

COMPORTEMENT GÉOTECHNIQUE ET STRUCTUREL DES TUNNELS EN MAÇONNERIE



Université
Gustave Eiffel



SOMMAIRE

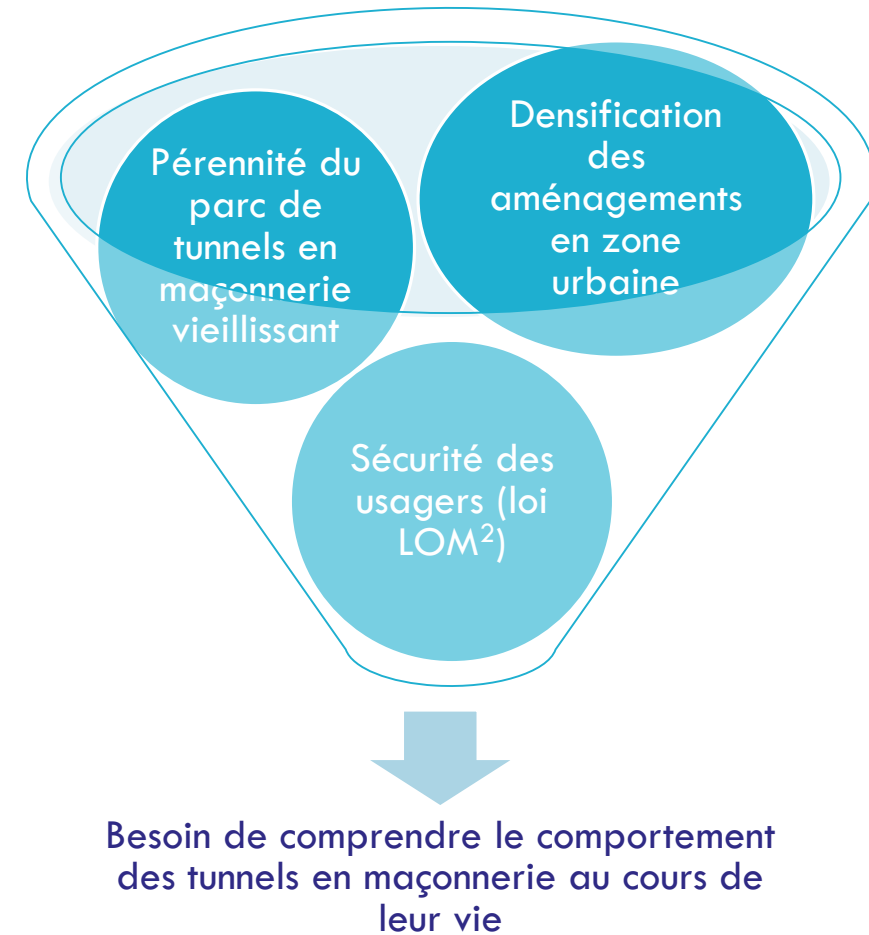
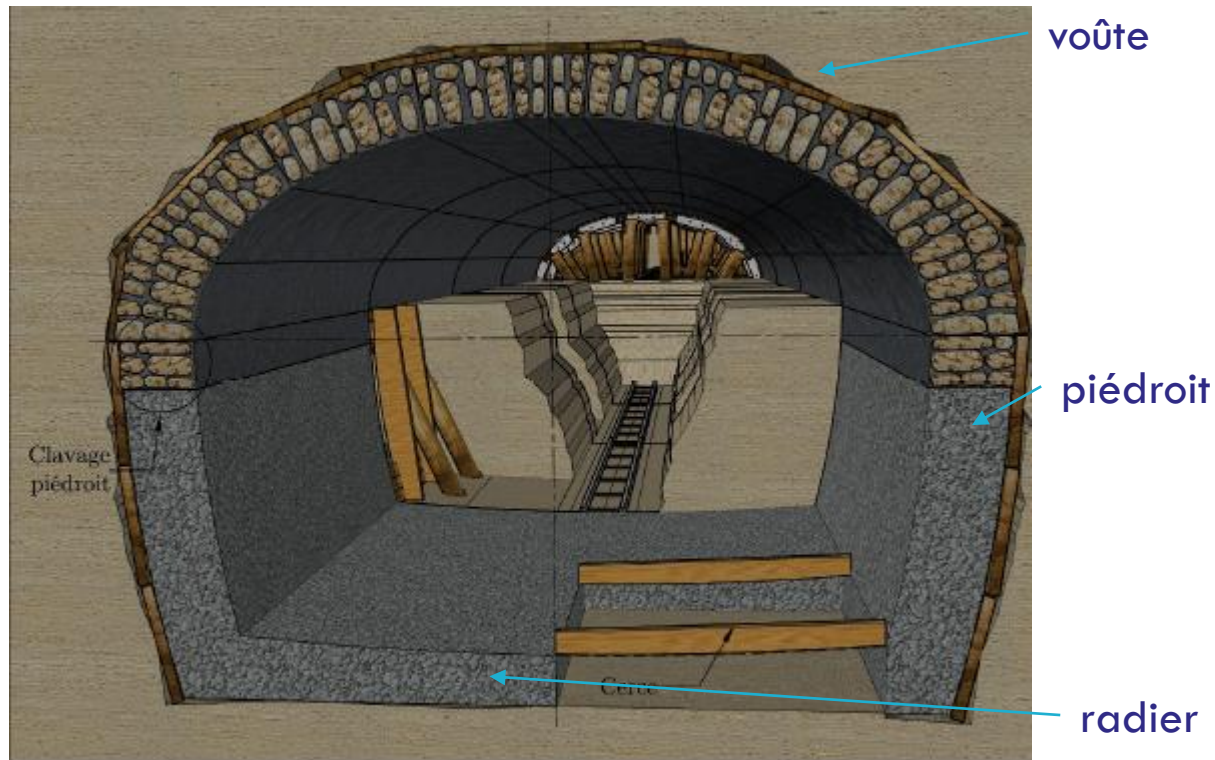
Sujet de recherche

- Contexte
- Démarche scientifique
- Verrous scientifiques

Travail réalisé

- Diagnostic initial
- Etude de la stabilité par le calcul à la rupture
- Instrumentation par fibre optique

CONTEXTE



1. MORENO REGAN O. 2016. ÉTUDE DU COMPORTEMENT DES TUNNELS EN MAÇONNERIE DU MÉTRO PARISIEN. THÈSE DE DOCTORAT. UNIVERSITÉ PARIS-EST

2. SITE LEGIFRANCE, LOI N° 2019-1428 DU 24 DÉCEMBRE 2019 D'ORIENTATION DES MOBILITÉS, [HTTPS://WWW.LEGIFRANCE.GOUV.FR/JORF/ID/JORFTEXT000039666574?R=LOGUE5D5KE](https://www.legifrance.gouv.fr/JORF/ID/JORFTEXT000039666574?R=LOGUE5D5KE), CONSULTÉ LE 22/12/2020

DÉMARCHE SCIENTIFIQUE

- Quel comportement ?
- Quelle stabilité ?

Analyse de
données
existantes de
convergence
sur un
ouvrage réel

Calcul à la
rupture

- Détermination de la charge maximale supportable avant rupture
- Mécanisme réel ?

Fibre
optique

- Mécanismes réels dans l'ouvrage étudié
- Déformation maximale avant rupture ?

Modélisation
numérique

- Déformation pour la charge maximale donnée par le calcul à la rupture
- Comparaison avec le mécanisme réel dans l'ouvrage

