



Journée scientifique et technique du 1^{er} 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

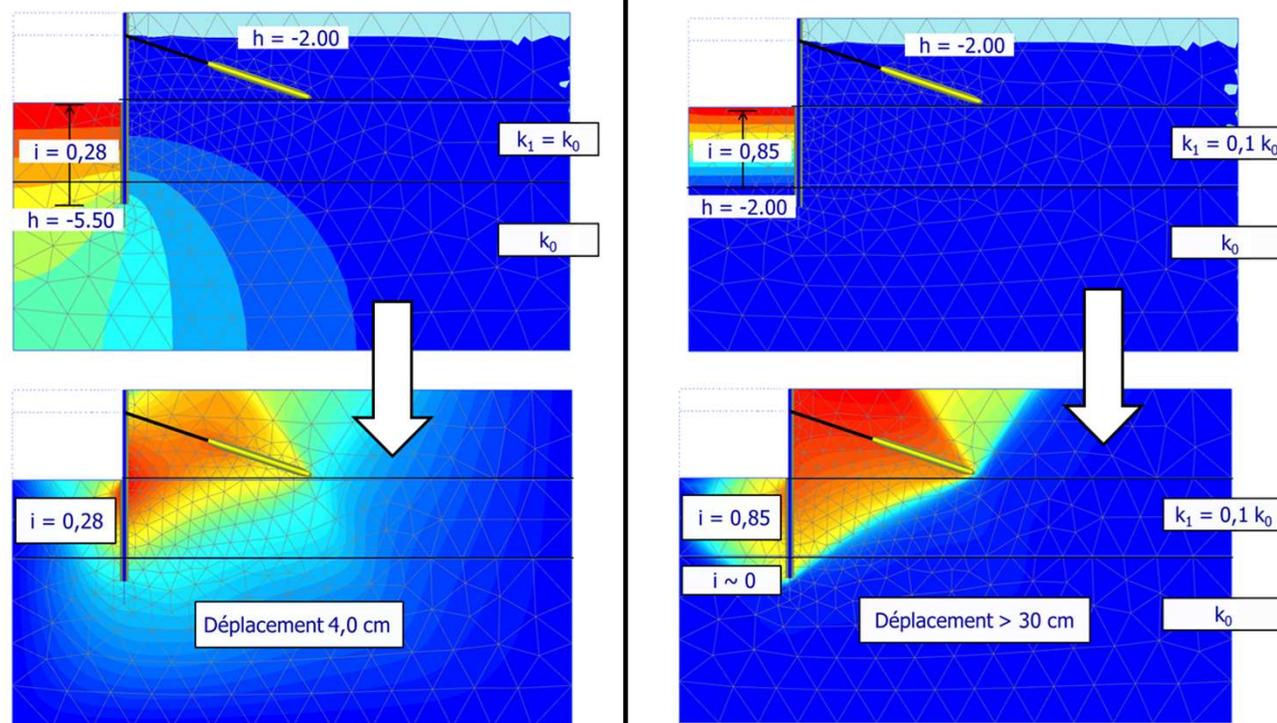
$$v = -k \cdot \text{grad } h = -k \cdot i$$

⇒ 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:

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

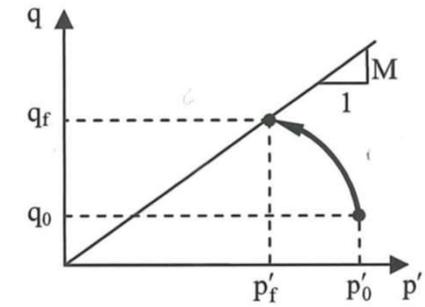
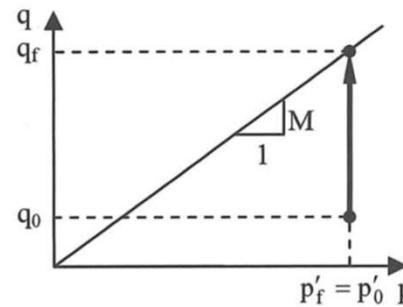
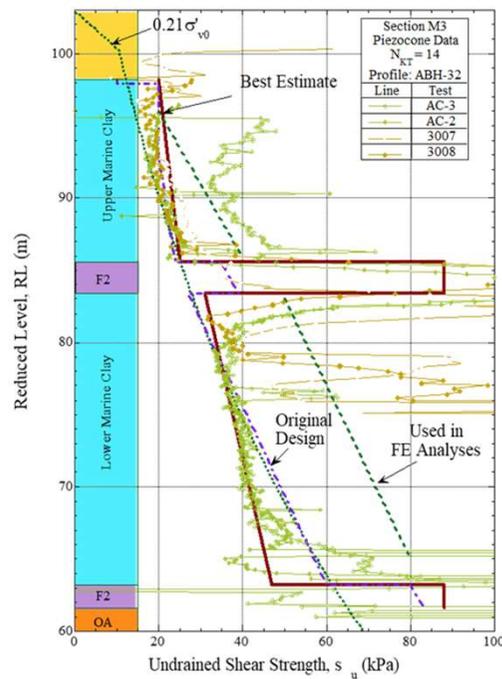
- Nécessite la considération d'une loi de comportement en contraintes effectives
- Attention: le comportement contractant ou dilatant du matériau (reproduit par la loi de comportement en contraintes effectives) peut mener à des résultats irréalistes!
 - Ex de la loi Mohr coulomb utilisée dans le cas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