



Journée scientifique et technique du 1^{er} Juin 2022
Restitution du GT Modélisation numérique

Recommandations sur l'utilisation pratique des modèles
numériques pour le calcul des ouvrages géotechniques

Sommaire

- Contexte
- Objectifs
- Organisation
- Guide CFMS

Contexte du groupe de travail

- Utilisation de plus en plus fréquente des logiciels de calculs EF et DF en géotechnique
 - ⇒ Ces calculs sont basés par construction sur une idéalisation du comportement du terrain (modèle indirect) avec des lois constitutives pensées pour rendre compte des comportements élémentaires observés en laboratoire
 - ⇒ Corpus géotechnique français très dépendant de l'essai pressiométrique, ce qui n'est pas en phase avec le caractère de plus en plus sophistiqué des modèles et lois de comportement utilisées = besoin d'éclairage sur les lois de comportement et choix des paramètres
 - ⇒ Les normes de calcul donnent très peu d'indications sur l'exploitation des modèles numériques comme « outils de dimensionnement » vis-à-vis des états limites géotechniques des ouvrages
 - ⇒ Constat d'une certaine « discontinuité » entre les résultats issus des « modèles numériques » et ceux fournis par les règles semi-empiriques existantes : l'utilisation des modèles numériques ne doit pas être de nature à bouleverser les ordres de grandeur dans les situations où les modèles empiriques existants sont applicables

Objectifs du groupe de travail

- Recommandations sur l'utilisation pratique des modèles numériques en géotechnique
 - ⇒ Description détaillée des lois de comportement usuelles : domaine d'application, rôle des différents paramètres, lien avec les essais in situ et laboratoire, quelle loi de comportement pour quel ouvrage
 - ⇒ Savoir exploiter les modèles numériques dans les problèmes d'interaction sol-structure
 - ⇒ Gestion éclairée des couplages hydromécaniques (écoulement, consolidation, comportement non-drainé)
 - ⇒ Clarifier l'utilisation des modèles numériques pour identifier les mécanismes de ruine et justifier les états limites d'un ouvrage géotechnique (+ lien avec les formalismes de sécurité)
 - ⇒ Garantir la continuité avec l'expérience acquise en géotechnique en matière de suivi d'ouvrages en vraie grandeur

Organisation du groupe de travail

- Réunion de lancement le 29 Novembre 2019
- 15 membres actifs
- 11 organismes représentés
- 4 principaux axes de travail :
 - ⇒ Lois de comportement
 - ⇒ Couplage hydromécanique
 - ⇒ Stratégie de modélisation
 - ⇒ Stratégie de dimensionnement
- Guide organisé en deux tomes :
 - ⇒ Tome 1 = Bases (7 chapitres)
 - ⇒ Tome 2 = Exemples (7 ouvrages types)

Membres du groupe de travail :

- T. Badinier	Université Gustave Eiffel
- E. Bourgeois	Université Gustave Eiffel
- S. Burlon	Terrasol
- P. Burtin	Ménard
- M. Cahn	Terrasol
- F. Cuira	CST CFMS / Terrasol
- P. Delavernée	Soletanche Bachy
- D. Dias	Laboratoire 3SR
- F. Emeriault	Laboratoire 3SR
- G. Gourrin	Socotec
- L. Pavel	Arcadis
- JM. Pereira	Ecole des Ponts Paris-Tech
- L. Quirin	Keller
- J. Racinais	Ménard
- B. Virolet	Systra

Présentation du guide CFMS (tome 1)

⇒ 101 pages

⇒ 5 chapitres « fondamentaux »

- Chapitre 1 Construction du modèle
- Chapitre 2 Lois de comportement
- Chapitre 3 Méthodes de résolution
- Chapitre 4 Interaction sol-structure
- Chapitre 5 Couplage hydromécanique

⇒ 2 chapitres « pratiques »

