

Sécheresse géotechnique

**Caractérisation au laboratoire de
l'aptitude au retrait - gonflement des
sols argileux**



Martine Audiguier
Centre de Géosciences

Retrait-gonflement des sols argileux

Un changement de teneur en eau s'accompagne généralement de variations de volume dues à deux types de phénomènes principaux

- Phénomènes physico-chimiques
 - Interactions entre eau, matrice poreuse et particules argileuses
 - Propriétés électrochimiques et surface spécifique des minéraux argileux
- Phénomènes hydromécaniques
 - Liés à l'historique des contraintes subies par le matériau

A un état de contrainte totale donné, un changement dans l'environnement hydrique d'un sol conduit à une modification des pressions interstitielles (donc de l'état de succion) directement liée à l'état de contrainte effective d'après les 2 relations suivantes :

milieu saturé : relation de Terzaghi : $\sigma = \sigma' + u_w$

milieu non saturé relation de Bishop : $\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w)$

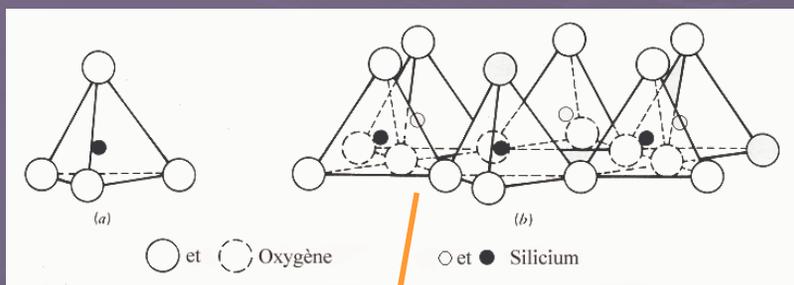
Si $u_w \downarrow$, $\sigma' \uparrow \Rightarrow$ Volume du sol \downarrow = retrait ou tassement.

Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

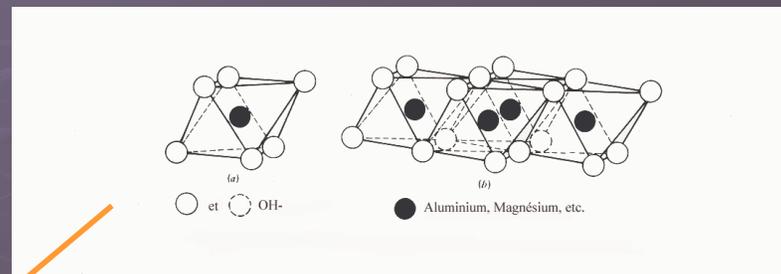
- **Minéralogie**
- Structure
- Caractéristiques géotechniques
- Caractéristiques hydriques
- Caractéristiques mécaniques
- Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement

Minéralogie des argiles

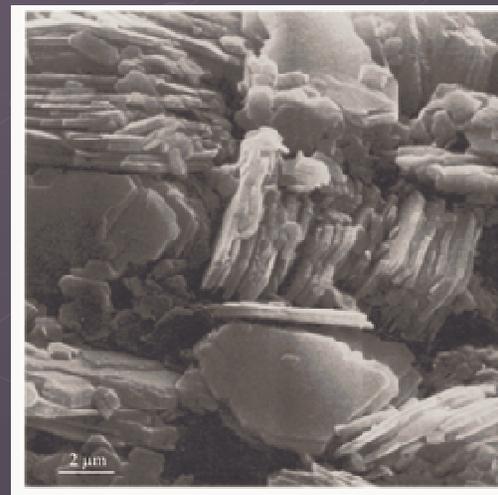
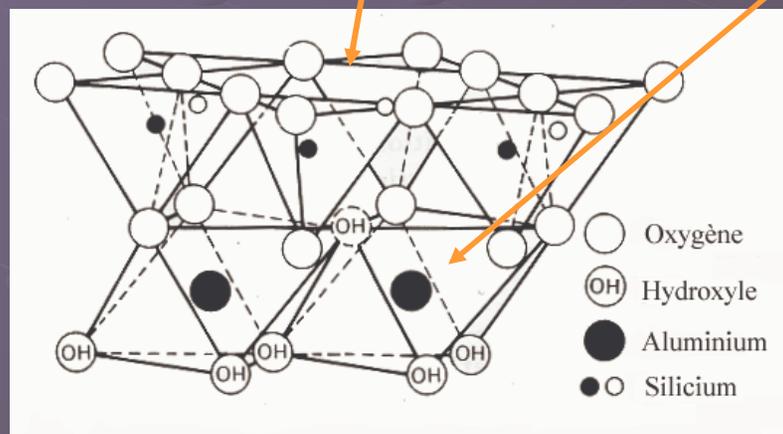
Couche tétraédrique (T)



Couche octaédrique (O)



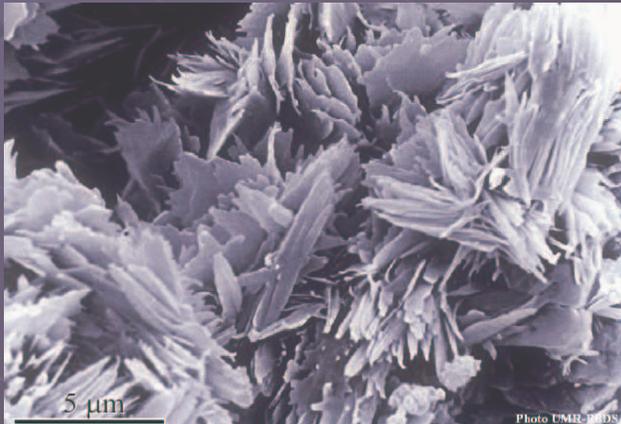
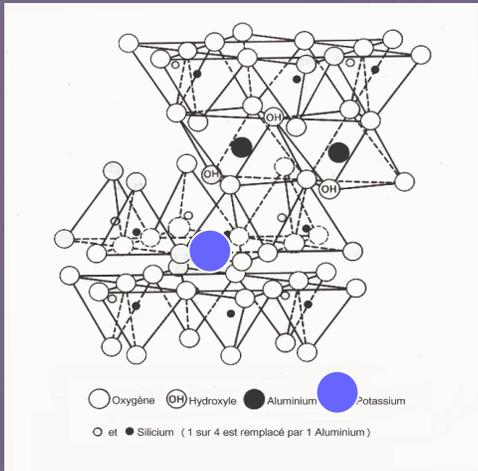
Association des 2 couches



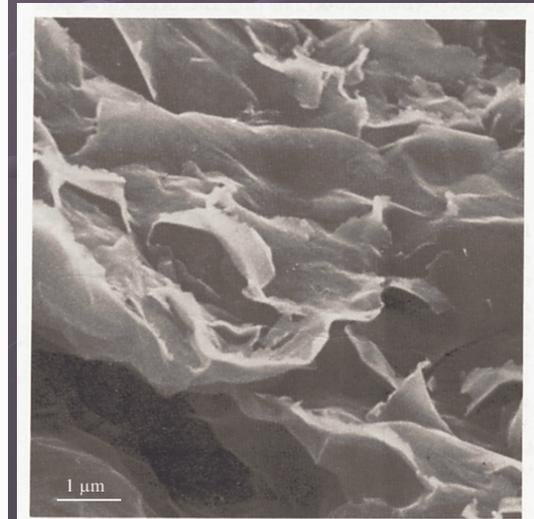
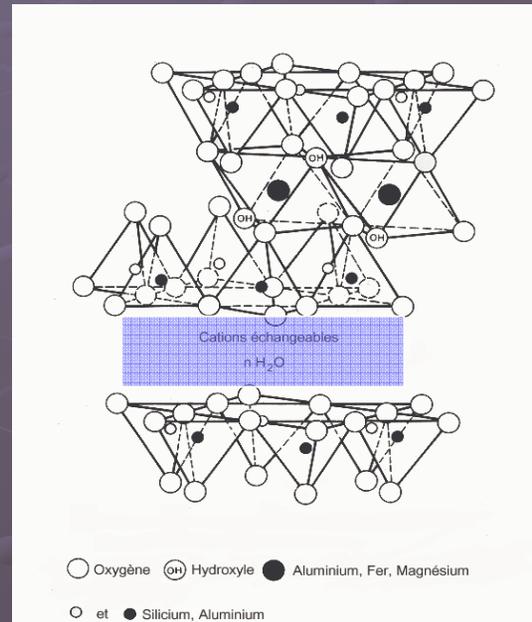
Famille de la kaolinite : TO (7Å)

Minéralogie des argiles

Famille de l'illite : TOT (10 Å)



Famille des smectites TOT + cations échangeables entre feuillets élémentaires (12 Å – 15 Å)

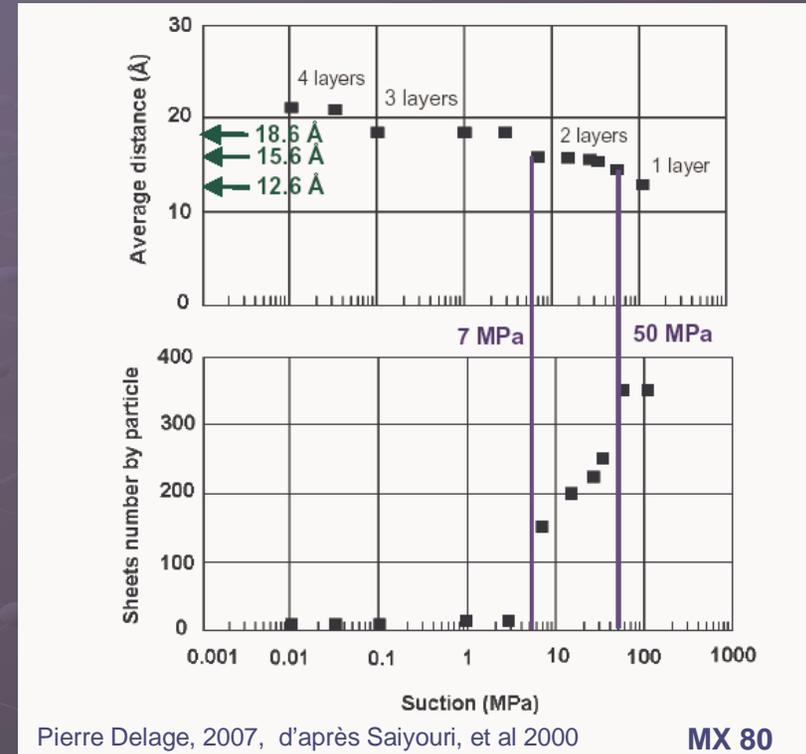


Systeme eau-argile

Mécanisme d'hydratation à l'échelle des particules argileuses

- Eau adsorbée sur la surface externe et entre les feuillets des particules due au déficit de charge. Le phénomène d'hydratation est plus important pour les smectites :

- à l'espace interparticulaire s'ajoute l'espace interfoliaire ;
- Au fur et à mesure de l'hydratation la distance entre les feuillets augmente par adsorption de 1 à 4 couches de molécules d'eau ;
- Ce phénomène s'accompagne d'une division des particules élémentaires dont l'épaisseur passe de plusieurs centaines à une dizaine de feuillets augmentant considérablement l'espace interparticulaire accessible aux molécules d'eau.



