

Thème B : Critères de conception et de justification  
des fondations : modélisations et calculs

## Génération de pression interstitielle dans les barrages en remblai : retour d'expérience et méthodes d'analyses

L. BOUTONNIER - EGIS

D. MAHMUTOVIC - EGIS

J-J. FRY - EDF

Colloque CFBR – Fondations des Barrages  
8 et 9 avril 2015 – Chambéry



# SOMMAIRE

## **1. Détermination des coefficients $R_u$ et $B$**

Mesures en laboratoire

Méthodes de calcul traditionnelles

## **2. Nouvelle approche du calcul de la génération de pression en construction**

Description du modèle

## **3. Application au calcul de la génération de pression interstitielle au sein des couches de fondation du barrage de Mirgenbach**

Description du barrage, de sa fondation et du dispositif d'instrumentation en place

Paramètres du modèle

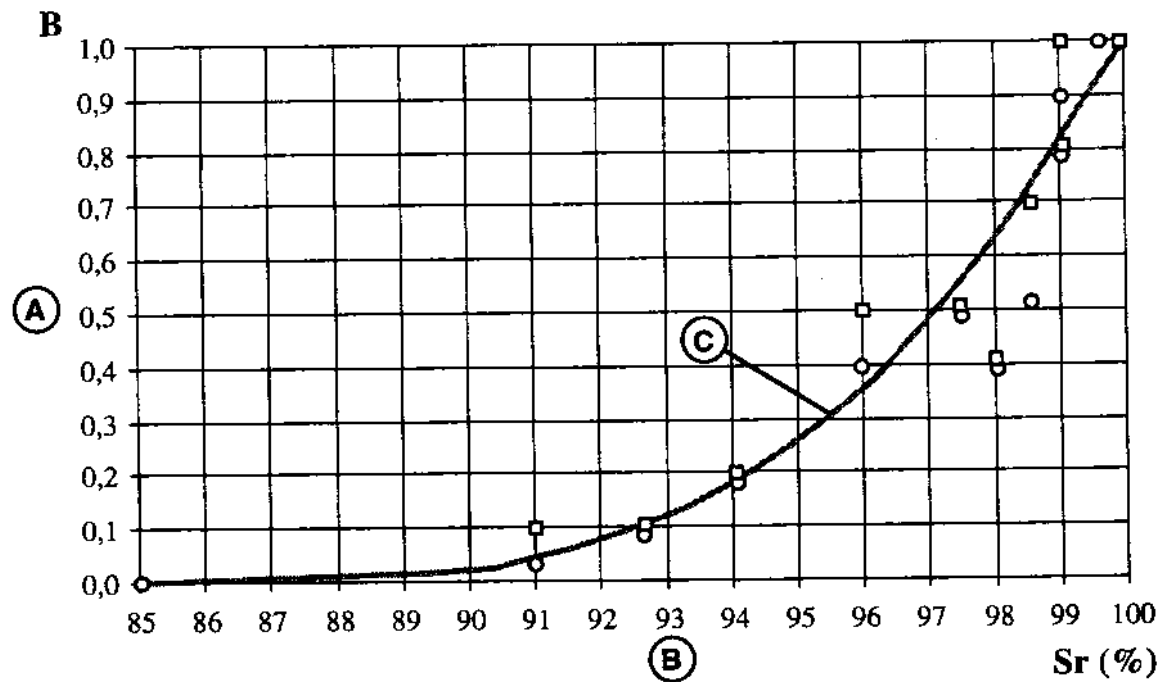
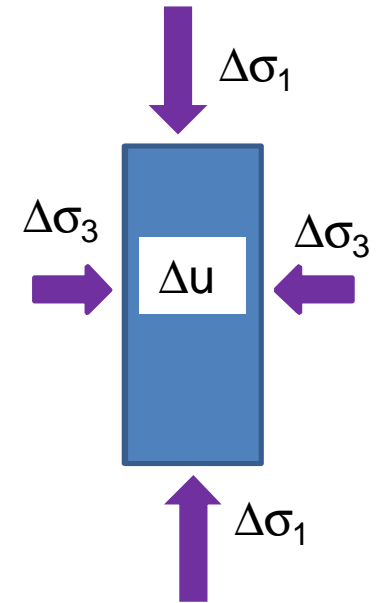
Application du modèle

