



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

CONFERENCE JEAN MANDEL

La géologie structurale, vecteur d'innovation en mécanique des roches

Philippe VASKOU

Cergy Paris Université



7 décembre 2023



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

OBJECTIFS DE CETTE CONFERENCE

- ➔ Présenter quelques aspects de la Géologie Structurale,
- ➔ Montrer leur importance dans la compréhension des phénomènes en Mécanique des Roches s.l.
- ➔ Démontrer que la Géologie Structurale reste plus que jamais un vecteur d'innovation

Propos limités: - aux travaux souterrains (tunnels, mines, puits, cavernes)
- au domaine de la sub-surface (domaine fragile)



SOMMAIRE

- 1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?
- 2 - Deux aspects structuraux concernant les fractures
 - ➔ chronologie
 - ➔ terminaisons
- 3 - Utilisation en Mécanique des Roches
 - ➔ mapping et
 - ➔ classification des massifs rocheux
 - ➔ modélisation (DFN)
- 4 - Conclusion



SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

→ chronologie
→ terminaisons

3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

→ mapping et
→ classification des massifs rocheux
→ modélisation (DFN)

4 - Conclusion

1 – INTRODUCTION: LA GÉOLOGIE STRUCTURALE C'EST QUOI ?

Traite de(s) déformation(s) des roches (ductiles ou fragiles), à toutes les échelles (échantillon à l'écorce terrestre)

Initialement: reconstitution de la géométrie de la déformation des matériaux (Mattaue, 1973)

80s : Tectonique ➔ Géologie Structurale

Plus récemment: analyse **quantitative** de la déformation, de son origine et de son histoire (monophasée, polyphasée, etc.)



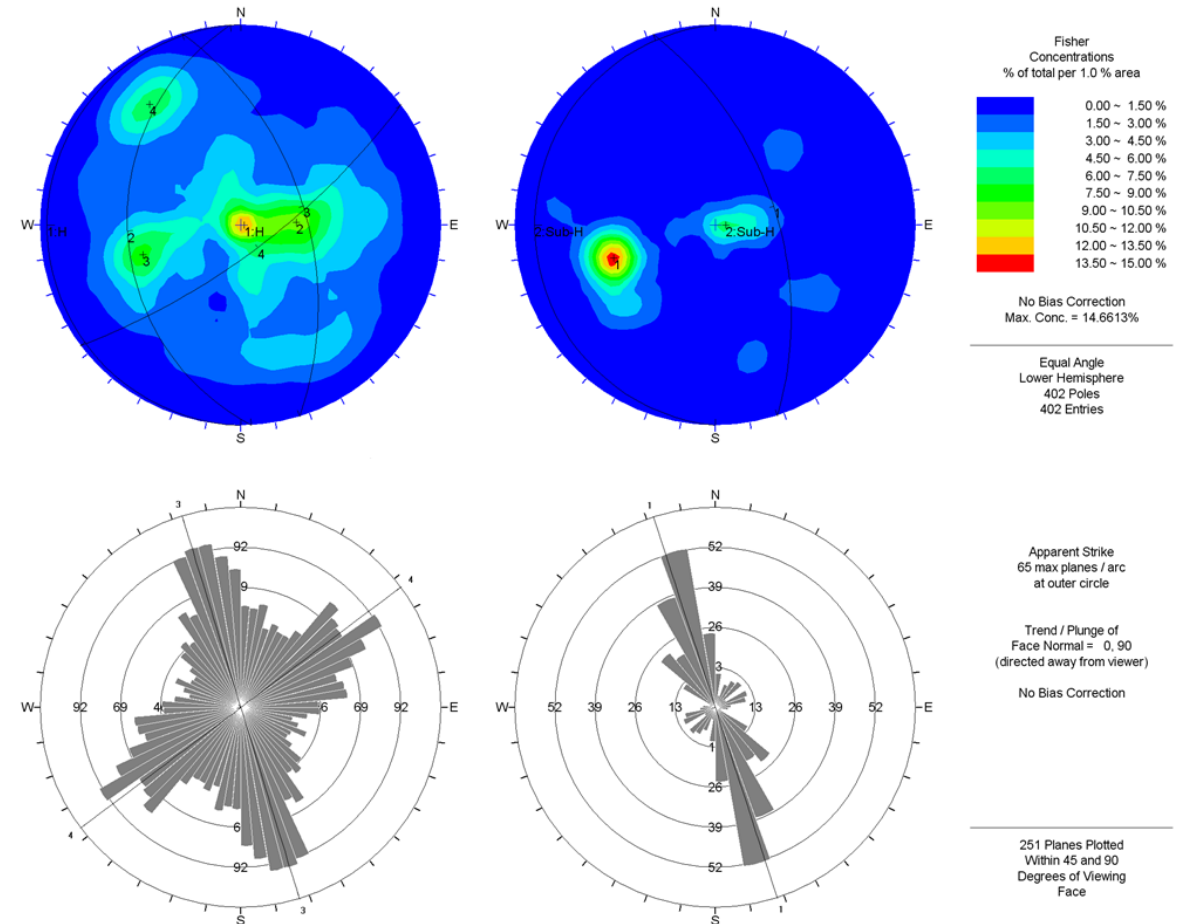
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

1 – INTRODUCTION: LA GÉOLOGIE STRUCTURALE C'EST QUOI ?

Trop souvent cantonnée
aux canevas et à la distinction
des familles de fractures.

Pourtant, l'origine, la chronologie, etc.
de la fracturation sont des données
essentielles en mécanique des roches

Réflexion en cours à l'ISRM
concernant la Géologie Structurale.
A suivre...





CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

TERMINOLOGIE

Géologues $\neq$ Mécaniciens de roches

FRACTURES:

Diaclases	Fractures en traction (<i>tensile fractures, joints</i>)
Failles	Fractures en cisaillement (<i>shear fractures</i>)



1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

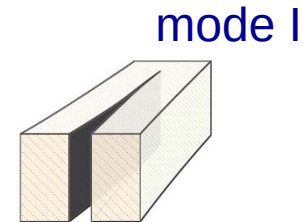
TERMINOLOGIE

Géologues $\neq$ Mécaniciens de roches

FRACTURES:

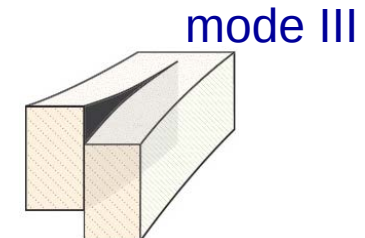
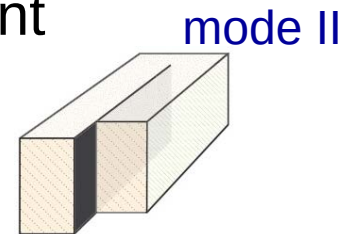
Diaclases

Fractures en traction
(*tensile fractures, joints*)



Failles

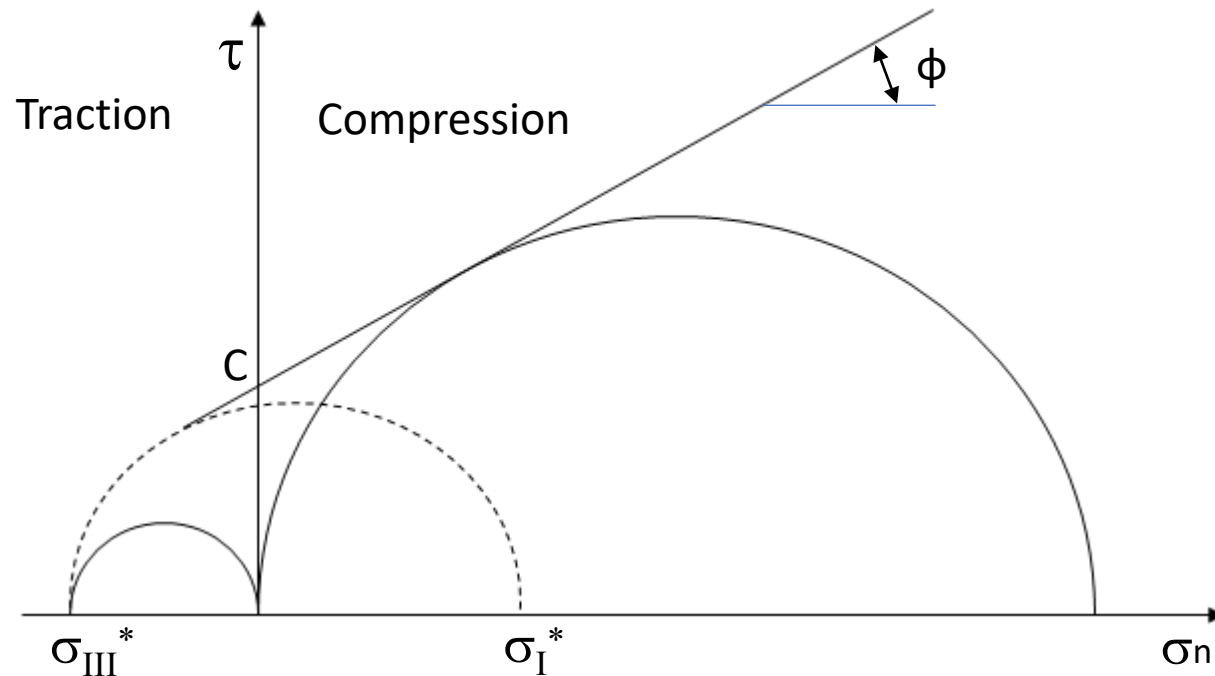
Fractures en cisaillement
(*shear fractures*)





1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi$$



σ_n contrainte normale

τ contrainte cisailante

C cohésion

ϕ angle de frottement

μ coeff. frottement interne $= \tan \phi$

σ_c résistance à compression uniaxiale

T résistance à la traction uniaxiale

$$\sigma_I^* = \sigma_c - mT$$

$$\sigma_{III}^* = -T$$

$$m = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$$

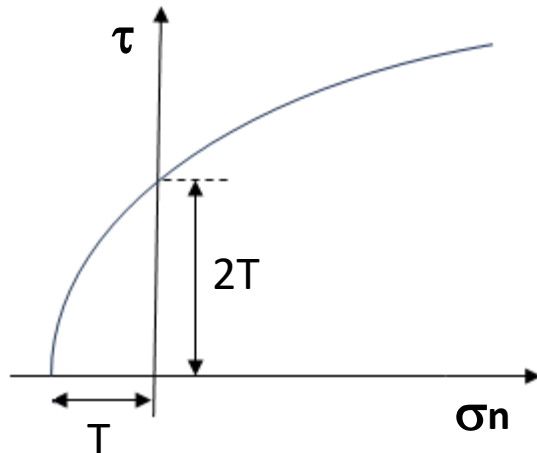


1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

CRITERE DE RUPTURE LINEAIRE DE TYPE MOHR-COULOMB (M-C) + NON-LINEAIRE (Griffith)

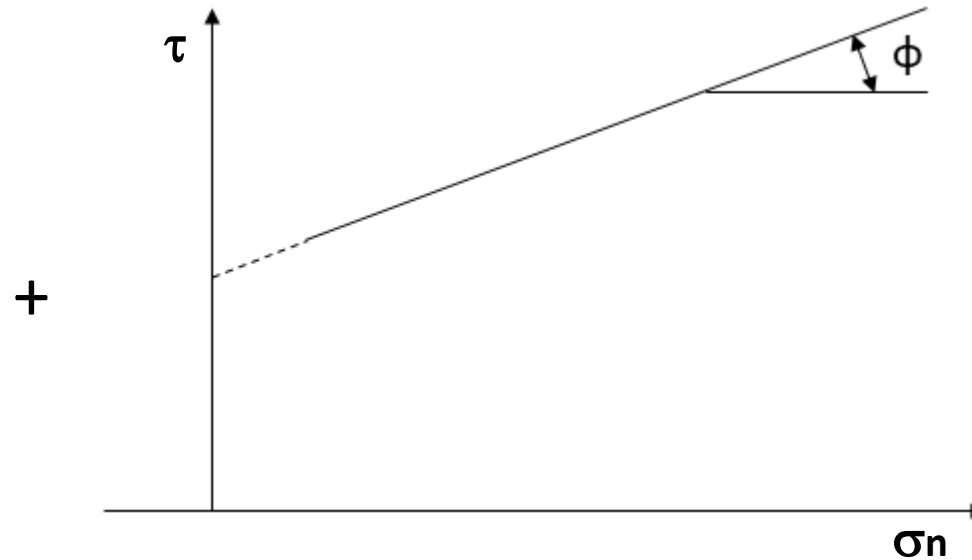
Traction: enveloppe de rupture parabolique de Griffith

$$\tau^2 + 4T\sigma_n - 4T^2 = 0$$



Compression: enveloppe de rupture linéaire de type Mohr-Coulomb

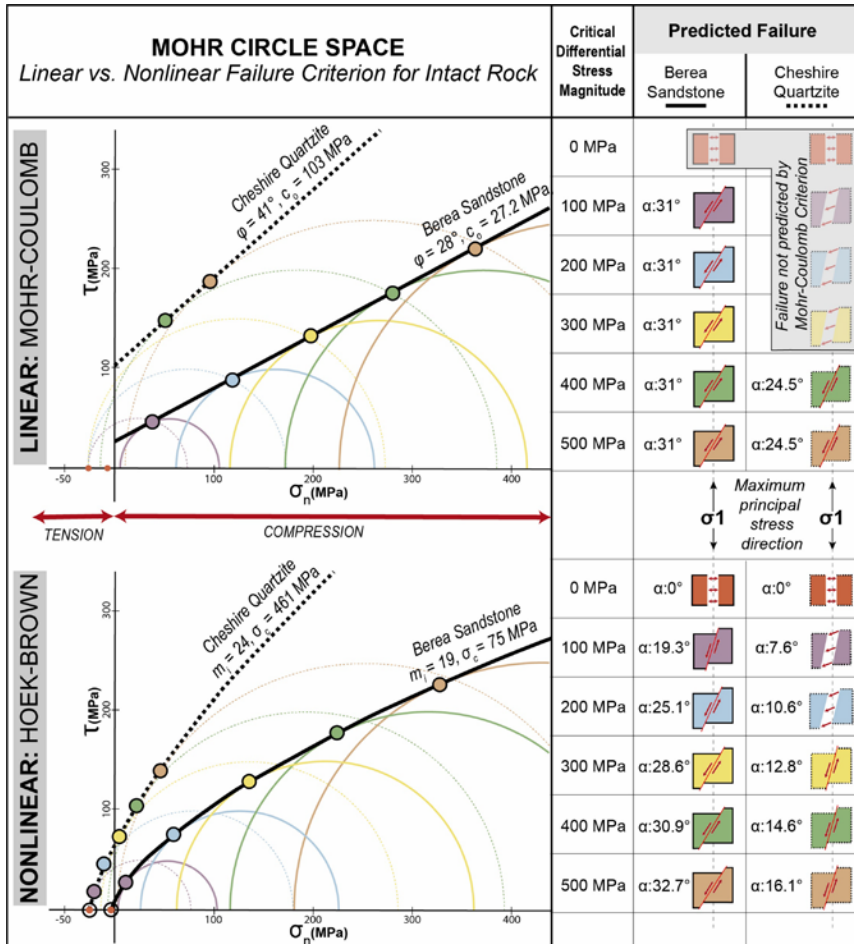
$$\tau = C + \sigma_n \tan \phi$$



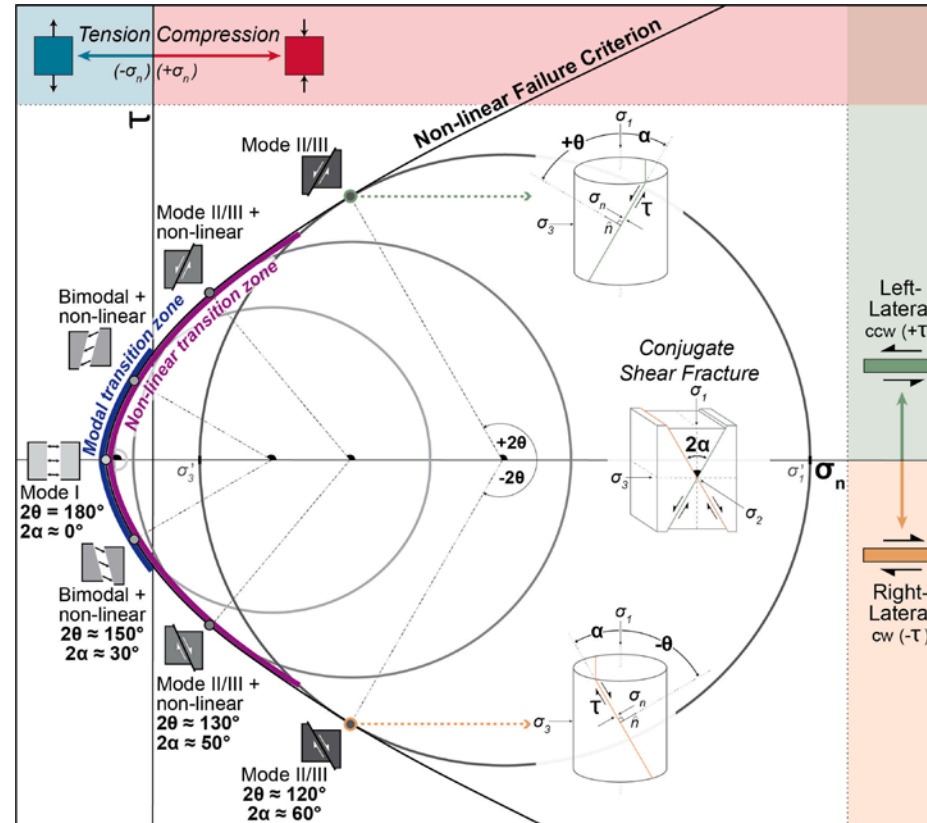
σ_n contrainte normale
 τ contrainte cisailante
 C cohésion
 ϕ angle de frottement
 T résistance à la traction uniaxiale

1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

CRITERE DE RUPTURE LINEAIRE (M-C) et NON-LINEAIRE (H-B)



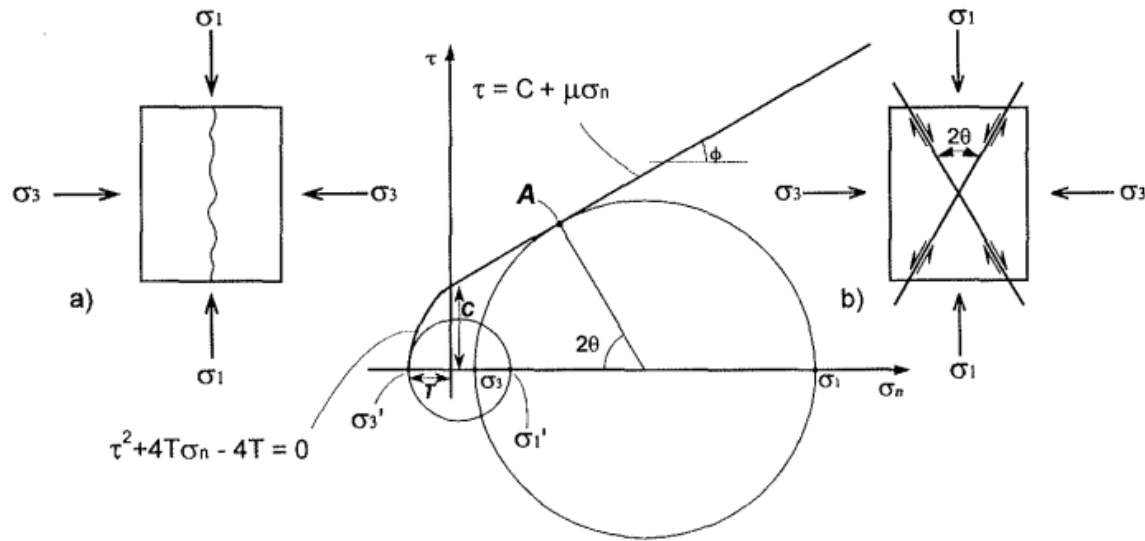
Cercle de Mohr complet (prise en compte du couple de fractures (1 fracture dextre + 1 fracture senestre))



