

CONFERENCE TECHNIQUE



9 OCTOBRE 2025

MECANIQUE DES ROCHES, TUNNELS ET EUROCODES

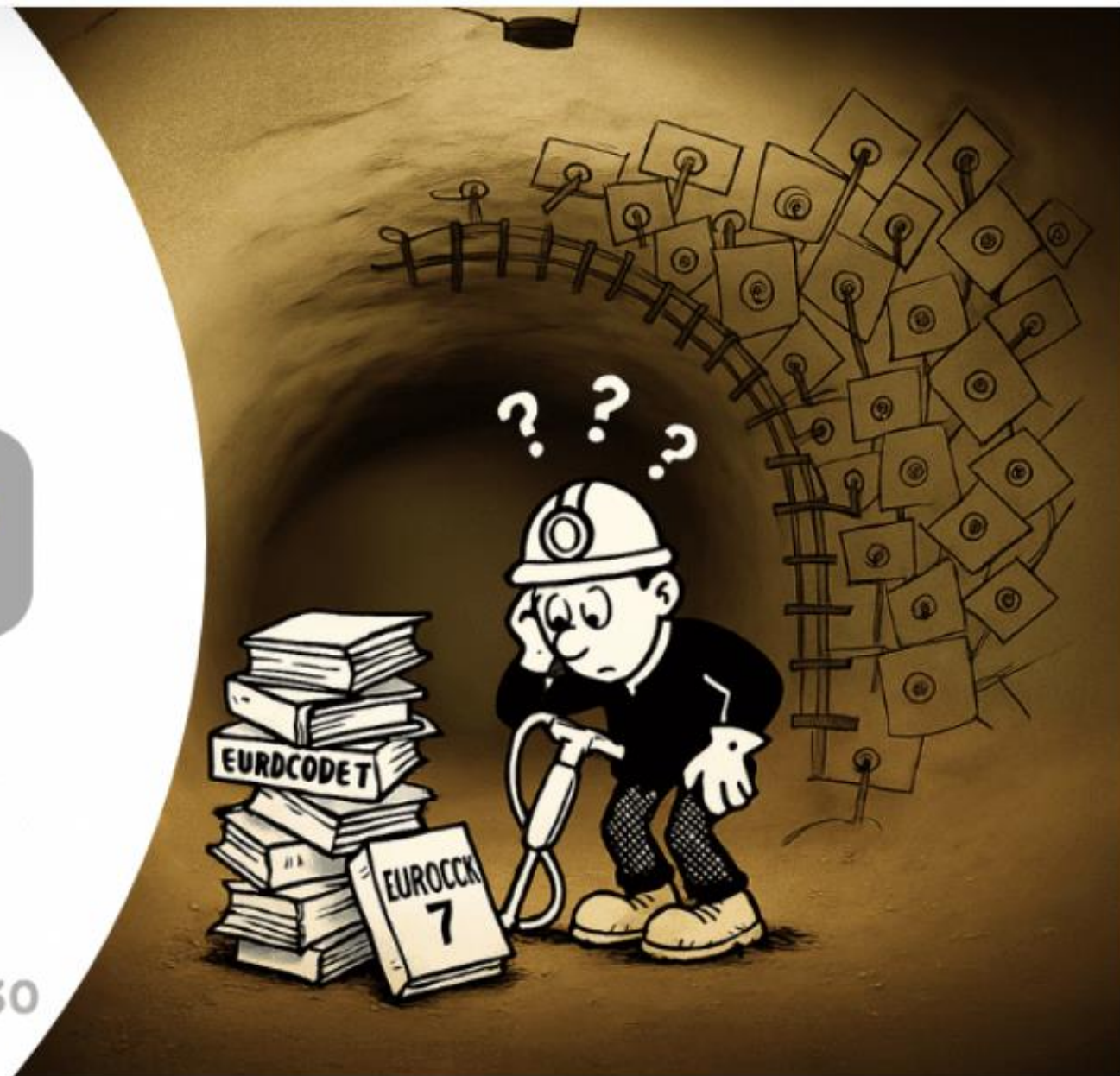
Co-organisé par



Ecole des Mines
60 Bd Saint Michel
75006 PARIS



A partir de 13:30





Muriel GASC

(Cerema, présidente du Conseil du CFMR)

Accueil et informations CFMR





François LAIGLE

(Terrasol, président du Comité Technique de l'AFTES)

Accueil et informations AFTES





Didier SUBRIN

(CETU, Centre d'études des tunnels)

Introduction à la séance technique



PROGRAMME

■ 14h00 – Comment pratiquer la mécanique des roches avec le nouvel Eurocode 7 ?

Didier VIRELY (Cerema)

Développements récents et pistes d'amélioration de l'Eurocode 7 en milieu rocheux

Rima GHAZAL (Artelia)

Exemple d'application pour le dimensionnement d'une excavation urbaine en milieu rocheux

Questions/réponses



PROGRAMME

■ 14h50 – Appliquer les Eurocodes aux tunnels : est-ce possible ?

Michel PRE (Setec)

Justification des structures de tunnel : soutènement et revêtement en béton non armé

François LAIGLE (Terrasol)

Comment évaluer la marge de sécurité en tunnel ?

Questions/réponses

■ 15h40 – Pause



PROGRAMME

■ 16h10 – Quelle place pour les roches et les tunnels dans la nouvelle génération des Eurocodes ?

Sébastien BURLON (Cerema, CNJOG)

Panorama des nouveaux Eurocodes et du nouvel Eurocode 7

Didier SUBRIN (CETU)

Réflexions en cours pour l'introduction des ouvrages souterrains dans les Eurocodes

Questions/réponses

■ 17h00 – Conclusion de la séance

■ 17h30 – Convivialité et gourmandises dans l'Espace Le Carreau



1^e partie

Comment pratiquer la mécanique des roches avec le nouvel Eurocode 7 ?



Didier VIRELY (Cerema)

Développements récents et pistes d'amélioration de l'Eurocode 7 en milieu rocheux



Journée CFMR AFTES, 9 octobre 2025, École des Mines, Paris

Tunnels, Mécanique des Roches, Eurocodes : quelles pistes pour l'avenir ?



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES



Développements récents et pistes d'amélioration de l'Eurocode 7 en milieu rocheux



*Didier Virely – Cerema
Membre REP Cen TC250 SC7
Pilote ISO TC182 WG 10 – Laboratory testing of rock*

Une lecture avec un prisme rocher de la nouvelle génération des Eurocodes 0 et 7.

Un appel pour réfléchir aux conditions d'application de ces textes et aux travaux à entreprendre pour combler les manques identifiés.

Rima Ghazal présentera un exemple d'application

Sébastien Burlon recentrera ces présentations dans le contexte général des Eurocodes.

- ☐ Les Eurocodes géotechniques
- ☐ Les différentes approches pour l'acquisition des données
- ☐ Les rapports demandés
- ☐ La géométrie
- ☐ Les propriétés mécaniques
 - ☐ Massif rocheux
 - ☐ Discontinuités du massif
- ☐ Les approches de dimensionnement
- ☐ Les structures géotechniques
 - ☐ Cas des fondations
 - ☐ Cas d'un glissement plan
- ☐ Perspectives

Pourquoi une seconde génération d'Eurocodes ?

- EN 1990 (Mars 2023) Eurocodes structuraux – Bases de calcul des structures
- En 2027 : Base des calculs structuraux **et géotechniques**

EN 1997-1 – (application 2027) Eurocode 7 : Calcul géotechnique – règles générales

EN 1997-2 – Propriétés des terrains

EN 1997-3 – Constructions géotechniques



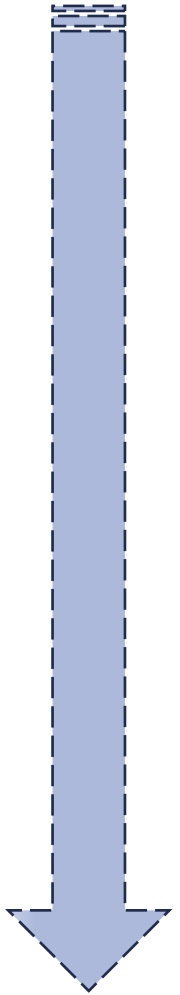
- Intégration formelle de l'ingénierie des roches
- Chapitre spécifique (boulons EC7-3-§ 11)



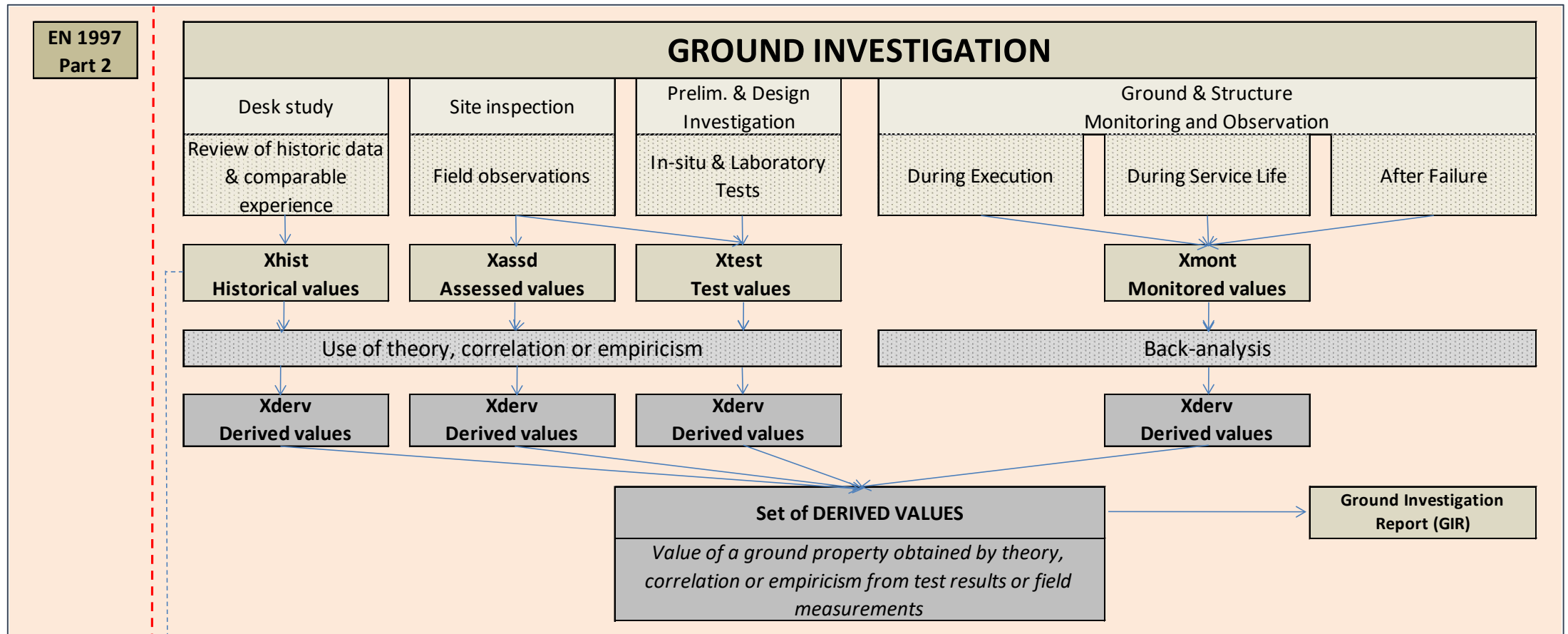
Un texte jeune

Ingénierie des roches **hors**
structures souterraines

Les phases d'une étude

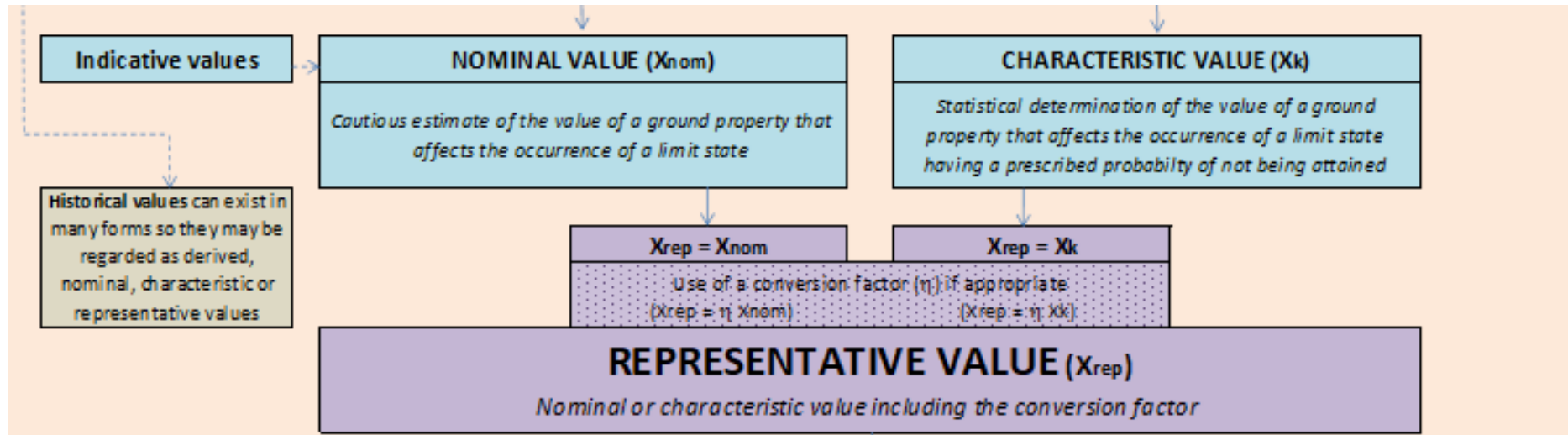
- 
- Le rapport de reconnaissance (GIR)
 - Le modèle de terrain (GM)
 - **Détermination du modèle géologique et des propriétés géotechniques**
 - Le rapport de dimensionnement géotechnique (GDR)
 - Le modèle de terrain
 - **Choix des propriétés géotechniques et dimensionnement de l'interaction terrain, ouvrage**
 - Mise en œuvre du dimensionnement, exécution des travaux de construction
 - Conditions de contrôle, de maintenance et de suivi (GCR)
 - **Importance particulière du suivi dans le cas de l'application de l'approche observationnelle**

Les Reconnaissances



- Valeurs dérivées obtenues par différents moyens
- Valeurs « brutes », validées

Le traitement des données



- En ingénierie des roches: Données rares présentant une forte dispersion; le plus souvent des valeurs nominales

Valeur nominale:

- ✓ Valeur prudente
- ✓ Valeur fondée sur le jugement, des expériences comparables

Les principales caractéristiques de la masse rocheuse : La géométrie

Géométrie : ***Paramètres définissant le massif rocheux***

- Les interfaces
- Les discontinuités / la fracturation

EN 1990 6.3 - (3) Lorsque les données sont suffisantes, il est permis de déterminer la valeur caractéristique d'une propriété géométrique à partir de sa distribution statistique et de l'utiliser à la place d'une valeur nominale.

$$a_d = a_{nom} + \Delta a$$

4.3.3 Propriétés géométriques

Les propriétés géométriques des discontinuités dans une unité rocheuse peuvent être considérées :

- *Soit comme des propriétés représentant les discontinuités discrètes du massif;*
- *Soit comme des propriétés équivalentes données à un massif homogénéisé.*

Acquisition des données sur les discontinuités

- ✓ Sur affleurement par un géologue (Ligne – surface - ...)
- ✓ En forage par camera optique ou sonique
- ✓ Sur affleurement par traitement d'image

n x 10

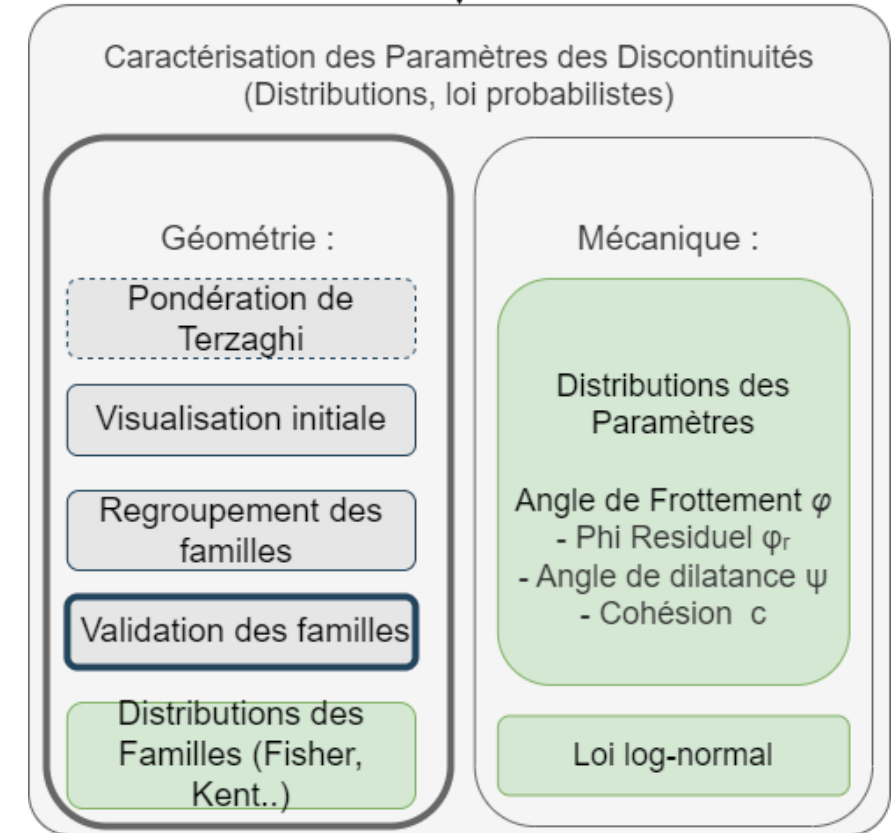
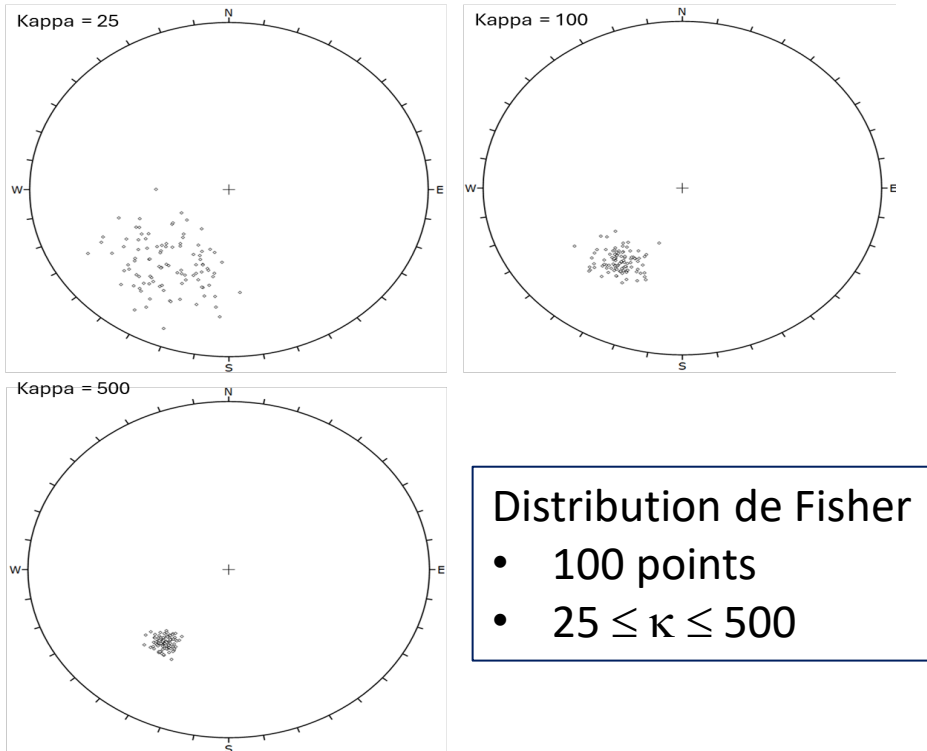
n x 1 000



La géométrie : Définir les familles de discontinuité

Reconnaissances

Approche fiabiliste



O. Stewart 2025

Traitement des familles

- ✓ Regroupement en famille et biais
- ✓ Dispersion de la famille (Fisher – Kent, ...)



Validation et systématisation de ces approches

Les propriétés mécaniques : Partie II – courbes d'état limite

8.1.2 Strength envelopes for saturated soils and rock

(1) The shear stress at failure τ_f of saturated soils and rock may be determined from the Mohr-Coulomb envelope given in terms of effective stresses from:

$$\tau_f = c' + (\sigma - u) \tan \varphi'$$

8.1.4 Strength envelopes for rock material and rock mass

(1) For both **rock material and rock mass**, shear strength may be described using the Hoek-Brown strength envelope given by:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b * \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

m_b, s et a déterminés à partir de l'indice GSI

(7) The values of the Hoek-Brown strength parameters for a rock mass (m_b , a , and s) may be determined using empirical formulations that take as inputs the:

- values of Hoek-Brown strength parameters for the rock material (intact rock); and
- values obtained from rock mass classification systems.

E.6 Geological Strength Index (GSI) Rock mass classification systems

8.1.5.2 Discontinuities with rock-to-rock surface contact

- (1) The discontinuity roughness shall be considered when assessing the shear strength.
- (2) The shear stress at failure τ_{dis} along discontinuities with rock-to-rock surface contact should be determined, using linear or non-linear strength envelopes, and their applicable normal stress range recorded in the Ground Investigation Report.
- (3) The value of τ_{dis} along discontinuities with rock-to-rock surface contact may be described by the linear Mohr-Coulomb strength envelope given by:

$$\tau_{dis} = c_{dis} + (\sigma_n - u) \tan(\phi_{dis})$$

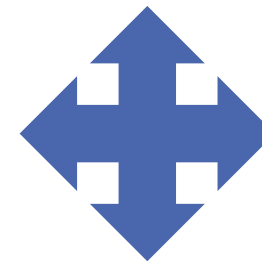
c_{dis} is the apparent cohesion of the discontinuity;
 ϕ_{dis} is the effective angle of friction of the discontinuity.

c_{dis} :

- Ponts rocheux
- Échelons
- ...

ϕ_{dis} :

- Au pic
- Résiduel
- Avec dilatance : 1^e et 2nd ordre



1. choisir
2. Expliciter son choix

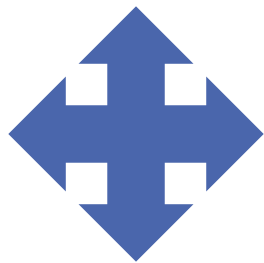
Les propriétés mécaniques : Partie II – Critère de cisaillement B - B

(4) The value of τ_{dis} along discontinuities with rock-to-rock surface contact may be described by the non-linear Barton-Bandis strength envelope given by:

$$\tau_{dis} = (\sigma_n - u) \times \tan \left(JRC \times \log_{10} \left(\frac{JCS}{(\sigma_n - u)} + \varphi_{dis,r} \right) \right) \quad (8.6)$$

where

- JRC is the joint roughness coefficient;
- JCS is the joint wall compressive strength;
- φ_r is the residual angle of friction of the discontinuity.

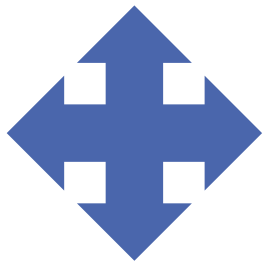


- Définition de JRC et JCS
- Choix de $\varphi_{dis,r}$
- Applicabilité de ces approches

Partie II – Paramètres physiques et mécaniques

Les essais de laboratoire en mécanique des roches:

- Un référentiel français en déshérence – dernière norme XP P de 2001
- Un référentiel ISO en cours de développement
 - ISO 16383 – 1 : Détermination de la teneur en eau
 - ISO 16 383 – 2 : Détermination de la masse volumique (enquête 21 octobre 2025)
 - ISO 16 383 – 3 : Détermination de l'angle de frottement de base (enquête en novembre 2025)
 - ISO 16 383 – 4 : Détermination de la résistance à la compression uniaxiale et de la compressibilité
 - ISO 16 383 – 5 : Détermination de l'abrasivité (NWI – P)
 - ISO 16 383 – x : Format des données ???
- ISRM **suggested** methods
- ASTM



- Comment passer des valeurs dérivées puis représentatives aux valeurs de calcul
- Qui peut faire des essais et quelles exigences pour ceux-ci (académique – professionnel)

Partie II – Paramètres physiques et mécaniques

Table A.1 (NDP) — Indicative values of coefficient of variation for different ground properties

Soil / Rock Type	Ground property	Symbol	Coefficient of variation, V_x (%)
All soils and rocks	Weight density	γ	5-10
Fine-grained soils	Shear strength in total stress analysis	c_u	30-50
All soils and rocks	Peak or residual effective cohesion	c'_p or c'_r	30-50
All soils and rocks	Coefficient of friction	$\tan \varphi$	5-15
All soils and rocks	Shear strength at failure	τ_f	15-25
All soils and rocks	Unconfined compressive strength	q_u	20-80
All soils	Modulus of deformability ^a	E or G	20-70
Fine-grained soils	Vertical or horizontal consolidation coefficient	c_v or c_h	30-70
All soils	Hydraulic conductivity ^b	K	70-250

^a This refers to the different moduli of deformation whose symbols appear FprEN 1997-2:2024, 3.2.1.

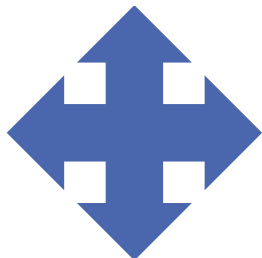
^b Given the high value of the coefficient of variation for the hydraulic conductivity, this procedure should not be used.

Distribution normale ou log normale

DEM:

Une discontinuité

- Rigidité normale
- Rigidité tangentielle
- Dilatances
- Angles de frottement résiduel



- Application de coefficients de sécurité partiels
- Approche fiabiliste (EN 1990 – Annexe C)

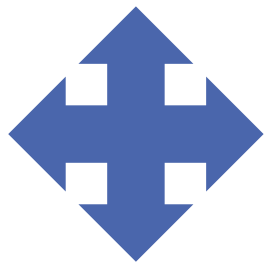
Partie I - Les approches de dimensionnement

EN 1997-1

4.2 Principles of limit state design

4.2.1 General

- (1) The principles of limit state design given in EN 1990:2023, Clause 5 shall apply to geotechnical structures.
- (2) In addition to (1), limit states for geotechnical structures shall be verified by one or more of the following methods:
- calculation using the partial factor method (4.4) ***or other reliability-based methods;***
 - prescriptive rules (4.5);
 - testing (4.6); or
 - Observational Method (4.7).
- (3) The verification of limit states by any of the methods given in (2) shall provide a level of reliability no less than that required by EN 1990.
- (4) The result of the verification shall be compared with previous experience.