Résultats obtenus à partir du modèle probabiliste de Pons (Pons et al 1981)

Lorsque la succion (S) ↓ :
couches d'eau adsorbées ↑
nombre de feuillets par particule ↓

Systeme eau-argile

Mécanisme d'hydratation à l'échelle des particules argileuses

- Eau adsorbée sur la surface externe et interne des particules ;
- Eau de condensation capillaire = eau retenue par condensation aux points de contact entre les particules ou les agrégats ;
- Autres notions :
 - Eau interne : eau d'hydratation des cations échangeables ;
 - Eau externe : eau située dans les pores inter-particulaires et inter-agrégats.

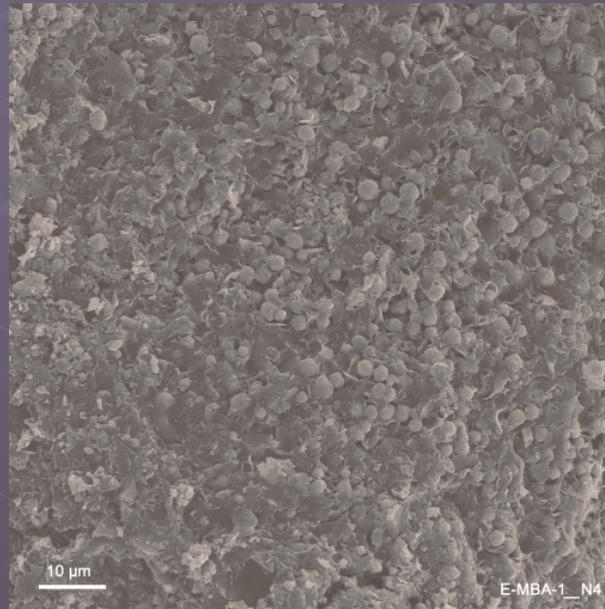
Minéraux non argileux

Rôle des carbonates dans les processus de retrait gonflement ?

Formations	Argiles	%Carbonates	Wl %	Ip %	Ir %	Gonf. libre Etat nat. %	Gonf. libre Etat rem. %
AVR	K, I, I/S	15-20	75	30-35	55-60	15-25	>30
MBA	K, I, S	30-60	85	40-50	65-75	4	26

AVR = Argile verte de Romainville
MBA = Marne bleue d'Argenteuil

Rôle d'autres minéraux ?

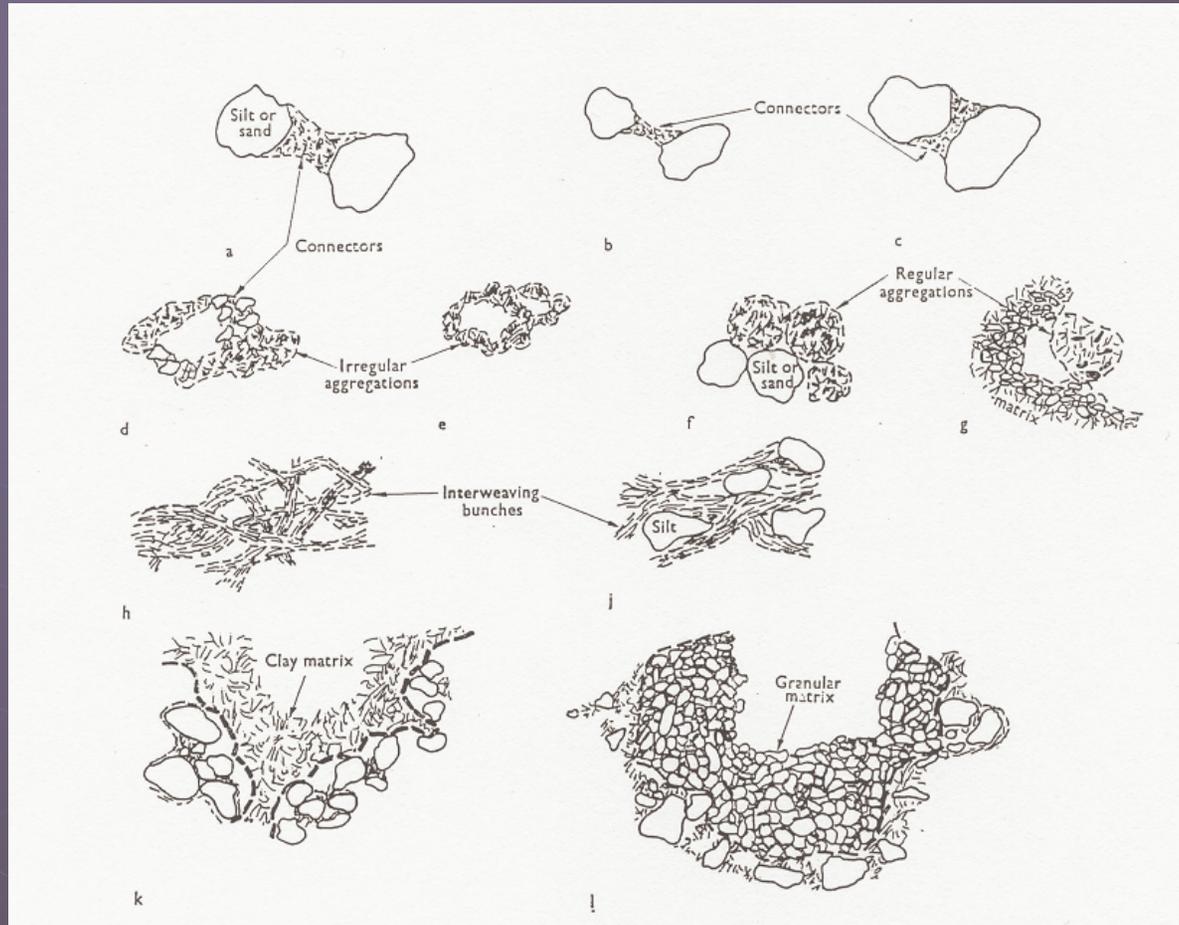


Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

- Minéralogie
- **Structure**
- Caractéristiques géotechniques
- Caractéristiques hydriques
- Caractéristiques mécaniques
- Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement

Structure des sols argileux

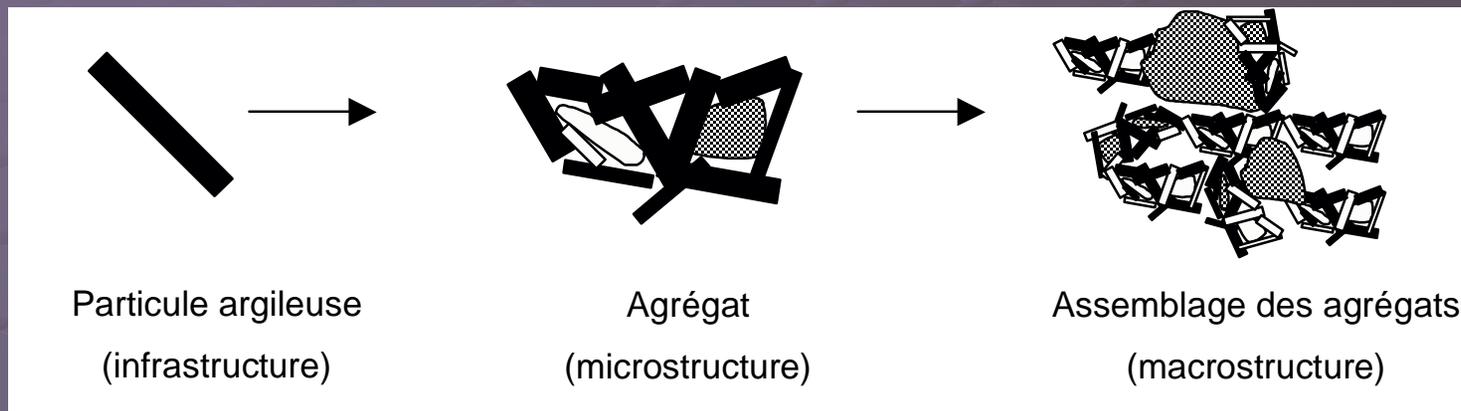
Assemblage de particules argileuses et de grains non argileux



Représentation schématique d'assemblage de particules argileuses et grains non argileux (d'après Collins et Mc Gown, 1974)