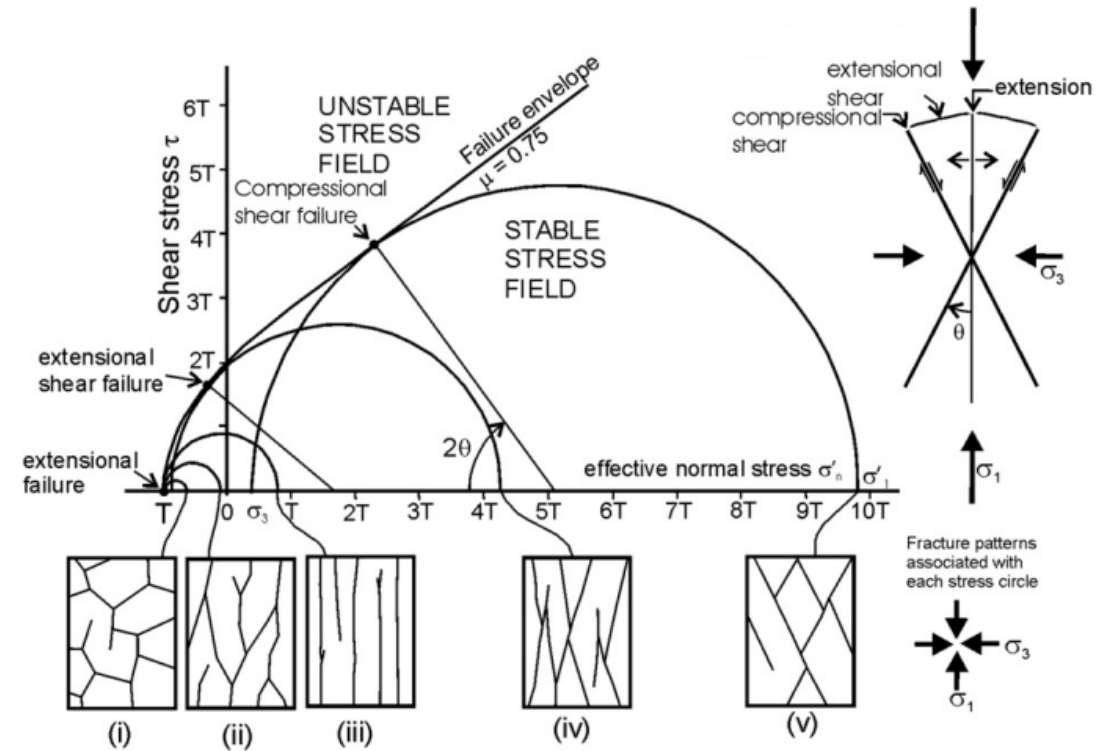
(Reeher et al., 2023)



1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS



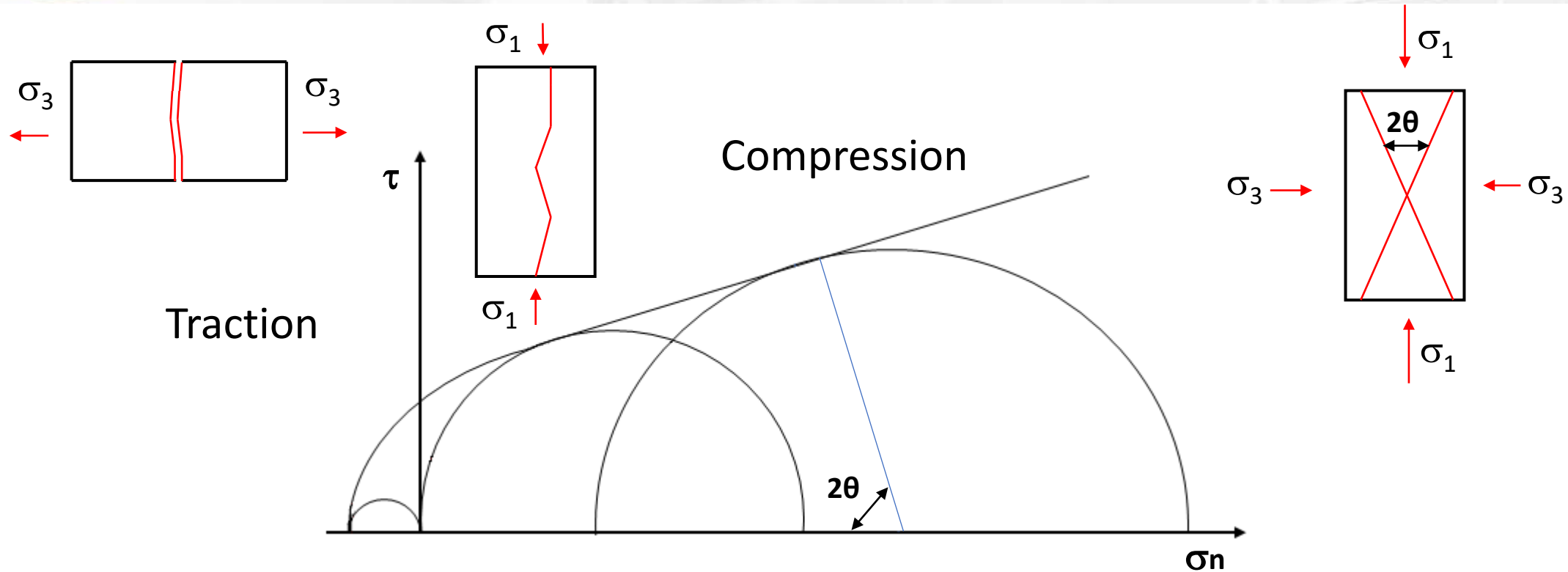
(Cosgrove, 1995)



(Belayneh & Cosgrove, 2010)



1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

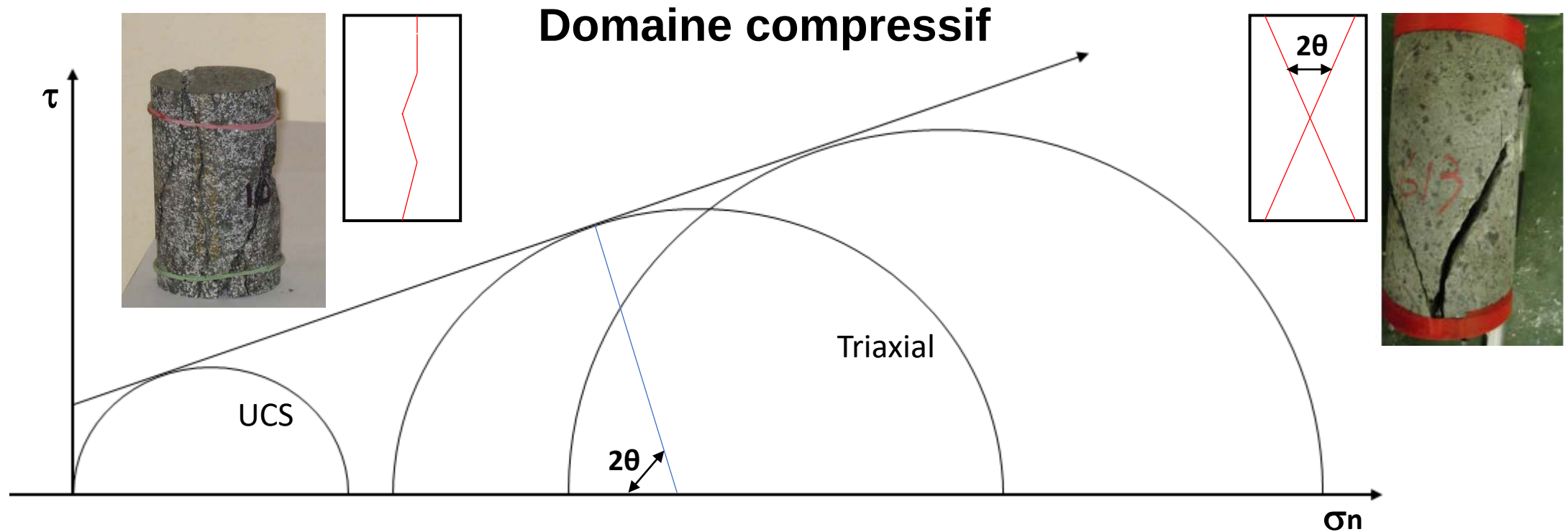


L'orientation des fractures est contrôlée par l'orientation des contraintes



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

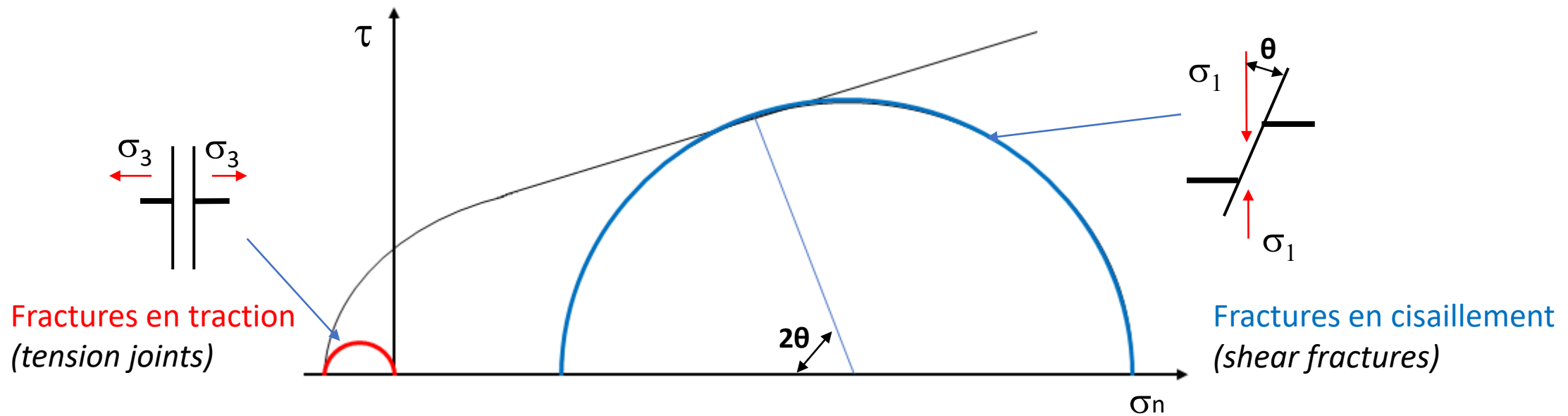


➔ Forme des fractures générées en subsurface par rapport au domaine plus profond



1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

Traction et compression

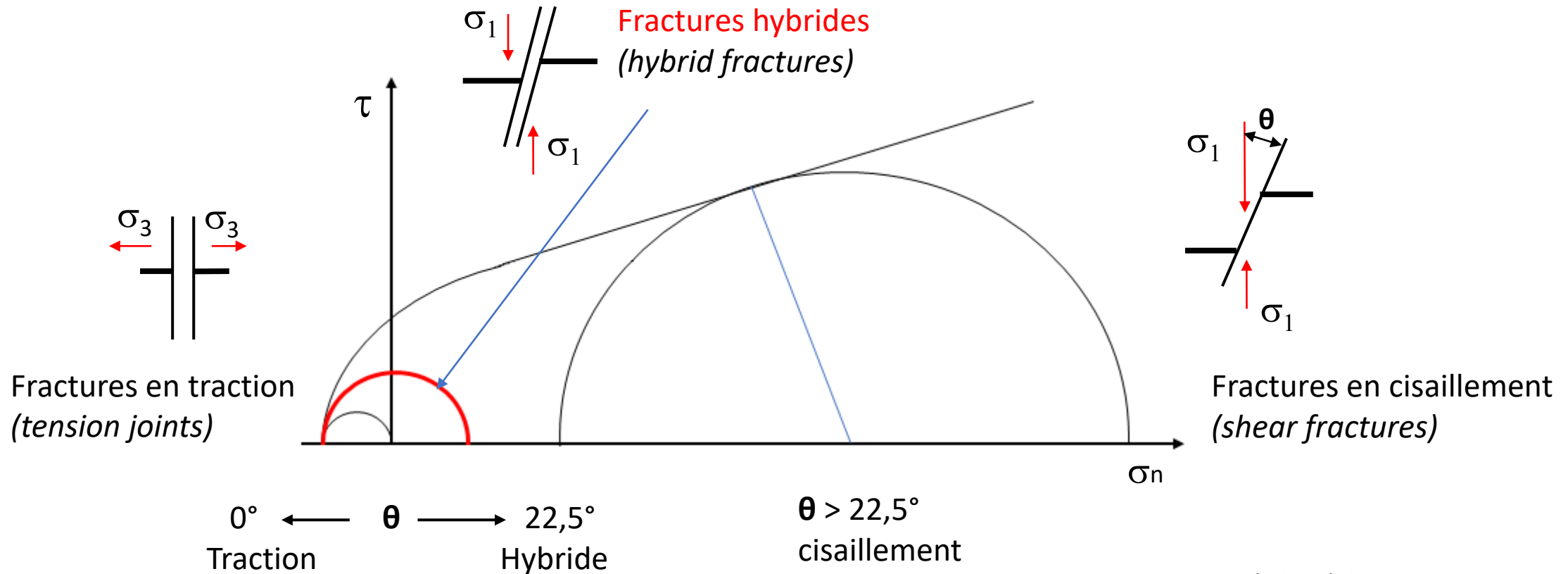


Le type de fracture (mode) est contrôlé par le différentiel de contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$)



1 – INTRODUCTION: QUELQUES CONCEPTS

De la traction à la compression



(adapté de Price & Cosgrove, 1990)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

➔ chronologie

➔ terminaisons

3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

➔ mapping et

➔ classification des massifs rocheux

➔ modélisation (DFN)

4 - Conclusion



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

QUELLE EST LA FAMILLE DE FRACTURES LA PLUS ANCIENNE ET LA PLUS RECENTE ?





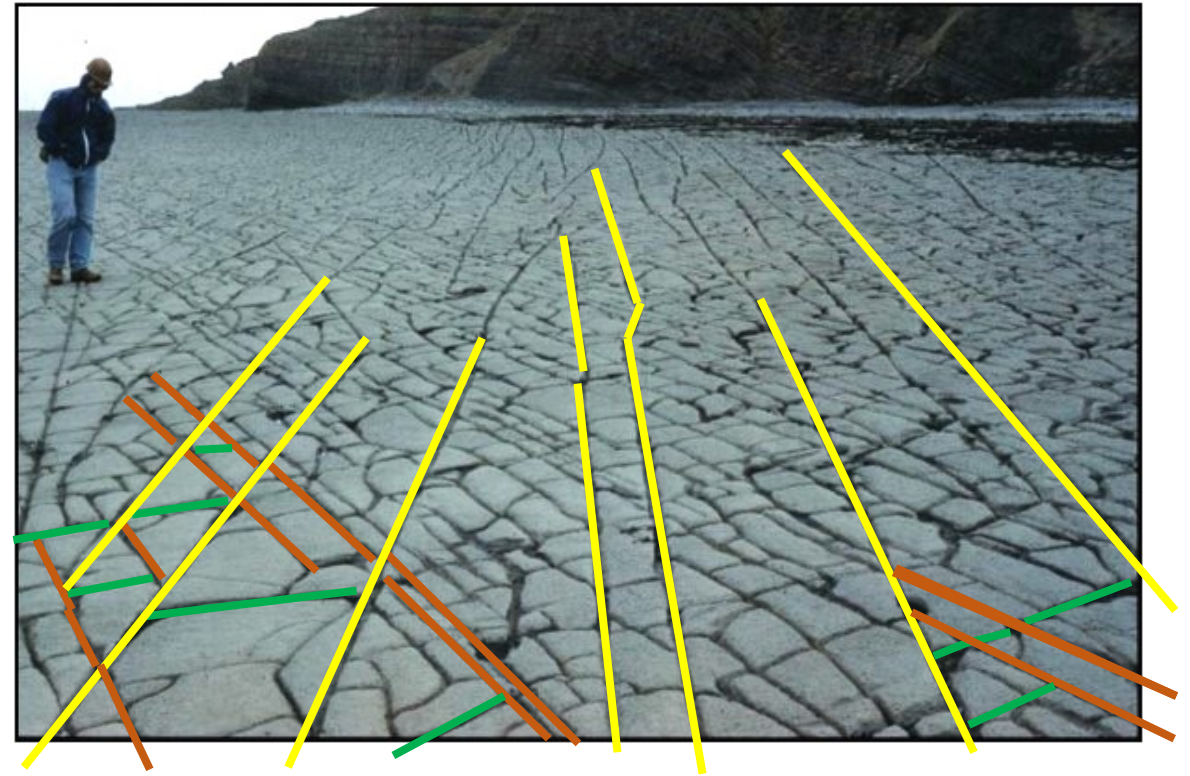
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

QUELLE EST LA FAMILLE DE FRACTURES LA PLUS ANCIENNE ET LA PLUS RECENTE ?



2 familles de fractures



3 familles de fractures

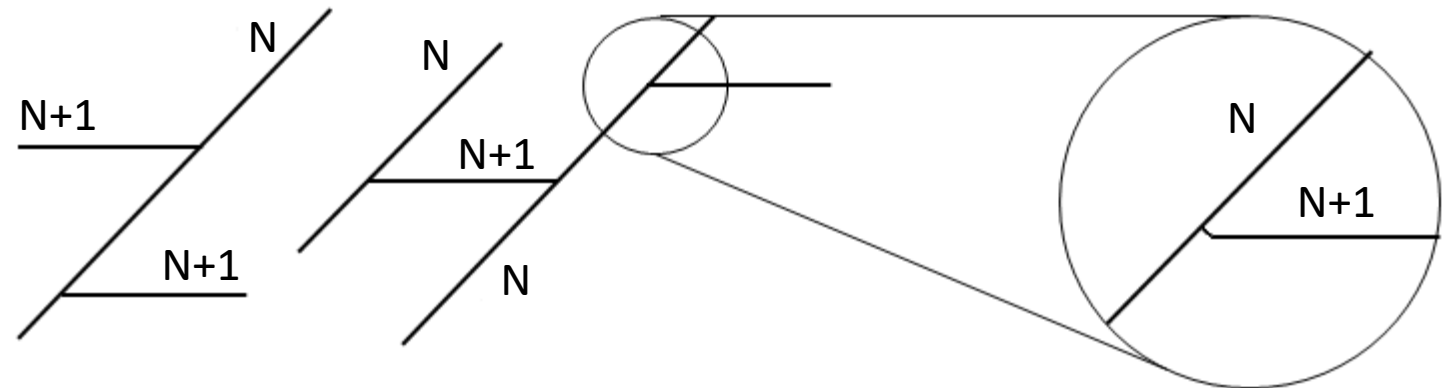


2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

MODE I: Les fractures en traction ne peuvent se propager au travers d'une surface libre
(= fracture préexistante non encore scellée par des minéraux « raides » type calcite ou quartz)

Une fracture préexistante amène à une rotation des contraintes qui tendent à devenir parallèles et perpendiculaires à la surface libre

- ➔ Une fracture qui s'arrête sur une autre est donc postérieure à cette première fracture
- ➔ Les fractures de génération N+1 tendent donc au contact des fracture de génération N à devenir perpendiculaires à celle-ci