VERROUS SCIENTIFIQUES

Diagnostic initial

Description de
l'ouvrage étudié

Etude des
données
existantes

Stabilité par le calcul à la rupture

Mécanismes de
rupture virtuels

Charge maximale
supportable

Instrumentation par fibre optique

Mise en place
d'une fibre
optique dans un
ouvrage existant

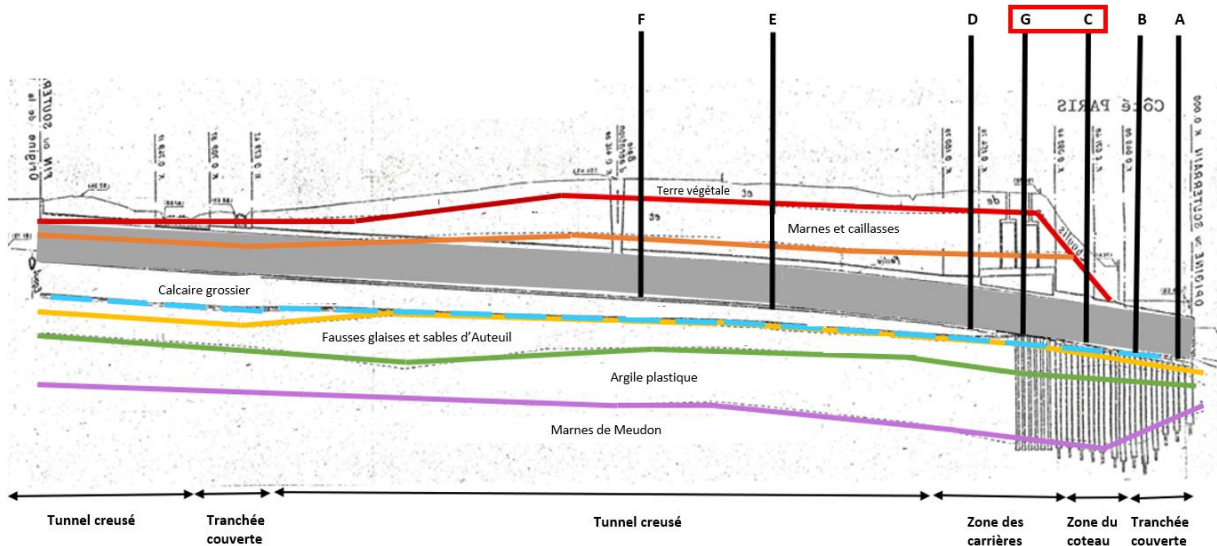
Traitement des
mesures sur un
milieu hétérogène

Modélisation par éléments finis

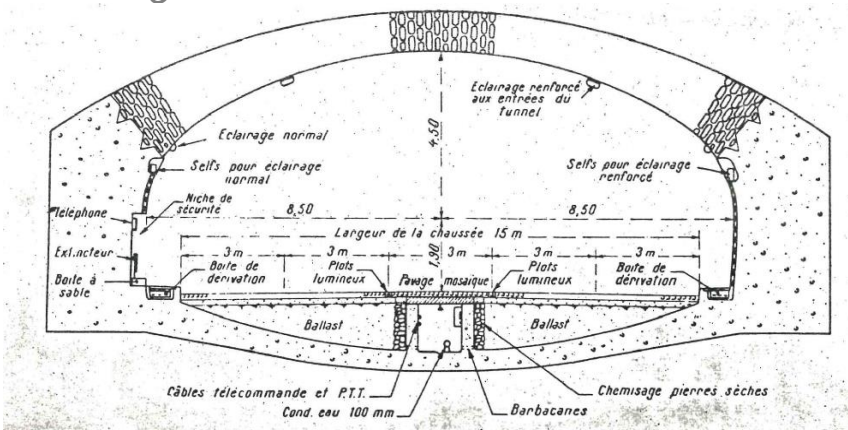
Fonctionnement et
prise en compte
de l'interaction
terrain-structure

Modélisation des
déformations

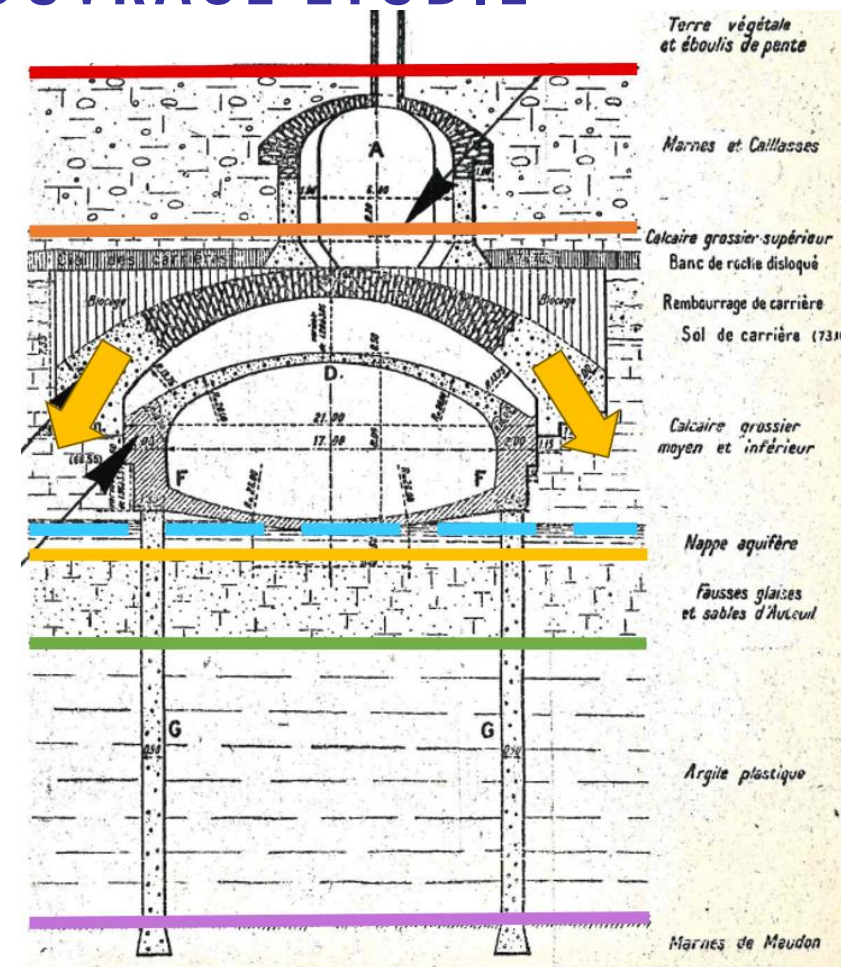
DIAGNOSTIC INITIAL : PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE ÉTUDIÉ



