



Journée scientifique et technique du 1<sup>er</sup> Juin 2022  
Restitution du GT Modélisation numérique

## Chapitre 5 : Couplage hydromécanique

Fabrice Emeriault  
(Laboratoire 3SR)

# Couplages hydro-mécaniques

- Chapitre 5 consacré aux couplages hydro-mécaniques – complété par des éléments dans le chapitre 6
- A pour objectif essentiel de mettre en avant le lien fondamental pour les problèmes géotechniques entre écoulement de l'eau dans les sols et comportement mécanique des ouvrages
- Volontairement court – renvoie vers une littérature plus complète sur certains points
- Alerte ou rappelle certains points cruciaux pour une bonne pratique de la modélisation numérique

## Plan du Chapitre 5

- Introduction
- Ecoulement dans les sols
  - Gradient hydraulique et perméabilité
  - Conditions aux limites
  - Equations d'écoulement en régime permanent
  - Ecoulement en régime transitoire
  - Cas particulier des sols non saturés
- Couplage hydro-mécanique
  - Présentation du problème
  - Problème à long terme
  - Problème à court terme
  - Problème couplé en régime transitoire
- Synthèse

## Écoulement dans les sols

- Gradient hydraulique et perméabilité

- Rappel de la notion de charge hydraulique

$$h = z + \frac{u_w}{\rho_w \cdot g}$$

- Et de son gradient  $i$

- Ainsi que de la Loi de Darcy

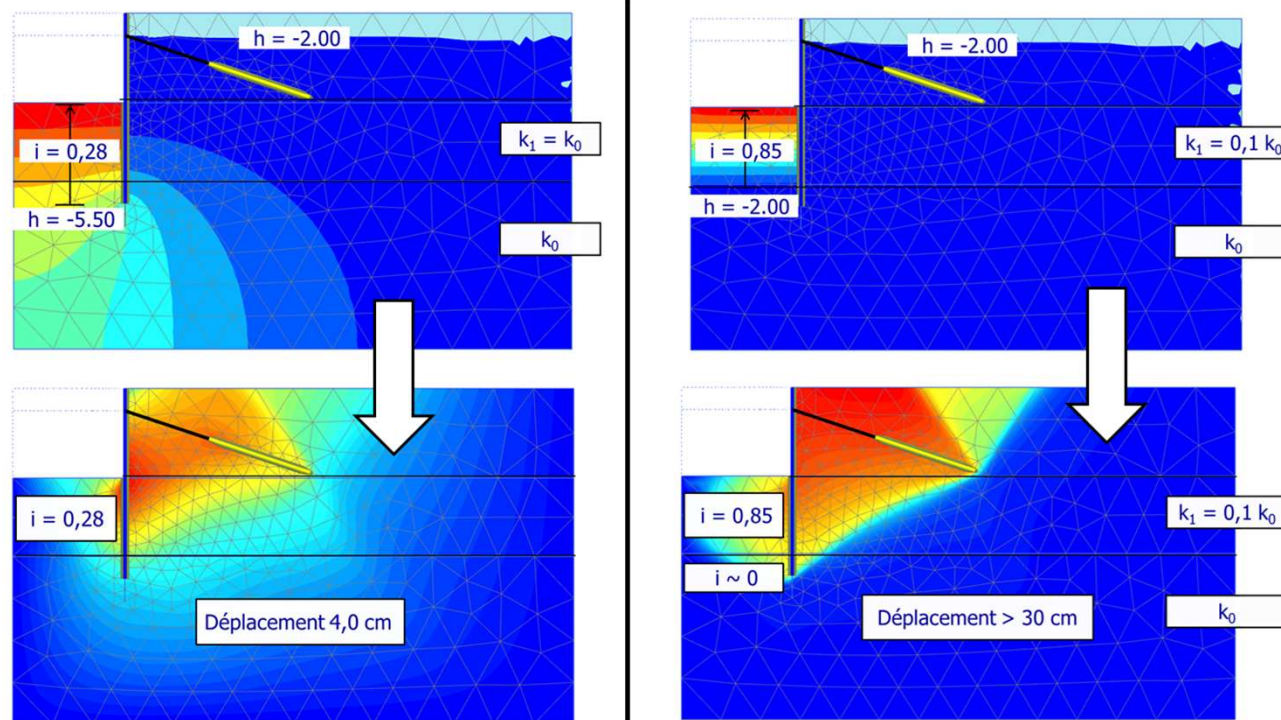
$$v = -k \cdot \text{grad } h = -k \cdot i$$

⇒ Les messages d'alerte:

- difficulté de mesure de la perméabilité – erreur possible d'un ordre de grandeur
- caractère anisotrope de la perméabilité
- perméabilité à l'eau et non valeur intrinsèque

# Ecoulement dans les sols

- Exemple d'impact d'une erreur sur les perméabilités (homogène vs hétérogène)