- Chapitre 6 Stratégie de modélisation
- Chapitre 7 Stratégie de dimensionnement



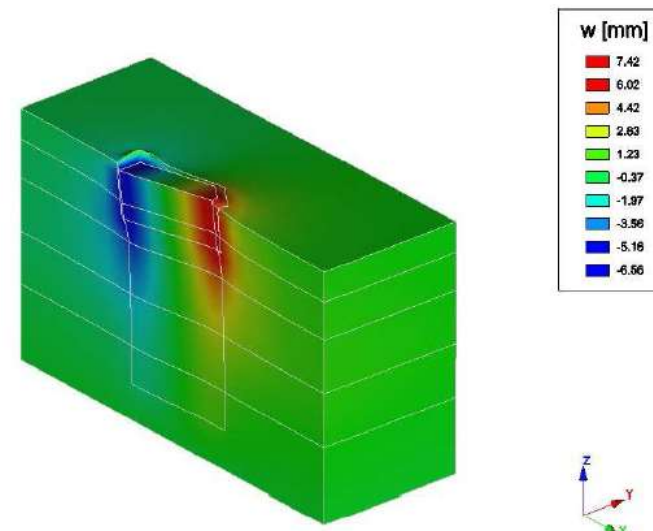
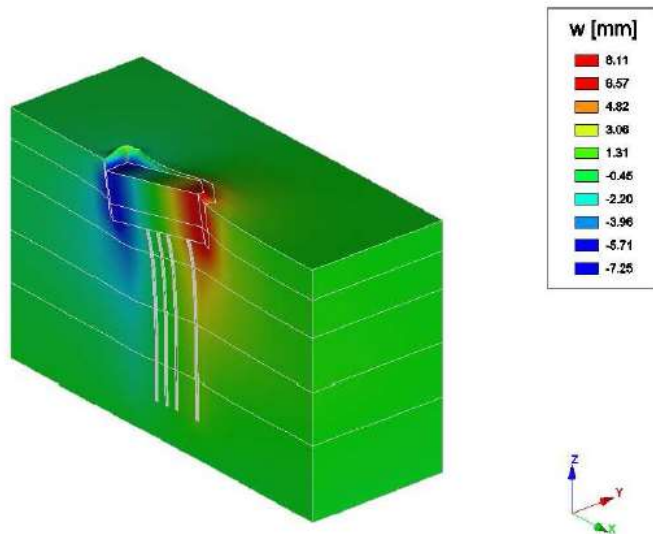
RECOMMANDATIONS SUR L'UTILISATION DES MODELES NUMERIQUES POUR LE CALCUL DES OUVRAGES GEOTECHNIQUES