## **4. Conclusions et perspectives**

# Mesure des coefficients A et B en labo

## 1. Détermination des coefficients B et A en laboratoire:

Précis mais  
Long et couteux  
Exemple : Mirgenbach

$$\Delta u = B[\Delta\sigma_3 + A.\Delta(\sigma_1 - \sigma_3)]$$


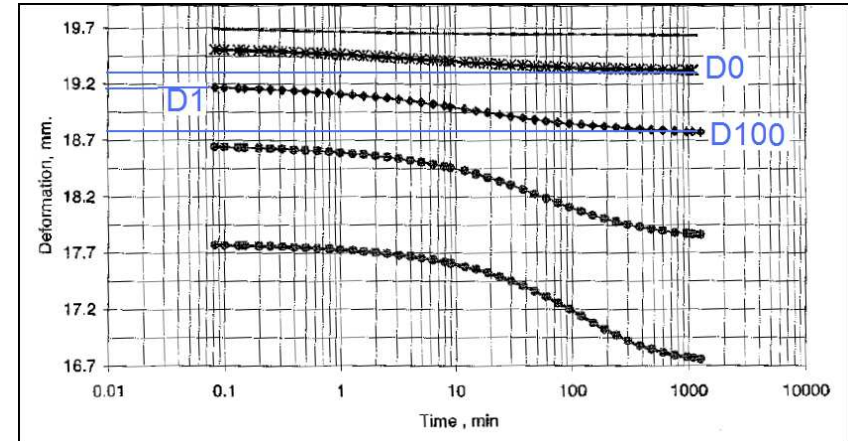
# Mesure du coefficients Ru en labo

## 2. Avec un oedomètre classique

courbe de tassement en fonction du temps

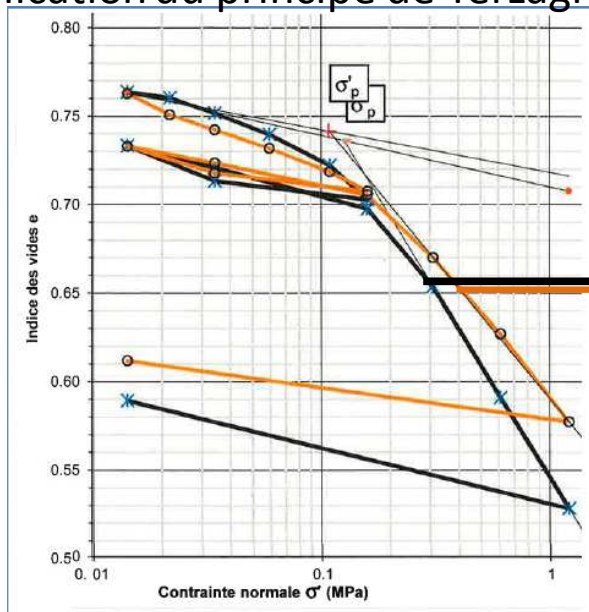
$$R_u = \frac{u}{\gamma h}$$

$$R_u = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_v} = \frac{D_{100} - D_1}{D_{100} - D_0} = \frac{E \Delta u}{E \Delta \sigma_v}$$



## 3. En comparant un oedomètre classique à un oedomètre non drainé

Application du principe de Terzaghi: à indice des vides constant:  $\sigma = \sigma' + u$



$\sigma$ (kPa)	$\sigma'$	$u = \sigma - \sigma'$	$r_u$
120	120	0	0,00
200	170	30	0,15
400	310	90	0,23
600	410	190	0,32



# Méthodes traditionnelles de calcul des coefficients $R_u$ et $B$

## ▪ Rappel des méthodes existantes

- Méthode USBR (dite de Hilf)

$$R_u = \frac{1}{1 + \frac{(1 - S_{r0} + h \cdot S_{r0}) \cdot n_0}{(P_{atm} + \Delta u_{air}) \cdot m_v}}$$

La variation de volume est due à la variation de volume d'air

La pression d'eau est égale à la pression d'air

Seulement sur chemin oedométrique

- Méthode de Bishop

$$R_u = \frac{B(K_0 + A(1 - K_0))}{1 - B(1 - A)(1 - K_0)}$$

Nécessite un nombre élevé d'essais triaxiaux pour déterminer  $A$  et  $B$  + définition  $K_0$  (NC ou OC)