Structure des sols argileux

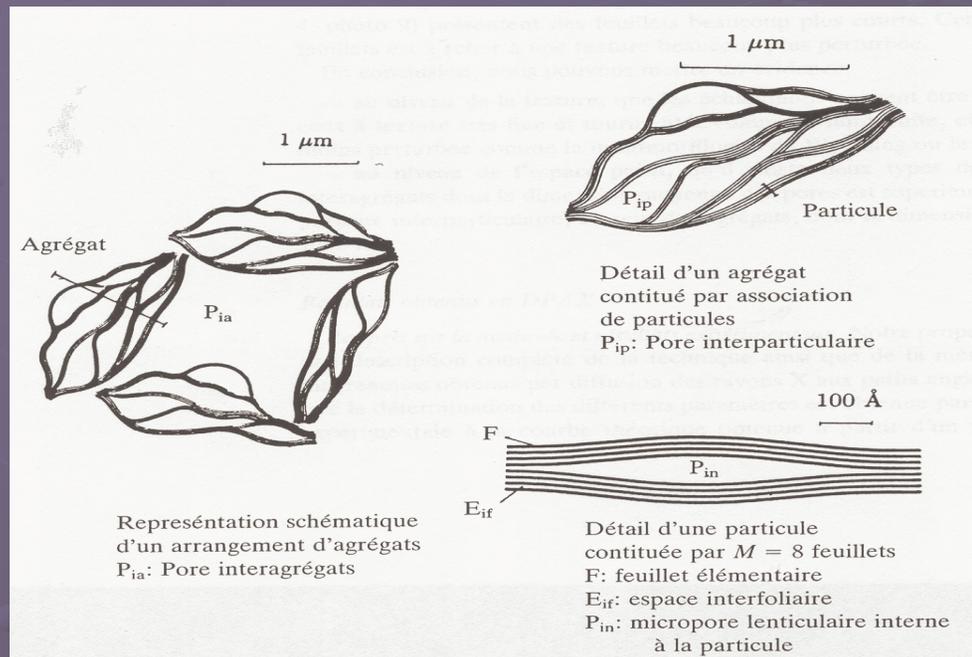
La plus part des auteurs s'accordent à définir un schéma d'organisation des sols argileux en 3 niveaux structuraux



Les trois niveaux structuraux des sols gonflants (Gens et Alonso, 1992)

Ces 3 niveaux sont interdépendants et jouent un rôle déterminant dans le processus de retrait-gonflement.

Le réseau poreux dans les sols argileux

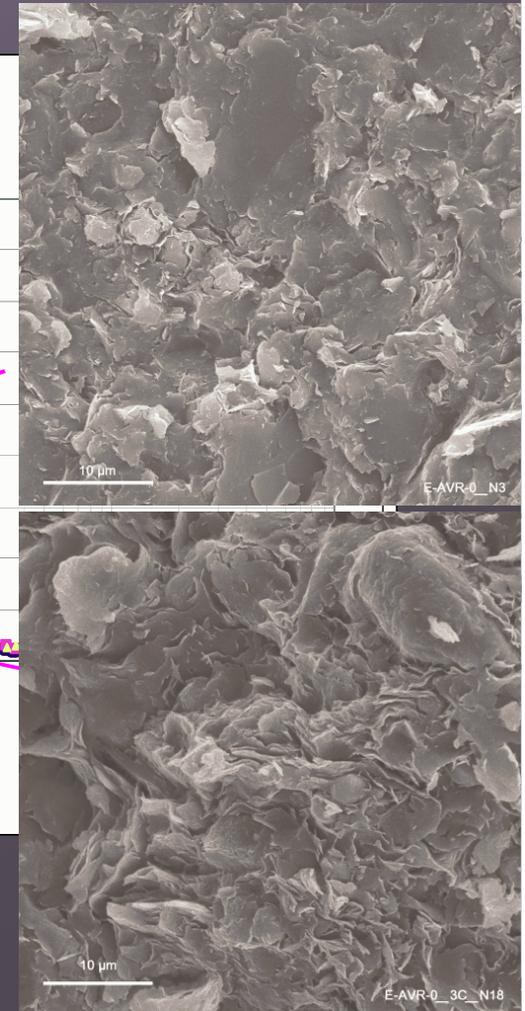
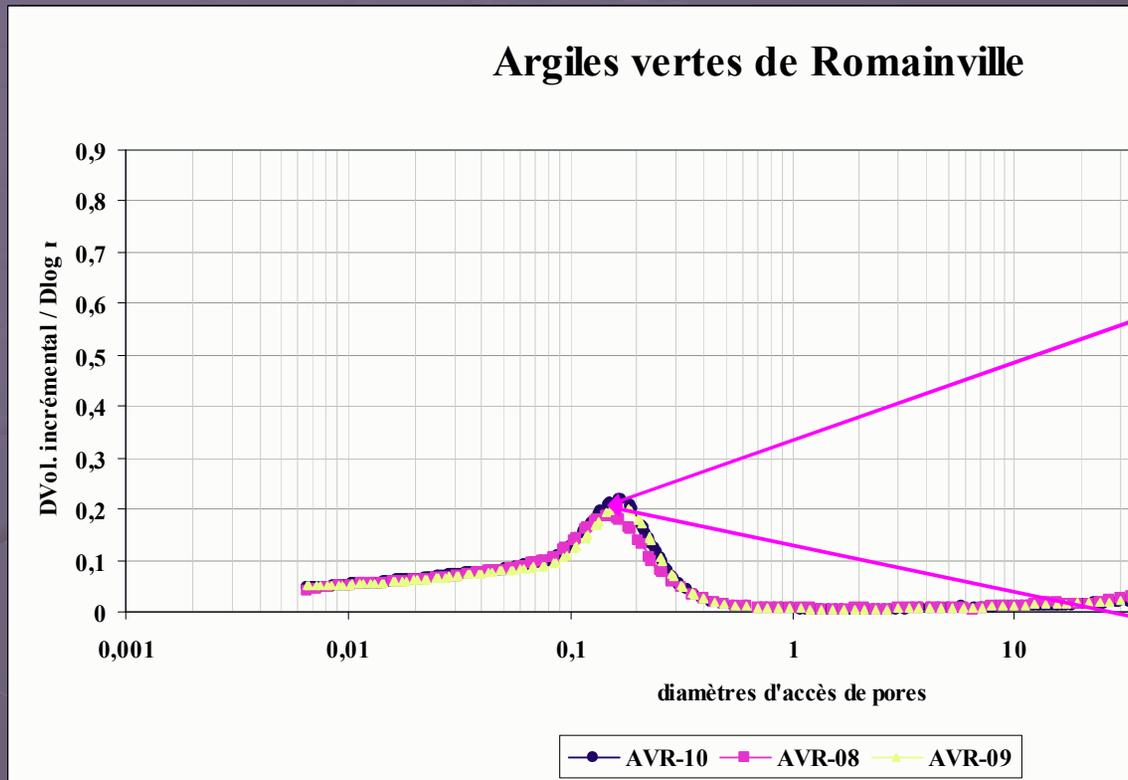


Représentation schématique des différents types de pores (d'après Touret 1990)

- Porosité interagrégat
> 500 nm à 1 μm
- Porosité interparticulaire ou intra agrégat
10 nm < < 500 nm à 1 μm
- Porosité interfoliaire et lenticulaire (interne à la particule)
< 10 nm

Caractérisation structurale de 2 formations de la Région parisienne sensibles au retrait – gonflement

Courbes porosimétriques – Observation au MEB



Projets ARGIC et Fondation MAIF

Centre de Géosciences, EMP

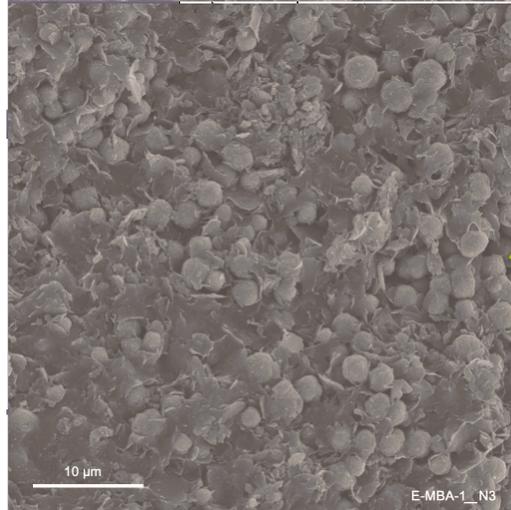
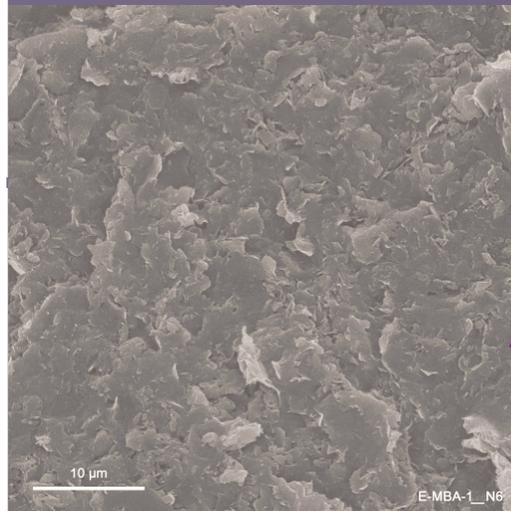
Journée CFGI-CFMS