# Ecoulement dans les sols

- Conditions aux limites
  - Fondamentales si l'écoulement de l'eau a un impact fort sur le résultat attendu
  - Définies en matière de charge hydraulique ou de flux:
    - sur les frontières du modèle
    - à l'intérieur du modèle (puits ou drain)
  - Peuvent être le critère majeur pour la bonne définition géométrique des frontières du modèle (latérales et/ou basse)
- ⇒ Les messages d'alerte:
  - analyse au cas par cas, compte-tenu des perméabilités et de leurs contrastes entre sols
  - bonne appréciation du rayon d'action d'un rabattement
  - attention à la capacité physique des puits et drains

## Ecoulement dans les sols

- Equations d'écoulement en régime permanent
  - Combinaison de la notion de charge hydraulique, de la loi de Darcy et de l'équation de continuité ou conservation de masse:

$$\operatorname{div} \boldsymbol{v} = 0 \quad \text{soit} \quad \Delta h = 0$$

⇒ Les messages d'alerte:

- sol saturé
- eau supposée incompressible
- squelette indéformable – grains solides incompressibles

## Ecoulement dans les sols

- Equations d'écoulement en régime transitoire
  - Prise en compte de l'évolution dans le temps de la charge hydraulique:

$$\text{div}(\mathbf{k} \cdot \mathbf{grad} h) = S \frac{\partial h}{\partial t}$$

- Avec S coefficient d'emmagasinement spécifique
- ⇒ Les messages d'alerte:
- évaluation de S peut être difficile
  - dépendance du résultat aux conditions:
    - limites hydrauliques (et leur variation temporelle)
    - initiales sur l'ensemble du modèle



## Cas particulier des sols non saturés

- Malgré l'existence dans de nombreux logiciels d'une possibilité de faire des calculs non saturés, **le guide se donne comme objectif d'alerter le lecteur sur la complexité du sujet et de la difficulté de devenir expert dans ce domaine.**
- Il préfère renvoyer vers de la littérature plus spécifique et une bonne appropriation de l'ensemble de la documentation du logiciel.
- Rappel de quelques éléments majeurs:
  - Utilisation de la notion de succion  $(u_a - u_w)$
  - Et de degré de saturation  $S_r$
  - Relation entre ces deux quantités - courbe de rétention avec différence entre chemins d'humidification ou de séchage
  - Nécessité pour un calcul en contraintes effectives d'une alternative à l'équation de Terzaghi
  - Par exemple Bishop:  $\sigma' = \sigma + (-u_a + \chi(u_a - u_w)) \cdot \delta$

## Couplage hydro-mécanique

- Quelle démarche adopter pour rendre compte du couplage hydro-mécanique (interaction écoulement – comportement mécanique)?
- Rappel du cadre général:
  - Pour un sol saturé
  - L'équation de Terzaghi pour les contraintes effectives s'applique  $\sigma' = \sigma - u_w \delta$
  - Pour un problème à l'équilibre statique, on a:  $\text{div}(\sigma) - \gamma e_z = 0$
  - Soit  $\text{div}(\sigma') + \rho_w g \text{grad}(h) - \gamma' e_z = 0$
  - A combiner avec la loi de comportement de squelette solide  $\sigma' = \Sigma \cdot \varepsilon$
- Analyse de 3 situations possibles:
  - Problème à long terme
  - Problème à court terme
  - Problème couplé en régime transitoire

## Couplage hydro-mécanique – long terme

- Cas pour lesquels les champs de charge hydraulique et de déformation ne varient pas (plus) avec le temps.
  - Le problème hydraulique peut être résolu indépendamment du problème mécanique
  - Le champ de charge hydraulique et pression interstitielle est reporté dans l'équation d'équilibre pour résoudre le problème mécanique
  - Le calcul est ainsi découplé
  - Il fait implicitement l'hypothèse que la situation la plus défavorable est le long terme et pas une situation intermédiaire

## Couplage hydro-mécanique – court terme 1/3

- Situation pour laquelle le chargement mécanique est suffisamment rapide pour que l'écoulement de l'eau n'ait pas encore eu le temps de s'initier

- Possible de traiter le problème en contraintes totales
- La variation de la pression interstitielle est fonction de la déformation du squelette

$$(u_w - u_w^0) = K \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}) \quad \text{avec par exemple: } K = K_w / \phi$$

- La loi de comportement en contraintes totales résultante:

$$\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}' + u_w \boldsymbol{\delta} = \boldsymbol{\Sigma} \cdot \boldsymbol{\varepsilon} + (u_w^0 + K \operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon})) \boldsymbol{\delta}$$