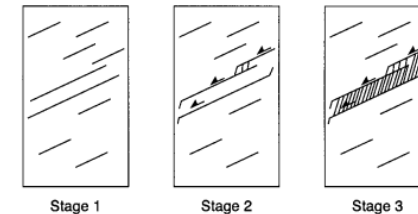


2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

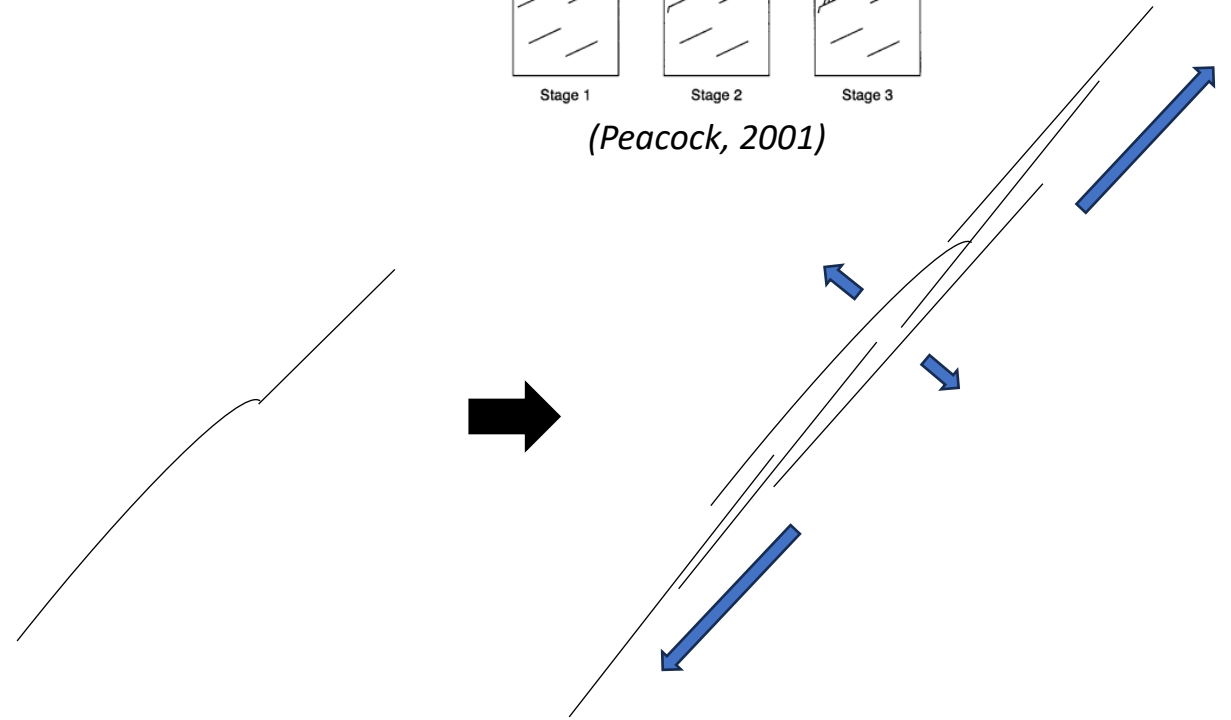
- MODE II:** Les fractures en cisaillement sont très souvent initiées des faiblesses pré-existantes
- anciennes fractures en traction
 - fracture en cours de formation (**C then $\tan\phi$** ; Barton, 2022)

La propagation d'une fracture est perturbée par une fracture pré-existante,

- ➔ les nouvelles fractures en cisaillement tendent à rejoindre des fractures plus anciennes
- ➔ Les diverses fractures en cisaillement forment un chevelu puis un réseau (*braided*) qui devient une « faille »
- ➔ si le champ de contrainte perdure, la faille grandit en longueur et épaisseur



(Peacock, 2001)





2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

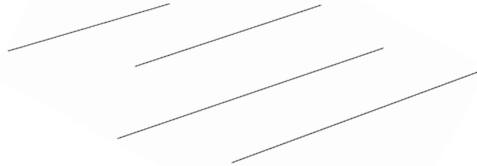
Chronologie des fractures – Par type

MODE I

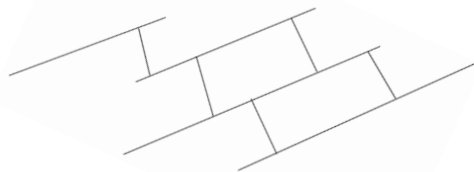
(*joints* - diaclasses)



Fractures les plus longues



Fractures les plus courtes
s'arrêtant sur d'anciennes



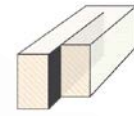
+ *ancien*



+ *récent*

MODE II

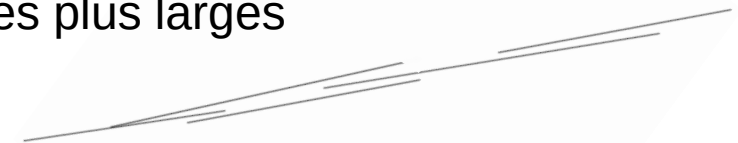
(*shear fractures* – failles)



Fractures les plus courtes



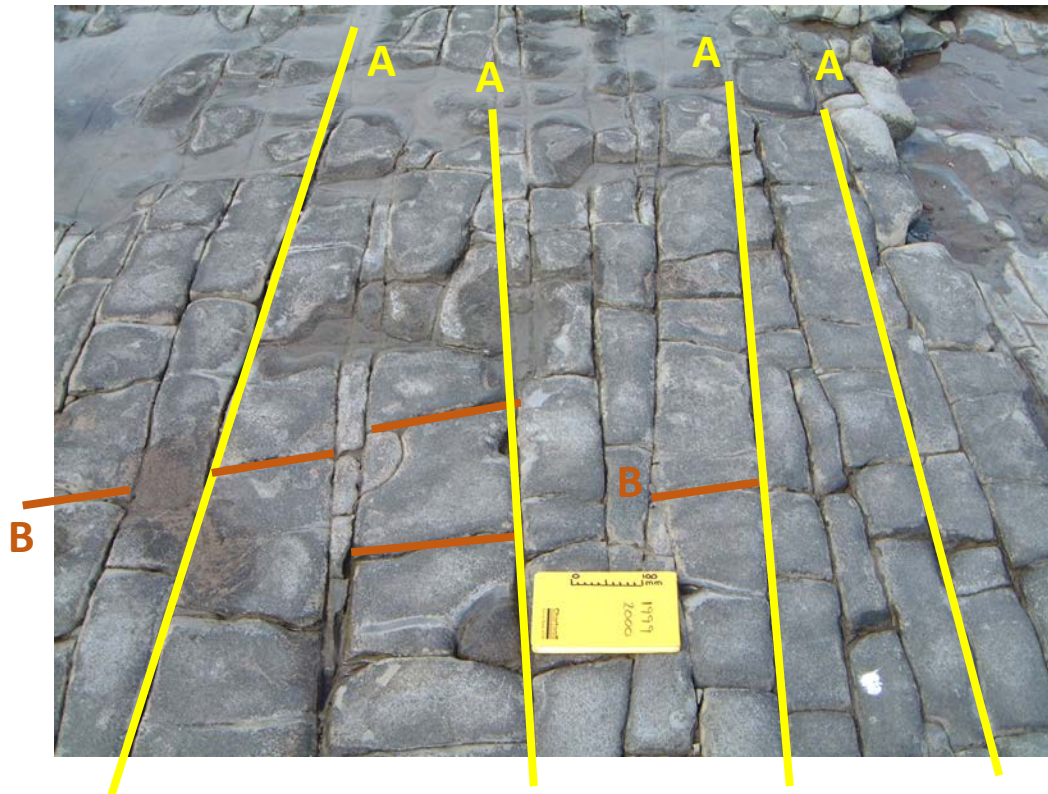
Fractures les plus longues
& les plus larges



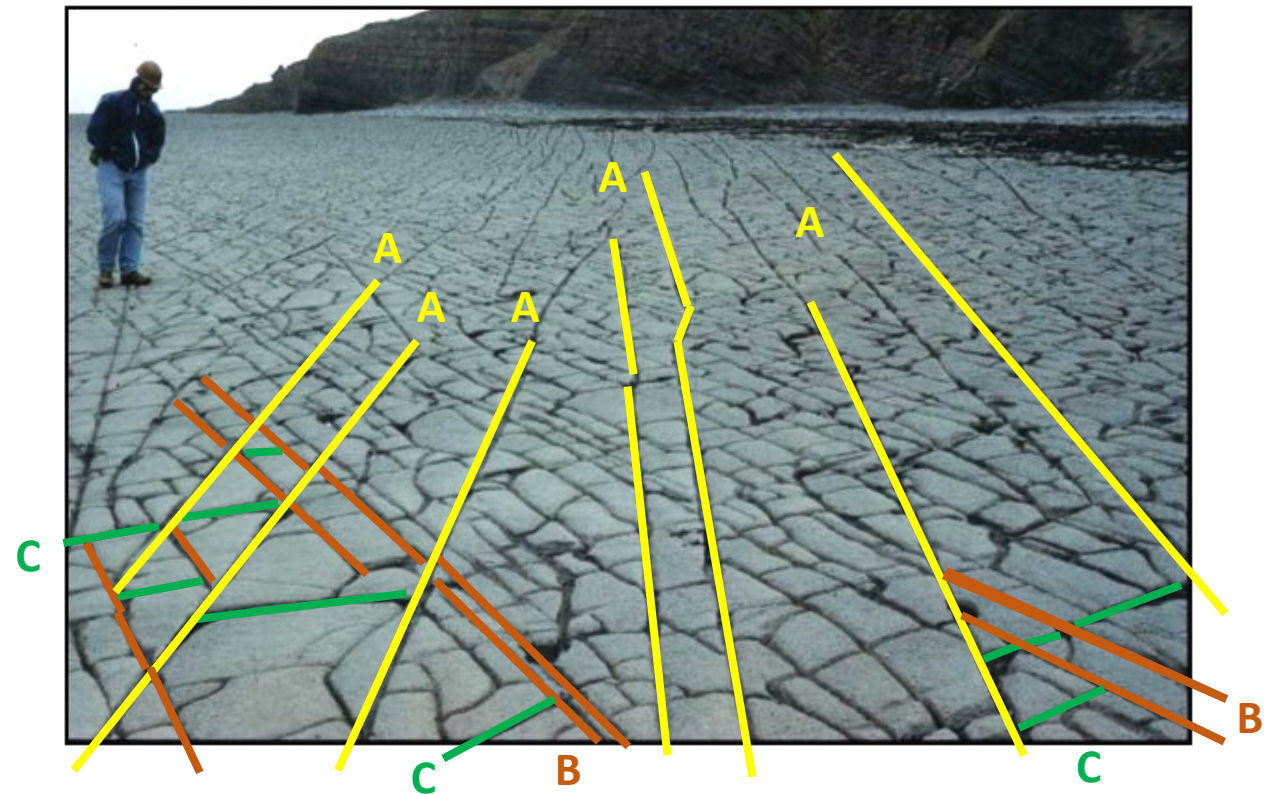


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES



2 familles de fractures



3 familles de fractures

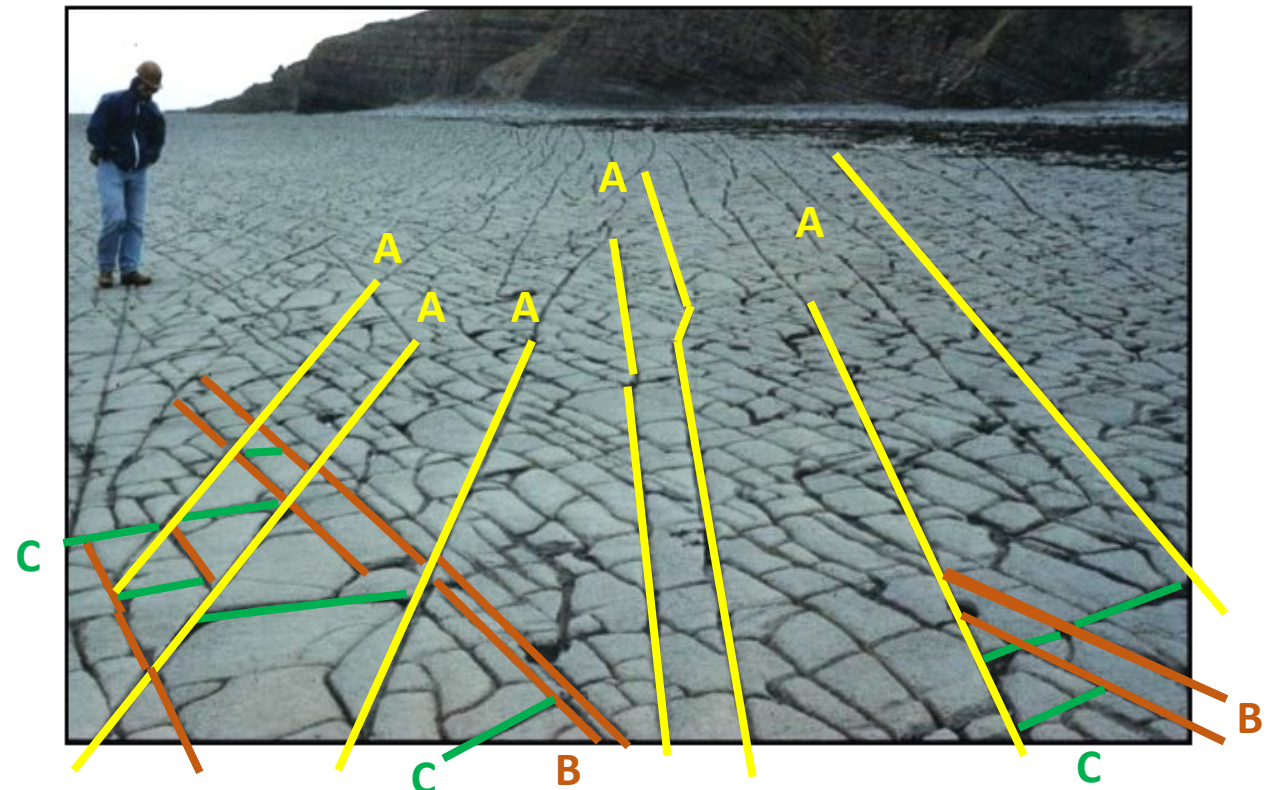


2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

Fractures s'arrêtent sur d'autres ($\perp$) $\rightarrow$ Mode I $\rightarrow$ fractures les plus longues sont de 1^{ère} génération



2 familles de fractures



3 familles de fractures



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

On parle beaucoup de fractures de MODE I

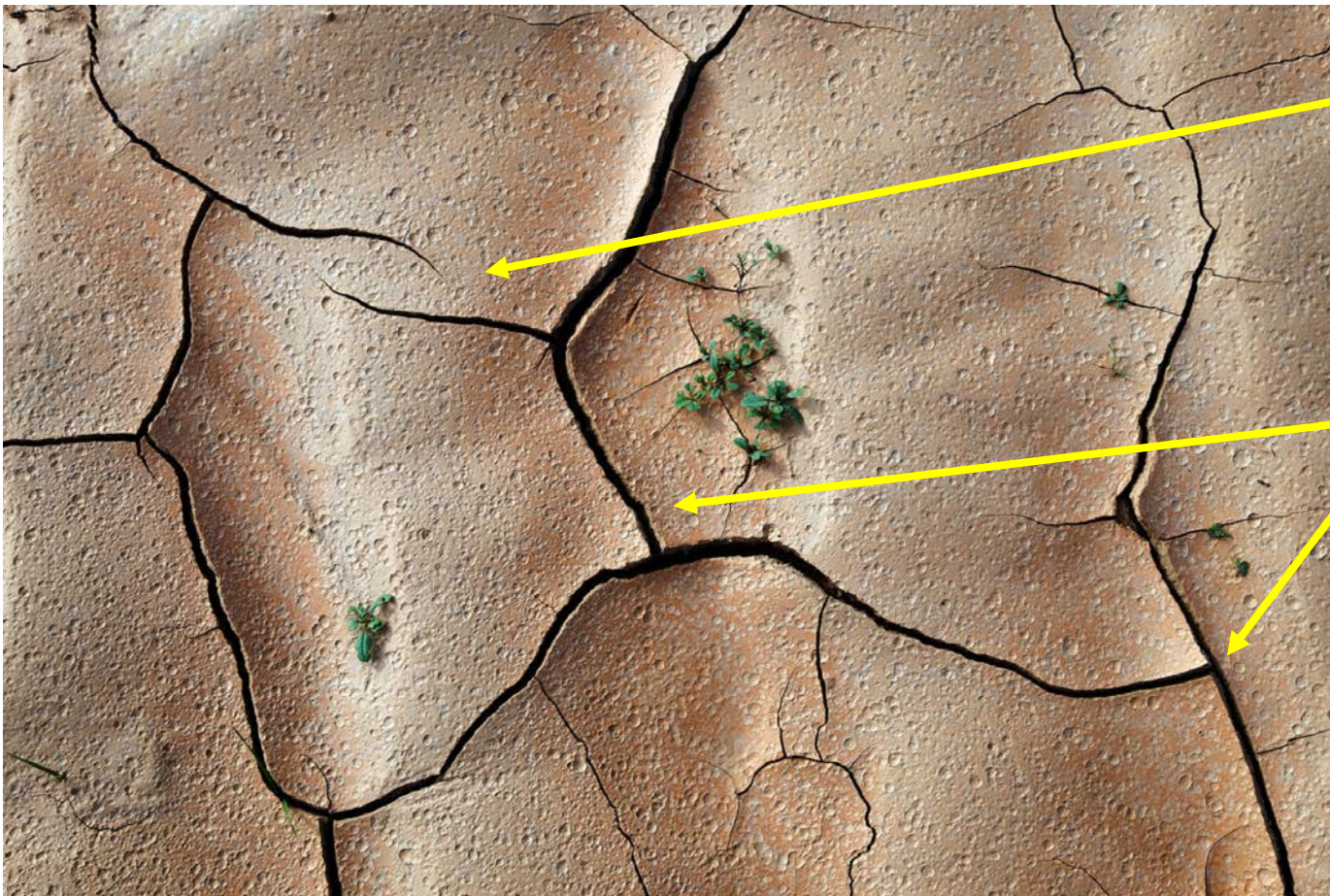
mais sont elles fréquentes naturellement dans les roches ?



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

EXEMPLES DE FRACTURES EN TRACTION: dans les sols



Modification locale de
la trajectoire des contraintes

Orthogonalisation

(Photo Henri Kartmann, Rio Secco)

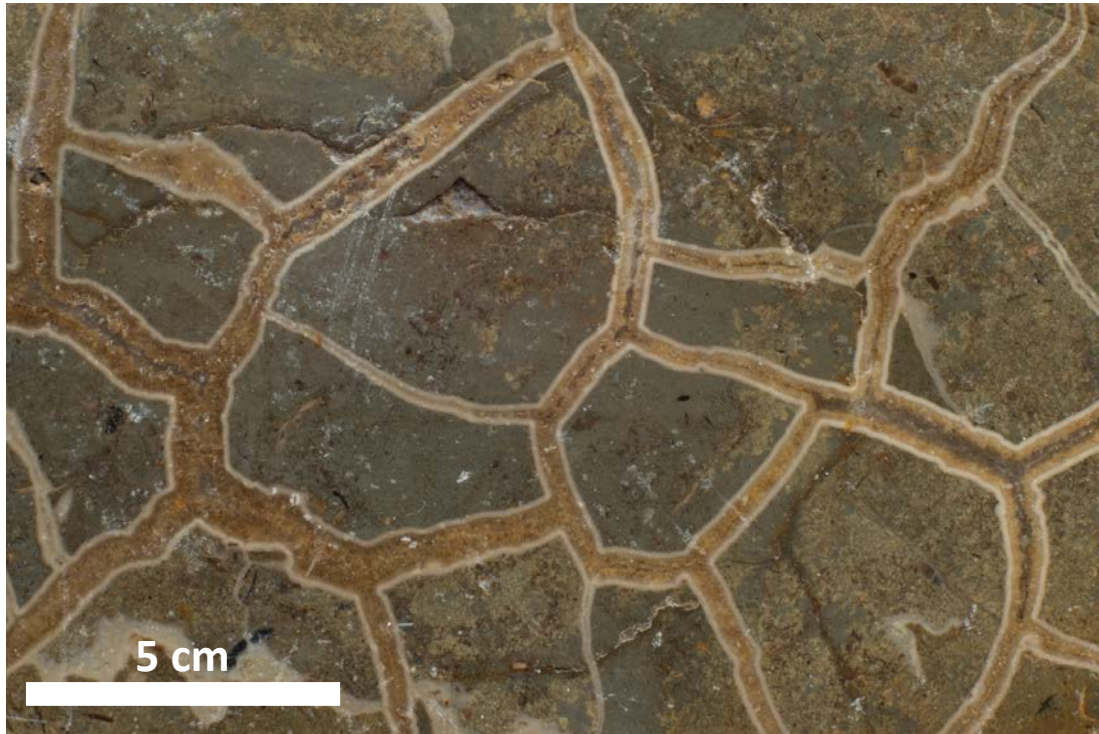


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

EXEMPLES DE FRACTURES EN TRACTION:

dans les roches



Septaria = dessication



Basalte = retrait thermique

(Photos P. Vaskou)



2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

Fracturation en MODE I: Est-ce fréquent dans les roches ?