Profil en long du tube Nord du tunnel de Saint-Cloud d'après (CETU, 1978)³



Section courante (De Buffevent, 1941)⁴

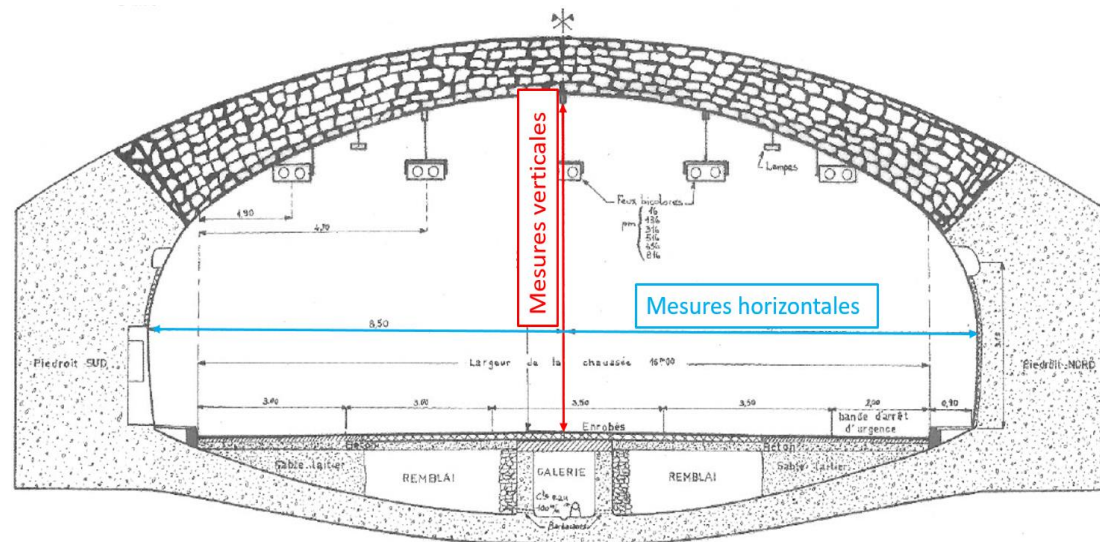


Section double voûte (De Buffevent, 1941)⁴

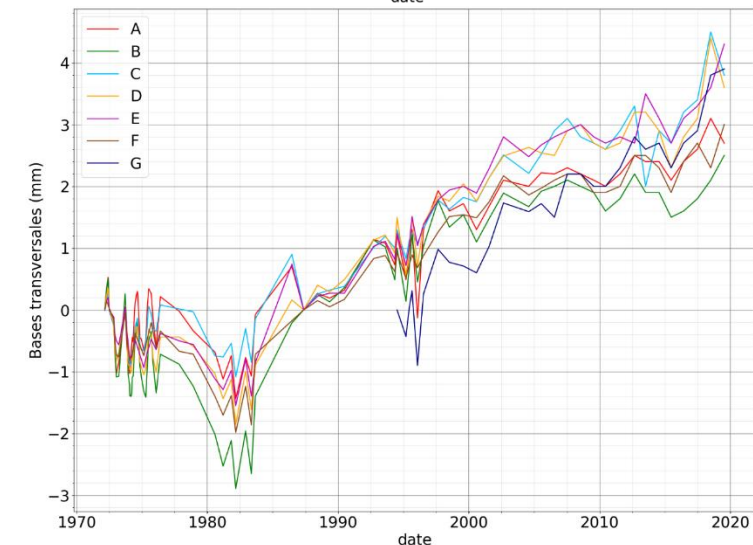
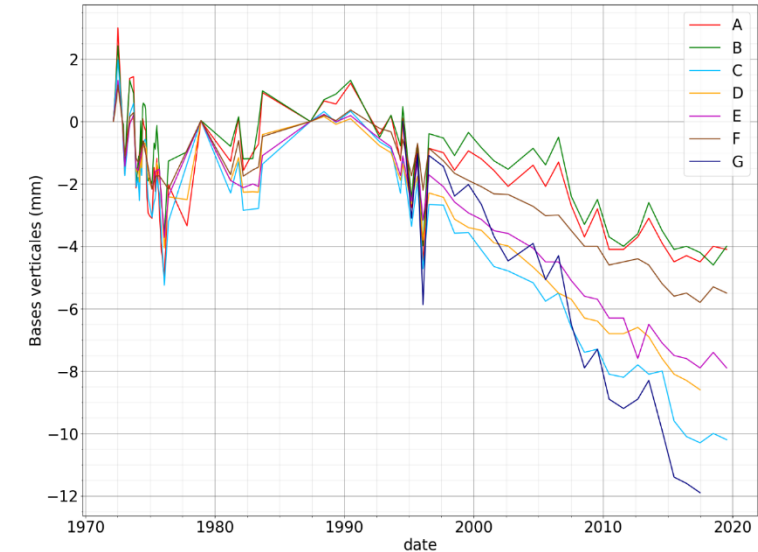
3. CETU. 1978. LES TUNNELS DE SAINT-CLOUD.

4. DE BUFFEVENT, M. 1941. L'AUTOROUTE DE L'OUEST, NOUVELLE SORTIE DE PARIS. ANNALES DES PONTS ET CHAUSSÉES, JUILLET-AOÛT 1941, 54

DIAGNOSTIC INITIAL : ANALYSE DE DONNÉES EXISTANTES DE CONVERGENCE



Dans le tube circulé il y a un **mouvement d'éloignement relatif des piédroits et de rapprochement de la calotte par rapport au radier**. Tous les profils sont concernés mais les mouvements les plus importants sont situés aux profils C, D et G soit les plus proches de la double voûte.



VERROUS SCIENTIFIQUES

Diagnostic initial

Description de l'ouvrage étudié

Etude des données existantes

Stabilité par le calcul à la rupture

Mécanismes de rupture virtuels

Charge maximale supportable

Instrumentation par fibre optique

Mise en place d'une fibre optique dans un ouvrage existant

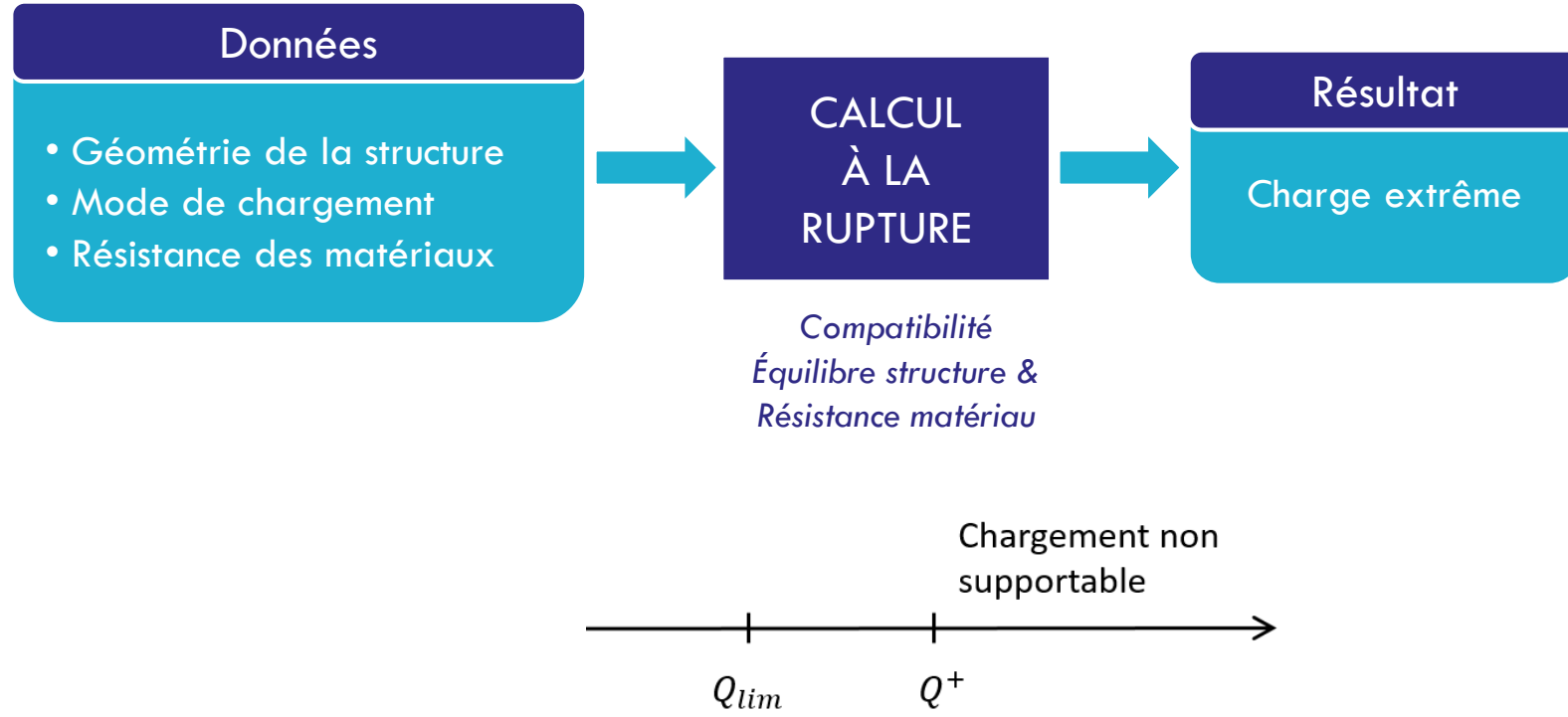
Traitement des mesures sur un milieu hétérogène

Modélisation par éléments finis

Fonctionnement et prise en compte de l'interaction terrain-structure

Modélisation des déformations

CALCUL À LA RUPTURE : PRINCIPE GÉNÉRAL



CALCUL À LA RUPTURE : APPROCHE CINÉMATIQUE PAR L'EXTÉRIEUR

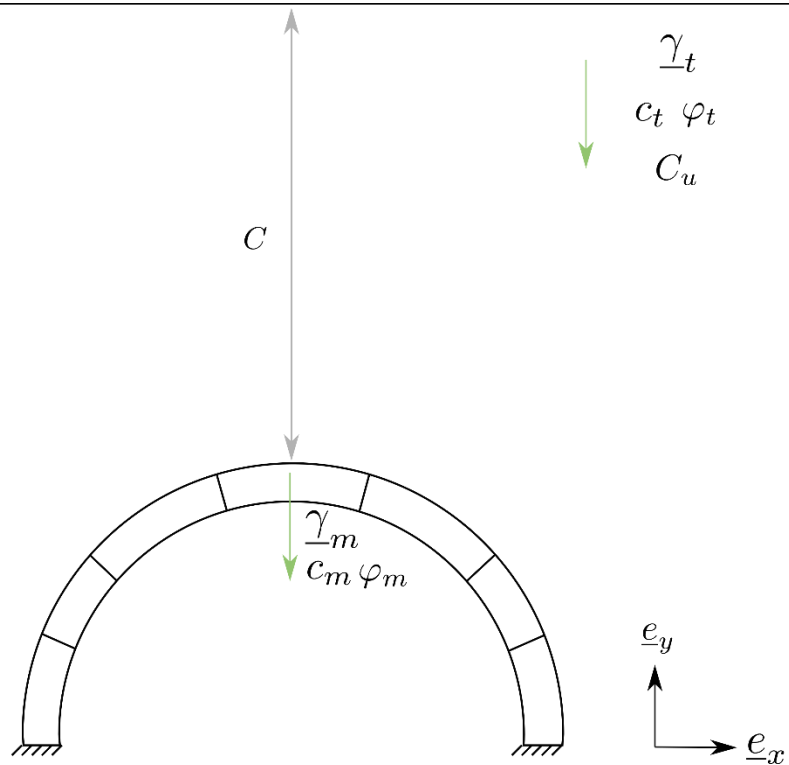
1. Construction de champs de vitesses virtuels cinématiquement admissibles :

$$\mathcal{C} = \{ \underline{v} \in C^0 \text{ et } C^1 \text{ par morceaux respectant les CL en vitesse} \}$$