- Facteurs de sécurité partiels – MFA ou RFA
- Approches prescriptives : e.g. Q-System - NGI
- Méthode observationnelle

Partie III - Les structures géotechniques

- 4 – Les pentes, déblais et remblais
- 5 – Les fondations superficielles
- 6 – Les fondations profondes
- 7 – Les soutènements
- 8 – Les ancrages
- 9 – Les remblais renforcés
- 10 – Les sols cloués
- 11 – Les boulons et accessoires de surface
- 12 – L'amélioration des sols
- 13 – La gestion des eaux souterraines

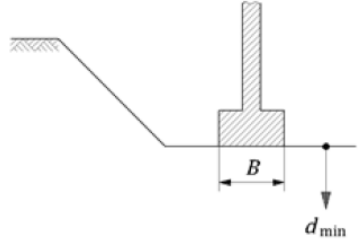
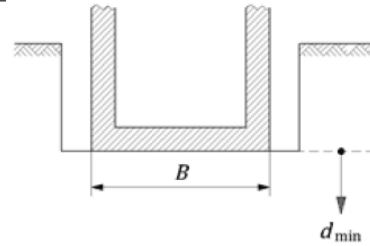
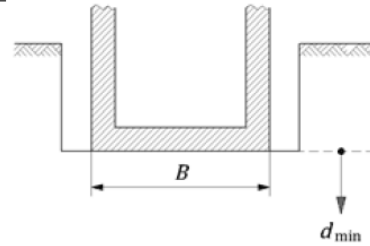
14 – ouvrages souterrains ou Partie 4

Ce qui n'est pas traité:

- Les ouvrages souterrains
- Les barrages

Partie III - Les fondations superficielles

Table 5.1 (NDP) — Minimum depth of field investigation for spread foundations

Application	Minimum depth ^{a, b, c}	Illustration
Square or circular spread foundation	$d_{\min} = \max\{3B; 6 \text{ m}\}$	
Strip spread foundation	$d_{\min} = \max\{5B; 6 \text{ m}\}$	
Raft or structure supported by a group of spread foundations	$d_{\min} = \max\{1,5B; 6 \text{ m}\}$	
^a B is related to the foundation system behaviour: the width of the shallow foundation for a single or a strip foundation, the width of the foundation group for a structure supported by many shallow foundations (to take into account group effects). ^b Where low strength soil layers are present beneath the foundation, $d_{\min}$ can be increased to account for the effect of these deep layers and the extent of the zone of influence. ^c $d_{\min}$ can be reduced where high strength ground layers exist without any low strength soil layers present.		

Les reconnaissances : prescriptions sur l'extension de celle-ci

Note d : prise en compte du rocher

Partie III - Les fondations superficielles

5.5.2.2 Bearing resistance of rock mass

The bearing resistance of a spread foundation on a rock mass that behaves *as a discontinuous medium* shall be verified using the shear strength along discontinuities, determined in accordance with EN 1997-2:2024, 8.1.5.

NOTE Mechanisms for bearing resistance of a spread foundation on a discontinuous rock can include planar sliding, wedge sliding and toppling.

The bearing resistance of a spread foundation on a rock mass that behaves as *an equivalent continuous medium* shall be verified using the shear strength determined in accordance with EN 1997-2:2024, 8.14.

NOTE A calculation model based on wedge equilibrium is presented in B.16.

B.16 Calculation model for bearing resistance on rock mass based on wedge equilibrium

The bearing resistance of a spread foundation lying on the horizontal rock mass may be determined using the mechanism shown in Figure B.8, assuming the rock mass acts as a continuous medium.

Figure B.9 — Bearing resistance for spread foundation on horizontal surface of rock mass

Based on (1), using the Hoek-Brown failure envelope, the bearing resistance R_N normal to the base of the foundation may be determined from:

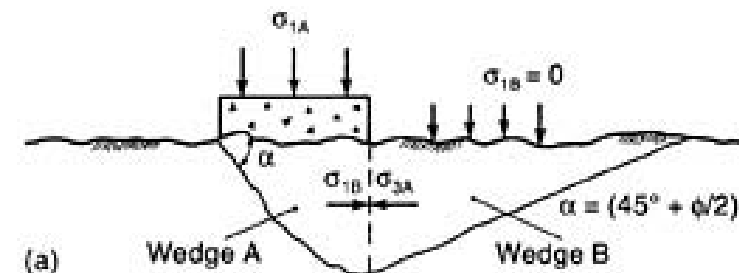
$$R_N = A' \cdot C_{f1} \cdot s_a \cdot \sigma_{ci} \cdot [(m_b \cdot s_{(a-1)} + 1)^{a+1} + 1] \quad (B.22)$$

where

C_{f1} is a shape corrective factor given in Table B.6;

Table B.6 — Shape corrective factor for spread foundations on rock

	L/B > 6	L/B = 5	L/B = 2	Carré	Circulaire
C_n		1,05	1,12	1,25	1,2



Wyllie [2005]

Manuel Canadien des fondations – US army CE - ...

Approche coefficients de sécurité partiels - Fiabiliste

Propriété du terrain	Symbole	M1	M2
Matériau rocheux et masse rocheuse			
Résistance au cisaillement (τ_r)	$\gamma_{\tau r}$	1,0	1,25 k_M
Résistance à la compression uniaxiale (q_u)	γ_{qu}	1,0	1,4 k_M
Discontinuités dans la roche			
Résistance au cisaillement (τ_{dis})	$\gamma_{\tau dis}$	1,0	1,25 k_M
Coefficient de frottement résiduelle ($\tan \varphi'_{dis}$)	$\gamma_{\tan \varphi'_{dis}, r}$	1,0	1,1 k_M
Interface			
Coefficient de frottement de l'interface terrain-structure ($\tan \delta$)	$\gamma_{\tan \delta}$	1,0	1,25 k_M

versus

Probabilité de rupture

$$P(f) = \Phi(-\beta)$$

$\Phi()$ est la fonction de distribution de la probabilité cumulée pour une loi normale.

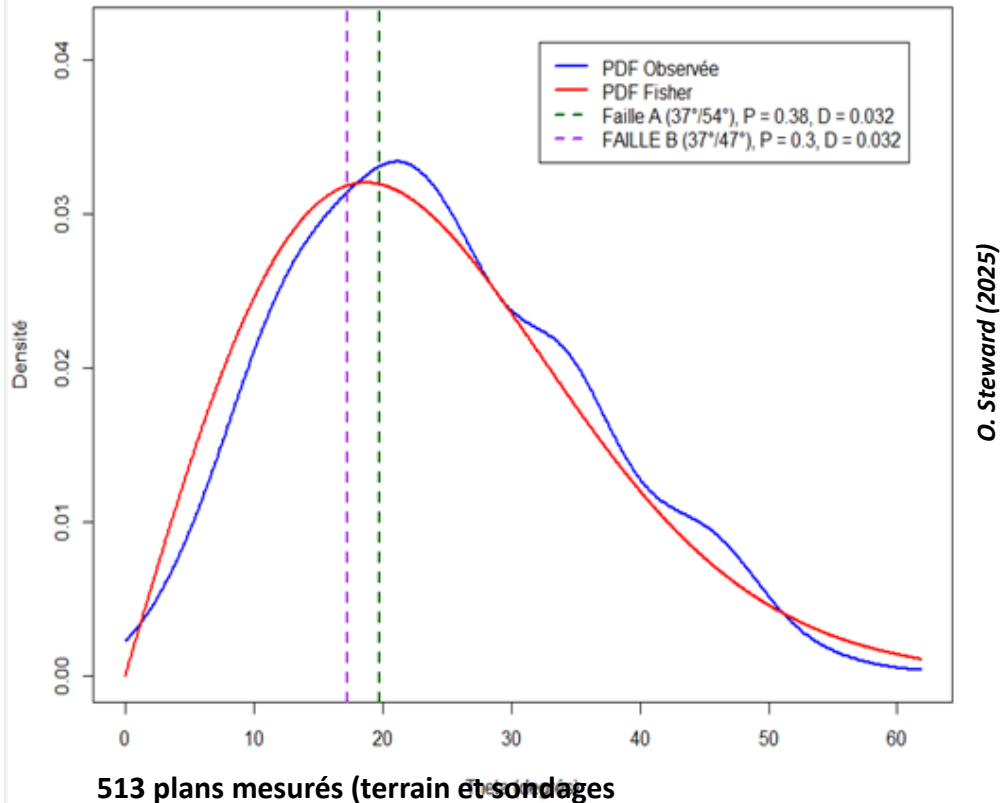
Table C.2 — Relation between P_f and β

P_f	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷
$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$	1,28	2,33	3,09	3,72	4,26	4,75	5,20

Approche coefficients de sécurité partiels – Fiabiliste – exemple

Stabilité par rupture plane d'un talus

PDF: Fisher vs. Observed avec Plans Critiques (K = 9.24)



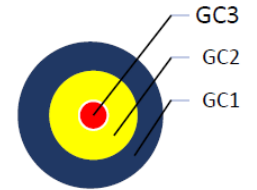
- Analyse cinématique – le mouvement selon les plans d'une famille sont-ils possibles ?
- Quelles sont les plans conduisant à un mouvement ?
- Propriétés mécaniques de ces plans



- Calcul traditionnel avec centre de la famille et valeur représentative des propriétés mécaniques
- Approche fiabiliste ?

vs

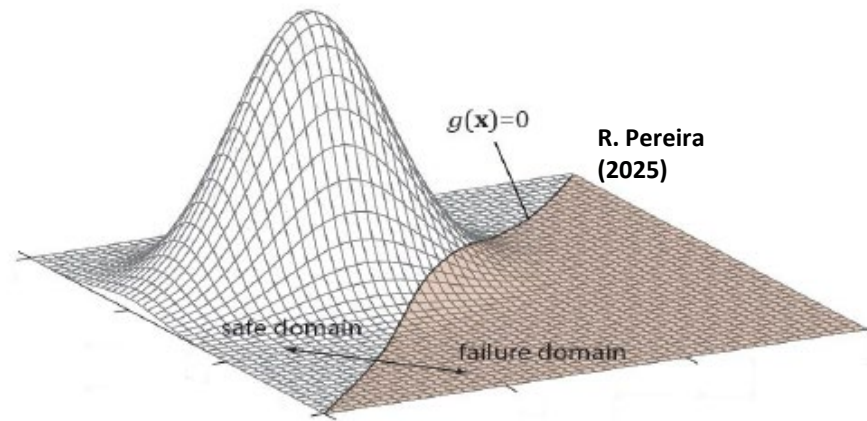
- Enjeux
- Coûts
- délais



- L'Eurocode 0 et L'Eurocode 7 intègre les principes de l'ingénierie des roches
- Il s'agit d'une ébauche qui doit être adaptée aux cas simples et plus complexes
- Des défis à cinq ans:
 - Intégrer la géométrie i.e. l'analyse structurale
 - Obtenir des données mécaniques fiables
 - Définir des approches de dimensionnement : par le calcul, la méthode observationnelle
 - Évaluer les incertitudes aller-retour approche fiabiliste, coefficients de sécurité partiels
- Une implication de la communauté AFTES – CFMR / Bureaux d'études – Universités - ...

Vous êtes attendus pour la rédaction du fascicule documentaire AFNOR : Ouvrages géotechniques au rocher

L'eau – Les contraintes en place – La zone d'influence – Le suivi durant les travaux – la qualification des intervenants
États limites de service



Merci de votre attention !

«Qui veut bâtir sur le roc doit d'abord connaître ses strates. »

Antoine De Saint Exupéry

Rima GHAZAL (Artelia)

Exemple d'application pour le dimensionnement d'une excavation urbaine en milieu rocheux



Exemple d'application pour le dimensionnement d'une excavation en milieu rocheux

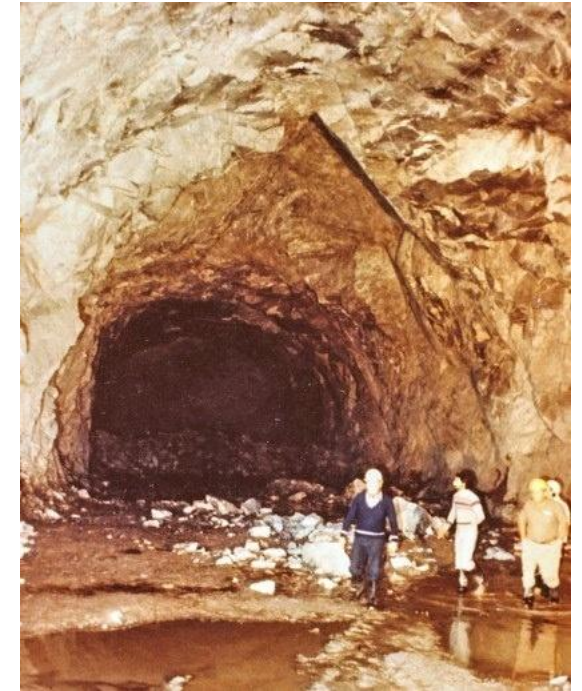
Rima Ghazal - ARTELIA, France

Séance technique CFMR-AFTES

Mécanique des roches, tunnels et eurocodes : quelles pistes pour l'avenir ?

09/10/2025

Mécanisme d'instabilité contrôlés par les discontinuités



Comment utiliser la nouvelles génération des Eurocodes 7 pour le dimensionnement d'instabilités caractéristiques de la roche ?

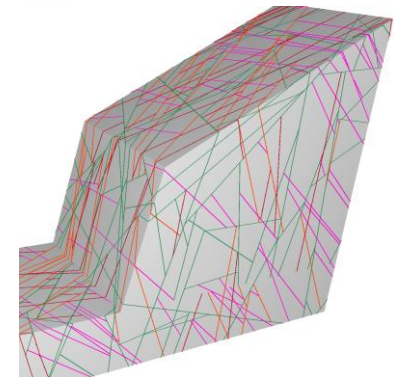
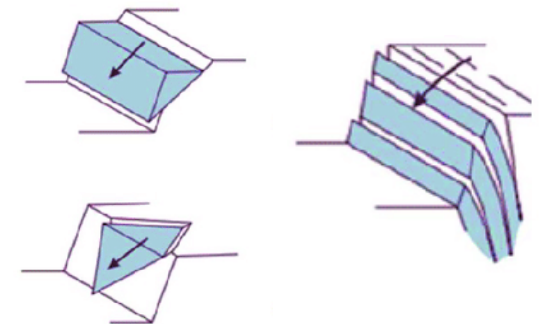
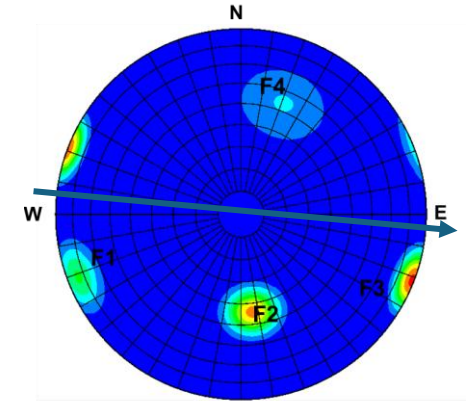
Plan

- Pentes rocheuses dans l'Eurocode 7
- Processus de conception
- Présentation de l'exemple d'application
- Résolution analytique
- Résolution numérique

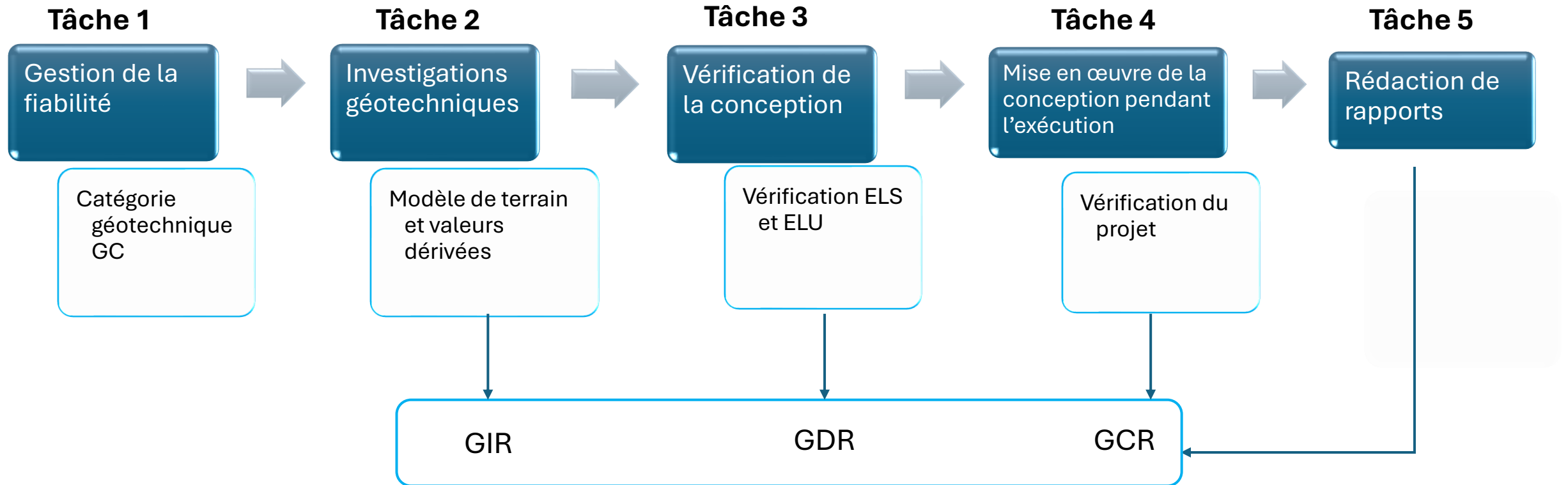
Pentes rocheuses dans l'Eurocode

Spécificités liées à la mécanique des roches dans le chapitre 4 «Talus, déblais et remblai »

- Etat Limite Ultime : rupture le long des discontinuités, rupture due à la chute de blocs ([EN1997-3, 4.2.5.1](#))
- Les discontinuités et les zones altérées doivent être définies par leurs propriétés géométriques et géotechniques. ([EN 1997-2, 6.2](#))
- Stabilité de la masse rocheuse doit prendre en compte : la technique et la séquence d'excavation, influence des discontinuités, l'anisotropie de la résistance dans la roche, l'influence d'une instabilité locale sur la stabilité globale ([EN1997-3, 4.5.3](#))
- Exemples de types de rupture des pentes rocheuse en (rupture plane, glissement intersection de plans (wedge), rupture par basculement, chute de blocs ([EN1997-3 Annex A.4](#))
- Modèles de calcul: équilibre limite, différences finis , éléments discrets ([EN1997-3 Annex A.4](#))



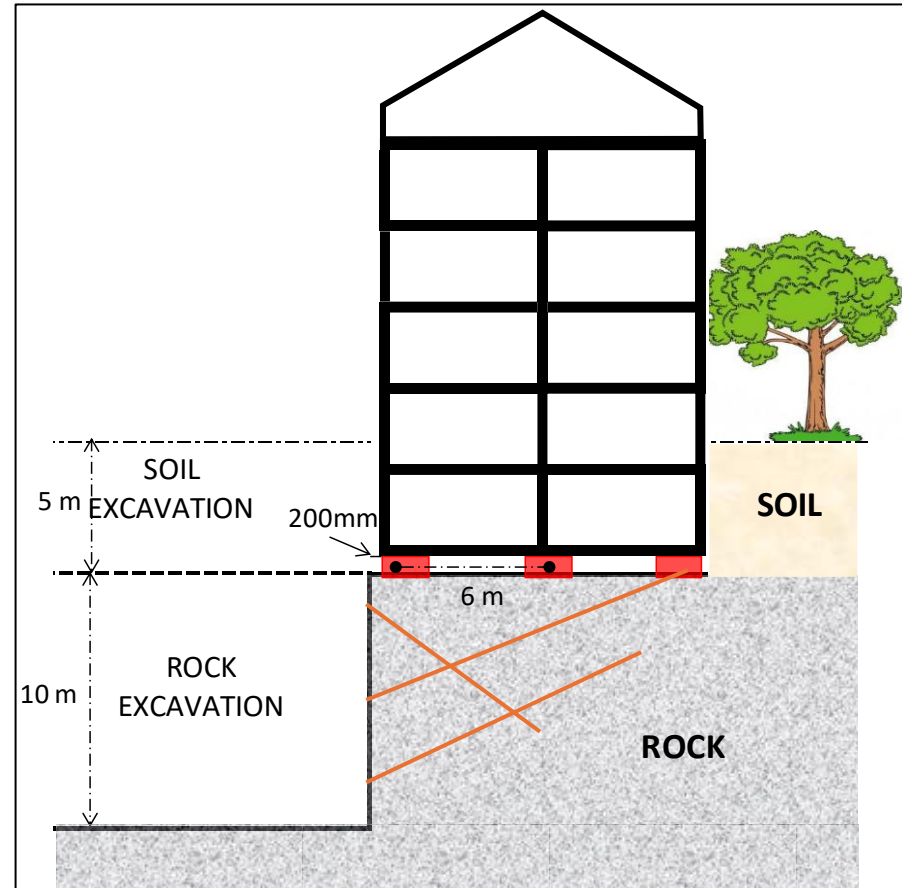
Processus de conception



Exemple d'application

Données initiales

- Profondeur de l'excavation = 10m
- Roche granitique
- Présence probable de discontinuités
- A proximité d'un bâtiment à 5 étages, descente de charge par pilier de 6MN



Ref.: José Estaire, Gunilla Franzén and Javier González-Gallego: "Verification of a rock slope stability using partial factors according to the Second Generation Eurocode 7", New Challenges & Rock Mechanics and Rock Engineering (Eurock 2024), Alicante, Spain, 15-19 July 2024, ISBN 978-1-032-55144-9

Exemple d'application

Tâche 1 - Gestion de la fiabilité

Catégorie géotechnique = GC3

Table 4.2 (NDP) — Relationship between Geotechnical Category, Consequences Class, and Geotechnical Complexity Class

Consequence Class (CC)	Geotechnical Complexity Class (GCC)		
	Lower (GCC1)	Normal (GCC2)	Higher (GCC3)
Higher (CC3)	GC2	GC3	GC3
Normal (CC2)	GC2	GC2	GC3
Lower (CC1)	GC1	GC2	GC2

Classe de conséquence = CC3

Table 4.3 (NDP) — Examples of geotechnical structures in different Consequence Classes

Consequence class	Description of consequence	Examples
CC4	Highest	- Geotechnical structures whose integrity is of vital importance for civil protection^a; - Geotechnical structures in areas with significant landslide hazards.
CC3	Higher	- Retaining walls and foundations supporting public buildings, with high exposure; - Man-made slopes and cuttings and retaining structures with high exposure; - Major road/railway embankments, bridge foundations that can cause severe interruption of service in emergency situations; - Geotechnical structures with a primary navigational function^b; - Flood barrier protecting a large number of people; - Underground constructions with large occupancy.
CC2	Normal	All geotechnical structures not classified as CC0, CC1, CC3, or CC4
CC1	Lower	- Retaining walls and foundations supporting buildings with low occupancy; - Man-made slopes and cuttings, in areas where a failure will have low impact on society; - Minor road/railway embankments not vital for society; - Underground structures with occasional occupancy^c.
CC0	Lowest	Not applicable for geotechnical structures

Classe de complexité géotechnique = GCC2

Table 4.1 (NDP) — Selection of Geotechnical Complexity Class

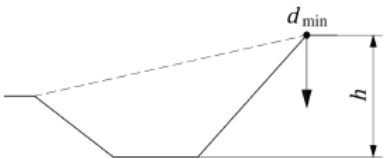
Geotechnical Complexity Class	Complexity	General features
GCC 3	Higher	Any of the following apply: - considerable uncertainty regarding ground conditions - highly variable or difficult ground conditions - significant sensitivity to groundwater and surface water conditions - significant complexity of the ground structure interaction
GCC 2	Normal	GCC2 applies if GCC 1 and GCC3 are not applicable
GCC 1	Lower	All the following conditions apply: - negligible uncertainty regarding the ground conditions - uniform ground conditions - low sensitivity to groundwater and surface water conditions, - low complexity of the ground structure interaction

Exemple d'application

Tâche 2 - Investigations et modèle géotechnique

- Investigations
 - Paramètres de la roche définis par investigations géotechniques, essais au laboratoire
 - Paramètres des discontinuités définis par analyses de carottage et vidéos de boreholes

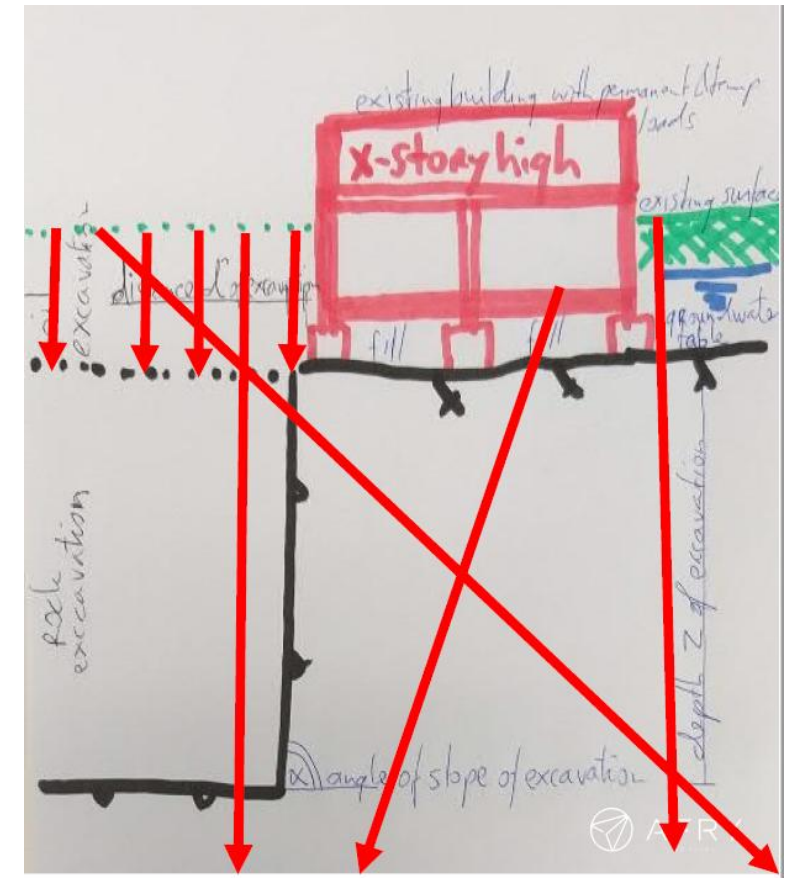
Table 4.1 (NDP) — Minimum depth of field investigation of slopes, cuttings, and embankments

Application	Minimum depth	Illustration
Cuttings	$d_{\min} = 1,4 h$	

EN1997-2 5.4(4) donne la possibilité de réduire $d_{\min}$ dans les terrains compétents

Table H.1(NDP) — Maximum spacing and minimum number of investigation locations for structures in Geotechnical Category 2

Structures		Maximum spacing $X_{\max}$	Minimum number $N_{\min}$
Slopes and cuttings	< 3 m high	100 m	-a
	≥ 3 m high	50 m	-a