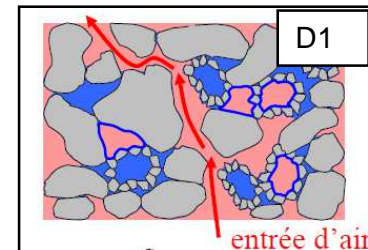
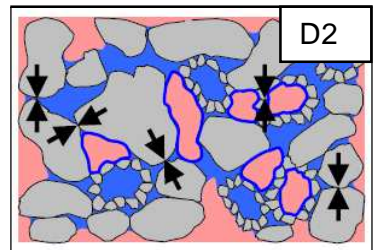
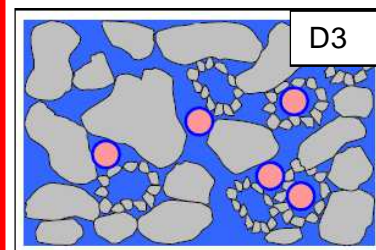
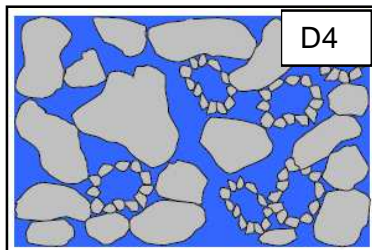
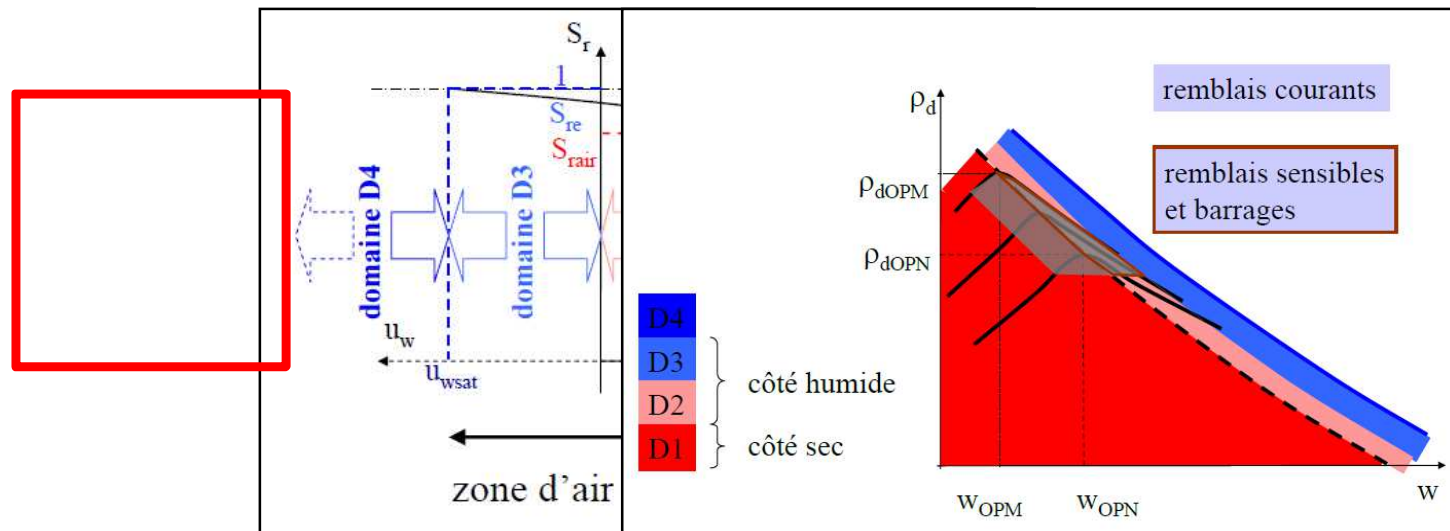
- Méthode de Skempton

$$B = \frac{1}{1 + n \frac{C_v}{C_s}}$$

Introduire en plus la variation de la compressibilité du fluide interstitiel

# Nouveau modèle de calcul

- **Nouvelle méthode proposée (Boutonnier 2007, 2010)**
  - Décomposition du sol en 4 domaines de saturation
    - ❖ Transposition possible sur les essais laboratoires et les ouvrages en terre



# Nouveau modèle de calcul

- Nouvelle méthode proposée (Boutonnier 2007, 2010)**
  - Une relation degré de saturation en fonction de  $u_w$  pour chaque domaine de saturation

$S_r = 1$

**Domaine quasi-saturé**

$$S_r = \frac{1}{1 - h + \left( \frac{1 - S_{re} + h \cdot S_{re}}{S_{re}} \right) \cdot \left( \frac{s_{bm} + p_a - u_{wg}}{u_w + s_{bm} + p_a - u_{wg}} \right)}$$

Paramètres

~~$S_{re}$~~   
 ~~$S_{rair}$~~   
 ~~$S_{air}$~~   $\rightarrow \alpha$   
 $r_{bm}$   
 $h$

$$S_r = S_{re} - u_w \frac{(S_{re} - S_{rair})}{u_{wair}} = \alpha$$

$$S_r = \left( \frac{s}{S_{air}} \right)^{-\gamma} S_{rair}$$

# Nouveau modèle de calcul

- **Nouvelle méthode proposée (Boutonnier 2007, 2010)**

- Prédiction du coefficient  $B_t$  à l'aide du coefficient de compressibilité du fluide dans les domaines quasi-saturés

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

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

$$B = \frac{\Delta u_w}{\Delta \sigma_z} = \frac{u_{w\_fin} - u_{w\_ini}}{\sigma_{z\_fin} - \sigma_{z\_ini}} = \frac{\int_{\sigma_{z\_ini}}^{\sigma_{z\_fin}} B_t d\sigma_z}{\sigma_{z\_fin} - \sigma_{z\_ini}}$$