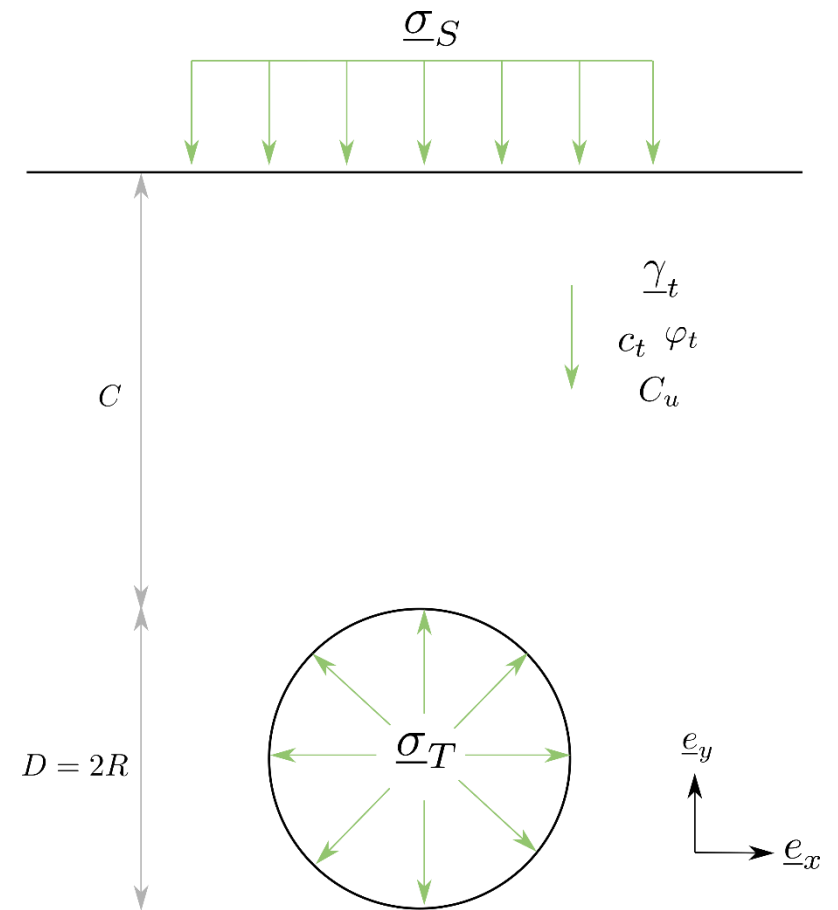
2. Vérification de la pertinence du mécanisme
3. Calcul de la puissance résistante maximale
4. Calcul de la puissance des efforts extérieurs
5. Application du théorème cinématique :

$$\exists \underline{v} \in \mathcal{C}, \mathcal{P}_{ext}(\underline{Q}, \underline{v}) > \mathcal{P}_{rm}(\underline{v}) \Rightarrow \underline{Q} \notin K$$