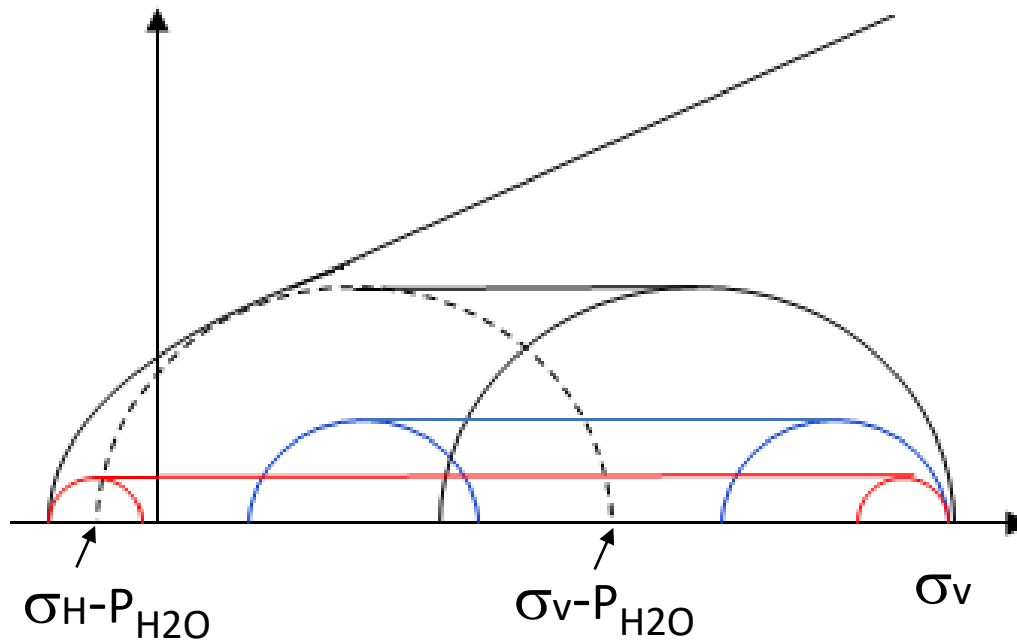
Exemples de fractures en mode I:

- zones tectoniques particulières (rift actif, subduction) ← **RARE**
 - fractures d'origine **thermique** (granite, gneiss, tuffs, basalte, etc.)
 - fractures induites par **fracturation hydraulique**
 - roches sédimentaires durant enfouissement (diagenèse)
 - roches sédimentaires durant des orogènes
 - roches magmatiques (filons, *dykes*)
- } **TRES FREQUENT**



2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

Fracturation hydraulique



Dans des matériaux en cours de diagenèse (= peu voire pas indurés), la contrainte majeure est σ_v ($\sigma_1 = \sigma_v$)

La présence d'eau amène à une réduction de la contrainte effective et à la fracturation du matériau (cercle noir)

Même des différentiels de contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$) faibles peuvent amener à la rupture par fracturation hydraulique (cercle rouge)

Rupture en traction:

Rupture en cisaillement:

SEC

$$\sigma_3 < -T$$

$$\tau > C + \sigma_n \tan \phi$$

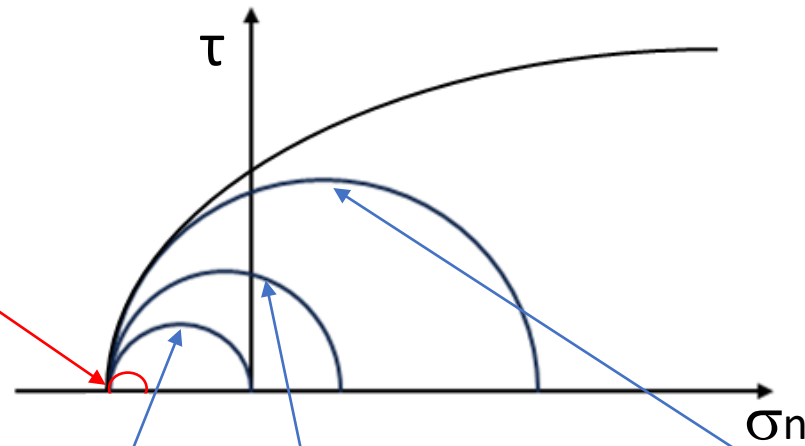
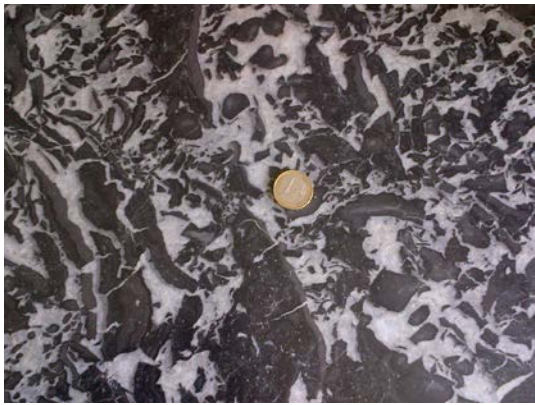
SATURE

$$(\sigma_3 - P_{H_2O}) < -T$$

$$\tau > C + (\sigma_n - P_{H_2O}) \tan \phi$$

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

Fracturation hydraulique: affectant un massif rocheux



On observe une augmentation de la régularité des fractures avec l'augmentation du différentiel de contraintes ($\sigma_1 - \sigma_3$)

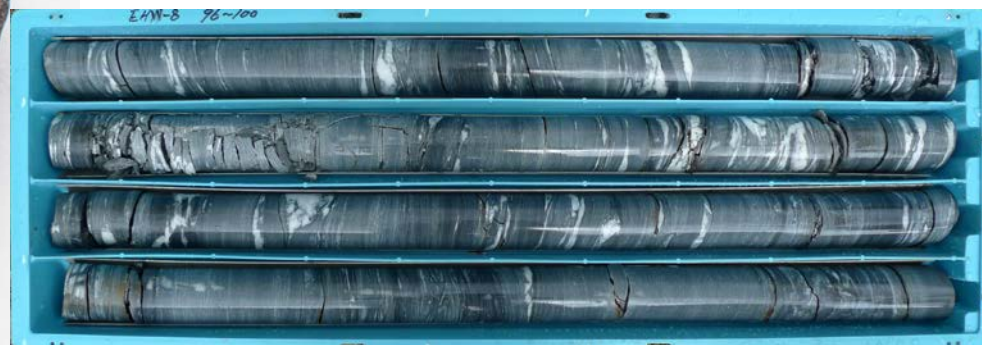




CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – CHRONOLOGIE DES FRACTURES

Fracturation hydraulique: localisée (contraste de perméabilité)



(Photos P. Vaskou)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

→ chronologie
→ terminaisons

3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

→ mapping et
→ classification des massifs rocheux
→ modélisation (DFN)

4 - Conclusion



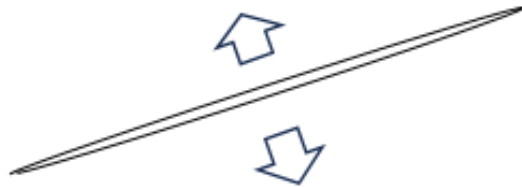
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

MODE I
(*joints* - diaclases)



Arrêt « simple » de la fracture
dans le plan de la fracture
(**endommagement limité**)

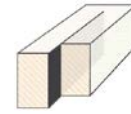




CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

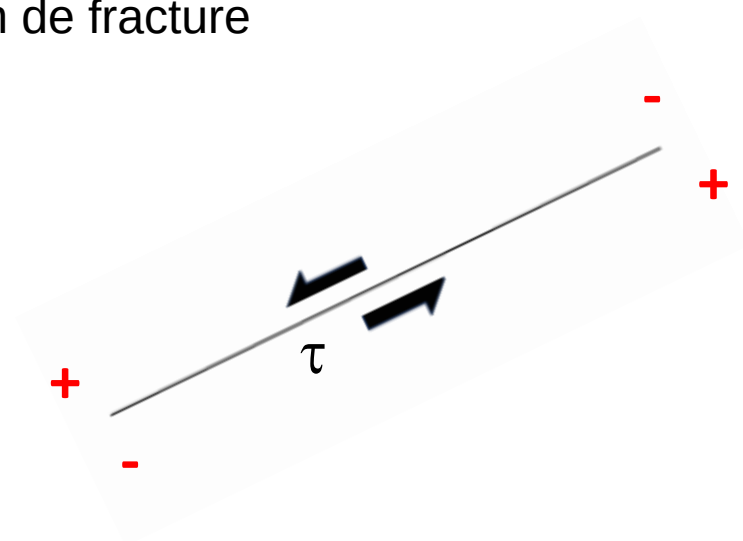
MODE II
(*shear fractures* – failles)



Arrêt « complexe » de la fracture = **endommagement fort**

➔ amortissement de la déformation

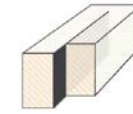
➔ création d'une (ou plusieurs) microstructure(s) en front du plan de fracture





2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

MODE II (*shear fractures* – failles)



$$\sigma_T \approx 1/10 \sigma_C$$

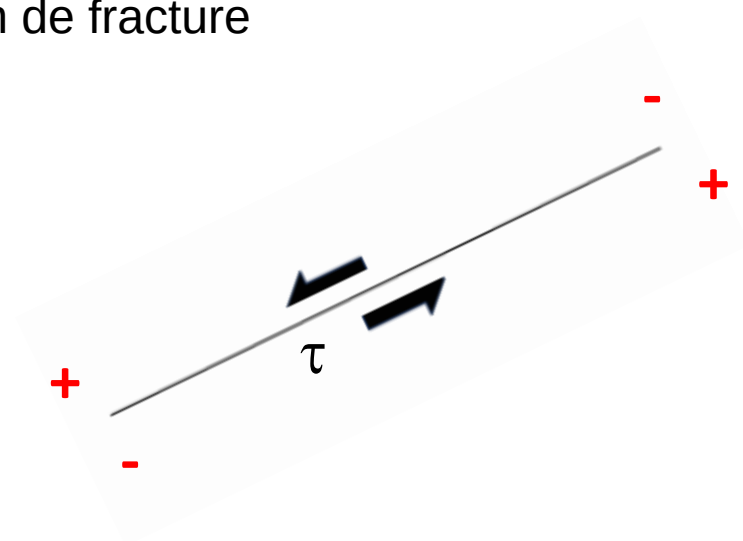
→ microstructures initiées en traction
puis évoluent en cisaillement

→ organisation en **3D**

Arrêt « complexe » de la fracture = **endommagement fort**

→ amortissement de la déformation

→ création d'une (ou plusieurs) microstructure(s) en
front du plan de fracture



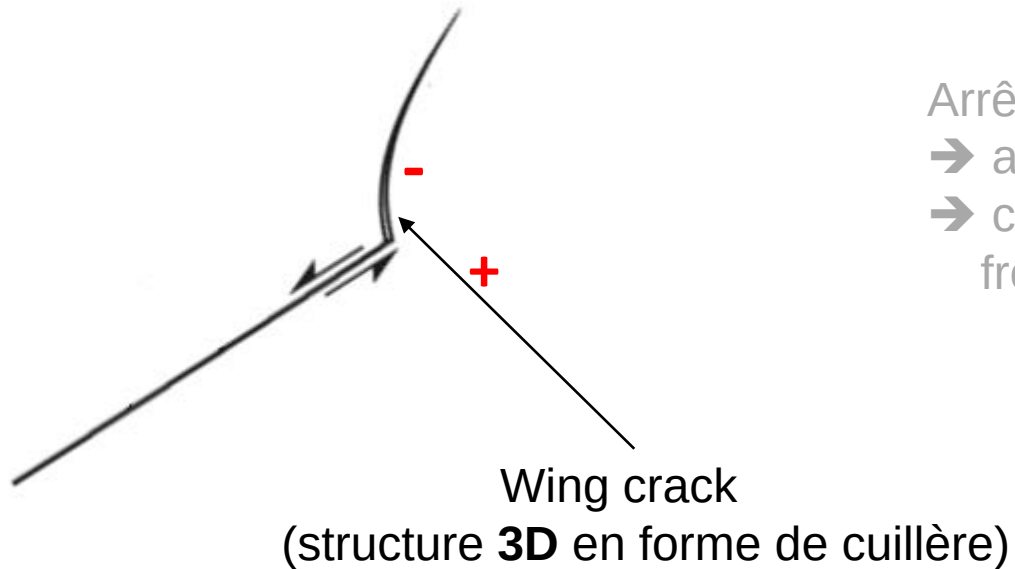
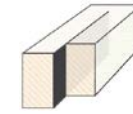


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

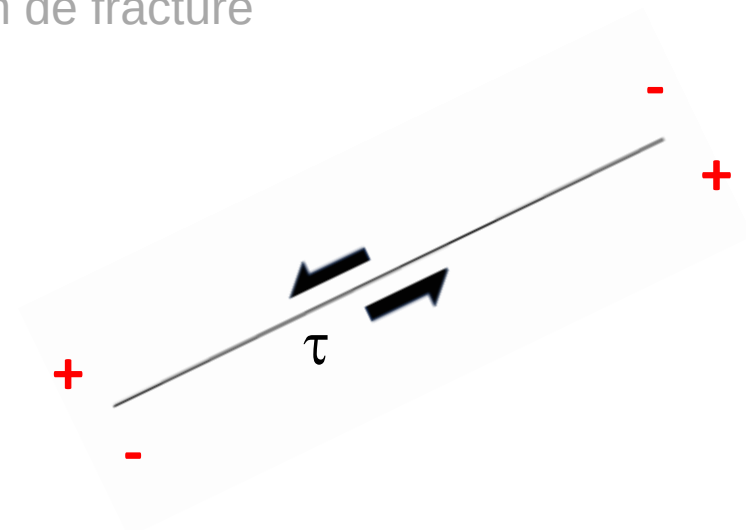
2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

Roches classiques

MODE II
(*shear fractures* – failles)



Arrêt « complexe » de la fracture = **endommagement fort**
→ amortissement de la déformation
→ création d'une (ou plusieurs) microstructure(s) en front du plan de fracture



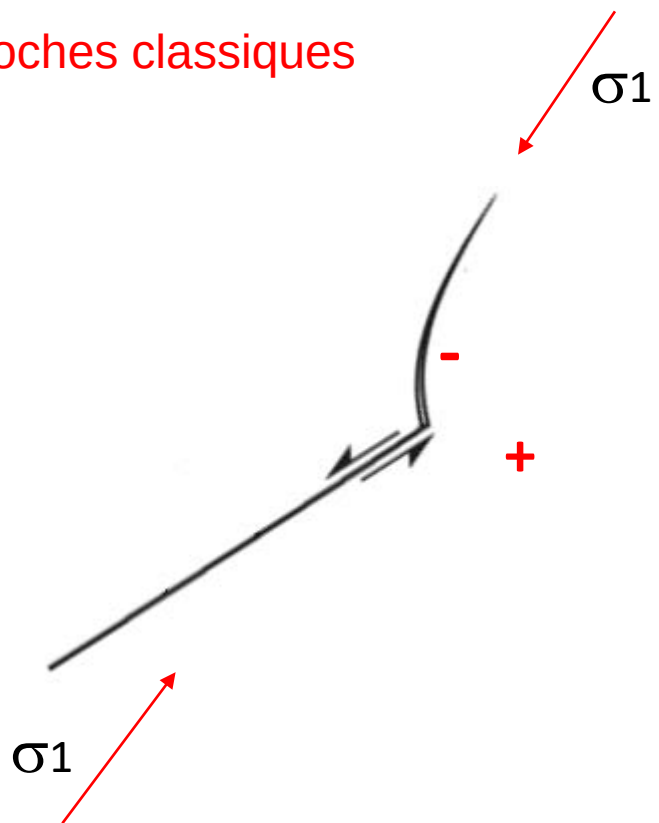
(adapté de Burg, 2016)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

Roches classiques



(adapté de Burg, 2016)

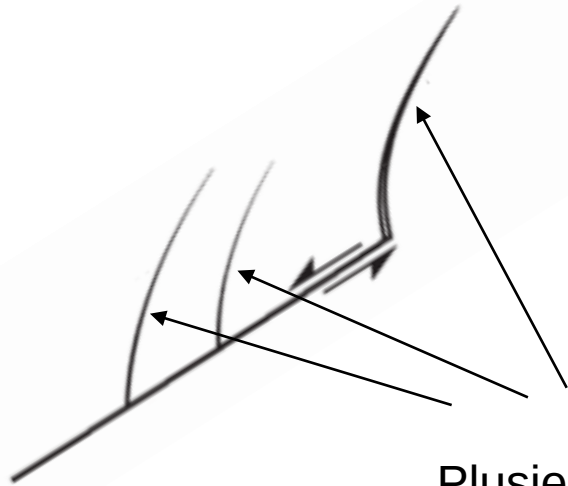


(Dyke de microgranite dans gabbro; Photo P. Vaskou)



2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

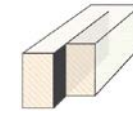
Roches classiques



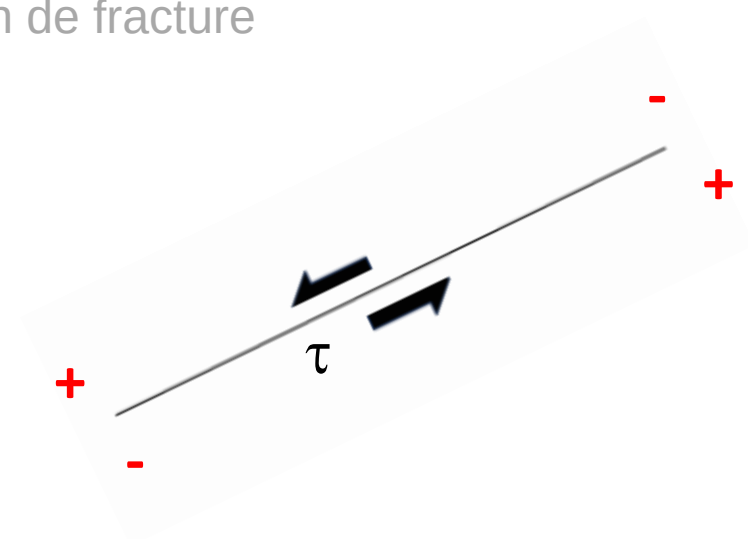
Plusieurs wing cracks
en cas de reprise de la déformation

(adapté de Burg, 2016)

MODE II (*shear fractures – failles*)



Arrêt « complexe » de la fracture = **endommagement fort**
→ amortissement de la déformation
→ création d'une (ou plusieurs) microstructure(s) en
front du plan de fracture