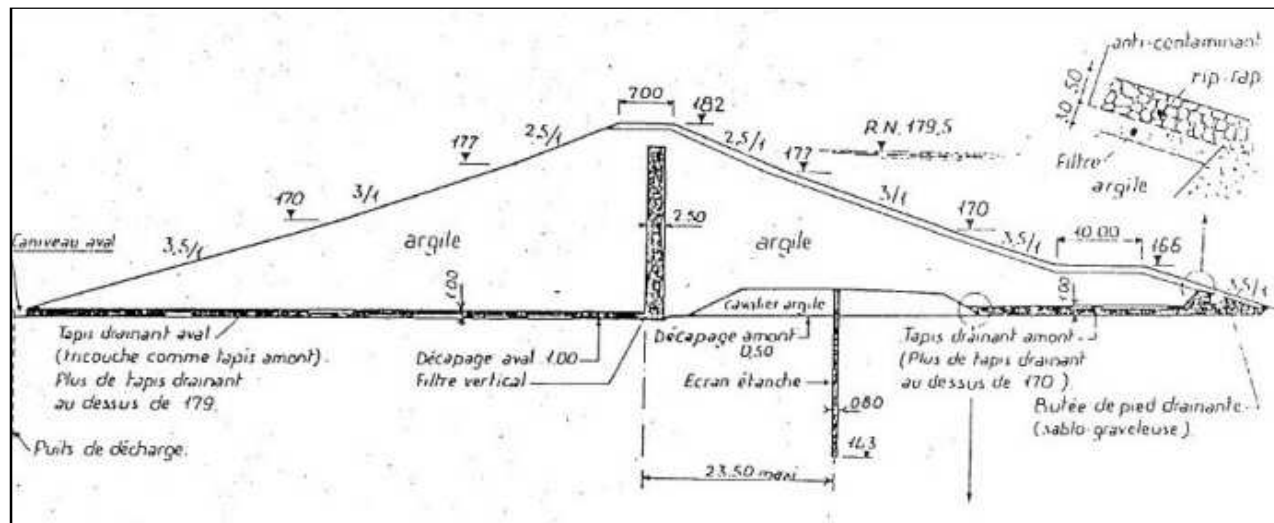
$$R_u = \frac{u_w}{\sigma_z} = \frac{u_{w\_ini} + B(\sigma_{z\_fin} - \sigma_{z\_ini})}{\sigma_{z\_fin}}$$



