

Journée scientifique sur la modélisation physique en géotechnique

**Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D
à la modélisation physique des massifs rocheux**

LE 06 OCTOBRE 2022



cfms
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

Essai préliminaire de l'application de l'impression 3D à la modélisation physique des massifs rocheux

Jana JABER – ANDRA

Olivier DECK – GeoRessources

Marianne CONIN – GeoRessources

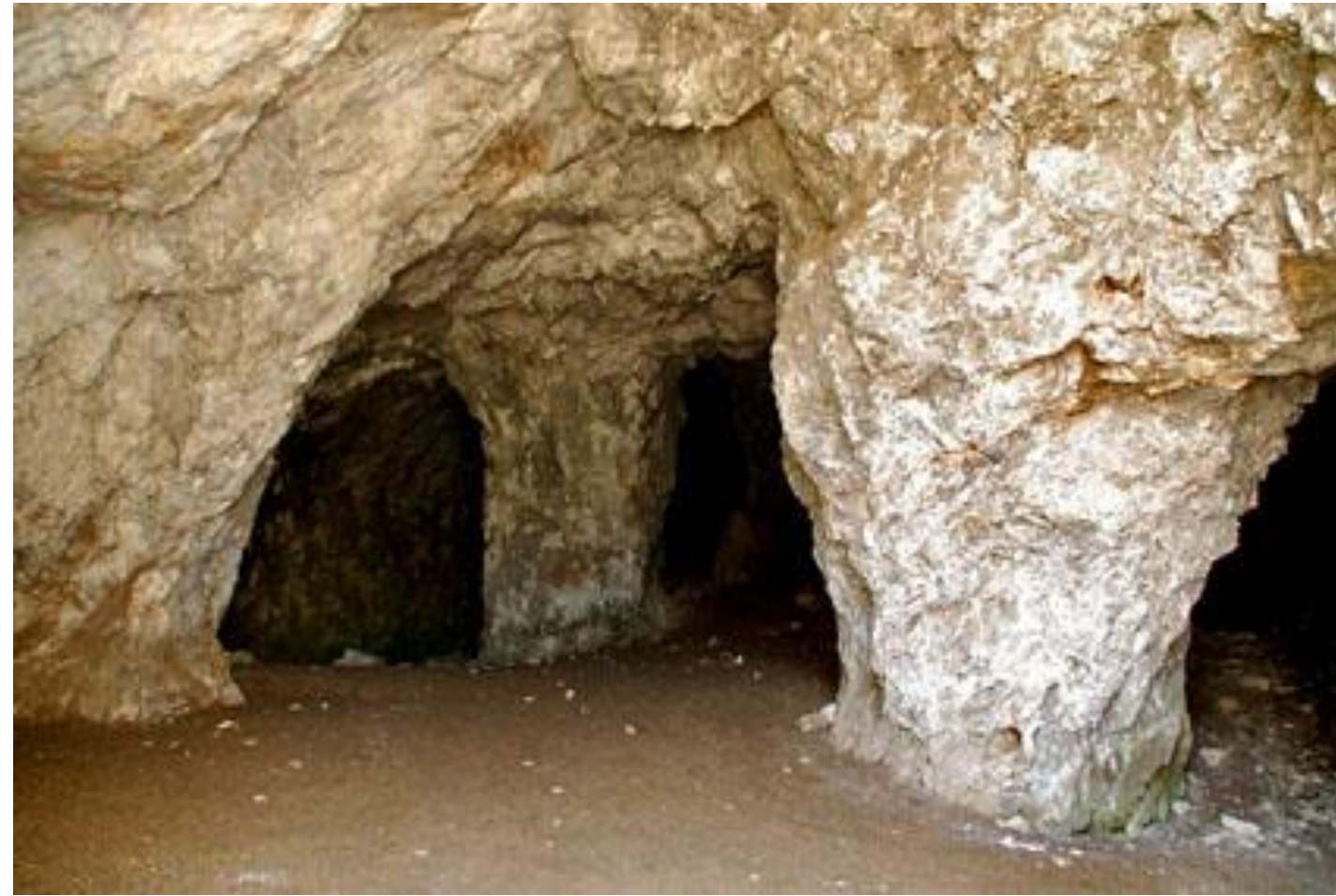
geo
Ressources

**UNIVERSITÉ
DE LORRAINE**

JOURNÉE SCIENTIFIQUE SUR LA MODÉLISATION PHYSIQUE EN GÉOTECHNIQUE

LE 06 OCTOBRE 2022

Contexte Général



Ancienne mine souterraine de gypse



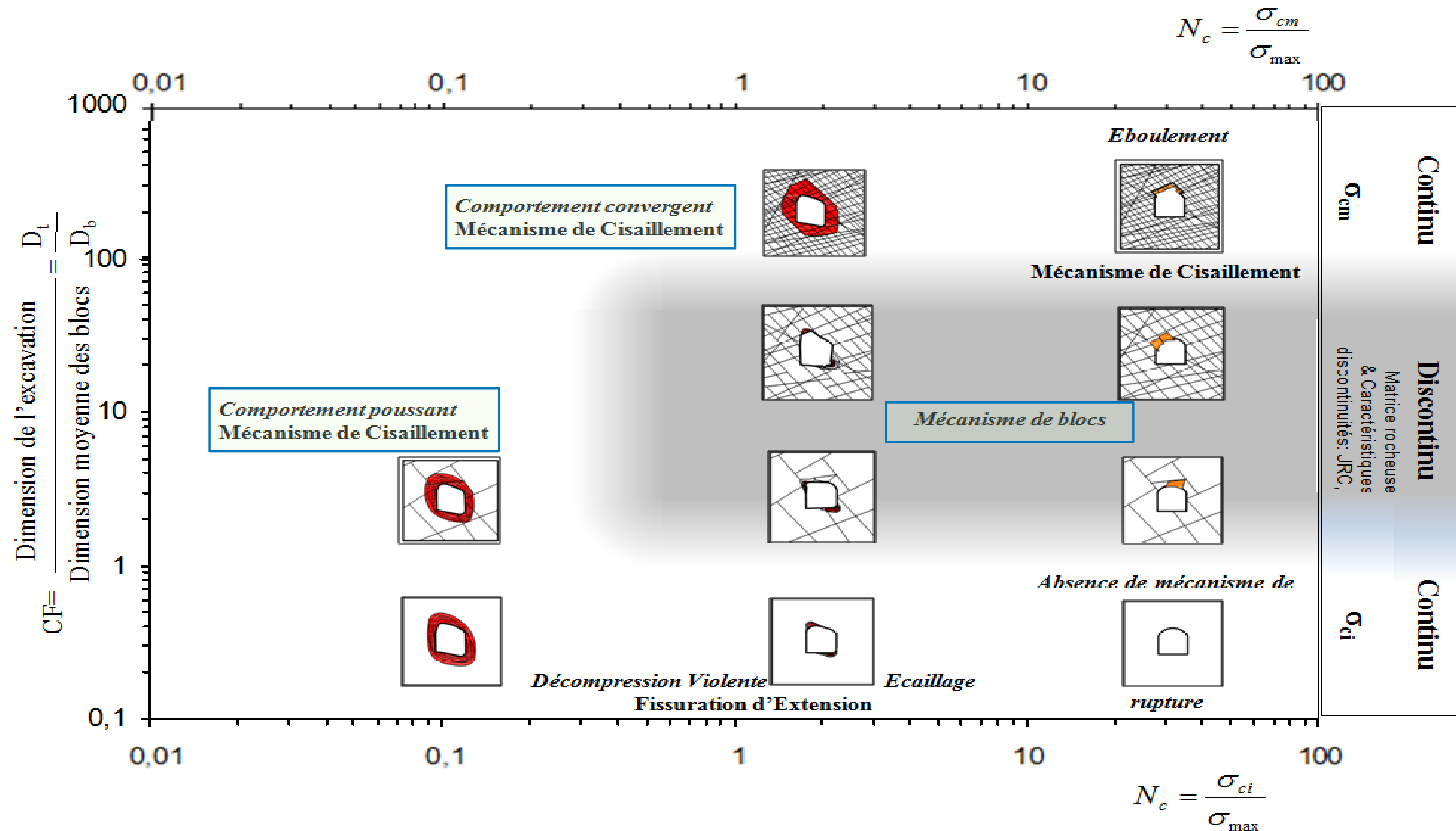
Massif rocheux discontinu



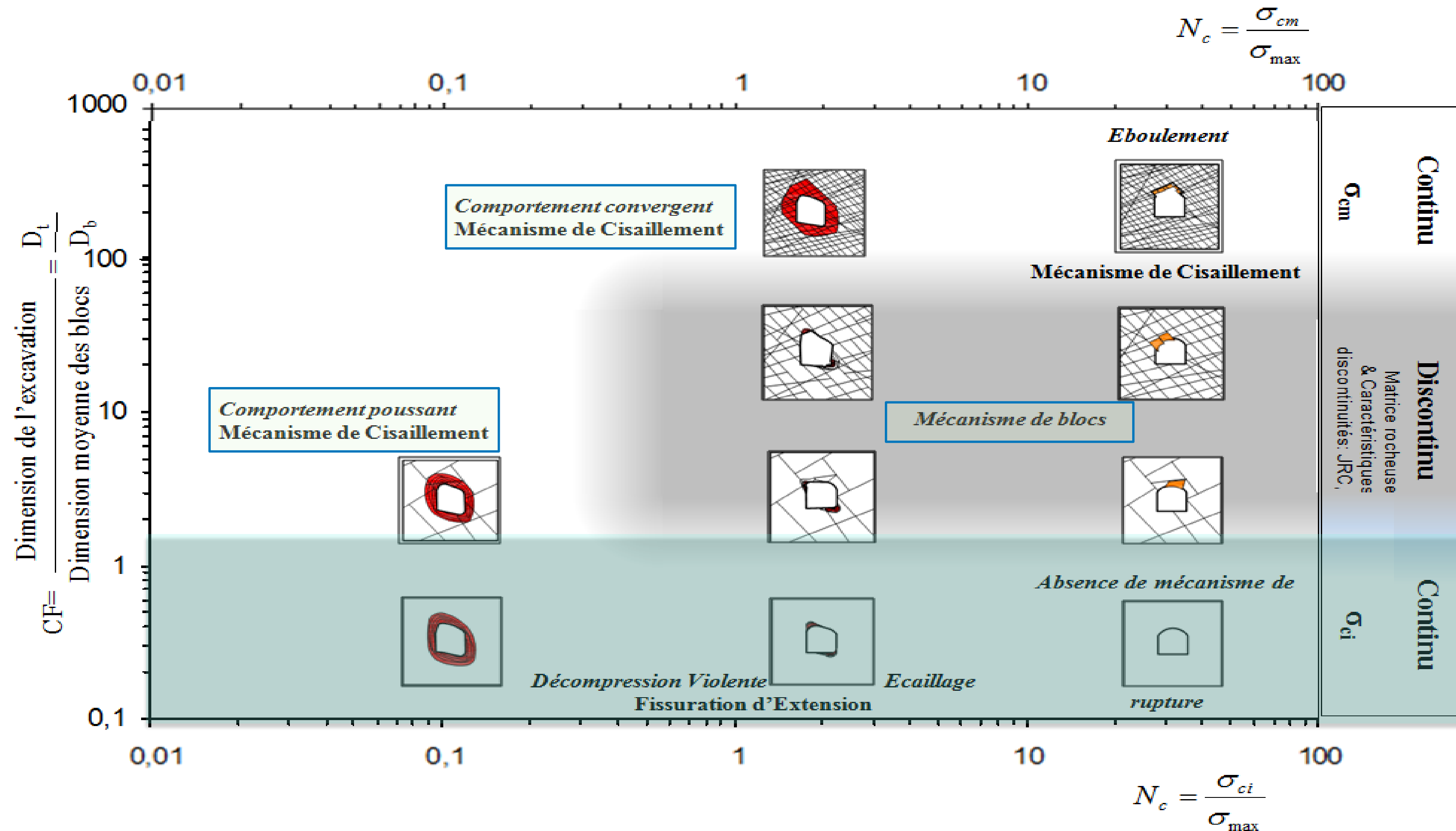
Excavation d'un tunnel

Massif rocheux = Roche intacte + Discontinuités rocheuses

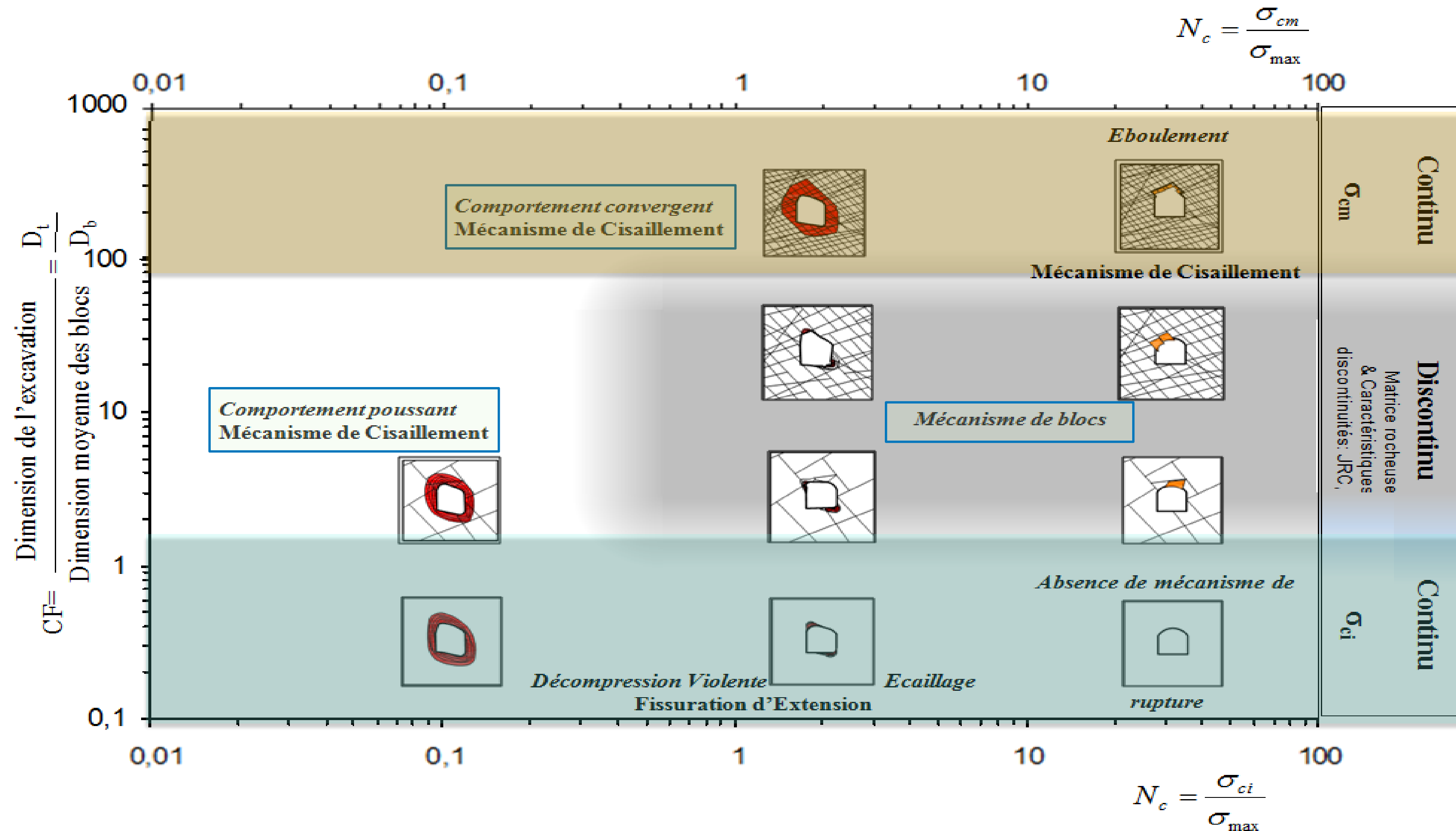
Milieu continu equivalent vs milieu explicitement discontinu



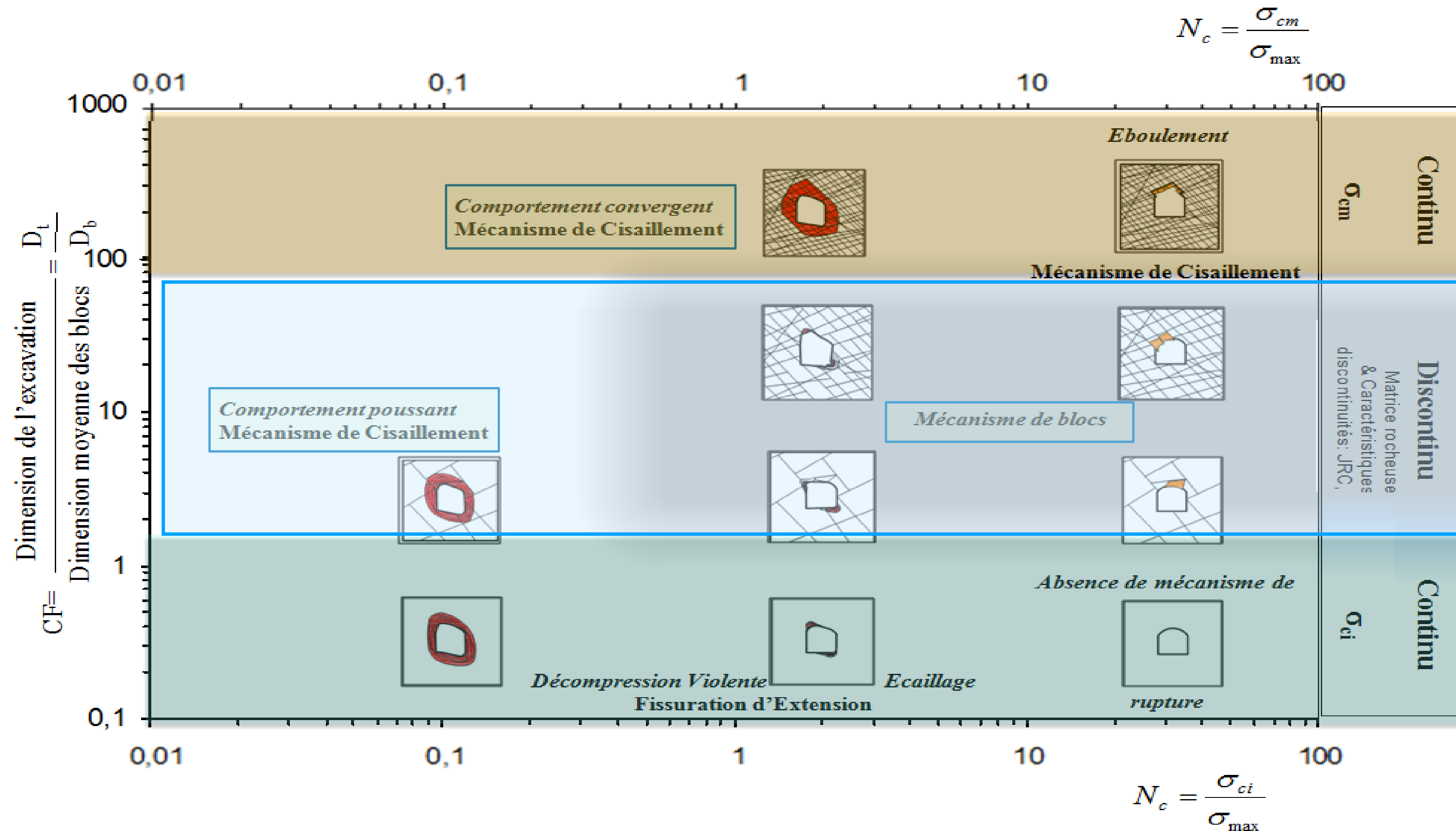
Milieu continu equivalent vs milieu explicitement discontinu