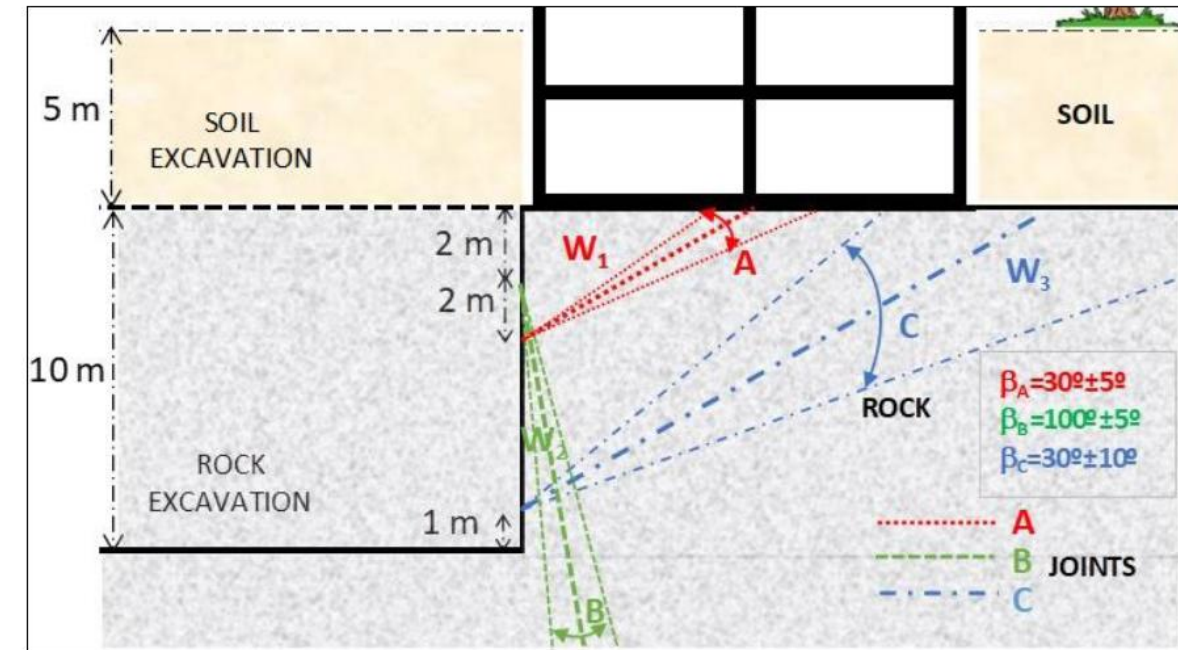
Exemple d'application

Tâche 2 - Investigations et modèle géotechnique

- Définition d'un modèle géotechnique
- Définition des valeurs représentatives
 - Nominales
 - Caractéristiques (à partir d'analyses statistiques)

Valeurs représentatives des joints	A	B	C
Inclination β (°)	30 ± 5	100 ± 5	30 ± 10
Residual friction angle (°)	25-35	25-35	30-45
JRC	0	0	10-12
JCS [MPa]	5-15	15-35	15-35

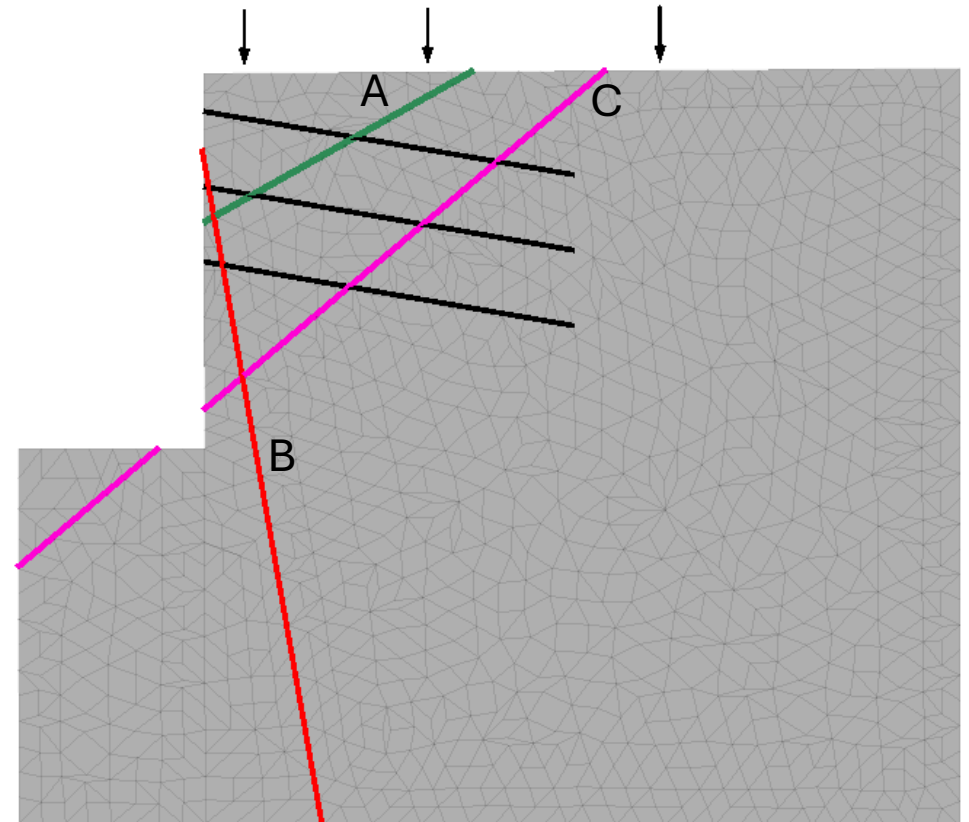
$$\tau_{dis} = (\sigma_n - u) \tan \left[JRC \log_{10} \frac{JCS}{(\sigma_n - u)} + \varphi_{dis,r} \right]$$



Exemple d'application

Tâche 3 - Vérification de la conception

- Situation de conception (design situation) = persistent
- Modes de rupture
 - Glissement joint A
 - Glissement joint C
 - Basculement joint B + Glissement joint C
- Vérification de l'Etat Limite Ultime
- Méthode de vérifications possibles
 - Par calcul (méthode des facteurs partiels)
 - Calcul analytique
 - Calcul numérique
 - Par mesures prescriptives
 - Par tests
 - Par la méthode observationnelle



Exemple d'application

Tâche 3 – Vérification de la conception

Approche de facteurs partiels sur les matériaux (MFA) : VC3, M2

Tableau 4.1 — (NDP) Facteurs partiels pour la vérification de la résistance du sol de talus, déblais et remblais pour les situations de calcul fondamentales (persistantes et transitoires)

Vérification de	Facteur partiel sur	Symbole	Approche de factorisation des matériaux (MFA) ^{a,b}
Stabilité globale	Actions et effets des actions	γ_F et γ_E	VC3
	Propriétés des terrains ^c	γ_M	M2 ^b

VC définit les facteurs sur les actions

Action / Verification Case	VC1	VC2a	VC2b	VC3	VC4
Unfavourable permanent	> 1	> 1	= 1	= 1	= 1
Unfavourable variable	> 1	> 1	> 1	> 1	> 1
Favourable permanent	= 1	= 1	= 1	= 1	= 1
Action effects	-	-	-	-	> 1

Facteurs sur les propriétés des matériaux

Soil and fill	Ground property	Symbol	M1	M2
	Shear strength in effective stress analysis (τ_f)	$\gamma_{\tau f}$	1.0	1.25 k_M
	Coefficient of peak friction ($\tan \phi'_p$)	$\gamma_{\tan \phi, p}$	1.0	1.25 k_M
	Coefficient of friction at critical state ($\tan \phi'_{cs}$)	$\gamma_{\tan \phi, cs}$	1.0	1.1 k_M
	Shear strength in total stress analysis (c_u)	γ_{c_u}	1.0	1.4 k_M
Rock material and rock mass	Shear strength (τ_f)	$\gamma_{\tau f}$	1.0	1.25 k_M
	Unconfined compressive strength (q_u)	γ_{q_u}	1.0	1.4 k_M
Rock discontinuities	Shear strength (τ_f)	$\gamma_{\tau dis}$	1.0	1.25 k_M
	Coefficient of residual friction ($\tan \phi'_{dis, r}$)	$\gamma_{\tan \phi dis, r}$	1.0	1.1 k_M

$k_M = 1.1$ pour CC3

Exemple d'application

Tâche 3 – Vérification de la conception

Passage des valeurs représentatives aux valeurs de conception

Valeurs représentatives

Shear strength
 $c, \tan(\phi)$

Facteurs partiels

(MFA, M2)
 $\gamma_M = 1,25k_M$
 $k_M = 1.1$ pour CC3

Valeurs de conception

$c/\gamma_M, \tan(\phi)/\gamma_M$

Weight W

(MFA, VC3)
 $\gamma_F = 1$

W/γ_F

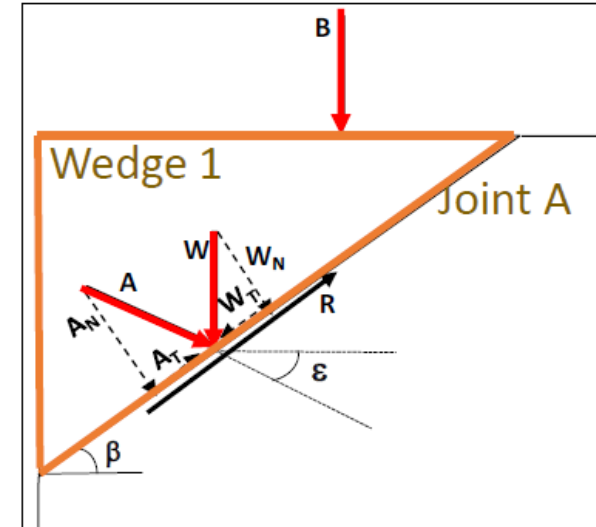
Exemple d'application

Tâche 3 – Vérification de la conception

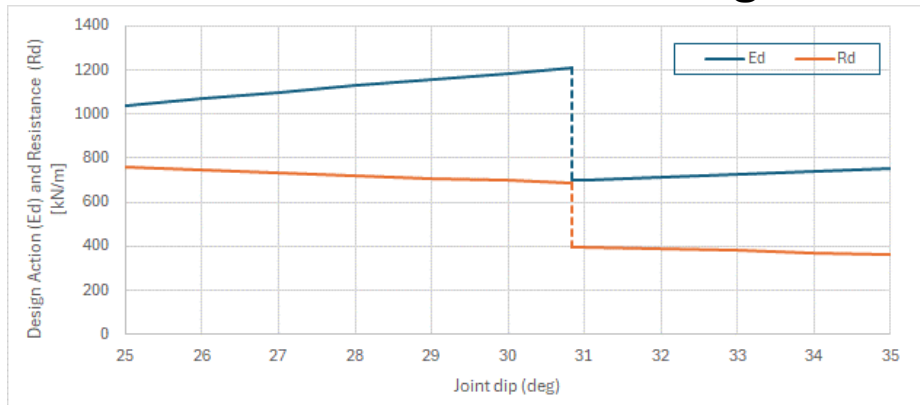
- Problème d'équilibre limite : glissement joint A
- Vérifier que $E_d \leq R_d$
 - E_d : Force de cisailment le long du joint
 - R_d : résistance de cisailment le long du joint

$$E_d = (W_d + B_d) \sin \beta - A_d \cos(\beta + \varepsilon)$$

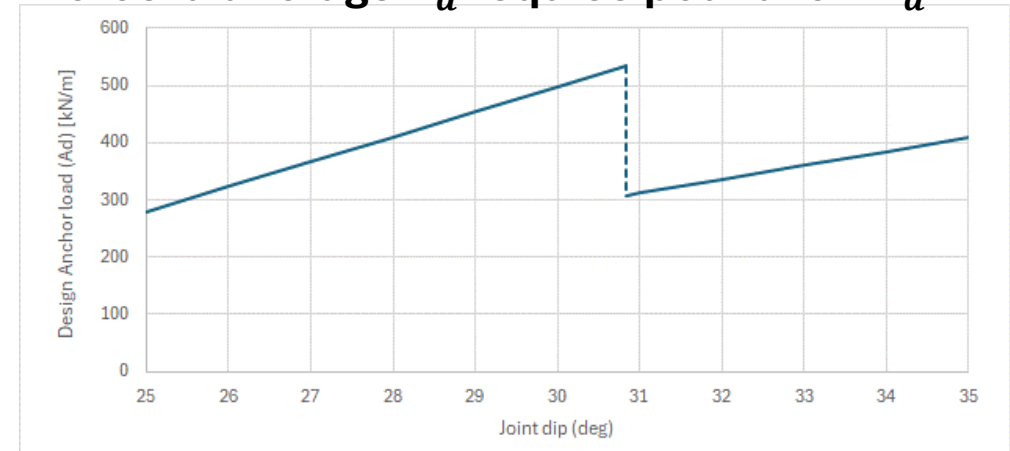
$$R_d = [(W_d + B_d) \cos \beta + A_d \sin(\beta + \varepsilon)] \frac{\tan(\phi_{rep})}{\gamma_M}$$



Résultat sans force d'ancrage

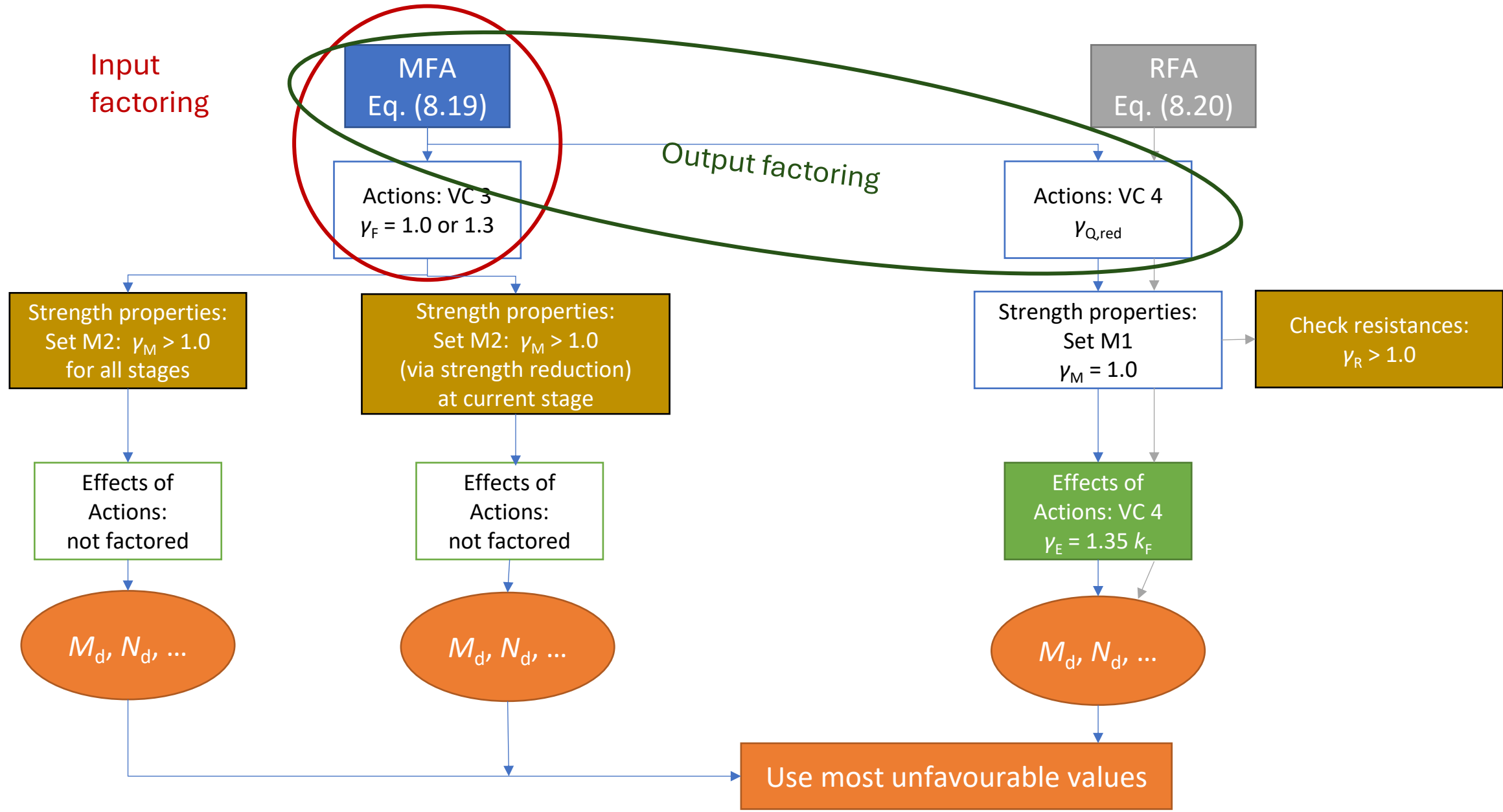


Force d'ancrage A_d requise pour avoir $E_d = R_d$

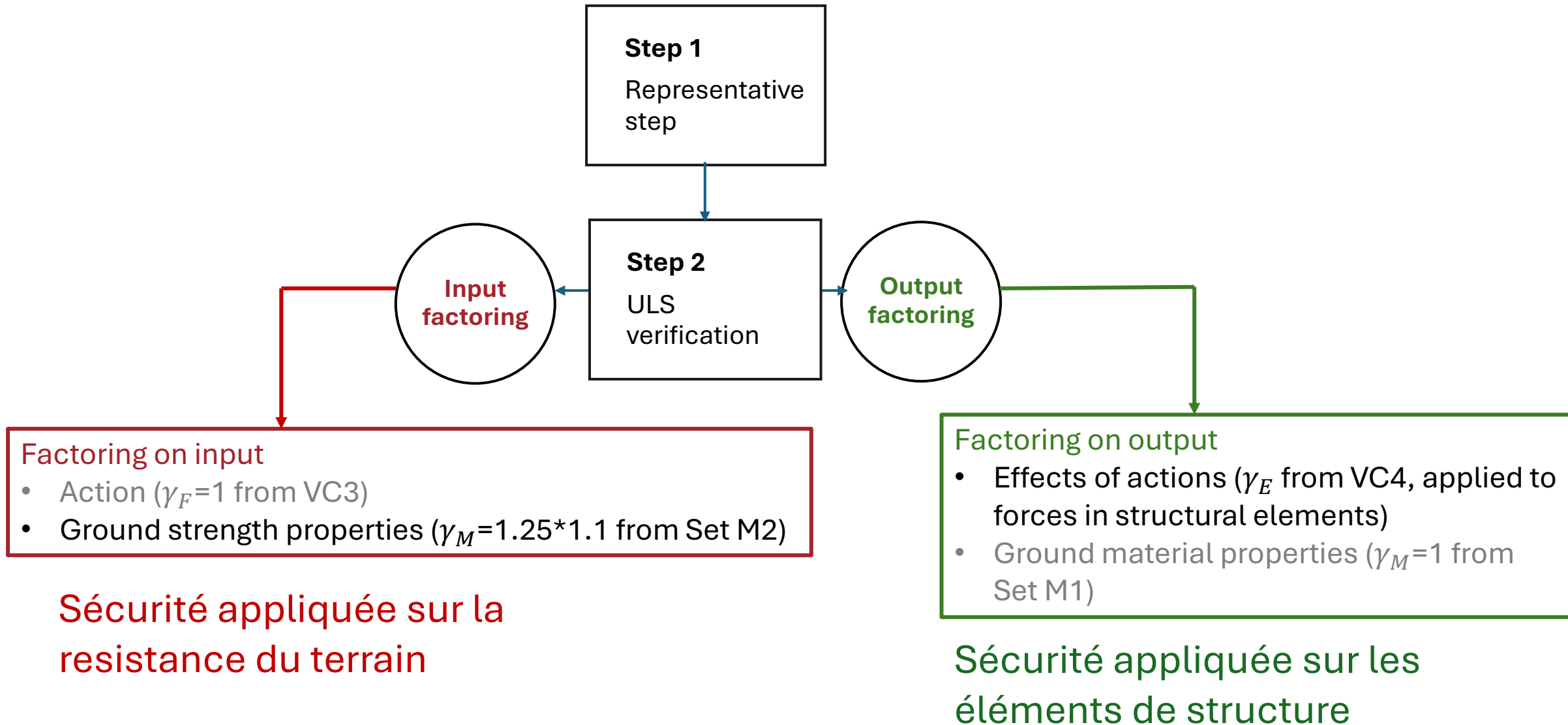


→ Contraste avec la pratique actuelle où le facteur de sécurité est calculée sur la résistance (voir RFA)

Définition des approches MFA et RFA



Calcul numérique dans les EC7

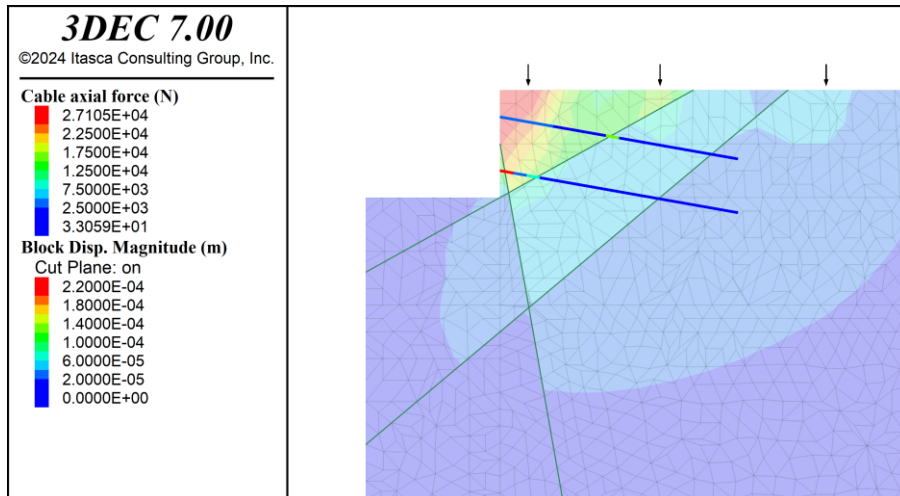


Exemple d'application

Tâche 3 – Vérification de la conception (par modèle numérique)

1ère phase d'excavation

Etape représentative

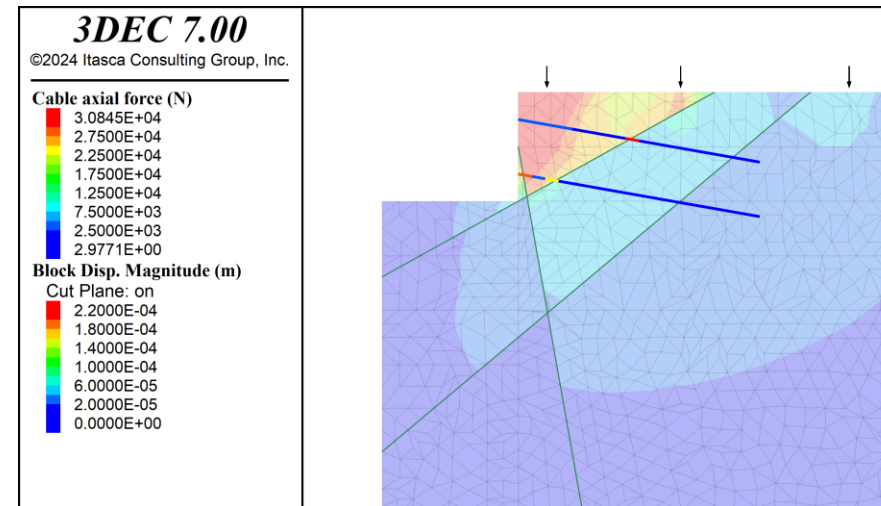


Boulons $\phi = 36mm$

$F_{max} = 271 kN$

$R_d = 402 kN$

Input factoring



Stabilité terrain vérifiée ✓

Vérification boulons ✓

- $E_d = 30 kN$
- $R_d = 402 kN$
- $E_d < R_d$

Output factoring

Vérification boulons ✓

$$\gamma_E = 1.35 * 1.1$$

$$E_d = F_{max} \gamma_E = 40 kN$$

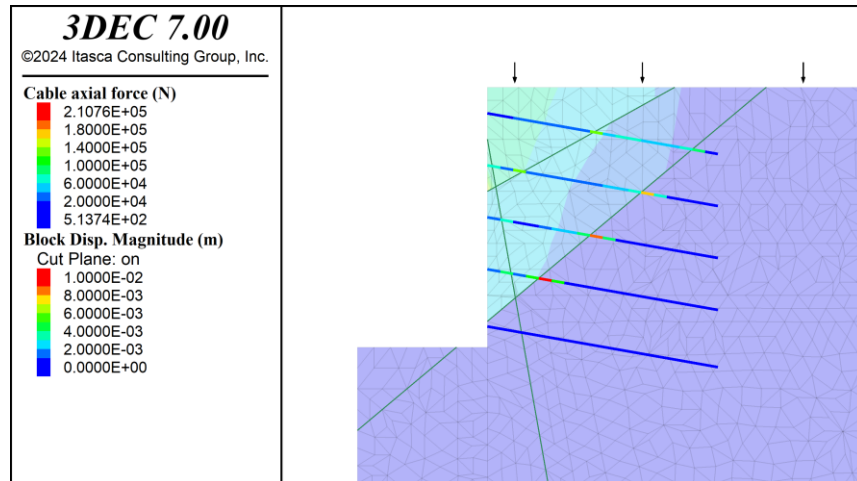
$$E_d < R_d$$

Exemple d'application

Tâche 3 – Vérification de la conception (par modèle numérique)

2ème phase d'excavation

Etape représentative

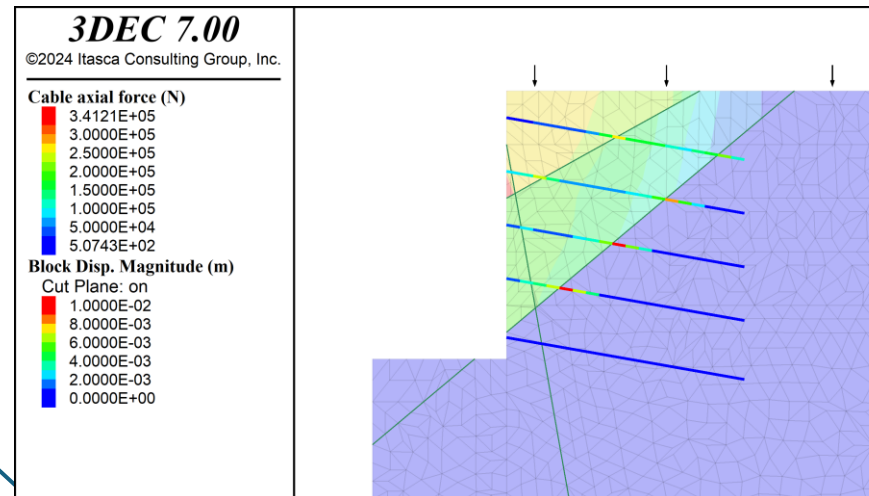


Boulons $\phi = 36mm$

$F_{max} = 271 kN$

$R_d = 402 kN$

Input factoring



Stabilité terrain vérifiée ✓
Vérification boulons ✓

- $E_d = 341 kN$
- $R_d = 402 kN$
- $E_d < R_d$

Output factoring

Vérification boulons ✓

$$\gamma_E = 1.35 * 1.1$$

$$E_d = F_{max} \gamma_E = 311 kN$$

$$E_d < R_d$$

Conclusions

- Vérification des pentes par calcul est uniquement basé sur l'approche MFA. Pas de proposition de calcul d'un facteur de sécurité global (relatif à la résistance) dans les nouveaux Eurocodes 7.
- Les facteurs partiels ($1,25k_m$) pour les paramètres mécaniques de la roche sont forfaitaires → comme alternative possibilité de déterminer les facteurs partiels par approche fiabiliste
- Introduction d'un cadre pour la modélisation numérique dans la nouvelle génération des Eurocodes
 - Input factoring : rejoint l'approche MFA
 - Output factoring : rejoint l'approche RFA uniquement pour la vérification de la tenue des éléments de structure. On peut proposer de compléter par une vérification de la marge de sécurité vis-à-vis de la rupture dans la roche

Merci pour votre attention

rima.ghazal@arteliagroup.com

Questions réponses



2^e partie

Appliquer les Eurocodes aux tunnels : est-ce possible ?