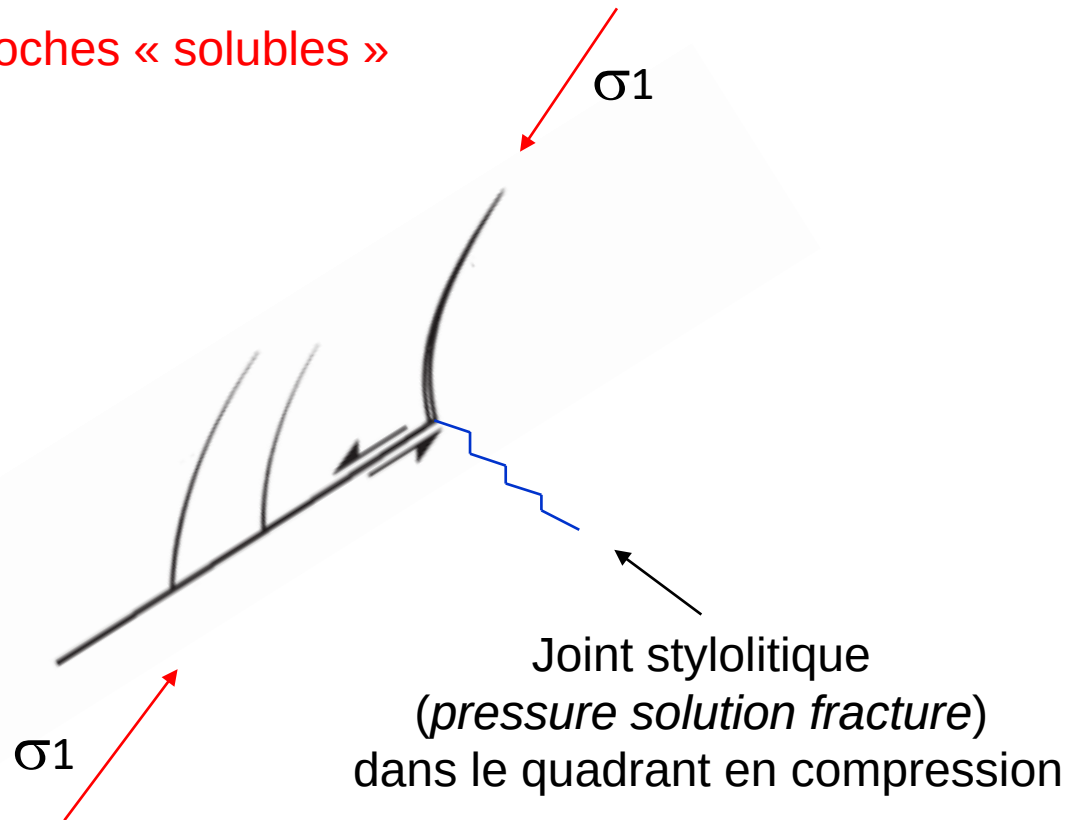




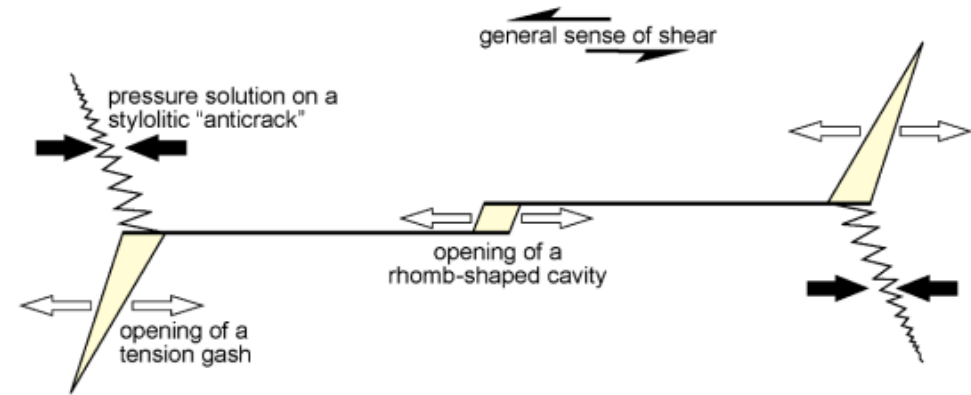
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

Roches « solubles »



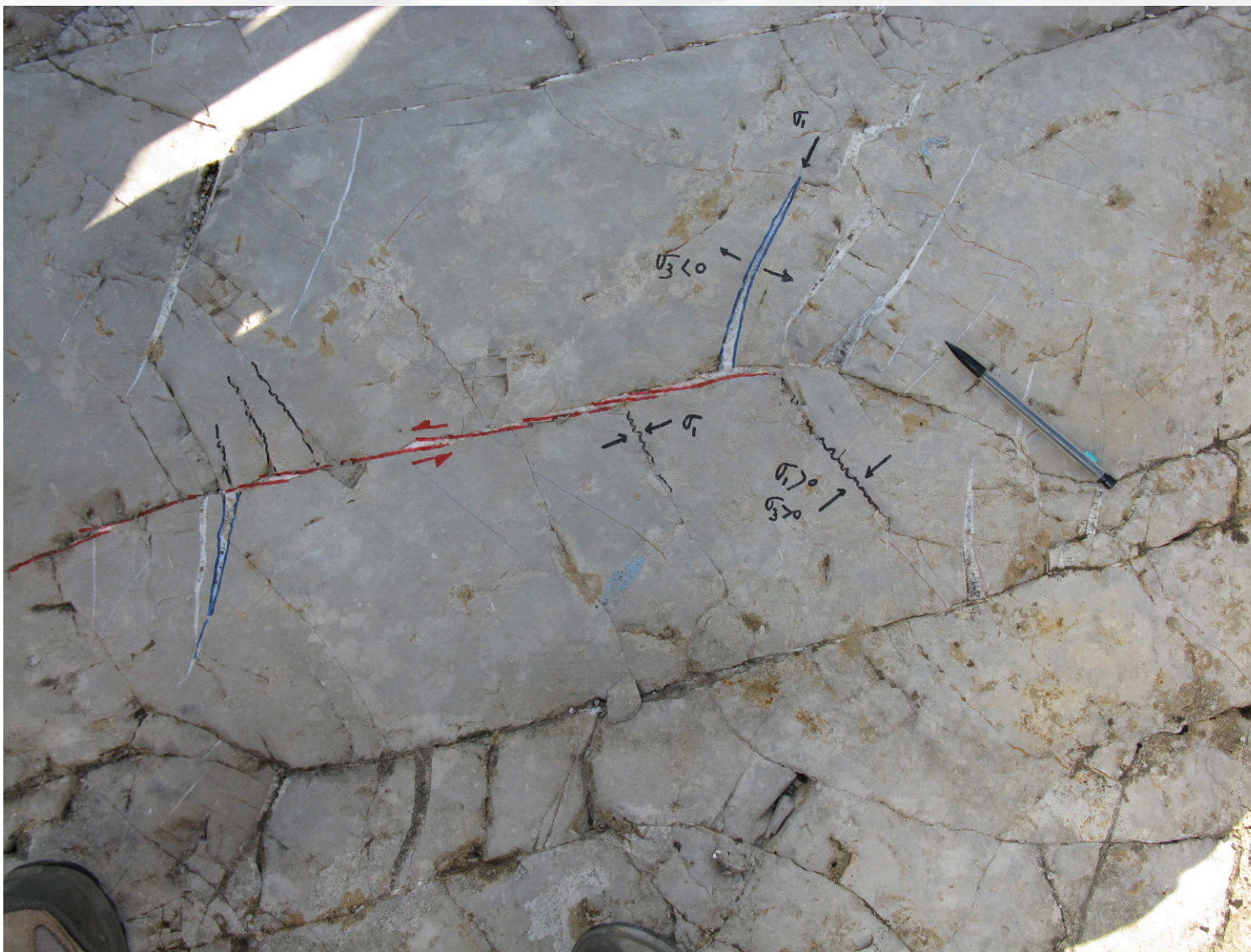
(adapté de Burg, 2016)





CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

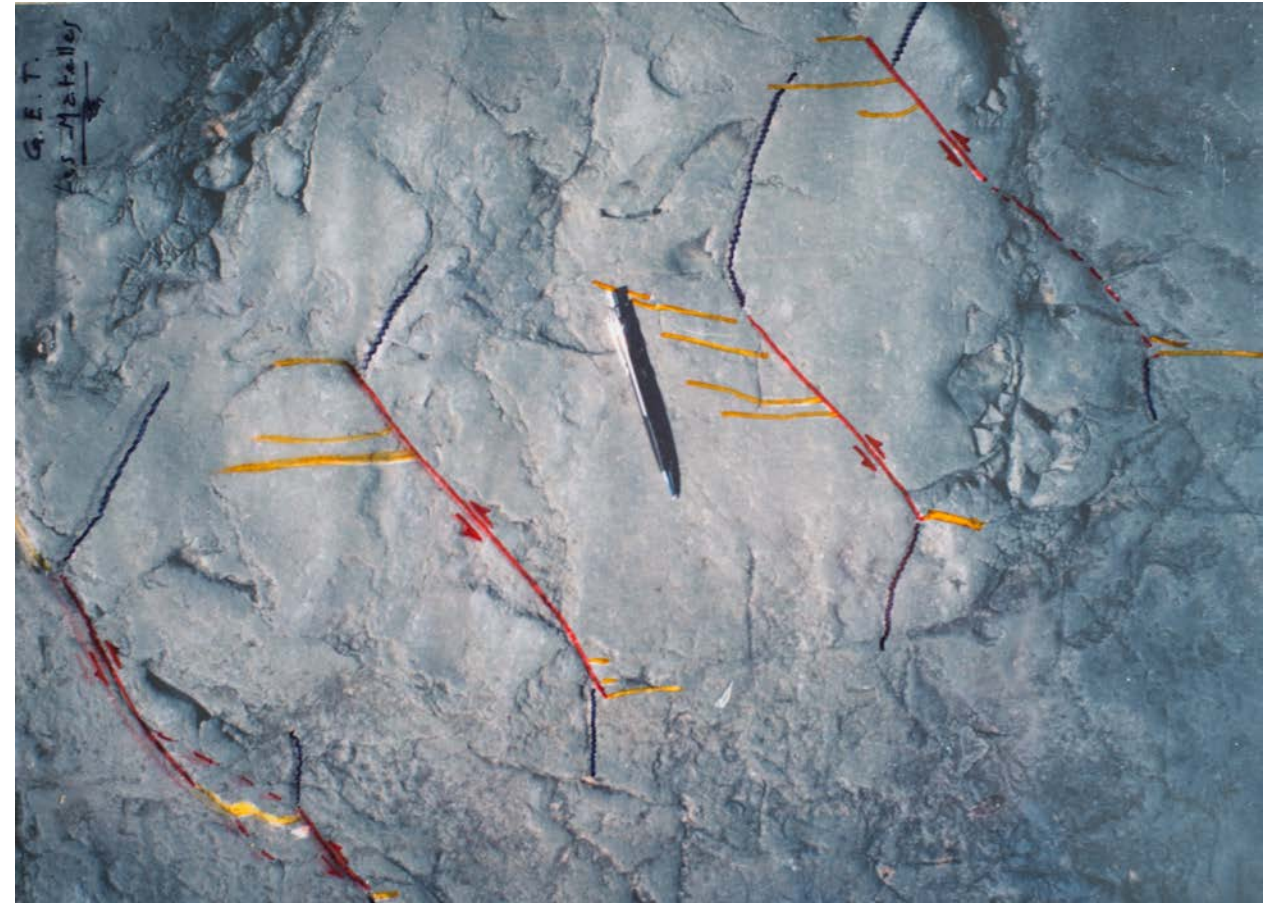


(photo Zilba,
<https://www.geodiversite.net/media179>)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES



(Photo P. Vaskou)



2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

Alors que le Wing Crack est un mécanisme de rupture unique en traction, il existe beaucoup d'autres formes d'accommodation de la déformation:

- plusieurs fractures
- traction et/ou cisaillement

Les structures les plus fréquentes sont:

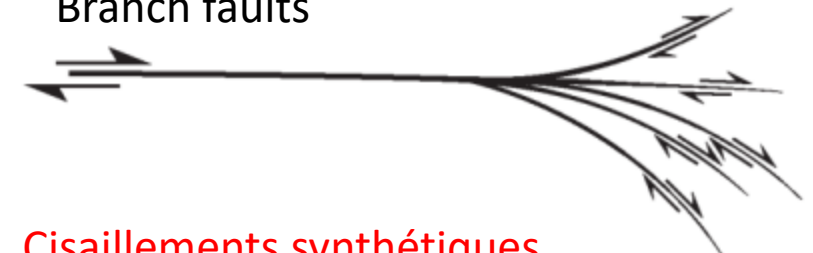
- la structure en **queue de cheval** (*horse tail splay*)
- **les fentes en échelon** (*en échelon veins /gash fractures*)

Toutes ces structures sont tri-dimensionnelles !

Structure en queue de cheval



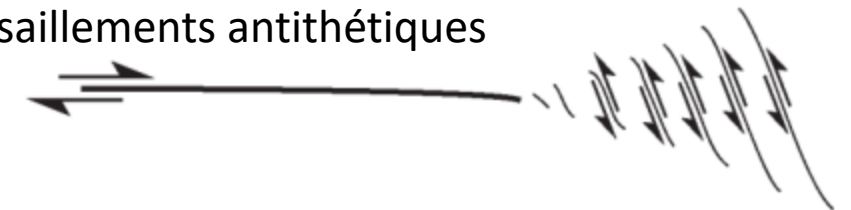
Branch faults



Cisaillements synthétiques



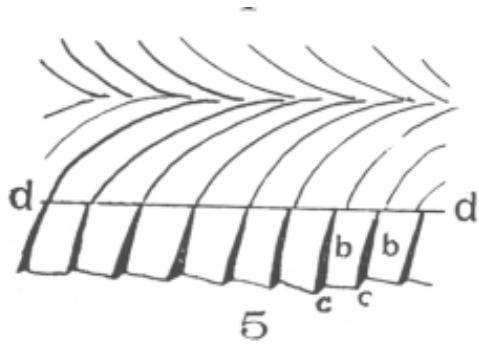
Cisaillements antithétiques



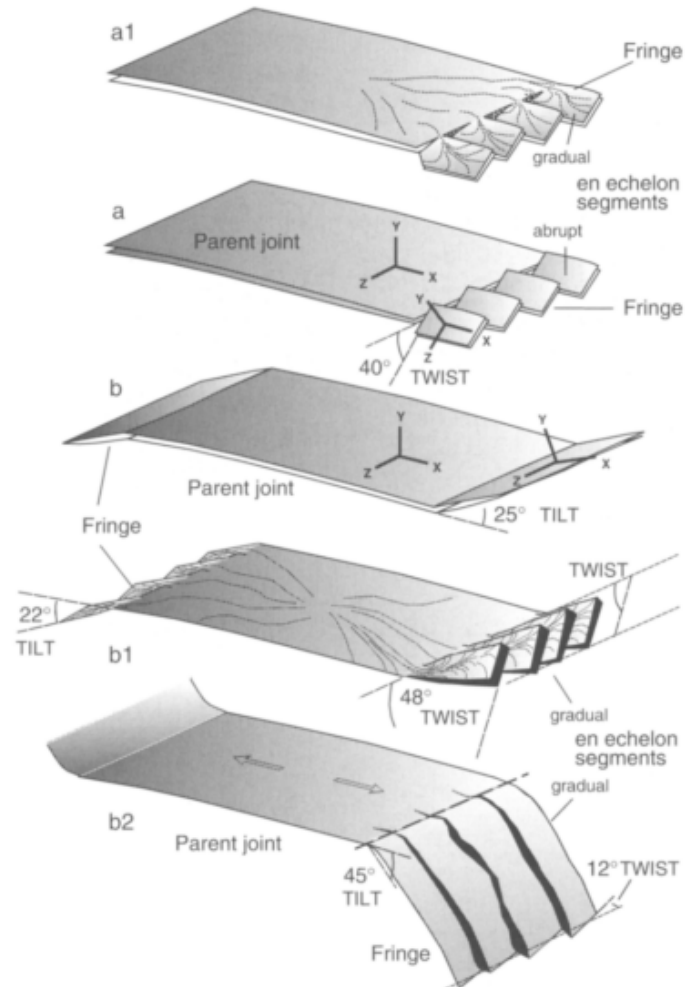
(adapté de Burg, 2016)



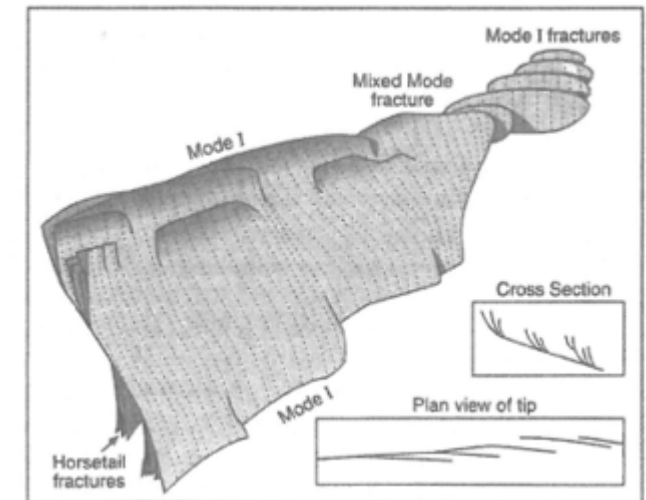
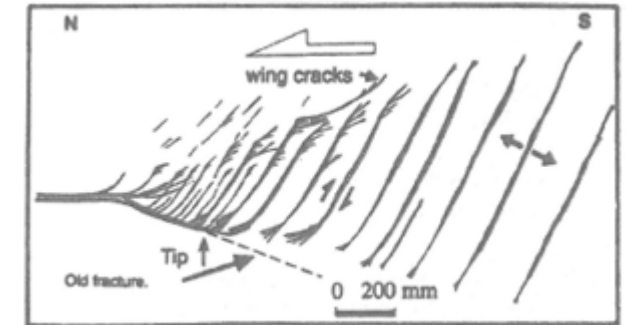
2 – TERMINAISONS DES FRACTURES



(Woodworth, 1896
in Pollard et al., 2004)



(Bankwitz & Bankwitz, 2004)



(McGrath & Davison, 1995)



2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

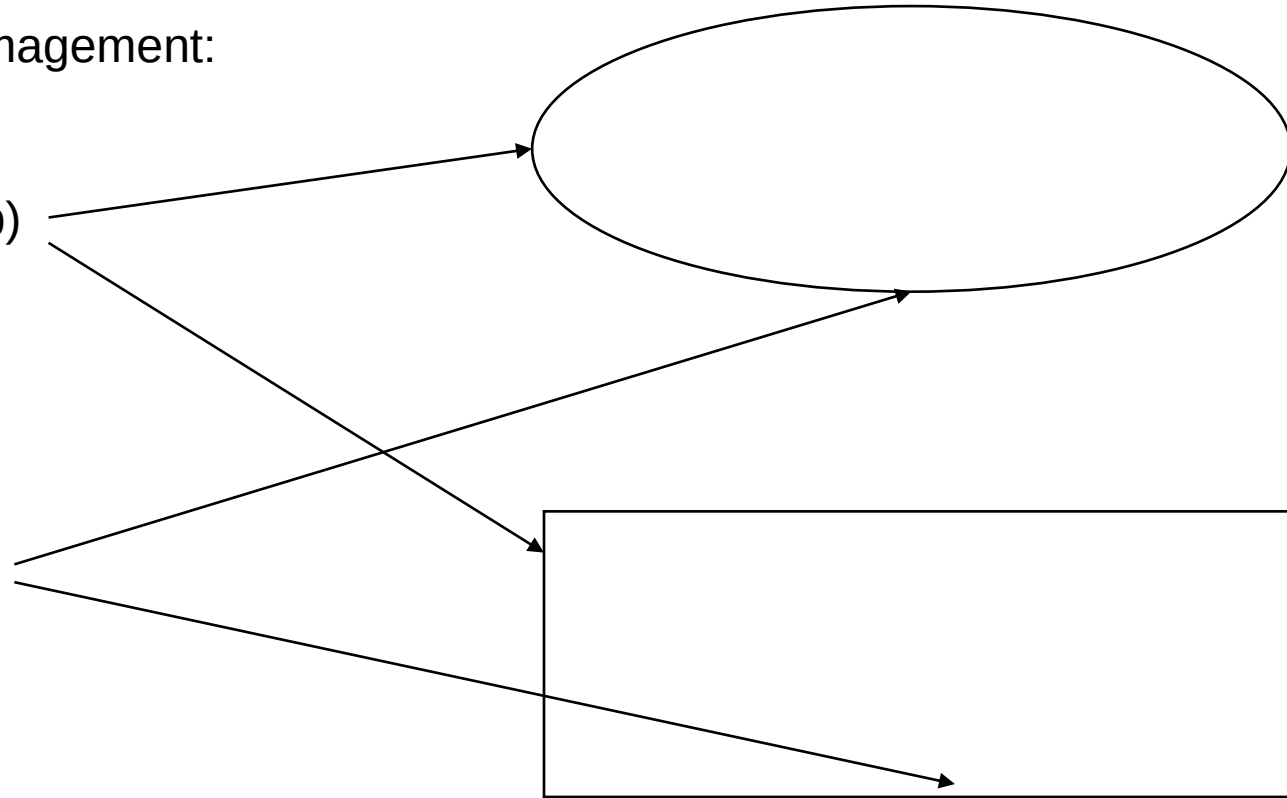
Il faut distinguer l'endommagement:

- **en front de fracture (tip)**

➔ wing cracks,
queues de cheval
branch faults

- **en bordure de fracture**

➔ fractures en échelon



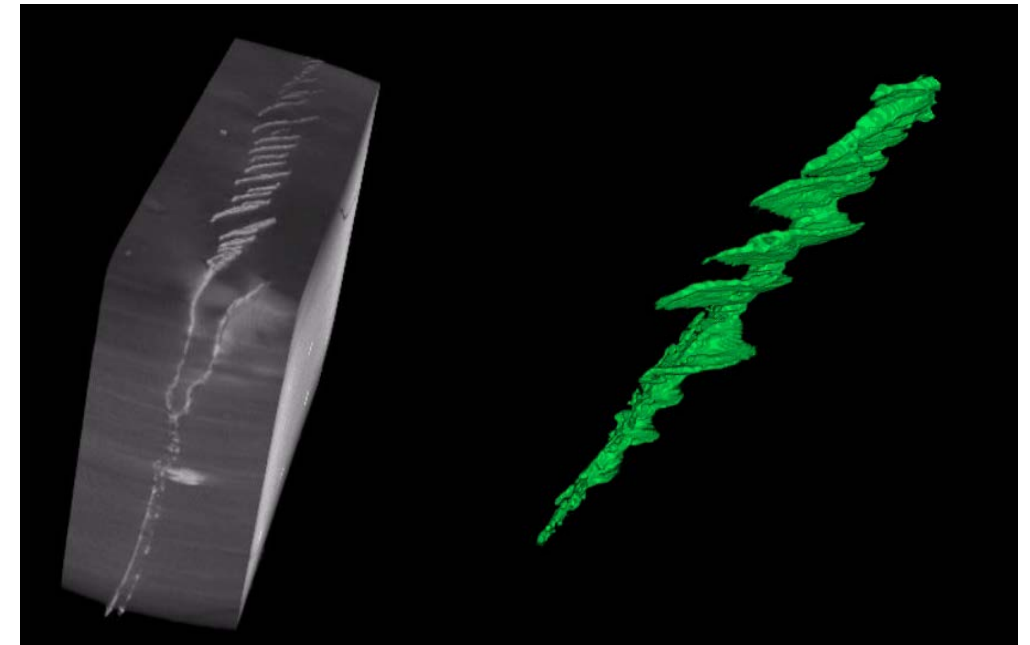


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

2 – TERMINAISONS DES FRACTURES



**Terminaison d'une bordure de fracture en
une série de fentes en échelon**



Tomographie RX (*Andrews et al. 2020*)

Galets de la Nappe des Préalpes médianes

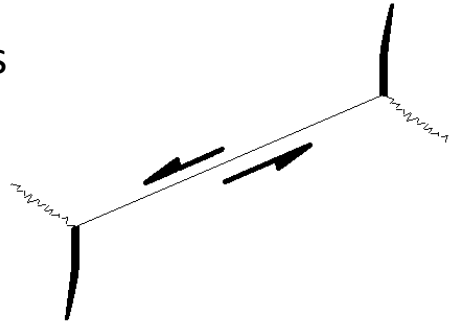
(Photos P. Vaskou)



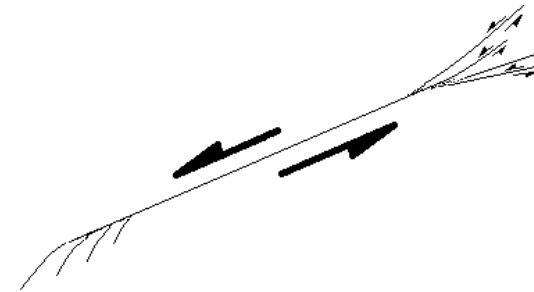
2 – TERMINAISONS DES FRACTURES

Symétrie ou asymétrie des terminaisons de fractures

Double wing cracks

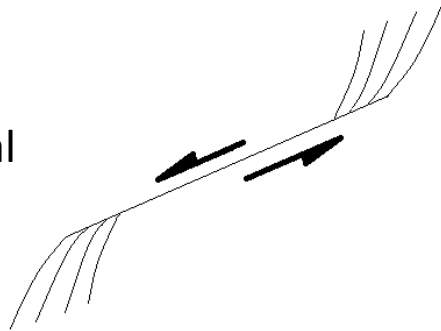


Branch faults



Queue de cheval

Double queue de cheval





SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

→ chronologie
→ terminaisons

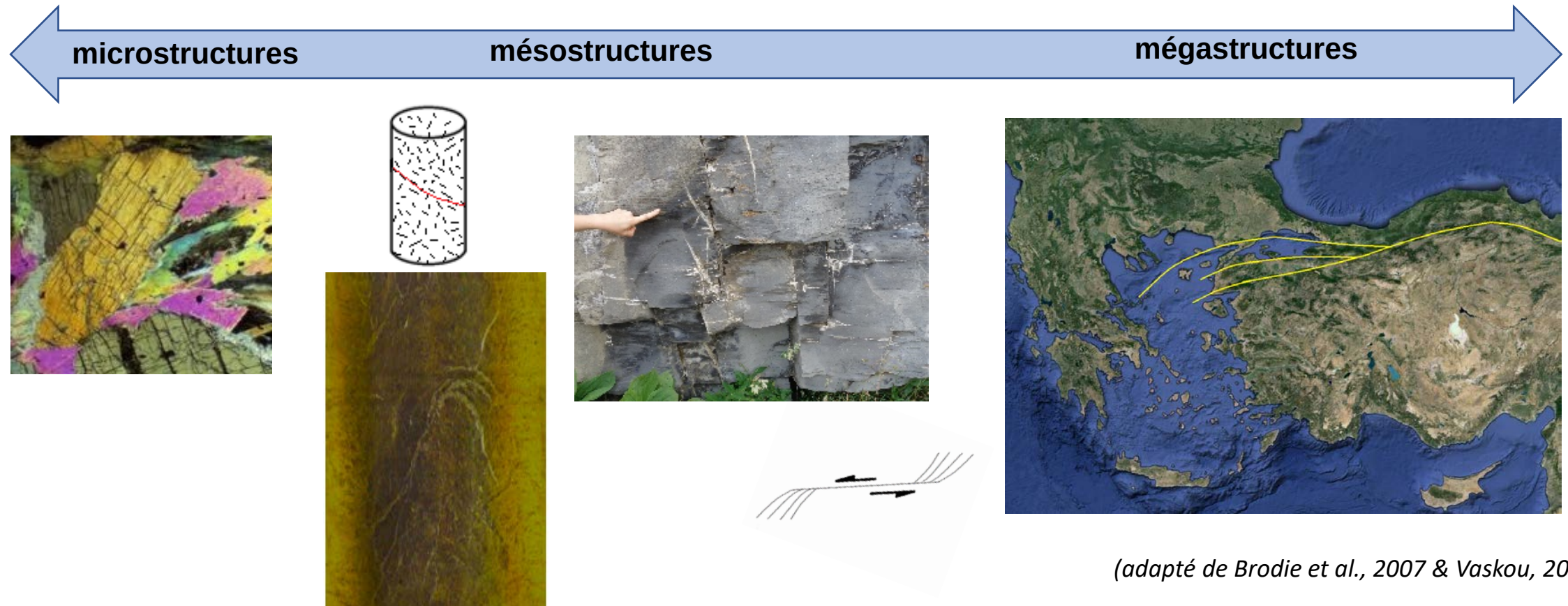
3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

→ mapping et
→ classification des massifs rocheux
→ modélisation (DFN)

4 - Conclusion

3 – UTILISATION EN MÉCANIQUE DES ROCHES

Absence d'effet d'échelle concernant la forme des structures (y compris terminaisons)



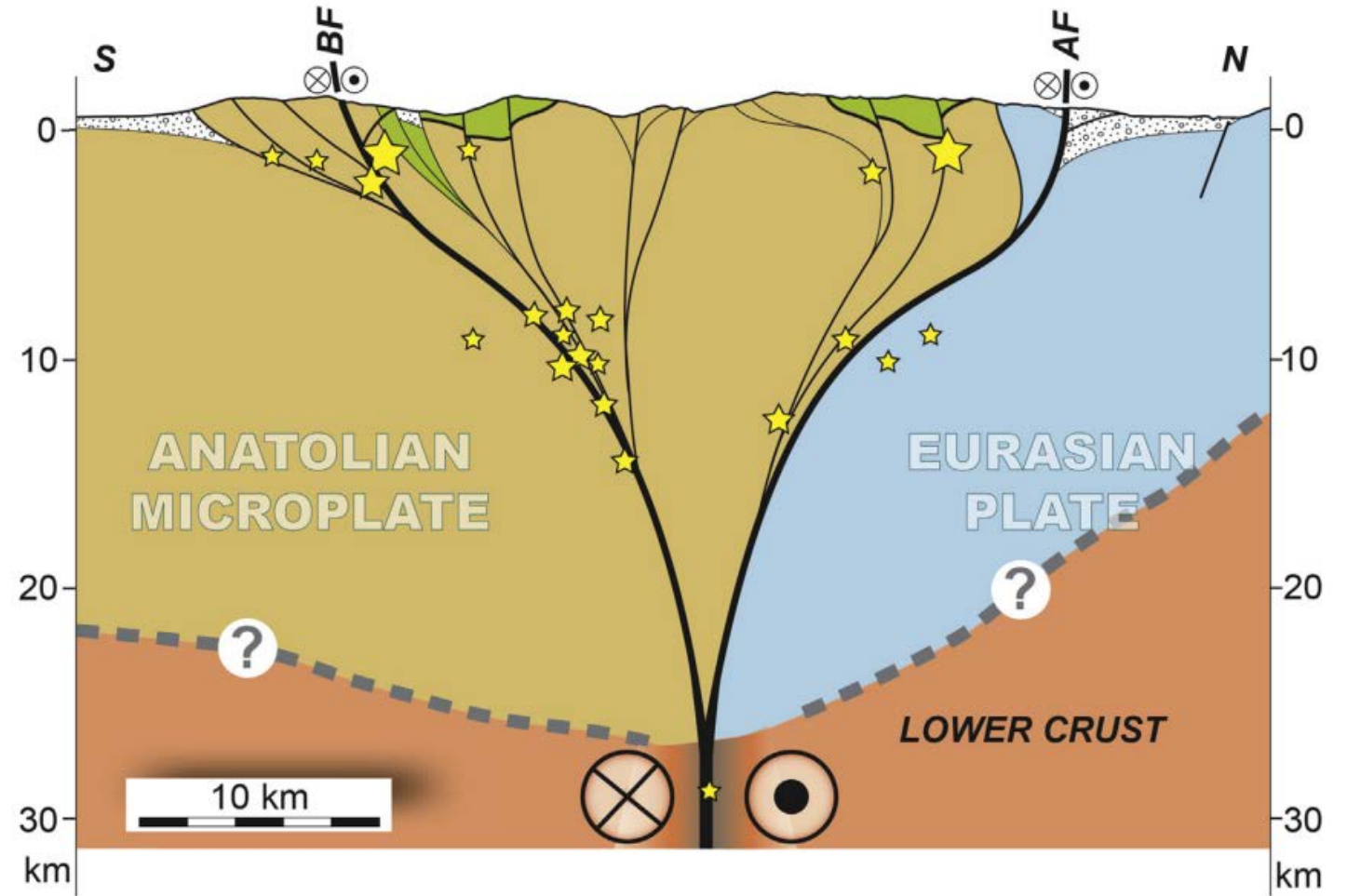


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES



(UAE - Photo Vaskou, 2015)



(Faille Nord-Anatolienne – Ellero et al., 2015)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Principales difficultés en souterrain:

- Qualité de l'air
- Eclairage insuffisant
- Hauteur
- **Temps limité**

Principe: Utiliser les formes des structures
→ Identification (type, mode, jeu, etc.)

Objectif: Aller plus vite tout en gagnant en qualité



(Photos Géostock)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

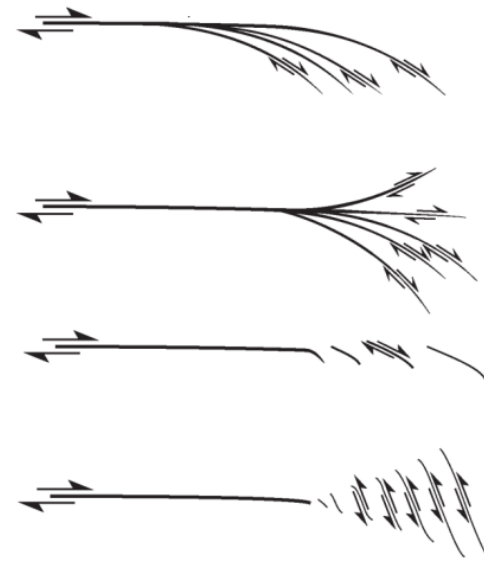
En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures

traction (Mode I)

vs.

Cisaillement (Mode II)





CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Gneiss (Karnataka, Inde)

Système de fractures
en queue de cheval



(Photo P. Vaskou)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Métasédimentaire (Jurong, Singapour)



Terminaison de la zone
de faille en queue de
cheval

Terminaison
d'une branche
secondaire
en fentes
en échelon

Plan principal
de la fracture (faille)

(Photo P. Vaskou)

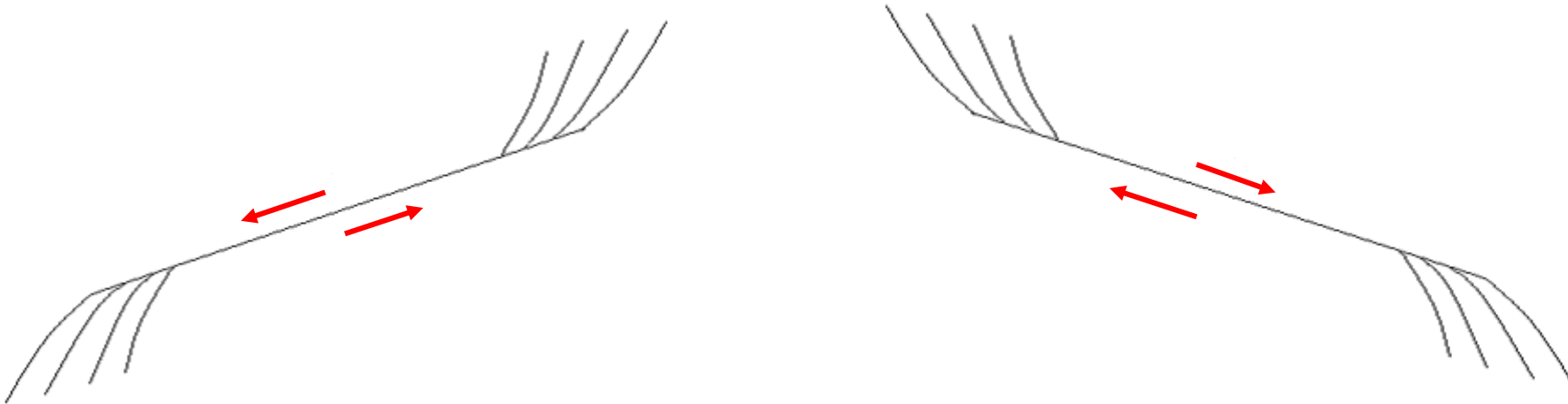


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures
- caractérisation du **movement** sur une fracture en cisaillement (même sans marqueur)





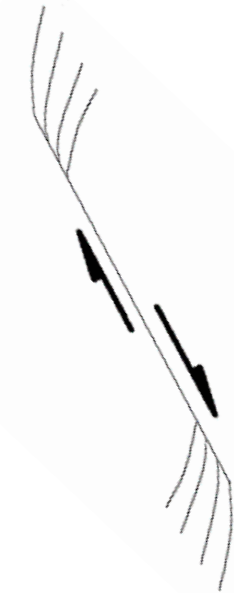
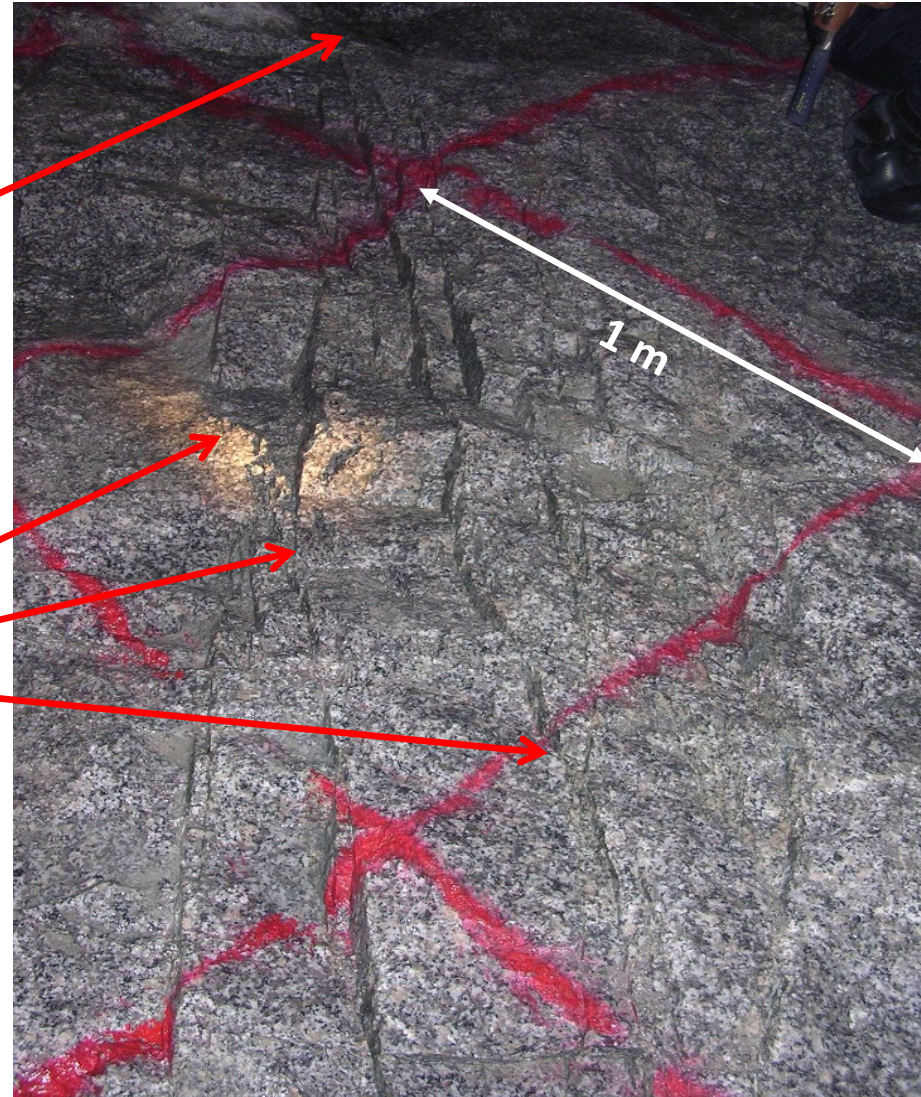
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Granite (Kurashiki, Japon)

Plan principal de la fracture

Fractures secondaires
formant un système
en queue de cheval



(Photo P. Vaskou)



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures
- caractérisation du **movement** sur une fracture en cisaillement (même sans marqueur)
- caractérisation des **surfaces** des fractures (→ stabilité)