18/01/2007

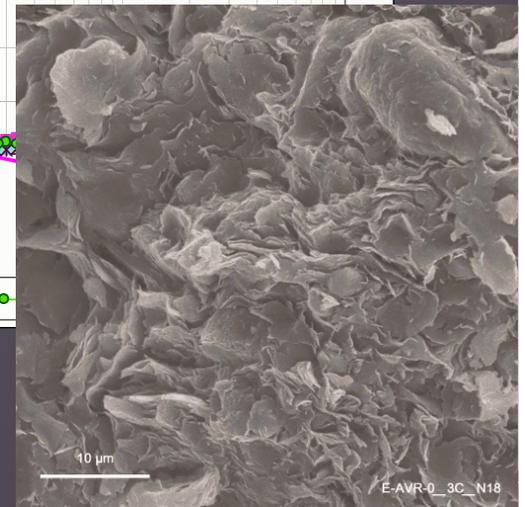
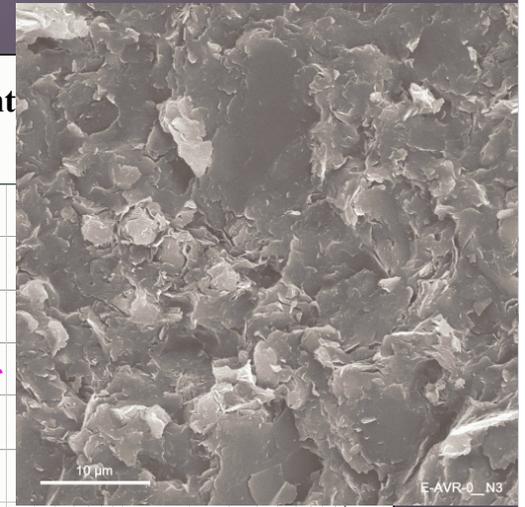
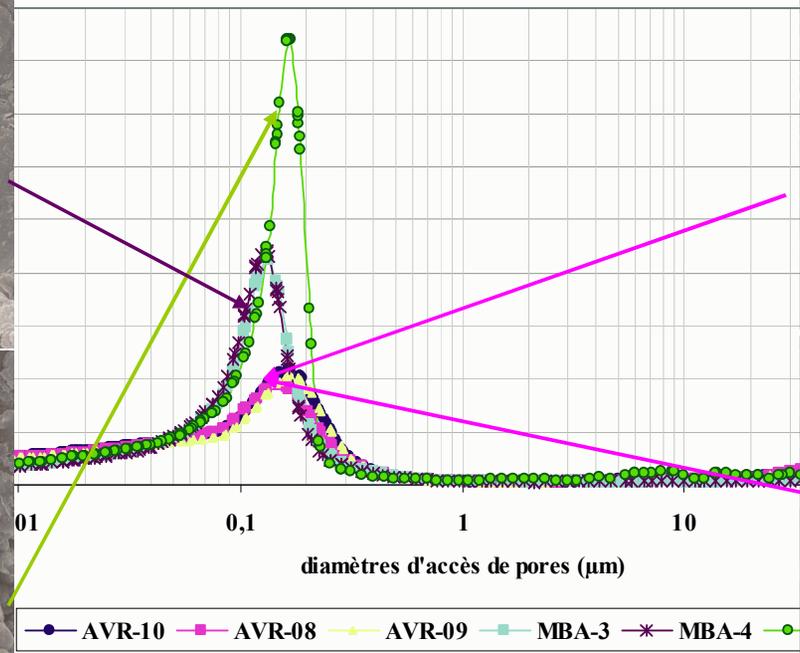
13

Caractérisation structurale de 2 formations de la Région parisienne sensibles au retrait – gonflement

Courbes porosimétriques – Observation au MEB



Argiles vertes de Romainville - Marnes bleues d'Argent

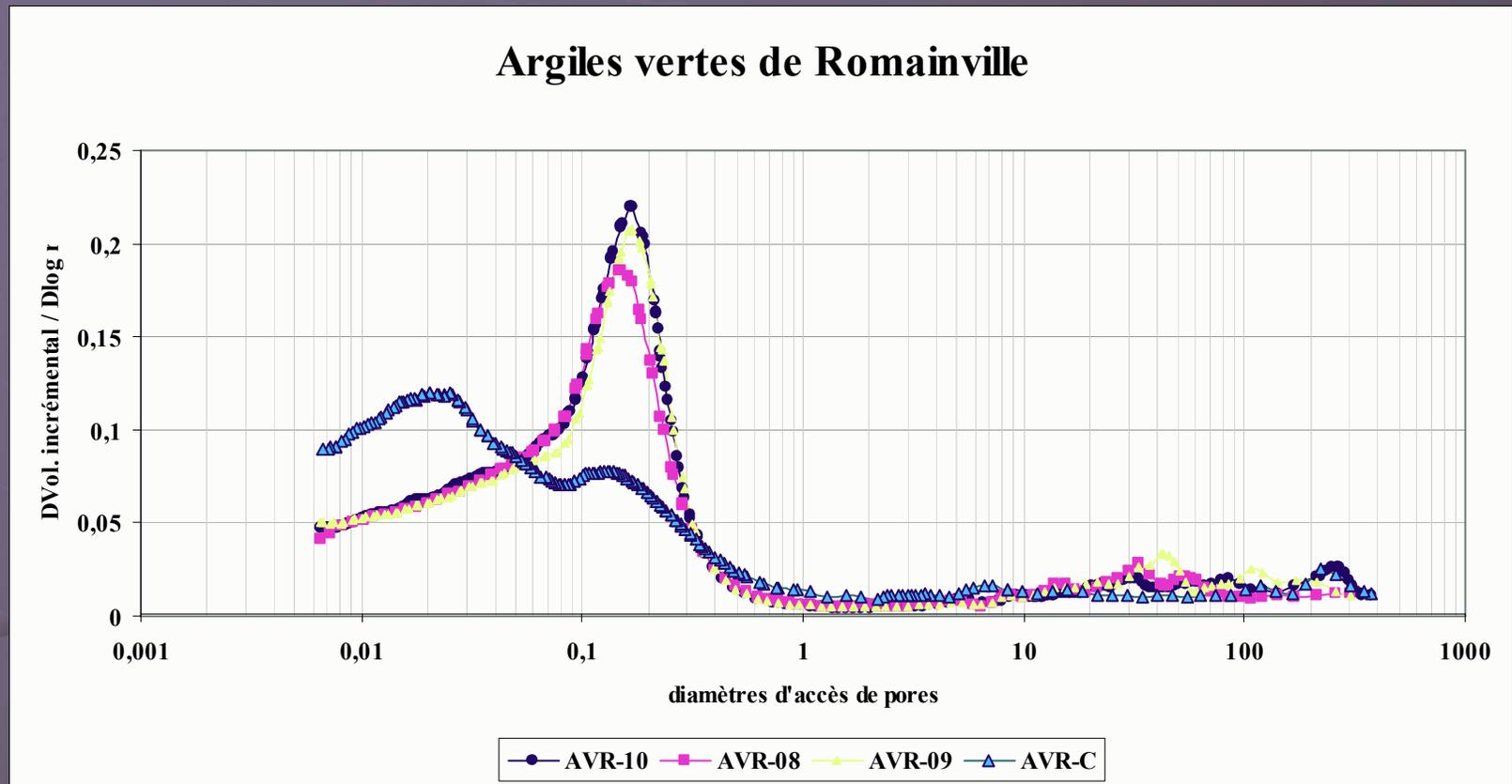


Projets ARGIC et Fondation MAIF

Centre de Géosciences, EMP

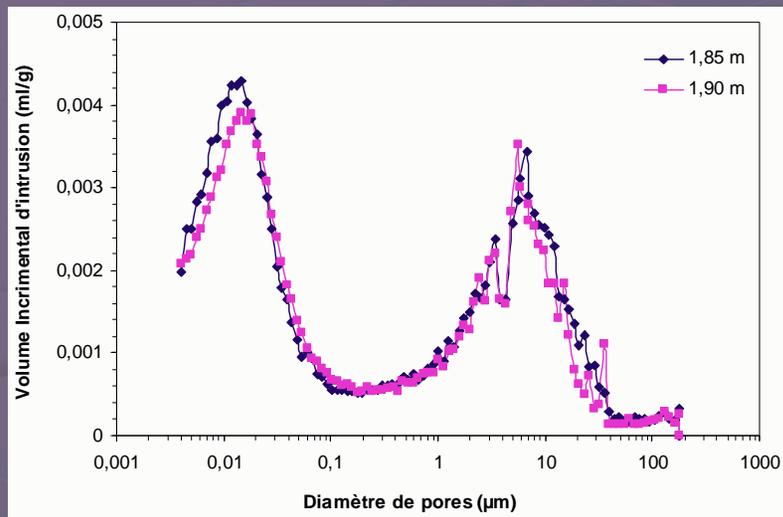
Journée CFGI-CFMS

Comparaison entre l'Argile verte de Romainville intacte et en formation de pente (colluvion argileuse)

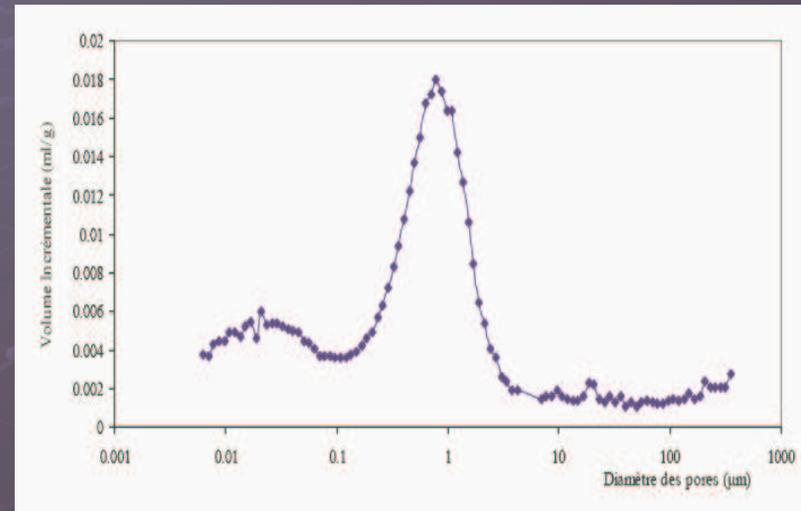


Centre de Géosciences, EMP

Distribution des accès de pores des sols argileux de 2 sites expérimentaux



Courbes porosimétriques du sol argileux (à une profondeur de l'ordre de 2m) du site du Deffend (Poitiers) (Laego, ENSG)



