

*Journée technique CFBR – CFMS –
SPTF FNTP du 16 mai 2019*

23 Avenue Condorcet, Villeurbanne



Méthode de calcul pour l'ingénierie

*Dino MAHMUTOVIC, EGIS
Luc BOUTONNIER, EGIS*

Journée organisée par :



CONCEPTION ET CONSTRUCTION des ouvrages en sols fins



Sommaire

- Introduction
- Décomposition du sol en domaines de saturation
- Présentation du modèle théorique
- Etude de cas
- Conclusions et perspectives

Introduction : les sols non saturés

Les sols naturels

Les déblais



Les remblais



Les sols compactés

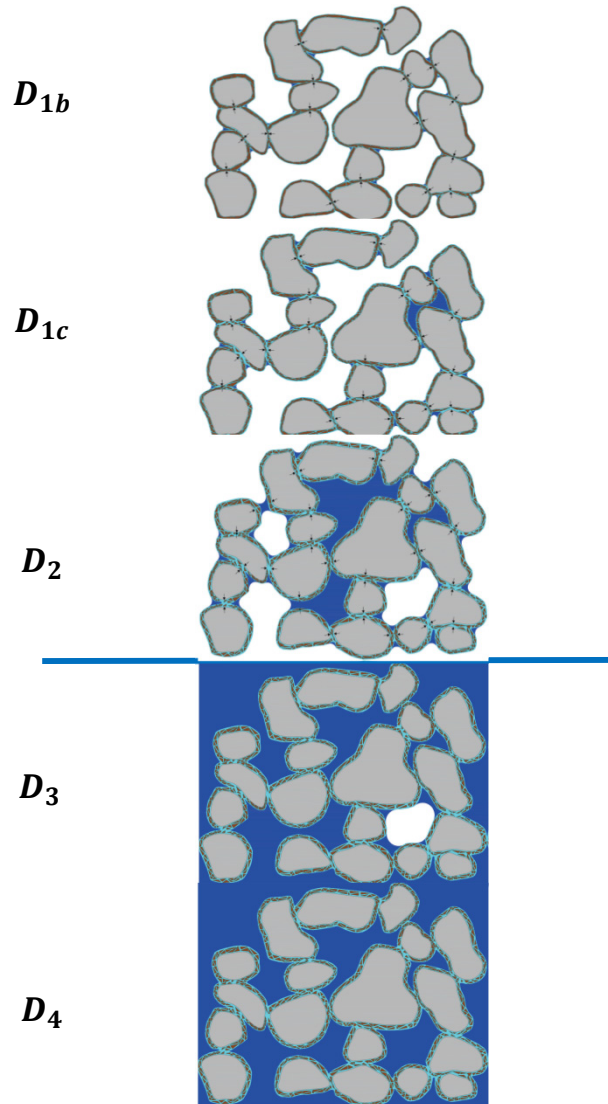
Les digues



Les barrages

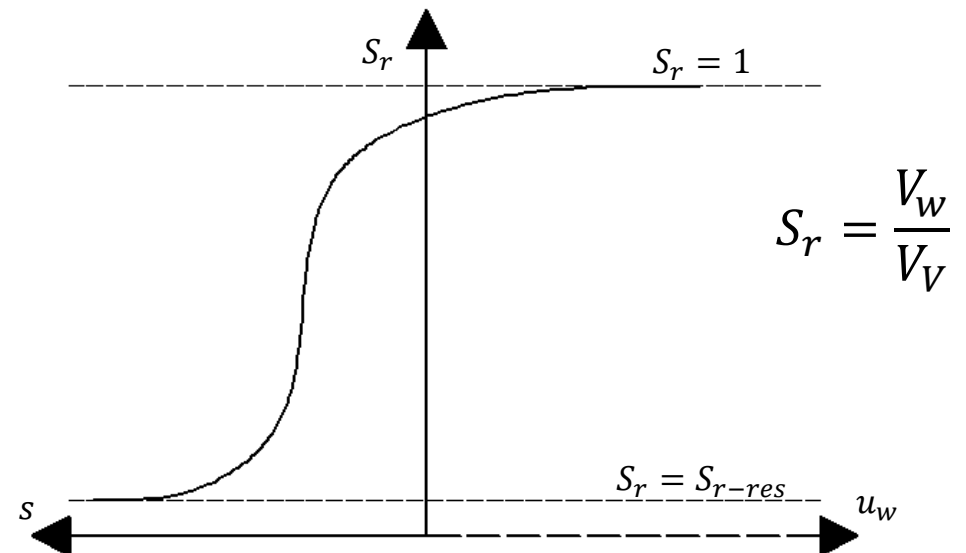


Domaines de saturation et sols naturels

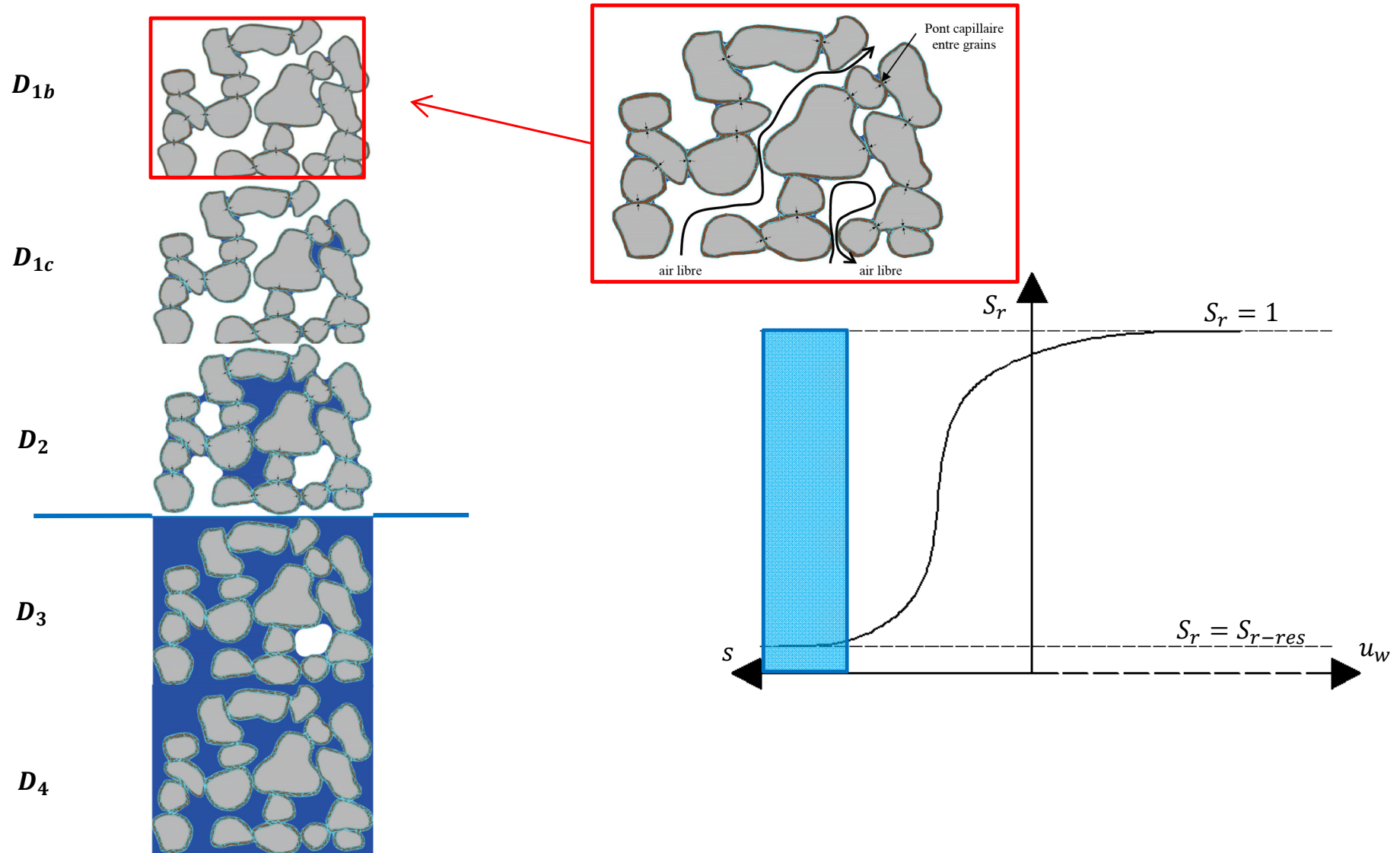


Objectifs :