1 CONSTRUCTION DU MODELE.....	7
1.1 INTRODUCTION.....	7
1.2 CHOIX DU TYPE D'ANALYSE.....	7
1.3 HYPOTHESES GEOMETRIQUES.....	8
1.4 ETAT INITIAL DES CONTRAINTES.....	11
1.5 PRISE EN COMPTE DU PHASAGE DE CONSTRUCTION.....	12
1.6 MODELISATION DES STRUCTURES.....	12
1.7 SYNTHESE.....	15
1.8 REFERENCES.....	15
2 LES LOIS DE COMPORTEMENT.....	16
2.1 INTRODUCTION.....	16
2.2 NOTIONS DE BASE.....	17
2.3 CONSTITUTION D'UNE LOI DE COMPORTEMENT ELASTOPLASTIQUE.....	21
2.4 QUELQUES MODELES USUELS.....	25
2.5 REFERENCES.....	36
3 LES METHODES DE RESOLUTION.....	38
3.1 RESOLUTION GLOBALE.....	38
3.2 RESOLUTION LOCALE.....	39
3.3 METHODE « C-PHI REDUCTION ».....	40
3.4 REDUCTION DES MODULES DE DEFORMATION.....	41
3.5 REFERENCES.....	41
4 ELEMENTS D'INTERACTION SOL-STRUCTURE.....	42
4.1 LES ELEMENTS DE STRUCTURE.....	42
4.2 COUPLAGE SOL/STRUCTURE.....	45
4.3 LES MODELES HYBRIDES.....	47
4.4 LE CAS PARTICULIER DES TUNNELS.....	49
4.5 REFERENCES.....	51
5 COUPLAGE HYDROMECHANIQUE.....	52
5.1 INTRODUCTION.....	52
5.2 ECOULEMENT DANS LES SOLS.....	52
5.3 COUPLAGE HYDROMECHANIQUE.....	56
5.4 SYNTHESE.....	59
5.5 REFERENCES.....	59
6 STRATEGIE DE MODELISATION.....	61
6.1 INTRODUCTION.....	61
6.2 CONSTRUCTION DU MODELE.....	61
6.3 CHOIX DES LOIS DE COMPORTEMENT.....	69
6.4 PHASAGE.....	80
6.5 GESTION PRATIQUE DES COUPLAGES HYDRO-MECHANIQUES.....	84
6.6 EXPLOITATION DES RESULTATS.....	89
6.7 REFERENCES.....	93
7 STRATEGIE DE DIMENSIONNEMENT.....	94
7.1 LIEN AVEC L'EUROCODE 7 ET L'EUROCODE 0.....	94
7.2 VERIFICATION DES ETATS LIMITES DE SERVICE (ELS).....	94
7.3 VERIFICATION DES ETATS LIMITES ULTIMES (ELU).....	95
7.4 ASPECTS LIES AUX ECOULEMENTS HYDRAULIQUES.....	102
7.5 REFERENCES.....	102

Première édition 2022

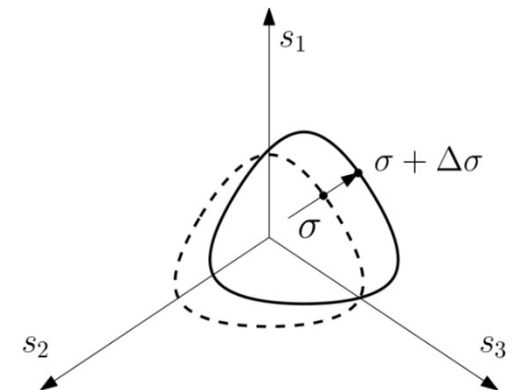
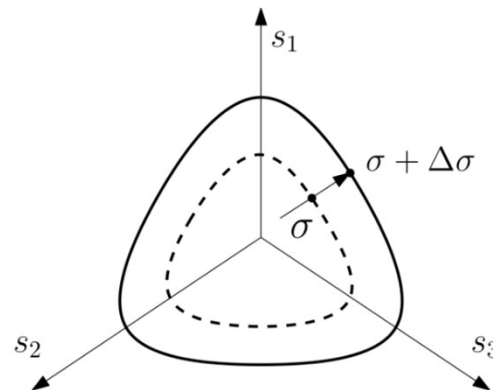
Chapitre 1 – Construction du modèle

- Les points clés à gérer pour la construction d'un modèle numérique
 - ⇒ Hypothèses géométriques : 2D/3D, taille du modèle, maillage (§1.3)
 - ⇒ Etat initial des contraintes (§1.4)
 - ⇒ Phasage de construction (§1.5)
 - ⇒ Modélisation des structures et des interfaces (§1.6)