Michel PRE (Setec)

Justification des structures de tunnel : soutènement et revêtement en béton non armé



François LAIGLE (Terrasol, AFTES)

Comment évaluer la marge de sécurité en tunnel ?





APPLIQUER LES EUROCODE AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE ?

**Comment évaluer la
marge de sécurité en
tunnel ?**

François LAIGLE

09 octobre 2025

APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

SOMMAIRE

Critères de conception

Principe d'interaction sol/structure

- ✓ « Philosophies » de conception
- ✓ Notion « d'Hyperstaticité »

Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

- ✓ Approches en contraintes/forces
- ✓ Approches en déformations
 - ✓ Mécanismes d'instabilité « identifiables »
 - ✓ Mécanismes d'instabilité « difficilement identifiables »

Conclusions



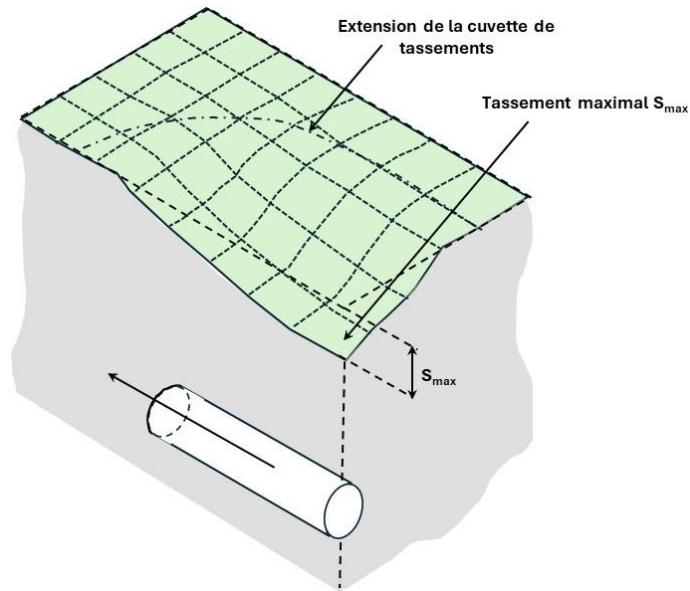
APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Critères de conception

Vis-à-vis de critères en déplacements/tassements/déformations

Etats Limites de Service



Critères de conception et de dimensionnement qui sont objectifs et bien définis

Vis-à-vis de critères de stabilité générale

Etats Limites Ultimes



Comment évaluer la marge de sécurité vis-à-vis d'une ruine de l'ouvrage ?

AFTES-GT16R1F1 – 1995 - Tassements liés au creusement des ouvrages en souterrain.

AFTES-GT16R2F1 - 2018 –Prise en compte des effets induits par le creusement sur les constructions avoisinantes dans la conception et la réalisation des ouvrages souterrains.

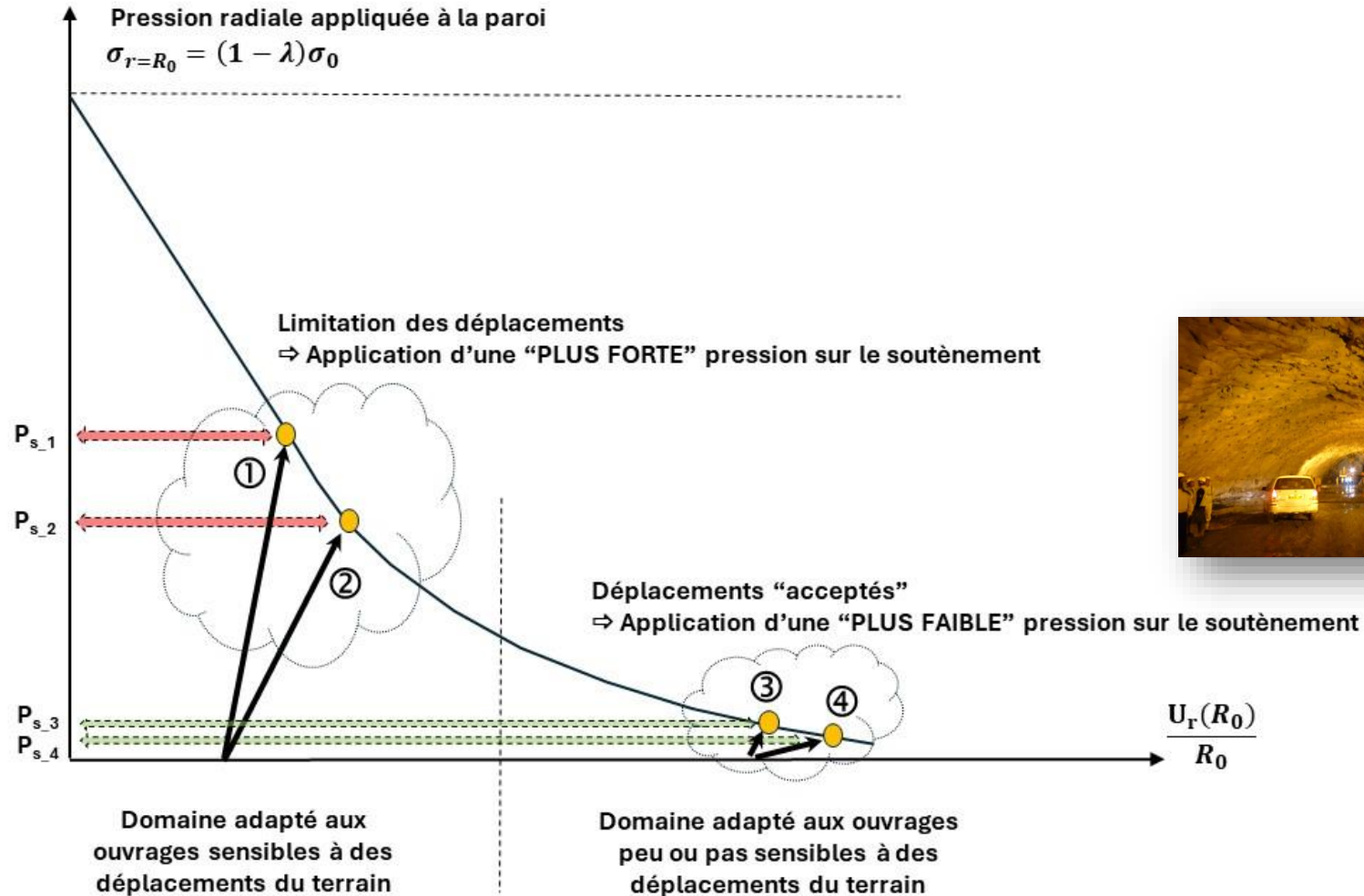
Conférence Technique AFTES CFMR 09/10/2025

APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Principe d'interaction sol/structure

« Philosophies » de conception



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

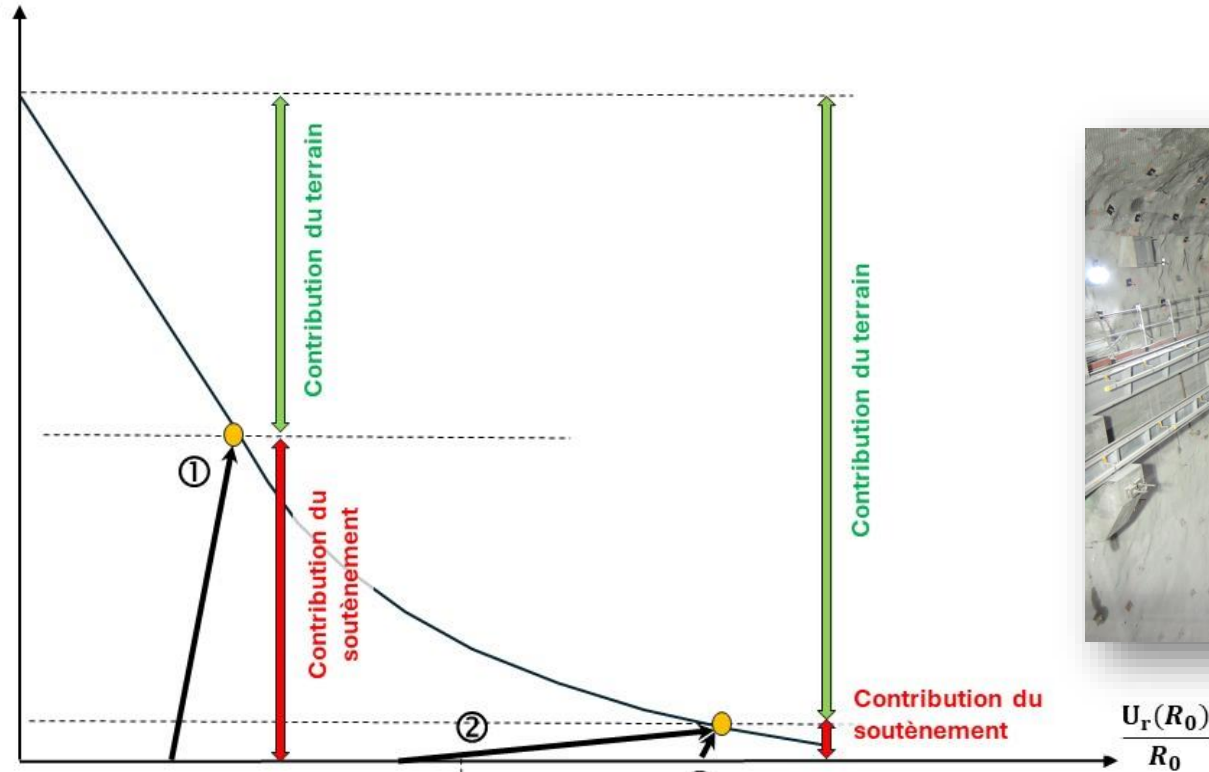
COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Principe d'interaction sol/structure

« Philosophies » de conception

Pression radiale appliquée à la paroi

$$\sigma_{r=R_0} = (1 - \lambda) \sigma_0$$



Domaine adapté aux ouvrages sensibles à des déplacements du terrain

Domaine adapté aux ouvrages peu ou pas sensibles à des déplacements du terrain

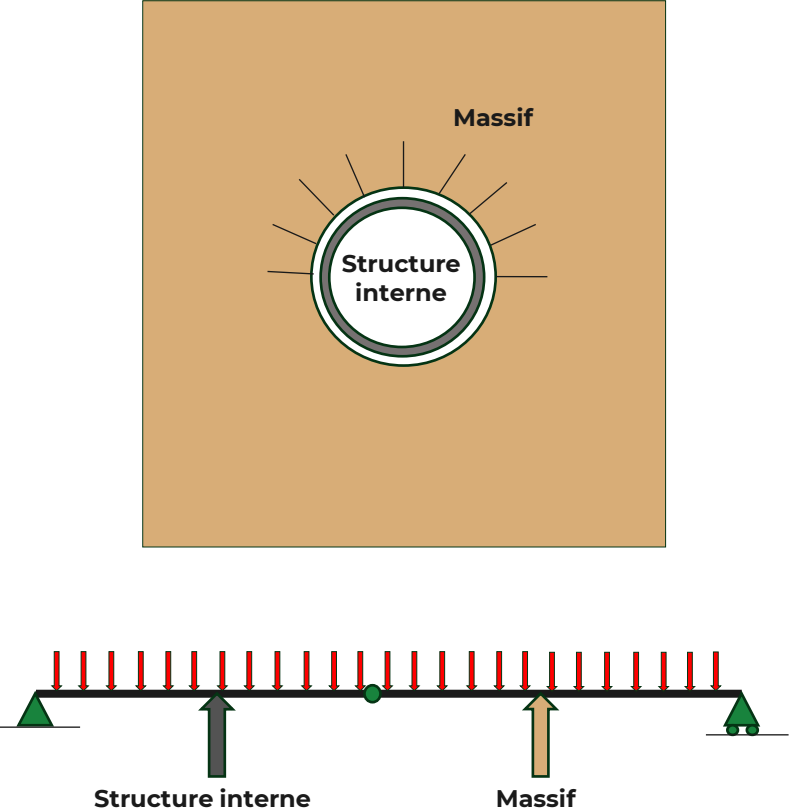
Conférence Technique AFTES CFMR 09/10/2025

APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Principe d'interaction sol/structure

Notion d'Hyperstaticité



		Massif encaissant	
		Stabilité justifiée en l'absence de soutènement / revêtement	Stabilité non démontrée en l'absence de soutènement / revêtement
Structure de soutènement/revêtement	Stabilité justifiée	① Système hyperstatique Stabilité assurée par 2 barrières de stabilité	② Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la structure de soutènement/revêtement
	Stabilité non démontrée ou Absence de structure de soutènement/revêtement	③ Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la capacité du terrain assurer sa propre stabilité	④ Système hypostatique Instabilité générale

- I Rupture du revetement/soutènement rigide
- II Rupture du terrain par deformation excessive et développement d'un mécanisme d'instabilité



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

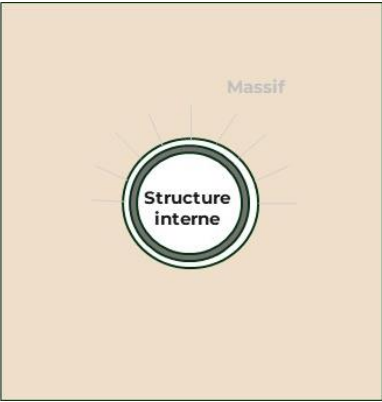
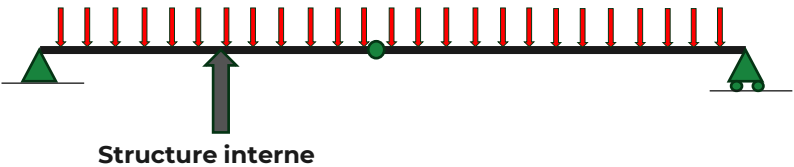
COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Principe d'interaction sol/structure

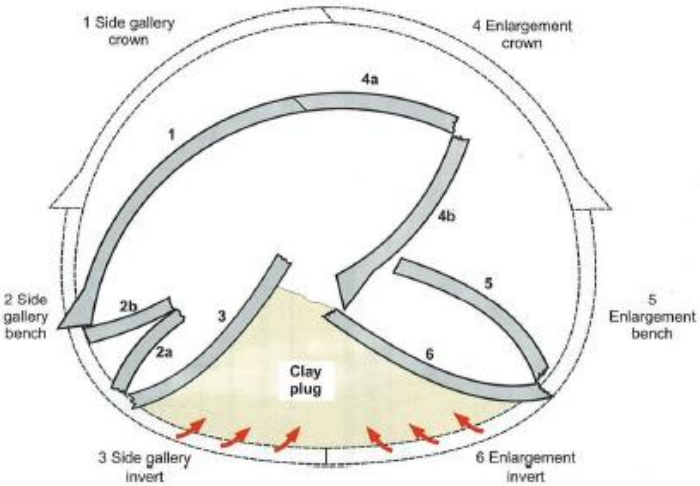
Notion d'Hyperstaticité

		Massif encaissant	
		Stabilité justifiée en l'absence de soutènement / revêtement	Stabilité non démontrée en l'absence de soutènement / revêtement
Structure de soutènement/revêtement	Stabilité justifiée	① Système hyperstatique Stabilité assurée par 2 barrières de stabilité	② Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la structure de soutènement/revêtement
	Stabilité non démontrée ou Absence de structure de soutènement/revêtement	③ Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la capacité du terrain assurer sa propre stabilité	④ Système hypostatique Instabilité générale

- I Rupture du revetement/soutènement rigide
- II Rupture du terrain par deformation excessive et développement d'un mécanisme d'instabilité

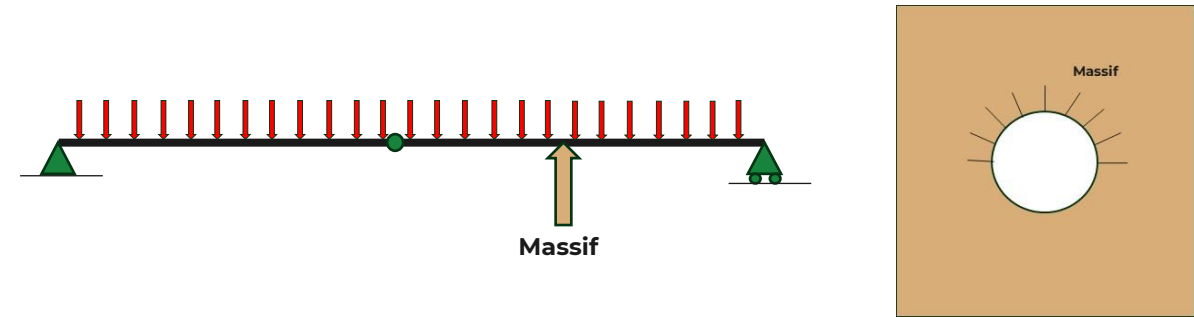


Système isostatique pour lequel la stabilité repose uniquement sur la capacité de la structure de soutènement/revêtement à assurer cette stabilité avec une marge de sécurité suffisante



Principe d'interaction sol/structure

Notion d'Hyperstaticité



		Massif encaissant	
		Stabilité justifiée en l'absence de soutènement / revêtement	Stabilité non démontrée en l'absence de soutènement / revêtement
Structure de soutènement/revêtement	Stabilité justifiée	① Système hyperstatique Stabilité assurée par 2 barrières de stabilité	② Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la structure de soutènement/revêtement
	Stabilité non démontrée ou Absence de structure de soutènement/revêtement	③ Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la capacité du terrain assurer sa propre stabilité	④ Système hypostatique Instabilité générale

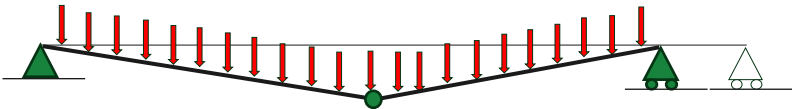
Système isostatique pour lequel la stabilité repose presque uniquement sur la capacité du massif à assurer cette stabilité avec une marge de sécurité suffisante (aidé par le boulonnage)

APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Principe d'interaction sol/structure

Notion d'Hyperstaticité



		Massif encaissant	
		Stabilité justifiée en l'absence de soutènement / revêtement	Stabilité non démontrée en l'absence de soutènement / revêtement
Structure de soutènement/revêtement	Stabilité justifiée	① Système hyperstatique Stabilité assurée par 2 barrières de stabilité	② Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la structure de soutènement/revêtement
	Stabilité non démontrée ou Absence de structure de soutènement/revêtement	③ Système isostatique Stabilité reposant uniquement sur la capacité du terrain assurer sa propre stabilité	④ Système hypostatique Instabilité générale



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

Stabilité reposant sur la structure de soutènement/revêtement

Approche conforme aux recommandations AFTES

Evaluation des sollicitations dans la structure sur la base d'une approche en valeurs caractéristiques sans pondération.

Pondération des sollicitations et sur la résistance



Stabilité reposant sur le massif

Approches en contraintes/forces

Instabilité de blocs rocheux
Instabilité de front
...



Approche aux Equilibres Limites et coefficients de sécurité

Approches en déformations



Mécanisme identifiable et connaissance/confiance suffisante dans les modèles géo/géo

Modélisations
Critère en déplacements déformations
Approche en C/ Φ I réduction



Mécanisme difficilement identifiable.
Fortes incertitudes
Géologie complexe
Géotechnique incertaine

Tentative de modélisation
Méthode observationnelle
Critères en déplacements déformations



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

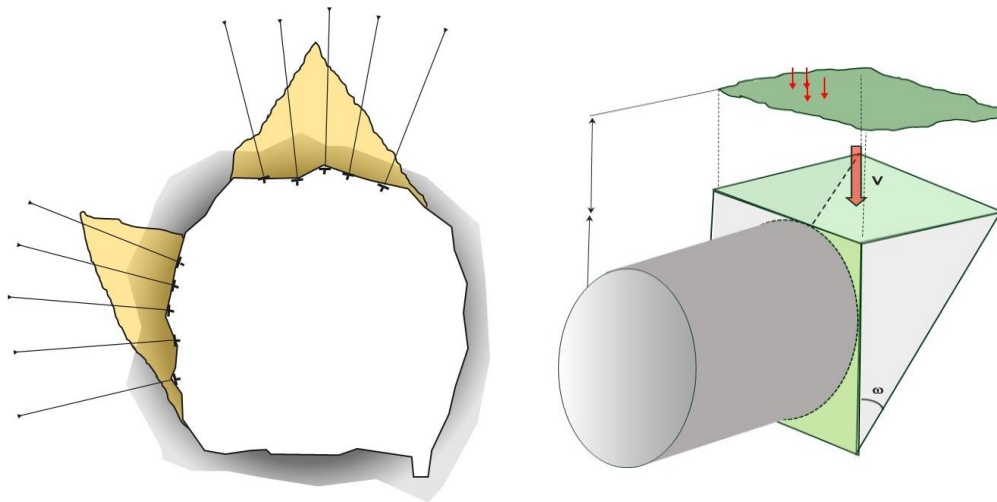
Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

Approches en
contraintes/forces

Instabilité de blocs rocheux
Instabilité de front
...



Approche aux Equilibres
Limites et coefficients de
sécurité



Le mécanisme d'instabilité identifié ou supposé
Possibilité d'écrire les conditions d'équilibre en forces

Approche aux équilibres limite et vérification du
coefficient de sécurité

Par exemple, stabilité d'un blocs rocheux :

Situation courante :

- Blocs en voûte de tunnel : FS=1.80
- Blocs en piédroits du tunnel : FS=1.60

Situation exceptionnelle :

FS=1.0

LES RECOMMANDATIONS DE L'AFTES

Conception et guide
de dimensionnement
du boulonnage radial
en tunnel

GT30RIFI

Association Française des Tunnels
et de l'Espace Souterrain



ISBN 978-2-901148-10-4 - ISSN 2609-8822 - Novembre 2020

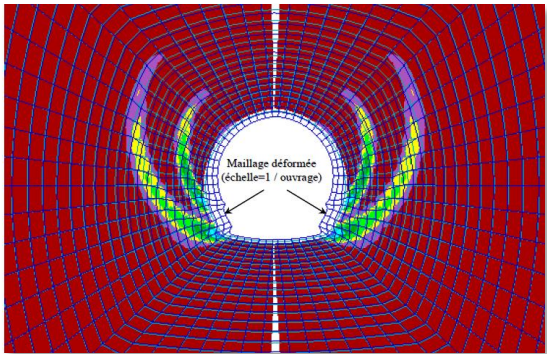


APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

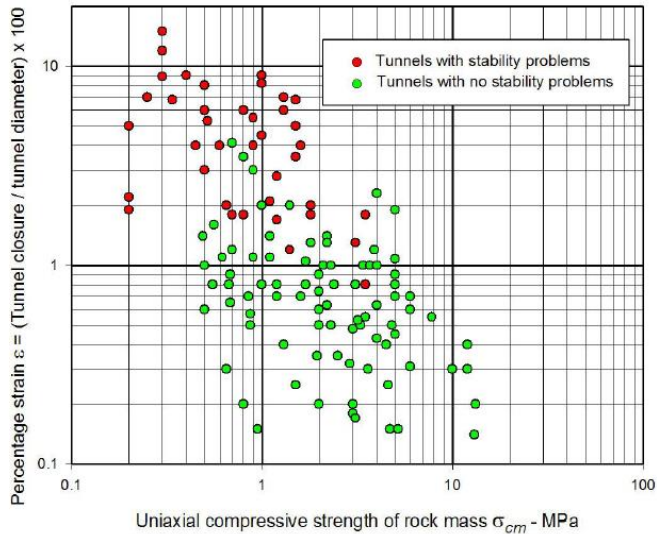
Approches en déformations



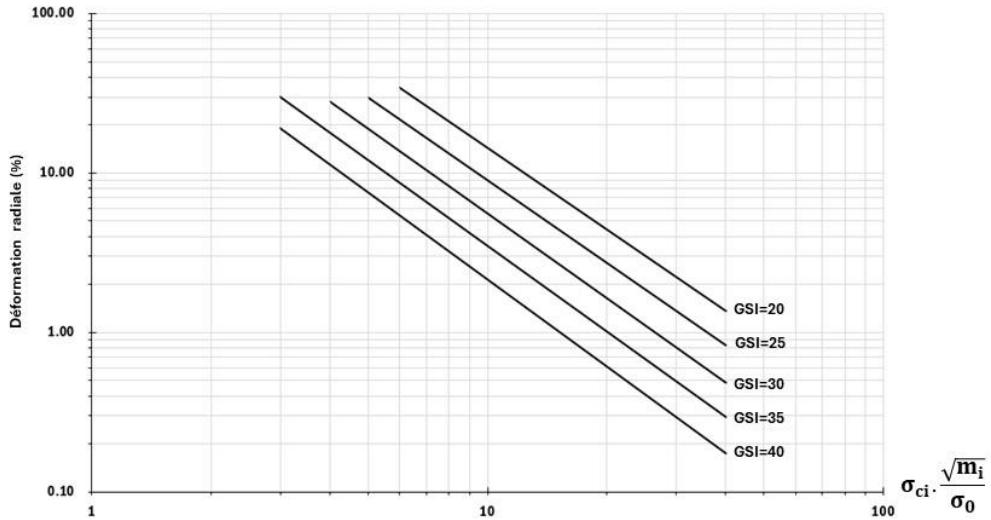
Mécanisme identifiable et connaissance/confiance suffisante dans les modèles géo/géo



Modélisations
Critère en déplacements déformations
Approche en C/PHI réduction



Hoek E. & Marinos P. – 2000 – Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses - Tunnels and Tunnelling International -Part 1 – November 2000, Part 2 – December 2000



Fenneteau B. & Deck O. & Mehdizadeh R. & Laigle F. – 2025 - Improved Squeezing Prediction of Deep Tunnels Within Highly Fractured Rock Mass: Update of the Hoek & Marinos Curve Under Uncertainties. Rock Mechanics and Rock Engineering. April 2025.



