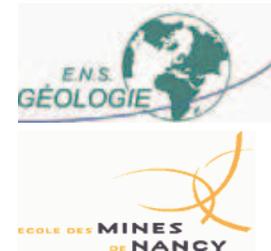


18 janvier 2007

Journée commune CFMS/CFGF : sècheresse géotechnique

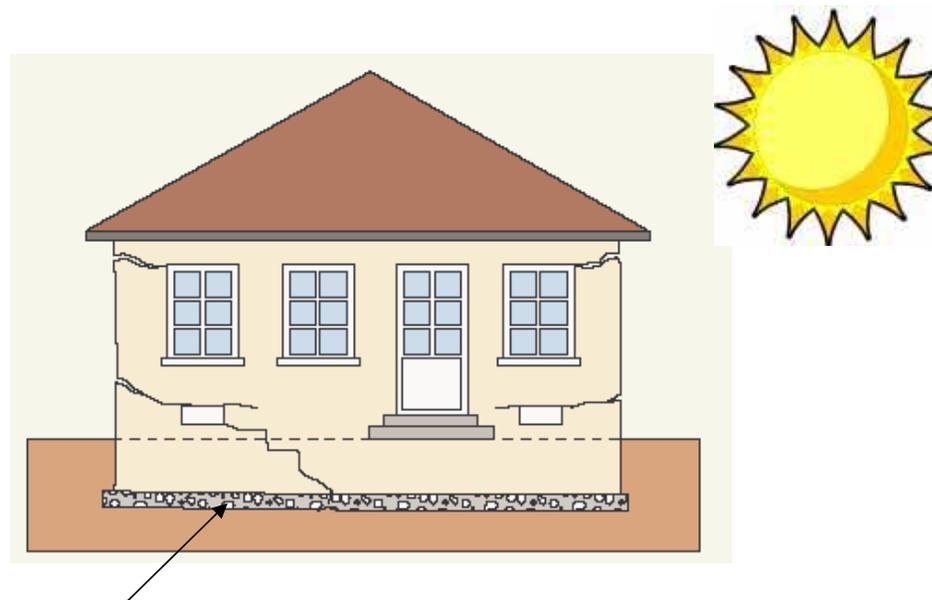


Modélisation des essais de
retrait-gonflement des sols argileux

F. MASROURI - Professeur

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

Comment **prédire** les variations volumiques d'un sol gonflant soumis à des cycles de sécheresse-pluie ?



Phénomènes d'interaction sol-structure

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Modélisation numérique du comportement hydromécanique du sol

Modèle conceptuel pour sols fins

- Saturés
- Non saturés
- Gonflants



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Modèles pour sols gonflants

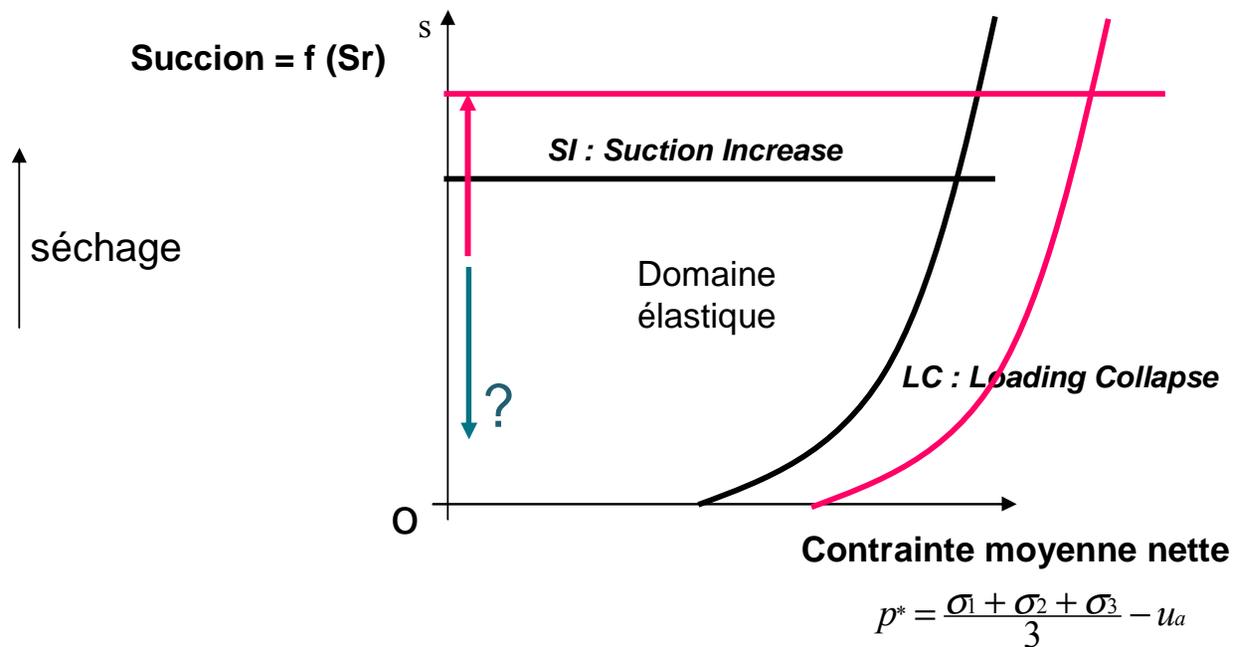
Modèle pour sols gonflants	Type de sol
Gens et Alonso (1992); Alonso <i>et al.</i> (1999) : <i>BExM</i>	Gonflants non saturés
Robinet <i>et al.</i> (1994, 1998, 1999)	Gonflants saturés
Cui <i>et al.</i> (2002)	Gonflants fortement compactés non saturés
Baudet et Stallebrass (2004)	Argiles naturelles saturés

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

- **Modèle pour sols fins non saturés gonflants**
 - Sols fins → Cam Clay
 - Non saturés → BBM (Barcelona Basic Model)
 - Gonflants → BExM (Barcelona Expansive Model)

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

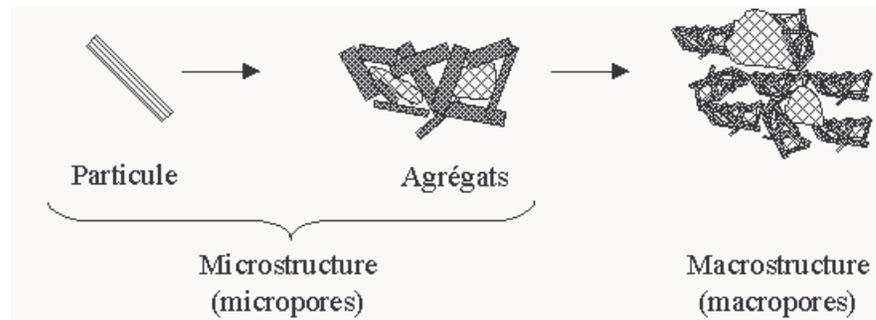
■ BBM (non saturé)