POSITION DU PROBLÈME

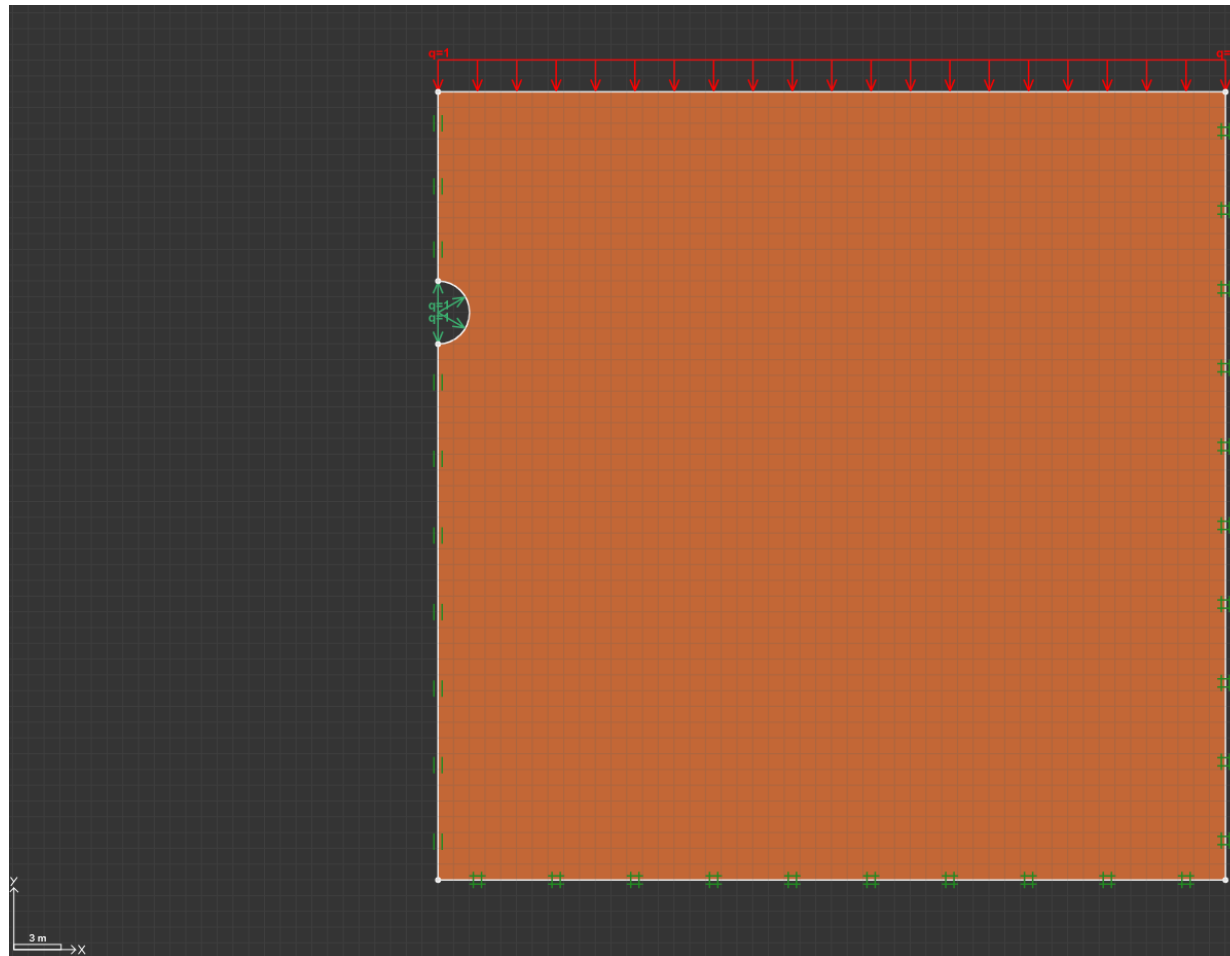


Description du problème général

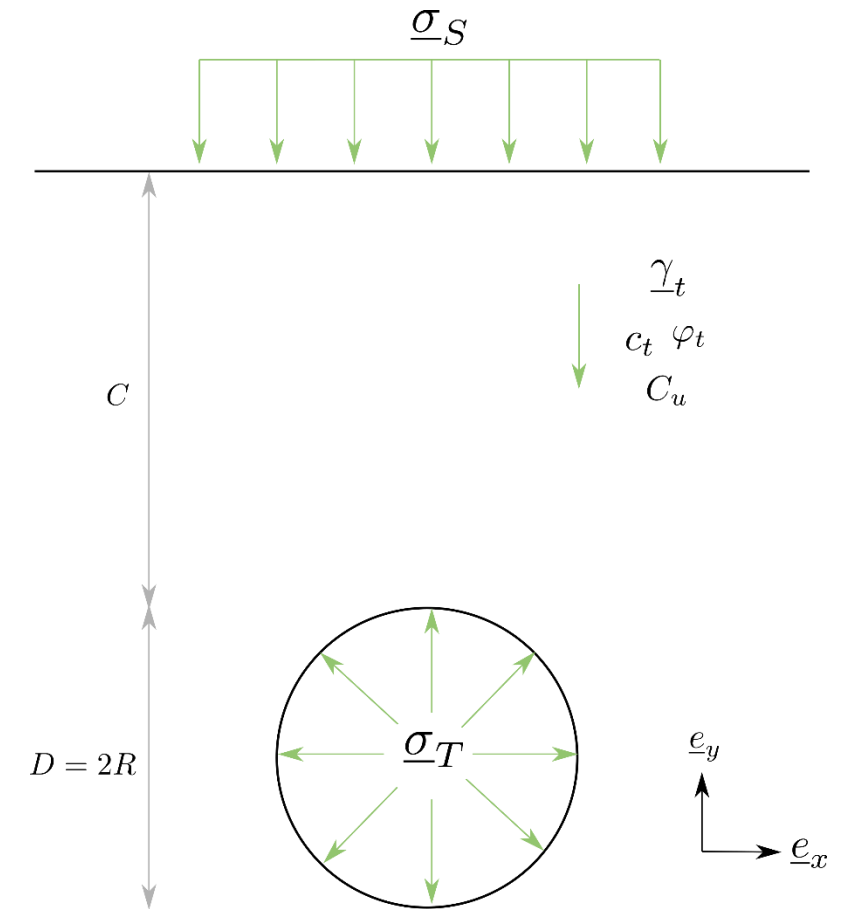


Description du problème dans le terrain

MODÉLISATION SUR OPTUM

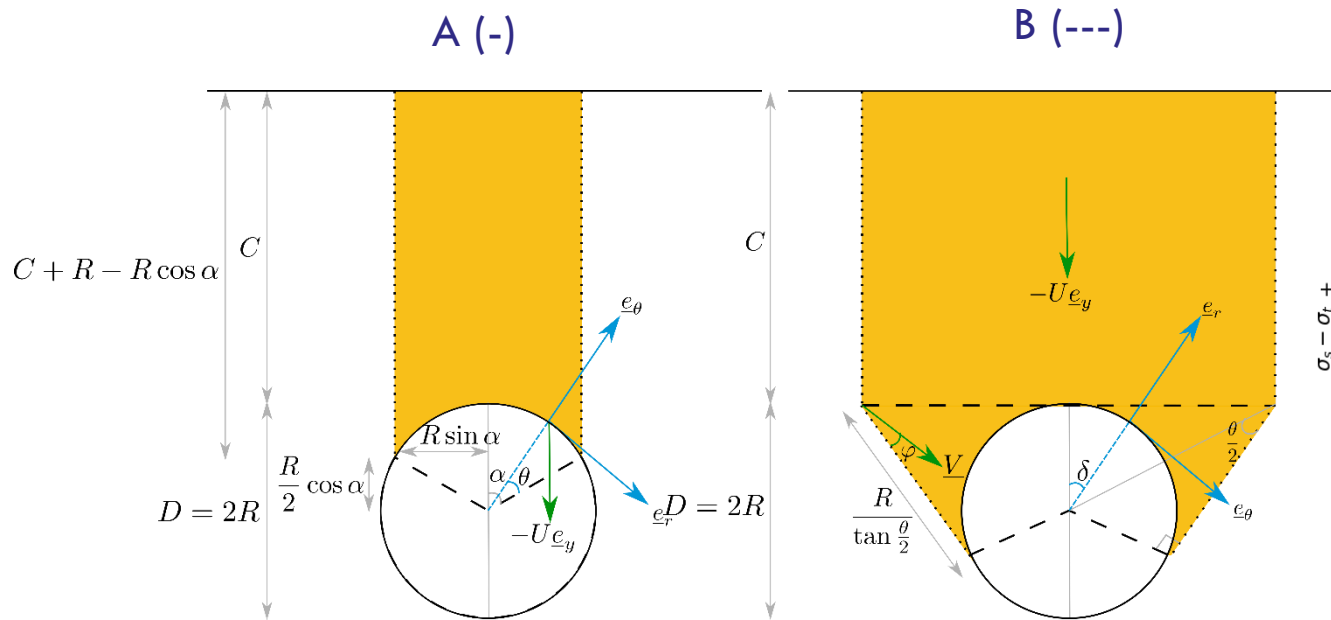


Modélisation sur Optum⁵ avec $\frac{C}{D} = 3$