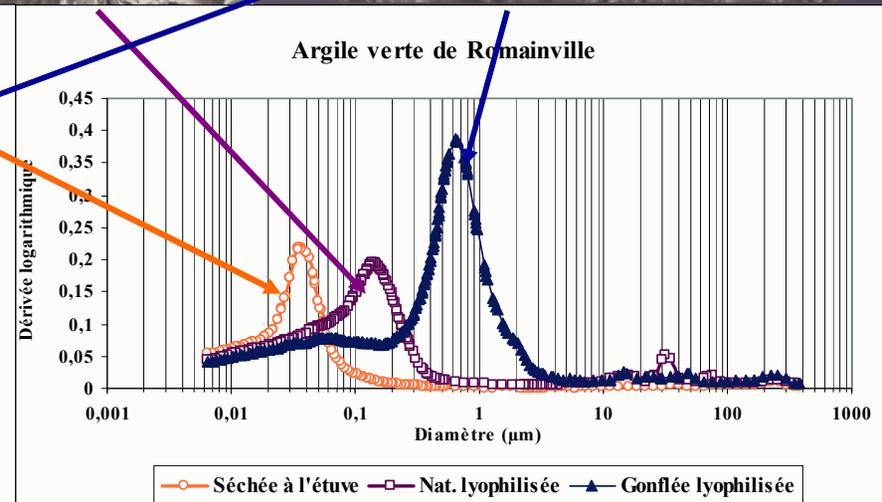
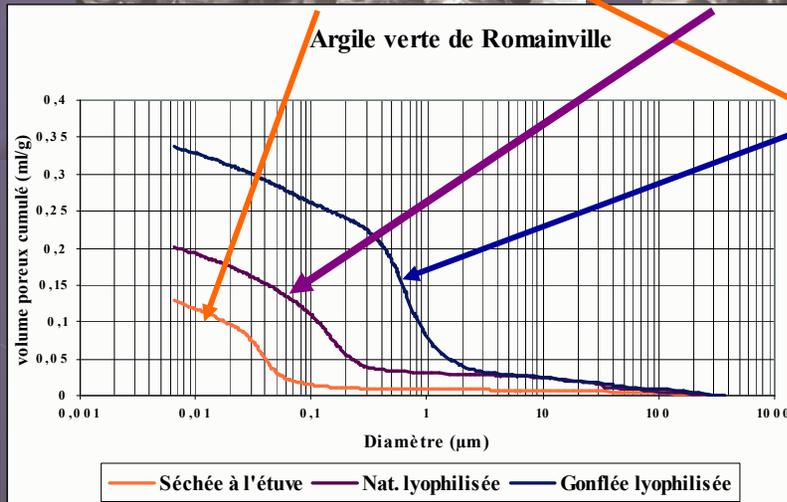
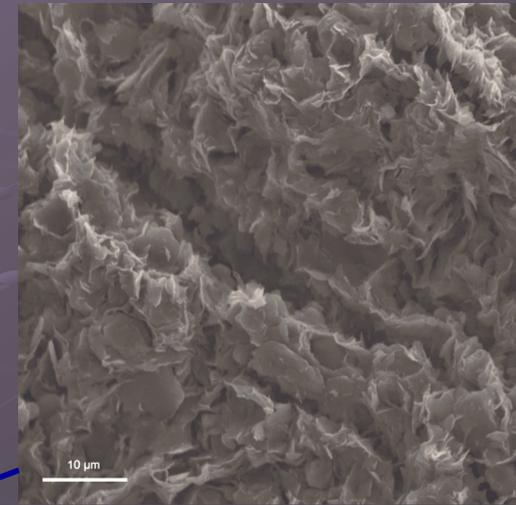
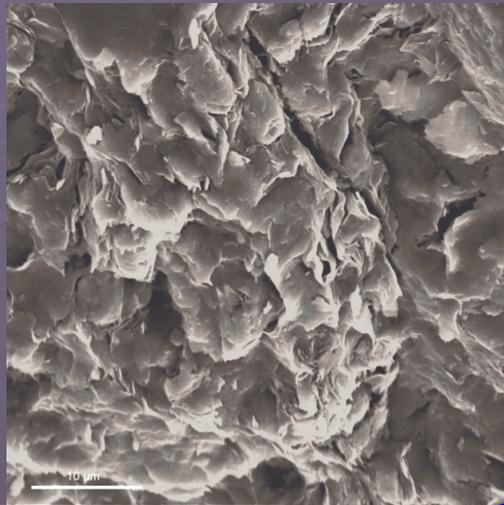
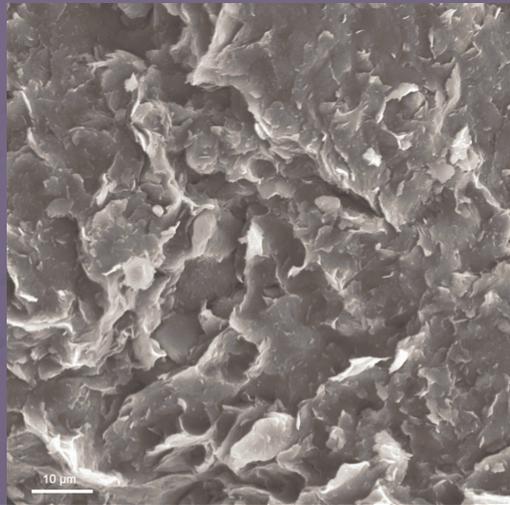
Courbes porosimétriques des sols argileux de Mormalon (Var) (MSS-Mat, Centrale)

Projet ARGIC

Argile verte de Romainville

Comparaison de la distribution des accès de pore à 3 états hydriques différents

séché à l'étuve, naturel lyophilisé (w=25%), après gonflement libre et lyophilisation (w=39%)



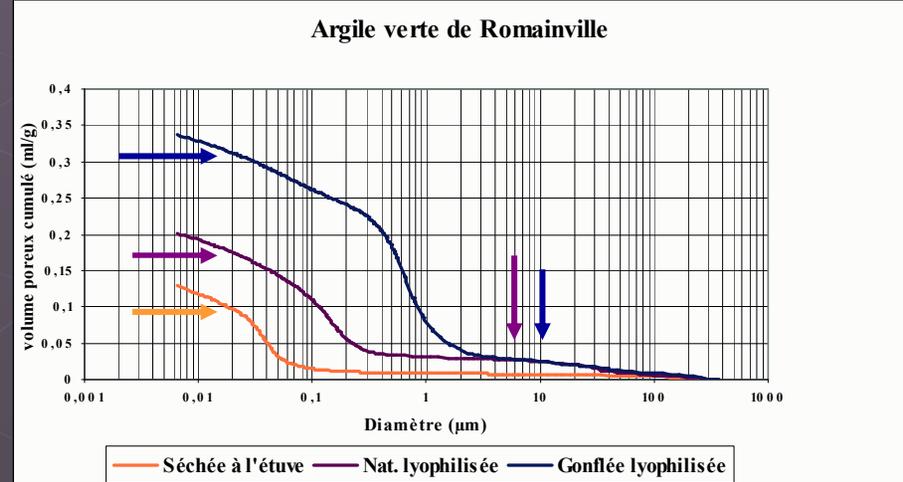
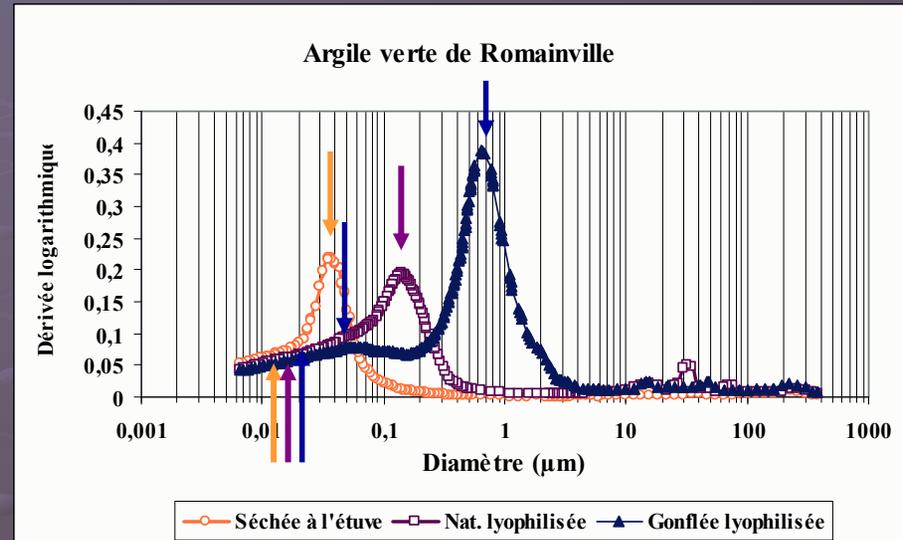
Processus du retrait gonflement à l'échelle microscopique

Au cours de l'hydratation la porosité augmente en taille et en volume par ouverture progressive des porosités inter et intraagrégat « primaire », générant ainsi des agrégats « secondaires ».

Le processus de subdivision se poursuit jusqu'à atteindre des agrégats constitués de quelques particules, initiant ainsi une famille de pores interparticulaires distinctes.

La queue de distribution commune est attribuée à la porosité intraparticulaire.

Centre de Géosciences, EMP



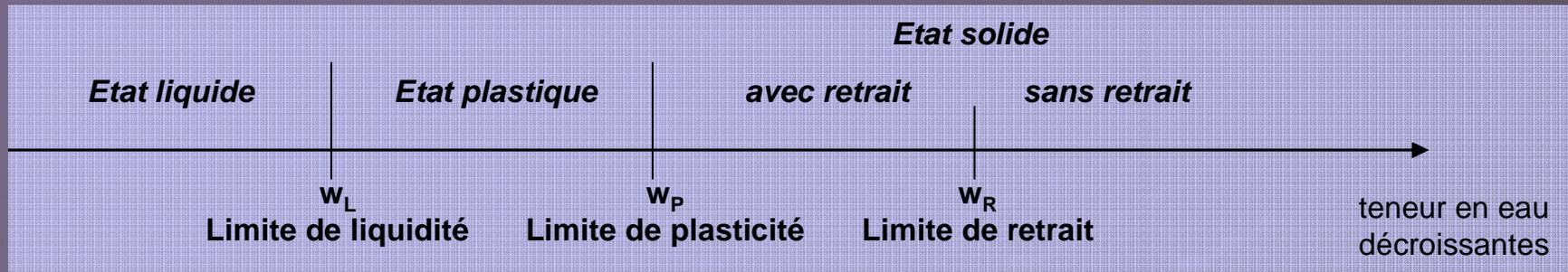
Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

- Minéralogie
- Structure
- Caractéristiques hydriques
- **Caractéristiques géotechniques**
- Caractéristiques mécaniques
- Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement

Caractérisation géotechnique

- La fraction argileuse $< 2\mu\text{m}$ possède en présence d'eau des propriétés de surface regroupées sous le terme « **activité** » (cohésion, plasticité, retrait, gonflement...)
- Ces propriétés résultent de :
 - La finesse des particules argileuses (argiles, sens granulométrique = $< 2\mu\text{m}$) \Rightarrow **grande surface spécifique externe** ;
 - La structure cristalline en feuillets des minéraux argileux (argiles, sens minéralogique = phyllosilicates) \Rightarrow **grande surface spécifique interne** (entre feuillets) ;
 - Déficit de charge électrique des surfaces \Rightarrow **adsorption de molécules d'eau** (dipôles) et **de cations** (complexe d'adsorption des sols).
- 3 essais géotechniques rendent compte de ces propriétés
 - **La mesure des limites d'Atterberg**
 - **L'essai au bleu : mesure d'adsorption du bleu de méthylène**
 - **Mesure de Capacité d'Echange Cationique (CEC)**

Limites d'Atterberg



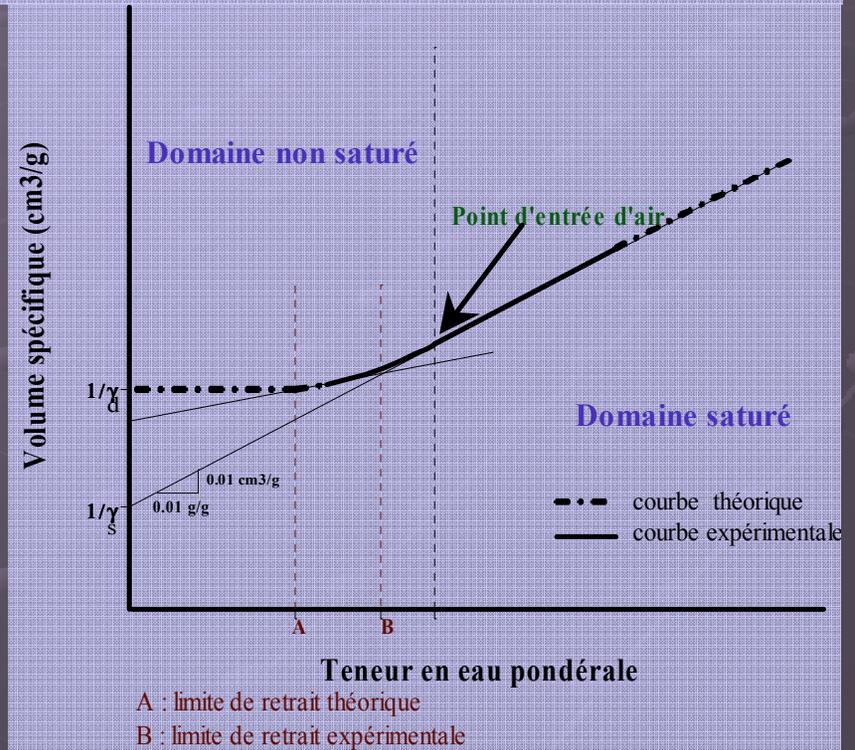
Teneurs en eau mesurées de façon conventionnelle

Indice de plasticité : $I_p = W_L - W_p$

Indice de consistance : $I_c = (W_L - W_{nat}) / I_p$

Indice de retrait : $I_R = W_L - W_R$

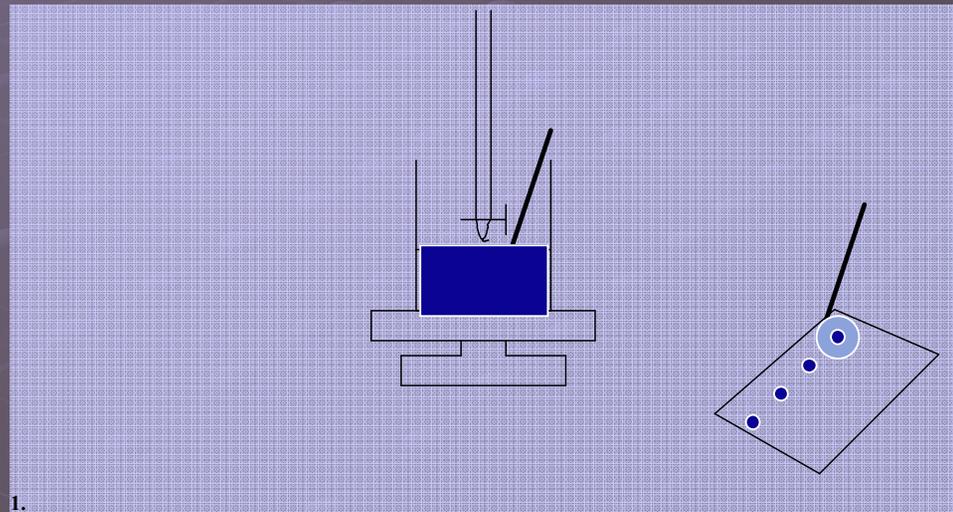
Activité de Skempton $A = I_p / \% < 2\mu m$



Essai d'adsorption de bleu de méthylène

- Mesure des surfaces spécifiques externes et internes des particules argileuses ;
- Bien adapté à la mesure d'activité ;
- Principe :
Quantité de bleu nécessaire pour couvrir d'une couche monomoléculaire les surfaces externes et internes des particules fines en suspension dans l'eau rapportée à un poids sec de sol de 100 g.

Valeur de bleu : $VBS = W_{bleu} / W_{s\ sol}$
Activité de bleu = $VBS / \% < 2\mu m$



Classifications

Limite de liquidité

w_L (%)	Classification
0 à 20	non gonflant
20 à 35	gonflement faible
35 à 50	gonflement moyen
50 à 70	gonflement élevé
70 à 90	gonflement très élevé
> 90	gonflement critique

Potentiel de gonflement d'après Dakshanamurthy et Raman (1973)

w_L (%)	Potentiel de gonflement
> 60	très élevé
40 à 60	élevé
30 à 40	moyen
< 30	faible

Potentiel de gonflement d'après Chen (1975)

Classifications

Indice de plasticité

I_p (%)	Sensibilité
< 12	Faible
12 à 25	Moyenne
25 à 40	Forte
≥ 40	Très forte

Sensibilité d'une argile au retrait-gonflement d'après Prian et al. (2000)

Indice de retrait

I_s (%)	Potentiel de gonflement
0 à 20	Faible
20 à 30	Moyen
30 à 60	Fort
> 60	Très fort

Potentiel de gonflement d'après Ranganathan et Satyanarayana (1965)

Valeur de bleu

VBS	Sensibilité
< 2,5	Faible
2,5 à 6	Moyenne
6 à 8	Forte
> 8	Très forte

Sensibilité au retrait-gonflement d'après Chassagneux et al (1996)

Classifications

w_s (%)	w_L (%)	I_P (%)	Potentiel de gonflement
7 à 12	50 à 70	25 à 35	fort
10 à 15	35 à 50	15 à 25	moyen
> 15	20 à 35	< 18	faible

*Potentiel de gonflement
d'après Holtz et al. (1973)*

I_P (%)	% < 2 μm	Potentiel de gonflement
> 35	> 95	très élevé
22 à 35	60 à 95	élevé
18 à 22	30 à 60	moyen
< 18	< 30	faible

*Potentiel de gonflement
d'après BRE (1980)*

Classifications

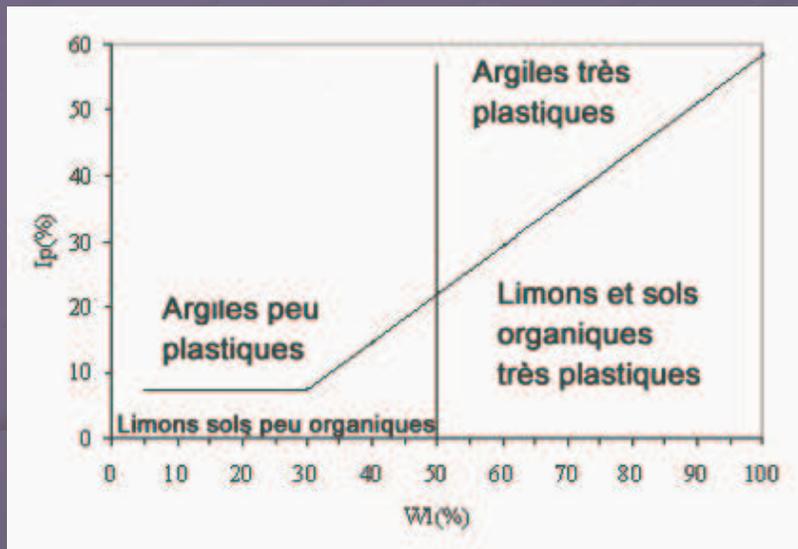
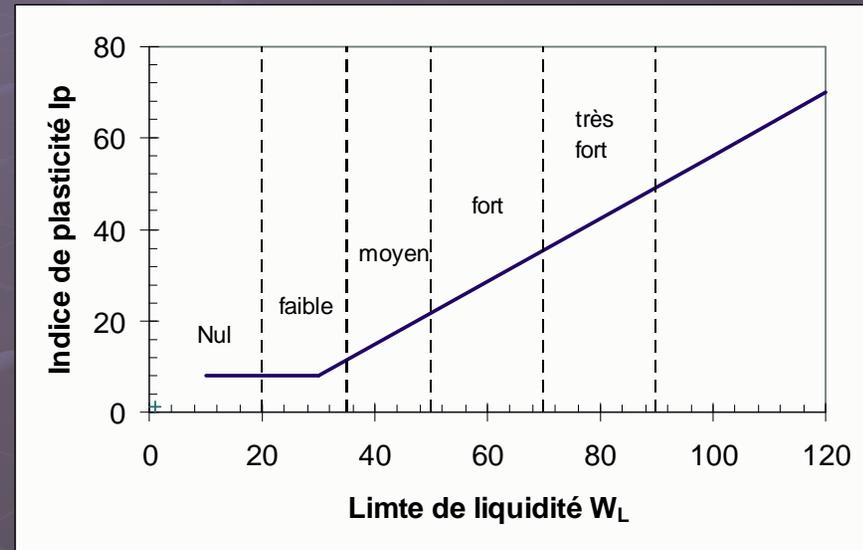