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Hypothèses de base du BExM

- Deux niveaux structuraux : macrostructure et microstructure

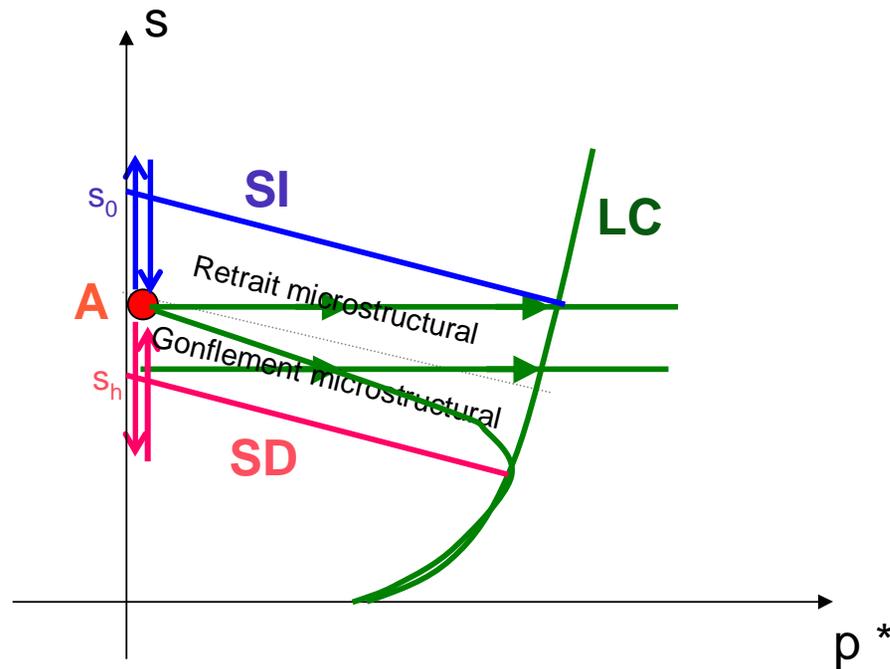


- Couplage micro / macro : $(\epsilon_{vm}^e) \rightleftarrows (\epsilon_{vM}^p)$
 - (ϵ_{vm}^e) : déformations élastiques microstructurales
 - (ϵ_{vM}^p) : déformations élastoplastiques macrostructurales
- Equilibre mécanique, hydrique et chimique micro / macrostructure

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ BExM

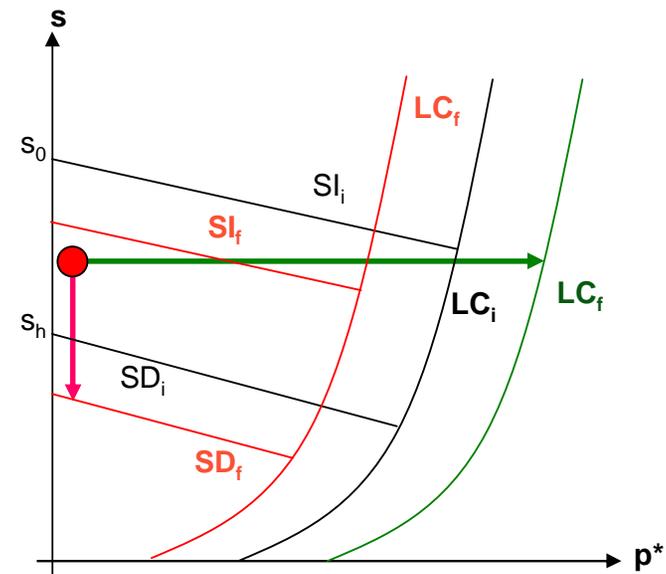
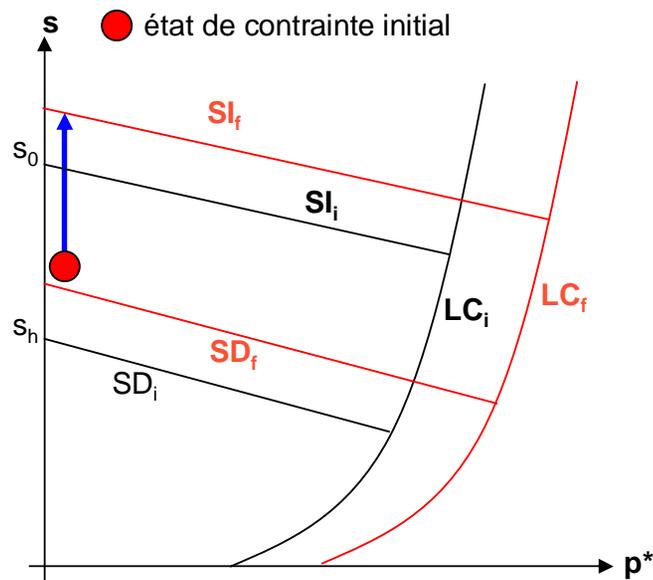
- Apparition des déformations irréversibles **en séchage** et **en humidification**
- Détermination de la courbe LC



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ BExM - Lois d'écroûissage

- Modification de la zone élastique en séchage et en humidification

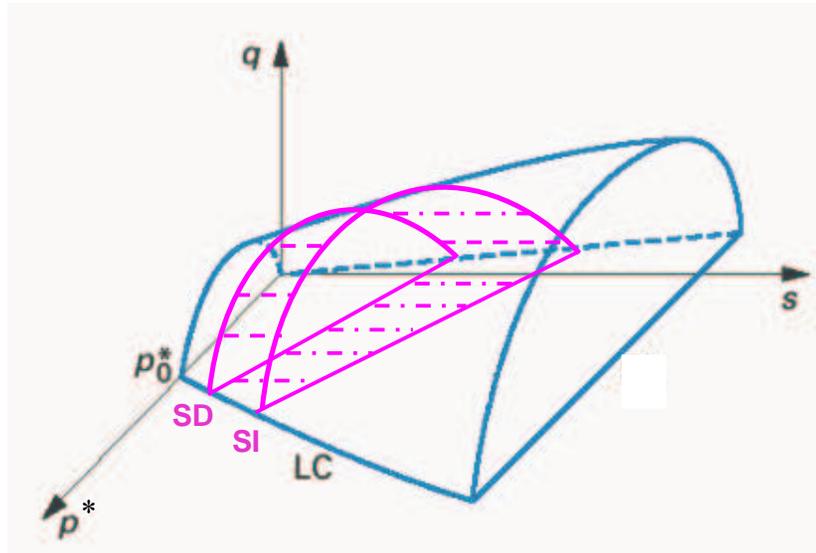


Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ BExM

■ Surface de charge dans l'espace (p^*, q, s)

(Modèle continu, les fissures ne sont pas prises en compte)



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Paramètres du modèle pour **sols fins** non saturés gonflants

- Sols fins → Cam Clay

Paramètres	Unité	Définition
M	—	la pente de la courbe d'état critique
Γ	MPa	l'indice des vides initial
κ	—	le coefficient de compressibilité élastique (indépendante de la succion)
$\lambda(0)$	—	le coefficient de compressibilité plastique à l'état saturé

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Paramètres du modèle pour sols fins **non saturés** gonflants

- Non saturés → BBM (Barcelona Basic Model)

Paramètres	Unité	Définition
r	—	un paramètre lié à la rigidité du sol quand la succion tend vers l'infini
β	MPa ⁻¹	un paramètre contrôlant l'augmentation de la rigidité avec la succion
p_c	MPa	une pression de référence
p_o^*	MPa	la pression de préconsolidation apparente sous une succion nulle
κ_s	—	le coefficient de compressibilité pour des incréments de succion dans le domaine élastique
k	—	un paramètre décrivant l'augmentation de la cohésion avec la succion