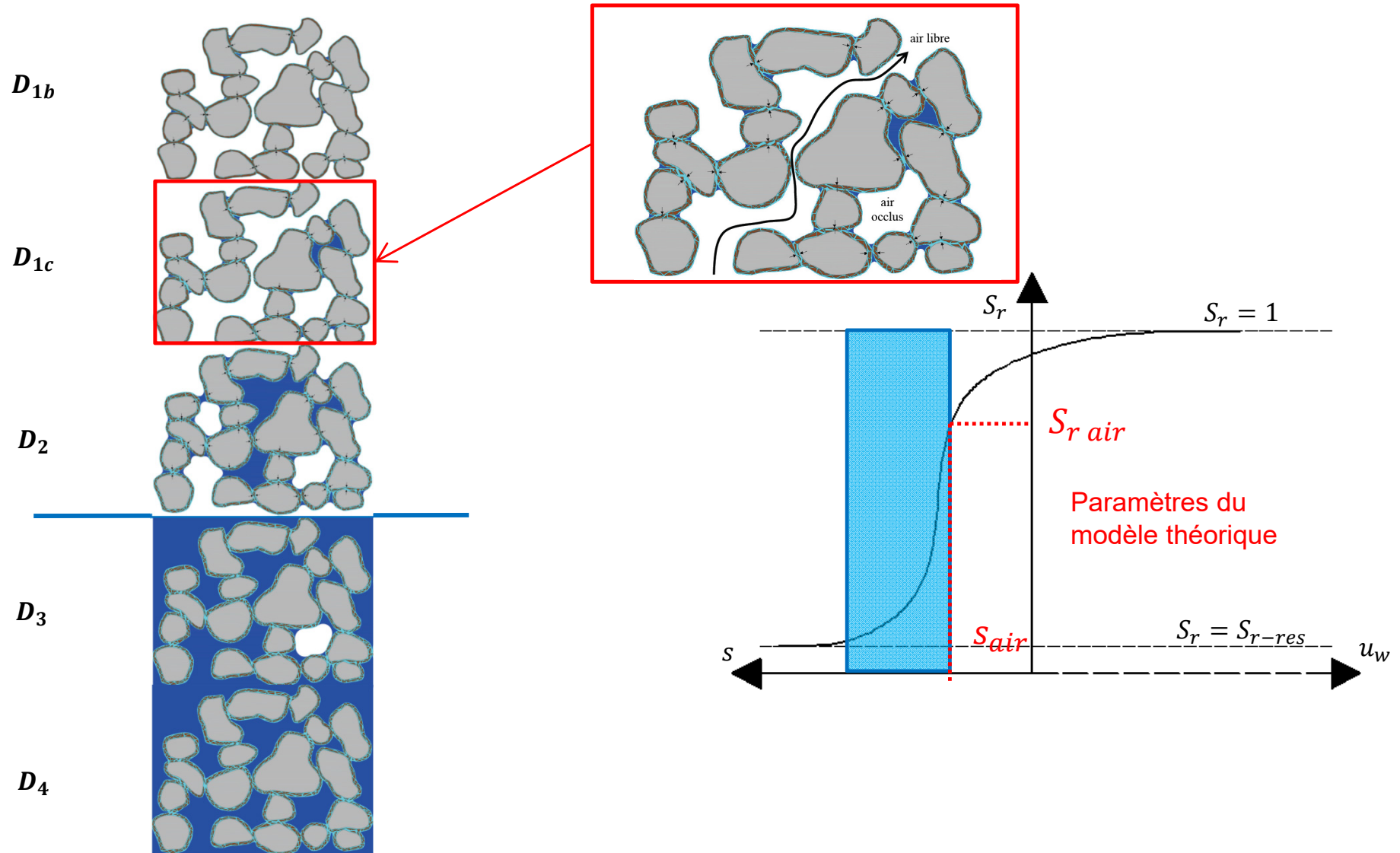
- Division du sol en domaines de comportement
- Utiliser une variable justifiant cette division