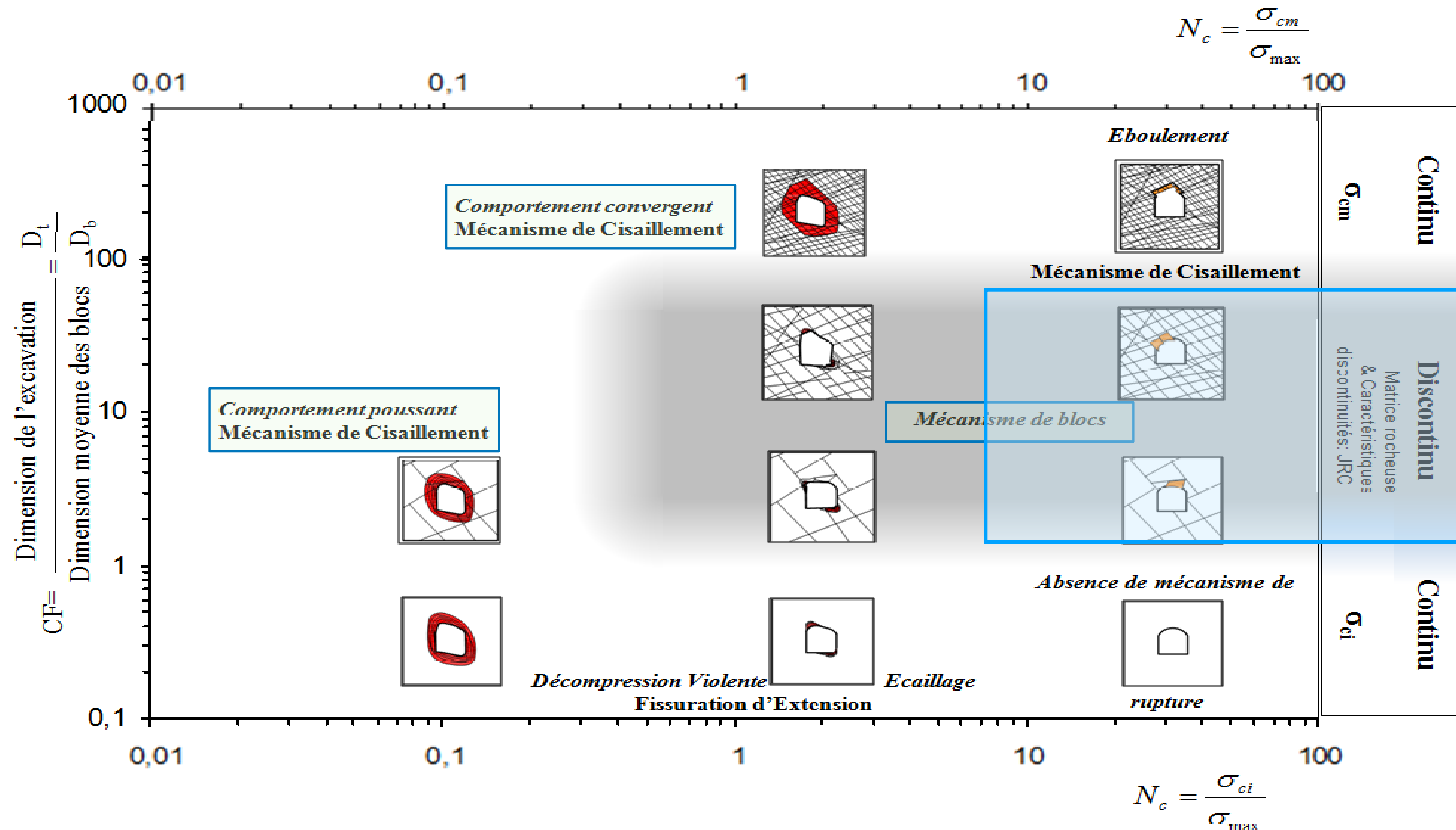
Milieu continu equivalent vs milieu explicitement discontinu



Milieu continu equivalent vs milieu explicitement discontinu

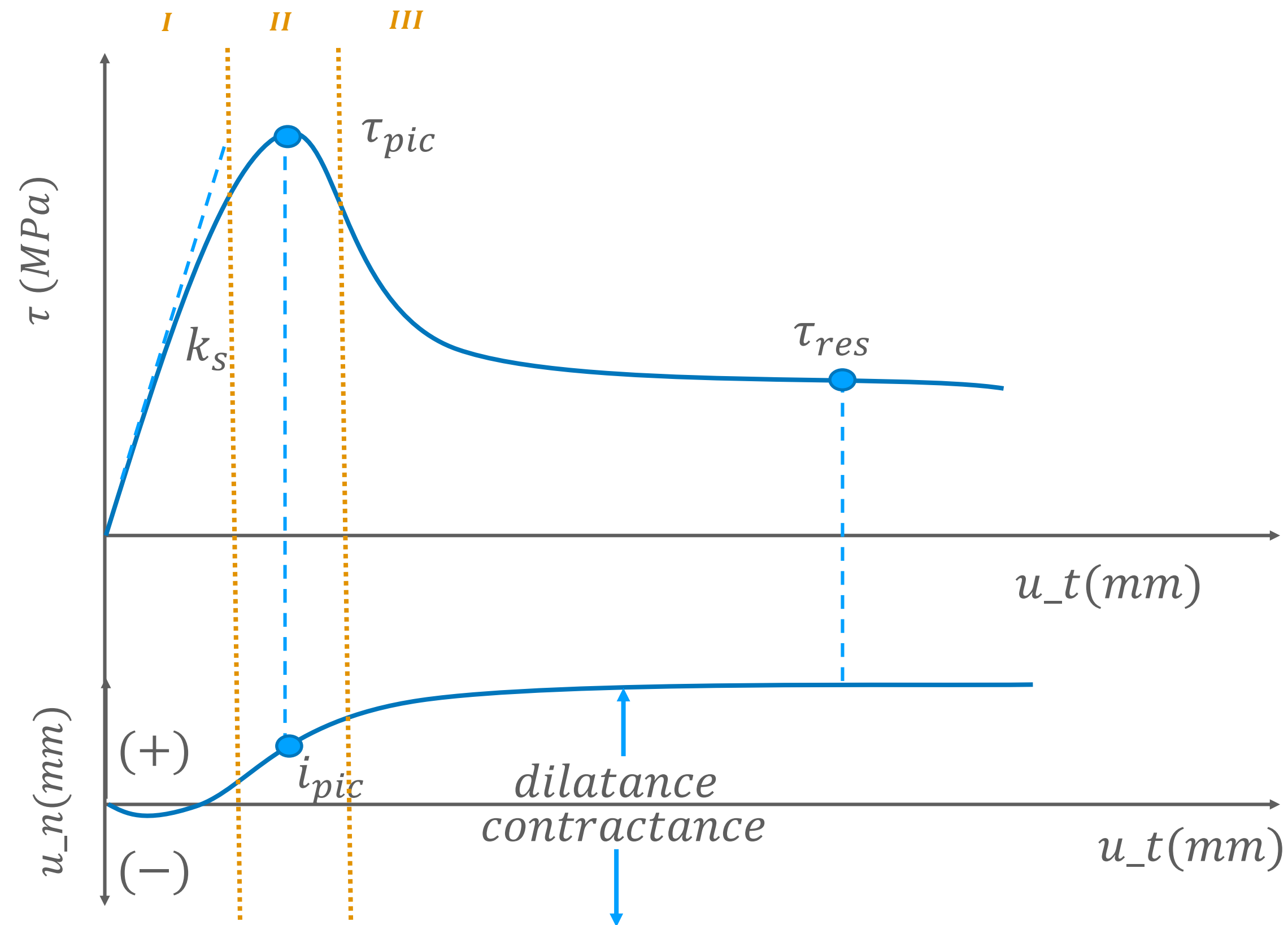


Milieu continu equivalent vs milieu explicitement discontinu



- Modélisation numérique (ex. Hoang, 2010)
- Modélisation physique (ex. Zhang et al., 2019)

Comportement mécanique des joints rocheux sous cisaillement



Morphologie



Ponts rocheux



Levy, 2006

La modélisation physique

- Une technique expérimentale
- Reproduire, à **l'échelle réduite** et à partir d'un **matériau analogue**, un ouvrage réel afin d'étudier son comportement dans son environnement naturel.
- Résultats quantitatifs \longleftrightarrow application des lois de similitude.

Modélisation physique en centrifugeuse
($g^*=n$)

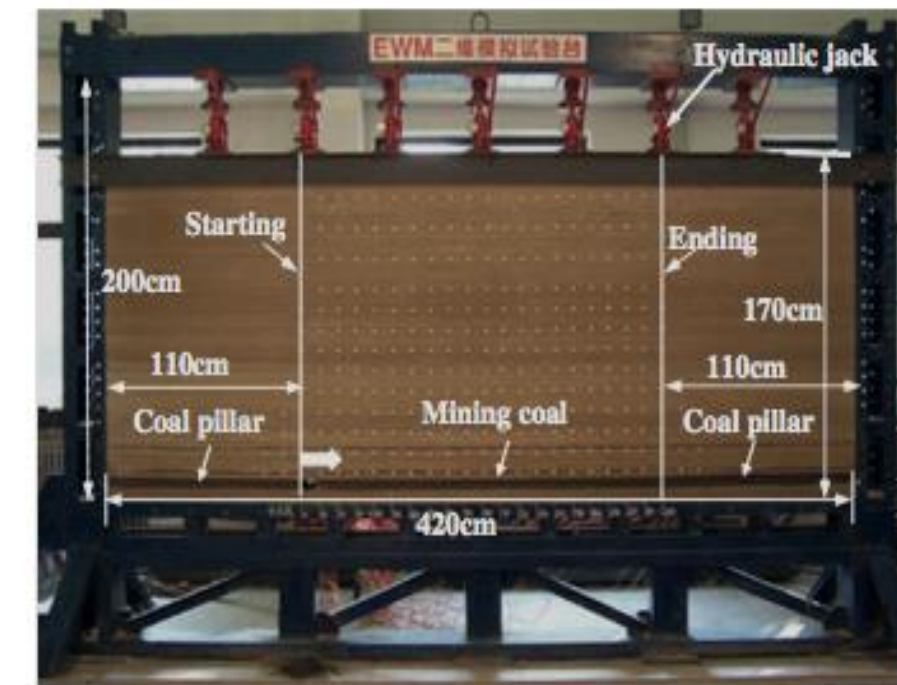


Centrifugeuse à l'IFSTTAR, Nantes

Modélisation physique sous gravité terrestre
($g^*=1$)

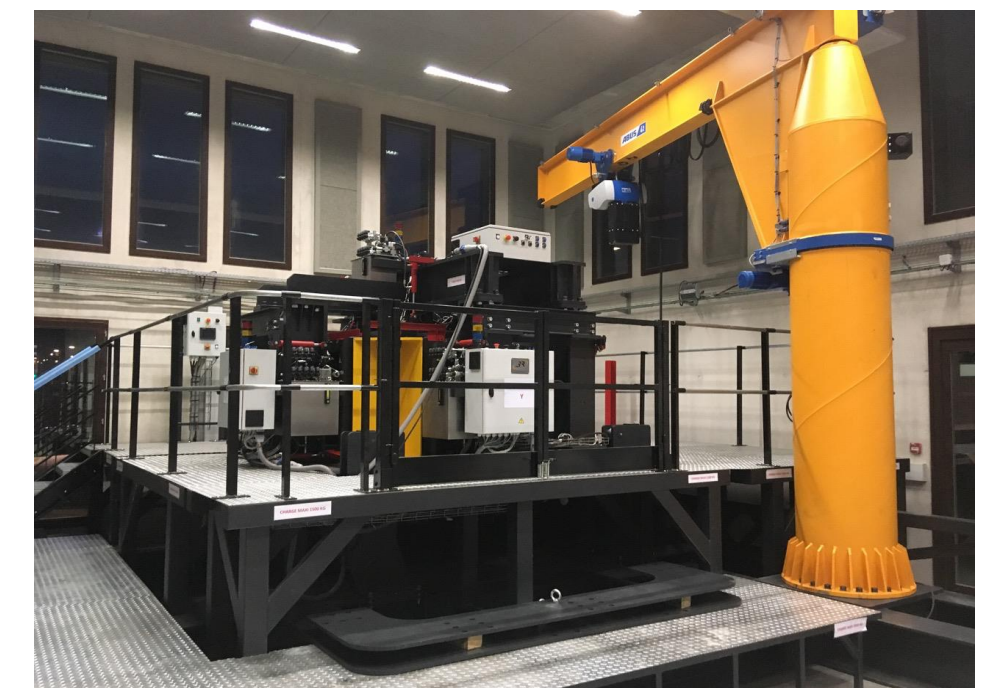


Berthoz et al., 2010



Lin et al., 2015

Dispositif DIMITRI
($g^*=1$)

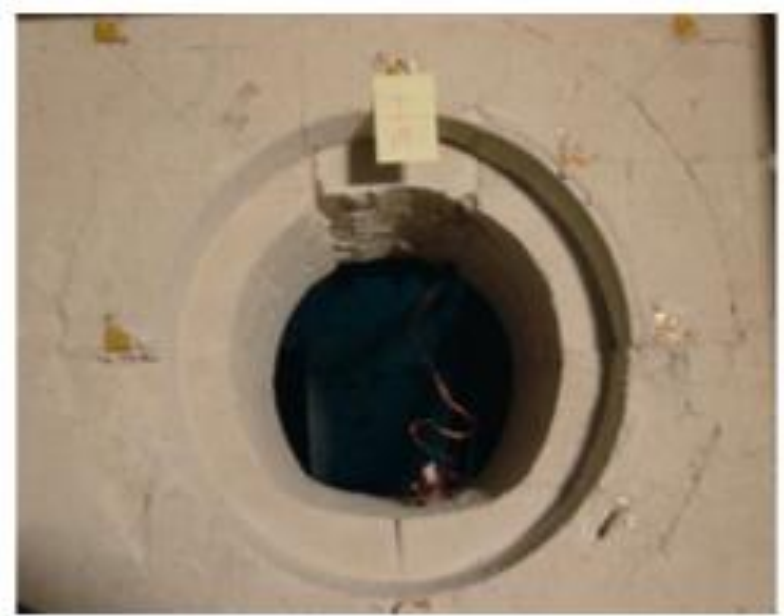


GéoRessources

Modélisation physique en mécanique des roches sous 1g

Etat de l'art

Approche continue : Méthodes d'homogénéisation



Lin et al., 2015

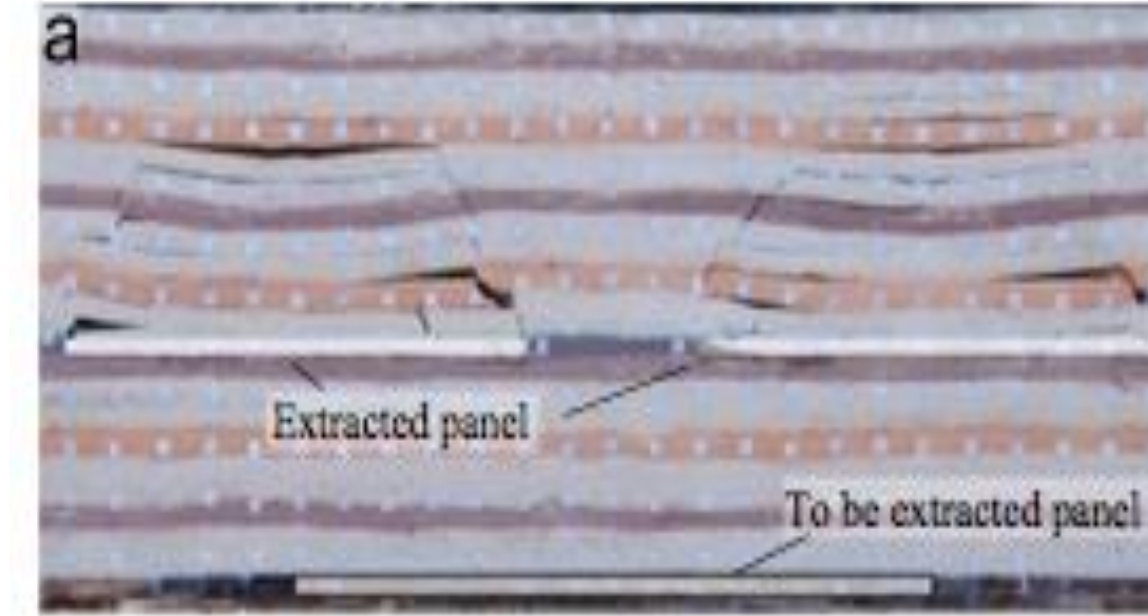


Huang et al., 2013

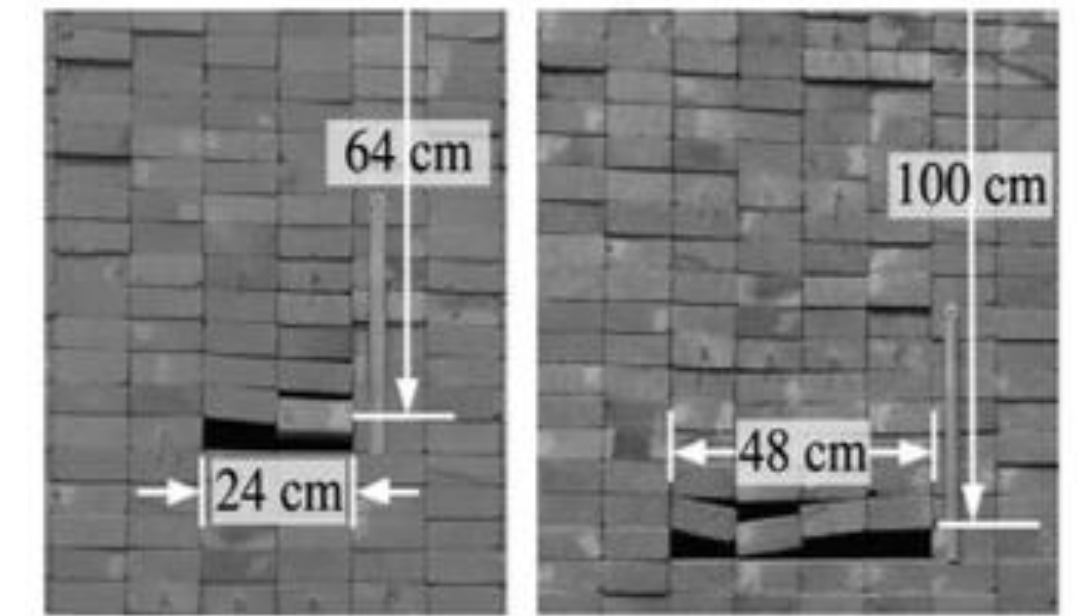
Inconvénients

- Non prise en compte explicitement des discontinuités
- Négligence des phénomènes liés aux interactions entre les fractures

Approche discontinue



Ghabraie et al., 2015



Fuenkajorn et Phuenakphum, 2010

Inconvénients

- Hypothèses de géométries simplifiées
- Pas de caractérisation mécanique des discontinuités

Utilisation de la fabrication additive

Application de l'impression 3D en mécanique des roches

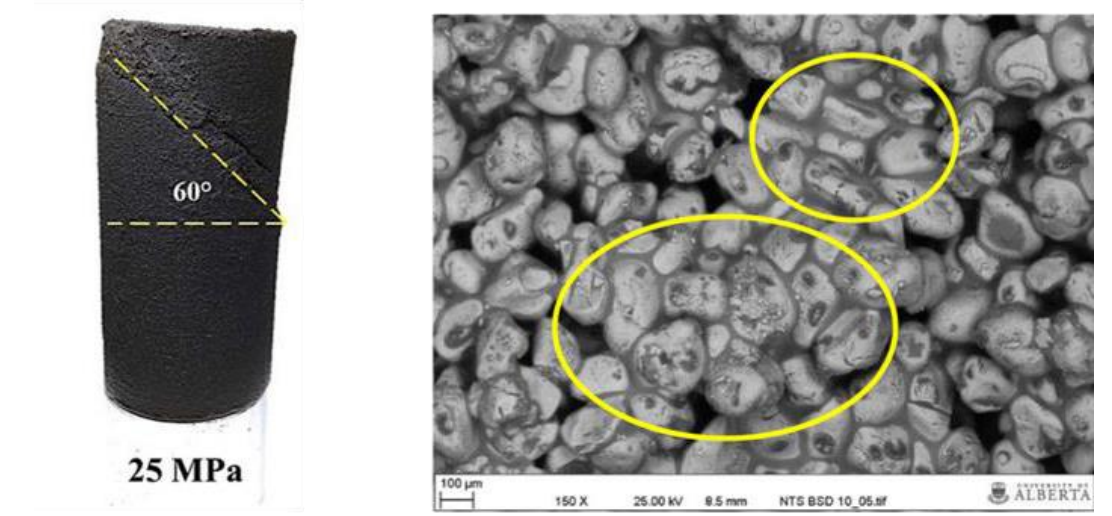
Etat de l'art

- Modèle numérique géométrique ➔ objets 3D
- Géométries complexes
- Reproductibilité
- Rapidité
- Différentes familles de matériaux