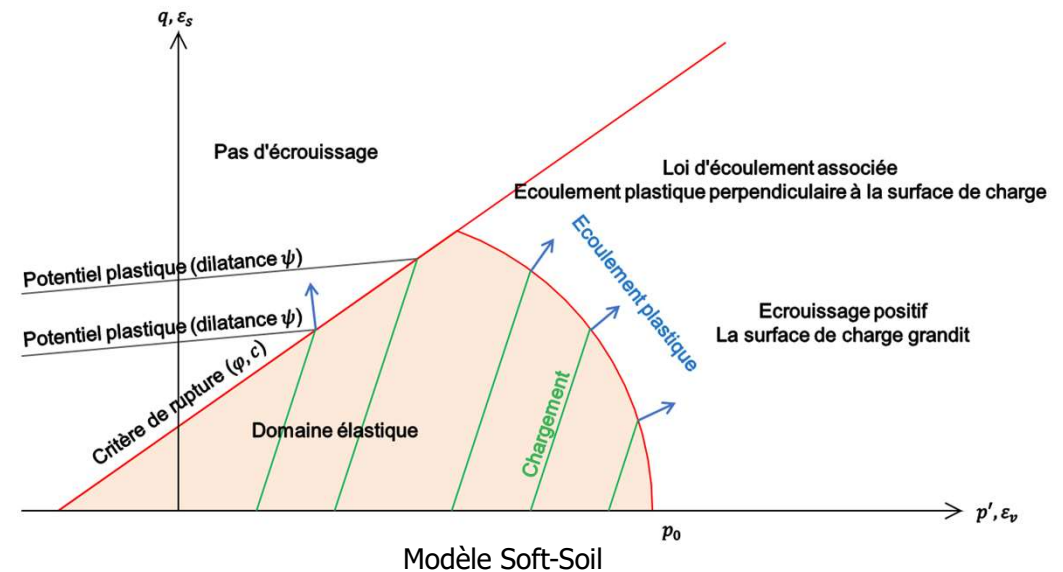
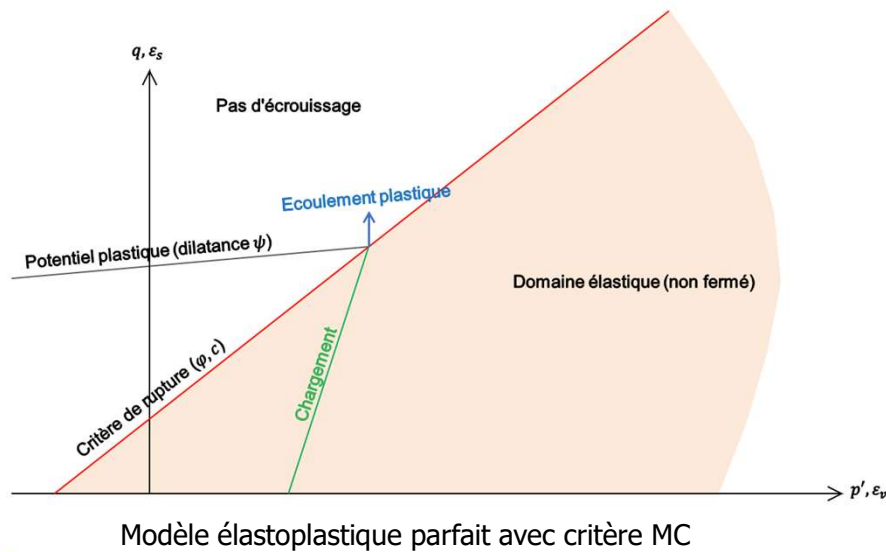
Chapitre 2 – Lois de comportement

- Rappels de quelques notions de base (§2.2)
 - ⇒ Contraintes et déformations
 - ⇒ Invariants, généraux et triaxiaux
 - ⇒ Notion de critère de rupture
 - ⇒ Plasticité et écrouissage
- Constitution d'une loi de comportement (§2.3)
 - ⇒ Elasticité
 - ⇒ Surface de charge, critère de plasticité
 - ⇒ Règle d'écoulement plastique
 - ⇒ Loi d'écrouissage



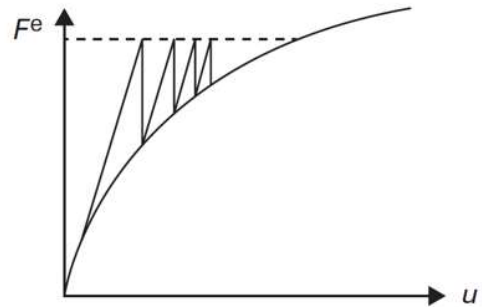
Chapitre 2 – Lois de comportement

- Présentation détaillée de quelques modèles usuels (§2.4)
 - ⇒ Elastique linéaire isotrope (§2.4.1)
 - ⇒ Elastoplastique parfait avec critère de Mohr Coulomb (§2.4.2)
 - ⇒ Cam-Clay modifié (§2.4.3)
 - ⇒ Soft-Soil (§2.4.4)
 - ⇒ Hardening-Soil (§2.4.5)