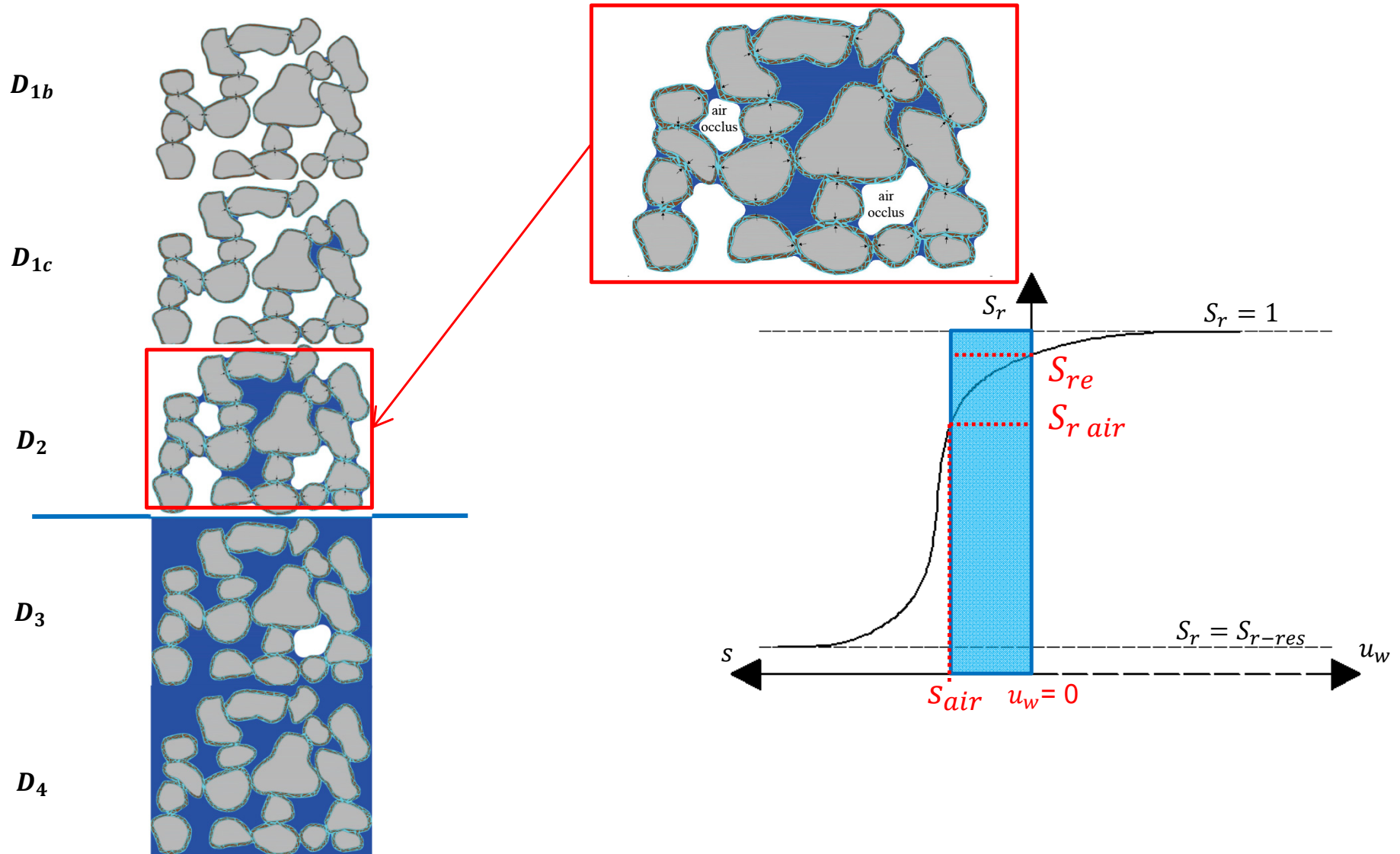
Domaines de saturation et sols naturels



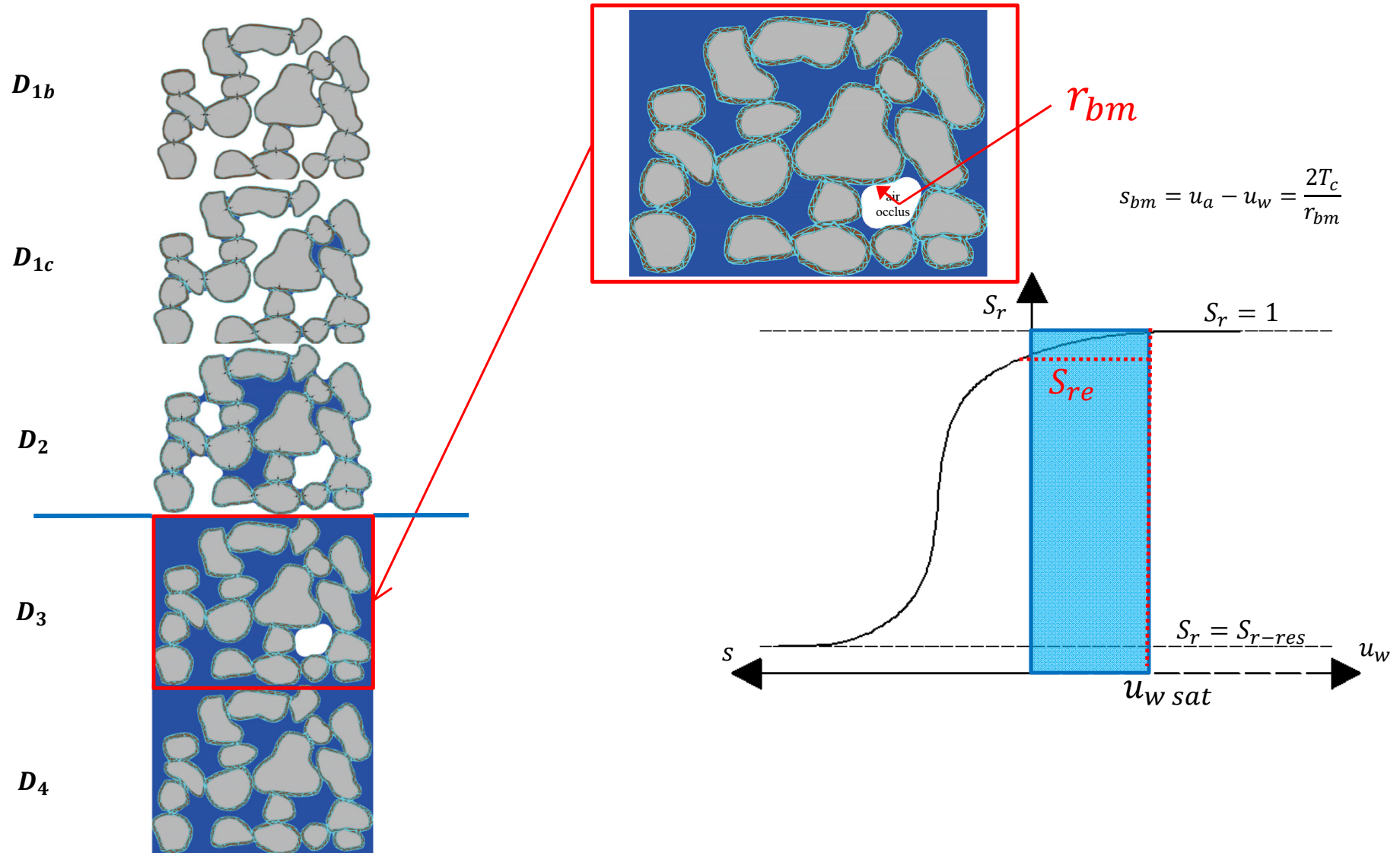
Domaines de saturation et sols naturels



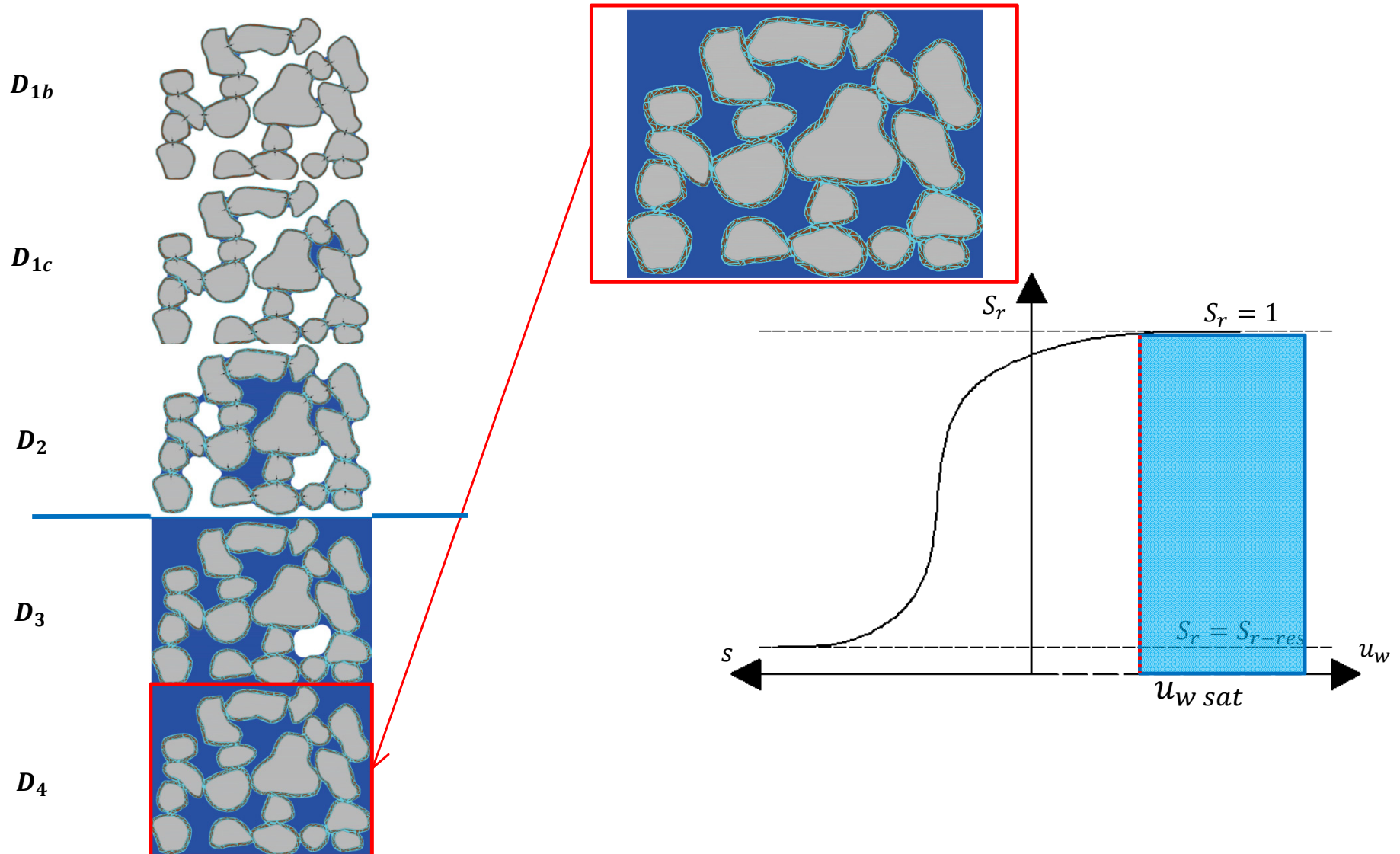
Domaines de saturation et sols naturels



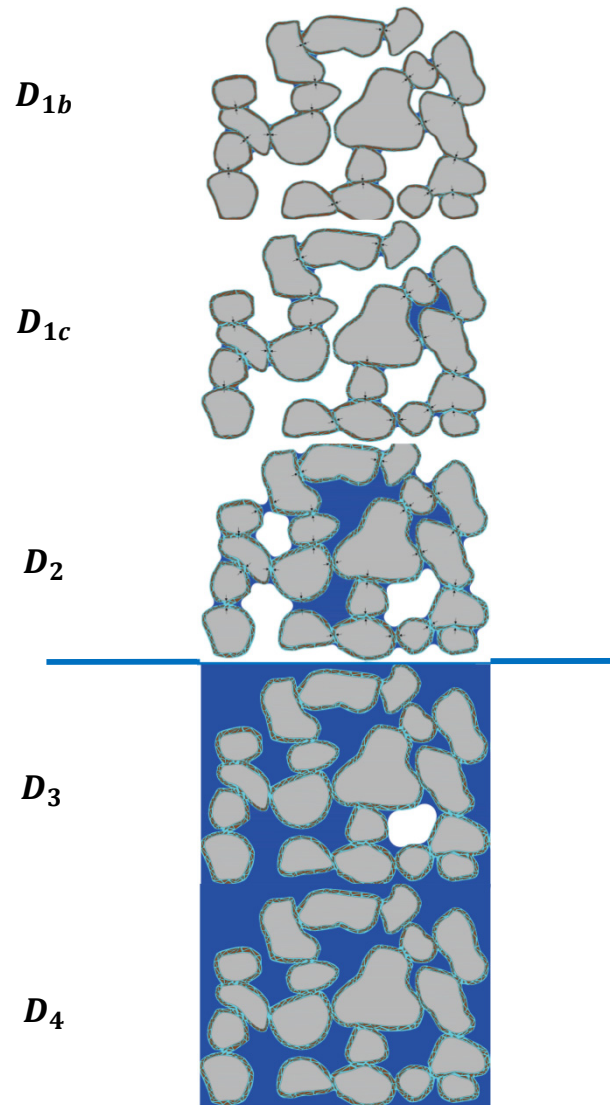
Domaines de saturation et sols naturels



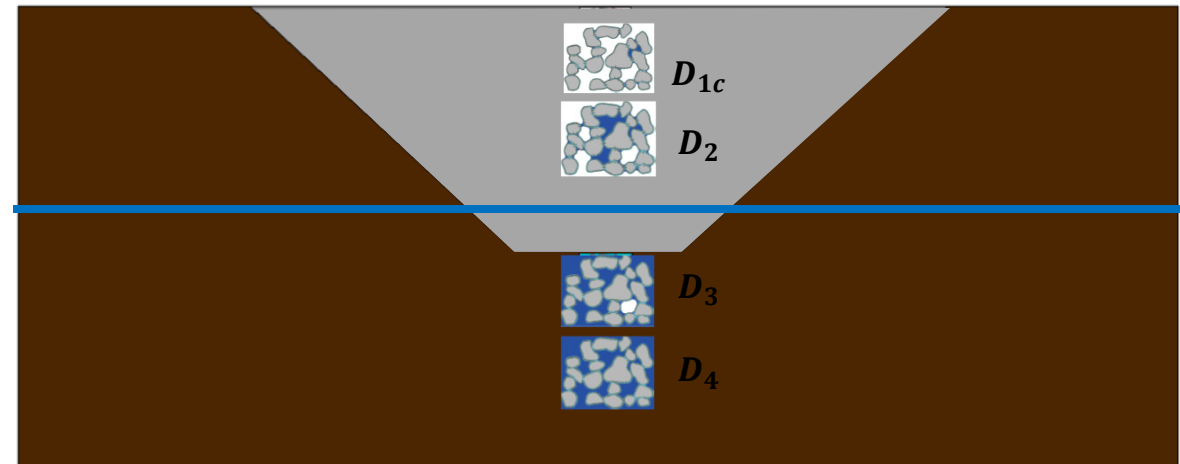
Domaines de saturation et sols naturels



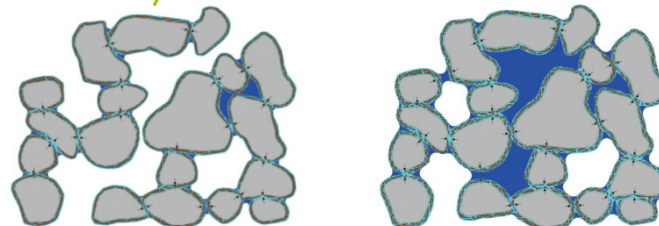
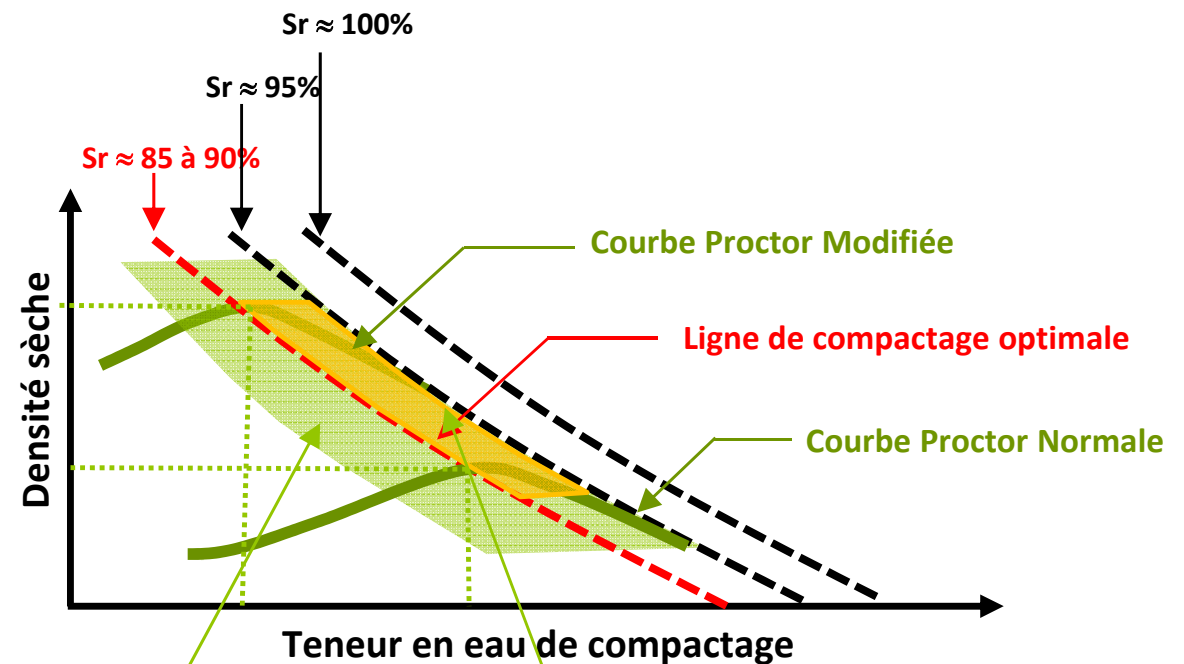
Domaines de saturation et sols naturels



Exemple d'application : le cas des déblais

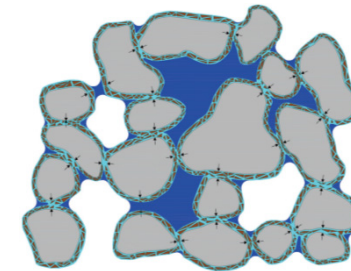
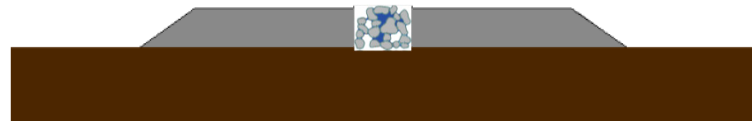


Domaines de saturation et sols compactés

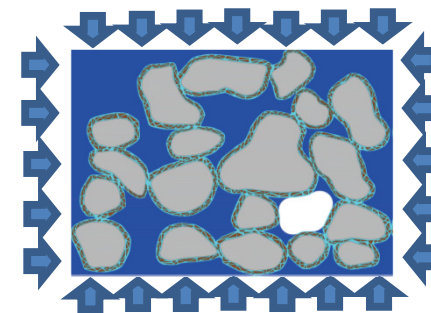
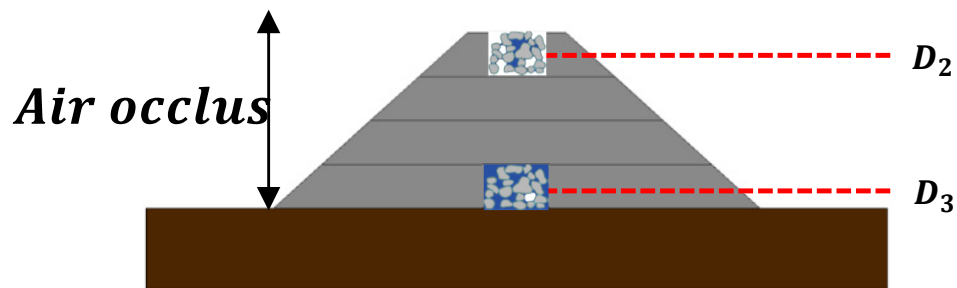


Domaines de saturation et sols compactés