Etude de la porosité et perméabilité

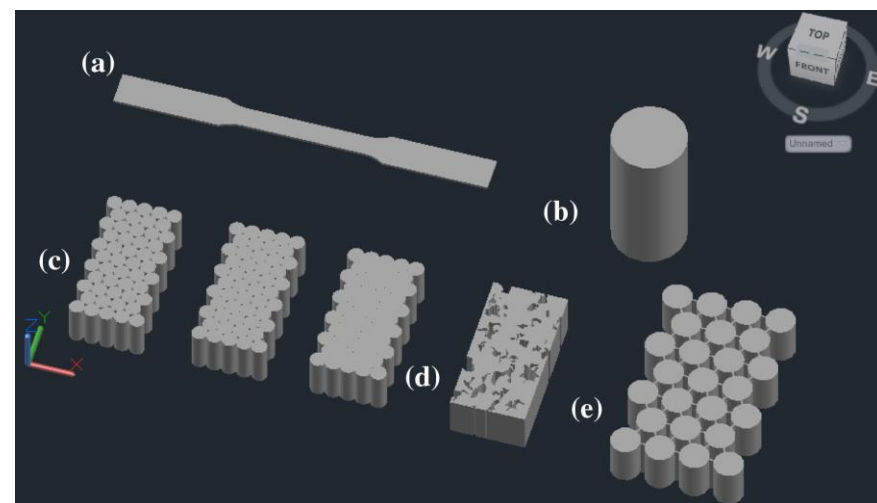


Ishutov et al., 2015



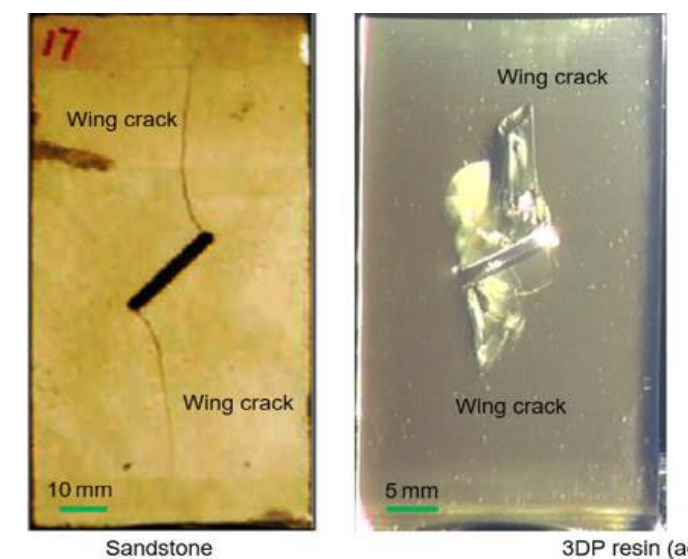
Gomez et al., 2019

Caractérisation du matériau et des paramètres d'impression



Jiang et Zhao, 2015

Etude de la propagation des fissures



Zhou et al., 2019

Distribution interne des contraintes

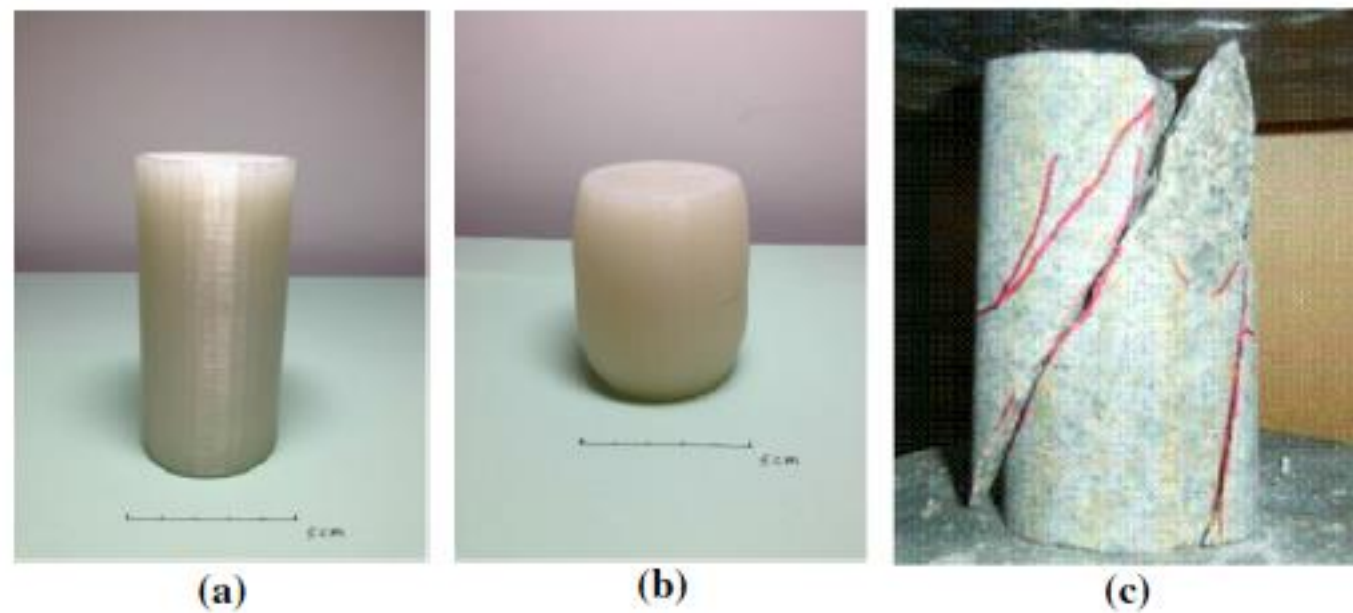


Ju et al., 2014

Application de l'impression 3D en mécanique des roches

Etat de l'art

Comportement mécanique pour les plastiques différents des géomatériaux

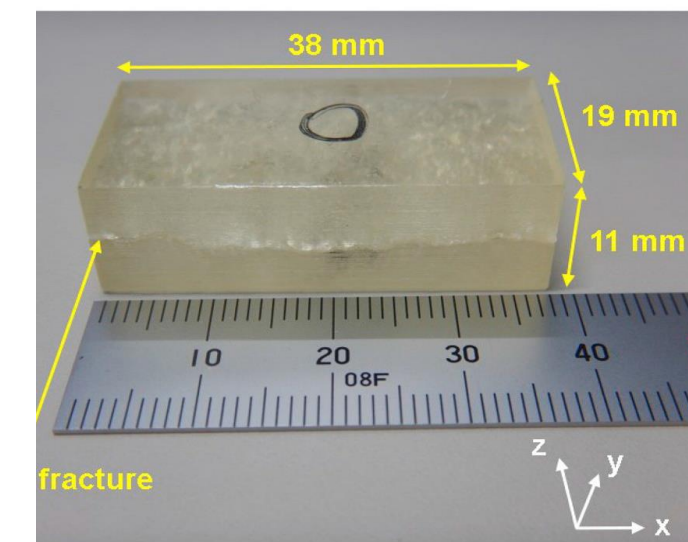


Jiang et Zhao, 2015

Peu d'intérêt accordé au comportement des joints

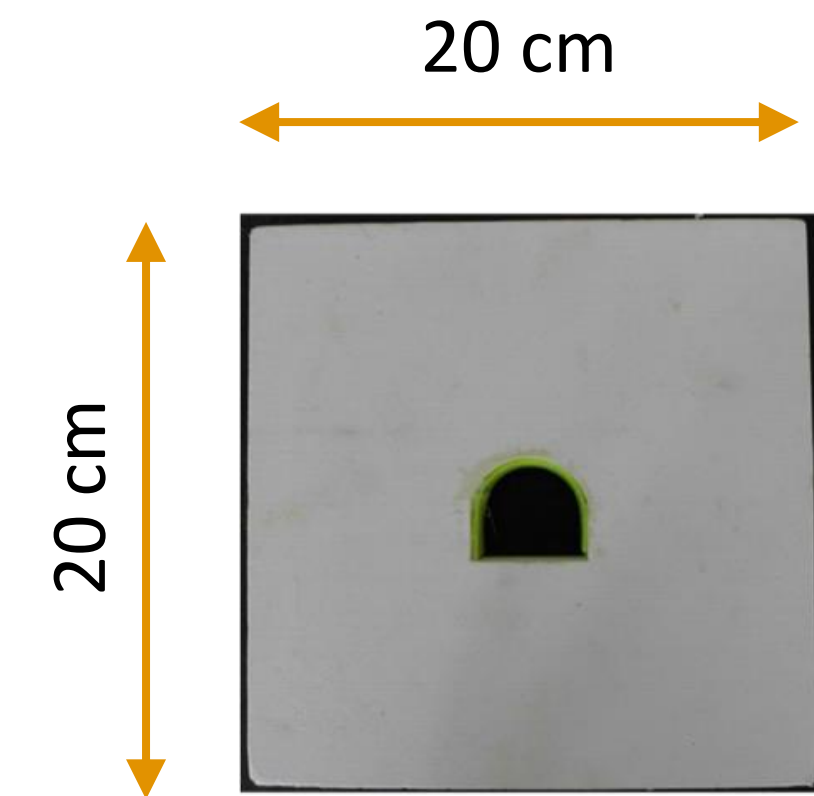


Jiang et al., 2016



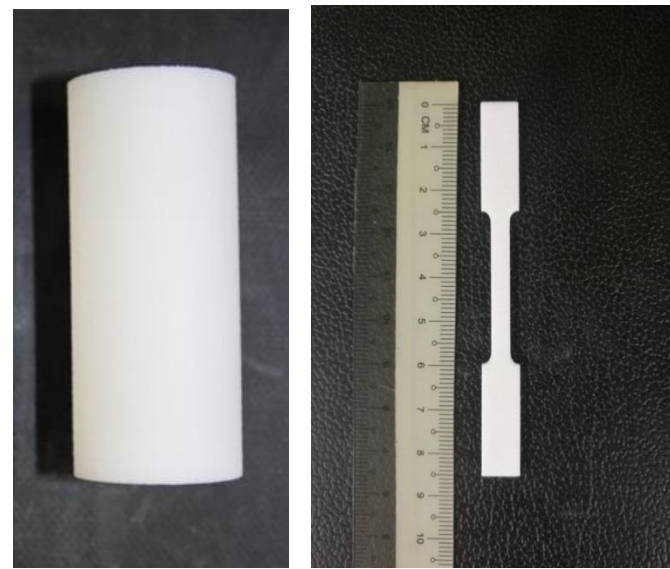
Ishibashi et al., 2020

Etudes limitées à l'échelle du laboratoire



Song et al., 2018

Comment construire par 3DP un modèle réduit en milieu rocheux explicitement discontinu, dont le comportement est piloté par les discontinuités?

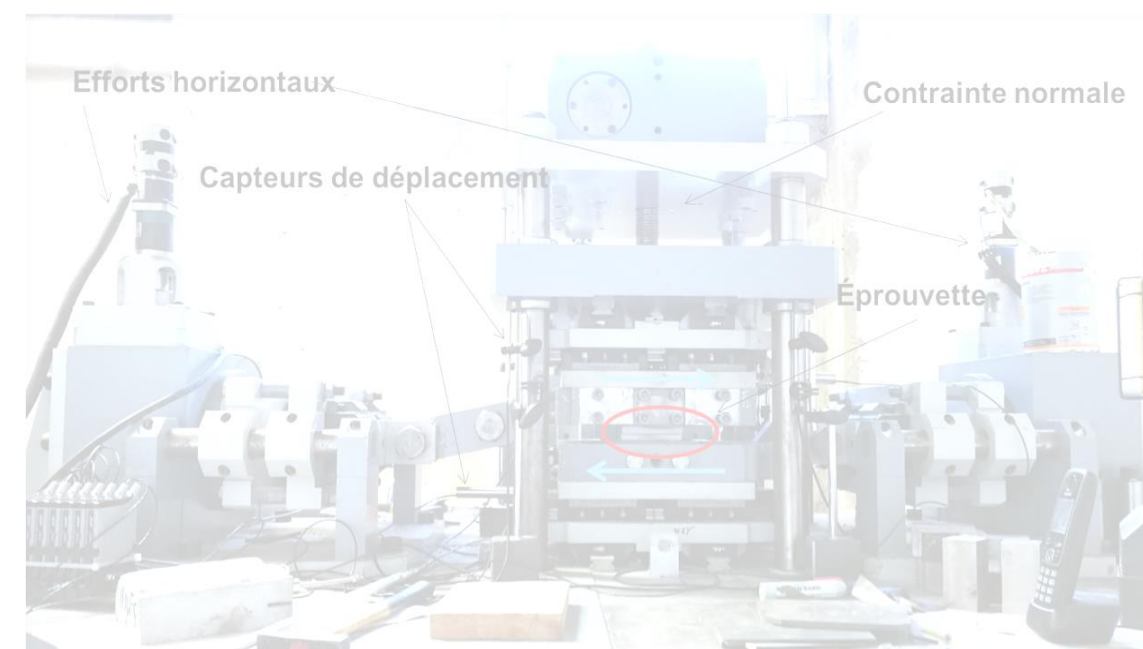


Propriétés du PA12

1

2

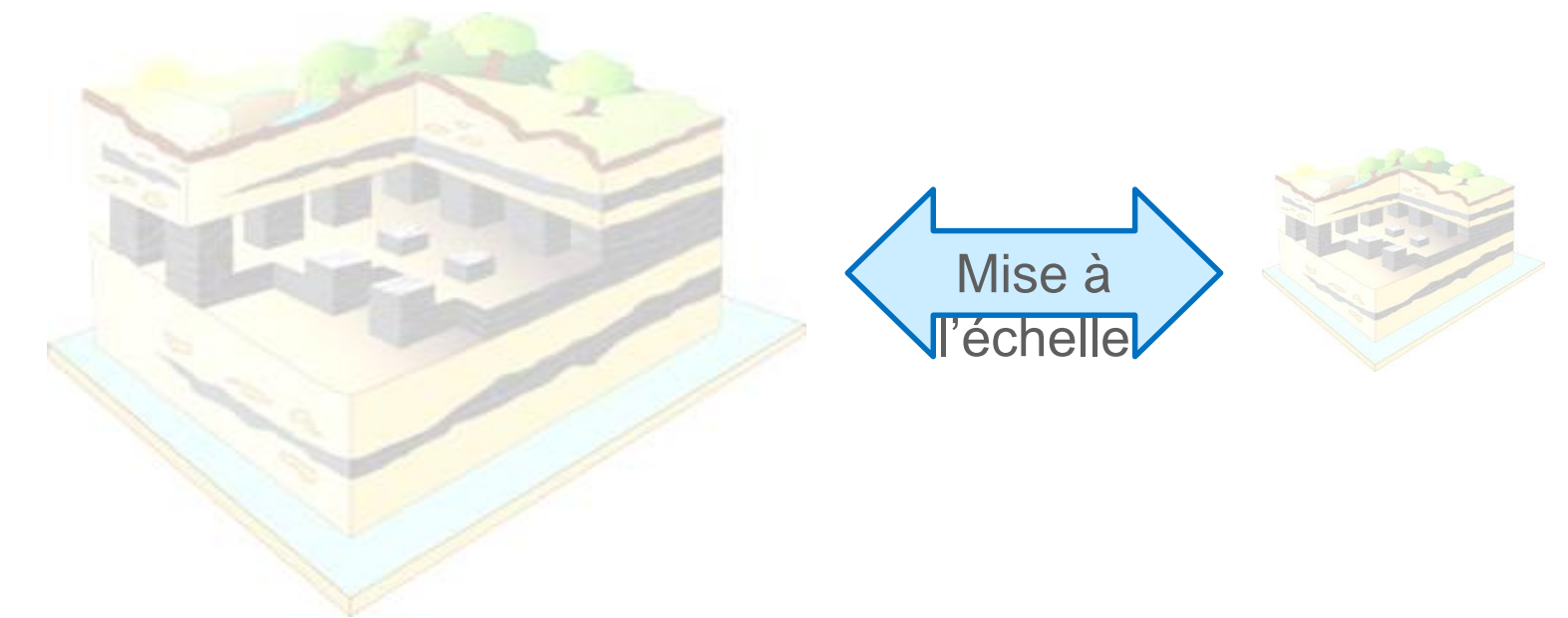
Jointes rocheux à propriétés contrôlées



Application à la modélisation physique

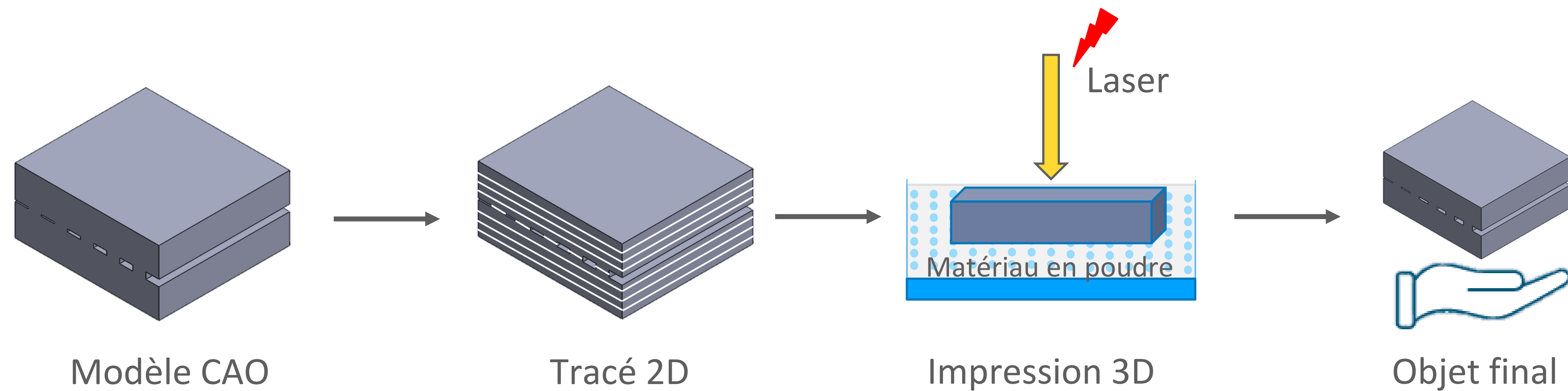
Echelle réelle

Echelle réduite $\frac{1}{n}$



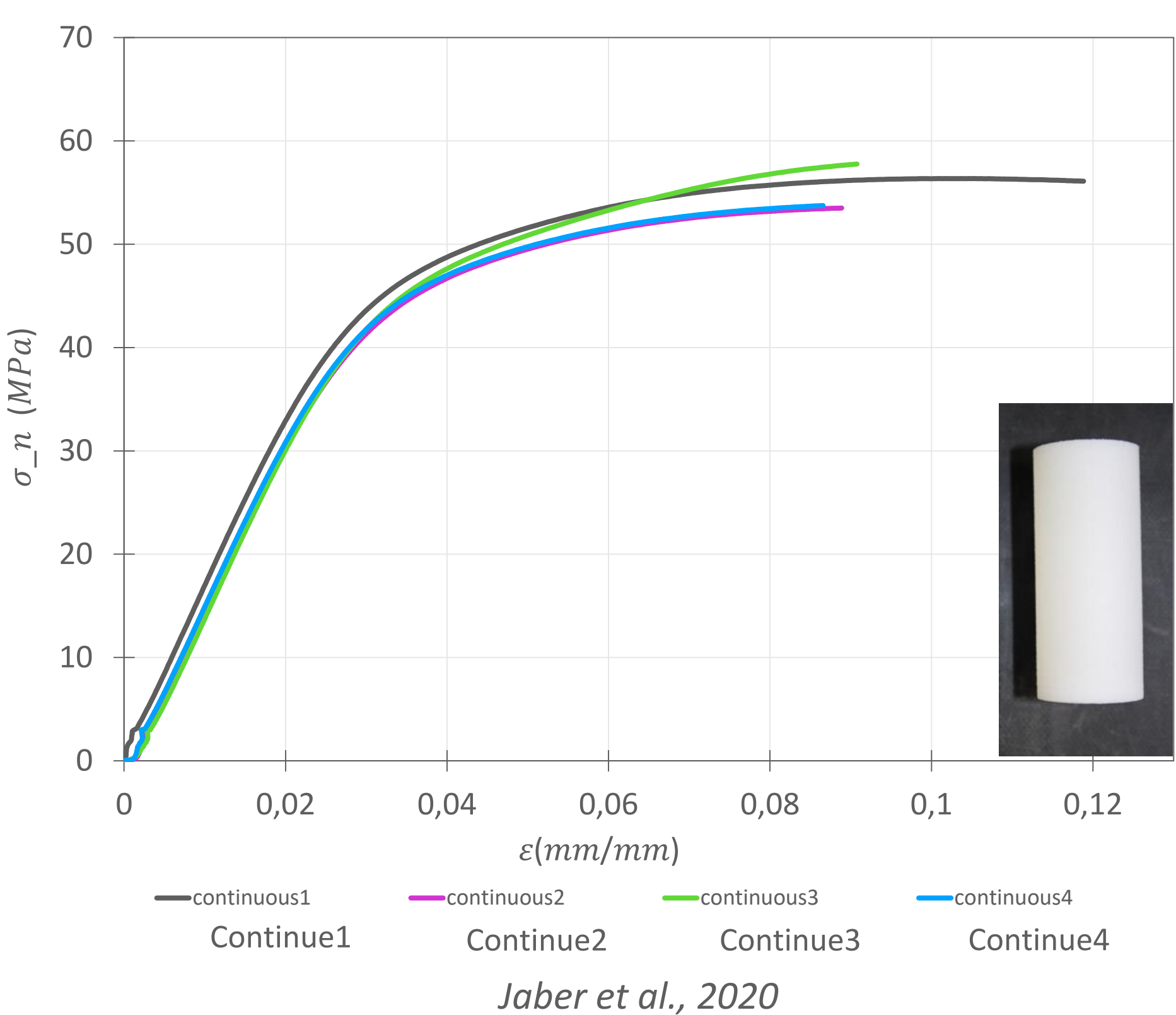
3

Impression 3D : le frittage laser SLS du Polyamide 12 (PA12)