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

Réduction simultanée de la cohésion C et de $\tan(\phi)$ jusqu'à :

Approche déformation



Mécanisme identifiable et connaissance/confiance suffisante dans les modèles géo/géo



Modélisations
Critère en déplacements déformations

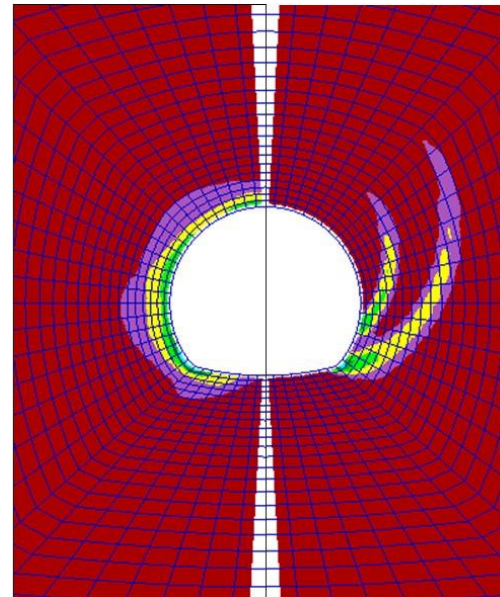
Approche en C/PHI réduction

- Divergence numérique du modèle.
- L'identification du mécanisme de déformation et de rupture.
- L'évolution d'un indicateur représentatif d'un changement de comportement.

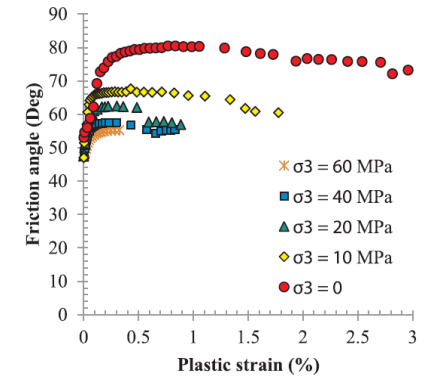
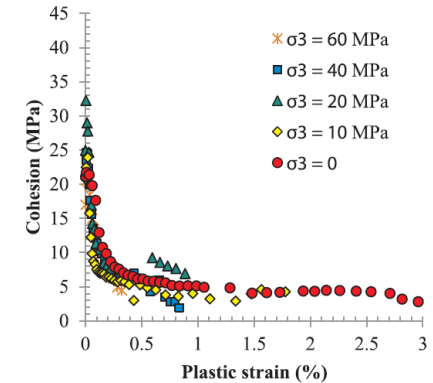
Hypothèse importante

Réduire simultanément C et $\tan(\phi)$ permet-il de retrouver le bon mécanisme de comportement ?

Réduction simultanée de la cohésion et
De l'angle de frottement



Réduction de la cohésion



Renani H.R. & Martin C.D. – 2018 - Cohesion degradation and friction mobilization in brittle failure of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 106 (2018) 1–13

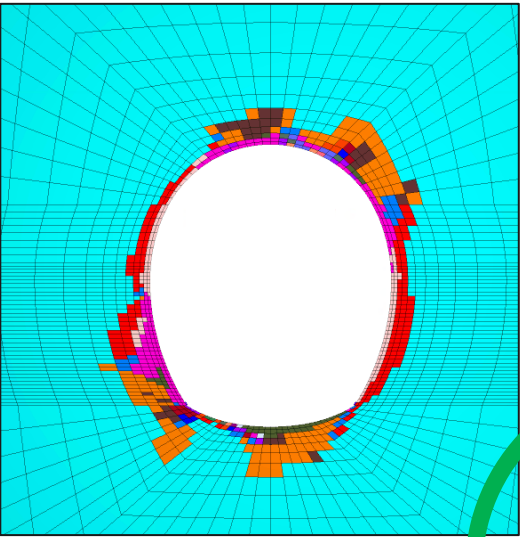


APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Evaluation de la marge vis-à-vis d'un mécanisme de ruine par instabilité

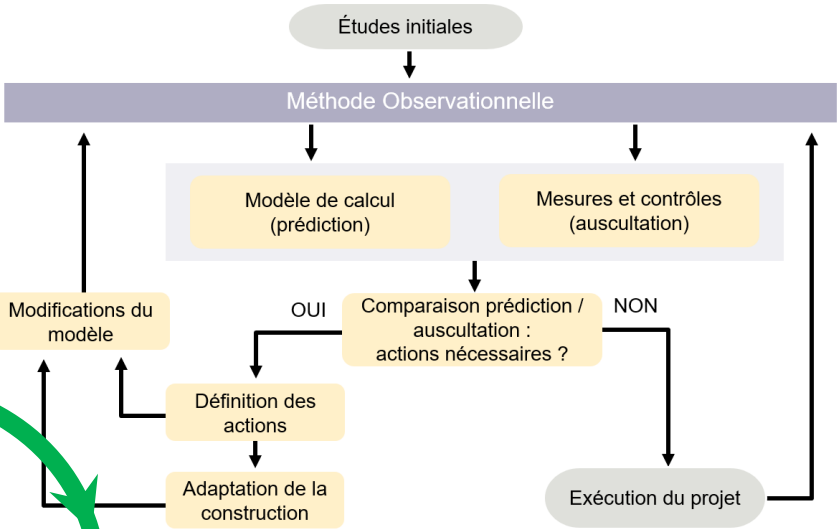
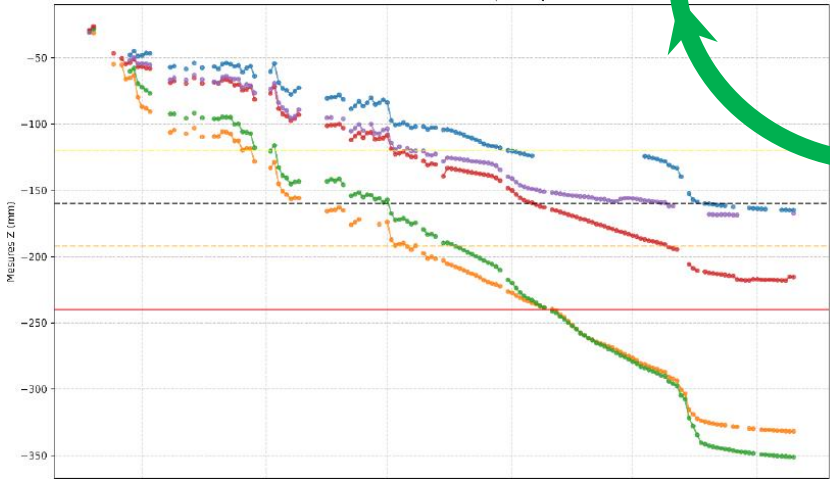
Approche en déformations



Mécanisme difficilement identifiable.
Fortes incertitudes en les modèles
Géologie complexe
Géotechnique incertaine
...



Tentative de modélisation
Méthode observationnelle
Critères en déplacements
Déformations



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Conclusions

Etats Limites Ultimes vis-à-vis du risque d'une instabilité générale de l'ouvrage

Les normes et recommandations encadrent-elles l'évaluation de la marge de sécurité selon les approches décrites précédemment?

Les approches pour évaluer cette marge dépendent très fortement de la conception de l'ouvrage

Si la stabilité repose totalement ou partiellement sur une structure interne (cintres, voussoirs, coque en béton ou béton projeté de type 3):

- ELU Stru et cohérence des recommandations AFTES GT29 avec les approches aux Eurocodes

Si la stabilité repose principalement sur la contribution du massif encaissant:

- ELU Geo et les recommandations AFTES ne traitent que partiellement des critères à retenir (GT30)

Approche Forces/Contraintes



Mécanisme identifié

Equilibres limites et coefficient de sécurité

Approches en déformations



Mécanisme de ruine
« identifiable »

Seuils de déformations (?)
Approche en « C- ϕ réduction »



Forte incertitude sur les modèles

Seuils de déformations
Approche en méthode observationnelle et collaborative



APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?

Conclusions

Quels seuils de déformation / déplacement?

Pertinence de l'approche $C-\phi$ réduction :

- Matériau faiblement cohésif : 😊
- Matériau fortement cohésif : 😞

APPLIQUER LES EUROCODES AUX TUNNELS: EST-CE POSSIBLE?

COMMENT ÉVALUER LA MARGE DE SÉCURITÉ EN TUNNELS?



Questions/réponses



Pause



3^e partie

Quelle place pour les roches et les tunnels dans la nouvelle génération des Eurocodes ?



Sébastien BURLON (Cerema, EC7, CNJOG)

Panorama des nouveaux Eurocodes et du nouvel Eurocode 7



Journée CFMR AFTES, 9 octobre 2025, École des Mines, Paris

Tunnels, Mécanique des Roches, Eurocodes : quelles pistes pour l'avenir ?



CFMR
COMITÉ FRANÇAIS
DE MÉCANIQUE
DES ROCHES



Présentation des nouveaux Eurocodes et du nouvel Eurocode 7



*Sébastien Burlon – Cerema
Président du Groupe Miroir Français de l'Eurocode 7 (CNJOG - BNTRA)
Vice-Président de l'Eurocode 7 (TC250 / SC7)*

Pourquoi une seconde génération d'Eurocodes ?

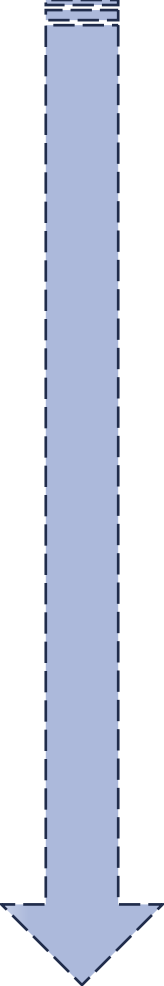
- Poursuivre l'harmonisation des pratiques de dimensionnement au niveau européen
- Disposer d'un ensemble de normes de calcul plus faciles à mettre en œuvre
- Toujours mieux réfléchir à la conception et au dimensionnement des ouvrages géotechniques



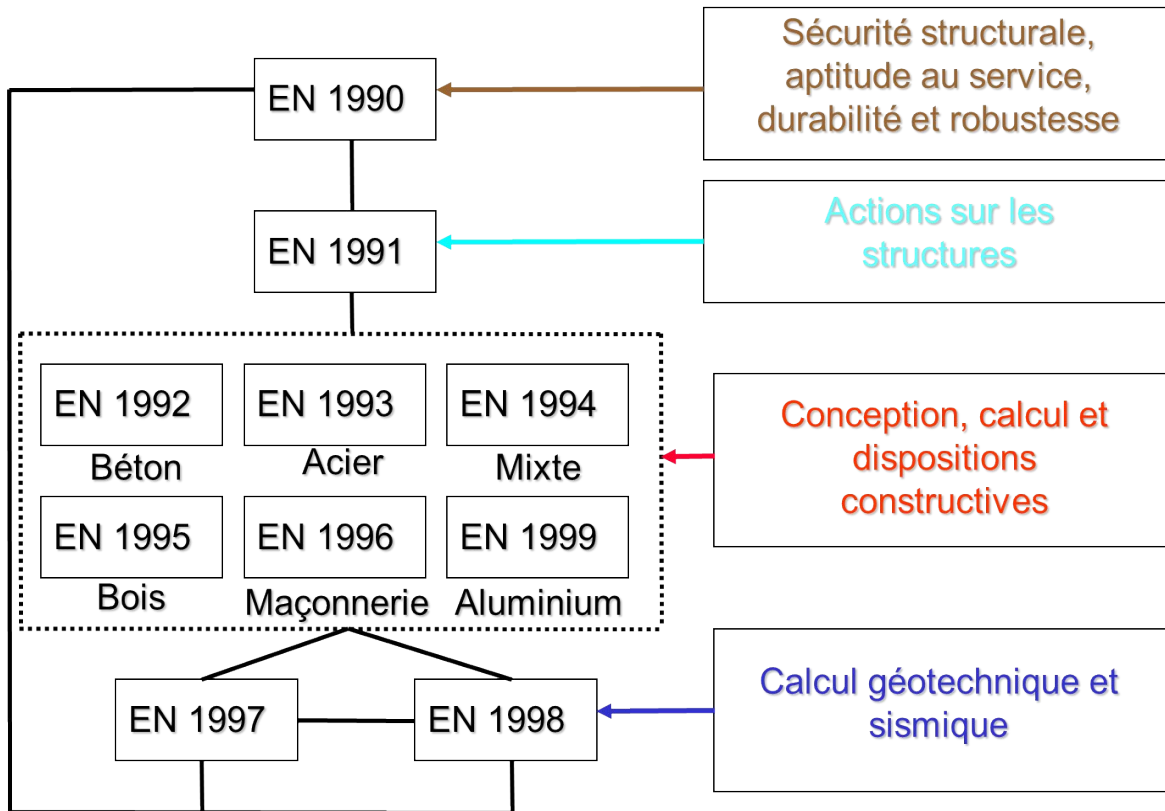
ELS ou ELU ?

La vérification d'un ouvrage doit traduire une certaine réalité.

Quelques repères historiques

- 
- Fin des années 1970 : premières rencontres en vue de l'élaboration des Eurocodes
 - Fin des années 1990 – Début des années 2000 : Rédaction de la première génération des Eurocodes
 - 2005-2007 : Publication de l'Eurocode 7 (Partie 1 puis Partie 2) en France
 - 2008-2014 : Publications successives des normes d'application nationale de l'Eurocode 7 (NF P 94-282, NF P 94-270, NF P 94-262, NF P 94-261, NF P 94-281)
 - 2012-2018 : Groupes d'évolution pour la seconde génération de l'Eurocode 7
 - 2016-2021 : Équipes projet pour la seconde génération de l'Eurocode 7 (PTs 1 à 6)
 - 2022-2025 : Enquête formelle et Vote formel
 - 2022-2027 : Révision des normes d'application nationale de l'Eurocode 7
 - **2027 : Publication de la seconde génération de l'Eurocode 7 le 30 septembre 2027**

Les Eurocodes



EN 1990 Eurocode : Bases de calcul des structures

EN 1991 Eurocode 1 : Actions sur les structures

EN 1992 Eurocode 2 : Calcul des structures en béton

EN 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

EN 1994 Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton

EN 1995 Eurocode 5 : Calcul des structures en bois

EN 1996 Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie

EN 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique

EN 1998 Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes

EN 1999 Eurocode 9 : Calcul des structures en alliage d'aluminium

+ Annexe Nationale fixant les NDPs (paramètres déterminés nationalement) et les NCCIs (informations complémentaires non contradictoires)

+ Normes d'application nationale pour l'Eurocode 7 (NF P 94-261, 262, 270, 281, 282, etc.)

- Ce sont des textes d'application volontaire que les documents de marché peuvent rendre obligatoires.
- Seuls les aspects liés à la sécurité incendie et aux accélérations sismiques sont obligatoires.

Les coefficients partiels

Le dimensionnement des ouvrages est généralement appréhendé en termes de calcul selon trois approches que **les Eurocodes permettent d'une manière ou d'une autre** :

- Calcul aux contraintes admissibles (« ASD ») : c'est la manière la plus intuitive de concevoir un ouvrage, le calcul est mené avec des charges non pondérées et les effets des actions sont comparées aux résistances des matériaux ou du sol par des coefficients globaux.

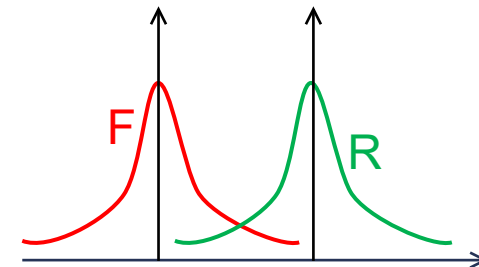
$$F < R/F_{os}$$

- Calcul de type semi-probabilistes (« LRFD » ou « Eurocodes ») : le coefficient de sécurité global est découpé pour tenir compte d'incertitudes liées à la géométrie, aux sollicitations, aux résistances, à la méthode de calcul, etc.

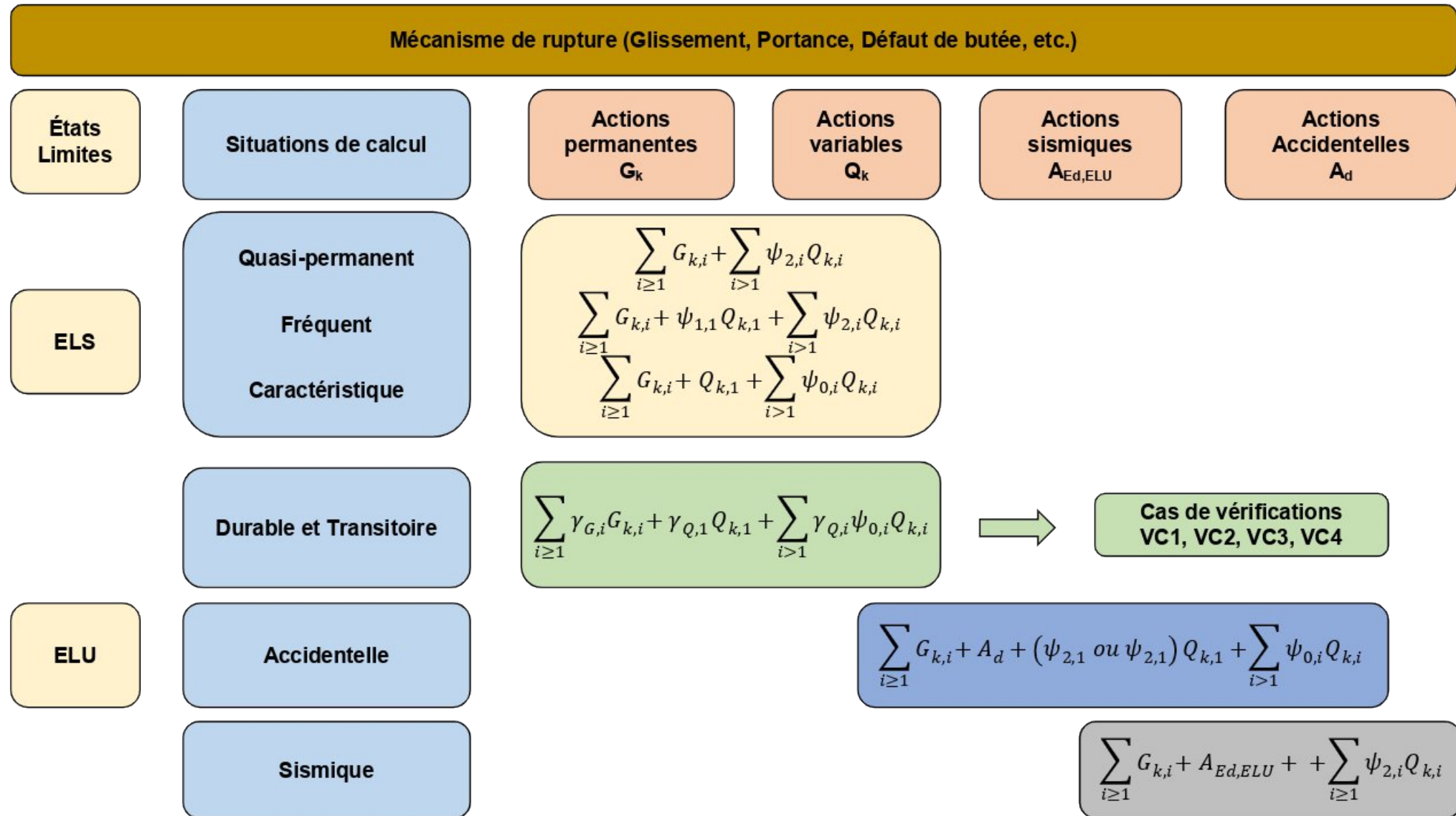
C'est plus ou moins le format de certains règlements (Fascicule 62 Titre V, DTU 13.2, Fond 72, Mur 73)

- Calcul selon une approche fiabiliste basée sur les lois de distribution des actions et des résistances

$$\gamma_F F < R/\gamma_R$$

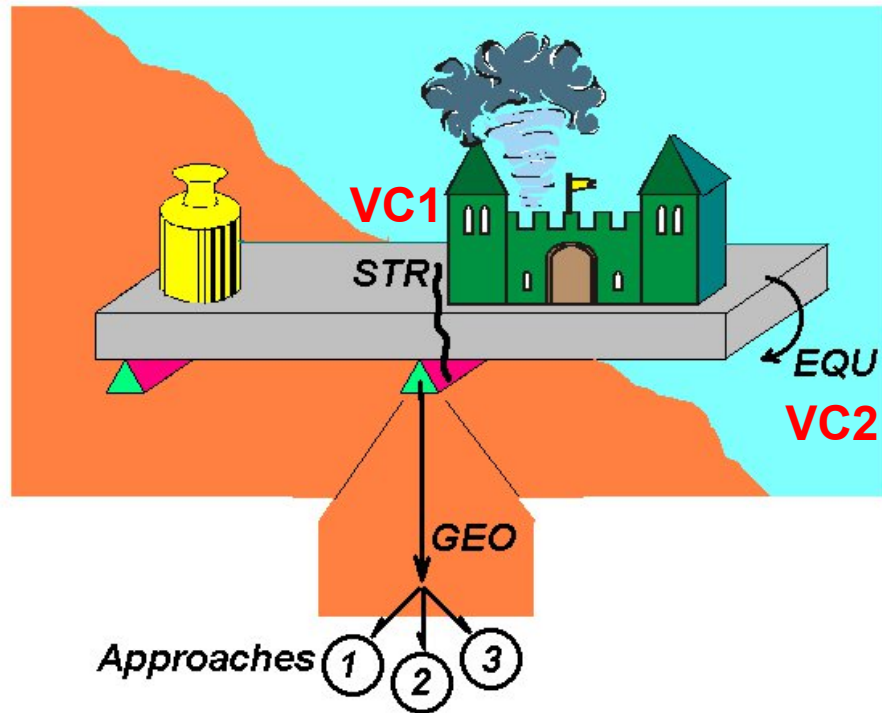


Mécanismes, États-Limites, Actions, Combinaisons d'actions

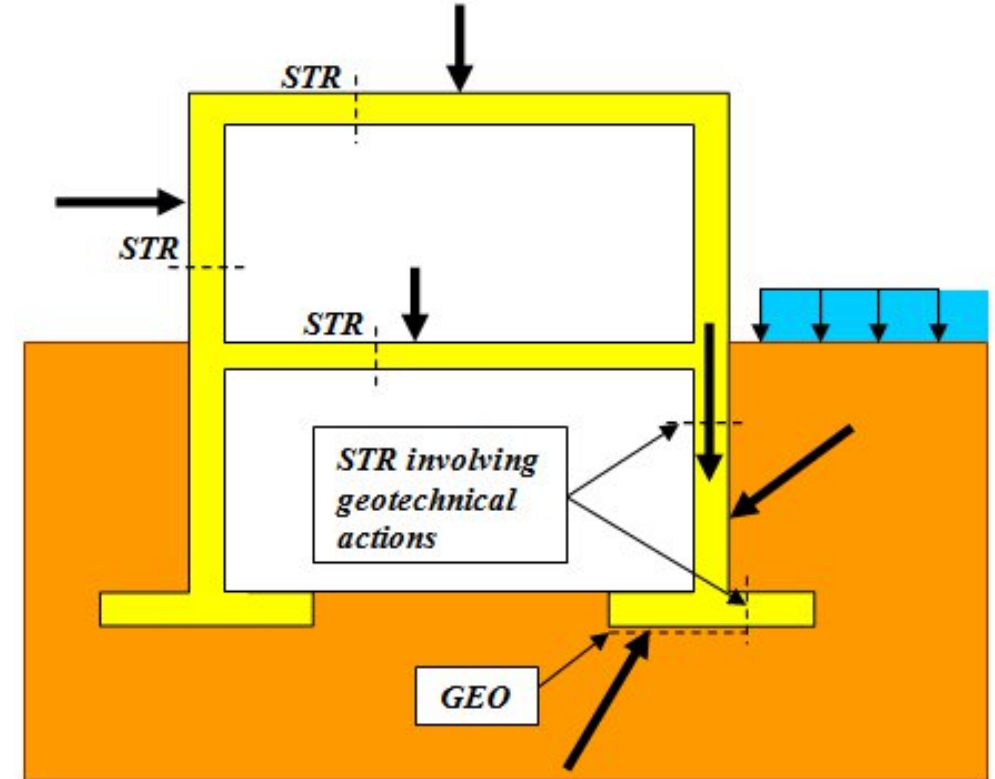


Approches pour les résistances

Illustration des états limites STR, EQU & GEO - J.A. Calgaro

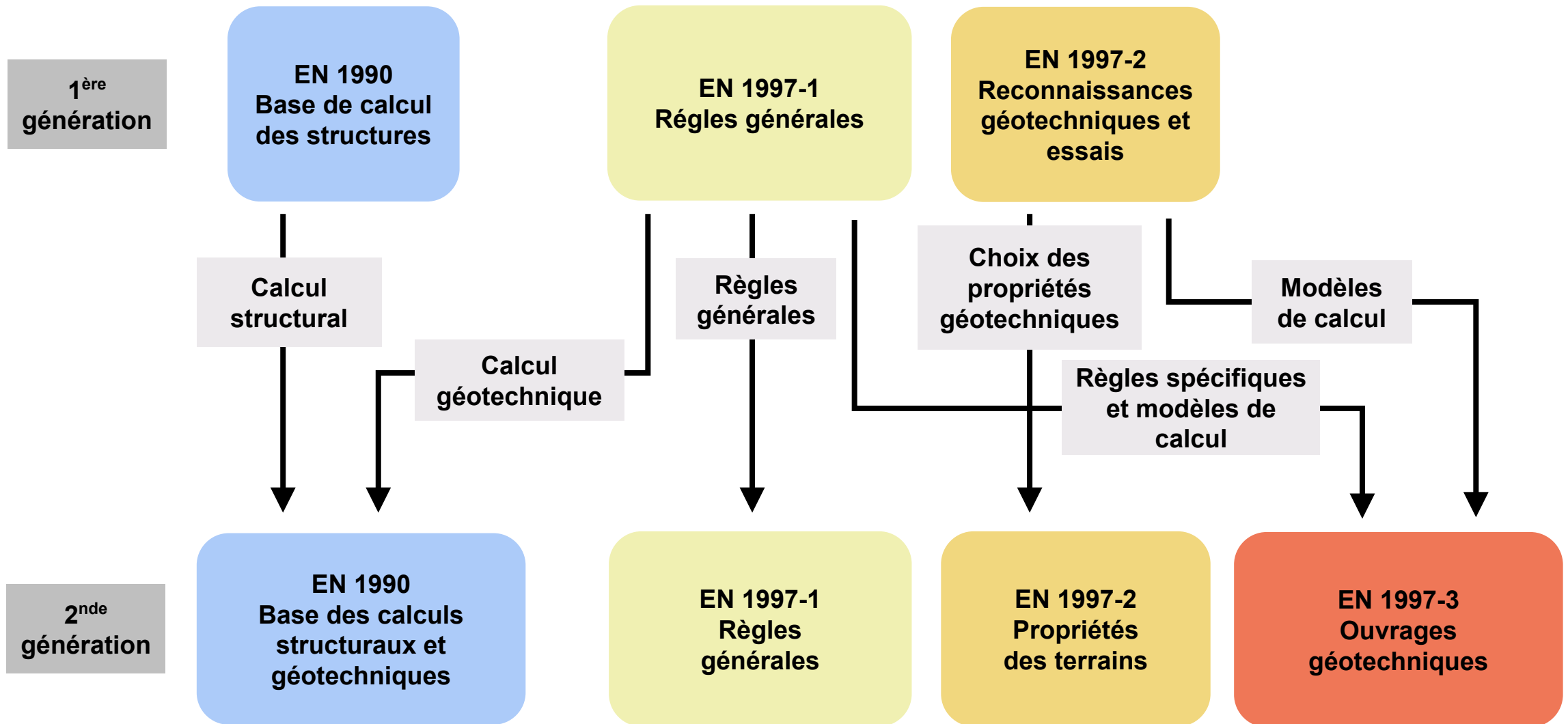


→ RFA (Resistance Factor Approach - globale)
ou MFA (Material Factor Approach - locale)



→ En géotechnique, actions et résistances interagissent fortement ce qui oblige à disposer d'un cadre souple de gestion de la sécurité

EN 1997 : Trois parties désormais !



