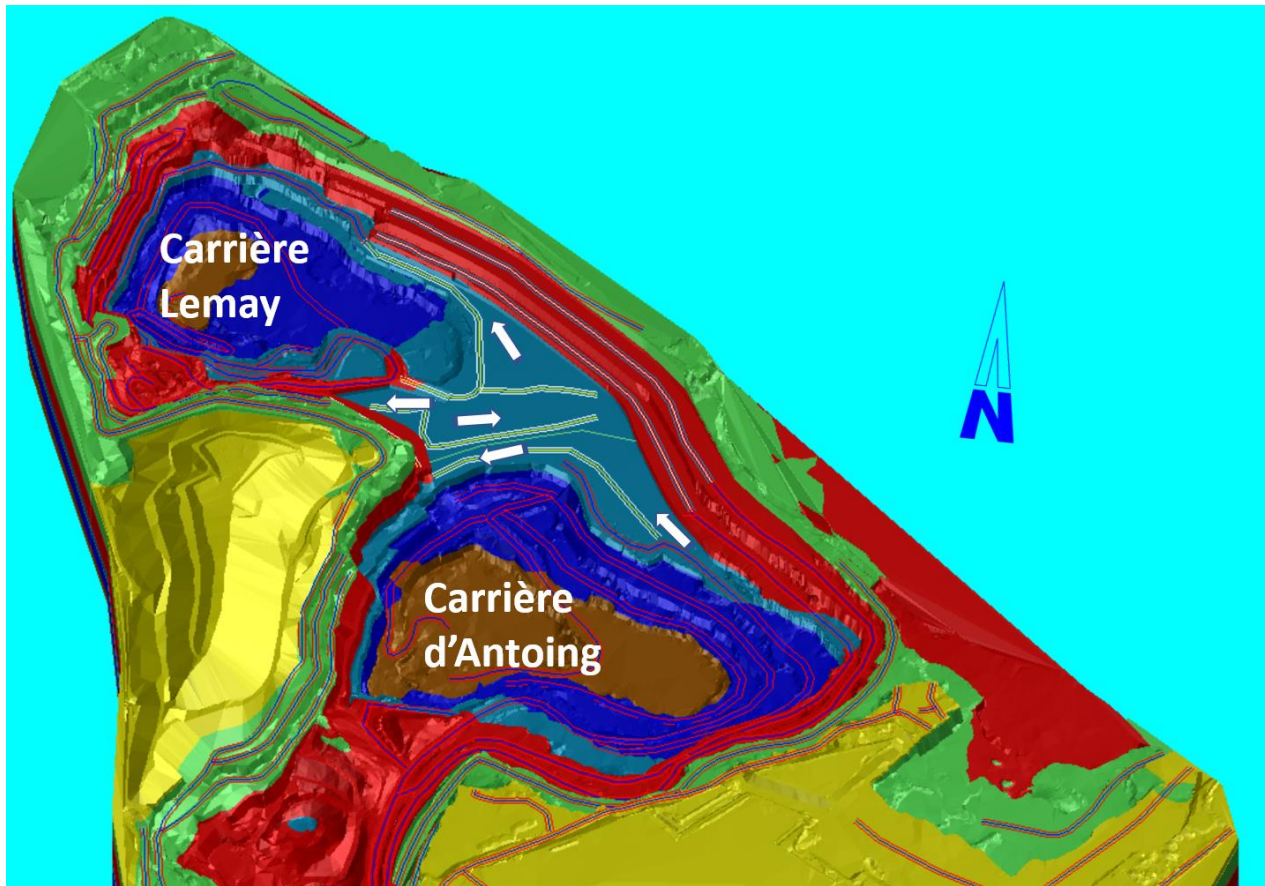
Planification d'exploitations: modélisation géologique