# Application au barrage de Mirgenbach

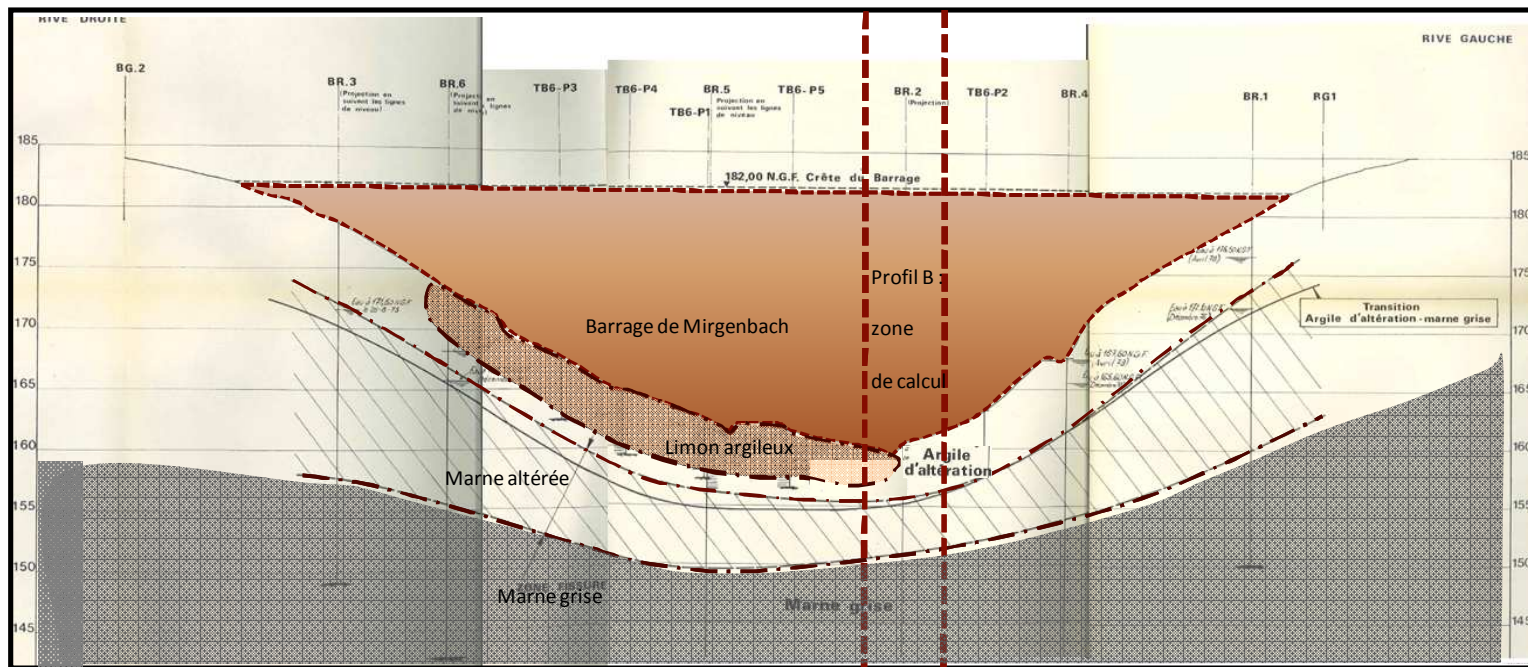
## ■ Description du barrage

- Barrage construit au début des années 80
- Barrage homogène en argile (H=22m 1982)
- Présence d'un filtre cheminée et d'un tapis drainant



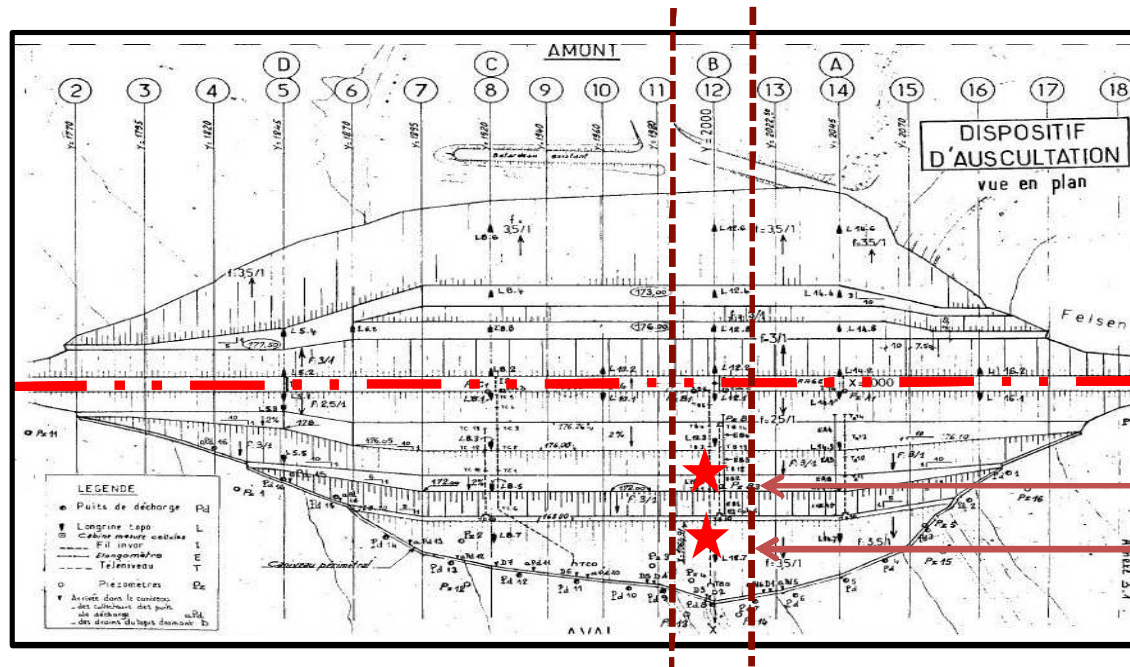
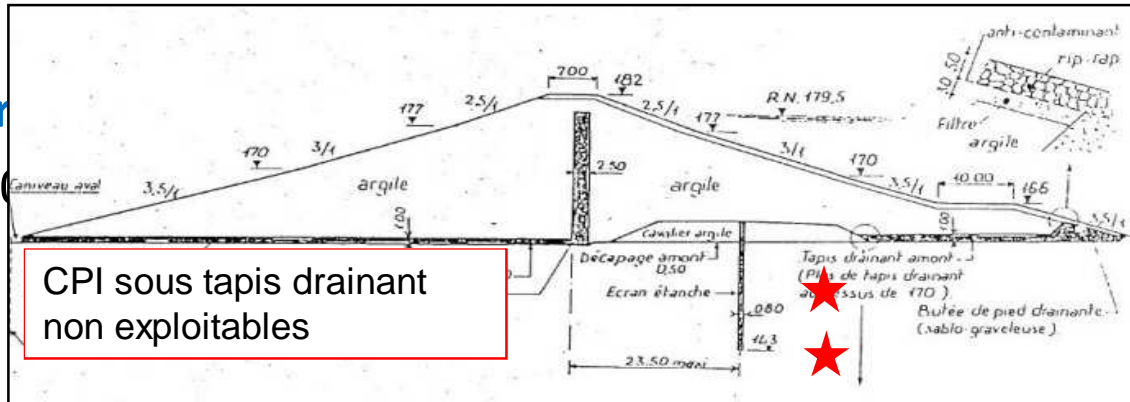
# Application au barrage de Mirgenbach