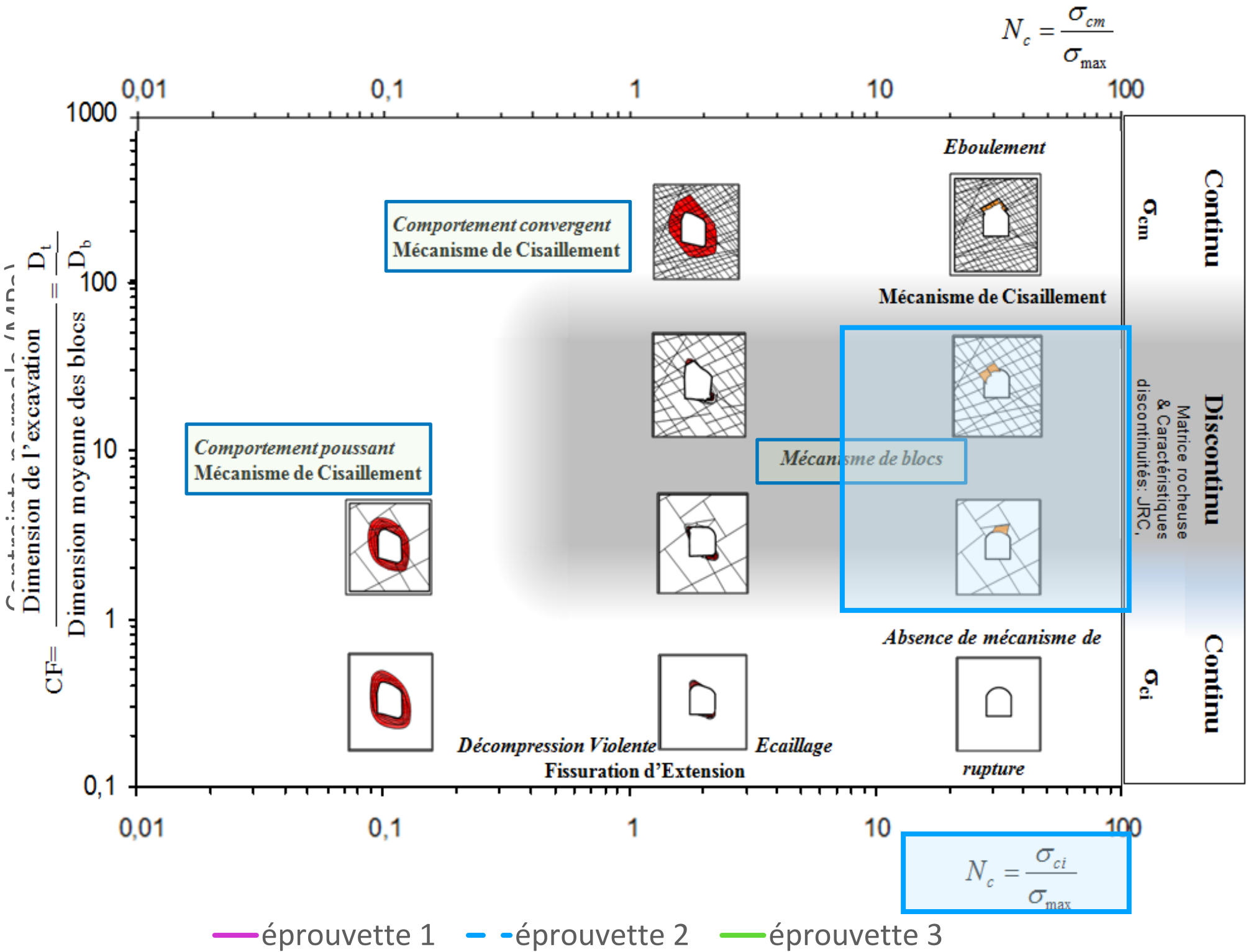


Jaber et al., 2020

Essai de compression/traction

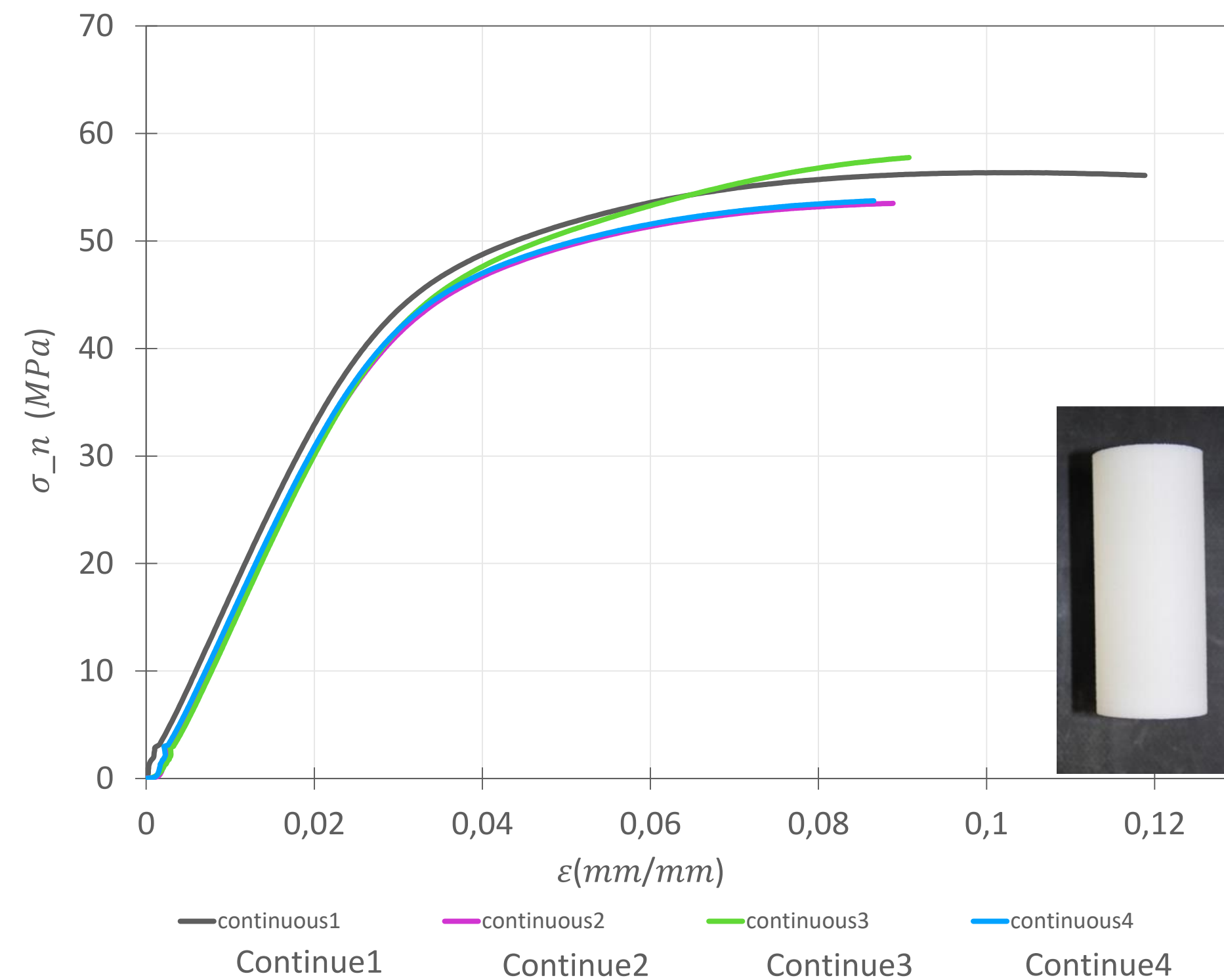


E = 1600 MPa
Limite d'élasticité = 42 MPa



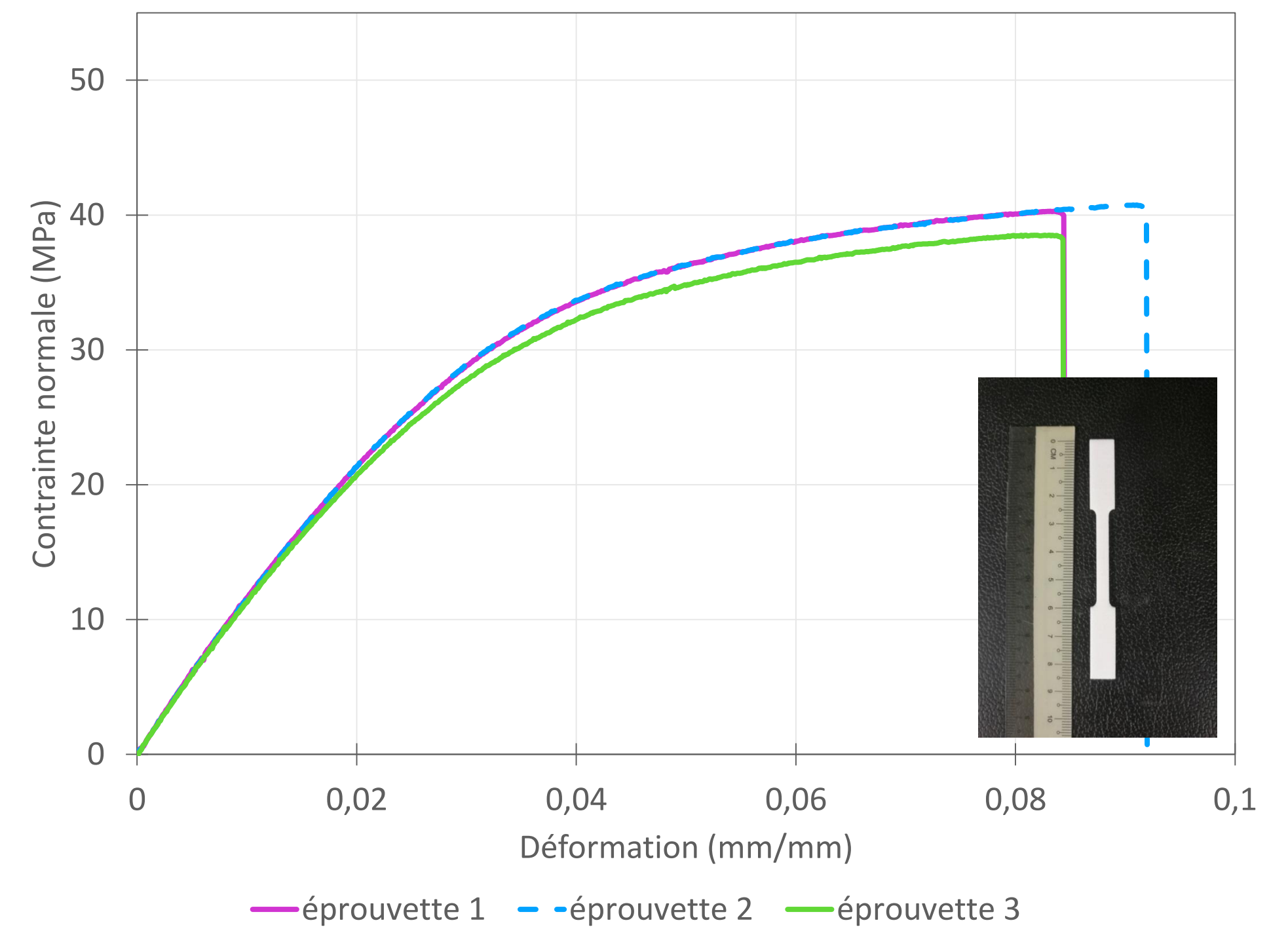
E = 1200 MPa
Limite d'élasticité = 30 MPa

Essai de compression/traction



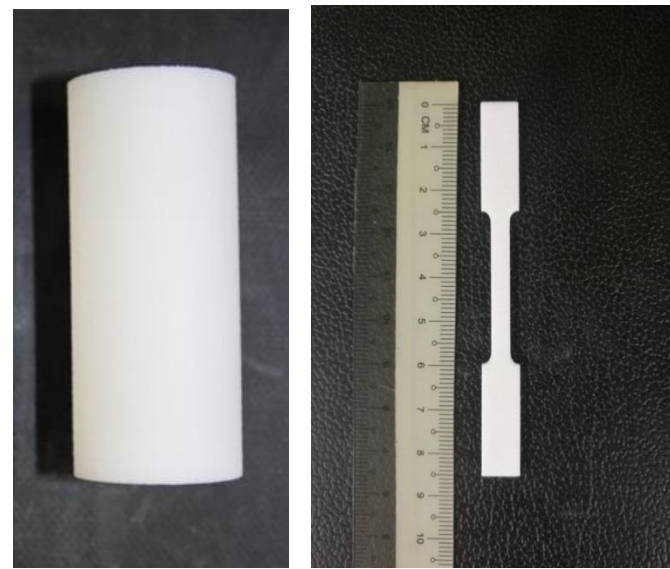
Jaber et al., 2020

E = 1600 MPa
Limite d'élasticité = 42 MPa



E = 1200 MPa
Limite d'élasticité = 30 MPa

Comment construire par 3DP un modèle réduit en milieu rocheux explicitement discontinu, dont le comportement est piloté par les discontinuités?

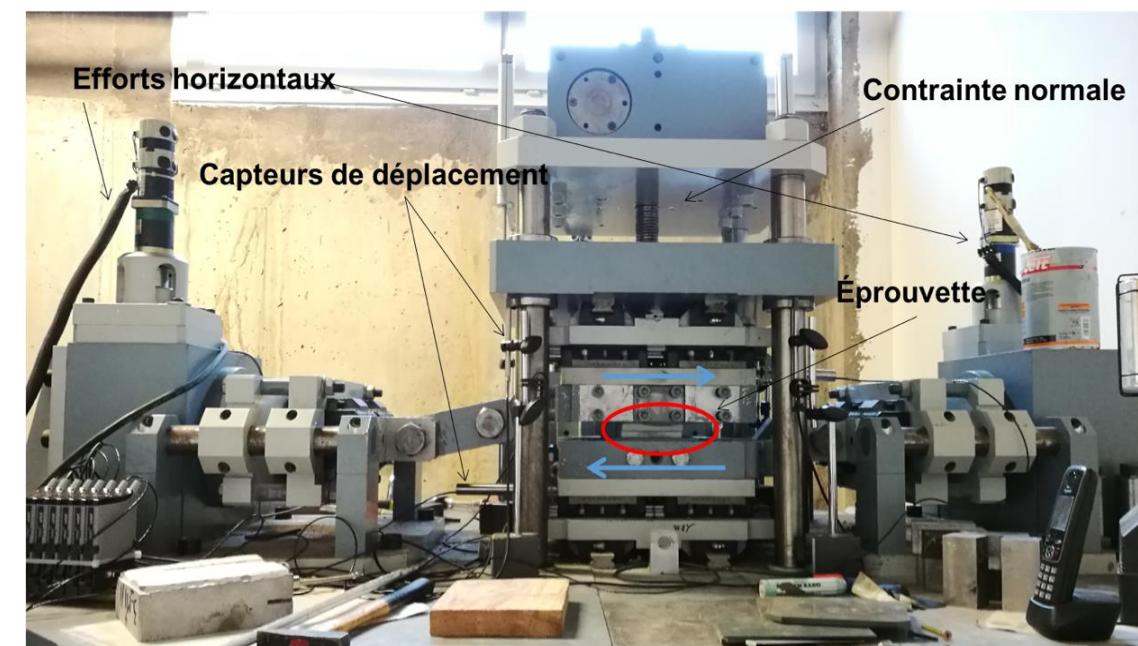


Propriétés du PA12

1

2

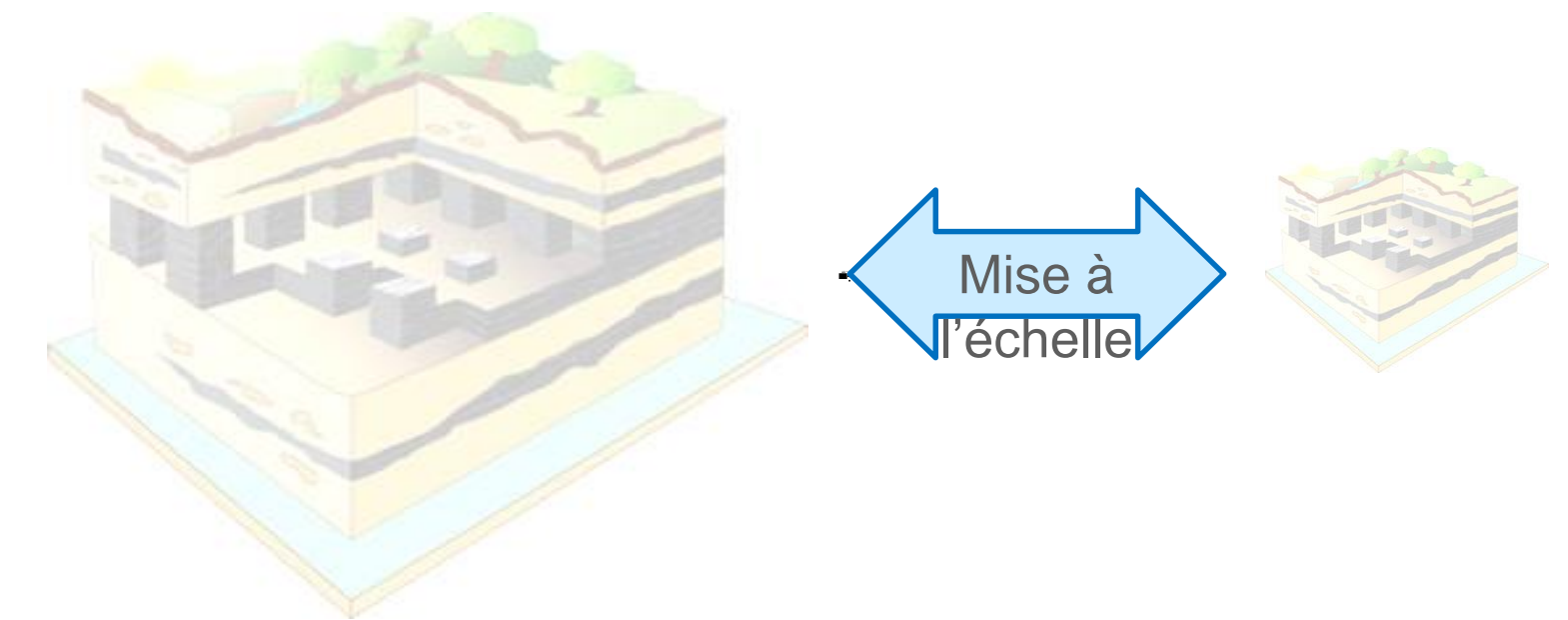
Jointes rocheuses à propriétés contrôlées



Application à la modélisation physique

Echelle réelle

Echelle réduite $\frac{1}{n}$

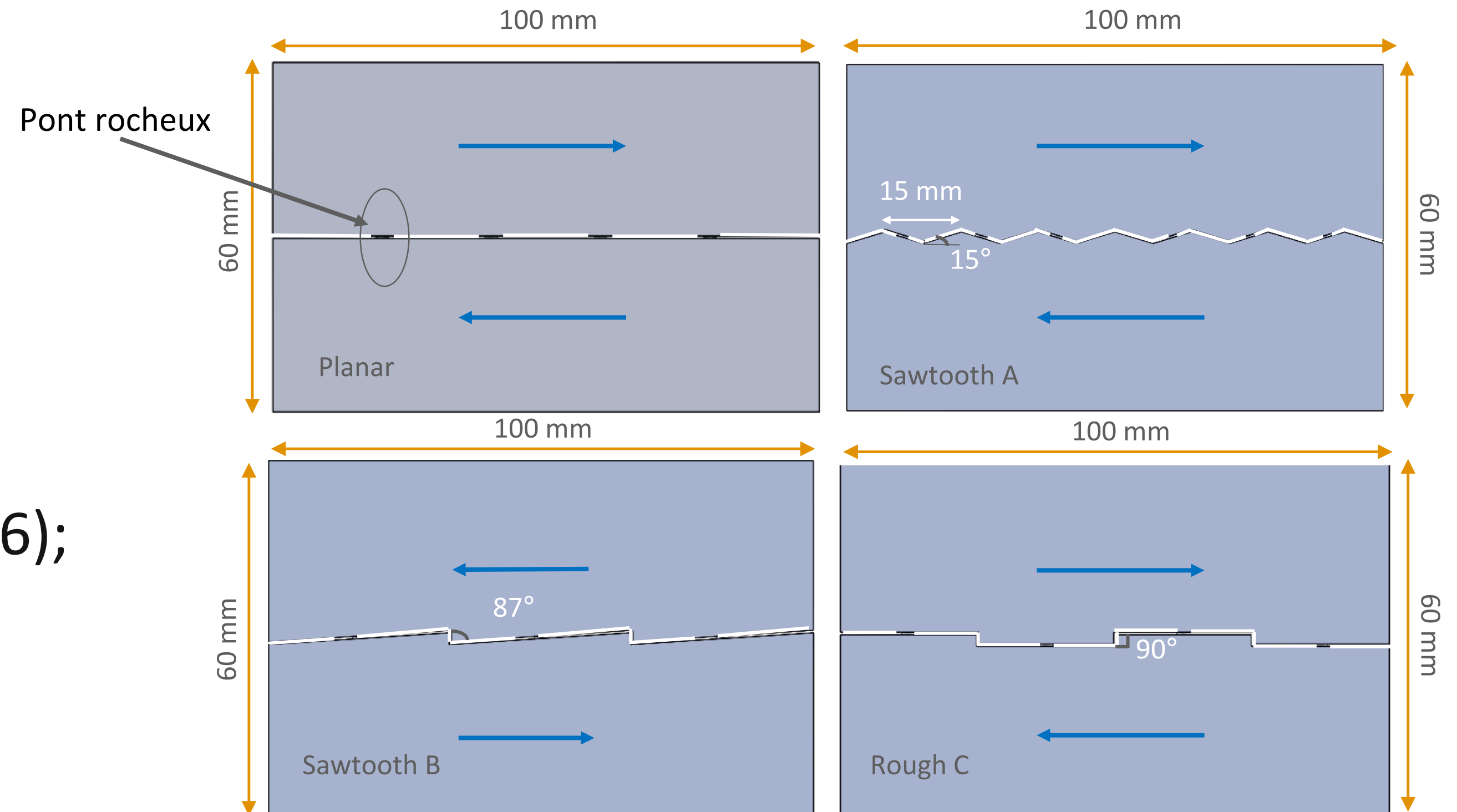


3

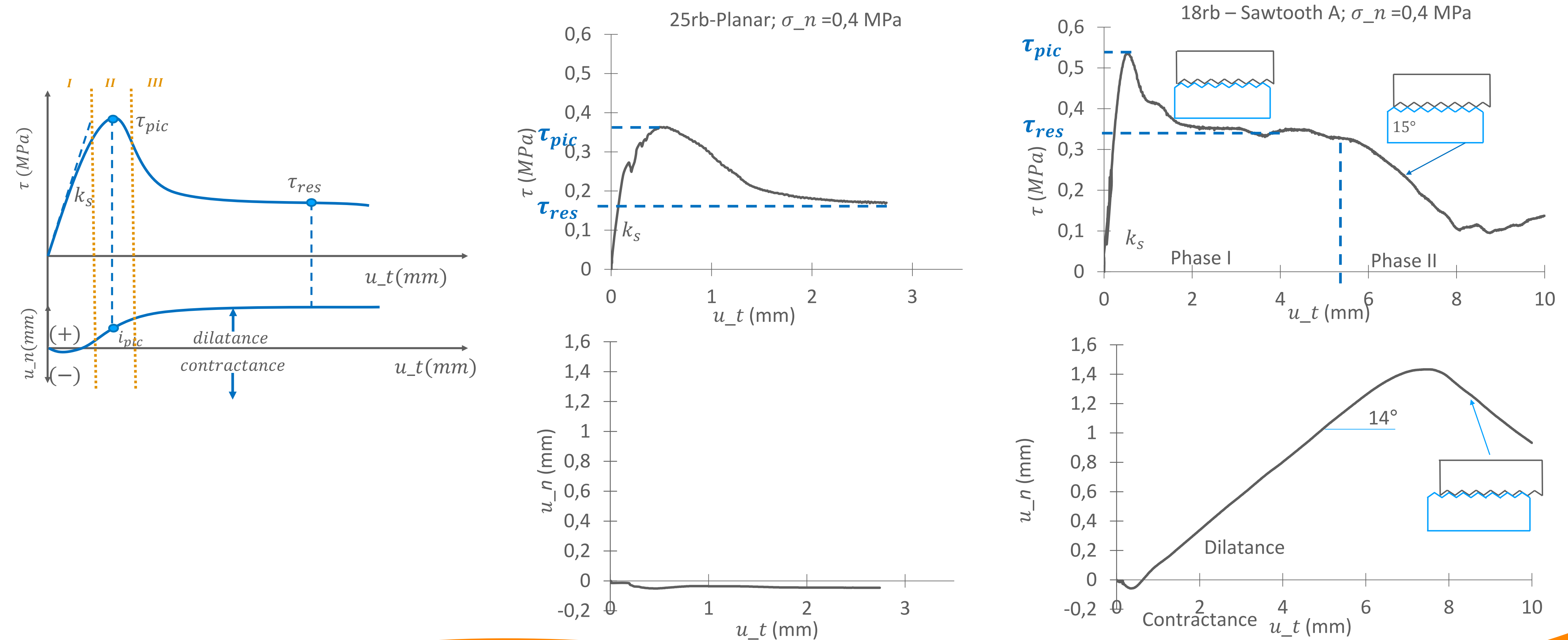
Description des joints réguliers

Les joints sont définis par :

- 1- Une ouverture fixe de 0,4 mm;
- 2- Un nombre fixe de ponts rocheux (section unitaire unique – nombre varie entre 9 et 126);
- 3- Une géométrie régulière.