Exemple d'application : le cas des remblais



D_2



D_3

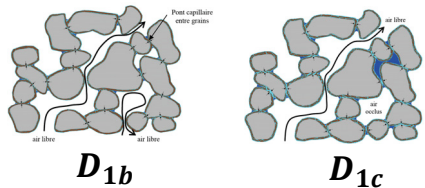
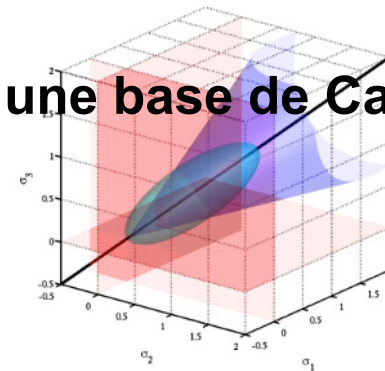
Présentation du modèle théorique

Modèle en contrainte effective

$$\sigma' = \sigma - [u_a - \chi(u_a - u_w)]$$

Bishop (1962)

sur une base de Cam Clay

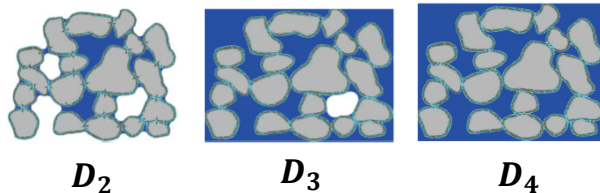


$$\chi = \left(\frac{s_{air}}{s} \right)^\gamma$$

Khalili (1998), Dubreucq (2019)

Ecrouissages Volumique et Capillaire

$$p'_c = f(s, e)$$



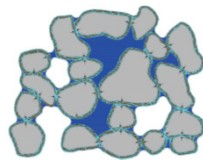
$$\chi = 1$$

Ecrouissage Volumique

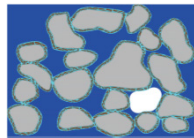
$$p'_c = f(e)$$

Présentation du modèle théorique

Utilisation d'un fluide équivalent



D_2



D_3



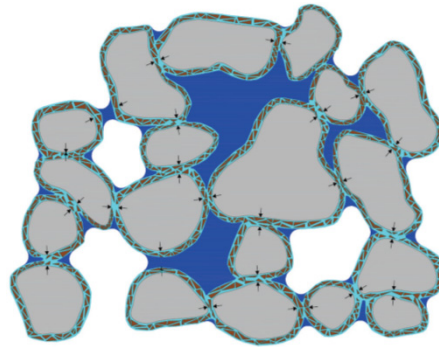
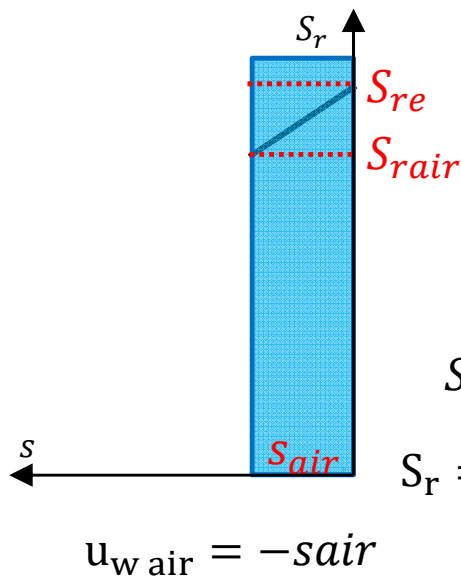
$$c_f = \frac{1}{\rho_f} \frac{d\rho_f}{du_w}$$