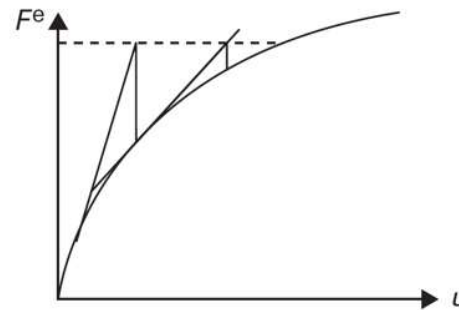


Chapitre 3 – Méthodes de résolution

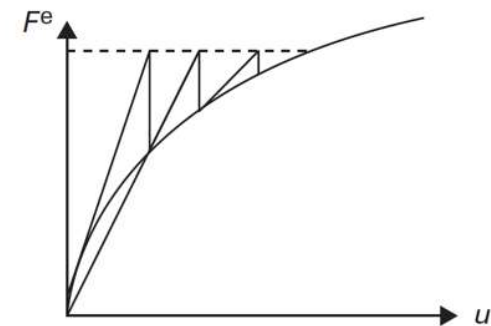
- Principes généraux de la procédure résolution
 - ⇒ Résolution globale (§3.1)
 - ⇒ Résolution locale (§3.2)
 - ⇒ Réduction des propriétés de cisaillement (§3.3)
 - ⇒ Modification des rigidités au cours du phasage (§3.4)



(a) méthode des contraintes initiales
(rigidité constante)



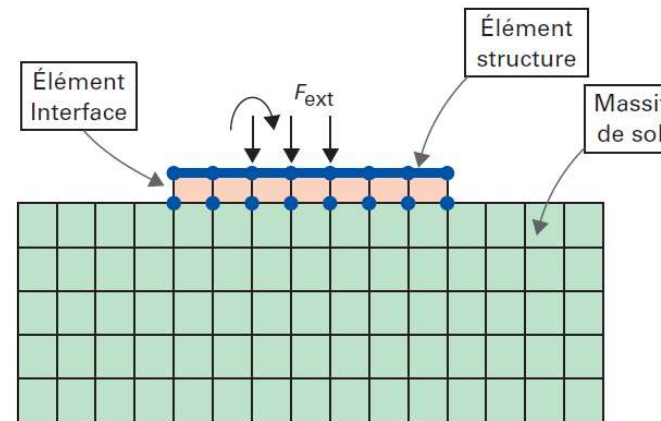
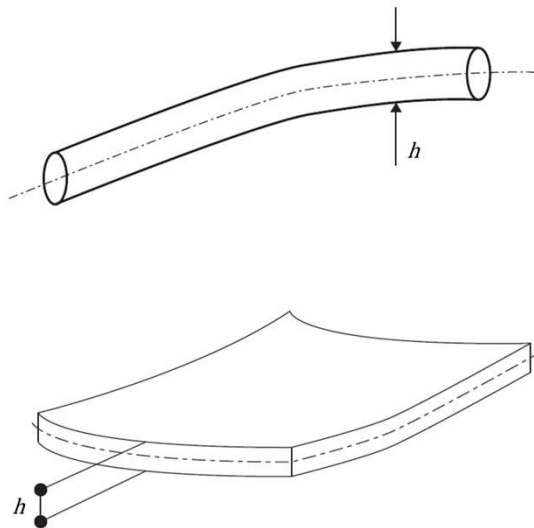
(b) méthode de rigidité tangente