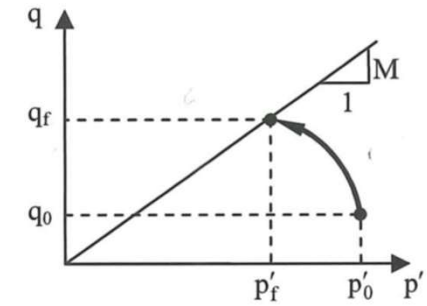
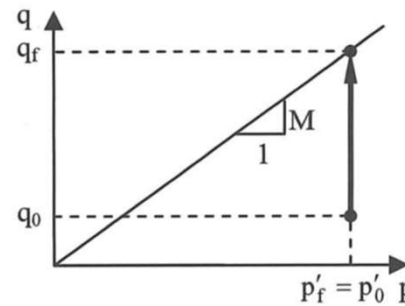
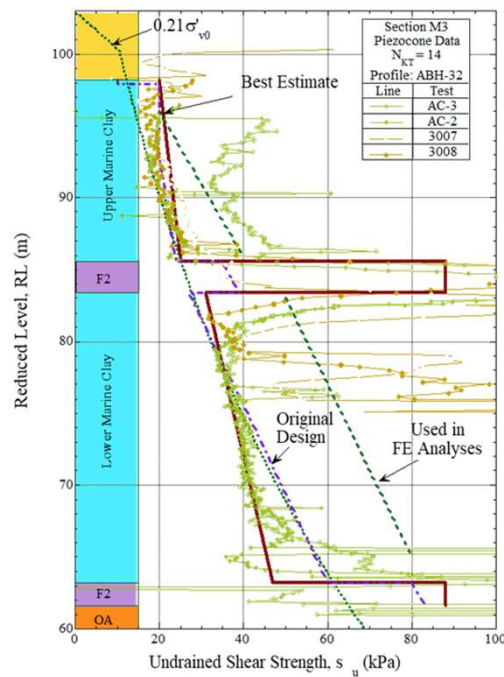
- Nécessite la considération d'une loi de comportement en contraintes effectives
- Attention: le comportement contractant ou dilatant du matériau (reproduit par la loi de comportement en contraintes effectives) peut mener à des résultats irréalistes!
  - Ex de la loi Mohr coulomb utilisée dans le cas de Nicholl Highway

# Couplage hydro-mécanique – court terme 2/3

## Cas de la rupture de Nicholl Highway – Singapour 2004

Analyse "détaillée" avec logiciel Elements Finis

Sol modélisé par Mohr Coulomb en conditions non drainées  
(utilisation des paramètres de résistance drainée)



## Couplage hydro-mécanique – court terme 3/3

- Alternativement, on peut utiliser une loi de comportement non drainée en contraintes totales
- ⇒ Les messages d'alerte:
- approche qui nécessite de considérer des paramètres (modules, cohésion et angle de frottement) bien adaptés
  - utiliser avec une certaine expérience en analysant les résultats avec prudence

## Couplage hydro-mécanique – régime transitoire

- Situation pour laquelle il est nécessaire de mener un calcul complètement couplé pour décrire l'évolution avec le temps d'un ouvrage

- Le guide rappelle les éléments principaux de l'approche de Biot (1941) menant à:

$$\operatorname{div}(k \cdot \mathbf{grad} h) = \frac{\rho_w g \phi}{K_w} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\operatorname{tr}(\boldsymbol{\varepsilon}))$$

- Et le couplage avec les équations d'équilibre et la loi de comportement du squelette

⇒ Les messages d'alerte:

- Ces calculs doivent être menés par un professionnel expérimenté
- Questions théoriques et numériques, notamment celle du choix du pas de temps
- Outre les paramètres du comportement hydro-mécanique, des conditions aux limites et des conditions initiales appropriées aux problèmes mécanique et hydraulique

## Analyse et contrôle des résultats

- Dans le chapitre 6, le guide formule quelques recommandations sur les résultats à analyser:
  - Lignes équipotentiels et pertes de charge (dans les zones d'intérêt liées à l'ouvrage considéré)
  - Lignes de courant et vitesses associées (évaluation des débits par unité de surface).
  - Surface libre d'écoulement (rayon d'action)
  - Gradients
- Il formule également quelques recommandations sur les contrôles à effectuer.
  - Contrôle des conditions limites hydrauliques:
    - en matière de charge hydraulique et/ou lignes de courant
    - cohérence avec le rayon d'action estimé
  - Contrôle de la cohérence des gradients et vitesses vis-à-vis des critères de stabilité
  - Contrôle de l'adéquation entre débit calculé dans un puits ou drain et caractéristiques techniques
  - En cas de comportement non drainé:
    - contrôle du cisaillement mobilisé et compatibilité avec la cohésion non drainée théorique ou estimée.
    - Évolution et amplitude des pressions interstitielles générées



# Synthèse

- De nombreuses situations/ouvrages nécessitent la considération des écoulements et du couplage hydro-mécanique
- L'estimation réaliste des perméabilités du massif en place est une difficulté.
- Les calculs complètement couplés restent rares et on a tendance à privilégier une démarche dans laquelle on détermine le champ de pression séparément avant de l'introduire dans le calcul mécanique (en particulier en condition drainée ou long terme).
- Pour étudier le comportement d'un ouvrage en condition non drainée, une attention particulière doit être portée au choix du modèle de comportement pour le sol, certains modèles pouvant conduire à surestimer largement la résistance au cisaillement du sol