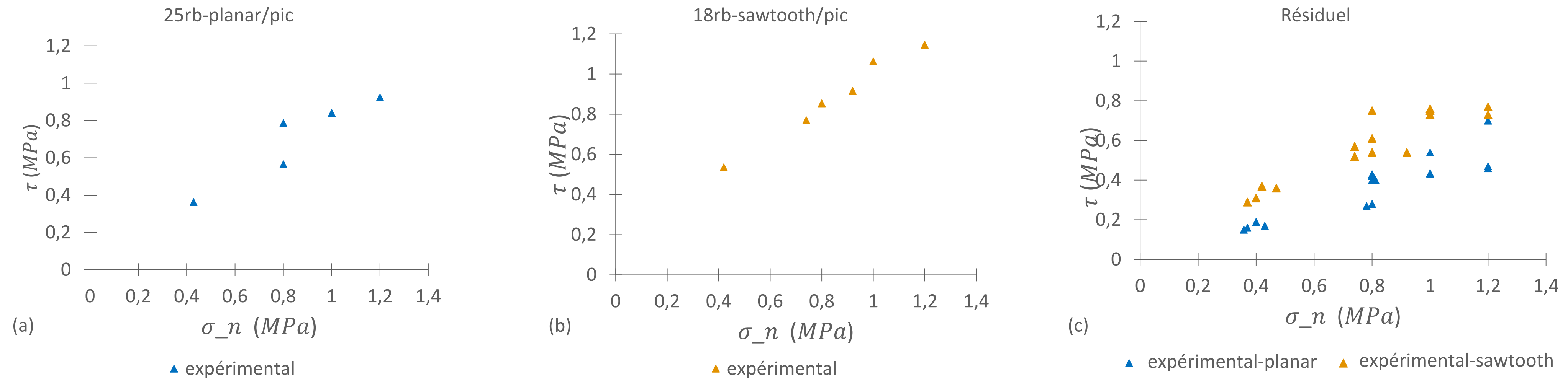
Essais de cisaillement : comportement mécanique global



Jaber et al., 2020



Critère de rupture



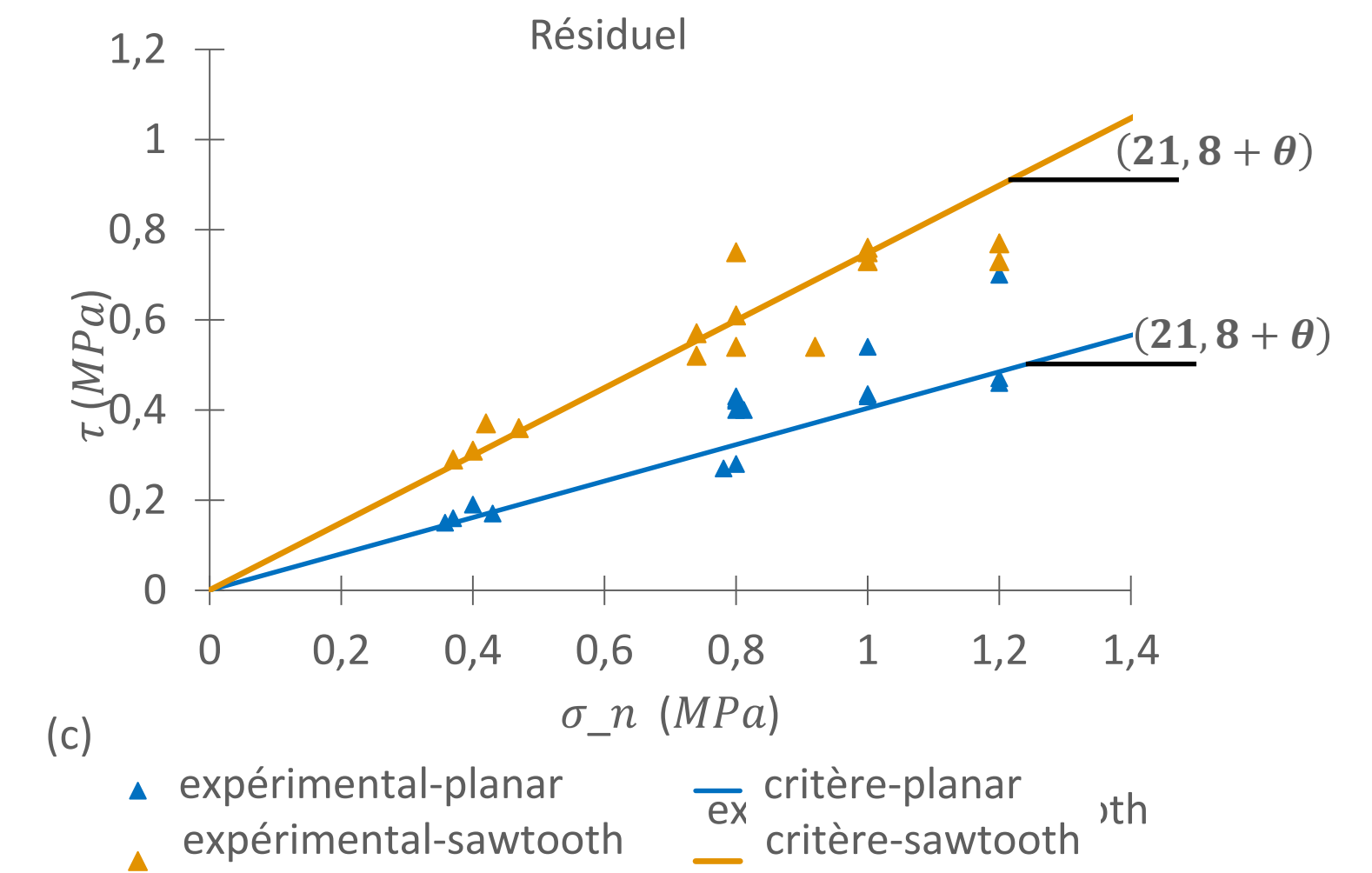
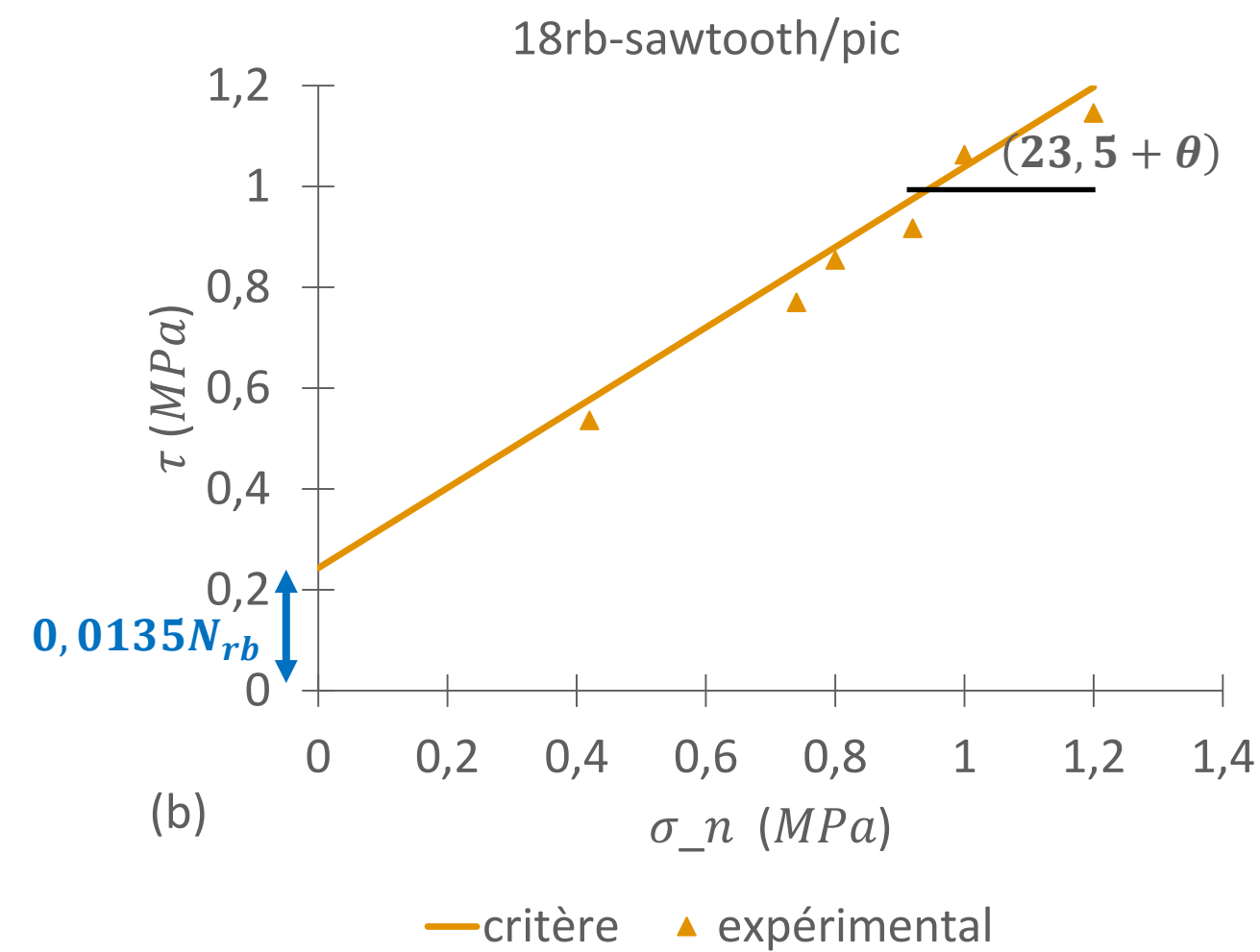
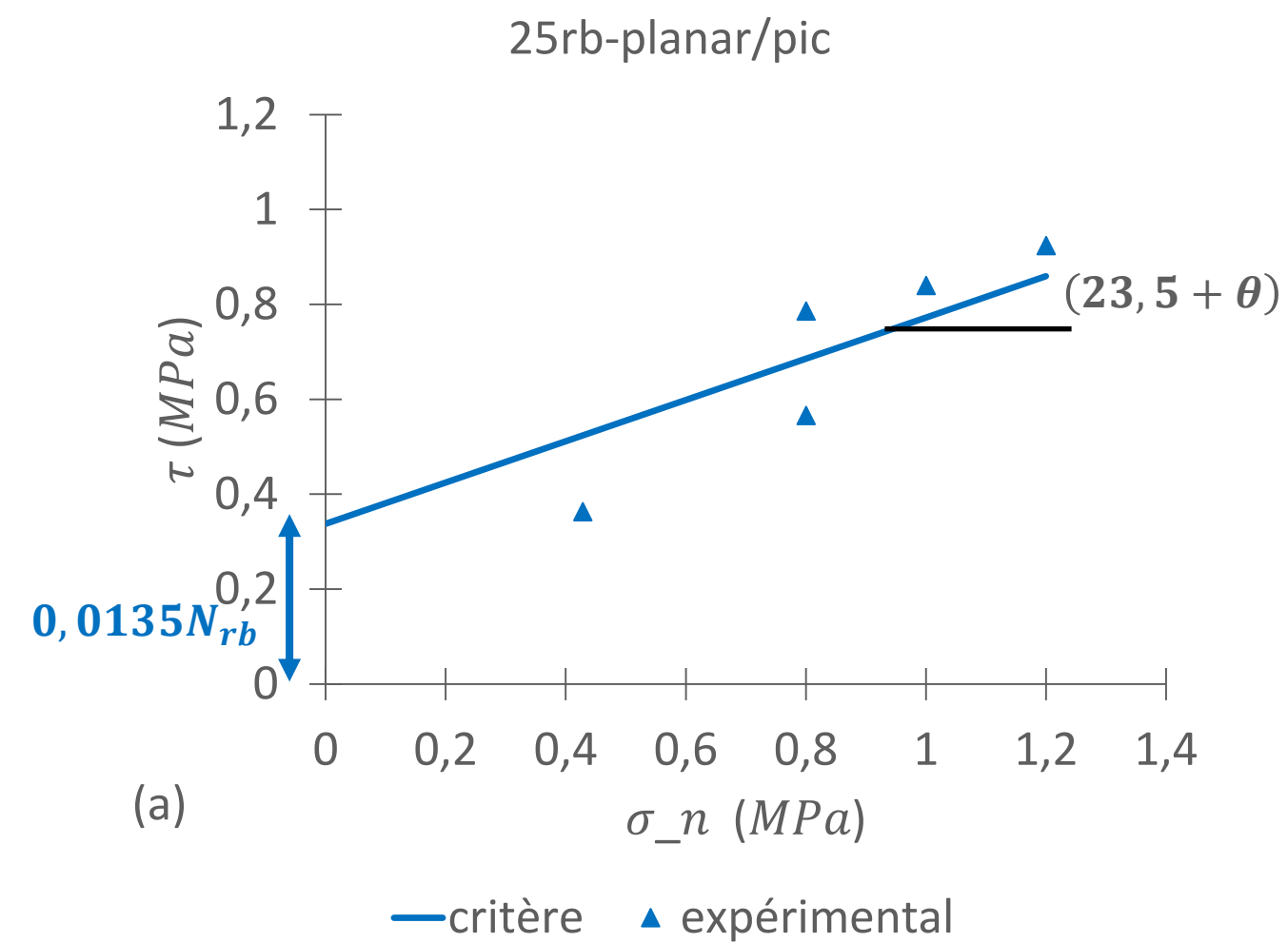
$$\tau_{pic} = \sigma_n \tan(23,5 + \theta) + 0,0135N_{rb}$$

$$avec R^2 = 0,982$$

$$\tau_{res} = \sigma_n \tan(21,8 + \theta)$$

$$avec R^2 = 0,938$$

Critère de rupture



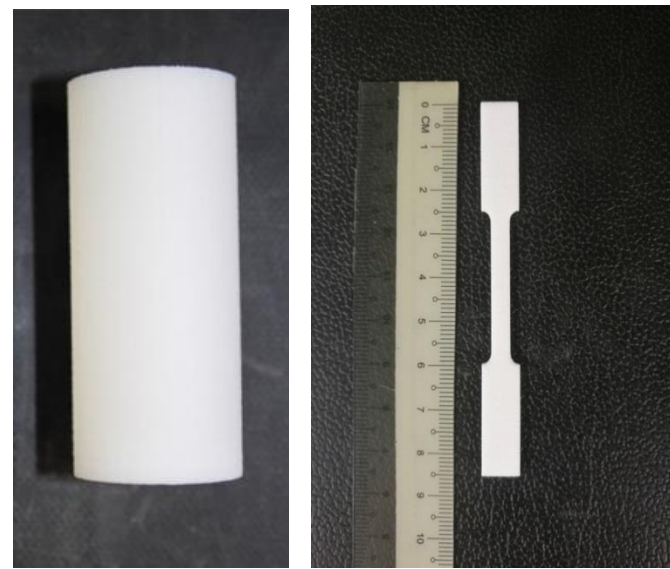
$$\tau_{pic} = \sigma_n \tan(\overbrace{23,5}^{\varphi_j} + \theta) + \overbrace{0,0135N_{rb}}^{c_j}$$

$$\tau_{res} = \sigma_n \tan(\underbrace{21,8}_{\varphi_{j,r}} + \theta)$$

$$\text{avec } R^2 = 0,982$$

$$\text{avec } R^2 = 0,938$$

Comment construire par 3DP un modèle réduit en milieu rocheux explicitement discontinu, dont le comportement est piloté par les discontinuités?

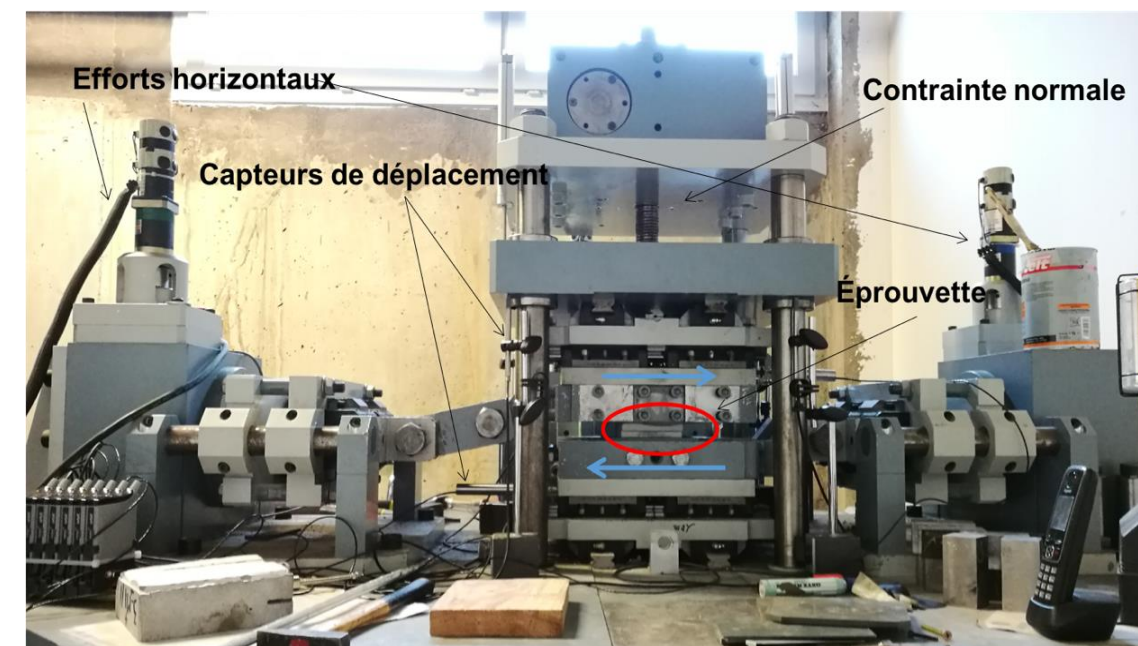


Propriétés du PA12

1

2

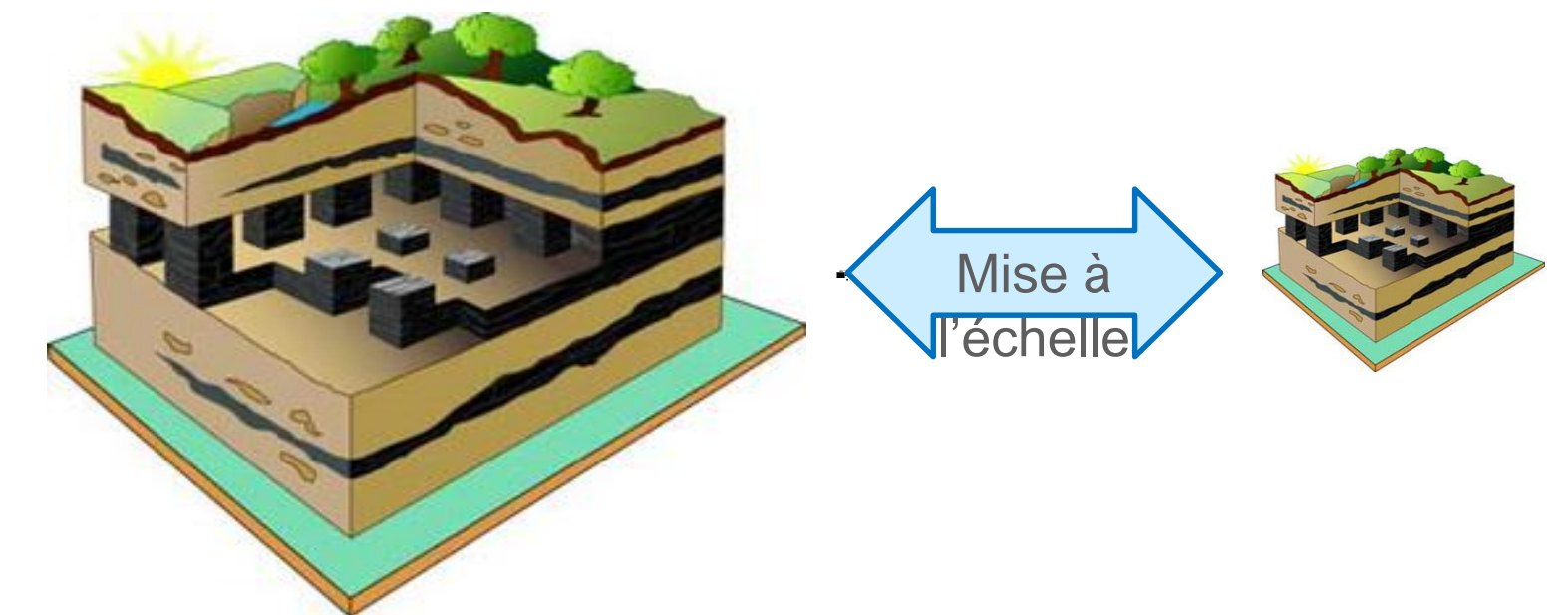
Jointes rocheuses à propriétés contrôlées