- Modèle géologique des carrières d'Antoing et de Lemay



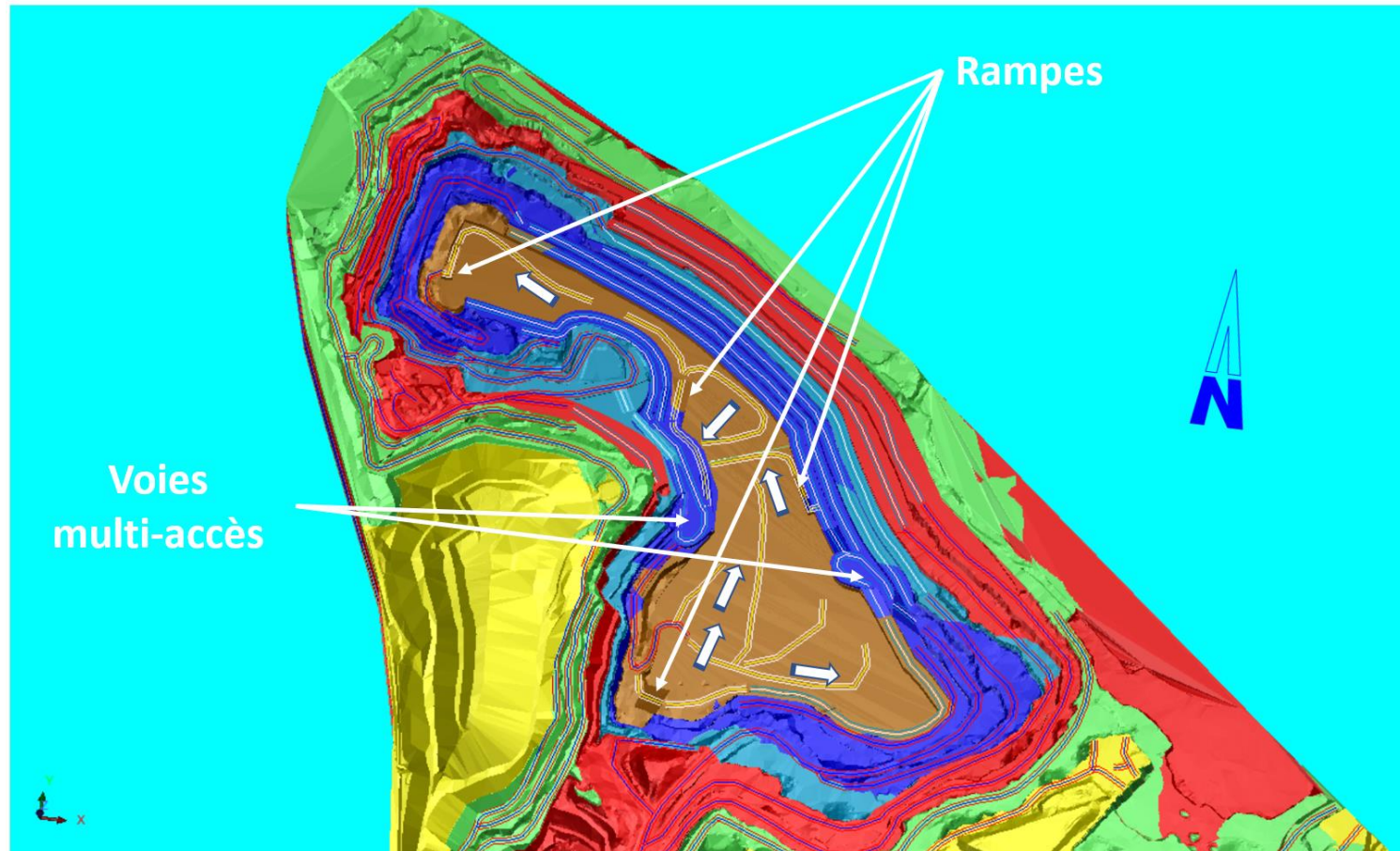
Planification d'exploitations: conception de la future exploitation

- Etape intermédiaire de l'exploitation



Planification d'exploitations: conception de la future exploitation

- Fosse finale de l'exploitation



Planification d'exploitations: conception de la future exploitation

- Fosse finale de l'exploitation