- **Description de la géologie du site et des fondations du barrage**
  - Barrage homogène en argile (H=22m 1982)
  - Couverture d'argile et de limon d'altération ( $10^{-9}$  -  $10^{-10}$  m/s)
  - Couche de marne décomprimée, fissurée et altérée sur 5 à 10 m d'épaisseur très perméable ( $10^{-5}$  m/s)
  - Substratum en marne grise étanche sur plus de 30 m d'épaisseur



# Application au barrage de Mirgenbach

- Description
- 8



Axe du barrage

2 CPI installées en couche de fondation et exploitables pour notre analyse

Profil B étudié

# Application au barrage de Mirgenbach

## ■ Paramètres du modèle

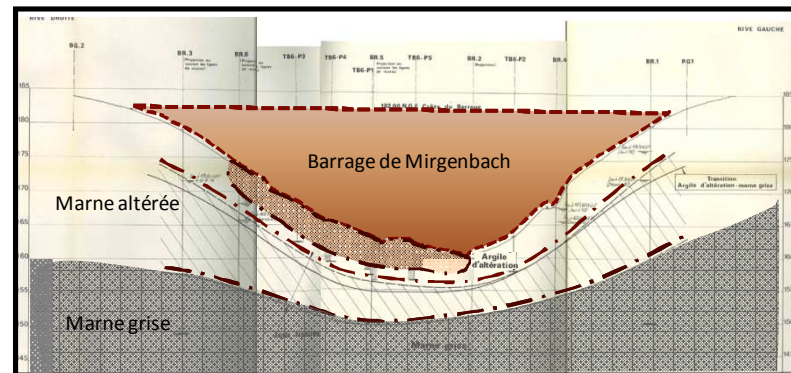
- Paramètres mécaniques des différentes couches de fondation

Couche	$\gamma_d$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_h$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$w_{sat}$ [%]	IP	e	$C_u$ [kPa]	$\sigma'_p$ [kPa]	$C_c$	$C_s$
Limons argileux	16,2	27	20,3	20,3	25%	20	0,67	40	(*)	0,136	0,005
Argile altération	16,6	27,4	20,4	20,5	24%	29	0,65	120	(*)	0,155	0,06
Marnes altérées	18,6	26,5	21,5	21,8	16%	-	0,42	-	-	(**)	(**)
Marnes compactes	20,3	26,5	22,5	22,8	12%	-	0,31	-	-	-	-

Sol	Limon argileux	Argile d'altération
$\sigma'_p = C_u/0,35$	114 kPa	343 kPa

- Paramètres retenus pour le quasi-saturé à partir d'une base de données sur ce type de sol

Paramètre	$S_{re}$	rbm [ $\mu\text{m}$ ]	alpha
moyenne	0.96	2	5,00E-05
Minimum	0.91	1	1,80E-05
Maximum	0.99	5	9,00E-05
Nombre d'essais oedométriques	18	18	20

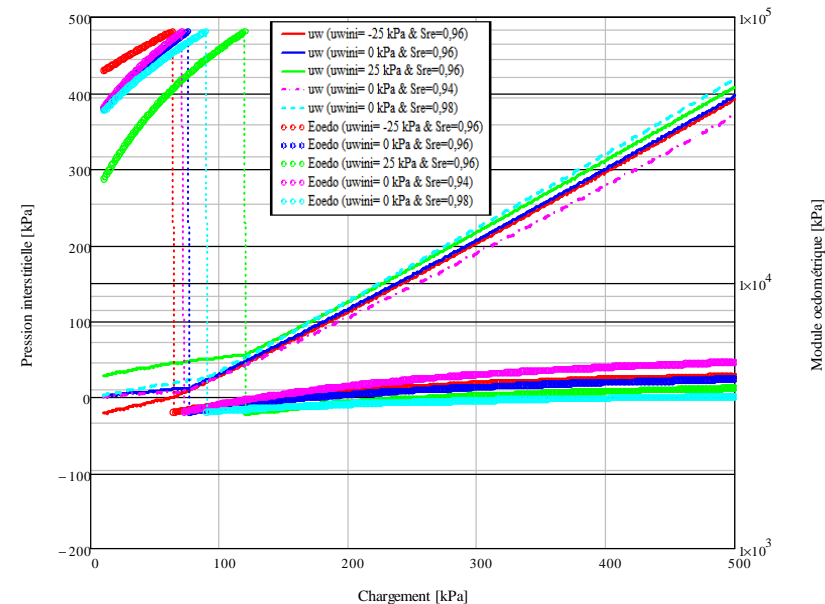
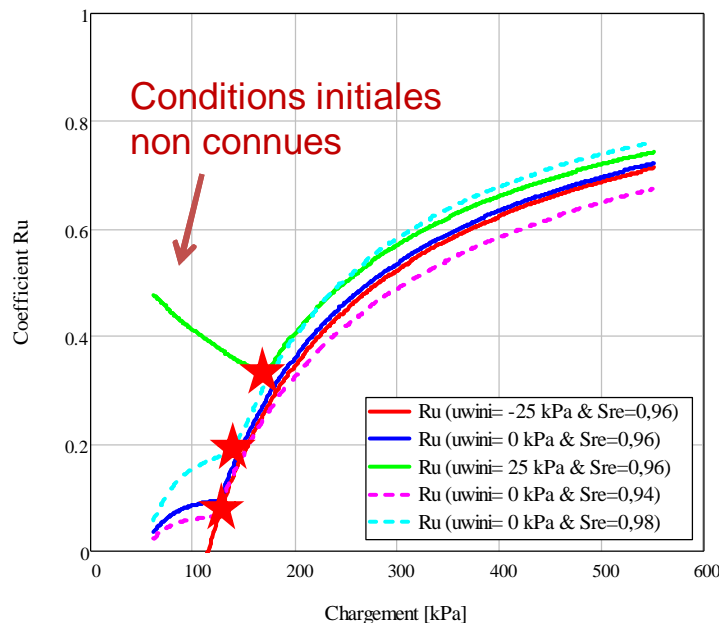