Application à la modélisation physique

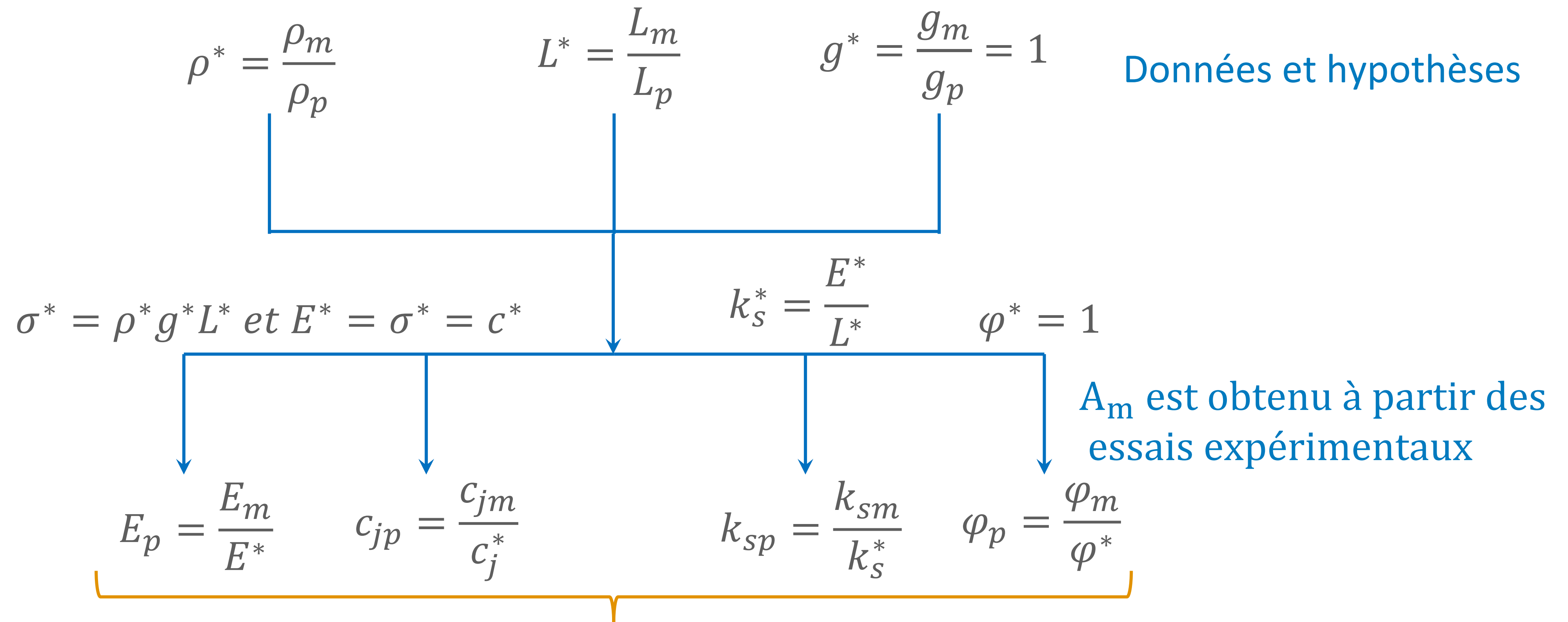
Echelle réelle

Echelle réduite $\frac{1}{n}$



3

Le PA12 fabriqué par SLS est-il applicable à la modélisation physique des roches?



A_p est comparé aux valeurs des propriétés des roches réelles

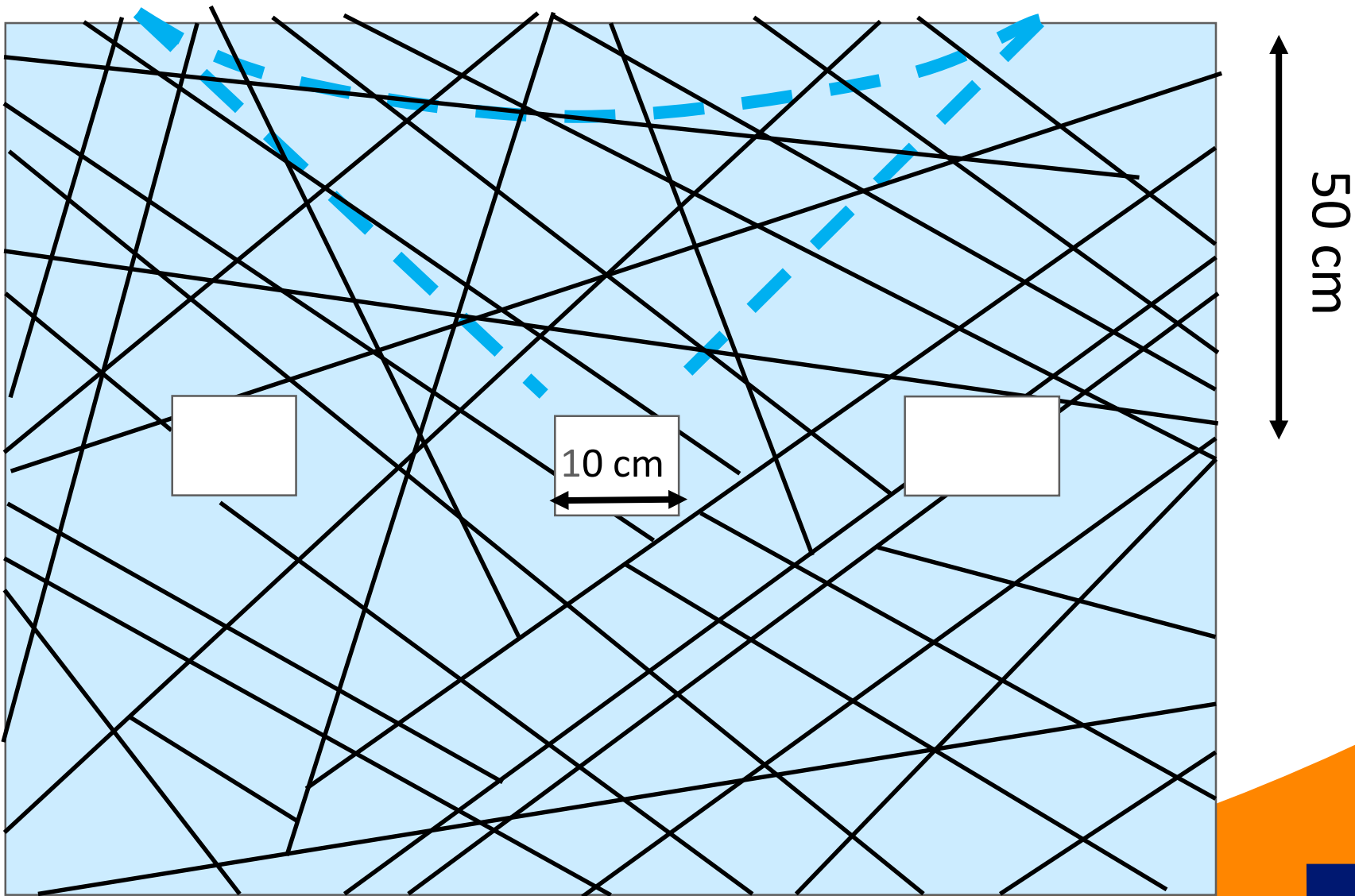
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

a) Etude d'un affaissement lié à une excavation située à 12,5 m de profondeur :

$$L^*=1/25 - g^*=1 - 0,3 \leq \rho^* \leq 0,5$$

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|----------------------------|-----------------------|--|
| E [GPa] | $0,012 \leq E^* \leq 0,02$ | 1,60 | $80 \leq E_p \leq 133$ |
| c_j [MPa] | $0,012 \leq c^* \leq 0,02$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 164,17$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$ | 0,7-5,6 | $1,4 \leq k_s \leq 18,7$ |



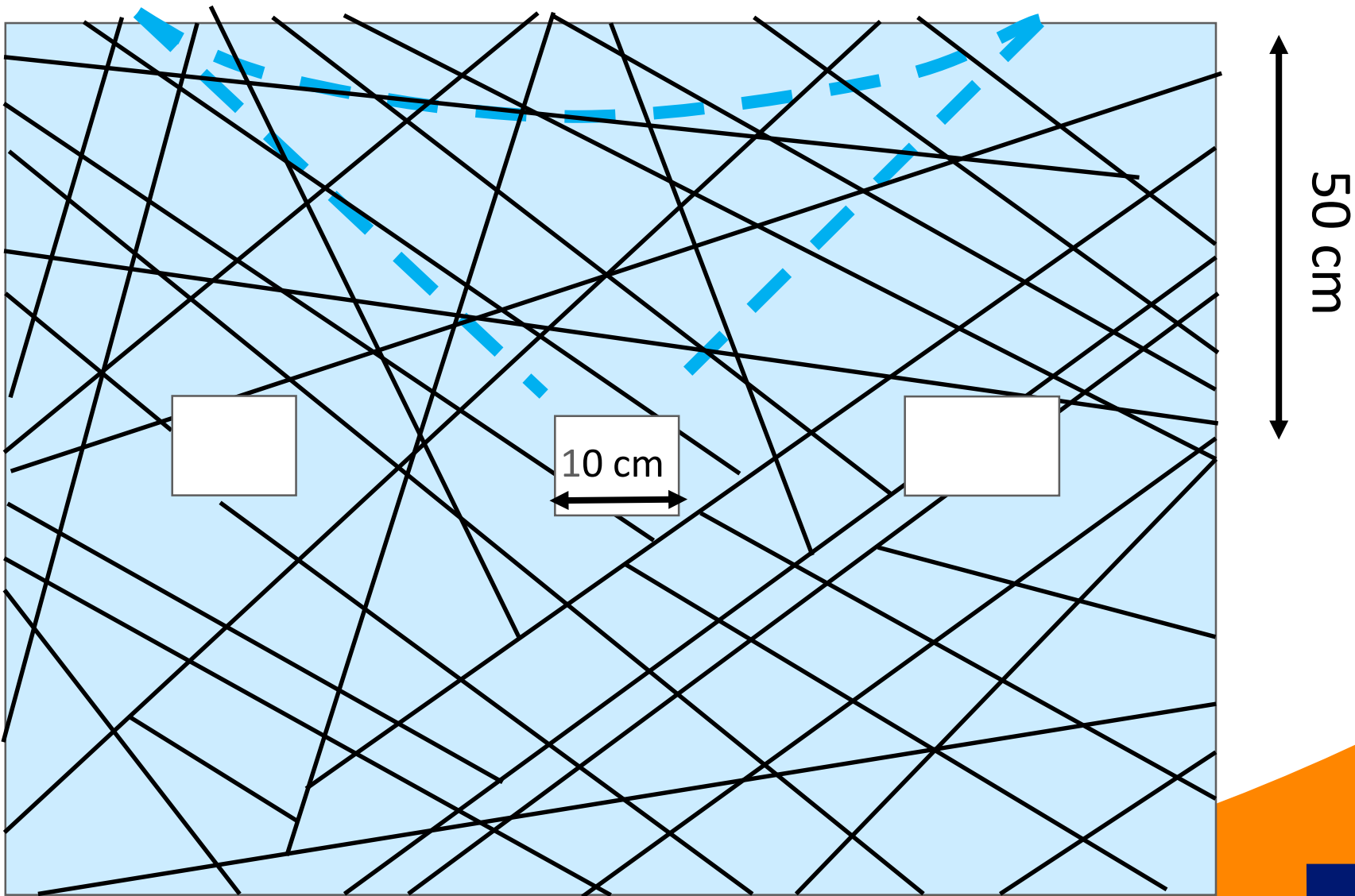
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

a) Etude d'un affaissement lié à une excavation située à 12,5 m de profondeur :

$$L^*=1/25 - g^*=1 - 0,3 \leq \rho^* \leq 0,5$$

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|---|
| E [GPa] | $0,012 \leq E^* \leq 0,02$ | 1,60 | $80 \leq E_p \leq 133$ |
| c_j [MPa] | $0,012 \leq c^* \leq 0,02$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 164,17$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$ | 0,7-5,6 | $1,4 \leq k_s \leq 18,7$ |



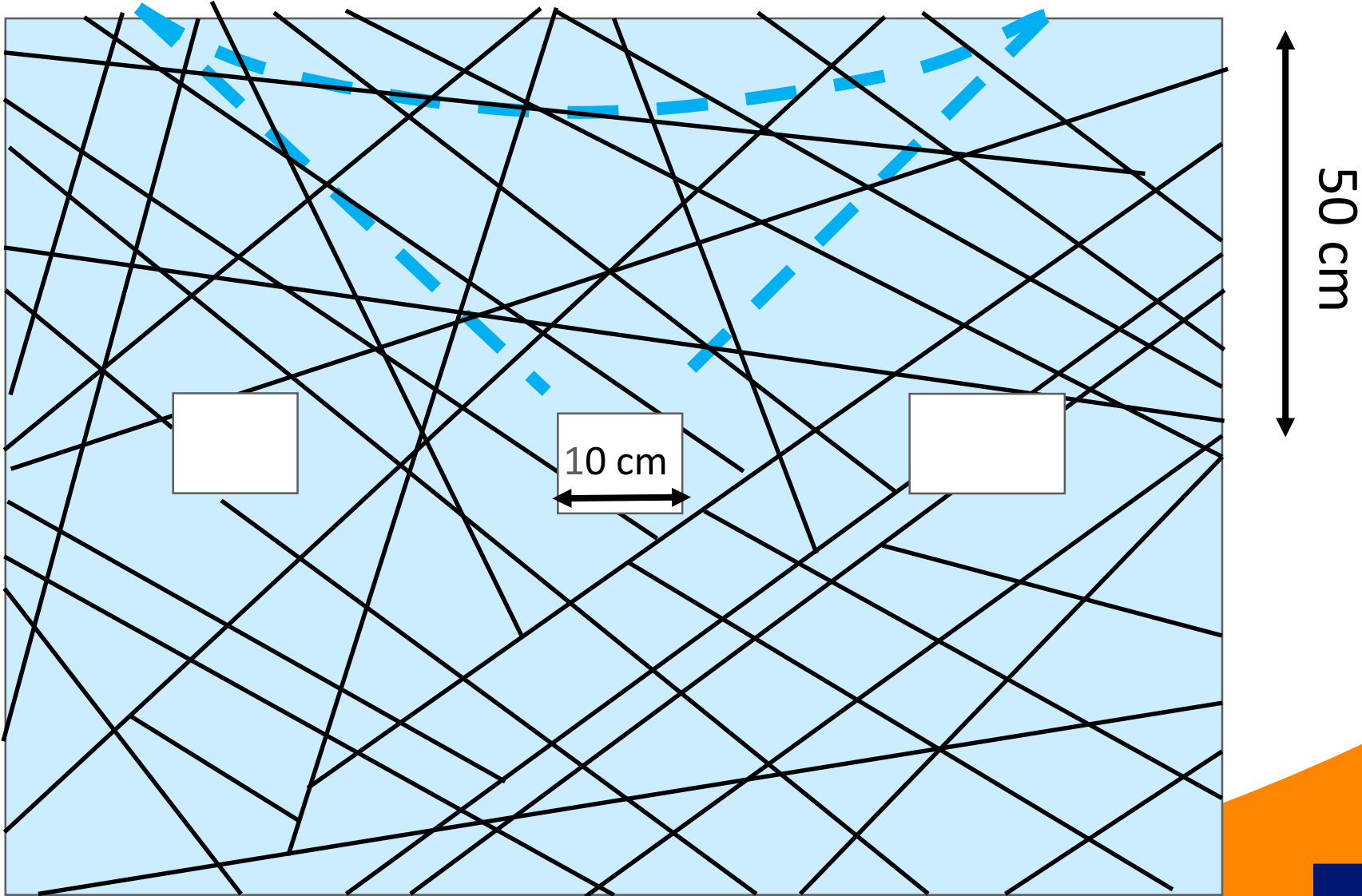
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

a) Etude d'un affaissement lié à une excavation située à 12,5 m de profondeur :

$$L^*=1/25 - g^*=1 - 0,3 \leq \rho^* \leq 0,5$$

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|---|
| E [GPa] | $0,012 \leq E^* \leq 0,02$ | 1,60 | $80 \leq E_p \leq 133$ |
| c_j [MPa] | $0,012 \leq c^* \leq 0,02$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 164,17$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$ | 0,7-5,6 | $1,4 \leq k_s \leq 18,7$ |



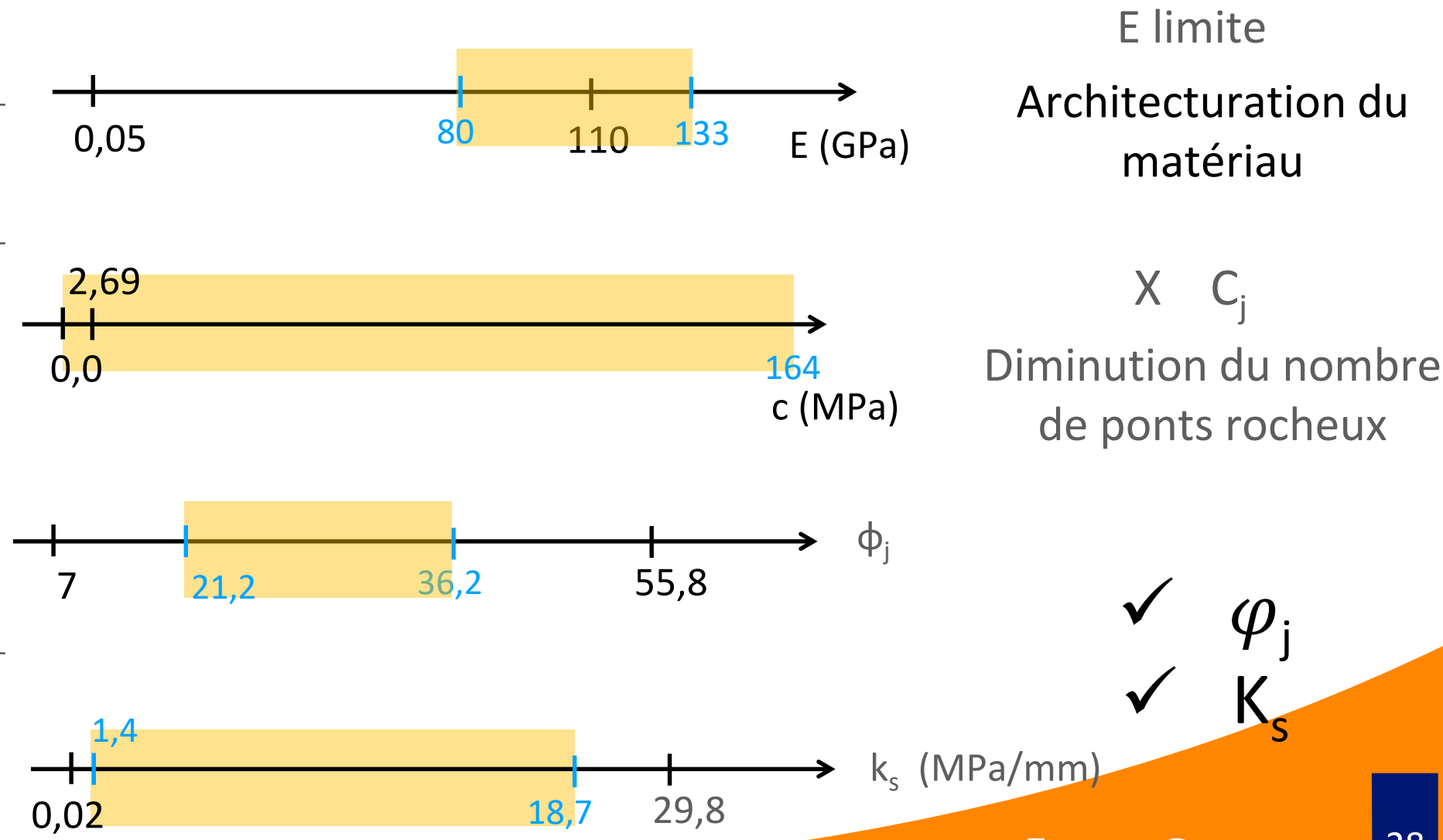
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

a) Etude d'un affaissement lié à une excavation située à 12,5 m de profondeur :

$$L^*=1/25 - g^*=1 - 0,3 \leq \rho^* \leq 0,5$$

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|----------------------------|--------------------------|---|
| E [GPa] | $0,012 \leq E^* \leq 0,02$ | 1,60 | $80 \leq E_p \leq 133$ |
| c_j [MPa] | $0,012 \leq c^* \leq 0,02$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 164,17$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $0,3 \leq k_s^* \leq 0,5$ | 0,7-5,6 | $1,4 \leq k_s \leq 18,7$ |