$$c_f = \frac{1}{\boxed{S_r}} \frac{dS_r}{du_w} + c_w$$

Présentation du modèle théorique

Relation $S_r(u_w)$ dans le domaine de l'air occlus

Domaine
D2



$$S_r = f(s, s_{air}, S_{rair}, S_{re})$$

$$S_r = S_{re} - \frac{u_w}{u_{w \text{ air}}} (S_{re} - S_{r \text{ air}})$$

Domaine
D3

$$\frac{M_a}{M_w} = C_{ste}$$

$$+ \text{ Air} = \text{Air}_{libre} + \text{Air}_{dissous}$$

$$+ \text{ Loi de Henry}$$

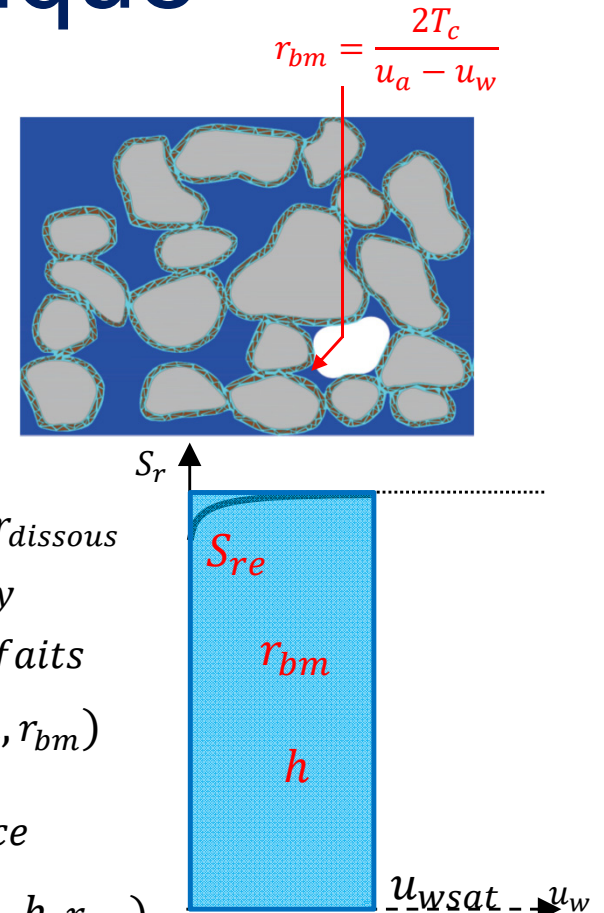
$$+ \text{ Loi des gaz parfaits}$$

$$\Rightarrow S_r = f(u_a, S_{re}, h, r_{bm})$$

$$+ \text{ Loi de Laplace}$$

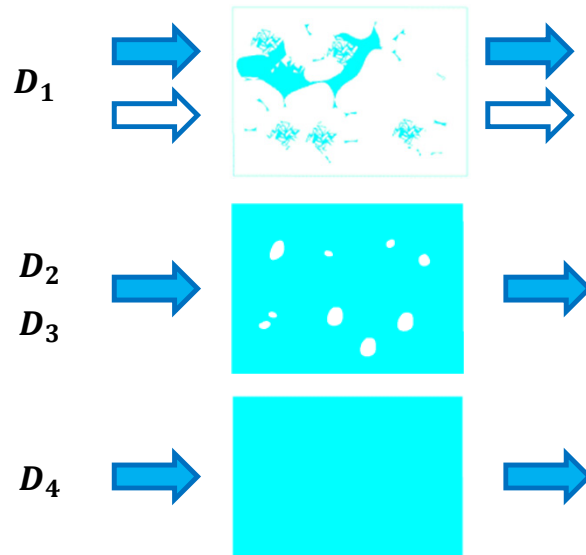
$$\Rightarrow S_r = f(u_w, S_{re}, h, r_{bm})$$

$$S_r = \frac{1}{1 - h + \left(\frac{1 - S_{re} + h S_{re}}{S_{re}} \right) \left(\frac{P_{atm} - u_{wg}}{u_w + \frac{2T_c}{r_{bm}} + P_{atm} - u_{wg}} \right)}$$



Présentation du modèle théorique

Loi de transport : Darcy



$$q_a = -K_a \cdot \text{grad}(H_a)$$

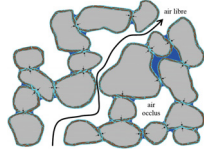
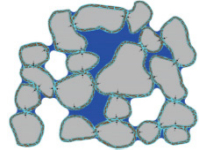
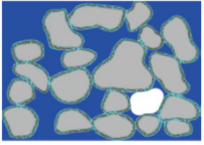
$$q_w = -K_w \cdot \text{grad}(H_w)$$

$$q_f = -K_f \cdot \text{grad}(H_f)$$

$$q_w = -K_w \cdot \text{grad}(H_w)$$

Présentation du modèle théorique

Intégration du modèle dans un code de calcul

	Phases	Loi de comportement	Contrainte effective	Compressibilité du fluide
D_1 	- Squelette - Eau - Air	Loi élasto-plastique : - Ecrouissage Volumique - Ecrouissage capillaire	$\sigma' = \sigma - [u_a - \chi(u_a - u_w)]$ $\chi < 1$	$c_w = cste$ c_a
D_2 	- Squelette - Fluide équivalent	Loi élasto-plastique : Ecrouissage Volumique	$\chi = 1$	$c_f = f(S_r)$
D_3 				

Possibilité d'utiliser logiciels courant de l'ingénierie

Présentation du modèle théorique

Application analytique:

$$\Delta u_w = B \Delta \sigma_v$$

$$B = \frac{\int_{\sigma_{v_ini}}^{\sigma_{v_final}} B_t d\sigma_z}{\sigma_{v_final} - \sigma_{v_ini}}$$

$$B_t = \frac{1}{1 + E_{oedo} \frac{e}{1 + e} c_f}$$

$$E_{oedo} = \frac{(1 + e) p' \ln(10)}{C_x}$$

$$c_f = f(S_r) \quad S_r = f(u_w)$$

Etudes de cas: champs d'application

Essais de laboratoire:

modélisation d'essais (oedomètres, mesures de B au triaxial)

Remblais:

Estimation du tassement non drainé / drainé

Barrages:

Estimation des montées de pressions interstitielles

Déblais:

Estimation du gonflement non drainé/ drainé

Exemples traités:

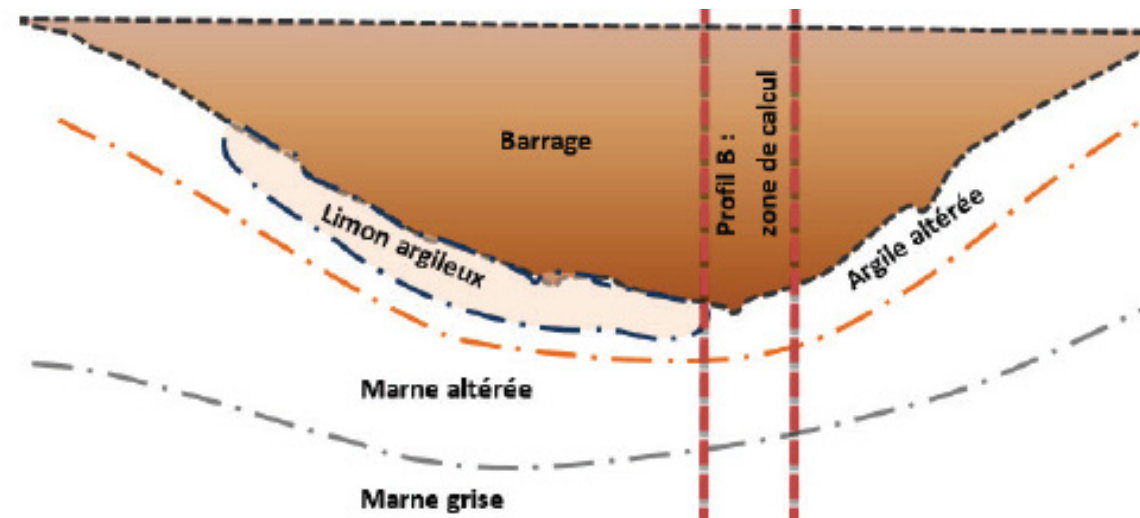
Digues du Rhône - LGV Rhin-Rhône - Barrage d'Aratozawa -
Barrage de Mirgenbach – A304

- Barrage construit au début des années 80
- Barrage homogène en argile
- Hauteur de 22m
- Présence d'un filtre cheminée et d'un tapis drainant



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Matériaux:



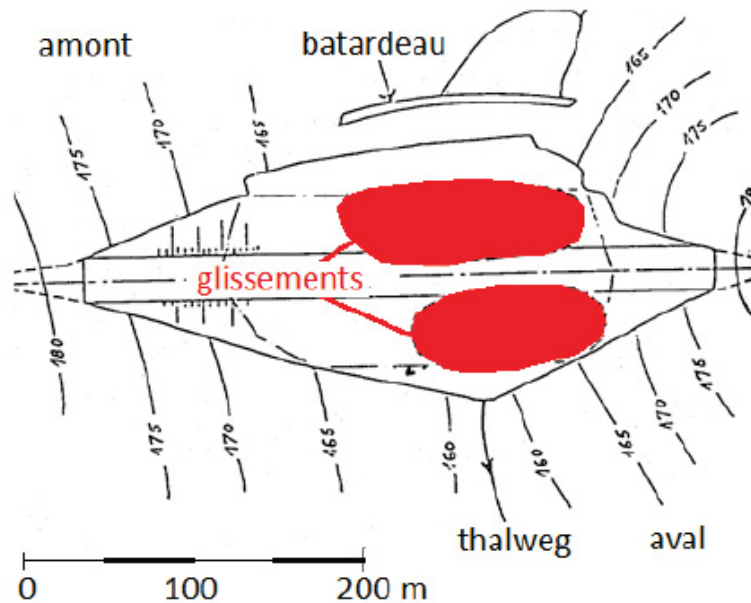
Couche	Y_d [kN/m ³]	Y_s [kN/m ³]	Y_h [kN/m ³]	Y_{sat} [kN/m ³]	w_{sat} [%]	IP [%]	e	C_u [kPa]	σ'_p [kPa]	C_c	C_s
Limon argileux	16,2	27	20,3	20,3	25 %	20	0,67	40	240	0,136	0,005
Argile altération	16,6	27,4	20,4	20,5	24 %	29	0,65	120	310	0,155	0,06
Marne altérée	18,6	26,5	21,5	21,8	16 %	–	0,42	–	1000	0,15	0,04
Marne compacte	20,3	26,5	22,5	22,8	12 %	–	0,31	–	–	–	–