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

- Paramètres du modèle pour sols fins non saturés gonflants
 - Gonflants → BExM (Barcelona Expansive Model)

Paramètres	Unité	Définition
s_0	MPa	la succion au-delà de laquelle les déformations macrostructurales plastiques apparaissent lors de la dessiccation
s_h	MPa	la succion au-delà de laquelle les déformations macrostructurales plastiques apparaissent lors de l'humidification
e_m	—	les paramètres de lois d'écrouisseage : $ds_i = ds_h = \frac{K_m (d\varepsilon_{vSI}^p + d\varepsilon_{vSD}^p)}{f}$ $f_I = f_{I0} + f_{I1} \left(1 - \frac{p^*}{p_0}\right)^{n_I} \quad f_D = f_{D0} + f_{D1} \left(1 - \frac{p^*}{p_0}\right)^{n_D}$ $K_m = \frac{(1 + e_m)(p^* + s)}{\kappa_m}$
k_m	—	
f_{I0}	—	
f_{I1}	—	
n_I	—	
f_{D0}	—	
f_{D1}	—	
n_D	—	

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Modèle pour sols fins non saturés gonflants (BExM)

Thèse Mrad 2005

- Implantation du modèle dans un code de calcul aux éléments finis intégrant le couplage hydromécanique : Code_Bright ;
- Validation du modèle et des procédures numériques à partir d'essais réalisés au laboratoire sur un sol gonflant (essais œdométriques à succion contrôlée) ;

RGC&U - RG
ARGIC

- Application aux problèmes pratiques (fondations, soutènements, remblais, canalisations, routes, ...).

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée (Cuisinier 2002)

- Matériau reconstitué
 - mélange de limon de Xeuilley (40 %) et de bentonite calcique (60 %)
 - $\gamma_d = 12,7 \text{ kN/m}^3$, $w_i = 15 \%$, $S_{rini} = 35 \%$
 - succion initiale comprise entre 20 et 25 MPa

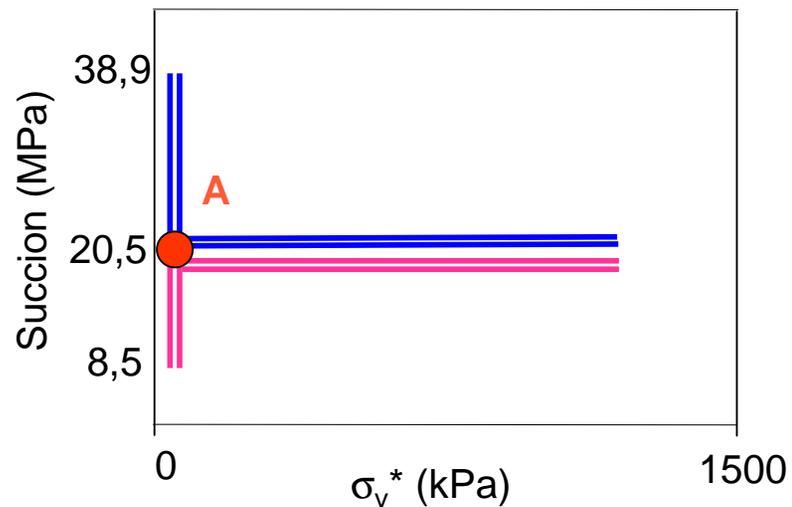
- Contrôle de la succion
 - Technique osmotique
succions $\leq 8,5 \text{ MPa}$

 - Technique des solutions salines
 $8,5 \text{ MPa} < \text{succions} \leq 287,9 \text{ MPa}$



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

- Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée
 - Chemins de contrainte suivis et paramètres du modèle



- Deux essais comportant des cycles hydriques sous une faible pression verticale de 10 kPa avant le chargement

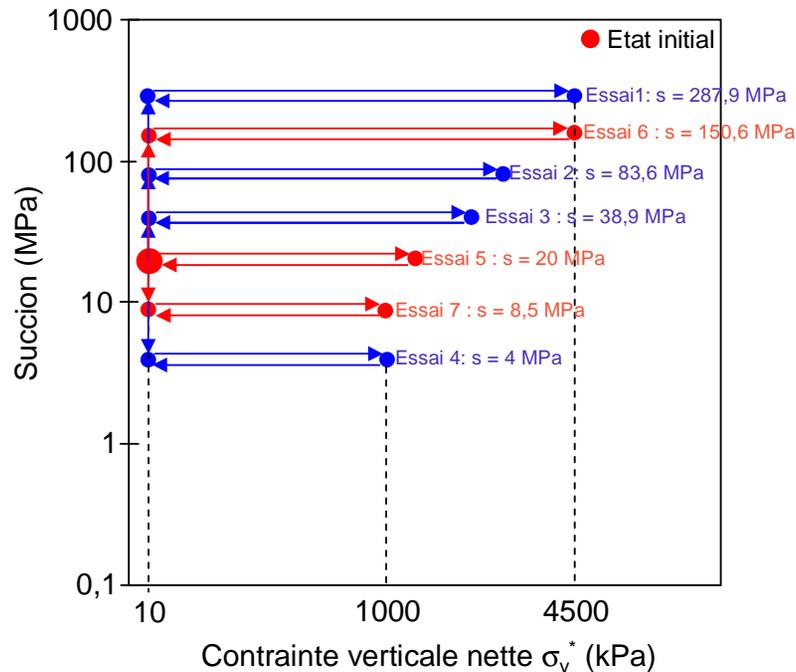


$$s_0 = 30 \text{ MPa et } s_h = 14 \text{ MPa}$$

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée

- Chemins de contrainte suivis et paramètres du modèle



- Essais 1, 2, 3 et 4

$$\lambda(0) = 0,315; r = 0,2777$$

$$\beta = 0,008 \text{ MPa}^{-1} \text{ et } \kappa = 0,02$$

- Essais 2 et 3

$$p_0^* = 0,844 \text{ MPa et } p_c = 0,609 \text{ MPa}$$

- Essais 5, 6 et 7 : à modéliser

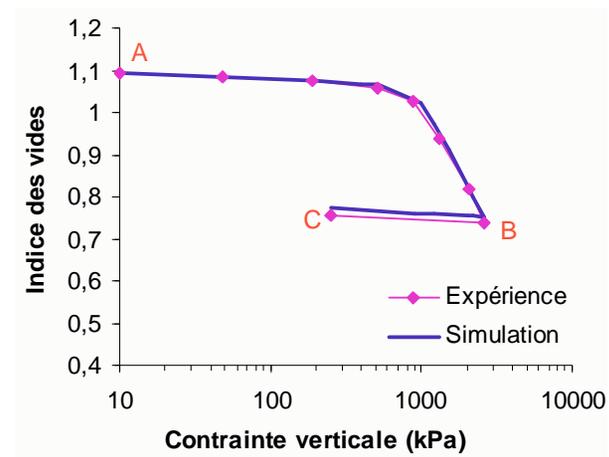
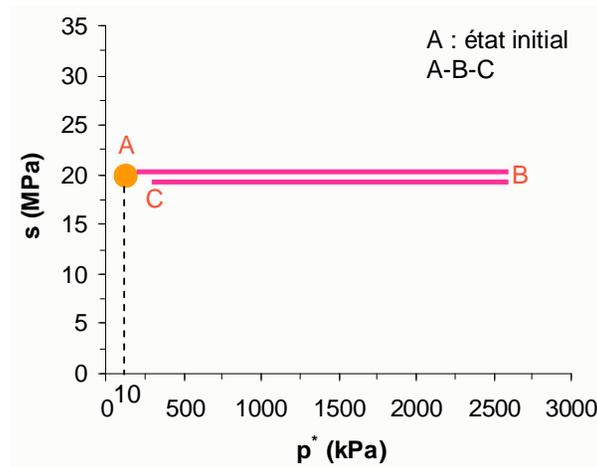
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

- Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée
 - Paramètres du modèle

Paramètres définissant la loi de comportement macrostructural			
κ	0,02	p_0^*	0,844 MPa
$\lambda(0)$	0,315	s_0	30 MPa
r	0,2777	s_h	14 MPa
β	$8,054 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$	k	0,09
κ_s	0,015	M	1,24
p_c	0,609 MPa		
Paramètres définissant la loi de comportement microstructural			
κ_m	0,011	e_m	0,25
Fonctions de couplage micro-macrostructurale			
$f_I = 0,5 + 9,9 (p^*/p_0)^1$		$f_D = 1 \times 10^{-3} + 2 \times 10^{-2} (1 - p^*/p_0)^{0,1}$	

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

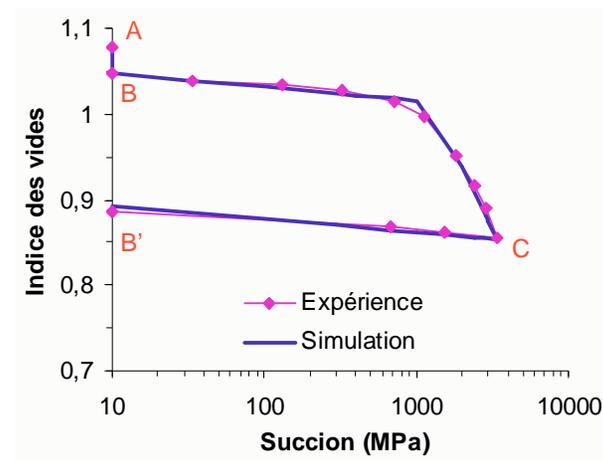
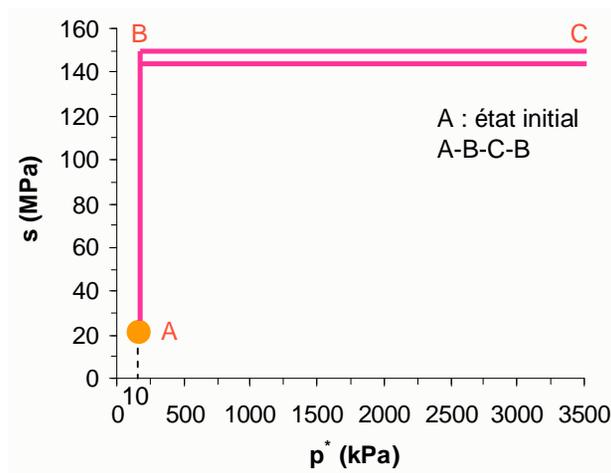
- Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée
 - Résultats – Essai 5



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

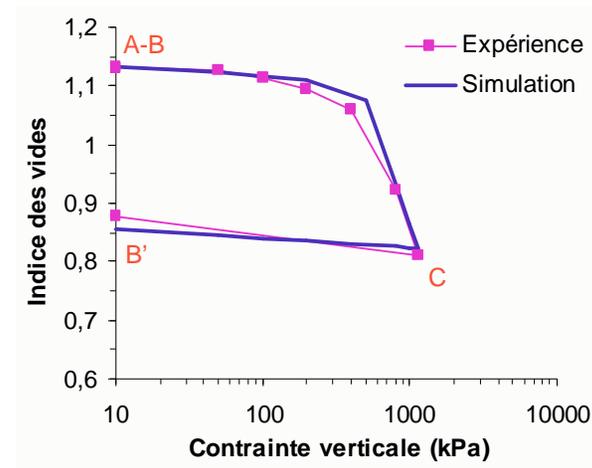
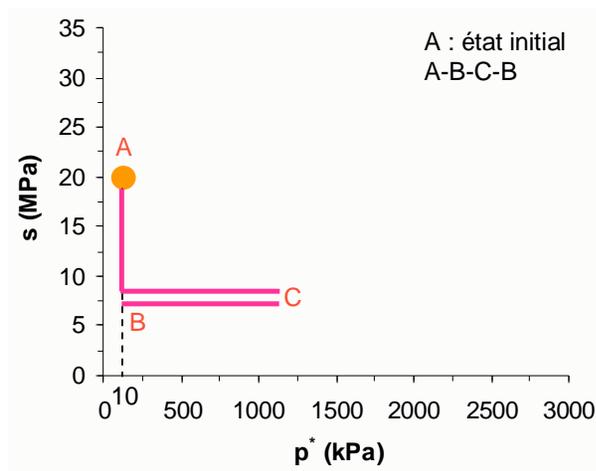
■ Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée

■ Résultats – Essai 6



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

- Simulation d'essais œdométriques à succion contrôlée
 - Résultats – Essai 7



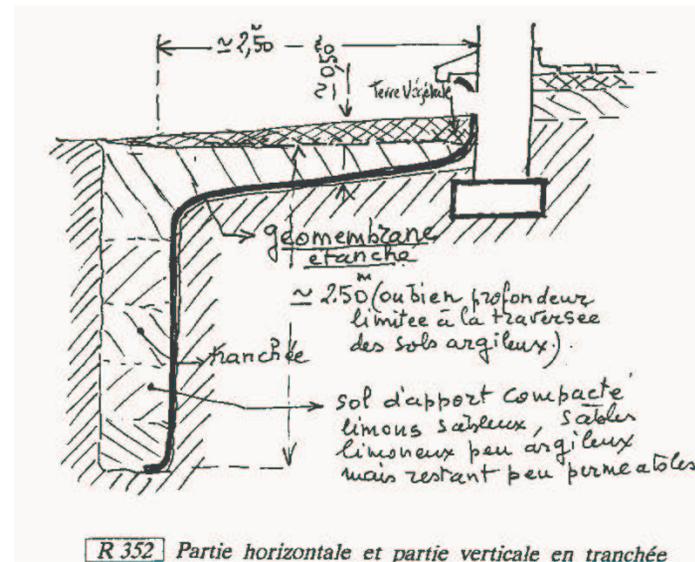
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

- Objectifs
 - Etude de l'influence des sollicitations hydriques (pluie et sécheresse) sur le tassement d'une **semelle filante**
 - Influence de la **géomembrane**

Analyse statistique basée sur un grand nombre de sinistres dus au phénomène de retrait-gonflement