# Application au barrage de Mirgenbach

## Application du modèle à la couche de limon

- Calcul du coefficient  $R_u$ , de la pression interstitielle et du module oedométrique au sein de la couche de limon au cours de la montée du barrage

★ Limite NC/OC



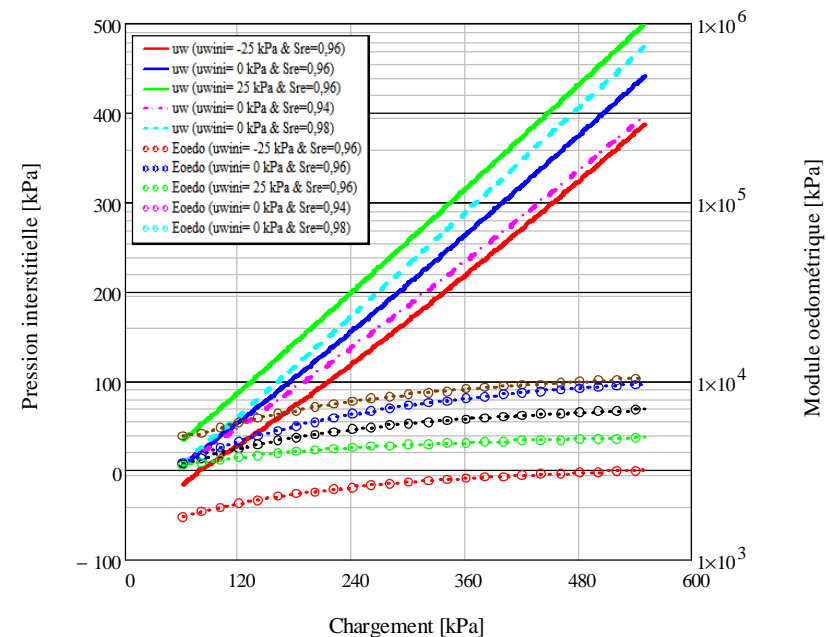
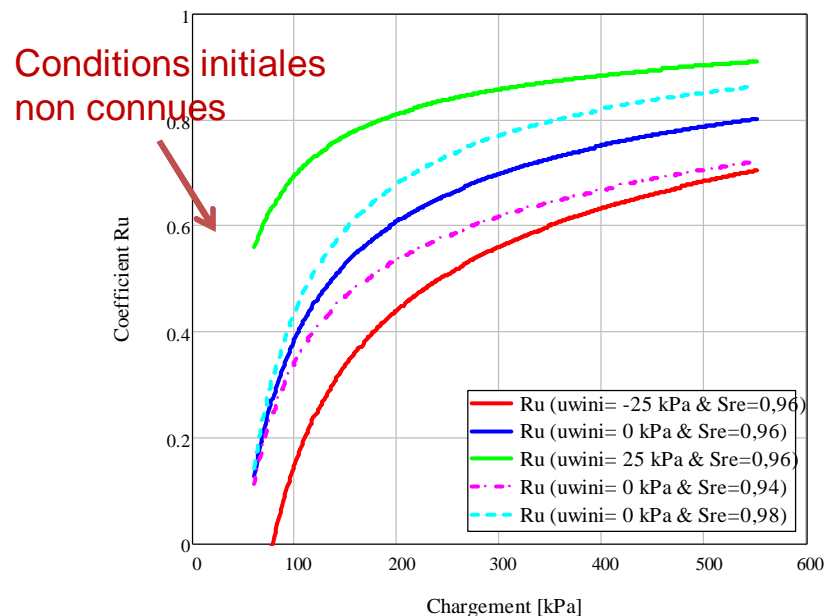
- Aucune mesure expérimentale au sein de cette couche