Couche	Y_s kN/m ³	Y_{dOPN} kN/m ³	w_{OPN} [%]	IP [%]	w_L [%]	ϕ' [°]	C_c	C_s
Argile remblai	26,9	16,1	22,5	30	50	21	0,205	0,06

Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Historique:

- 25 aout 1982: Glissement circulaire sur le parement Amont
- 11 septembre 1982: Glissement circulaire sur le parement Aval
- Hauteur du barrage: 18,5m / 22m



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Objectifs de la Modélisation:

- Modéliser la construction du barrage et la montée de pression interstitielle
- Reproduire les causes possibles de la rupture

Démarche de la Modélisation:

Loi de comportement

$$\lambda \quad \kappa \quad M \quad N_0 \quad p'_c$$

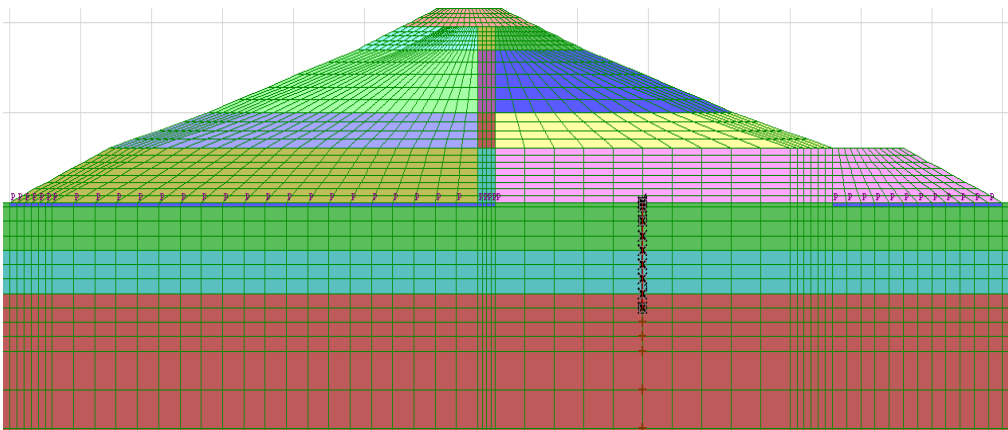
Etat initial

$$s \quad \sigma'_v \quad \sigma'_h$$

Paramètres

quasi – saturés

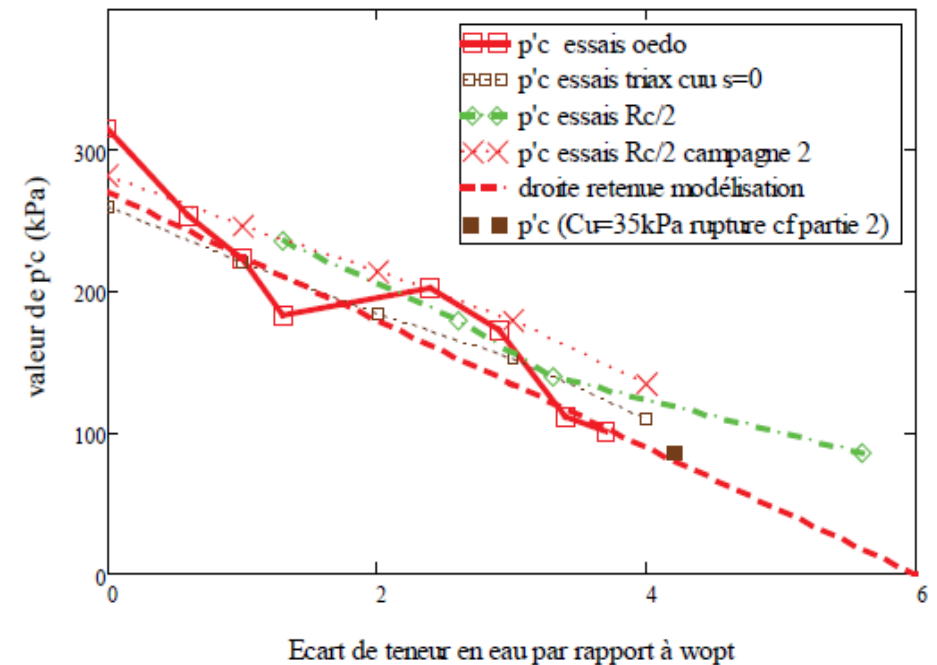
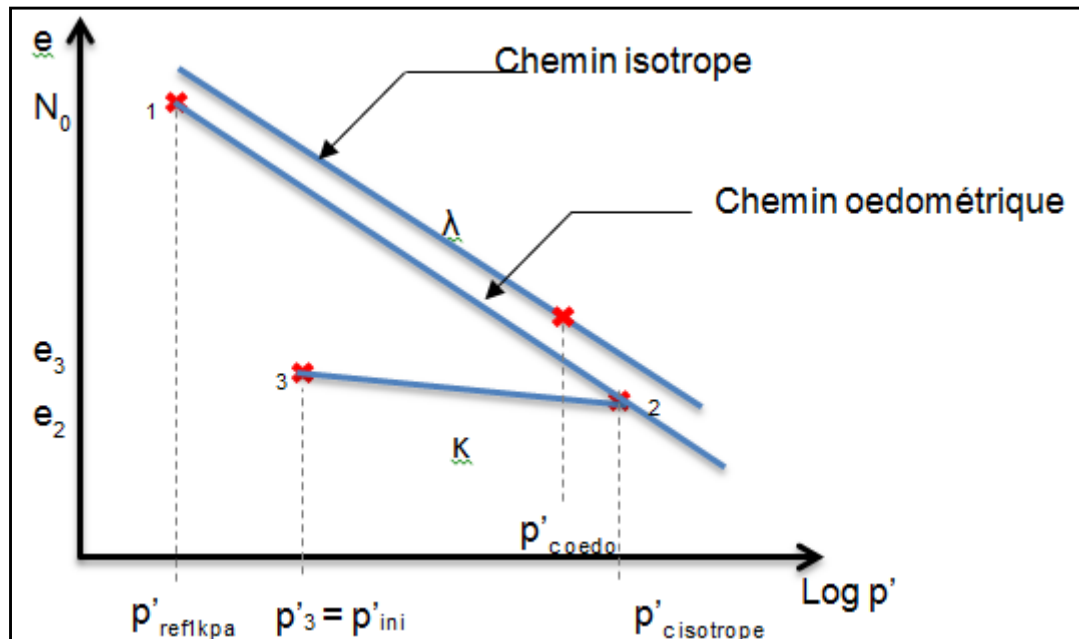
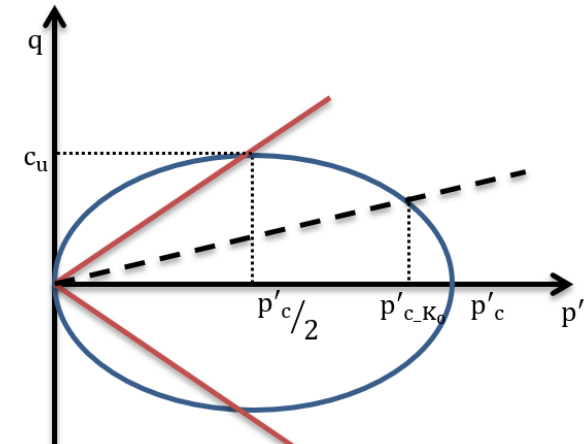
$$S_{r \text{ air}} \quad S_{\text{air}} \quad S_{re} \quad h \quad r_{bm}$$



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Loi de comportement:

λ κ N_0 p'_c M



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Calage des paramètres:

Etat initial:

$$s \quad \underbrace{\sigma'_v \quad \sigma'_h}_{K_0}$$

Succion initiale:

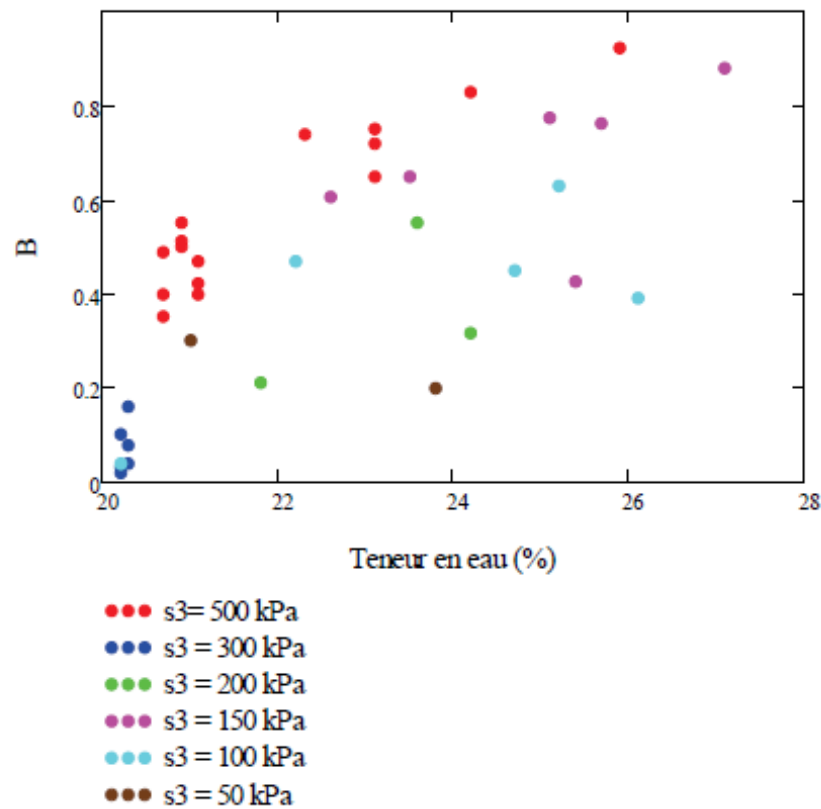
→ calage à partir d'essais de compression isotrope disponibles