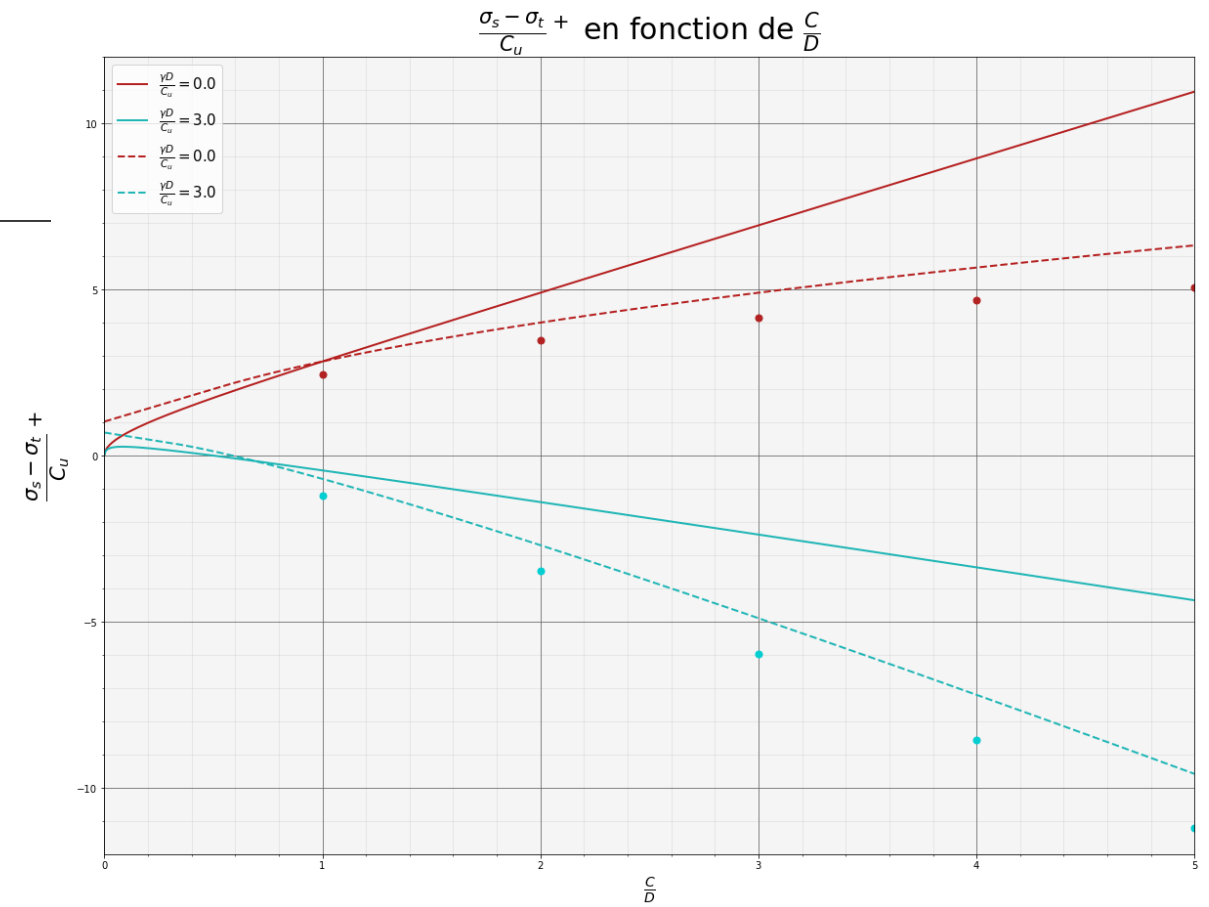


Description du problème dans le terrain

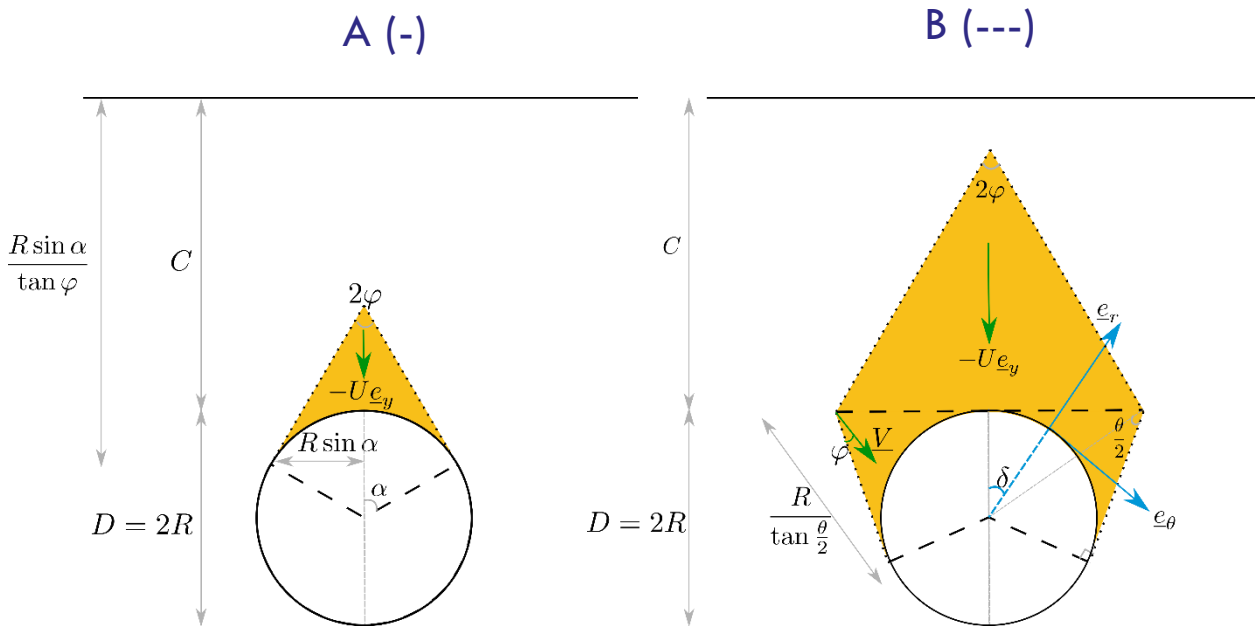
CALCUL À LA RUPTURE DANS UN TERRAIN PUREMENT COHÉRENT



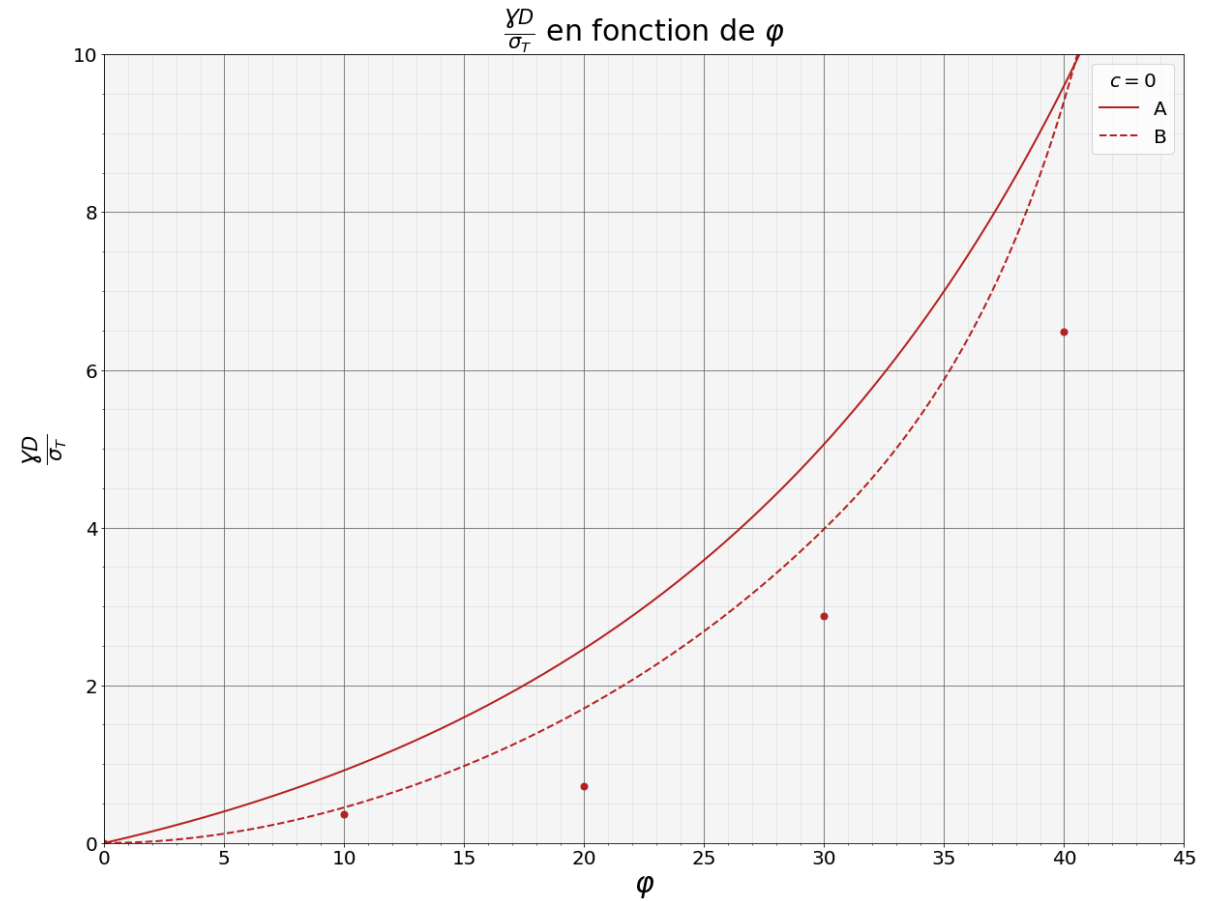
Mécanismes de rupture d'après (Davis et al. 1980)⁶