# Application au barrage de Mirgenbach

## ■ Application du modèle à la couche d'argile

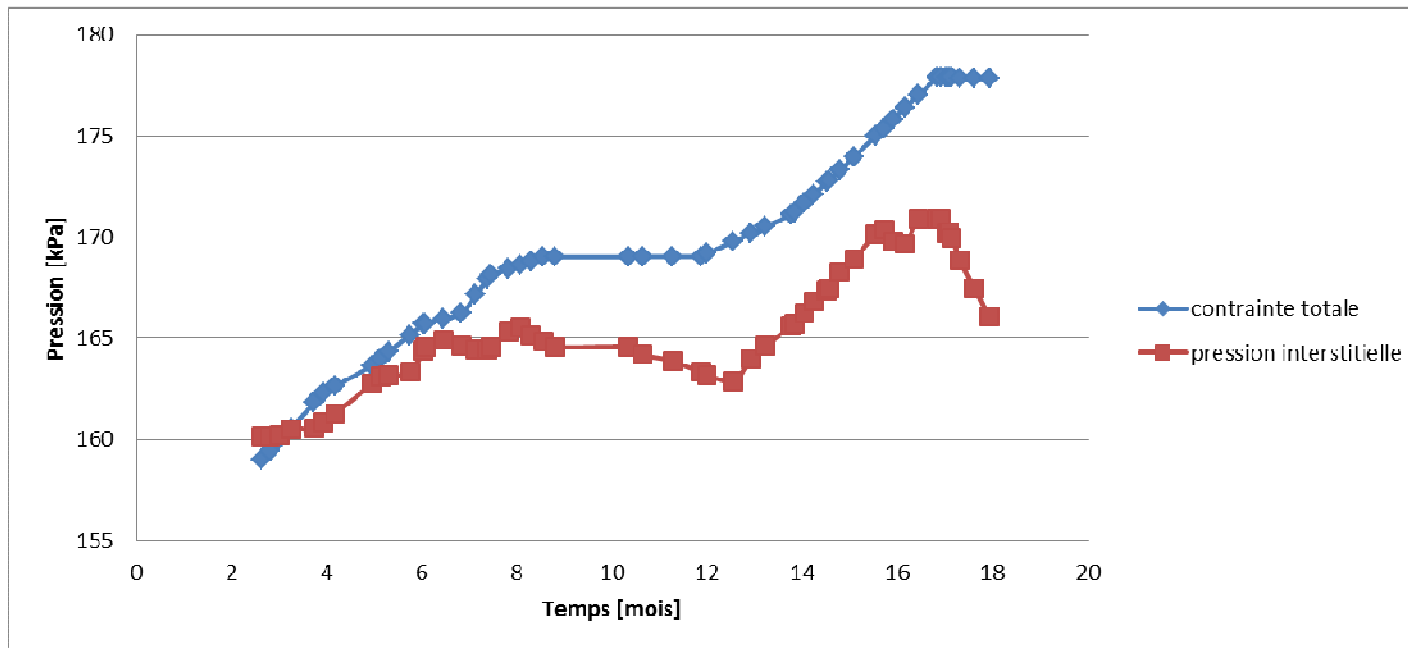
- Calcul du coefficient  $R_u$ , de la pression interstitielle et du module oedométrique au sein de la couche d'argile au cours de la montée du barrage



- Aucune mesure expérimentale au sein de cette couche

# Application au barrage de Mirgenbach

## ■ Application du modèle à la couche de Marne altérée



- Ru calculé 1er palier  $S_{re}=0.96$   $h=0$
- - - Ru calculé 1er palier  $S_{re}=0.94$   $h=0$
- - - Ru calculé 1er palier  $S_{re}=0.98$   $h=0$
- ..... Ru calculé 1er palier  $S_{re}=0.96$   $h=0.02$
- ◆◆◆ Ru 1er palier mesuré CPI

⌋ Période correspondant à une interruption des travaux

★ Conditions initiales connues

# Conclusions et perspectives

## ■ Conclusions

- Des mesures simples de pressions interstitielles avec l'oedomètre
- Développement d'un modèle de prise en compte de l'air complet
- Premiers résultats prometteurs de l'application à un cas réel : l'estimation des pressions interstitielles au sein des couches de fondation du barrage de Mirgenbach

## ■ Perspectives

- Application du modèle à d'autres exemples de barrages en terre (ou autres types d'ouvrages)

# MERCI