Coefficient K_0 :

→ Valeur fixée à 1,5 d'après REX planche de compactage A10

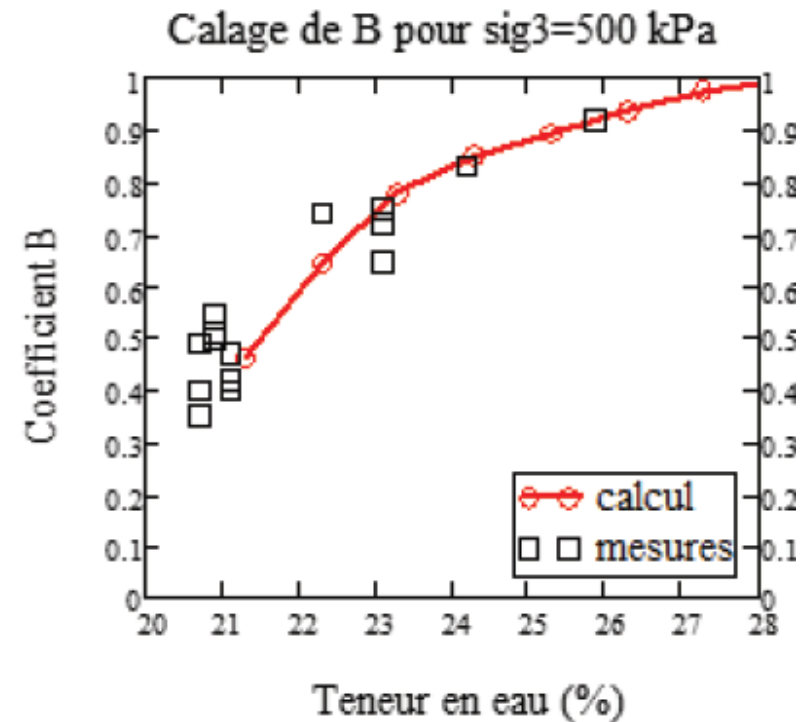
Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Calage des paramètres:



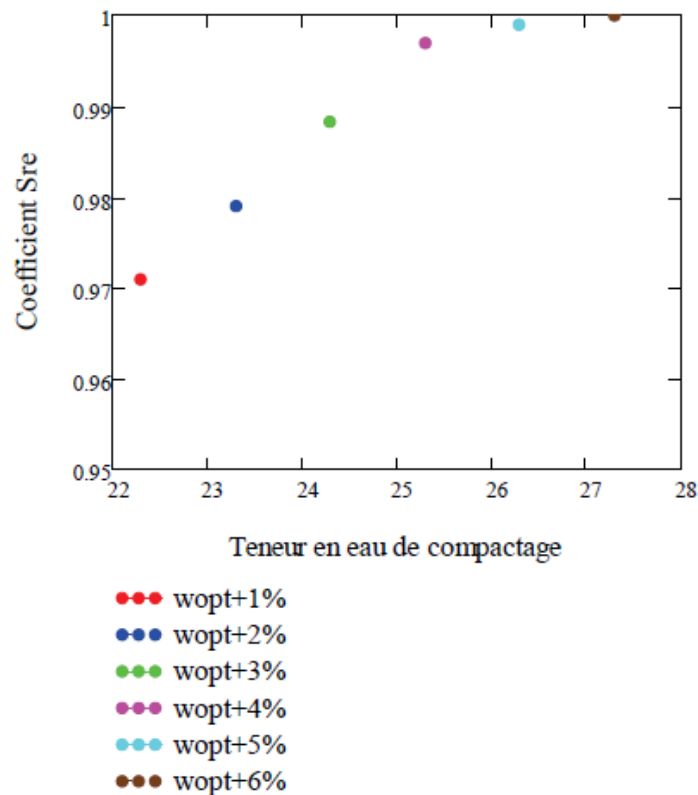
Paramètres quasi-saturés:

$$S_{rair} \quad s_{air} \quad S_{re} \quad h \quad r_{bm}$$



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Calage des paramètres:



Paramètres quasi-saturés:

$$S_{rair} \quad s_{air} \quad S_{re} \quad h \quad r_{bm}$$

$$S_{rair} = 93,5 \% \quad s_{air} = 65 \text{ kPa}$$

$$h = 0,02 \quad r_{bm} = 4 \mu\text{m}$$

$$\text{WOPN} + 1,3 \% :$$

$$S_{re} = 97,4 \%$$

$$\text{WOPN} + 1,6 \% :$$

$$S_{re} = 97,5 \%$$

$$\text{WOPN} + 4,2 \% :$$

$$S_{re} = 99,8 \%$$

$$\text{WOPN} + 1,3 \% :$$

$$u_{w \text{ ini}} = -42,7 \text{ kPa}$$

$$\text{WOPN} + 1,6 \% :$$

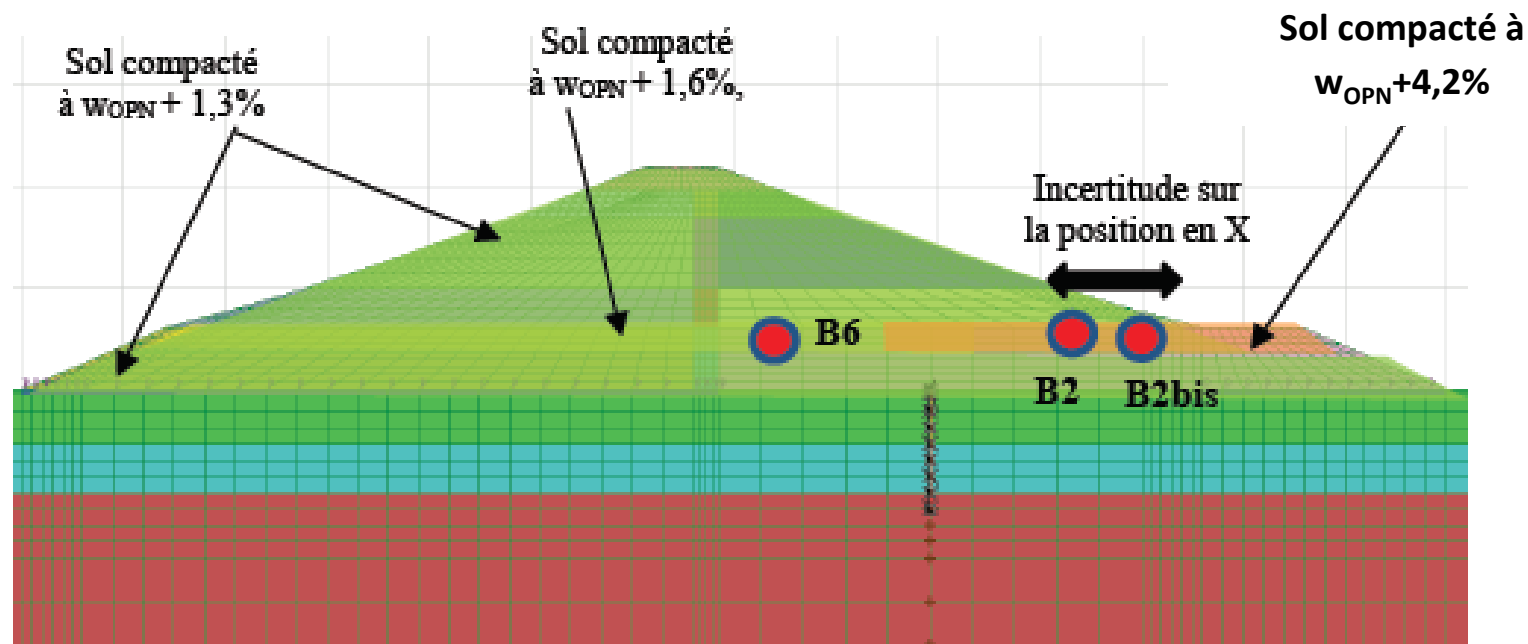
$$u_{w \text{ ini}} = -40,5 \text{ kPa}$$