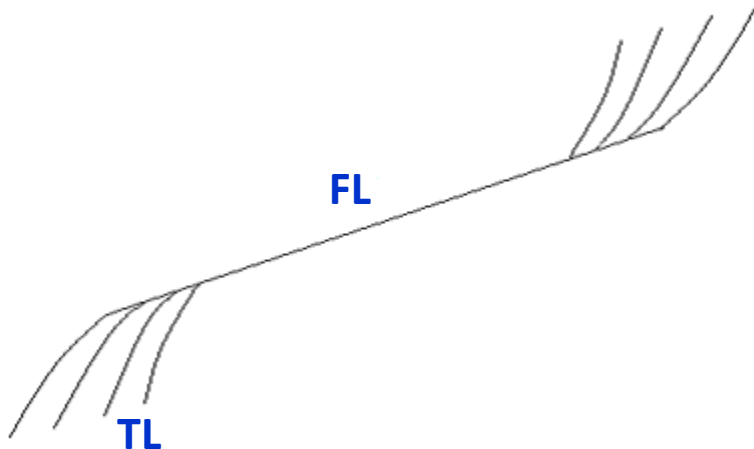
	Traction (Mode I) Surface rugueuse plane	Cisaillement (Mode II) Surface lisse (L <) striée (L >)	
Q-system Joint roughness	Jr = 1.5	Jr = 1	Jr = 0.5
RMR 4-Conditions of discontinuities Roughness rating =	5 ou 6	1	0



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures
- caractérisation du **movement** sur une fracture en cisaillement (même sans marqueur)
- caractérisation des **surfaces** des fractures (→ stabilité)
- estimation (grossière) de la **longueur** d'une fracture en cisaillement



$$FL \approx n \times TL$$

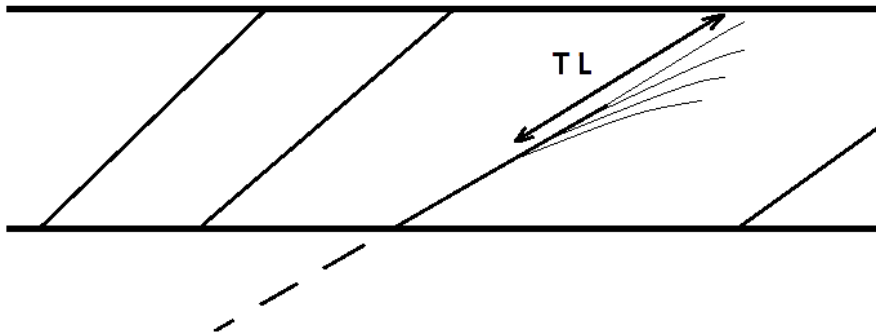
(n de 5 à 10)



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures
- caractérisation du **movement** sur une fracture en cisaillement (même sans marqueur)
- caractérisation des **surfaces** des fractures (→ stabilité)
- estimation (grossière) de la **longueur** d'une fracture en cisaillement



$$FL \approx n \times TL$$

(n de 5 à 10)

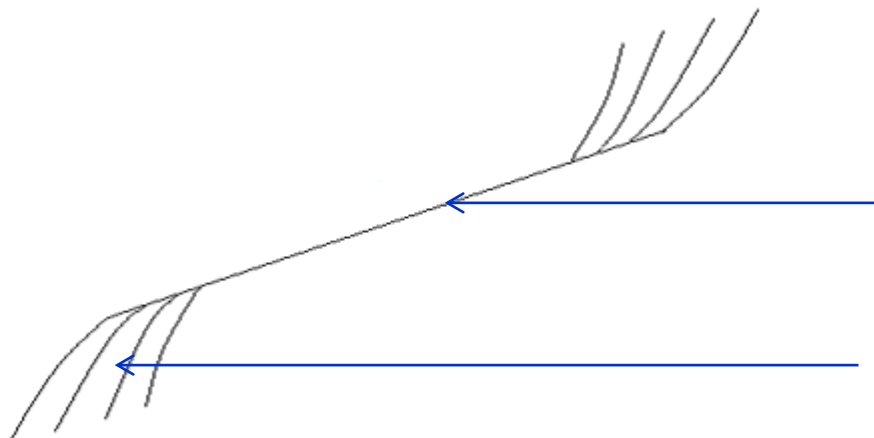
Utilisation dans le **RMR** 4-Conditions of discontinuities: Discontinuity Length (persistence)



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel, les observation des structures géologiques permettent de mettre en evidence, très rapidement, différents paramètres :

- **origine** des fractures
- caractérisation du **movement** sur une fracture en cisaillement (même sans marqueur)
- caractérisation des **surfaces** des fractures (→ stabilité)
- estimation (grossière) de la **longueur** d'une fracture en cisaillement
- **hiérarchisation** des fractures (fracture principale vs. fracture secondaire)



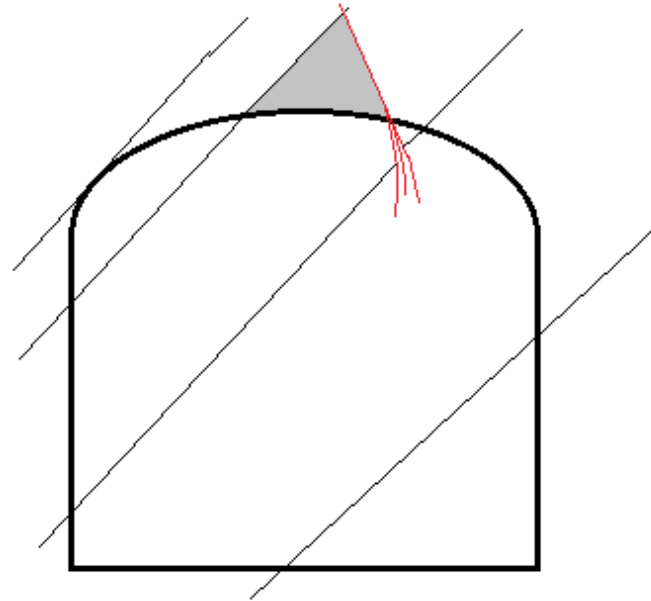
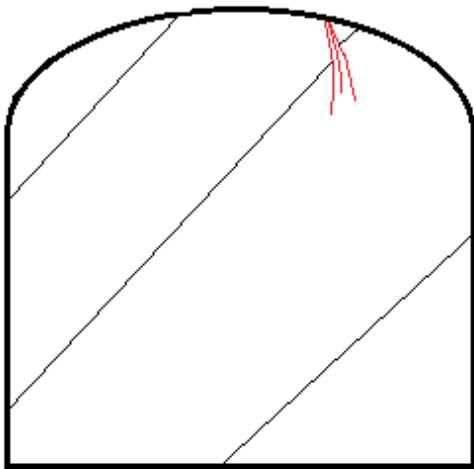
Fracture **principale** (comptabilisée dans le J_n)

Fracture **secondaire** (prise en tant que random)



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Exemple d'impact sur la stabilité en tunnel



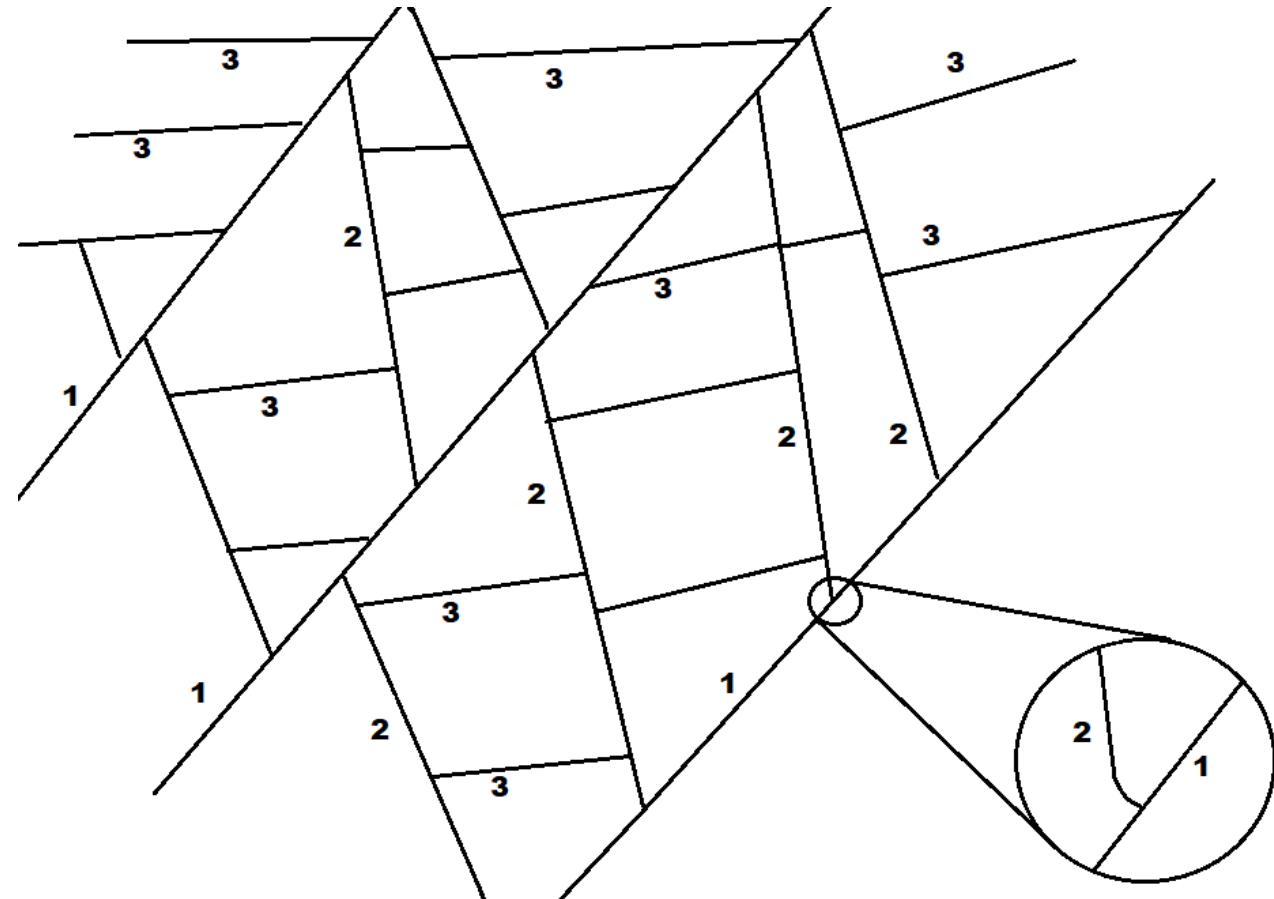


CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Chronologie des fractures

- 1 ↑ + ancien, + long, $K >$
- 2
- 3 ↓ + récent, + court, $K <$





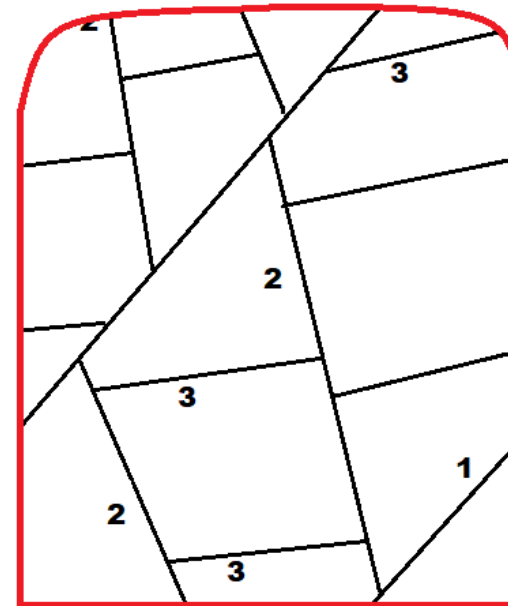
3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

En tunnel:

Il n'est pas évident sur une surface limitée
de repérer les fractures les plus longues
(persistentes)

mais 2 s'arrête sur 1
 3 s'arrête sur 2

➔ Ordre $1 > 2 > 3$





CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

→ chronologie
→ terminaisons

3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

→ mapping et
→ classification des massifs rocheux
→ modélisation (DFN)

4 - Conclusion



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Modélisation (H ou H-M)



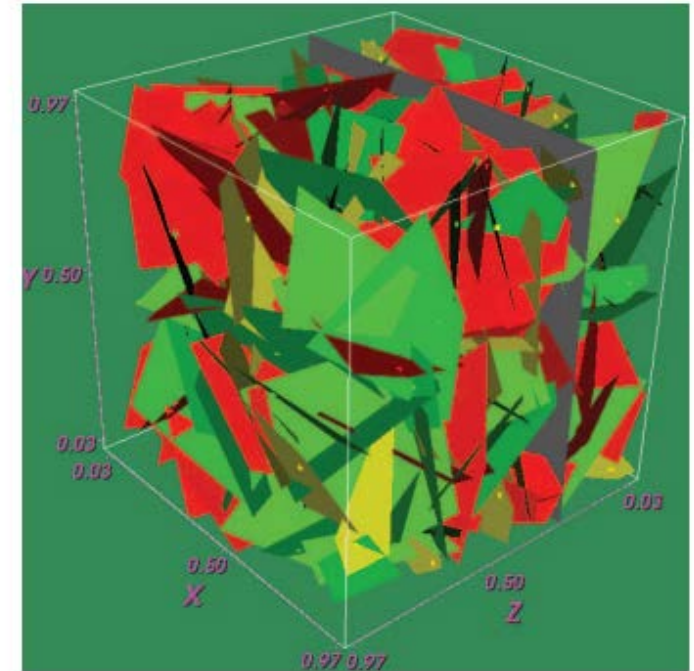
(Photo P. Vaskou)



Modélisation (H ou H-M)

Dans les modèles couplés (H-M) on utilise de plus en plus des modèles de type DFN (**Discrete Fracture Network**)

- ➔ Génération de familles de fractures (orientation, espacement, longueur)
Génération souvent stochastique
- ➔ Effet des contraintes sur les plans de fractures
- ➔ Effet des contacts entre familles de fractures sur la conductivité hydraulique

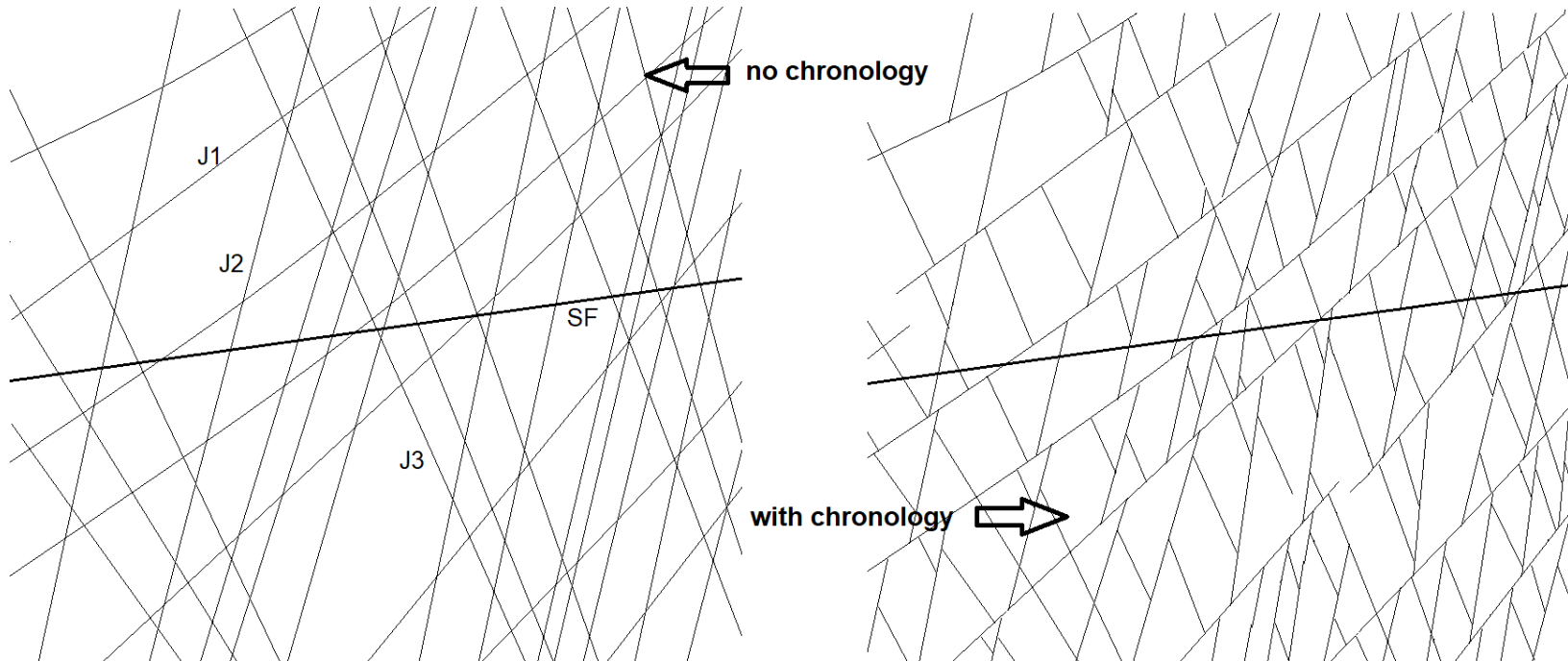


(Diaz General et al., 2012)



Modélisation (H ou H-M)

Comparaison approche **stochastique** et approche **déterministe** (structurale avec chronologie)
avec mêmes nombre de familles, même espacement, mêmes orientations

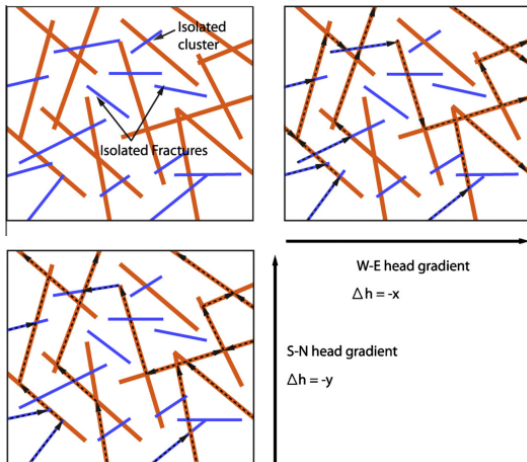
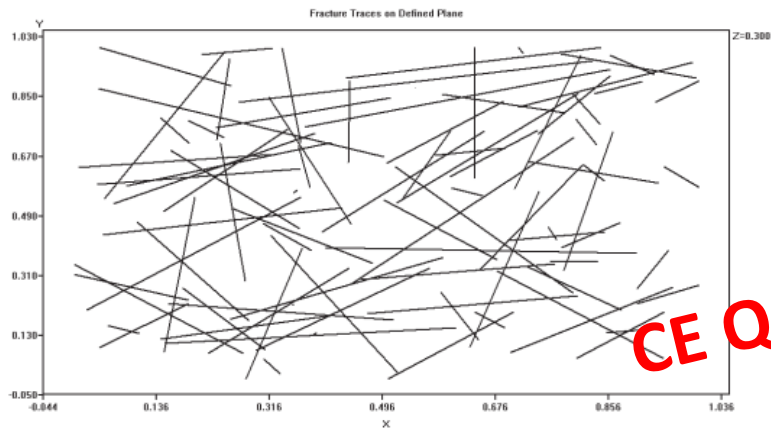