EN 1997-1 – Sommaire

➤ 12 Sections + 3 Annexes (normative et informative) – 110 pages

➤ Sections:

1. Domaine d'application
2. Références normatives
3. Termes, définitions et symboles
4. Principes de conception
5. Matériaux
6. Nappe
7. Analyse géotechnique
8. ELU
9. ELS
10. Exécution
11. Essais
12. Contenu des rapports

➤ Annexes :

- A. Procédure de détermination des valeurs caractéristiques
- B. Contenu des rapports
- C. Information sur la sélection des classes de complexité géotechnique

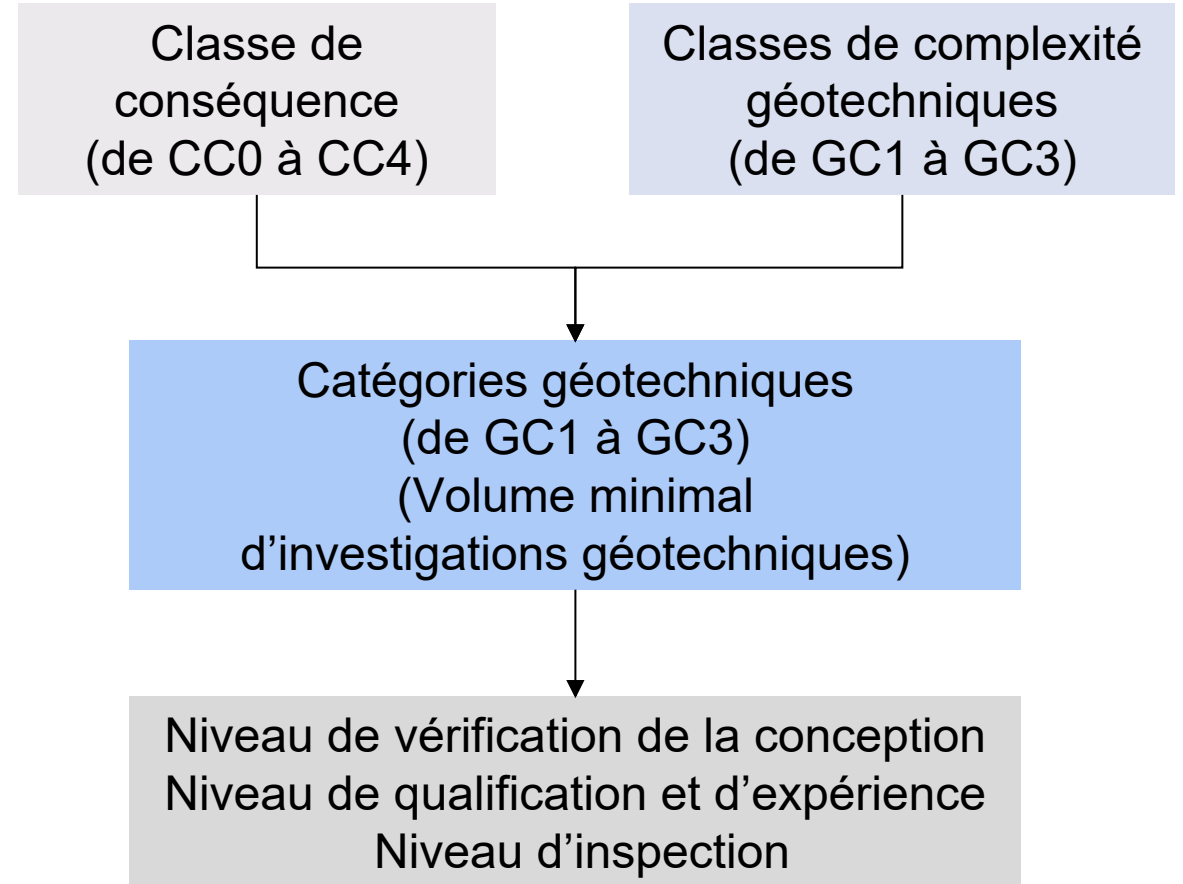
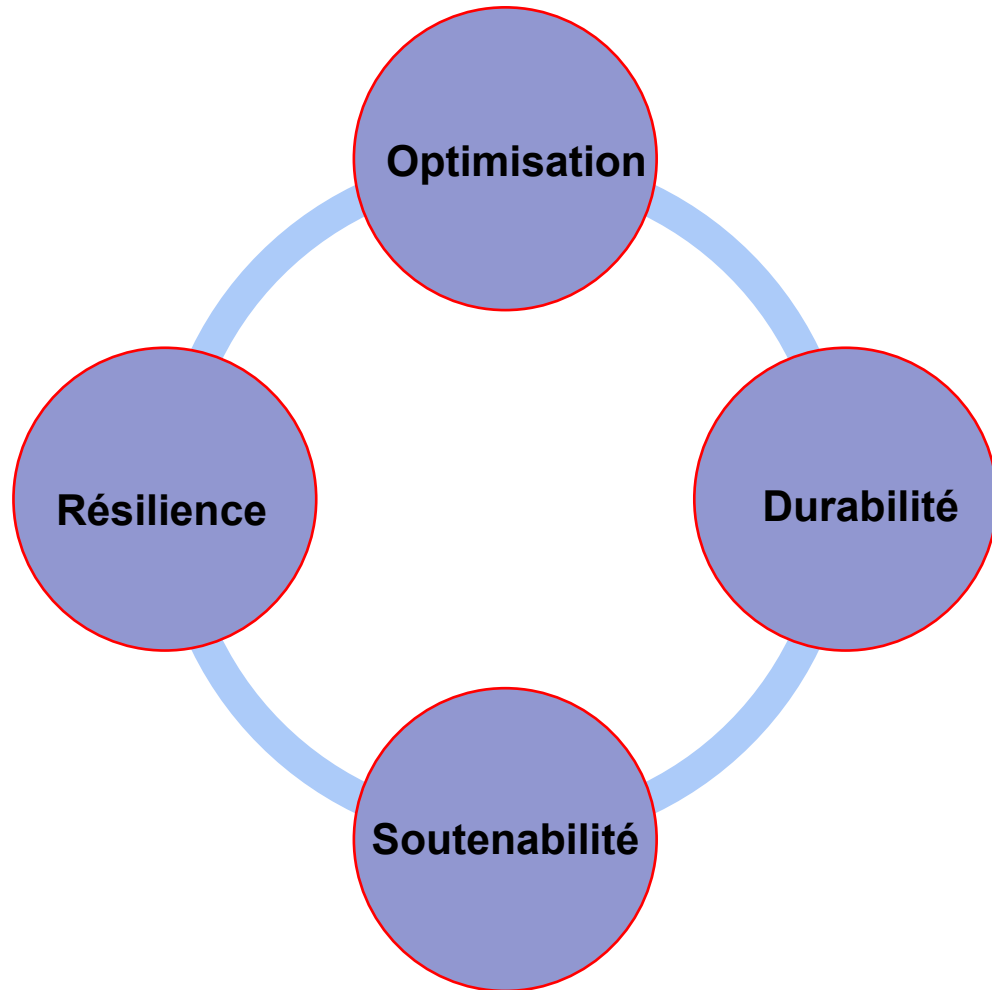
- Mécanique des roches
- Durabilité, Soutenabilité, Fiabilité
- Modèle de terrain, Modèle de calcul géotechnique
- ELU/ELS – MFA/RFA
- Modélisation numérique
- Vérifications hydrauliques

Mécanique des Roches

- Rocher / Masse rocheuse
- Propriétés mécaniques et géométriques
- Joint et discontinuité
- Modèles de calcul spécifiques
- Incertitude importante
- Rupture fragile



Fiabilité des Ouvrages Géotechniques – Section 4



Valeurs représentatives / nominales / caractéristiques – Section 4

- Le concept de valeurs caractéristiques a été mis à jour.
- Deux types de valeurs représentatives peuvent être utilisés en parallèle à partir des valeurs dérivées :
 - « les valeurs nominales » : estimation prudente des propriétés des terrain fondée sur l'expérience et les données disponibles (jugement de l'ingénieur)
 - « les valeurs caractéristiques » : analyse statistique des valeurs disponibles (moyenne avec une fiabilité de 95%)
- L'Annexe B donne les équations principales pour estimer les valeurs caractéristiques (effet de la profondeur absent) :
$$X_k = X_{mean} - k_N \sigma = X_{mean} (1 - k_N \cdot V) \quad k_N = \frac{N_{95}}{\sqrt{N}} \quad V = \frac{\sigma}{X_{mean}}$$
$$X_k = e^{Y_{mean} - k_N \sigma} = e^{Y_{mean} (1 - k_N \cdot V)} \quad (Y = \ln X) \quad k_N = \frac{t_{95, N-1}}{\sqrt{N}}$$
- Des valeurs typiques des coefficients de variation sont aussi fournis.

Modèle de terrain / Modèle de dimensionnement géotechnique

Étape 0

Modèle
géologique

Valeurs mesurées
des propriétés des
terrains

Investigations
géotechniques

Étape 1
Cahier A

Valeurs dérivées
des propriétés des
terrains

Étude de bureau

Analyse à rebours à partir
d'ouvrages suivis par
instrumentation

Corrélations

Zone d'influence
géotechnique

Étape 2
Cahier B

Modèle de terrain
GIR

Valeurs
représentative
propriétés des
terrains X_{rep}

Valeurs
caractéristiques
selon une approche
statique X_k

Valeurs nominales
dédiés du jugement
de l'ingénieur X_{nom}

Étape 3
Cahier C

Modèle de
dimensionnement
géotechnique
GDR

États limites : ELS/ELU

Situations de calcul
Permanent et transitoires
Sismiques
Accidentelles

Sollicitations

Intensité, durée
d'application,
fréquence

Mécanisme de rupture ou de
déformation

Volume en jeu - Possibilité de
répartir les charges, niveau de
déformation

Les méthode de dimensionnement – Section 4

Les états limites des structures géotechniques doivent être vérifiés par une ou plusieurs des méthodes suivantes :

- calculs utilisant la méthode des coefficients partiels (4.4) ou d'autres méthodes fondées sur la fiabilité ;
- règles prescriptrices (4.5) ;
- essais (4.6) ; ou
- méthode observationnelle (4.7).



Vérifications à l'ELU – Section 4

➤ RFA (Resistance Factor Approach) / MFA (Material Factor Approach)

Différentes alternatives dépendant de l'ouvrage géotechnique, de la méthode de calcul (analytique, semi-empirique, numérique, etc.)

→ **Les choix spécifiques sont présentés dans l'EN 1997-3**

		Types d'états limites géotechniques			
		<i>Rupture et deformation excessive</i>		<i>Équilibre statique et soulèvement</i>	
<i>Cas de conception (cas de vérification)</i>		MFA	RFA	MFA and/or RFA	
VC1 (ex STR/GEO)	γ_G et $\gamma_Q > 1.0$ $\gamma_G=1.35$ et $\gamma_Q=1.5$	X (ex DA1-1)	X (ex DA2)		Vérifications spécifiques – équilibre statique - contraintes effectives - gradients hydrauliques
VC2 (ex EQU)	γ_G and $\gamma_Q > 1.0$ $\gamma_G = 1.0$; $\gamma_Q > 1.0$			X	
VC3	$\gamma_G = 1.0$ et $\gamma_Q > 1.0$	X (ex DA1-2)			
VC4	γ_E et $\gamma_Q > 1.0$ $\gamma_E=1.35$		X (ex DA2*) EFA		

Les coefficients partiels – Section 4 – MFA

Propriété du terrain	Symbole	M1	M2
Sols et remblais			
Résistance au cisaillement lors d'une analyse en contrainte effective (τ_f)	$\gamma_{\tau f}$	1,0	1,25 k _M
Coefficient de frottement de pic ($\tan \varphi'_p$)	$\gamma_{\tan \varphi, p}$	1,0	1,25 k _M
Cohésion effective de pic (c'_p)	$\gamma_{c, p}$	1,0	1,25 k _M
Coefficient de frottement à l'état critique ($\tan \varphi'_{cs}$)	$\gamma_{\tan \varphi, cs}$	1,0	1,1 k _M
Coefficient de frottement résiduel ($\tan \varphi'_r$)	$\gamma_{\tan \varphi, r}$	1,0	1,1 k _M
Cohésion effective résiduelle (c'_r)	$\gamma_{c, r}$	1,0	1,1 k _M
Résistance au cisaillement lors d'une analyse de contrainte totale (c_u)	γ_{cu}	1,0	1,4 k _M
Résistance à la compression uniaxiale (q_u)	γ_{qu}	comme γ_{cu}	
Matériau rocheux et masse rocheuse			
Résistance au cisaillement (τ_r)	$\gamma_{\tau r}$	1,0	1,25 k _M
Résistance à la compression uniaxiale (q_u)	γ_{qu}	1,0	1,4 k _M
Discontinuités dans la roche			
Résistance au cisaillement (τ_{dis})	$\gamma_{\tau dis}$	1,0	1,25 k _M
Coefficient de frottement résiduele ($\tan \varphi'_{dis}$)	$\gamma_{\tan \varphi dis, r}$	1,0	1,1 k _M
Interface			
Coefficient de frottement de l'interface terrain-structure ($\tan \delta$)	$\gamma_{\tan \delta}$	1,0	1,25 k _M

Le calcul numérique – Section 8

Dans les éléments structuraux (tirant, poutre, plaque, coque, etc.), il est aisé de connaître à la fois le torseur d'efforts appliqués et le torseur d'efforts maximal :

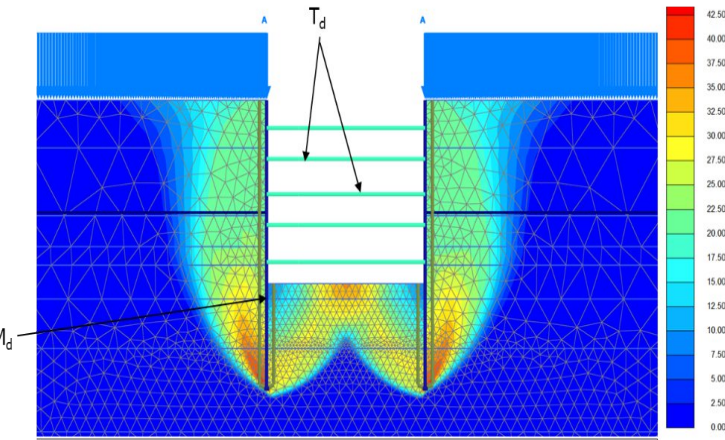
$$\begin{aligned} N_{\text{mob}} &- N_{\text{lim}} \\ V_{\text{mob}} &- V_{\text{lim}} \\ M_{\text{mob}} &- M_{\text{lim}} \end{aligned}$$

Dans le sol, le problème est plus complexe. On connaît l'état de contraintes mais on ne sait rien dire sur les contraintes limites mobilisables et encore moins sur les efforts limites mobilisables. On sait seulement que les contraintes sont limitées par une surface limite qui peut éventuellement évoluer.

- Dans certains cas, on peut raisonner sur des parties du modèle numérique : par exemple, un tirant, un pieu, la butée, etc. Le modèle numérique donne les forces mobilisées et on calcule les forces limites par d'autres moyens
- On peut aussi augmenter la charge jusqu'à obtenir la divergence du modèle
- La technique la plus utilisée consiste à réduire les paramètres de résistance au cisaillement jusqu'à obtenir la divergence des calculs (c-phi réduction)

Le calcul numérique – Section 8

Calcul avec les valeurs représentatives
des charges et des propriétés des terrains :



$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$
$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$
$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

$$F_d = 1.35 F_k \leftarrow$$
$$R_{mob} \leq R_{ult} / \gamma_R$$

Phase 1

Phase 2

Phase n

Éléments structuraux élastiques
ou élastoplastiques

$$\longrightarrow R_f > 1.25$$
$$F_d$$

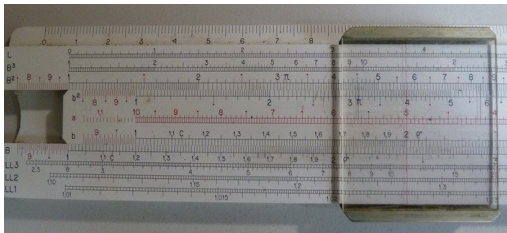
$$\longrightarrow R_f > 1.25$$
$$F_d$$

$$\longrightarrow R_f > 1.25$$
$$F_d$$

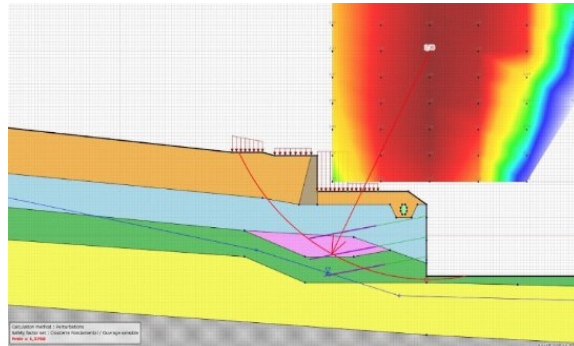
- A chaque étape, la valeur maximale des efforts est considérée.
- Cette approche sera probablement celle recommandée par l'Eurocode 7.

Le calcul numérique – Section 8

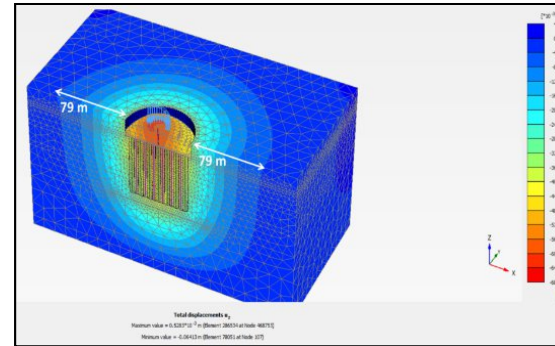
Il est difficile d'anticiper l'évolution des méthodes de calcul et donc des procédures de vérifications sur des durées de 15 ans....



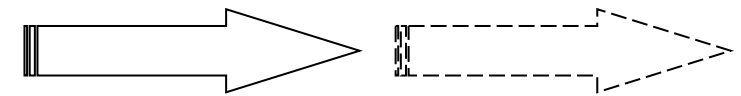
1975



1995



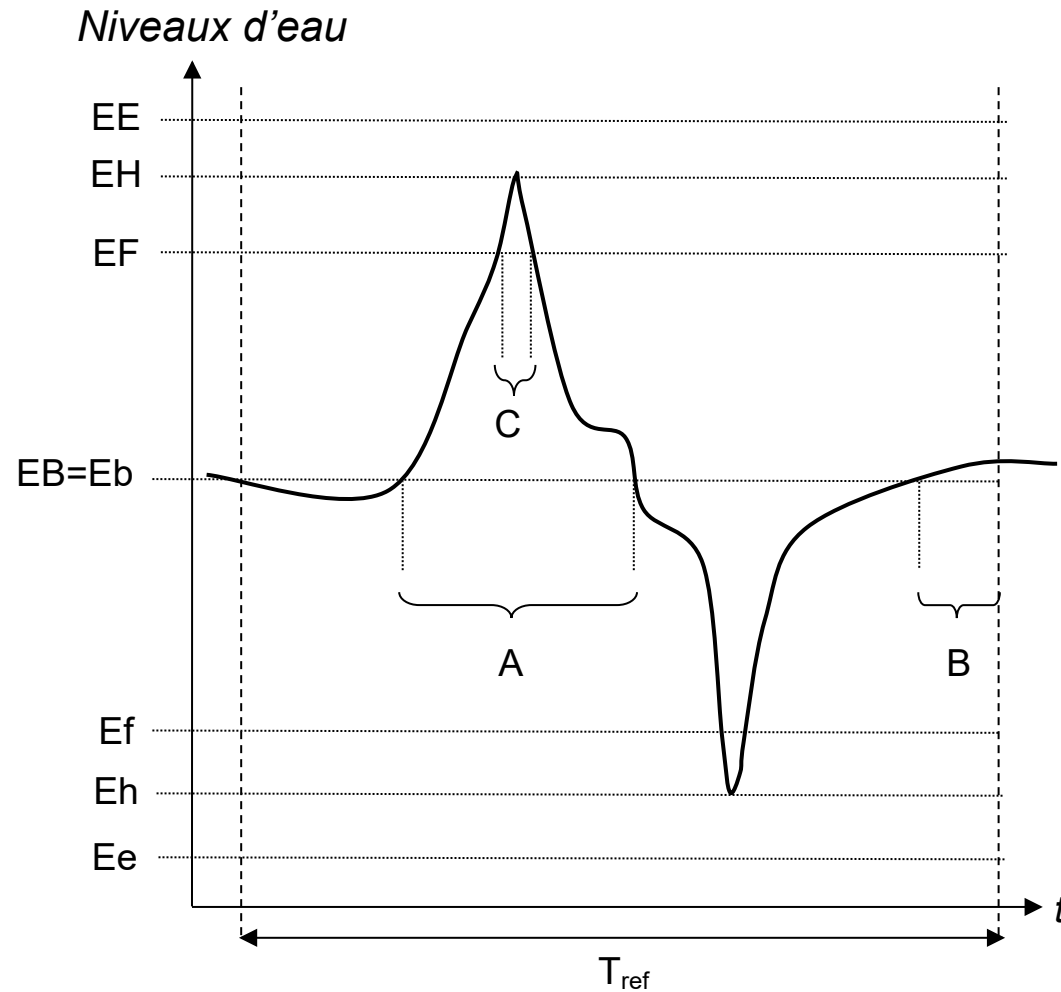
2015



2035

2055

Les niveaux d'eau – Sections 6 et 8



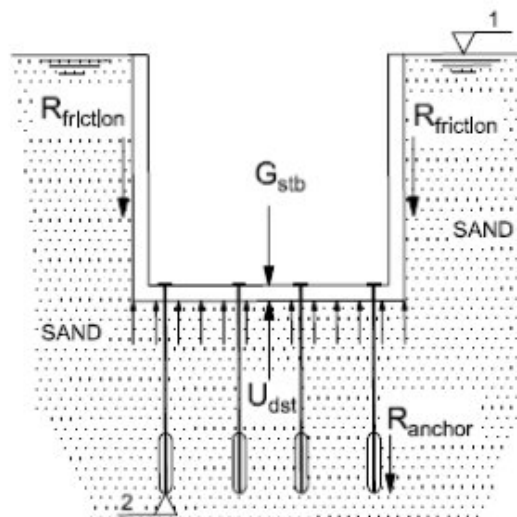
- ELU pour les situations accidentelles EE
- ELU pour les situations durables et transitoires EH
- ELS pour les situations caractéristiques EF and EB
- ELS pour les situations quasi-permanentes et fréquentes Ef
- ELU sismique Ee

$A + B = 50\% T_{ref}$ -- $C (EF/Ef) = 1\% T_{ref}$ -- $EH/Eh = 1$ fois par T_{ref}
Période de retour = $-T_{ref}/\ln(1-p)$ avec p la probabilité de dépassement