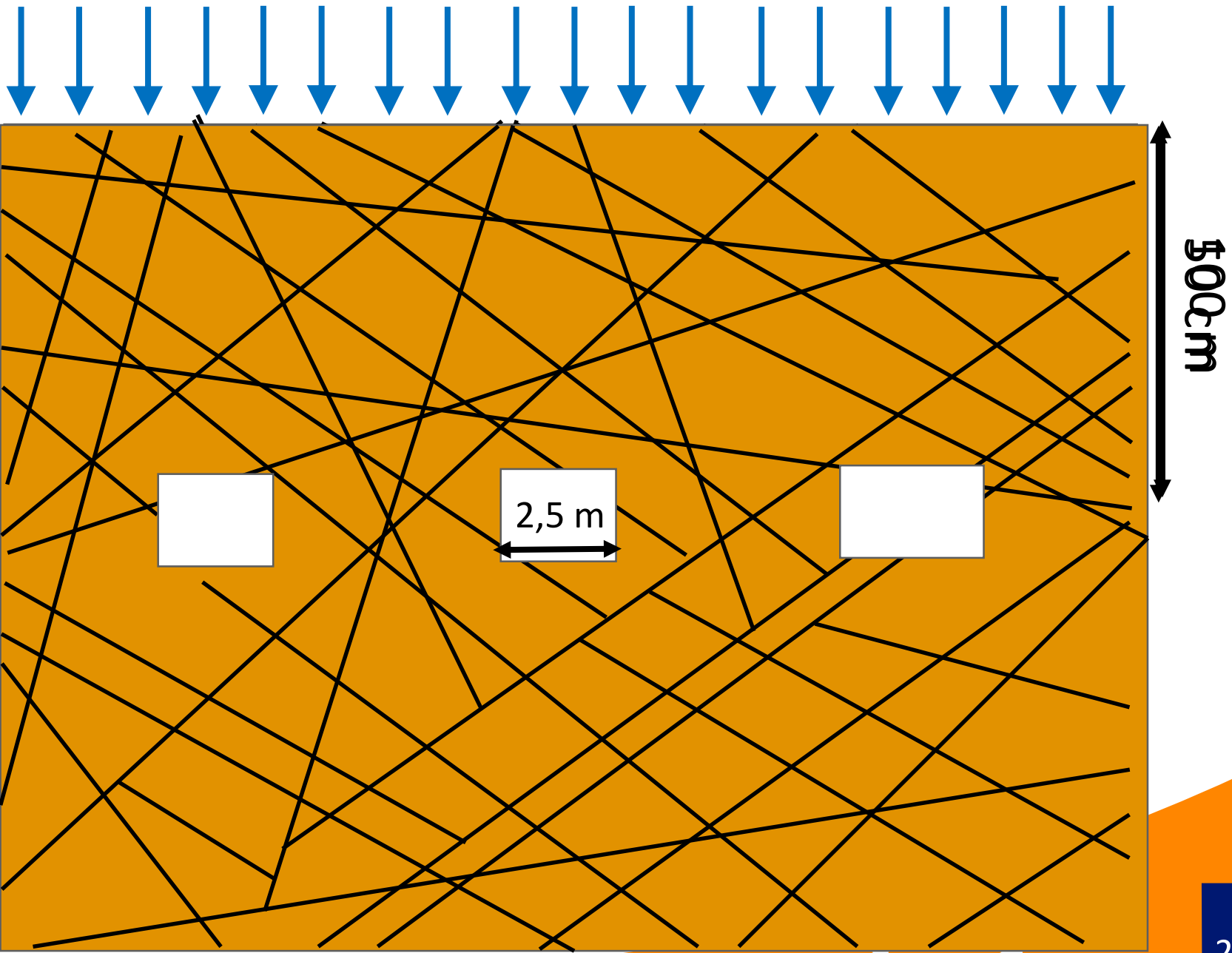
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

b) Etude de la stabilité d'une excavation située à 100 m de profondeur :

$L^*=1/25 - g^*=1 - \rho^*$ à négliger

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--|
| E [GPa] | $E^*=1/25$ | 1,60 | $E_p=40$ |
| c_j [MPa] | $c^*=1/25$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 49,25$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $k_s^*=1$ | 0,7-5,6 | $0,7 \leq k_s \leq 5,6$ |

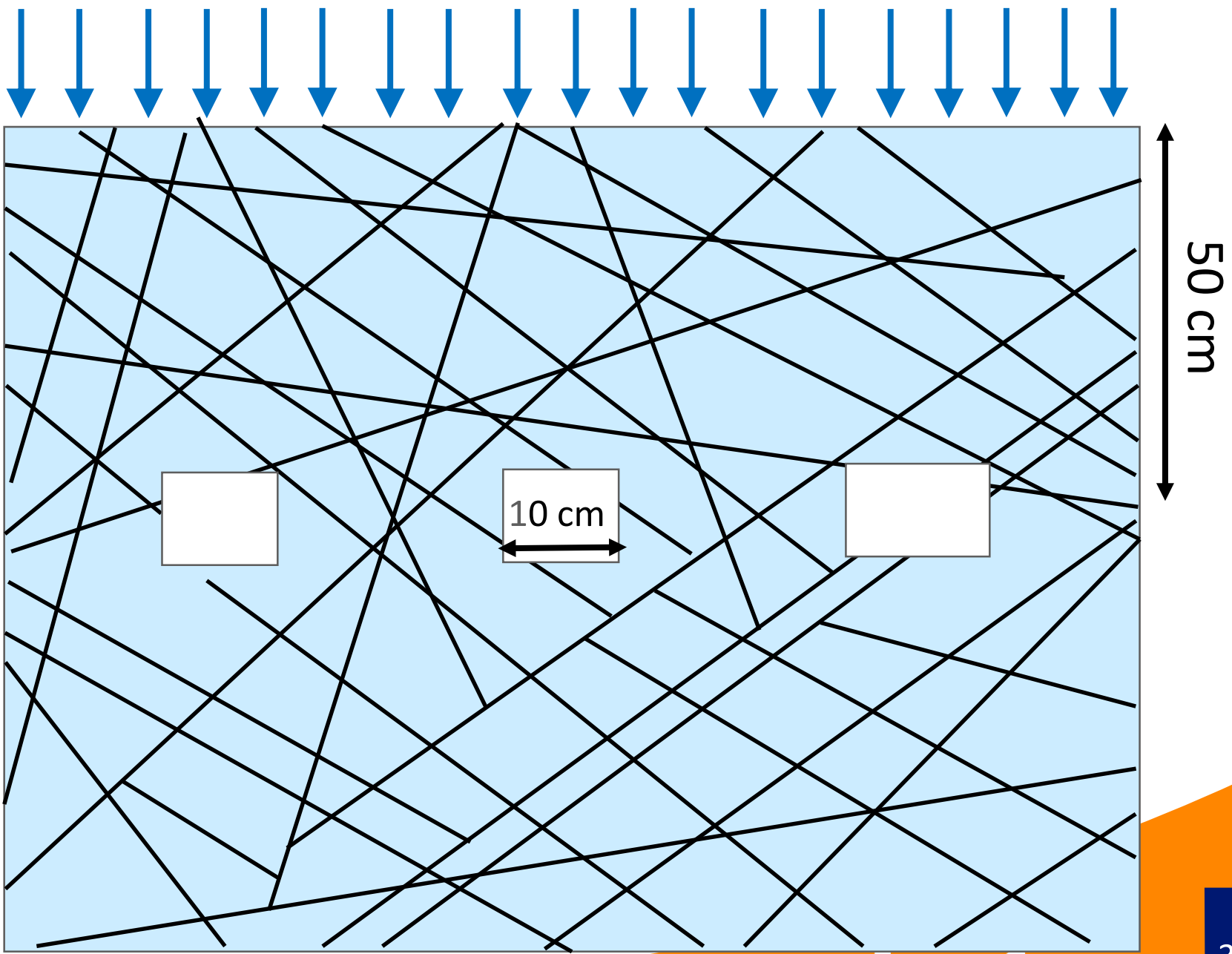


Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C _{roche} [MPa] | φ _{roche} [°] | E [GPa] | C _j [MPa] | φ _j [°] | K _n [MPa/mm] | K _s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------|----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | 2-80 | | 0 | 25 -37 | 3,8-46 |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | | | | | |

b) Etude de la stabilité d'une excavation située à 100 m de profondeur :
 $L^*=1/25 - g^*=1 - \rho^*$ à négliger

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--|
| E [GPa] | $E^*=1/25$ | 1,60 | $E_p=40$ |
| c_j [MPa] | $c^*=1/25$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 49,25$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $k_s^*=1$ | 0,7-5,6 | $0,7 \leq k_s \leq 5,6$ |

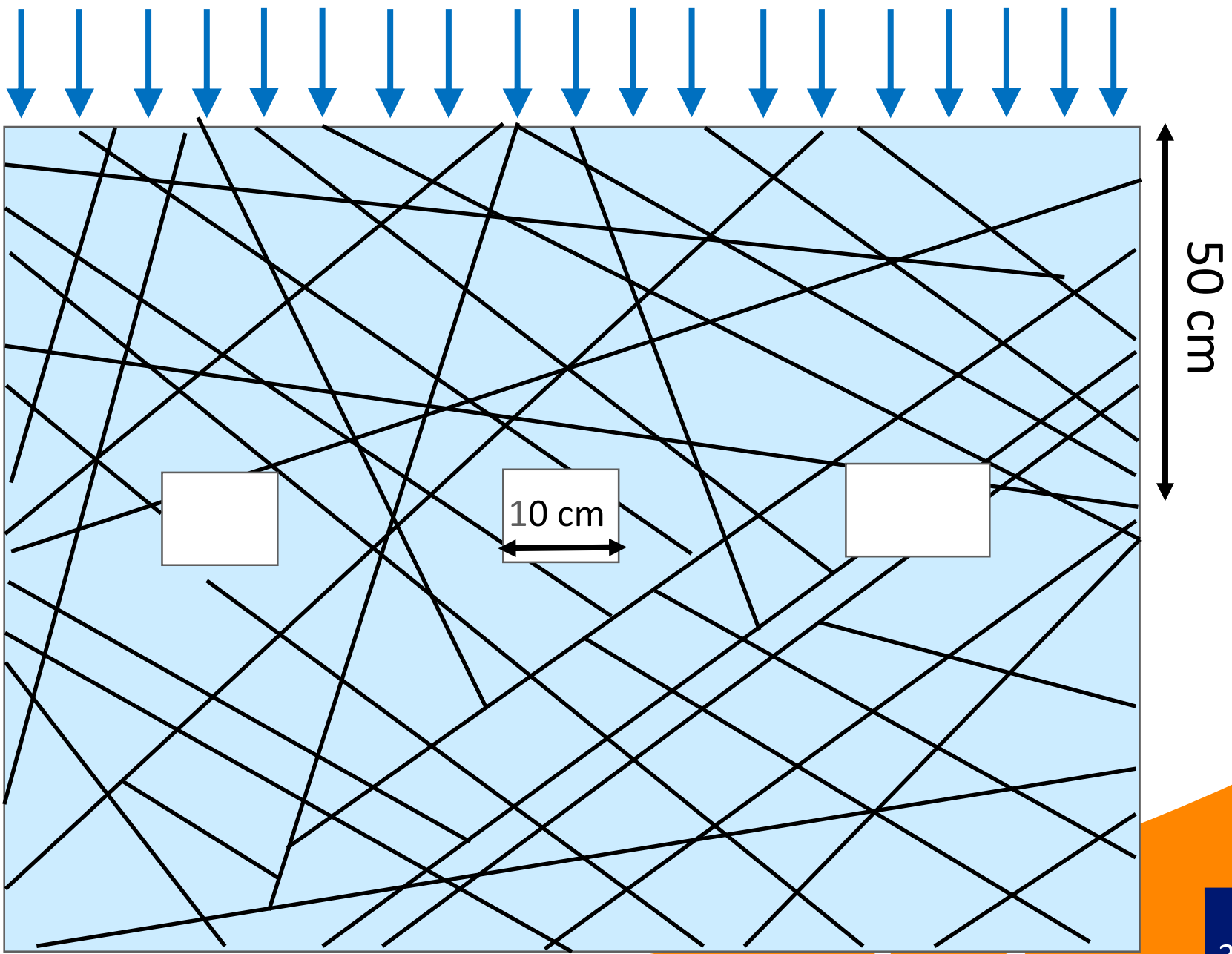


Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C _{roche} [MPa] | φ _{roche} [°] | E [GPa] | C _j [MPa] | φ _j [°] | K _n [MPa/mm] | K _s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------|-----------|----------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | 2-80 | | 0 | 25 -37 | 3,8-46 |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | | | | | |

b) Etude de la stabilité d'une excavation située à 100 m de profondeur :
 $L^*=1/25 - g^*=1 - \rho^*$ à négliger

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--|
| E [GPa] | $E^*=1/25$ | 1,60 | $E_p=40$ |
| c_j [MPa] | $c^*=1/25$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 49,25$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $k_s^*=1$ | 0,7-5,6 | $0,7 \leq k_s \leq 5,6$ |



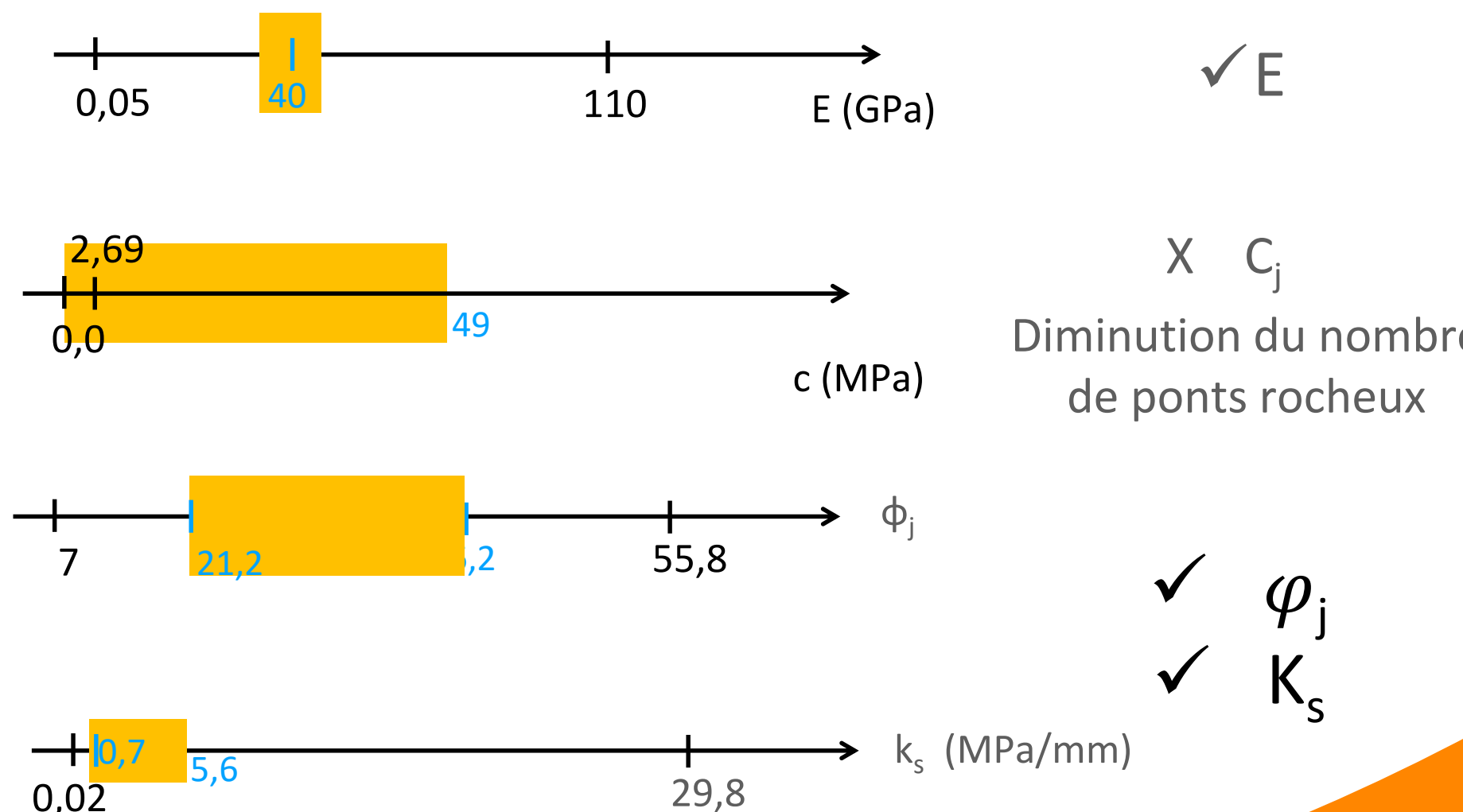
Application des facteurs d'échelle aux joints et propriétés du PA12

| Roches | C_{roche} [MPa] | φ_{roche} [°] | E [GPa] | C_j [MPa] | φ_j [°] | K_n [MPa/mm] | K_s [MPa/mm] |
|-------------------------------|--------------------------|------------------------------|-----------|-------------|-----------------|----------------|----------------|
| Intervalle générale (min-max) | 0-70,6 | 7,5-51 | 0,050-110 | 0-2,69 | 7-55,8 | 3,8-46 | 0,02-29,8 |
| Basalte | 8-36 | 43-50 | 20-73,4 | 0,24 – 0,35 | 31-42 | 35,1-1,29 | 1,29 |
| Grès | 8-27,2 | 27,8-45,2 | 5-60 | | 25-34 | | |
| Argilite | 0-0,18 | 12-18,5 | | | | | |
| Calcaire | 6,72-24 | 42-50 | 2-80 | 0 | 25 -37 | 3,8-46 | 0,7-17 |

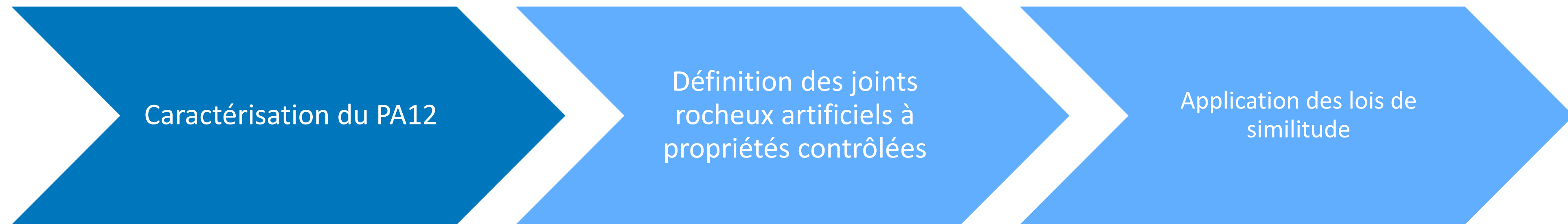
b) Etude de la stabilité d'une excavation située à 100 m de profondeur :

$L^*=1/25 - g^*=1 - \rho^*$ à négliger

| | Facteurs d'échelle | Echelle réduite A_m | Résultats à l'échelle du prototype A_p |
|-----------------|--------------------|-----------------------|--|
| E [GPa] | $E^*=1/25$ | 1,60 | $E_p=40$ |
| c_j [MPa] | $c^*=1/25$ | 0,0-1,97 | $0 \leq c_j \leq 49,25$ |
| φ_j [°] | $\varphi^*=1$ | 21,2-36,2 | $21,2 \leq \varphi_j \leq 36,2$ |
| k_s [MPa/mm] | $k_s^*=1$ | 0,7-5,6 | $0,7 \leq k_s \leq 5,6$ |



Conclusions



Validation de la faisabilité d'un modèle physique d'un massif rocheux en utilisant la fabrication additive (SLS du PA12).