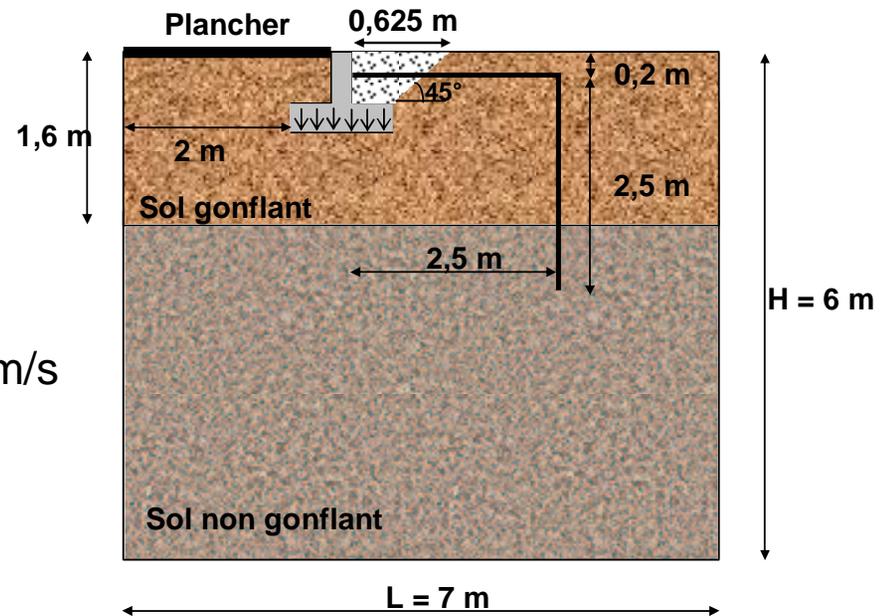
(CEBTP-Solen : projet RG - RGC&U)



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant (déformation plane)

- Massif de sol
 - Argile homogène sur 1,6 m
 - Sol non gonflant
 - Remblai
- Géomembrane
 - Épaisseur 4 mm
 - Perméabilité 1.10^{-14} m/s



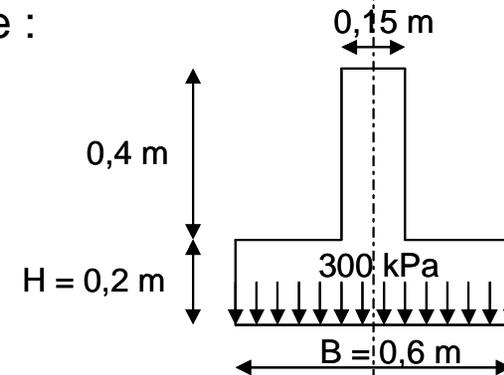
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

■ Caractéristiques de la fondation

- Semelle filante en béton
- Comportement élastique linéaire :

- $E = 27\,000\text{ MPa}$
- $\nu = 0,2$
- $n_0 = 0,16$
- $\gamma_s = 26,5\text{ kN/m}^3$
- $k_s = 10^{-12}\text{ m/s}$



- Paramètres de van Genuchten (courbe de rétention) :

$$S_e = \frac{S_r - S_{r(res)}}{S_{r(sat)} - S_{r(res)}} = \left[1 + (\alpha s)^n\right]^{-m}$$

- $n = 2,105$; $m = 1 - 1/n = 0,525$; $\alpha = 0,0235\text{ MPa}^{-1}$; $S_{r(res)} = 0$

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

- Caractéristiques du massif de sol

Matériau	Argile gonflante (mélange limon- bentonite)	Sol non gonflant	Remblai
Type de comportement	Élastoplastique BExM	Elastique linéaire ($E = 6 \text{ MPa}$, $\nu = 0.2$)	Élastoplastique BExM
Porosité	0,524		0,6
Perméabilité à l'état saturé k_s	$5 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$		$5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$
Courbe de rétention (van Genuchten)	Ajustement de la courbe expérimentale : $n = 1,34$ $m = 1-1/n = 0,254$ $\alpha = 1,5 \text{ MPa}^{-1}$ $S_{r(res)} = 0,05$		Plus lâche que l'argile : $n = 1,44$ $m = 1-1/n = 0,306$ $\alpha = 5 \text{ MPa}^{-1}$ $S_{r(res)} = 0,02$

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

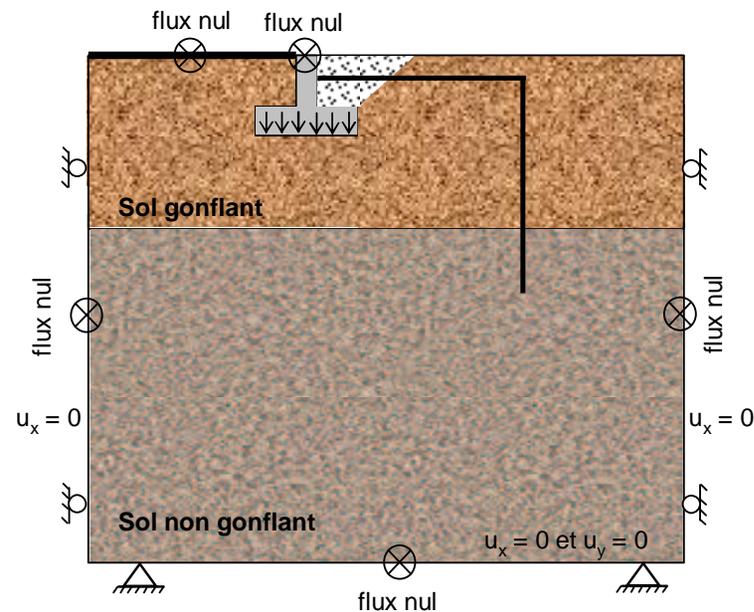
■ Fondation sur sol gonflant

■ Conditions initiales

- $\gamma_{d\text{ ini}} = 12,8 \text{ kN/m}^3$

- $S_{r\text{ ini}} = 35 \% \Rightarrow \text{Succion} = 20 \text{ MPa}$

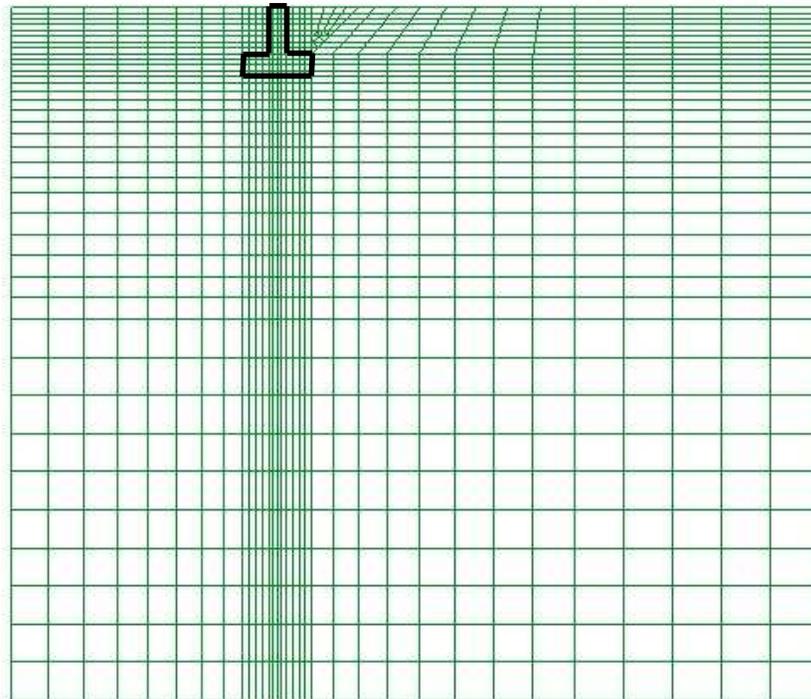
■ Conditions aux limites



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

- Maillage
 - 1436 éléments et 1508 nœuds



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

- Phasage de calcul
 - Données météorologiques à Reims (Beauchamp, 2006)