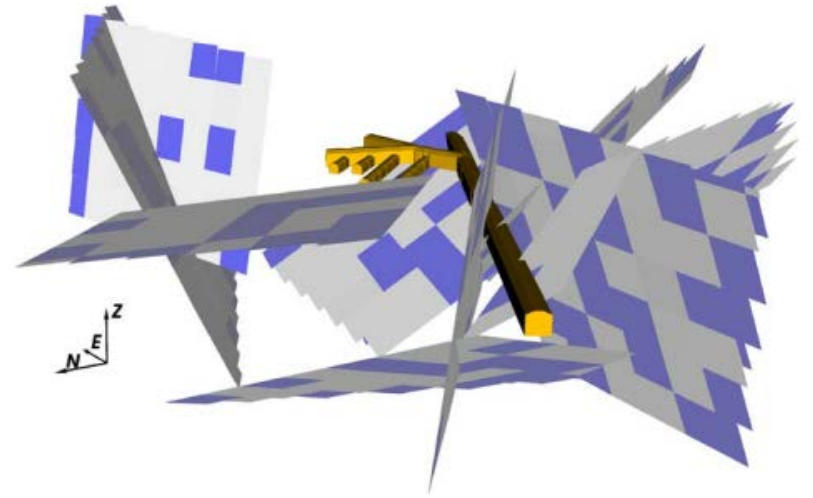
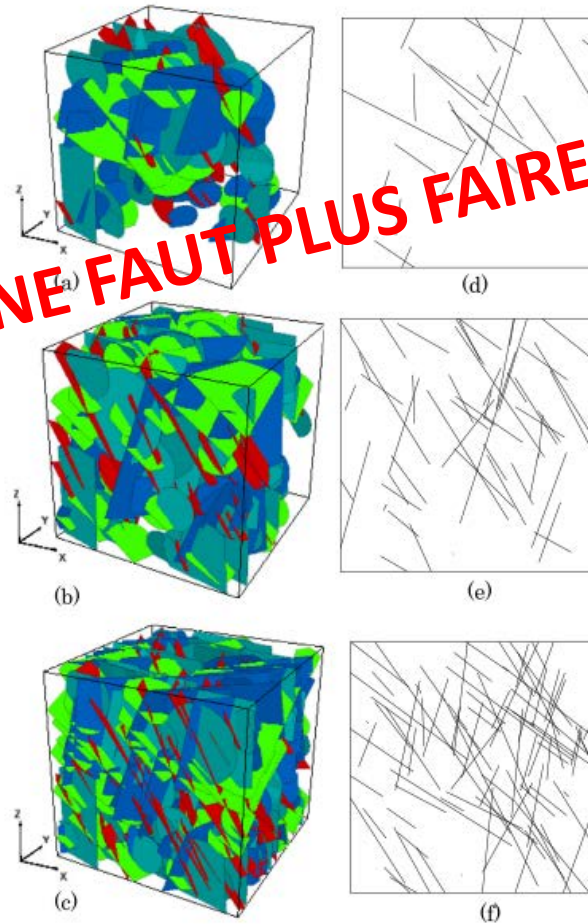
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Modélisation (H ou H-M)



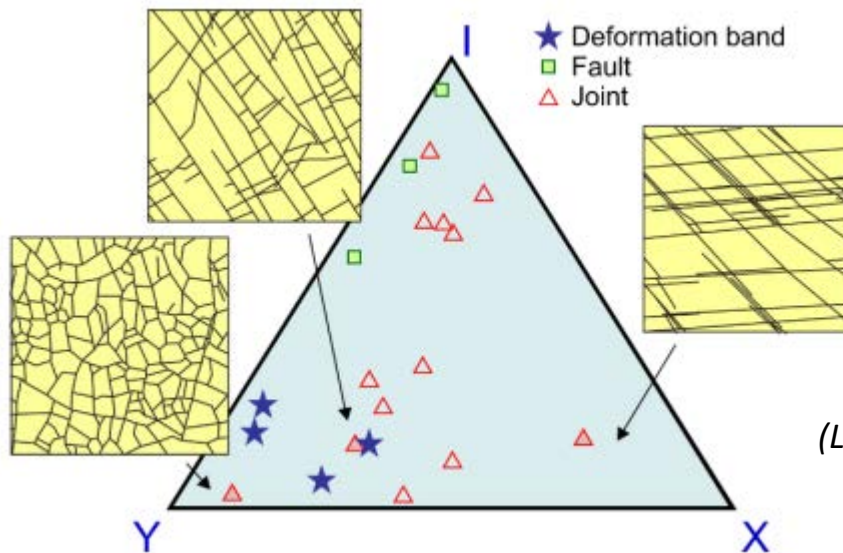
CE QU'IL NE FAUT PLUS FAIRE !



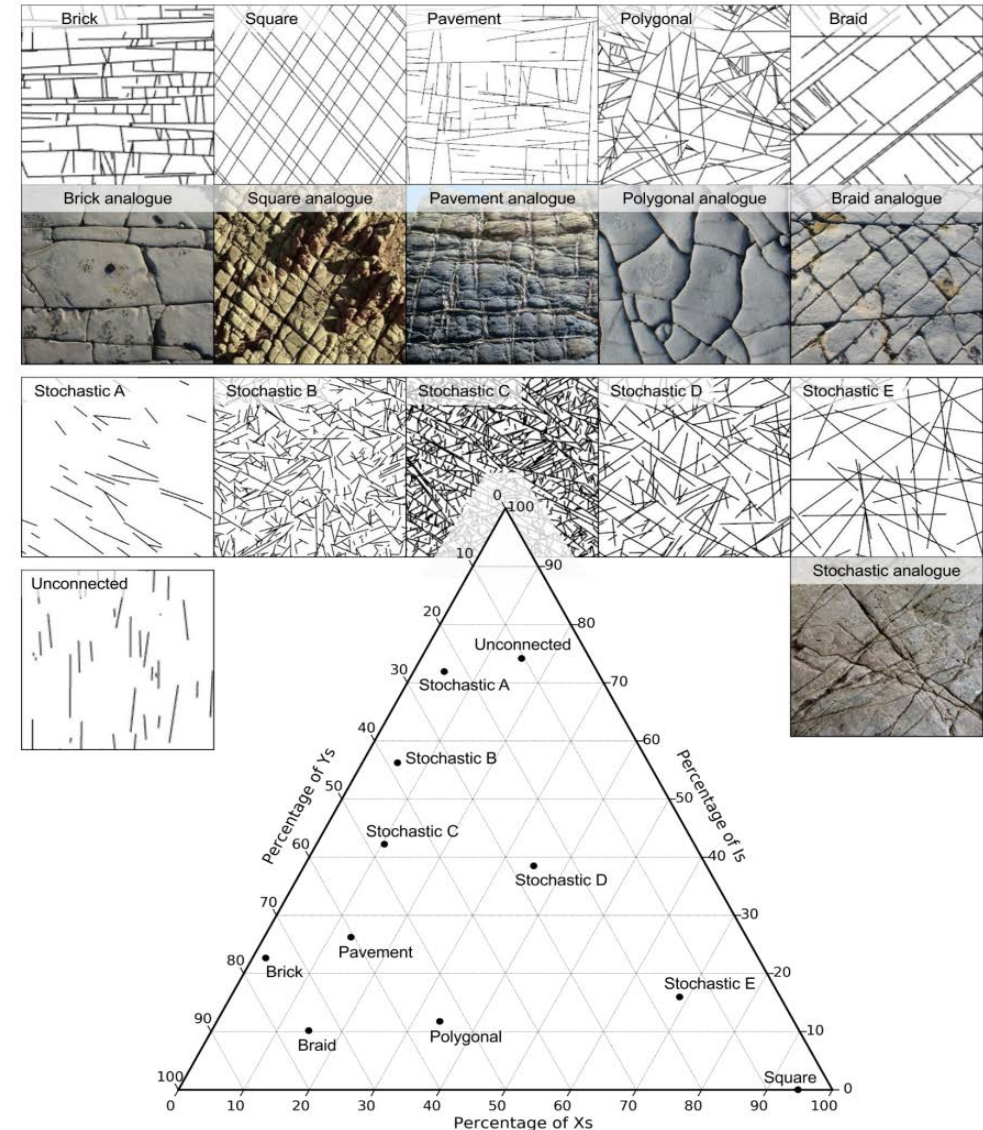
3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Modélisation (H ou H-M)

Beaucoup d'efforts ces dernières années,
au niveau des terminaisons/intersections de fractures



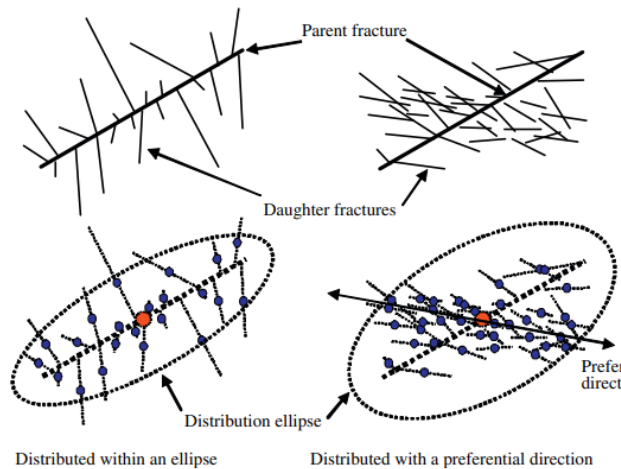
(Libby et al. 2019)



3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

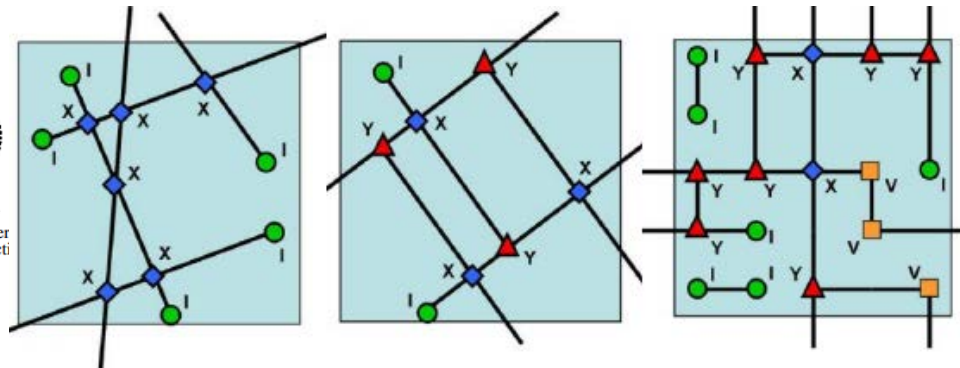
Modélisation (H ou H-M)

Beaucoup d'efforts ces dernières années,
au niveau des terminaisons/intersections de fractures

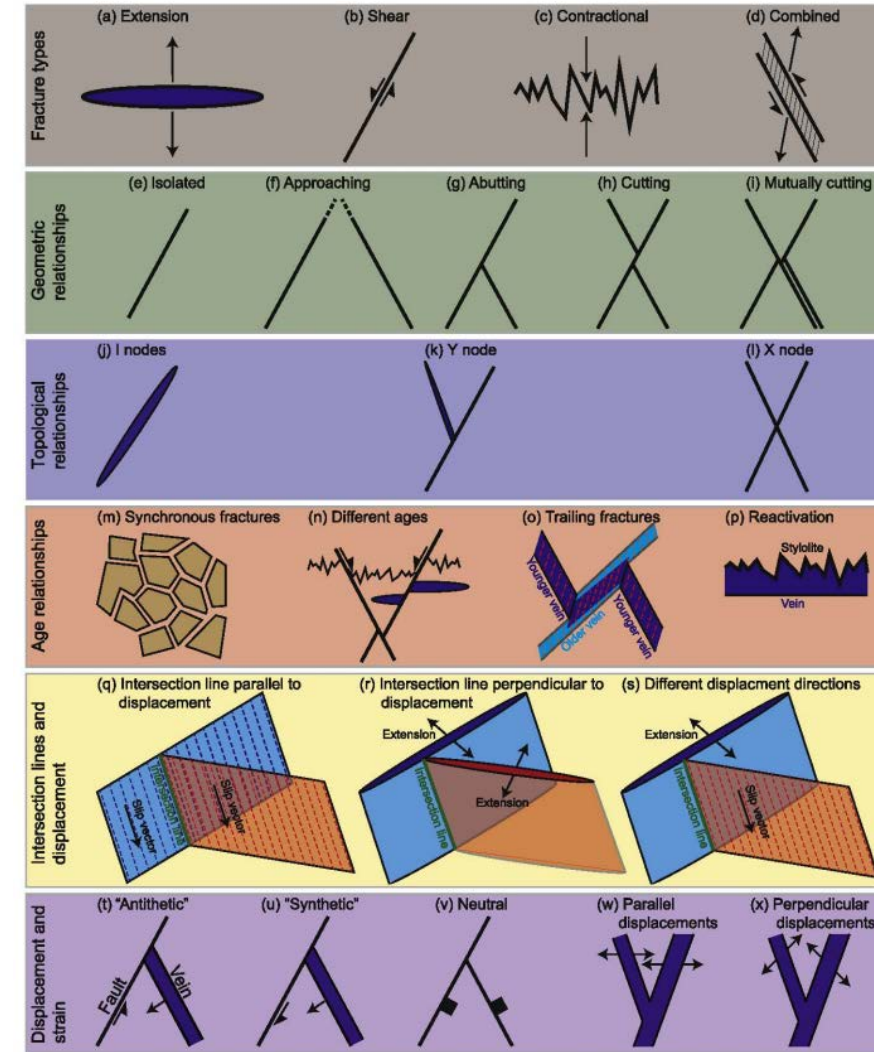


par **filiation**
(parent, enfant)

(Xu & Dowd, 2009)



Par topologie de **forme** (X, Y, V, I)



(Peacock et al., 2018)



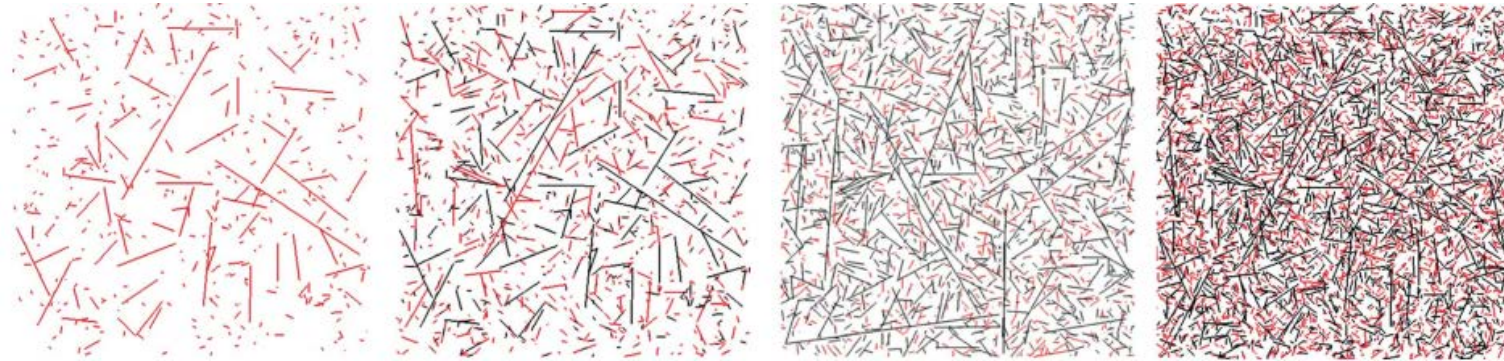
CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

3 – UTILISATION EN MECANIQUE DES ROCHES

Modélisation (H ou H-M)

Et les efforts commencent à porter leurs fruits, y compris dans des logiciels à vocation commerciale

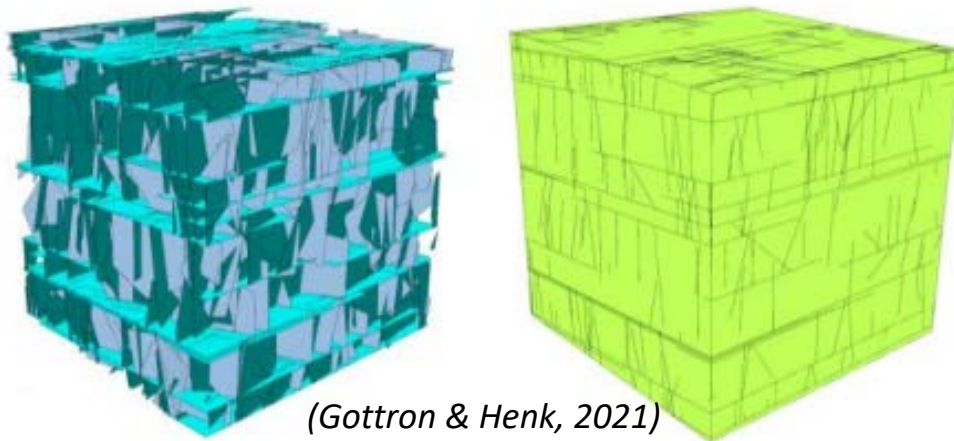
Impact de la nucléation des fractures sur le DFN



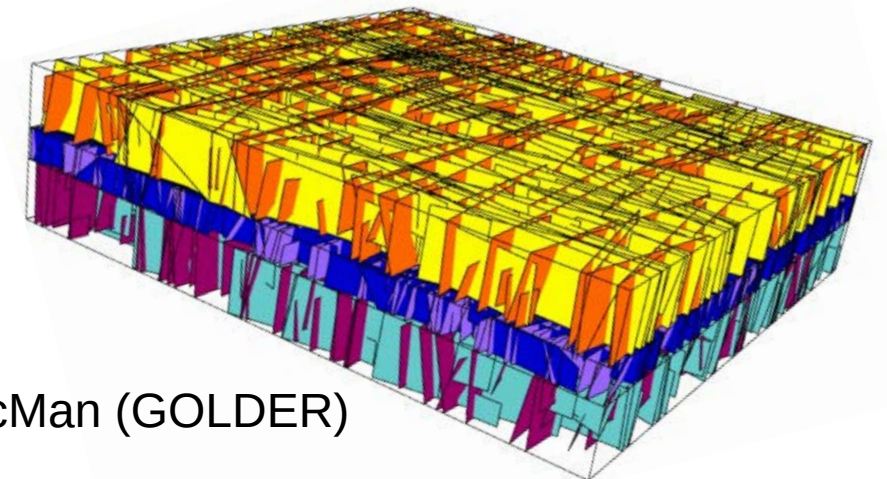
DFN.Lab

(Davy et al., 2013)

DFN depuis données de laser scanning terrestre



(Gottron & Henk, 2021)



FracMan (GOLDER)



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

SOMMAIRE

1 - Introduction: la géologie structurale c'est quoi ?

2 - Deux aspects structuraux
concernant les fractures

→ chronologie
→ terminaisons

3 - Utilisation en
Mécanique des Roches

→ mapping et
→ classification des massifs rocheux
→ modélisation (DFN)

4 - Conclusion



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

4 – CONCLUSION

Quelques exemples limités au domaine cassant...

... beaucoup d'autres concepts et beaucoup d'autres applications
(surtout dans le domaine de la modélisation)

**La Géologie Structurale constitue (encore)
un réel vecteur d'innovation et de développement !**



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES

4 – CONCLUSION

The Initiation, Propagation, and Arrest of Joints and Other Fractures

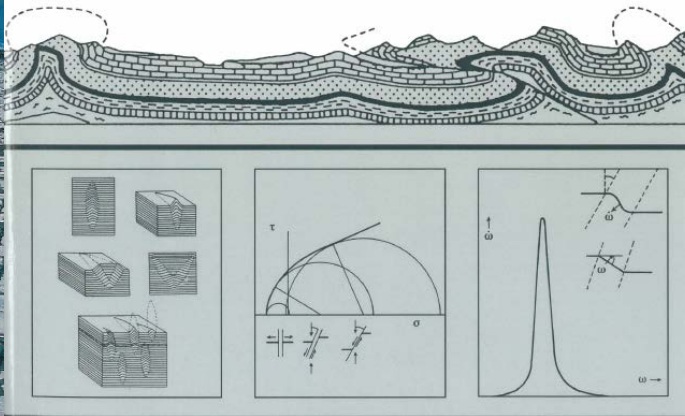
Edited by
J. W. Cosgrove and T. Engelder



Geological Society
Special Publication 231



ANALYSIS OF GEOLOGICAL STRUCTURES



N.J. PRICE and J.W. COSGROVE

ROCK FAILURE MECHANISMS EXPLAINED AND ILLUSTRATED

CHUN'AN TANG & JOHN A. HUDSON