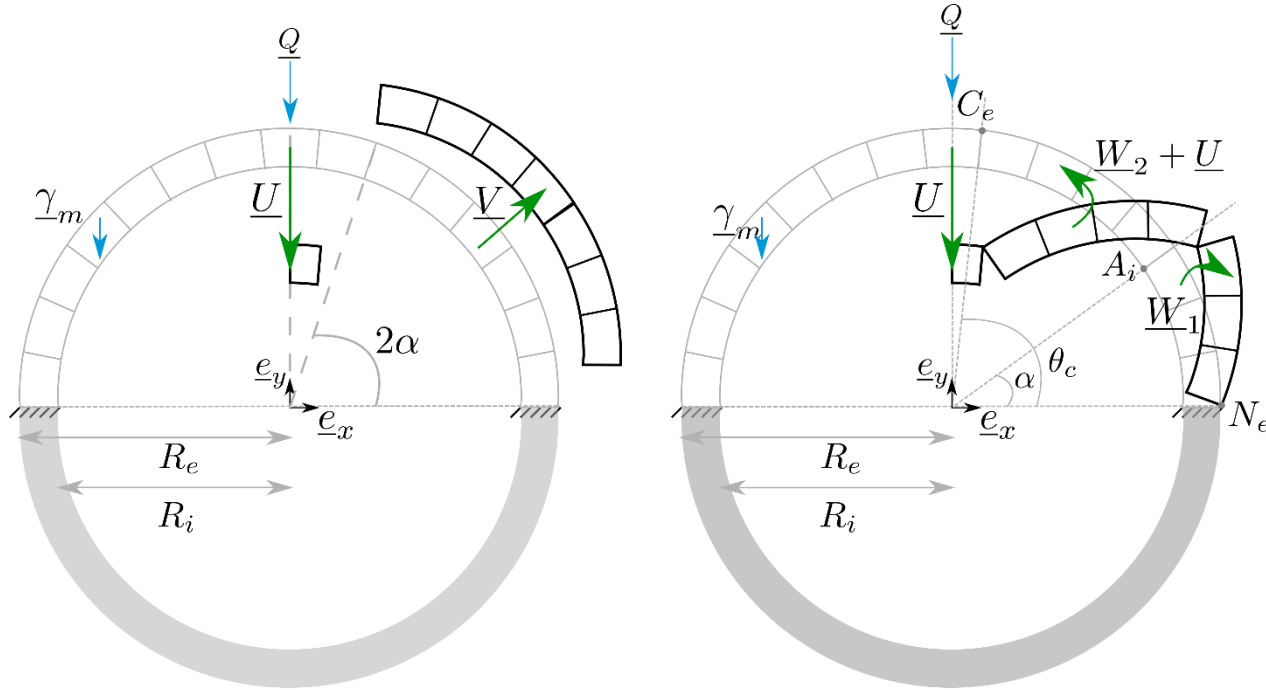
CALCUL À LA RUPTURE DANS UN TERRAIN COHÉRENT FROTTANT



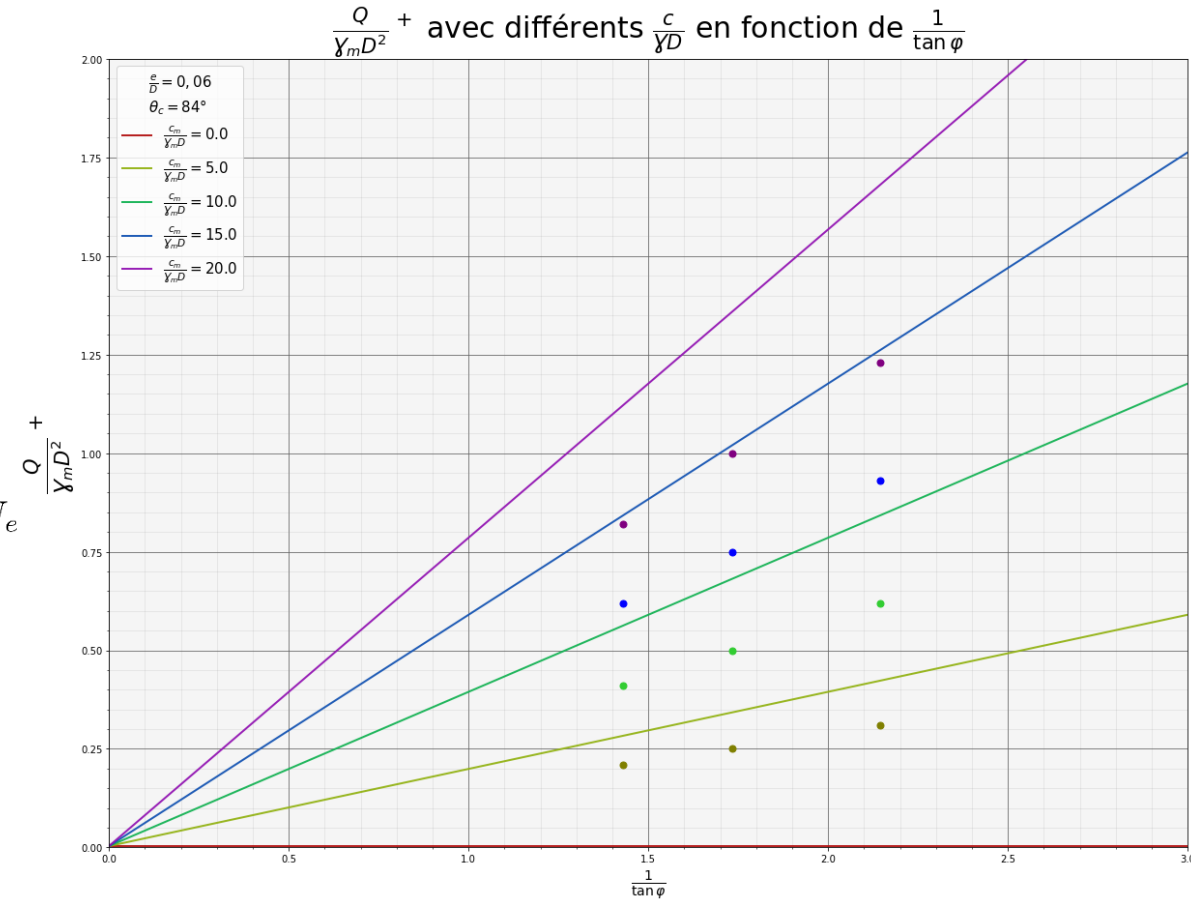
Mécanisme de rupture d'après (Atkinson et al. 1977)⁷

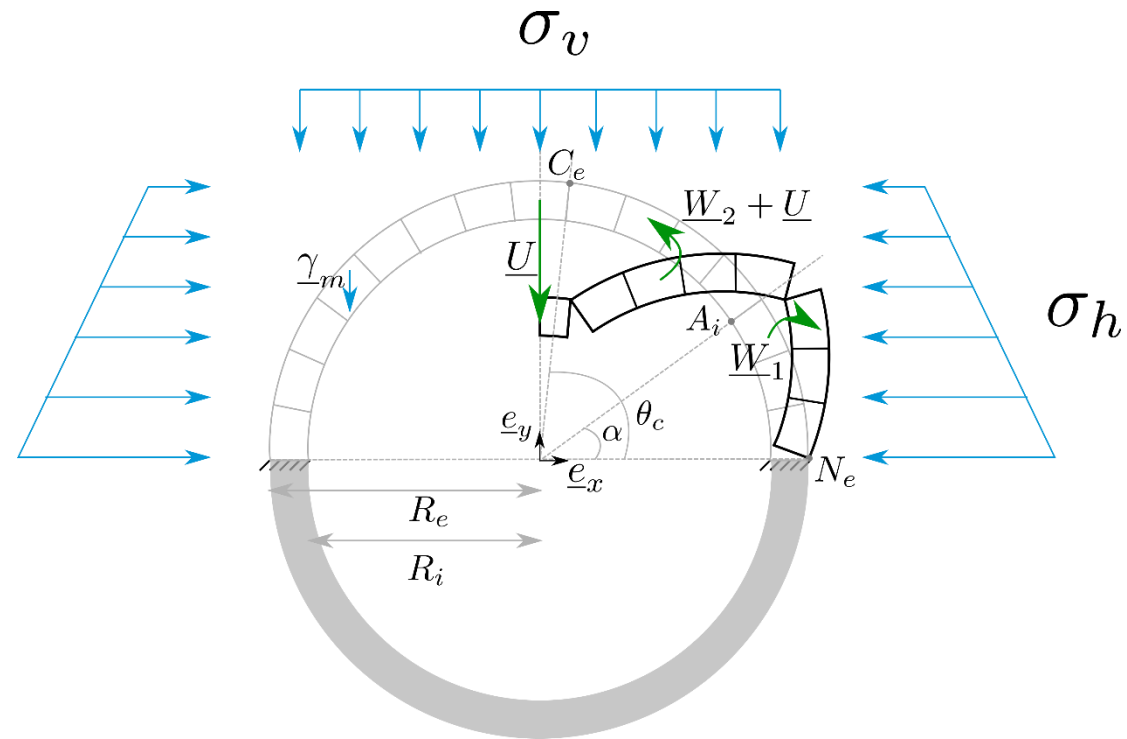


CALCUL À LA RUPTURE EN VOÛTE



Mécanismes de rupture en translation (gauche, trait pointillé) et en rotation (droite, trait plein) pour une voûte chargée ponctuellement en clé





Mécanismes de rupture en translation et rotation pour une voûte chargée de manière à reproduire les effets du terrain encaissant

VERROUS SCIENTIFIQUES

Diagnostic initial

Description de
l'ouvrage étudié

Etude des
données
existantes

Stabilité par le calcul à la rupture

Mécanismes de
rupture virtuels

Charge maximale
supportable

Instrumentation par fibre optique

Mise en place
d'une fibre
optique dans un
ouvrage existant

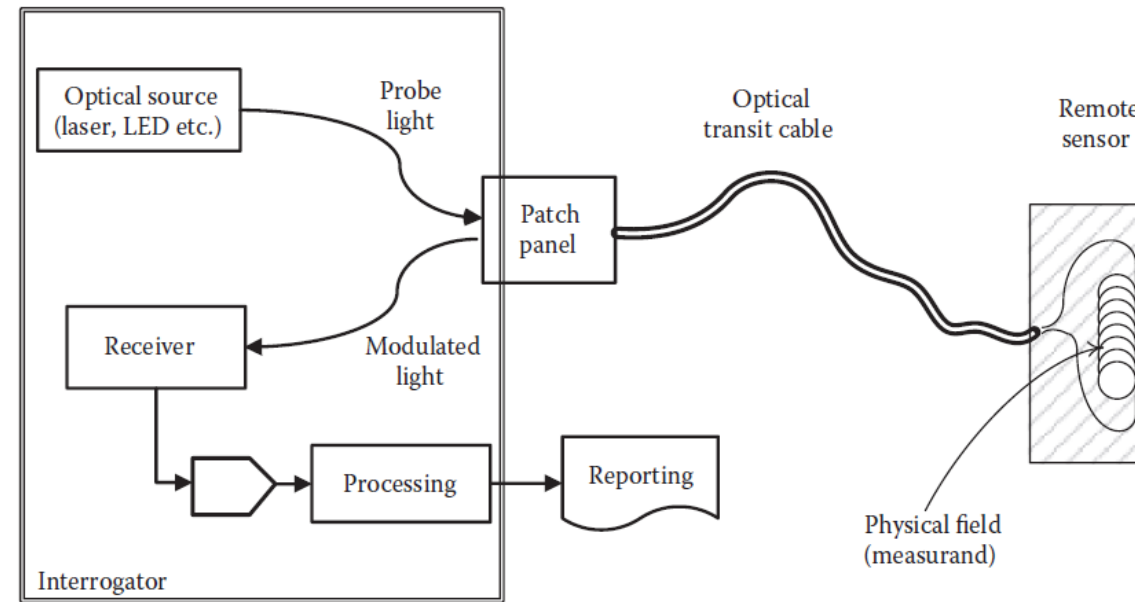
Traitement des
mesures sur un
milieu hétérogène