Mois	P (mm/mois)	ETP (mm/mois)	P – ETP (mm/mois)	P – ETP (m/s)
Novembre	53,4	9,2	44,2	$1,71 \times 10^{-8}$
Décembre	70,3	17,1	53,2	$1,99 \times 10^{-8}$
Janvier	41,4	16,2	25,2	$9,41 \times 10^{-9}$
Février	86,5	35,1	51,4	$2,12 \times 10^{-8}$
Mars	14,1	50,9	-36,8	$-1,37 \times 10^{-8}$
Avril	64,3	80,9	-16,6	$-6,40 \times 10^{-9}$
Mai	9,1	120,6	-115,5	$-4,31 \times 10^{-8}$
Juin	56,2	104,7	-48,5	$-1,87 \times 10^{-8}$
Juillet	39,4	143,2	-103,8	$-3,88 \times 10^{-8}$
Août	11,8	118,7	-106,9	$-3,99 \times 10^{-8}$
Septembre	30,0	67,4	-37,4	$-1,44 \times 10^{-8}$
Octobre	28,6	40,0	-11,4	$-4,26 \times 10^{-9}$

$> k_s = 5.10^{-9} \text{ m/s}$

Conditions aux limites
appliquées en surface

Phase I :
succion = 0
humidification

Phase II :
Flux entrant = $-1,37.10^{-8} \text{ m/s}$
Séchage

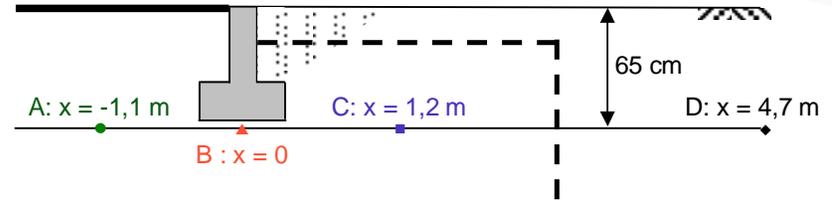
Phase III :
succion (w_p) = 20 MPa
Séchage

P : Précipitation; ETP : Evapotranspiration Potentiel; P – ETP : Flux d'eau infiltré ou évaporé.

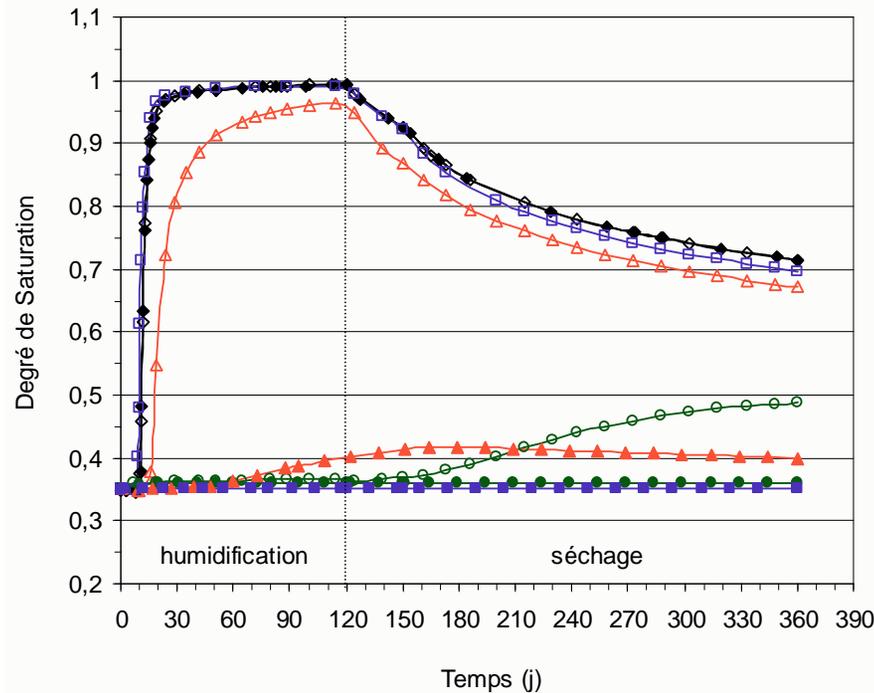
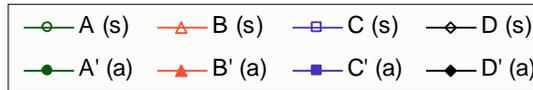
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