Les effets de l'eau – Section 8

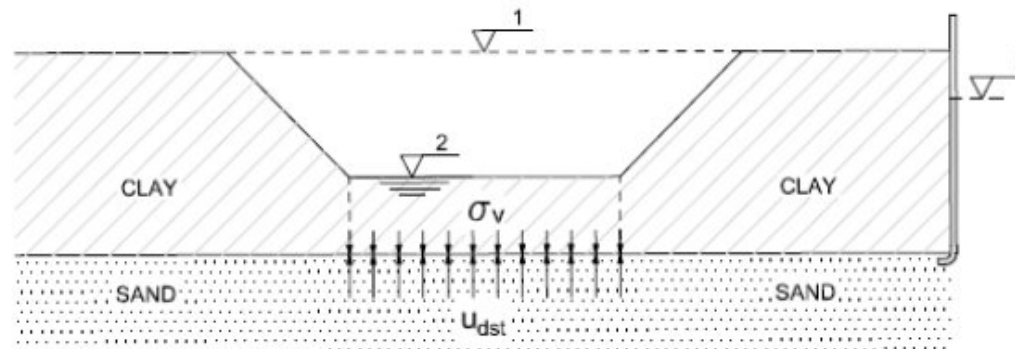
Solide rigide

$$U_{dst;d} + G_{dstb;d} + Q_{dst;d} - G_{stb;d} \leq R_d$$



Solide souple

$$u_{dst;d} - \sigma_{v;d} \leq 0$$



Les effets de l'eau – Section 8

➤ Deux vérifications sont proposées



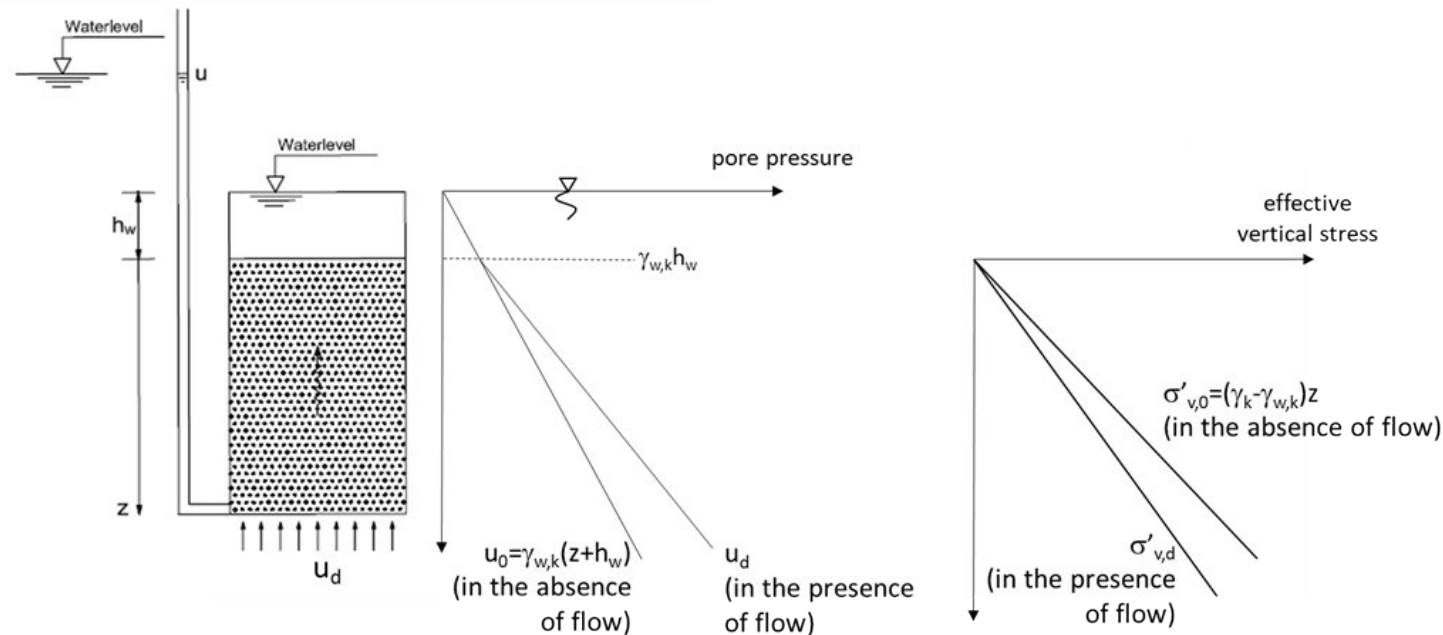
$$i_d \leq i_{cd}$$

(vérifications en termes de gradients hydrauliques – vérifications locales)



$$\Delta u_d \leq \gamma_{HYD} (\gamma_{rep} - \gamma_{w,rep})z + \gamma_{pv} p'_{v,rep}$$

(vérifications de manière à ne pas trop réduire la contrainte verticale effective – vérifications globales)



Les effets de l'eau – Section 8

$$h = u/g_w + z$$

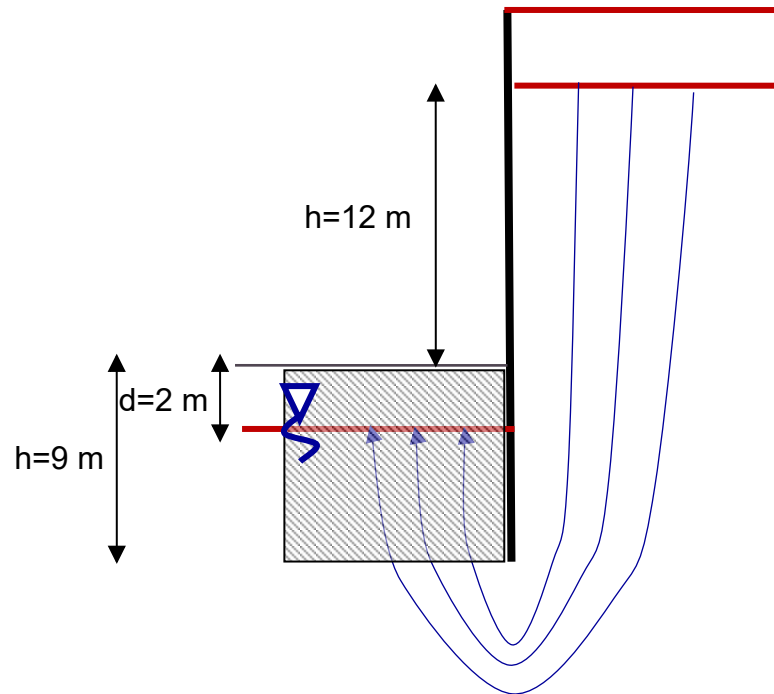
$$i = \Delta h / \Delta L$$

$$v = k \cdot i$$

ou

$$i = -\text{grad}(h)$$

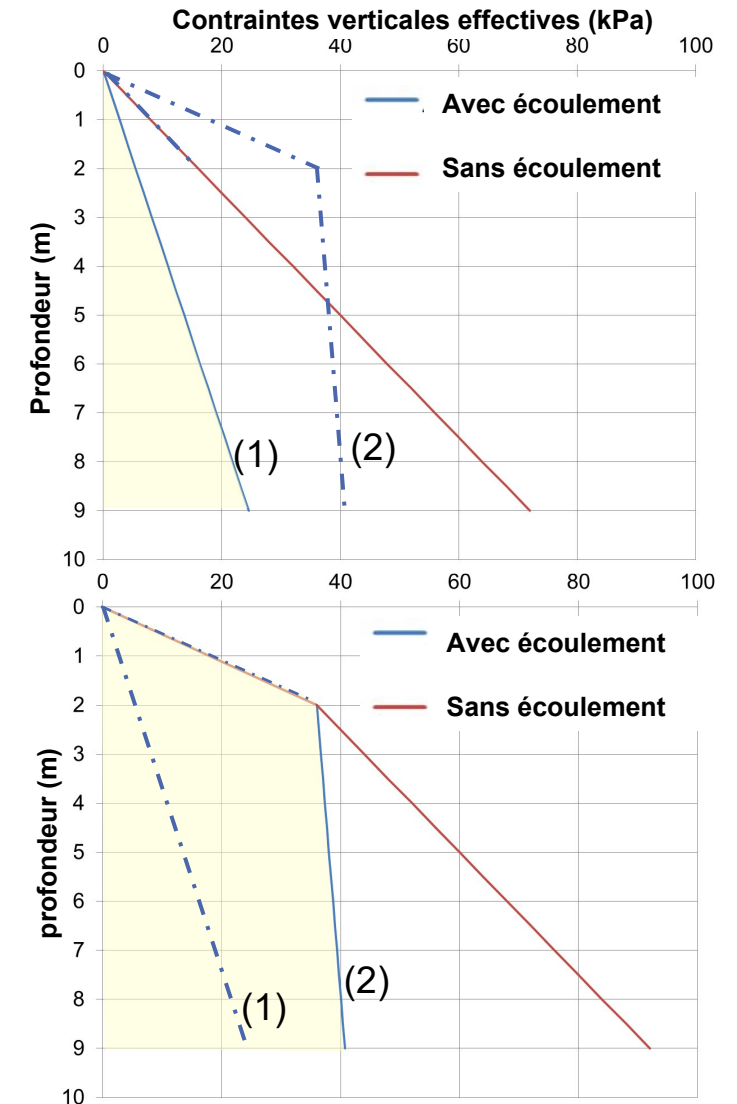
$$v = -k \cdot \text{grad}(h)$$



Le gradient hydraulique est plus grand mais la stabilité de l'écran est mieux assurée.

Cas 1:
d=0
i=0.528

Cas 2:
d=2 m
i=0.732



Autres aspects

- Effets du temps (fluage) - Chargement dynamique ou cyclique (section 4)
- ELS (section 9) : tous les facteurs partiels sont égaux et on s'intéresse aux déplacements. Des facteurs de mobilisation peuvent être prise en compte.
- Mise en œuvre de la conception (section 10) : supervision / inspection / surveillance / maintenance / méthode observationnelle
- Essais (section 11) : propriétés du terrain, paramètres de résistance locaux ou globaux, contrôle de la qualité, meilleure appréhension du comportement

- 13 Sections + 8 Annexes (normative et informative) – 143 pages

Clauses 4 à 6

- Modèle de terrain et valeurs dérivées
- Investigation géotechnique
- Description et classification des terrains

Clauses 7 à 12

- Résistance
- Raideur, compressibilité, consolidation et fluage
- Propriétés cycliques, dynamiques et sismiques
- Nappe et propriétés hydrauliques
- Propriétés thermiques

- 13 Sections + 11 Annexes (normative et informative) – 329 pages

Clauses 4 à 8

- Pente, déblai et remblai
- Fondations superficielles
- Fondations profondes
- Écrans de soutènement
- Ancrages

Clauses 9 à 12

- Structures en sol renforcé
- Structures clouées
- Ancrages au rocher
- Amélioration des terrains

Clauses 13

- Mesures de contrôle de la nappe

Quelle organisation d'ici 2027 ?

Niveau	Dimensionnement TC250	Essais TC341	Exécution TC288	Admi- nistr.
1	NF EN 1997-1 (Eurocode 7) + Annexe nationale + NF EN 1997-2 + NF EN 1997-3	Normes	Normes	Textes officiels
2	Normes d'application nationale de l'Eurocode 7 (Parties 1 à 3) P94-261 Fondations Superfic. P94-262 Fondations Profondes P94-263 Renforcement des terrains P94-270-1 et 2 Ouvrages en sols renforcés P94-281 Murs de soutènement P94-282 Écrans de soutènement P94-290 Ouvrages en terre			Fascicule de documentation Ouvrages géotechniques au rocher
	DTU/CCTG	Documents traitant des divers aspects des projets et de l'exécution des ouvrages, y compris les relations contractuelles (exemples : ouvrages simples, fondation de bâtiment, etc..)		

Quelle organisation d'ici 2027 ?

		2022				2023				2024				2025				2026				2027			
		T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
EN 1997-1&2&3	Enquête Formelle	---	---	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête Formelle	---	---	---	---	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Vote Formel	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
Annexe EN 1997-1&2&3	Préparation des textes	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
NF P 94-261	Préparation du texte	---	X	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
NF P 94-262	Préparation du texte	---	---	---	---	X	X	X	X	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
NF P 94-263	Préparation du texte	---	---	---	---	X	X	X	X	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
NF P 94-282	Préparation du texte	---	---	---	---	---	---	---	---	X	X	X	X	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---
NF P 94-281	Préparation du texte	---	---	---	---	---	---	---	---	X	X	X	X	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---	---
NF P 94-270-1&2	Préparation du texte	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	X	X	X	---	X	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---
NF P 94-290	Préparation du texte	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	X	X	X	---	X	---	---	---	---	---	---
	Enquête publique	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---	---
	Insertion Commentaires	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	X	---	---	---	---

Quelques mots de conclusion

- L'Eurocode 7 se veut être un outil de promotion de l'ingénierie géotechnique en proposant un cadre de justification des ouvrages géotechniques à la fois cohérent et souple.
- L'Eurocode 7 formalise des approches et méthodes de dimensionnement couramment mises en œuvre mais n'interdit en aucun cas des développements originaux qui seront formalisés par la suite : la clef d'entrée est le mécanisme de rupture ou de déformation.
- L'Eurocode 7 est un document qui permet désormais le dialogue entre les géotechniciens des sols, des roches et des sols intermédiaires ; de différents pays en lien avec les ingénieurs de structure.
- L'Eurocode 7 s'applique en Europe mais aussi ailleurs dans le monde. C'est un formidable outil d'exportation de l'ingénierie européenne. A l'échelle nationale, chaque pays européen peut néanmoins poursuivre sa pratique nationale.

Didier SUBRIN (CETU)

Réflexions en cours pour l'introduction des ouvrages souterrains dans les Eurocodes





**MINISTÈRE
CHARGÉ
DES TRANSPORTS**

*Liberté
Égalité
Fraternité*



SÉANCE TECHNIQUE CFMR-AFTES

**Mécanique des roches, tunnels et Eurocodes :
quelles pistes pour l'avenir ?**



Didier SUBRIN (CETU)

Réflexions en cours pour l'introduction des ouvrages souterrains dans les Eurocodes

Pourquoi normaliser les tunnels ?

*« on n'a pas attendu pour construire des tunnels et on vit très bien sans... »
« en tunnel, il y a vraiment des interactions sols/structures ! »
« quand on est dans les roches, c'est pas pareil... »*

Pourquoi normaliser les tunnels ?

*« on n'a pas attendu pour construire des tunnels et on vit très bien sans... »
« en tunnel, il y a vraiment des interactions sols/structures ! »
« quand on est dans les roches, c'est pas pareil... »*

Les tunnels se caractérisent en effet par :

- un **volume limité de reconnaissances** au regard de la taille des ouvrages, et donc des **incertitudes** fortes relatives aux hypothèses de conception
- le fait que le terrain agit **comme une charge et comme une résistance**, dans le même temps → **ISS** /\
- des méthodes d'exécution et un **soutènement provisoire, parties intégrantes de la conception**, avec des interrelations significatives entre la conception et la réalisation
- des méthodes d'exécution qui influent fortement sur la **préservation des propriétés du terrain**
- l'importance des **effets dépendant du temps** et du comportement en contraintes et déformations du terrain et des éléments structurels
- la conception s'appuie fondamentalement sur **l'expérience et l'empirisme** : règles prescriptives et méthode observationnelle répandues

→ différences jugées significatives comparées aux structures géotechniques construites à l'air libre

Pourquoi normaliser les tunnels ?

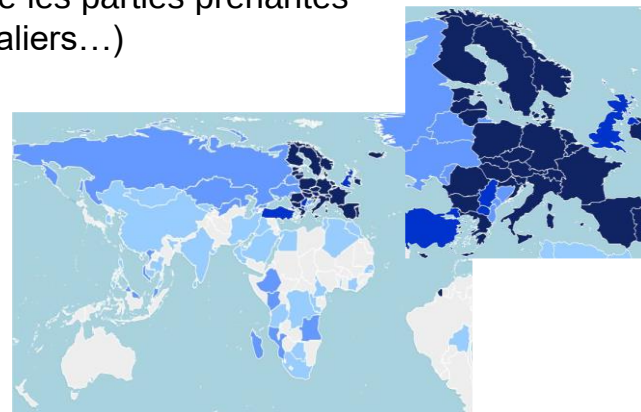
*« on n'a pas attendu pour construire des tunnels et on vit très bien sans... »
« en tunnel, il y a vraiment des interactions sols/structures ! »
« quand on est dans les roches, c'est pas pareil... »*

Motivations :

- inclure **explicitement** les tunnels au même titre que les autres **ouvrages géotechniques**
- clarifier l'application aux tunnels des parties des EC, **éviter les mauvais usages** et limiter les discussions contractuelles
- garantir une meilleure transparence dans les méthodes de conception et de dimensionnement, et adopter un **langage commun** et une communication améliorée entre les parties prenantes
- **harmoniser le niveau de sécurité** des ouvrages (ouvrages transfrontaliers...)
- diffuser l'état de l'art **au-delà de l'Europe** et accroître la compétitivité de l'industrie européenne

Enjeux :

- établir un **cadre commun accepté** dans les pays membres
- maintenir un cadre **flexible sans remettre en cause les pratiques**



Groupes de travail européens “Tunnels and underground structures” s/c. JRC et CEN/TC250

JRC Expert Group (Joint Research Center – CE, 2017-2022) :

- 2019 Standardisation needs for the design of TUS
- 2022 Prospect for designing TUS in the EC



Groupes de travail européens “Tunnels and underground structures” s/c. JRC et CEN/TC250

JRC Expert Group (Joint Research Center – CE, 2017-2022) :

- 2019 Standardisation needs for the design of TUS
- 2022 Prospect for designing TUS in the EC

Ad-Hoc Group Tunnel (2025 en cours) :

- objectif : un plan de travail pour introduire les tunnels dans le cadre formel des Eurocodes
- périmètre : les types de tunnels et de structures souterraines à inclure
- sujets techniques à traiter ? par quel sous-comité (EN1990-EN1999) ?
 - clauses applicables sans changement
 - écarts à la pratique, sujets qui exigent des clarifications,
 - amendements pour rendre les textes pleinement applicables aux tunnels
 - annexes techniques sur des points spécifiques
- organisation (engagement de la profession, future role du groupe AHG)
- calendrier prévisionnel et procédure d'avancement

Recommandations au CEN/TC250 qui décidera de la suite



Types d'ouvrages souterrains à considérer

« Les efforts devraient se concentrer en premier lieu sur les tunnels réalisés soit au tunnelier avec revêtement en voussoirs soit en méthode conventionnelle avec excavation séquentielle. Les ouvrages en tranchée couverte sont déjà couverts par les textes existants. » JRC 2022

Focus à porter prioritairement sur :

- **les tunnels et les cavernes** (auxquels on peut associer les puits profonds)
- les tunnels “creusés” **à faible et à grande profondeur** dans les sols, les roches et les SIRT
- réalisés **au tunnelier ou en méthode conventionnelle** (section pleine ou divisée)
- avec prise en compte des **interactions terrain/structure**

En matière de fonctionnalité :

- d'abord les **infrastructures de transports** (fer, métro, route)
- et divers usages publics, de défense...

Vérifier que **les tunnels en tranchée couverte et les tunnels immergés** sont suffisamment couverts par la 2e generation des Eurocodes.

Périmètre à élargir ensuite :

- culverts, micro-tunnels (jacked-boring), shafts (yc raise-boring)
- tunnels miniers ? de stockage ? voies d'eau ?

Comment faire ?

Quelles solutions pour intégrer formellement les tunnels dans les Eurocodes ?

EN 1990 General Rules

EN 1991 Actions

EN 1992 Structures en béton

EN 1993 Structures en métal

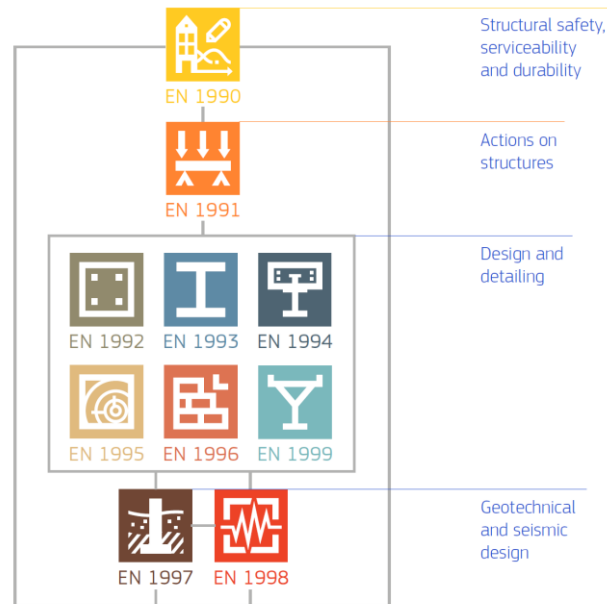
Autres Matériaux béton/métal, maçonnerie

EN 1997 Conception géotechnique

EN 1998 Conception sismique

Horiz. Group Fire

→ ~~un nouvel Eurocode auto-porteur ? NON~~



Comment faire ?

Quelles solutions pour intégrer formellement les tunnels dans les Eurocodes ?

EN 1990 General Rules

EN 1991 Actions

EN 1992 Structures en béton

EN 1993 Structures en métal

Autres Matériaux béton/métal, maçonnerie

EN 1997 Conception géotechnique

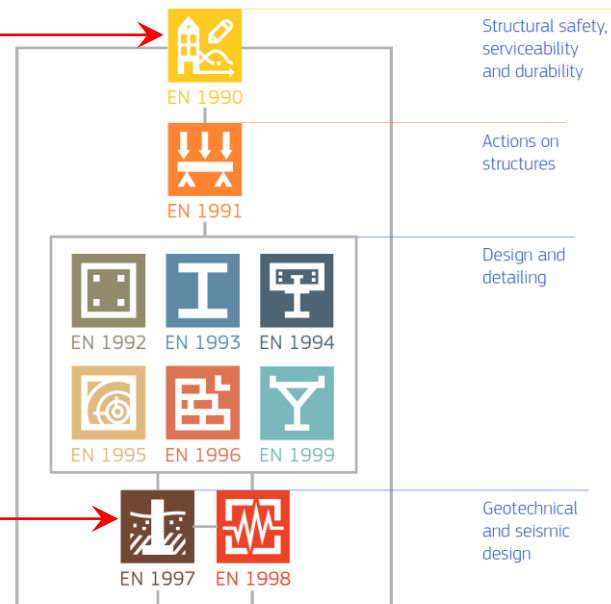
EN 1998 Conception sismique

Horiz. Group Fire

→ ~~un nouvel Eurocode auto-porteur ? NON~~

Nouvelle annexe A.x EN1990

Nouvelle partie EN1997-4



Comment faire ?

Quelles solutions pour intégrer formellement les tunnels dans les Eurocodes ?

EN 1990 General Rules

EN 1991 Actions

EN 1992 Structures en béton

EN 1993 Structures en métal

Autres Matériaux béton/métal, maçonnerie

EN 1997 Conception géotechnique

EN 1998 Conception sismique

Horiz. Group Fire

→ ~~un nouvel Eurocode auto-porteur ? NON~~

Nouvelle annexe A.x EN1990

Amendements EN1990

Nouvelle partie EN1991-x

Actions spécifiques aux tunnels

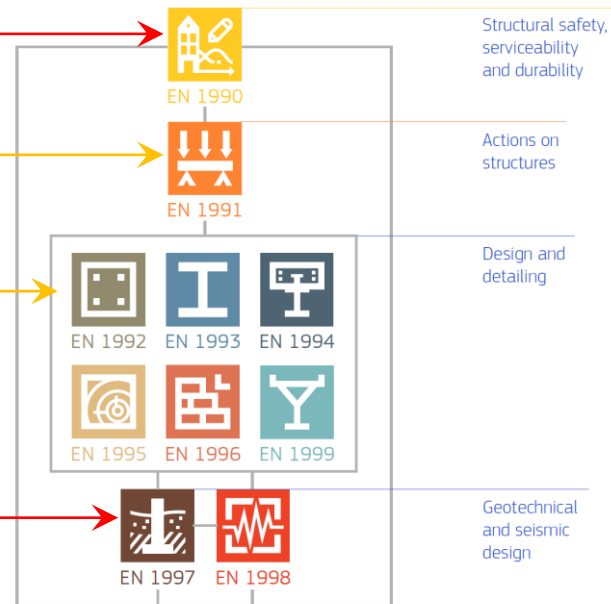
Nouvelles annexes EN1992, EN1993, ...

Amendements EN1992, EN1993, ...

Nouvelle partie EN1997-4

Amendements et/ou annexes

EN1997-1 et EN1997-2



Comment faire ?

Quelles solutions pour intégrer formellement les tunnels dans les Eurocodes ?

EN 1990 General Rules

EN 1991 Actions

EN 1992 Structures en béton

EN 1993 Structures en métal

Autres Matériaux béton/métal, maçonnerie

EN 1997 Conception géotechnique

EN 1998 Conception sismique

Horiz. Group Fire

→ ~~un nouvel Eurocode auto-porteur ? NON~~

Nouvelle annexe A.x EN1990

Amendements EN1990

Nouvelle partie EN1991-x

Actions spécifiques aux tunnels

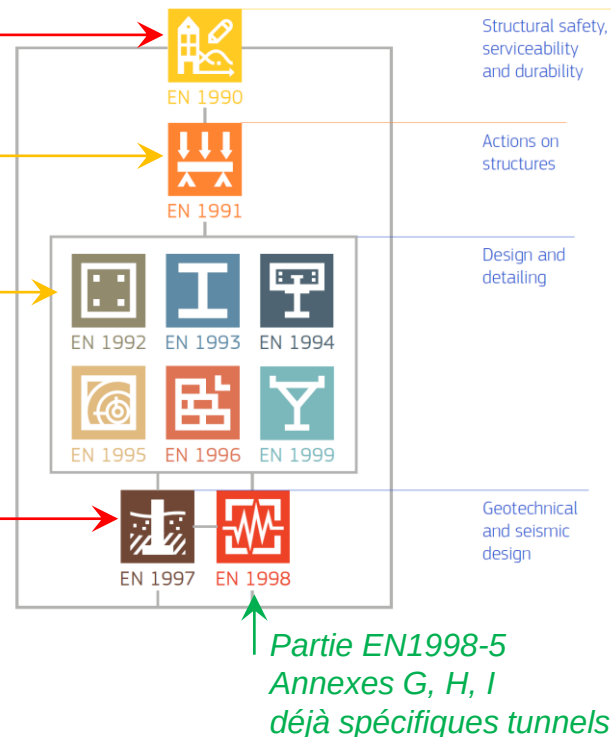
Nouvelles annexes EN1992, EN1993, ...

Amendements EN1992, EN1993, ...

Nouvelle partie EN1997-4

Amendements et/ou annexes

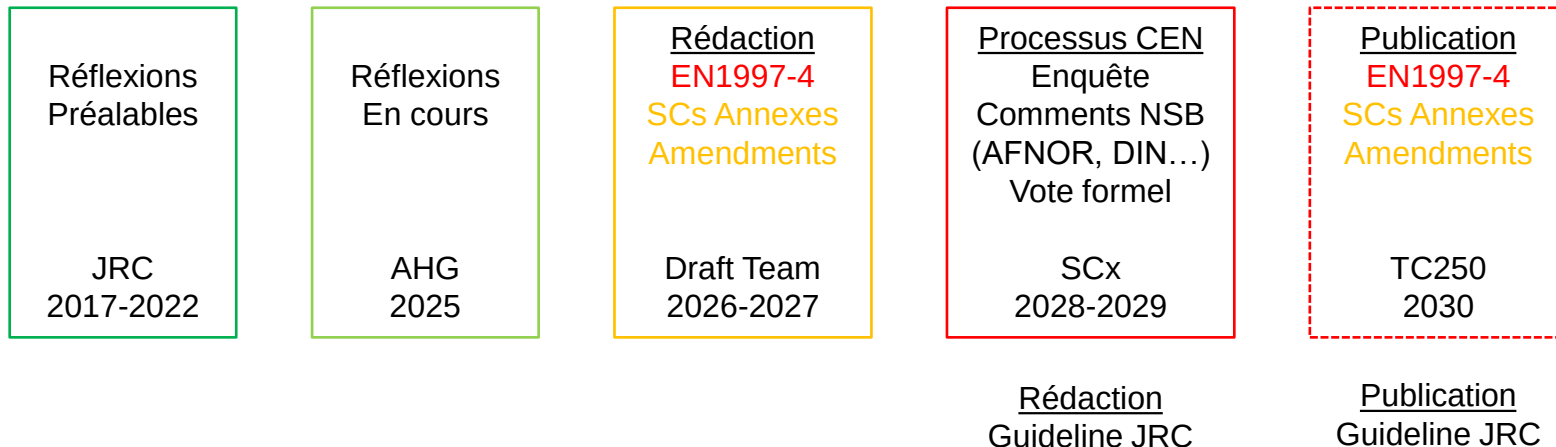
EN1997-1 et EN1997-2



Selon quel processus ?