Modélisation par éléments finis

Fonctionnement et
prise en compte
de l'interaction
terrain-structure

Modélisation des
déformations

INSTRUMENTATION PAR FIBRE OPTIQUE : PRINCIPE GÉNÉRAL



Disposition générale d'un système de capteurs à fibre optique (Hartog, 2017)⁸

INSTRUMENTATION PAR FIBRE OPTIQUE : MATÉRIEL

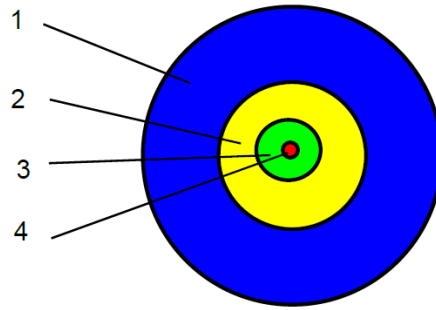
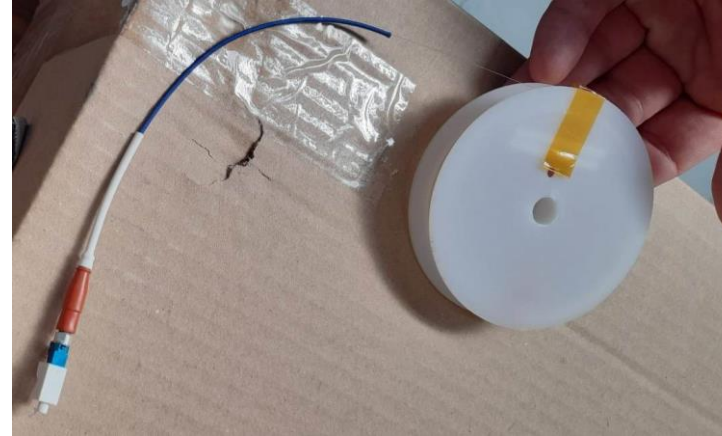
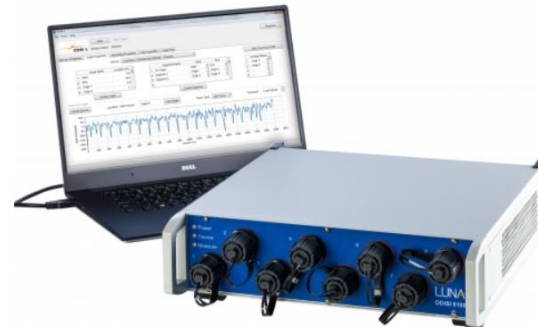


Schéma de la fibre optique BRUsens strain V1 (Brugg Cable AG, 2013)⁹



Fibre optique et connecteur optique



LIOS WELL.DONE DTS Raman pour la température¹⁰ (à gauche) et ODiSI 6000 Rayleigh pour la déformation avec ordinateur¹¹ (à droite)

9. BRUGG CABLE AG. 2013. *BRUSENS STRAIN V1*.
10. LIOS WELL.DONE DISTRIBUTED TEMPERATURE MONITORING. (2022). LIOS SENSING. [HTTPS://LIOS.LUNAINC.COM/EN/PRODUCT/LIOS-WELL-DONE-DISTRIBUTED-TEMPERATURE-MONITORING/](https://lios.lunainc.com/en/product/lios-well-done-distributed-temperature-monitoring/)

11. ODISI 6000 SERIES. 2022. LUNA. [HTTPS://LUNAINC.COM/PRODUCT/ODISI-6000-SERIES](https://lunainc.com/product/odisi-6000-series)

INSTRUMENTATION PAR FIBRE OPTIQUE D'UN TUNNEL

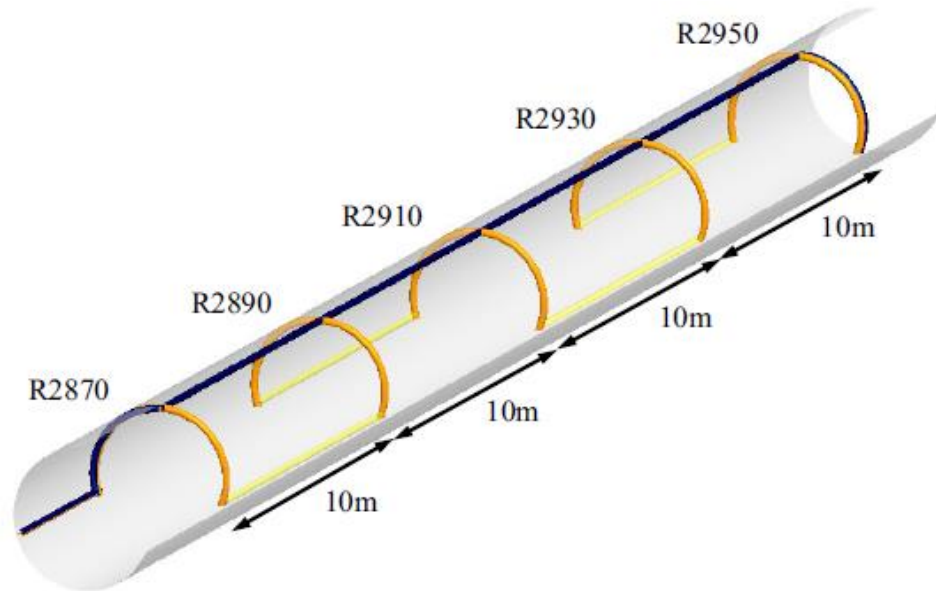
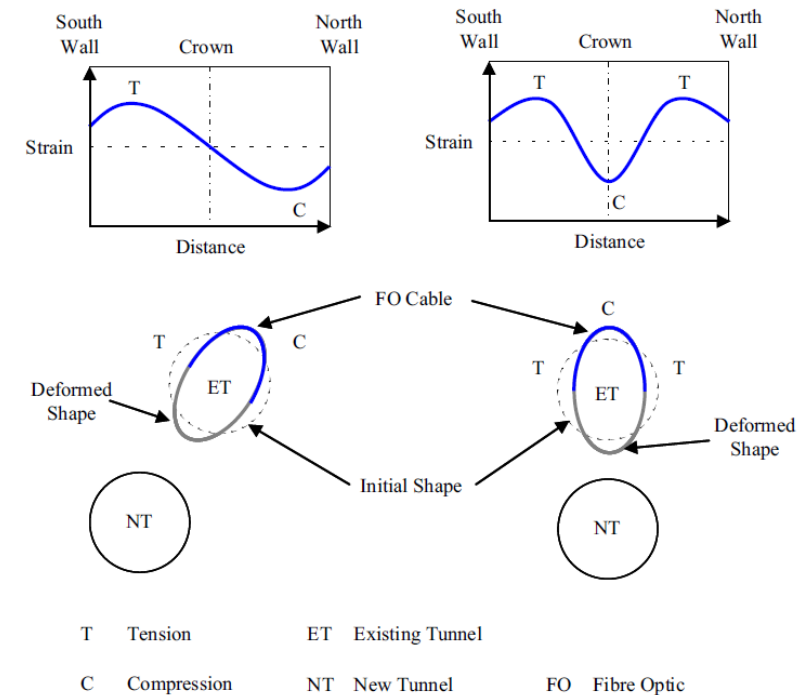


Schéma de l'instrumentation par fibre optique dans le Royal Mail Tunnel (Gue et al., 2015)¹²



Description des déformations dans les sections du Royal Mail Tunnel à partir des données relevées en section par la fibre optique, exemple de résultats présentés par (Gue et al., 2015)¹²

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

- L'analyse des données existantes pour le tunnel de Saint-Cloud a permis de constater un écartement relatif des piédroits et un rapprochement relatif de la clé de voûte au radier, la vitesse des déformation est continue et constante depuis des décennies ;
- Le calcul à la rupture permet de donner des valeurs de charge maximale supportable pour l'ouvrage avant rupture pour les mécanismes virtuels proposés ;
- L'instrumentation par fibre optique sera exploitée de manière à déterminer le mécanisme réel de déformation dans l'ouvrage étudié ;
- Une modélisation de l'ouvrage sera réalisée dans le but de décrire les déformations subies pour des charges supposées mener à la rupture.