$$\text{WOPN} + 4,2 \% :$$

$$u_{w \text{ ini}} = -23,6 \text{ kPa}$$

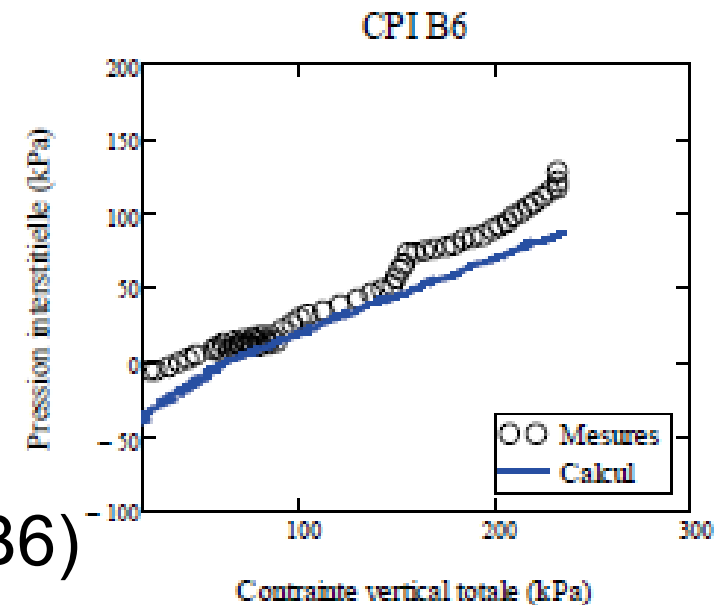
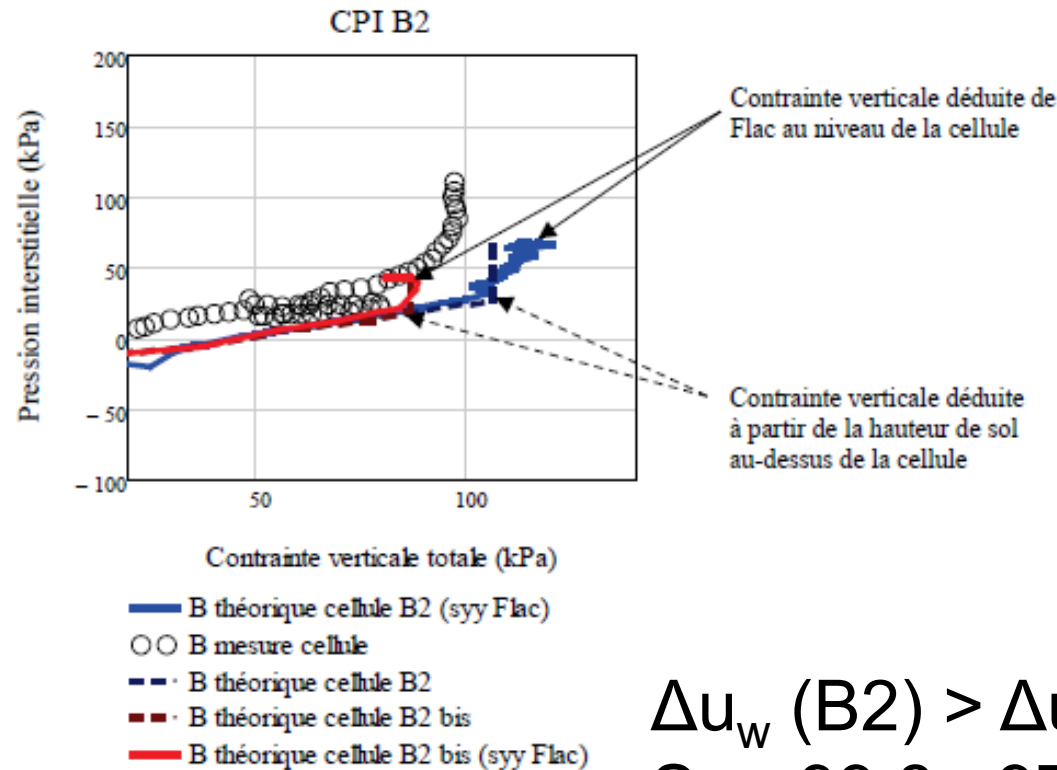
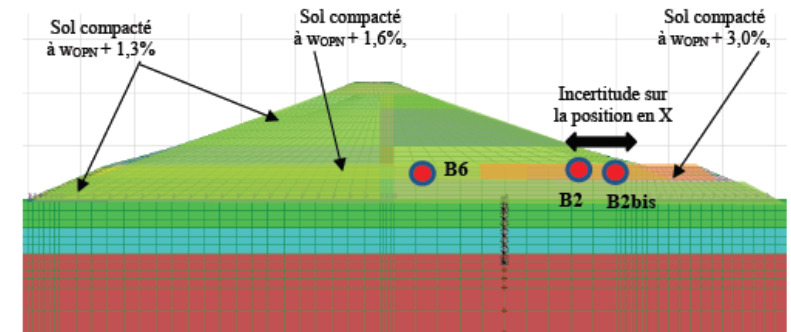
Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Choix des teneurs en eau de compactage:



Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Résultats:

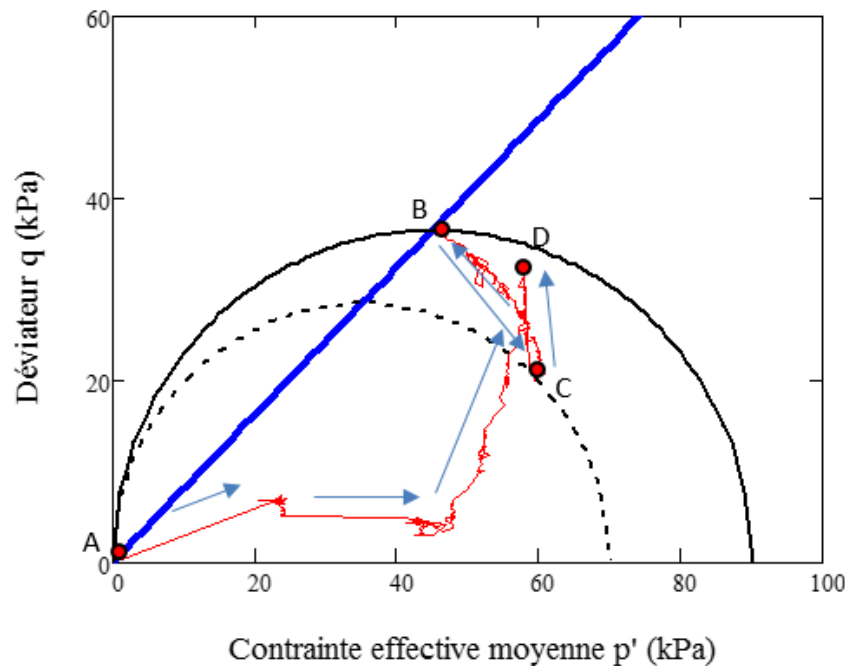


$$\Delta u_w (B2) > \Delta u_w (B6)$$

$$S_{re} : 99,8 > 97,4$$

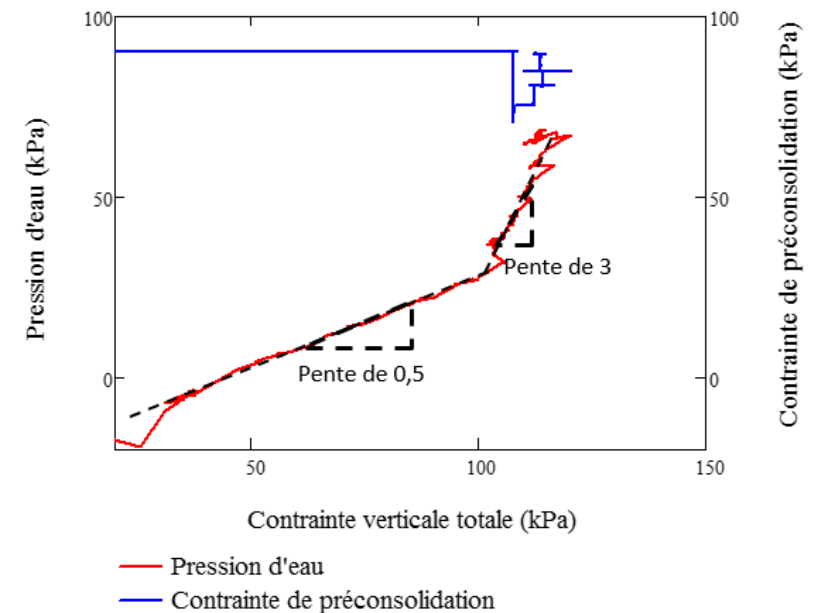
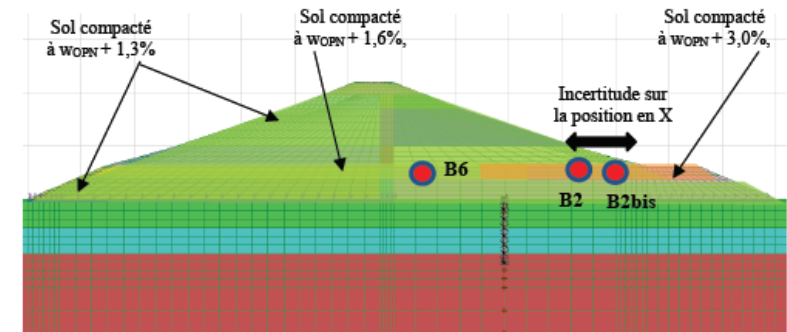
Etudes de cas: Barrage de Mirgenbach

Résultats:



- Résultats du calcul cellule B2
- Critère de rupture
- Ellipse initiale $p'_c=90\text{kPa}$
- Ellipse minimale $p'_c=70\text{kPa}$

A $\Rightarrow$ B : Chargement élastique
 B : Rupture
 B $\Rightarrow$ C : Anti-écrouissage
 C $\Rightarrow$ D : écouissage



Conclusions et perspectives

- Modèle facilement utilisable dans des codes calculs
- Modèle compatible avec différentes lois de comportement
- Bonne estimation des phénomènes non drainés (montée de pression interstitielle et déformations)
- Modèle qui peut être calé avec des essais standards
- Etudes de cas à poursuivre

Merci de votre attention...