- Résultats
 - Degrés de saturation



- (S) Sans géomembrane
- (A) Avec géomembrane



Sans géomembrane



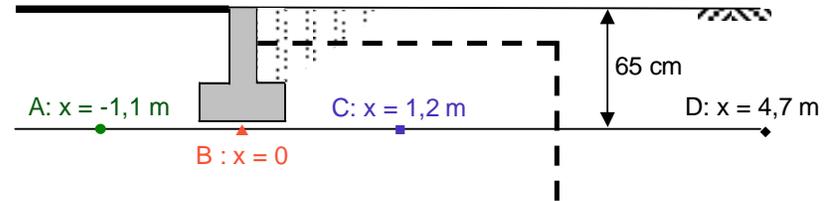
Avec géomembrane

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

Fondation sur sol gonflant

Résultats

Déplacements verticaux

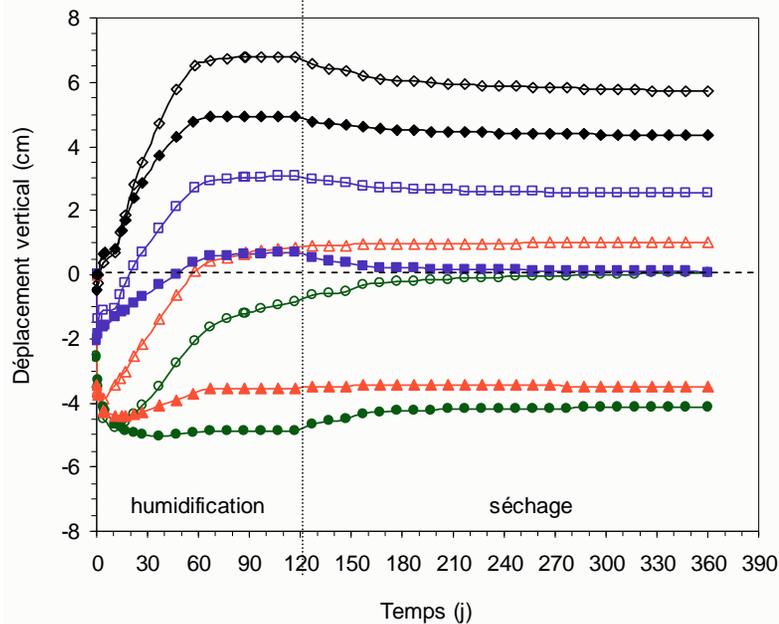


(S) Sans géomembrane

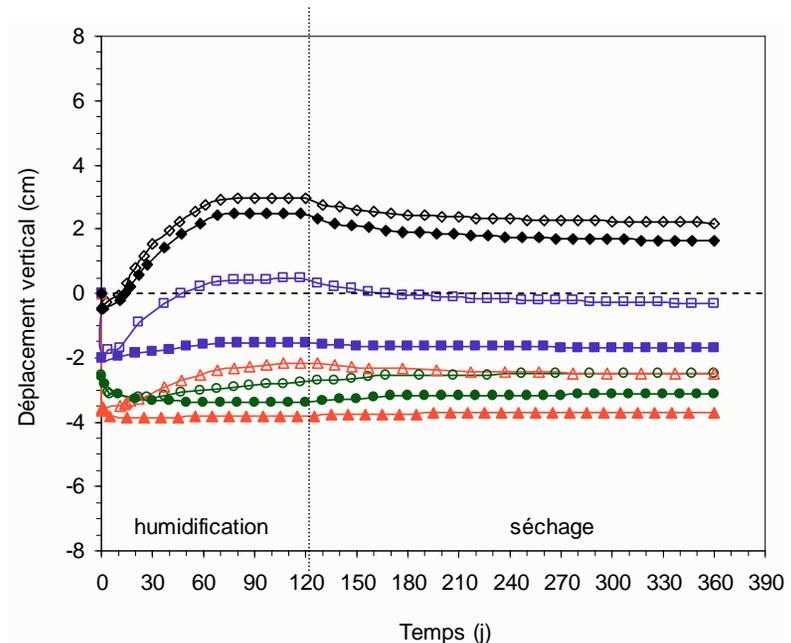
—○— A (s) —△— B (s) —□— C (s) —◇— D (s)

(A) Avec géomembrane

—●— A' (a) —▲— B' (a) —■— C' (a) —◆— D' (a)



BExM

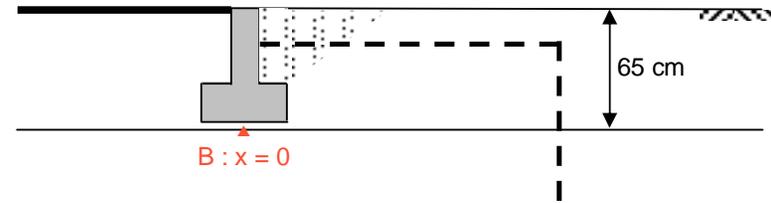


BBM

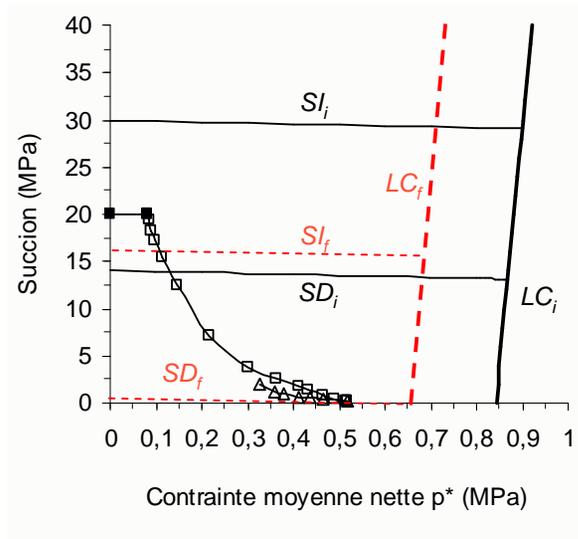
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

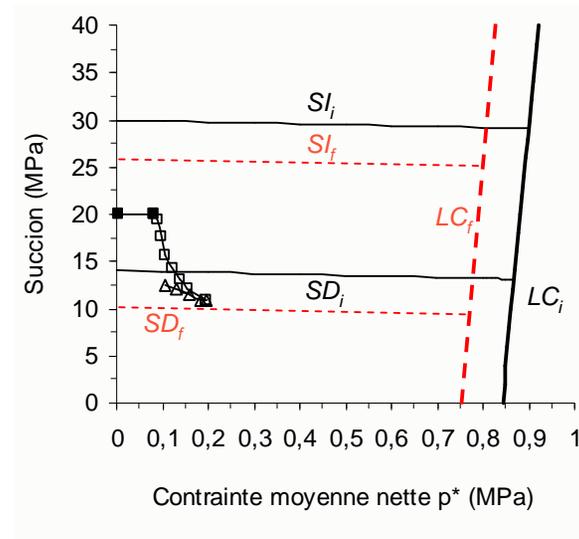
■ Chemins de contrainte



■ — Chargement □ — humidification ▲ — séchage



Sans géomembrane



Avec géomembrane

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux



Un modèle à 20 paramètres ?
Des mois d'essais de laboratoire ?
Des semaines de calcul ?

Ce n'est pas pour moi !

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Ce modèle permet :

- de reproduire qualitativement les déformations volumiques d'un sol gonflant chargé, sous des sollicitations hydriques
- d'analyser les différentes configurations
 - de l'état initial du sol
 - de la profondeur de la couche d'argile
 - de l'épaisseur de la couche d'argile
 - des cycles hydriques
 - ...
- de valider les méthodes de diminution des risques de RG (géomembrane, terrasse, ...)

En cours : essais sur les sondages du site du Deffend et de Champenoux

Mesures en vraie grandeur

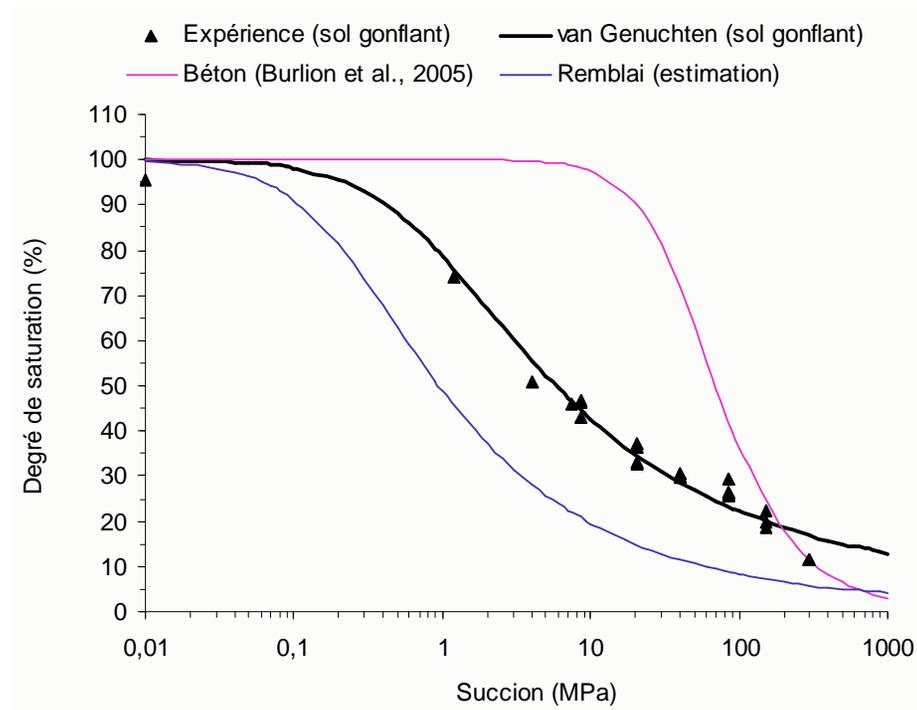
Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