- Reproduction du comportement global dans le cas où la rupture a lieu au niveau des joints rocheux
- Nouveau critère de rupture en fonction de l'angle des aspérités et du nombre de ponts rocheux
- Limites de cette technologie :
 - Application à des massifs dont le rapport entre la dimension de l'ouvrage et celle des blocs est compris entre 1 et 100, avec $\frac{\sigma_{roche\ intacte}}{\sigma_{massif}} \geq 10$
 - $L^* = 1/25$ pour $0,3 \leq \rho^* \leq 0,5$
 - $L^* = 4/275 = 0,0145$ si le ρ^* n'est pas pris en compte

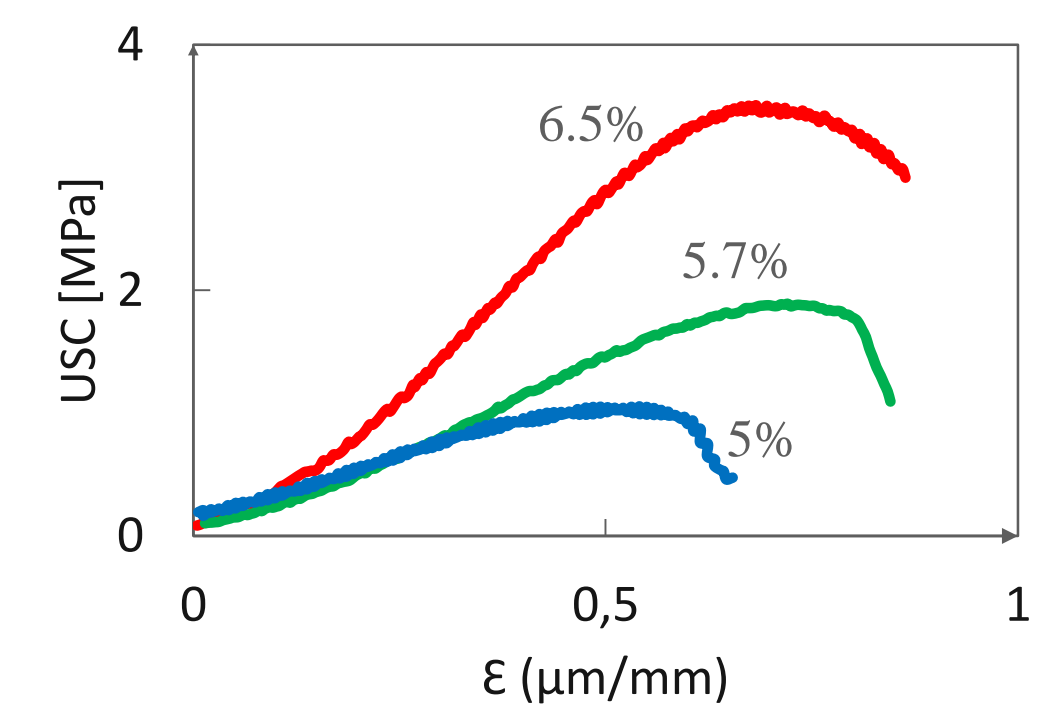
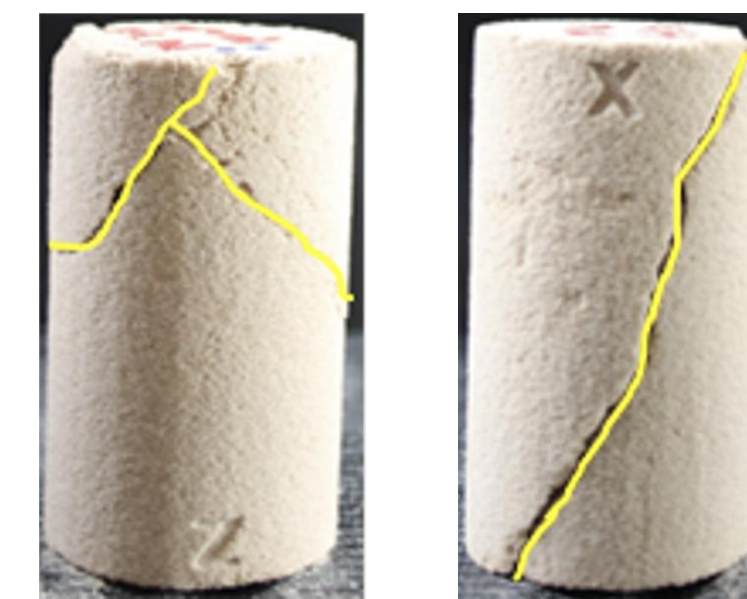
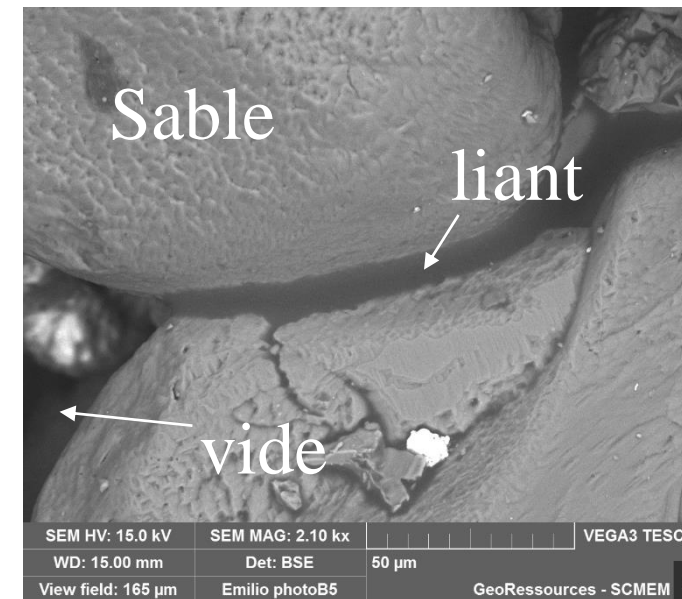
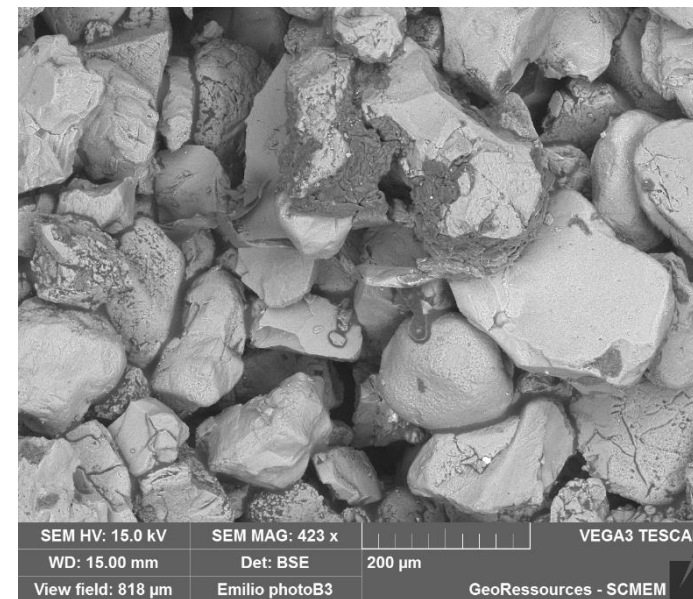
Suites et Perspectives

Thèse de E. Abi Aad – soutenance prévue juin 2023

a) Changement de matériaux – impression 3D SABLE (avec Platinum 3D)



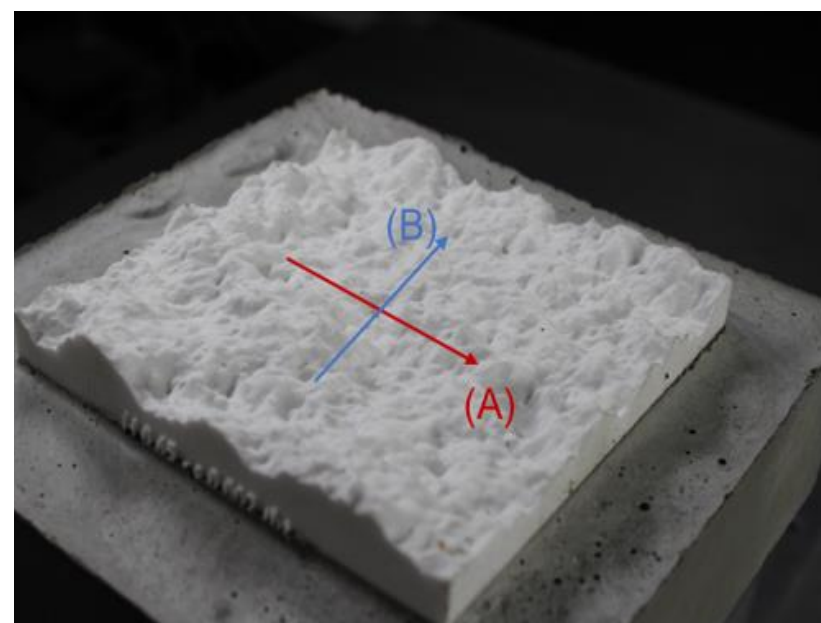
Imprimante Voxelfjet VX 1000



Facies de rupture Classique des Géomatériaux

Rc plus satisfaisante (% liant)

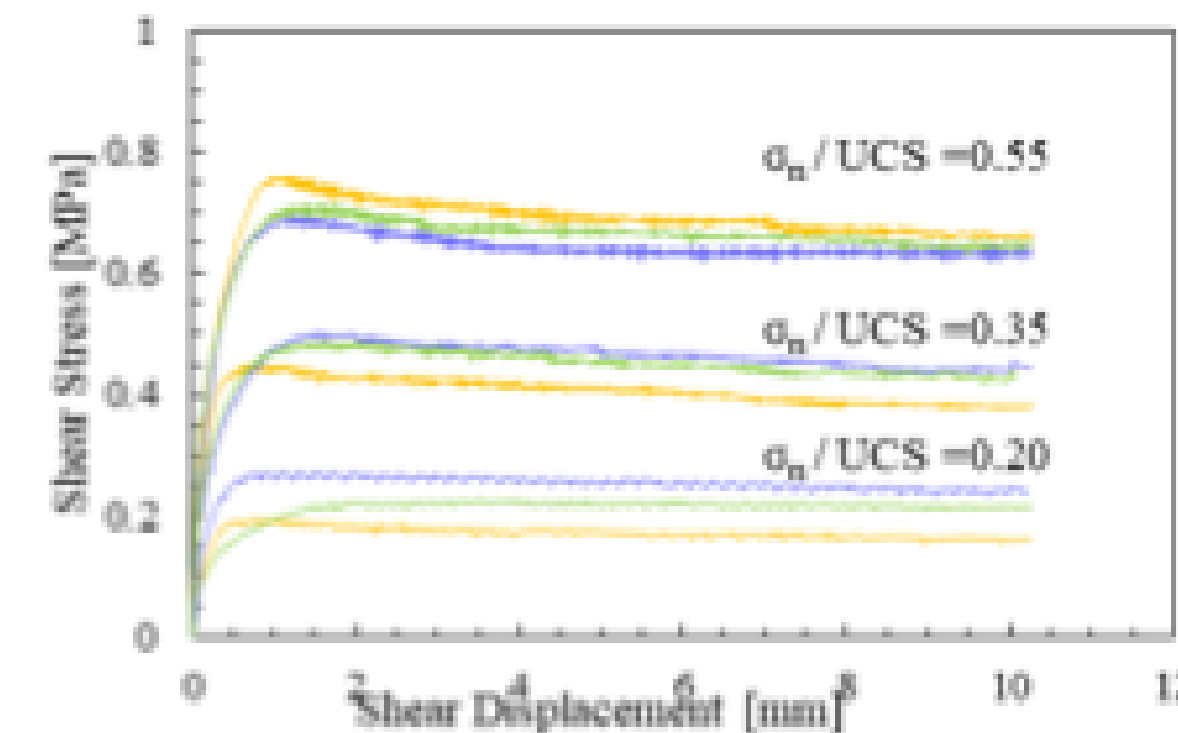
b) Intégration de rugosités plus réalistes (caractère fractal)



Jaber 2020



E. Abi Aad 2020

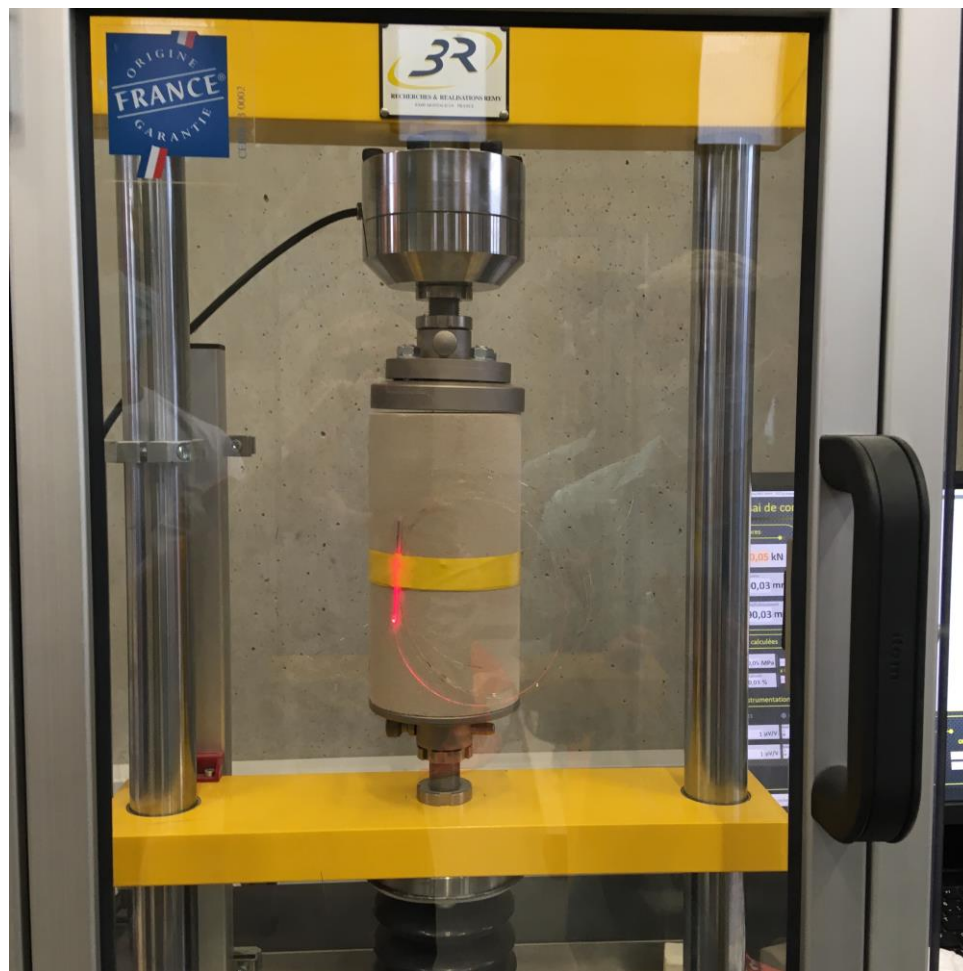


Endommagement de la matrice pour σ_n/UCS élevé

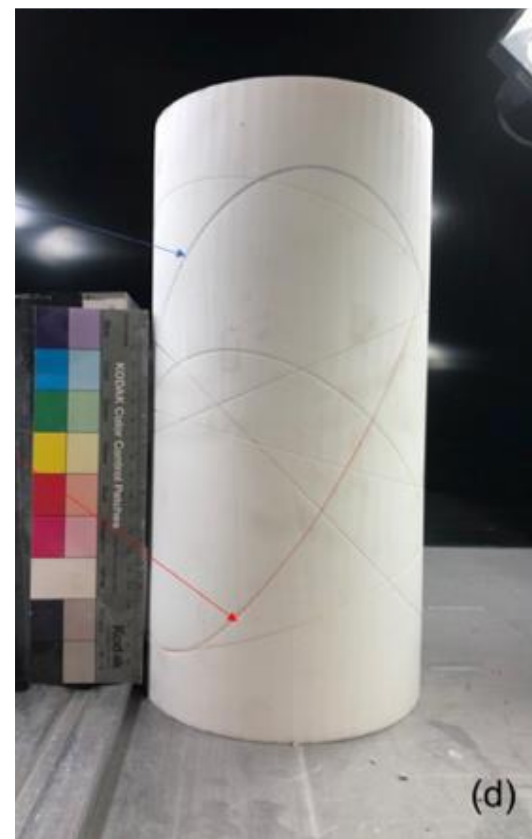
Suites et Perspectives

Thèse de E. Abi Aad – soutenance prévue juin 2023

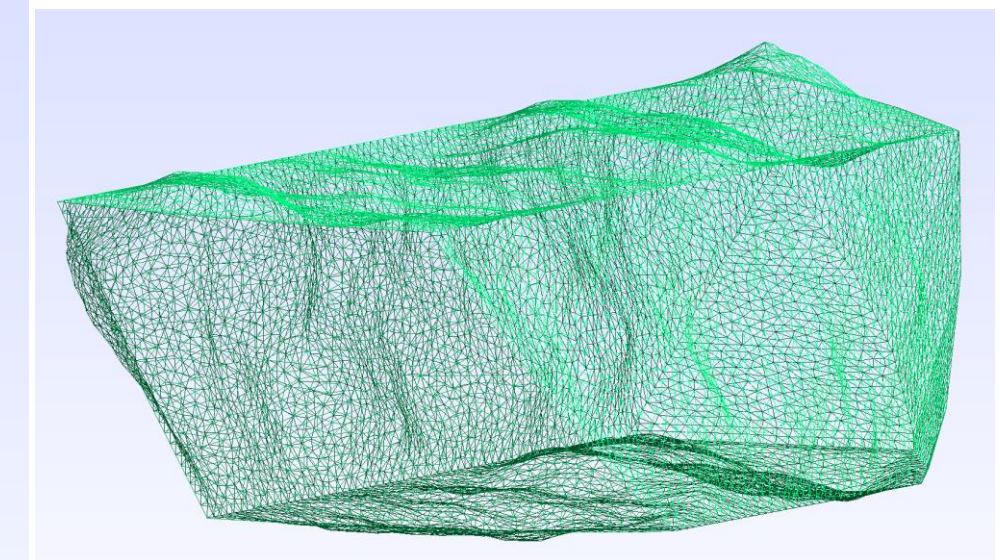
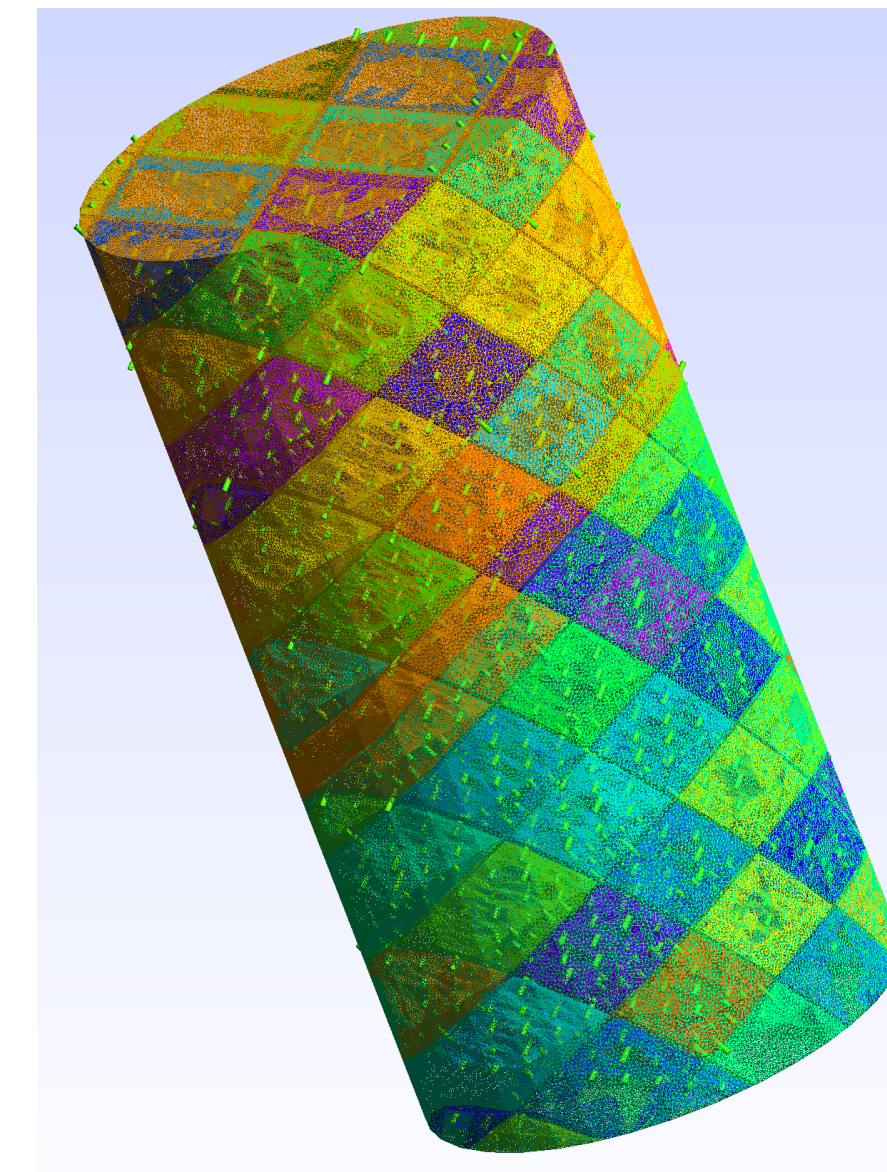
c) Intégration de capteurs dans la matrice (fibre optique) – avec SolExperts



d) Développement d'un programme permettant de générer les modèles géométriques 3D (Mathematica)



Jaber 2020



Différentes familles de discontinuités, rugosité emboîtée, ouverture du joint contrôlée + ponts rocheux (E. Abi Aad)

Merci pour votre attention