Aim : « Eurocodes establish principles and requirements for the safety, serviceability, robustness, sustainability and durability of tunnels and other underground structures, appropriate to the consequences of failure. The Eurocodes provide rules for the design and verification of all tunnels and other underground structures, both for the temporary execution stages and the permanent service life. » AHG 2025

Éléments (provisaires) de planning et d'organisation... **à confirmer** :



1) Programme du MOA

- Fonctionnalités du projet : besoins, contraintes, exigences
- Objectifs : sécurité, préservation des vies humaines et du patrimoine, coûts et délais
- Organisation des acteurs et conduite du projet : définition, conception, realization, exploitation

2) Données d'entrée et synthèse géotechnique

- Biblio, REX de constructions, levés de terrain, géomorphologie...
- Géologie structurale, nappes et écoulements souterrains...
- Propriétés mécaniques et hydrauliques, contraintes in-situ...
- Modèles géologique, hydrogéologique et géotechnique et incertitudes

3) Conception géotechnique et structurelle

- Implantation de l'ouvrage, en plan, en profil en long, section transversale
- Choix et définition des méthodes d'exécution
- Justification du dimensionnement géotechnique et structurel
- Management des risques géotechniques, avoisinants...

4) Exécution des travaux

- Auscultations avant, pendant, après les travaux
- Rétro-analyse et adaptation des dispositions constructives

Critères possibles pour classer les conséquences et la durée d'utilisation :

- distinguer stade de la construction ≠ stade de l'exploitation... JRC 2022 ? à examiner
- criticité de l'itinéraire, occupation/trafic, voie "portée" en surface
- référence aux documents réglementaires
- choix du MOA

IT2000, RTE, STI... ?

Classes de conséquences pour les ouv. Géotech.

Durée d'utilisation pour les ouv. Géotech.

Catégorie de structures géotechniques	Durée d'exploitation ou de service T_{if} années
Structures géotechniques supportant d'autres structures	Au moins celle de la structure supportée ^a
Structures géotechniques ^b supportant (ou incorporées dans) une infrastructure routière ou ferroviaire - Barrages remblayés de défense contre l'eau	
Structures géotechniques ne relevant d'aucune autre catégorie	100
Parties remplaçables de structures géotechniques ^c	50
Structures géotechniques provisoires	25
Ancrages provisoires ^d	10
	2

^a Voir l'Annexe A de l'EN 1990:2023.
^b Par exemple, talus, déblais artificiels, remblais, structures de soutènement, remblais renforcés ou structures clouées dans le sol, amélioration du terrain.
^c Par exemple, ancrages.
^d Exigences de durabilité conformément à l'EN 1993-5.

Classe de conséquence	Niveau de conséquence	Exemple
CC4	Très élevé	- Infrastructures critiques ; - Ouvrages géotechniques dont l'intégrité est d'une importance vitale pour la protection civile^a ; - Construction ou aménagement susceptible de causer un glissement de terrain.
CC3	Elevé	- Soutènements ou fondations supportant des bâtiments publics d'exposition élevée ; - Soutènements, pentes ou fouilles anthropiques d'exposition élevée ; - Remblais routiers ou ferroviaires et fondations de pont d'importance majeure, dont la défaillance peut conduire à un arrêt d'exploitation de l'infrastructure lors de situations d'urgence ; - Ouvrages géotechniques d'importance majeure pour la navigation^b ; - Ouvrages souterrains à fort taux d'occupation.
CC2	Moyen	Tous les ouvrages géotechniques non classés en CC1, CC3, ou CC4.
CC1	Faible	- Soutènements ou fondations supportant des bâtiments à faible taux d'occupation ; - Pentes et fouilles anthropiques dans une zone où une rupture aurait peu d'impact sur les tiers ou sur la société ; - Remblais routiers ou ferroviaires d'importance moindre et non vitale pour les tiers ou pour la société ; - Ouvrages souterrains occasionnellement occupés^c.
CC0	Très faible	Cette classe ne s'applique pas aux ouvrages géotechniques

^a Exemples d'ouvrage géotechnique dont l'intégrité est d'importance vitale pour la protection civile :
- remblais routiers ou ferroviaires ayant un rôle primordial en cas de survenue d'une catastrophe naturelle ;
- barrages en terre liés à des aqueducs ou des centrales énergétiques ;
- digues, barrages en résidus ou barrages en terre dont la rupture aurait des conséquences extrêmes ;
- fondations d'ouvrages dans le domaine nucléaire ;
- fondations d'ouvrages portuaires majeurs.
^b Exemples d'ouvrages géotechniques avec des fonctionnalités primaires pour la navigation : marquages ou protections d'entrées de ports.
^c Exemples d'ouvrages souterrains occasionnellement occupés : dalot ou ponceau ne supportant pas une voie ferrée ou une route majeure.

Quelle catégorie géotechnique pour un tunnel ?

Critères possibles pour définir la classe de complexité géotechnique :

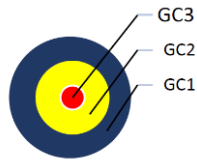
- fonction de la méthode d'exécution... JRC 2022 ? à évaluer
- assez systématiquement GCC3

Classes de conséquences pour les ouv. Géotech.

Classes de complexité géotechnique

Classe de complexité géotechnique	Complexité	Conditions générales
GCC3	Elevée	L'une des conditions suivantes est applicable : - une incertitude importante sur les propriétés de terrain ; - des terrains difficiles ou très variables ; - une sensibilité significative vis-à-vis de l'eau souterraine et de l'eau libre ; - une complexité significative de l'interaction entre le terrain et la structure.
GCC2	Normale	GCC2 s'applique par défaut dans les cas où ni GCC1 ni GCC3 ne s'appliquent.
GCC1	Faible	Toutes les conditions suivantes s'appliquent : - une incertitude négligeable sur les propriétés des terrains ; - des terrains homogènes ; - une sensibilité faible vis-à-vis de l'eau souterraine et de l'eau libre ; - une complexité faible de l'interaction entre le terrain et la structure.

NOTE : Les termes « important », « significatif », « élevé » etc. sont relatifs à une expérience comparable existante pour le même ouvrage géotechnique, dans les mêmes situations de calcul et des conditions de terrain similaires.



Classe de Conséquence (CC)	Classe de Difficulté Géotechnique (GCC)		
	Faible	Normale	Elevée
Elevée	GC2	GC3	GC3
Normale	GC2	GC2	GC3
Faible	GC1	GC2	GC2

Classe de conséquence	Niveau de conséquence	Exemple
CC4	Très élevé	- Infrastructures critiques ; - Ouvrages géotechniques dont l'intégrité est d'une importance vitale pour la protection civile^a ; - Construction ou aménagement susceptible de causer un glissement de terrain.
CC3	Elevé	- Soutènements ou fondations supportant des bâtiments publics d'exposition élevée ; - Soutènements, pentes ou fouilles anthropiques d'exposition élevée ; - Remblais routiers ou ferroviaires et fondations de pont d'importance majeure, dont la défaillance peut conduire à un arrêt d'exploitation de l'infrastructure lors de situations d'urgence ; - Ouvrages géotechniques d'importance majeure pour la navigation^b ; - Ouvrages souterrains à fort taux d'occupation.
CC2	Moyen	Tous les ouvrages géotechniques non classés en CC1, CC3, ou CC4.
CC1	Faible	- Soutènements ou fondations supportant des bâtiments à faible taux d'occupation ; - Pentes et fouilles anthropiques dans une zone où une rupture aurait peu d'impact sur les tiers ou sur la société ; - Remblais routiers ou ferroviaires d'importance moindre et non vitale pour les tiers ou pour la société ; - Ouvrages souterrains occasionnellement occupés^c.
CC0	Très faible	Cette classe ne s'applique pas aux ouvrages géotechniques

^a Exemples d'ouvrage géotechnique dont l'intégrité est d'importance vitale pour la protection civile :
- remblais routiers ou ferroviaires ayant un rôle primordial en cas de survenue d'une catastrophe naturelle ;
- barrages en terre liés à des aqueducs ou des centrales énergétiques ;
- digues, barrages en résidus ou barrages en terre dont la rupture aurait des conséquences extrêmes ;
- fondations d'ouvrages dans le domaine nucléaire ;
- fondations d'ouvrages portuaires majeurs.

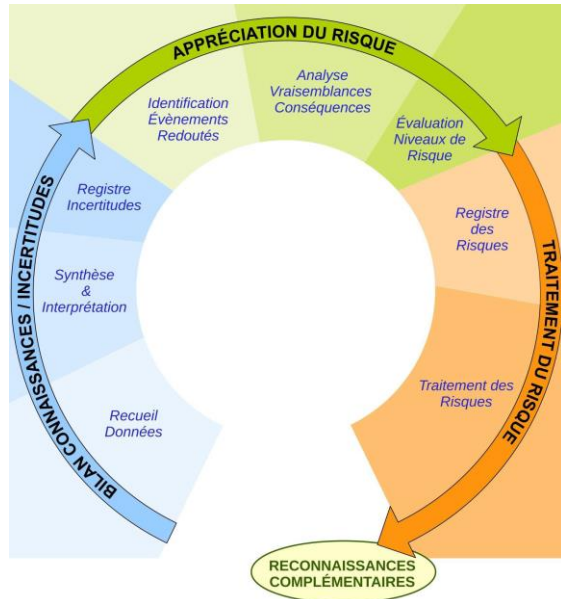
^b Exemples d'ouvrages géotechniques avec des fonctionnalités primaires pour la navigation : marquages ou protections d'entrées de ports.

^c Exemples d'ouvrages souterrains occasionnellement occupés : dalot ou ponceau ne supportant pas une voie ferrée ou une route majeure.

Niveaux de validation GIR, GDR, modèles de calcul...

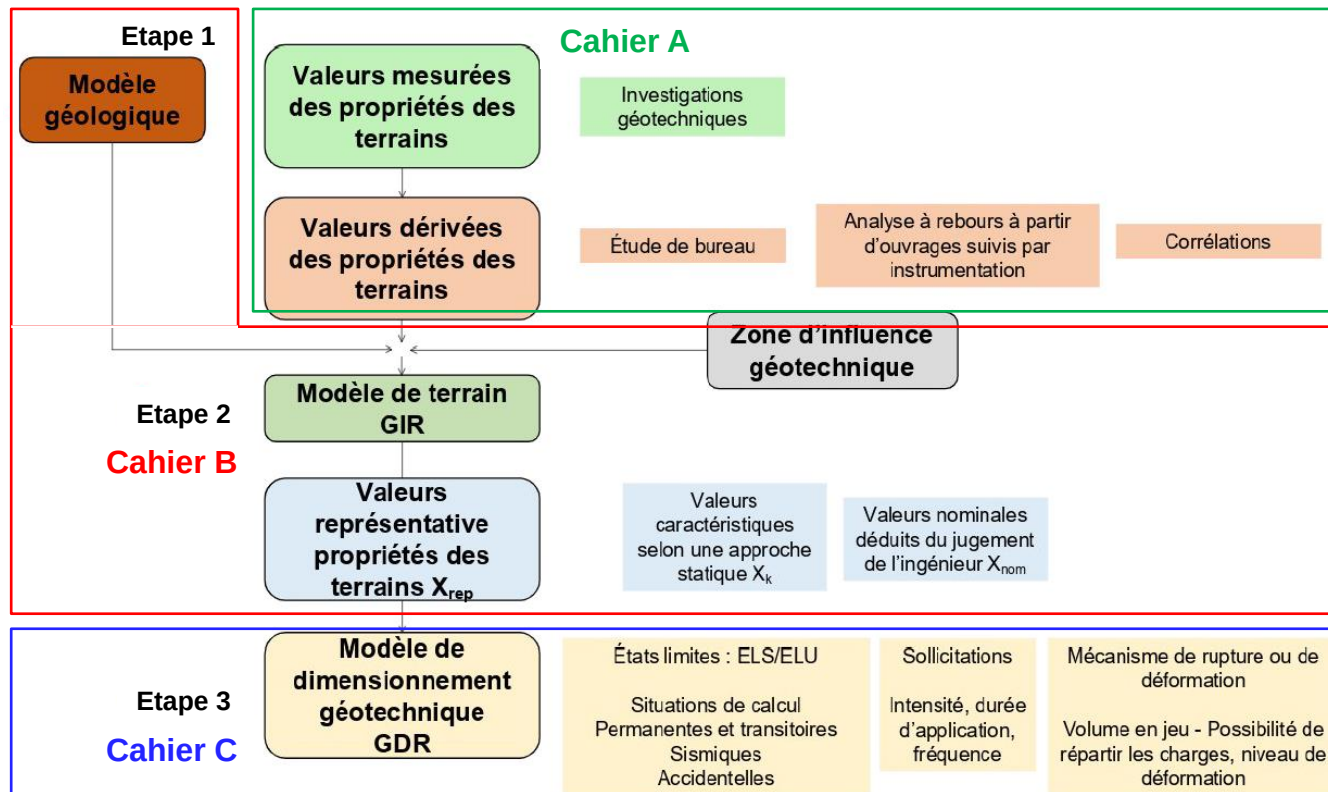
La **catégorie géotechnique** permet de :

- valider les informations issues du **rapport d'investig. GIR**
- valider le **modèle de dimensionnement géotech. GDM**
- identifier le niveau de **validation des modèles de calcul**
- fixer l'exhaustivité et le **niveau de détail des rapports**



- **évaluer le volume minimal de reconnaissances ?**
→ **management des incertitudes et des risques**

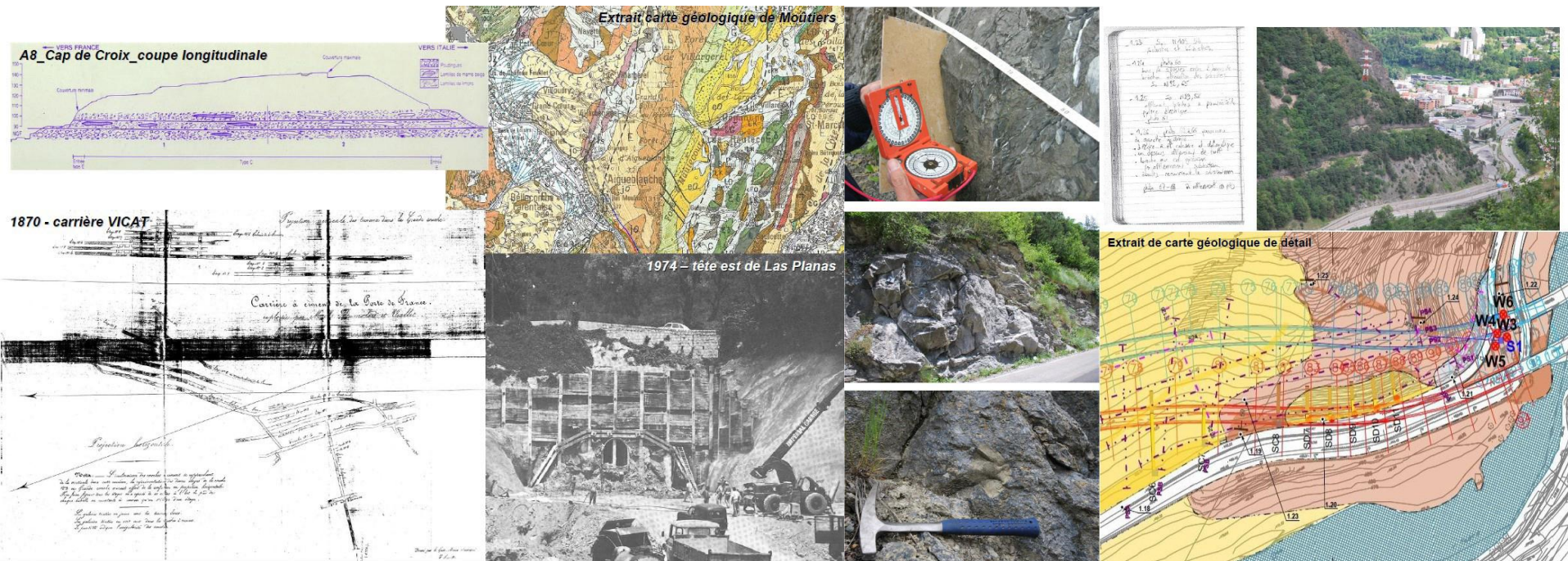
		Ground information needed (prEN 1997-2 clauses)																EN 1997-2	
		H = High relevance M = Medium relevance L = Low relevance C = compulsory																	
Proposed structures and engineering works	Structures (prEN 1997-3)	4 Excavations, cuttings	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	10 Cyclic response and seismic properties	11 Groundwater and geohydraulic properties
		4 Embankments	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	12 Geothermal properties	13 Geotechnical properties
Miscellaneous works	Linear - roads	5 Spread foundations	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	14 Geotechnical properties	15 Geotechnical properties
		6 Piled foundations	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	16 Geotechnical properties	17 Geotechnical properties
	Linear - pipelines	7 Retaining structures	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	18 Geotechnical properties	19 Geotechnical properties
		8 Anchors	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	20 Geotechnical properties	21 Geotechnical properties
	Underground openings	9 Reinforced fill structures	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	22 Geotechnical properties	23 Geotechnical properties
		10 Ground reinforcing elements	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	24 Geotechnical properties	25 Geotechnical properties
	Dams and barriers	11 Ground improvement	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	26 Geotechnical properties	27 Geotechnical properties
		12 Groundwater control	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	28 Geotechnical properties	29 Geotechnical properties
	Construction materials	13 Linear - tunnels	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	30 Geotechnical properties	31 Geotechnical properties
		14 Underground openings	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	32 Geotechnical properties	33 Geotechnical properties
	Ground source heat installations	15 Dams and barriers	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	34 Geotechnical properties	35 Geotechnical properties
		16 Construction materials	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	36 Geotechnical properties	37 Geotechnical properties
		17 Ground source heat installations	C	C	H	H	H	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	38 Geotechnical properties	39 Geotechnical properties
																		40 Geotechnical properties	41 Geotechnical properties



Modélisation géologique et hydrogéologique

Bibliographie, archives, reconnaissances et études existantes à proximité.
 Banque de Données du Sous-Sol du BRGM, carte géologique 1/50000.

Levés géologique et hydrogéologiques de terrain
 Analyse par photographie aérienne, géomorphologie



Sujets géotechniques à développer...



... pour intégrer pleinement les tunnels au schéma de vérification des Eurocodes

General rules & Actions EN1990 + EN1991 → **Annexe Ax Tunnels**

- Interaction terrain-structure : évaluation de l'effet des actions
- Incertitudes, en particulier dans les massifs rocheux
- En tunnel, déchargement au lieu de chargement
- Etats limites ultimes : selon défaillance de la structure ou du terrain
- Définition des coefficients partiels pertinents pour les ouvrages souterrains
- ...

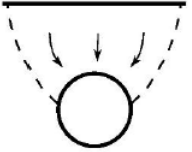
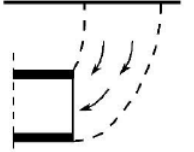
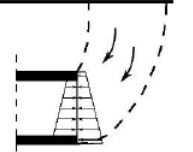
Geotechnical design EN1997 → **EN1997-4 Tunnels**

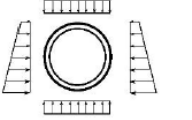
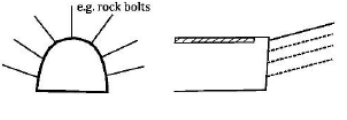
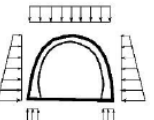
- design of tunnels in soils and rocks (Ref. EN1997-2G extended to cover geotechnical design in rock)
- design of tunnels in soils and rocks in relation to groundwater
- design of primary linings : sprayed concrete lining (Ref. EN1992) and steel linings (Ref. EN1993)
- design of ground reinforcement and pre-reinforcement (radial bolting, face bolting) and pre-linings (forepoling, umbrella arch, mechanical pre-cutting), elements partially described in EN1997
- ...

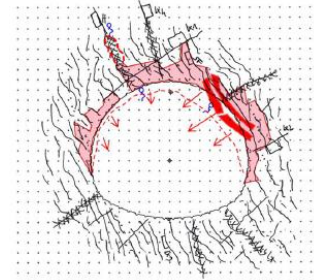
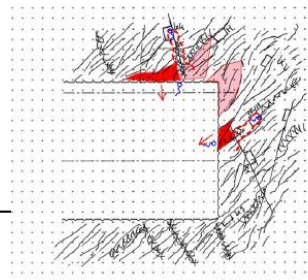
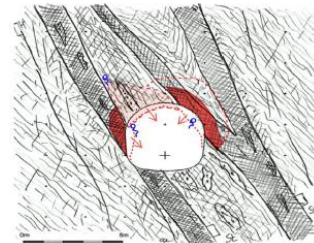
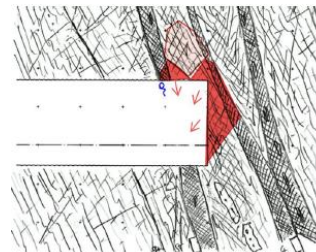
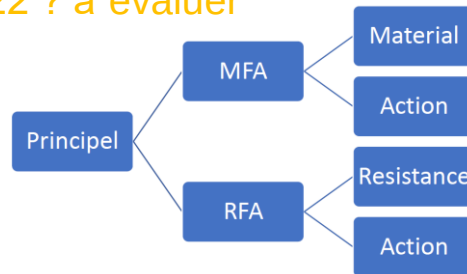
Conception géotechnique et structurelle

Identification des mécanismes de déformation et de rupture et des états limites correspondants

examples of possible visualization of MFA and RFA for tunnels... JRC 2022 ? à évaluer

Type of problem:	Unlined tunnel	Unsupported face stability	Supported face stability
			
- Action:	Self-weight of soil	Self-weight of soil	Pressures (ground, water)
- Resistance:	Shear resistance of the ground	Shear resistance of the ground	Pressures (face support)
Proposed:			
- Verification Case:	VC3	VC3	VC2
- Approach:	MFA	MFA	Equilibrium of pressures

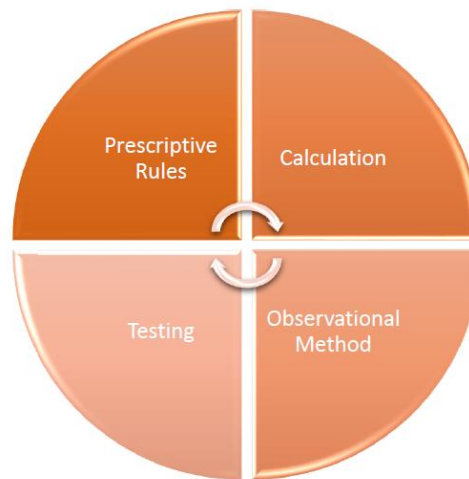
Type of problem:	Tunnel lining design (structural)	Tunnel with improvement	Tunnel arch foot
			
- Action:	Earth and water pressures	Earth and water pressures	Earth and water pressures
- Resistance:	Structural resistance	Shear resistance of ground and structural elements	Resistance of the ground
Proposed:			
- Verification Case:	VC1, VC4	VC3, VC4	VC1, VC3
- Approach:	EFA	MFA	MFA, RFA



Articulation des approches de vérification

Classifications géomécaniques
RMR, Q, GSI...

Vérification par le calcul
*ELU, ELS
MFA, RFA...*



Méthode observationnelle
*Scénarios probables/pessimistes
Rétro-analyse et adaptations*

Au-delà de la géotechnique, autres sujets à considérer...



... pour intégrer pleinement les tunnels au schéma de vérification des Eurocodes

Protection au feu des tunnels

- aspects sécurité incendie obligatoires
- courbes de référence au feu non conformes aux règlements français (IT2000, STI, ITI...)
- actions sur les structures exposées au feu (EN1991-1-2)... en lien avec Horizontal Group Fire...

Conception des tunnels en zone sismique (Réf. EN 1998-5)

- aspects sismiques obligatoires
- partie déjà dédiée EN1998-5 et annexes

Évaluation et rehabilitation des tunnels existants

- principes de base introduits dans la 2e generation
- EN1990-1 Structures neuves + EN1990-2 Structures existantes

1) Programme du MOA

- Fonctionnalités du projet : besoins, contraintes, exigences
- Objectifs : sécurité, préservation des vies humaines et du patrimoine, coûts et délais
- Organisation des acteurs et conduite du projet : définition, conception, realization, exploitation

Doctrine établie (AFTES)

GT43 Application NF P94-500

2) Données d'entrée et synthèse géotechnique

- Biblio, REX de constructions, levés de terrain, géomorphologie...
- Géologie structurale, nappes et écoulements souterrains...
- Propriétés mécaniques et hydrauliques, contraintes in-situ...
- Modèles géologique, hydrogéologique et géotechnique et incertitudes

GT32R3 Cahiers A1, B1, C

GT24R4 Reconnaissances préalables

GT01R1 Caractérisation des massifs rocheux

GT32R2 Incertitudes et risques

GT16R2 Avoisinants Cahiers A2, B2

... ..

3) Conception géotechnique et structurelle

- Implantation de l'ouvrage, en plan, en profil en long, section transversale
- Choix et définition des méthodes d'exécution
- Justification du dimensionnement géotechnique et structurel
- Management des risques géotechniques, avoisinants...

GT07R5 Béton non armé

GT07R6 Méthode CVCF

GT29R1 Utilisation normes revêtement béton

GT29R2 Compatibilité avec les Eurocodes

GT30R1 Boulonnage

GT30-1Rx Présoutènements

GT30-2Rx Modélisation numérique

GT16Rx Tassements induits et sensibilité

... ..

4) Exécution des travaux

- Auscultations avant, pendant, après les travaux
- Rétro-analyse et adaptation des dispositions constructives

Quelques éléments de conclusion...

- La nouvelle génération des Eurocodes est, sur le principe, applicable aux tunnels et structures souterraines. Pour que les tunnels et les cavernes soient couverts explicitement, un texte normatif doit être élaboré, **d'abord, en ce qui concerne les aspects géotechniques**.
- Chaque Eurocode devra, **à terme, être complété, pour intégrer des aspects spécifiques** et pour l'ensemble des tunnels au sens large.
- Accompagner la démarche engagée à l'échelon européen est indispensable pour garantir que les développements futurs **ne contraignent pas la pratique française**.
- Cette démarche constitue aussi une **opportunité pour consolider le corpus français** et couvrir l'ensemble des justifications nécessaires à la conception des ouvrages souterrains selon les principes de sécurité, de niveau de service, de robustesse, de soutenabilité et de durabilité.

Merci de votre attention !

*« No theory can be considered satisfactory
until it has been adequately checked by actual observations. »*

*« If something is discovered that does not agree with the hypothesis, rejoice!
You can then really learn something new.
You are on your way to an understanding of the problem. »*

Prof. Ralf B. Peck

Questions/réponses



Didier SUBRIN

(CETU, Centre d'études des tunnels)

Conclusion de la séance technique



Convivialité et gourmandises

Espace le Carreau





Merci à tous !

9
OCTOBRE
2025

AFTES &
CFMR