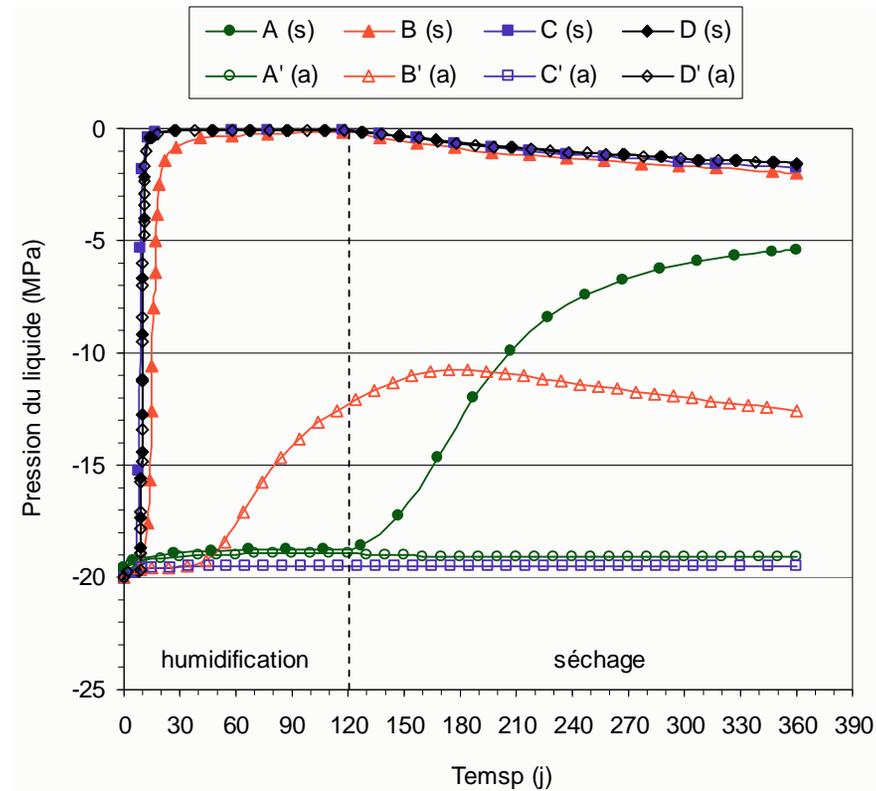
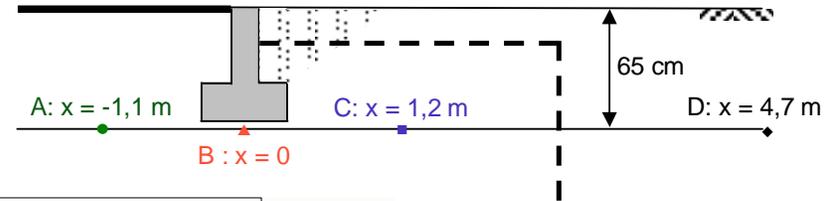
■ Courbes de rétention



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ Fondation sur sol gonflant

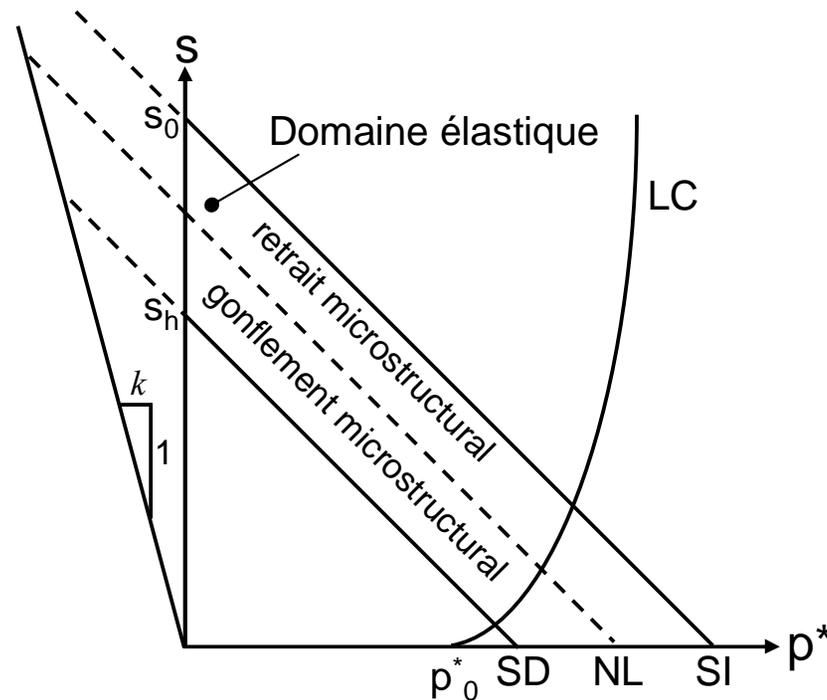
- Résultats
 - Pressions de l'eau



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ BExM

- Contrainte effective \rightarrow NL (Neutral Line)
- Couplage \rightarrow SD & SI : « Suction Decrease & Increase »
- BBM \rightarrow LC : « Loading Collapse »



Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

Modèle	Paramètre	Unité	Essais nécessaires
Cam-Clay modifié BBM – BExM	M	(-)	3 essais triaxiaux classiques
	e_0	(-)	
	κ	(-)	un essai de chargement/déchargement sous une succion nulle
	$\lambda(0)$	(-)	
BBM – BExM	p_0^*	(MPa)	au moins deux essais de chargement/déchargement sous succion contrôlée dont le chemin de contrainte est entièrement compris dans le domaine élastique
	r	(-)	
	β	(MPa ⁻¹)	
	p_c	(MPa)	un essai comportant un cycle de succion sous une charge verticale constante
	κ_s	(-)	
	k	(-)	
BExM	s_h	(MPa)	un essai d'humidification/drainage sous une faible charge verticale constante
	s_0	(MPa)	un essai de drainage /humidification sous une faible charge verticale constante
	f_{I0}, f_{I1} ou a_I	(-)	un essai comportant des cycles hydriques sous une charge verticale constante
	f_{I1}, f_{I2} ou b_I	(-)	
	n_I, k_I ou c_I	(-)	
	f_{D0}, x_I ou d_I	(-)	
	f_{D1}, f_{D1} ou a_D	(-)	
	n_D, f_{D2} ou b_D	(-)	
	k_D ou c_D	(-)	
	x_D ou d_D	(-)	
	k_m	(-)	

Modélisation des essais de retrait-gonflement des sols argileux

■ BExM - Lois d'écroûissage

- Modification de la zone élastique en séchage et en humidification

$$\frac{dp_0^*}{p_0^*} = \frac{(1+e)(d\varepsilon_{vLC}^p + d\varepsilon_{vSI}^p + d\varepsilon_{vSD}^p)}{\lambda(0) - \kappa}$$

$$ds_0 = ds_h = \frac{K_m(d\varepsilon_{vSI}^p + d\varepsilon_{vSD}^p)}{f}$$