(c) méthode de rigidité sécante

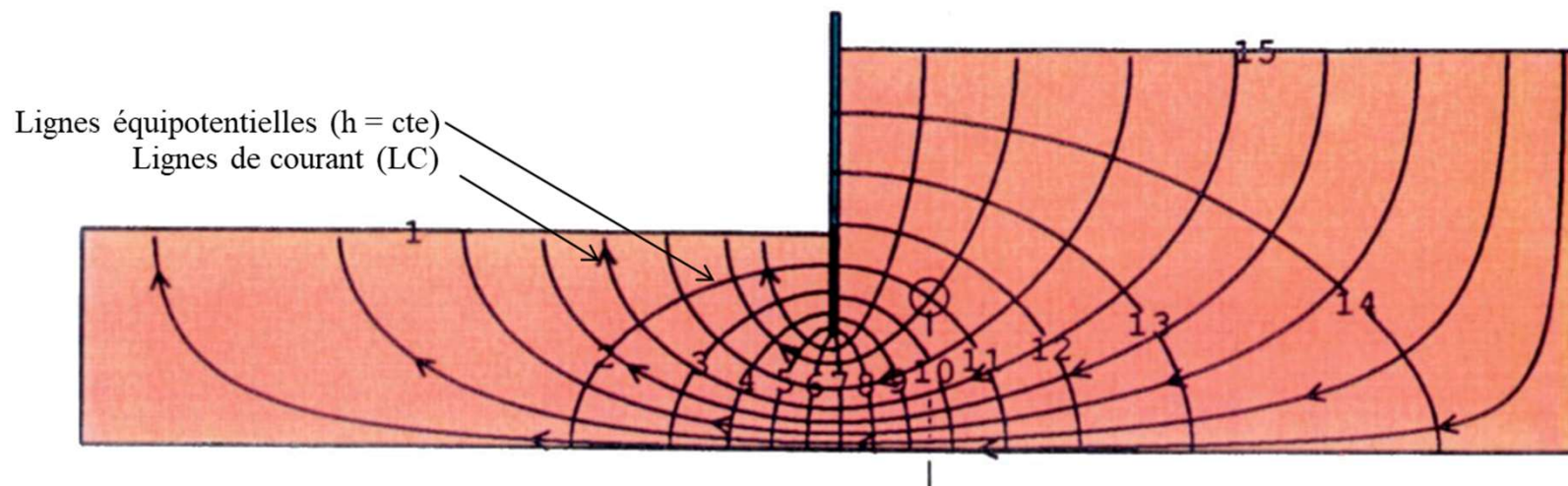
Chapitre 4 – Interaction sol-structure

- Intégration des éléments structuraux dans un modèle « géotechnique »
 - ⇒ Les éléments structures : poutres, plaques, membranes etc. (§4.1)
 - ⇒ Couplage sol/structure : contact parfait, interfaces, éléments incorporés (§4.2)
 - ⇒ Modèles hybrides : combinaison du modèle numérique avec des solutions analytiques préétablies (§4.3)
 - ⇒ Aspects spécifiques aux tunnels (§4.4)



Chapitre 5 – Couplage hydromécanique

- Mise en équation des effets de couplage sol/eau
 - ⇒ Rappels sur les écoulements dans les sols (§5.2.1) + voir guide 2022 CFMS sur rabattement de nappe
 - ⇒ Conditions aux limites (§5.2.2)
 - ⇒ Mise en équation d'un écoulement en régime permanent (§5.2.3)
 - ⇒ Mise en équation d'un écoulement en régime transitoire (§5.2.4)
 - ⇒ Prise en compte de la déformabilité du sol (§5.3)



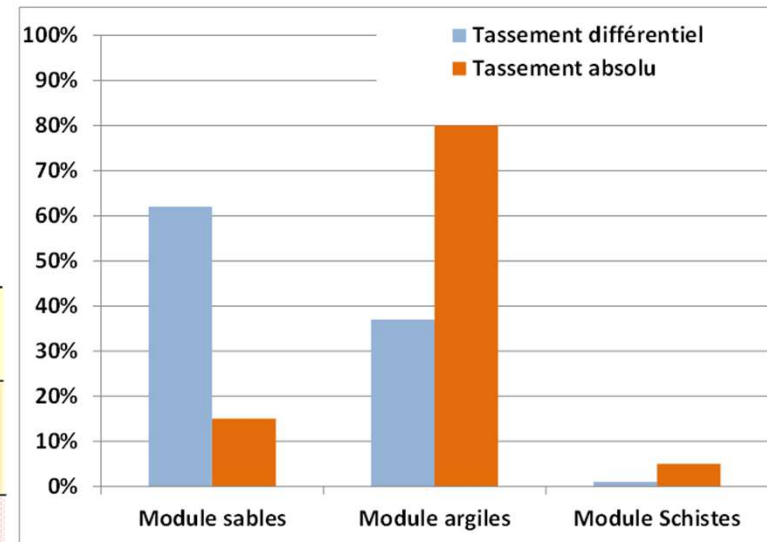
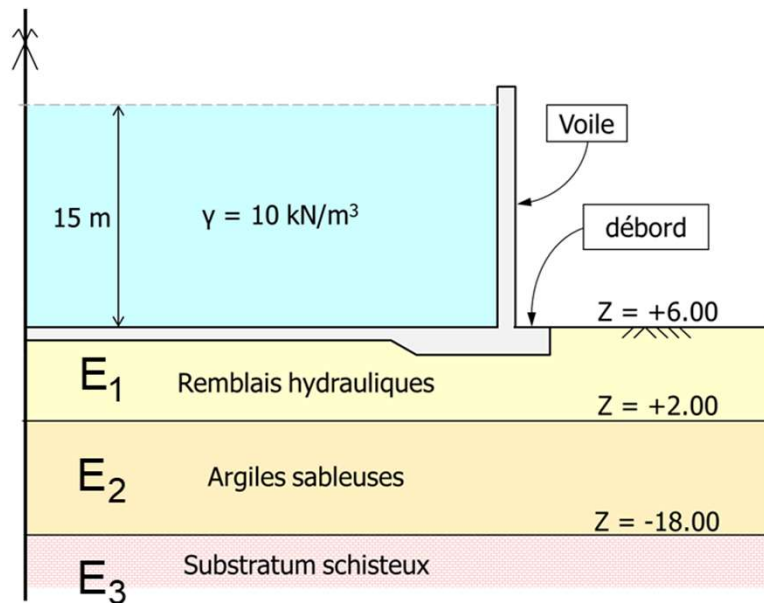
Chapitre 6 – Stratégie de modélisation

- Règles de bonne pratique pour construire un modèle numérique
 - ⇒ Conditions aux limites (§6.2.2), Etat initial (§6.2.3), Interfaces (§6.2.4)
 - ⇒ Quelle loi de comportement pour quel ouvrage (§6.3) : le « juste » modèle, choix des modules de déformation, lien avec les essais laboratoire et in situ, quelques ordres de grandeur
 - ⇒ Gestion du phasage dans les problèmes de fondation, soutènements et tunnels (§6.4)
 - ⇒ Choix pratique de l'approche de couplage hydromécanique (§6.5)

Ouvrage type	Loi élastique linéaire ou non linéaire	Loi élastoplastique	
		Plasticité parfaite	Plasticité avec écrouissage
Semelles, radiers, dallages, pieux et inclusions rigides sous charge verticale	Recommandé	Optionnel	Superflu
Pieux et Inclusions rigides chargés transversalement	Insuffisant	Recommandé	Optionnel
Soutènements, excavations, tunnels	Insuffisant	Peut être suffisant dans certains cas	Recommandé
Remblais sur sol compressible	Insuffisant	Insuffisant	Recommandé

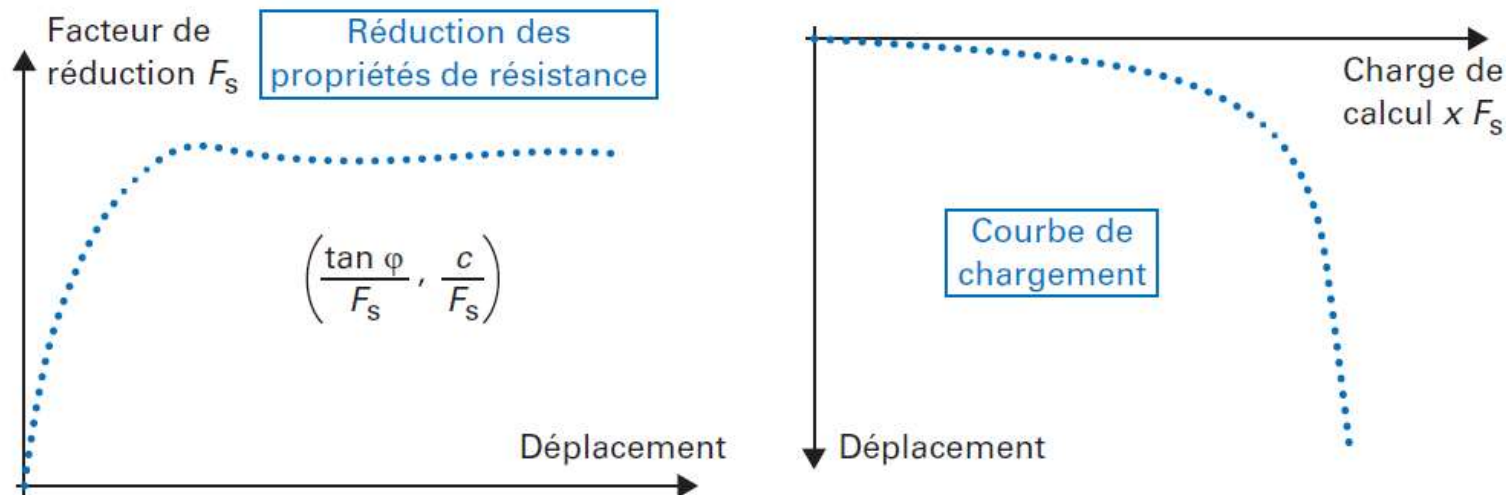
Chapitre 6 – Stratégie de modélisation

- Quelques recommandations sur l'exploitation des résultats
 - ⇒ Les grandeurs à analyser (§6.6.1)
 - ⇒ Comment contrôler la cohérence du modèle (§6.6.2)
 - ⇒ Contrôles spécifiques par type d'ouvrage (§6.6.3)
 - ⇒ Intérêt des études paramétriques (§6.6.4)



Chapitre 7 – Stratégie de dimensionnement

- Exploiter le modèle numérique comme outil de dimensionnement
 - ⇒ Vérifications ELS (§7.2)
 - ⇒ Vérifications ELU STR (§7.3.2)
 - ⇒ Vérifications ELU GEO : gestion de la sécurité (§7.3.3), capacité portante (§7.3.4), défaut de butée (§7.3.5), stabilité générale (§7.3.6)
 - ⇒ Aspects hydrauliques (§7.4)



Focus détaillé sur quelques chapitres clés

- | | | |
|---|---------------------|--------------------|
| • Chapitre 1 – Construction du modèle | E. Bourgeois | UGE |
| • Chapitre 2 – Lois de comportement | JM. Pereira | ENPC |
| • Chapitre 5 – Couplage hydromécanique | F. Emeriault | 3SR |
| • Chapitre 6 – Stratégie de modélisation | L. Pavel et M. Cahn | Arcadis / Terrasol |
| • Chapitre 7 – Stratégie de dimensionnement | S. Burlon | CNJO |

Synthèse

- ⇒ Mise en page finale en cours par prestataire externe
- ⇒ Mise en ligne sur le site du CFMS avec accès réservé aux membres CFMS dans un premier temps
<https://www.cfms-sols.org/documentation/normes-et-recommandations>
- ⇒ Le travail se poursuit sur le tome 2 (exemples d'application)