Diagramme de plasticité de Casagrande



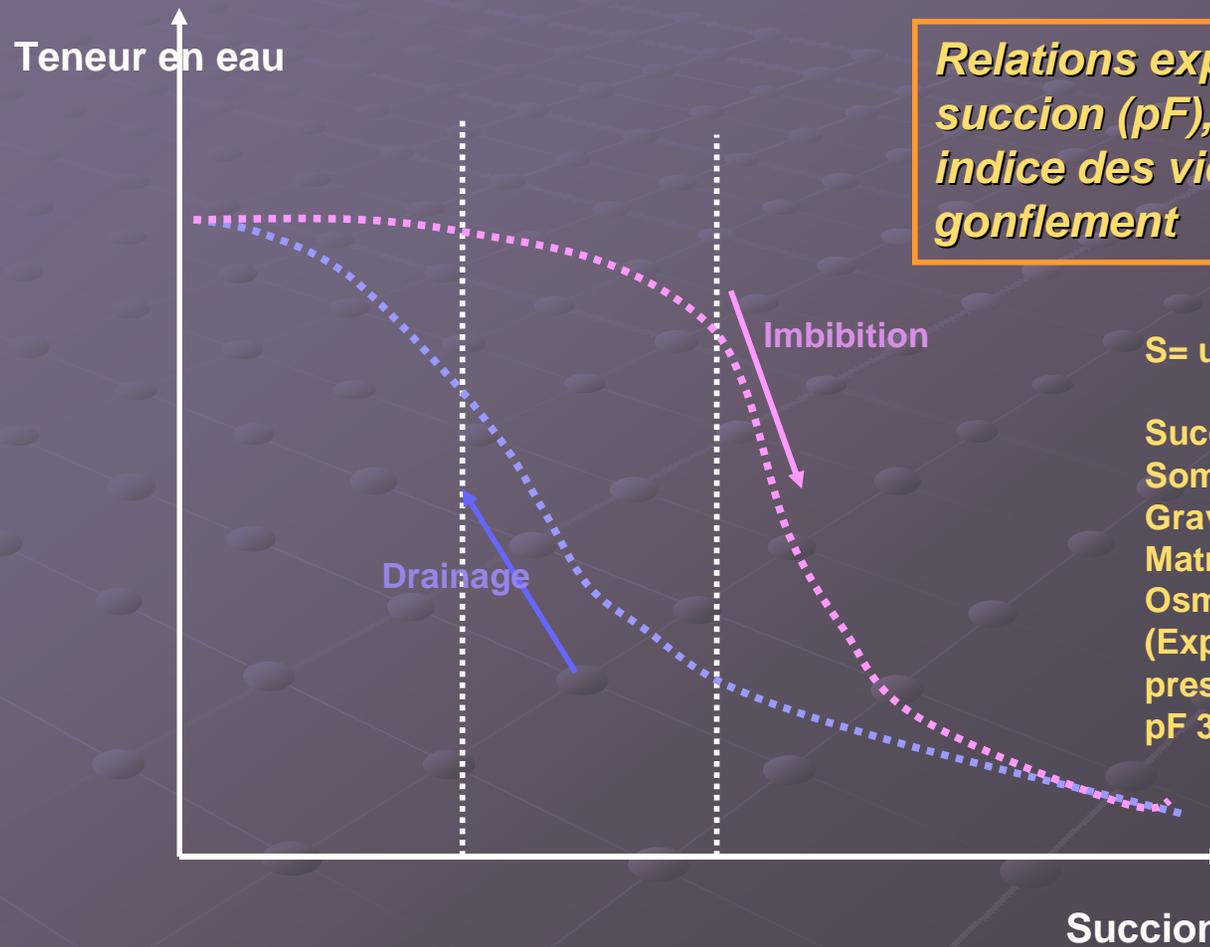
Charte du potentiel de gonflement des sols
(Daksanamurthy et al, 1973)

Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

- Minéralogie
- Structure
- Caractéristiques géotechniques
- **Caractéristiques hydriques**
- Caractéristiques mécaniques
- Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement

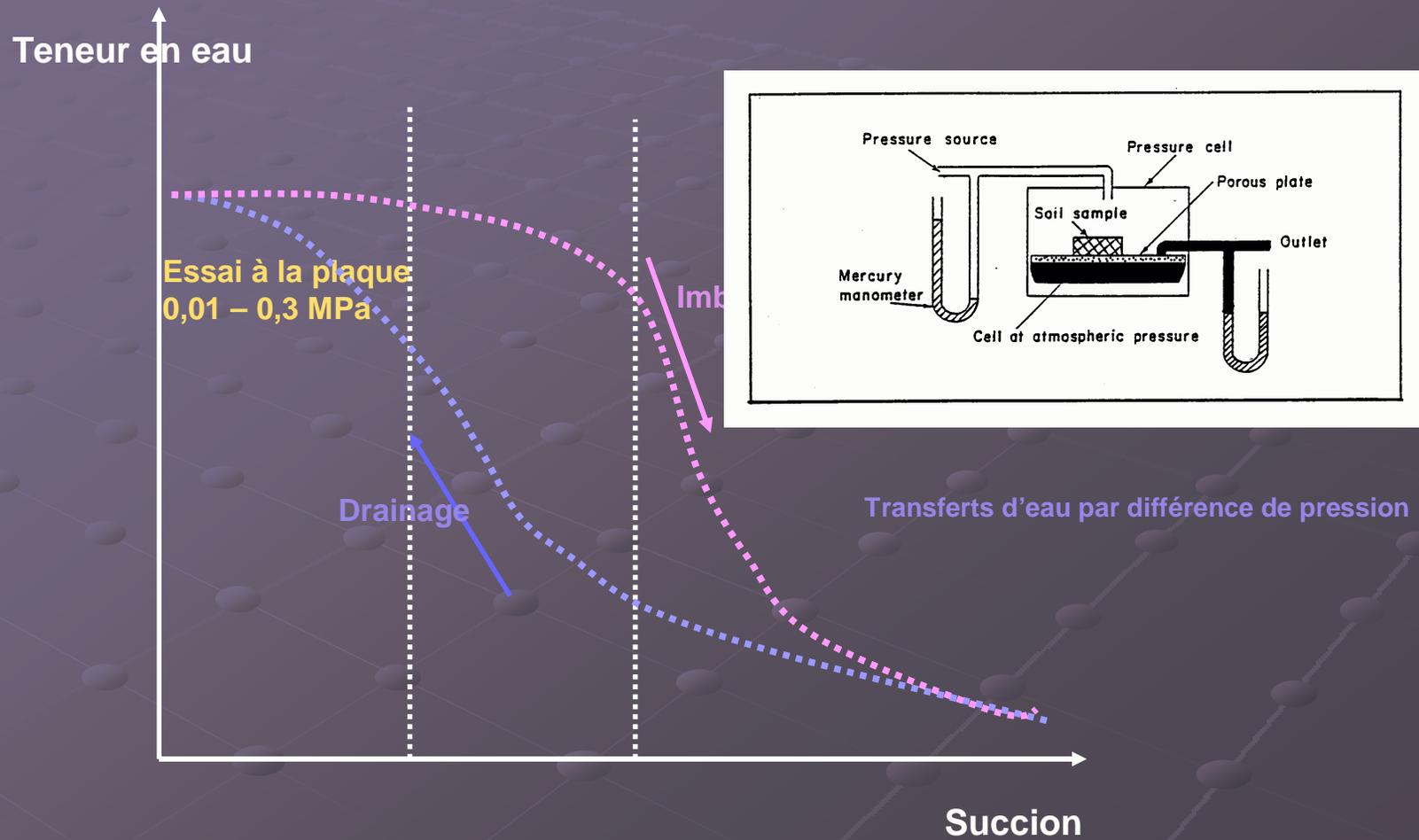
Courbes de rétention d'eau

Méthodes et domaines des succions appliquées



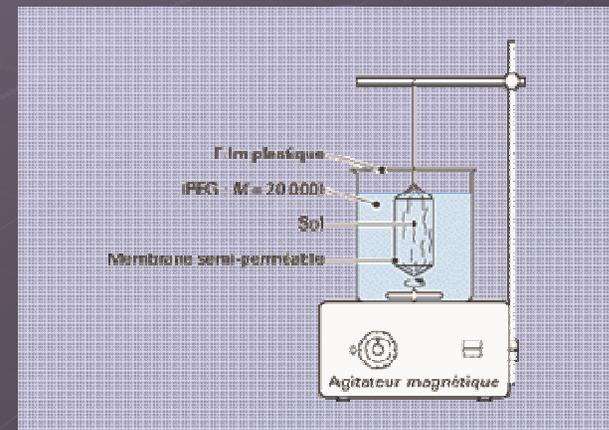
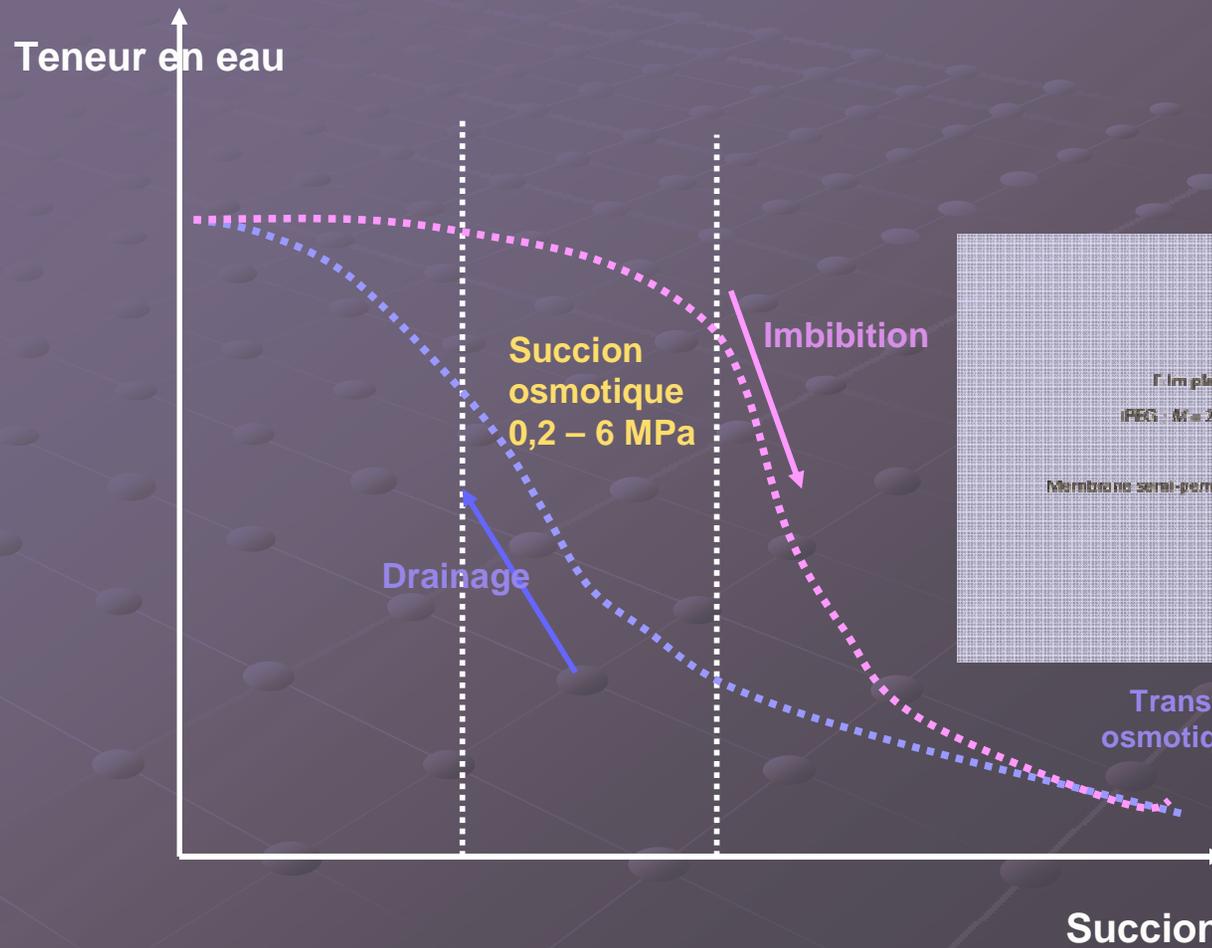
Courbes de rétention d'eau

Méthodes et domaines des succions appliquées



Courbes de rétention d'eau

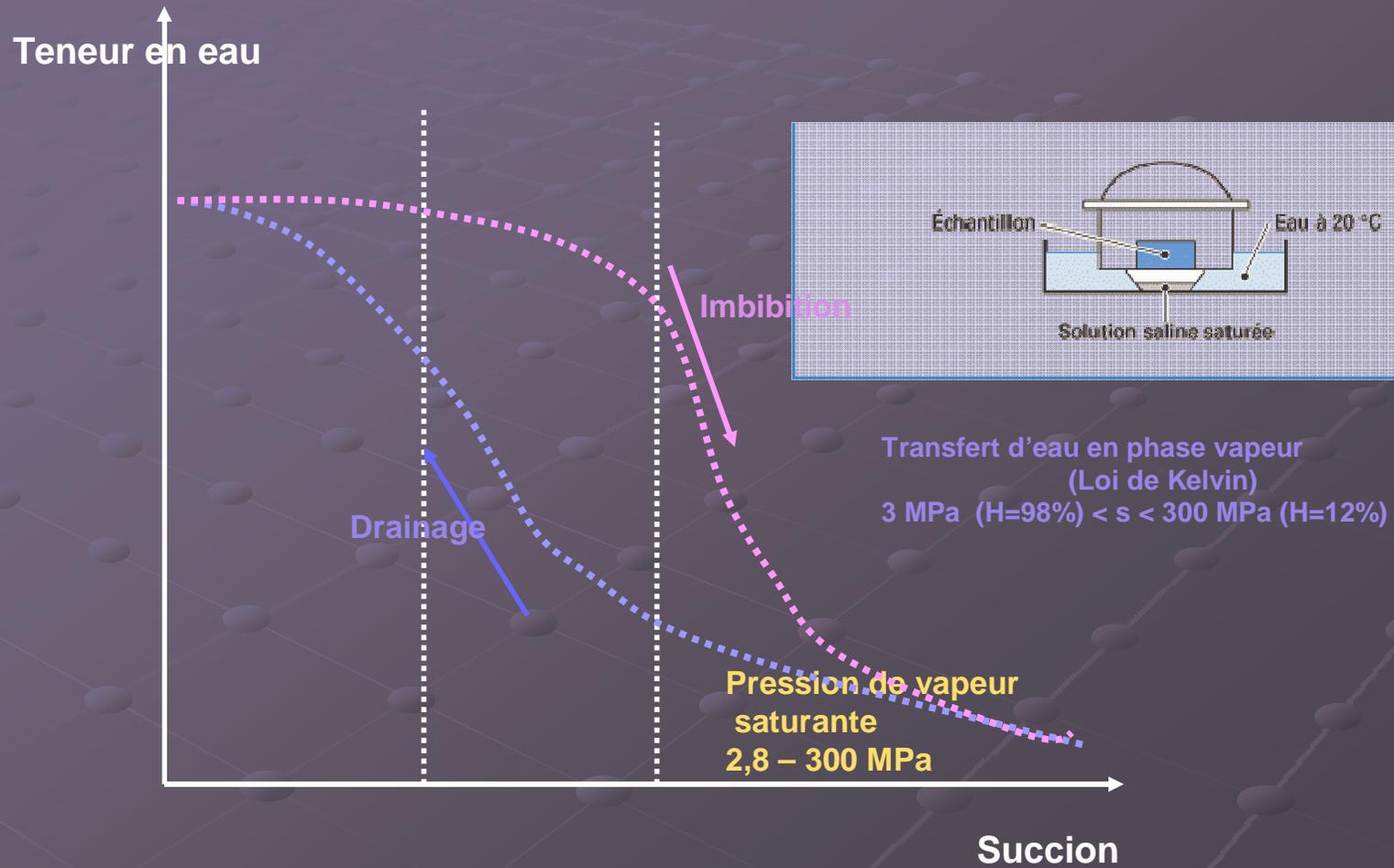
Méthodes et domaines des succions appliquées



Transfert d'eau par phénomène osmotique à travers une membrane semi-perméable ($s < 3$ MPa)

Courbes de rétention d'eau

Méthodes et domaines des succions appliquées



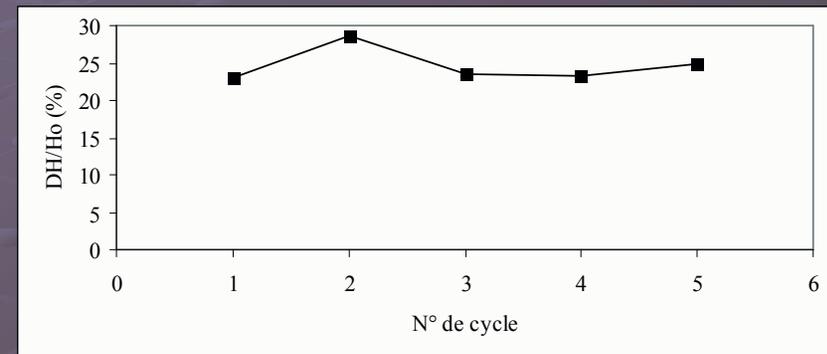
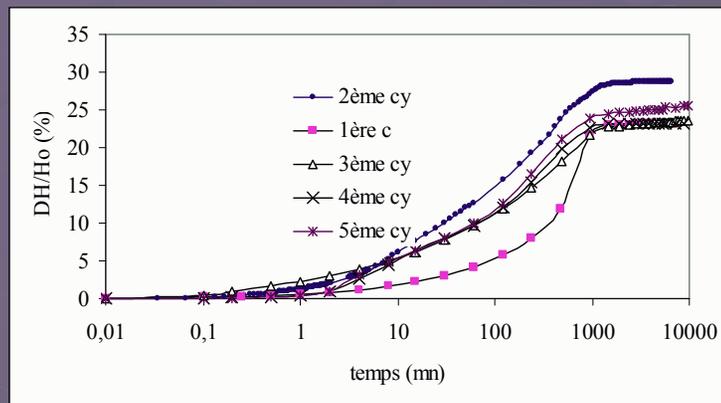
Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

- Minéralogie
- Structure
- Caractéristiques géotechniques
- Caractéristiques hydriques
- **Caractéristiques mécaniques**
- Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement

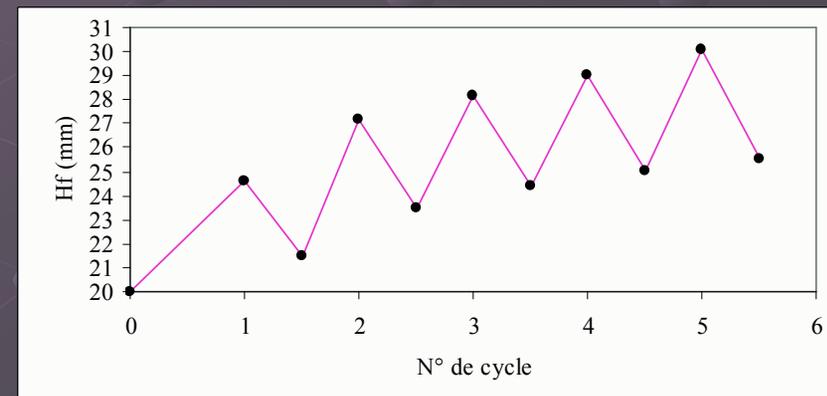
Sollicitations hydriques cycliques

Cycles imbibition-séchage complets

Argile verte de Romainville

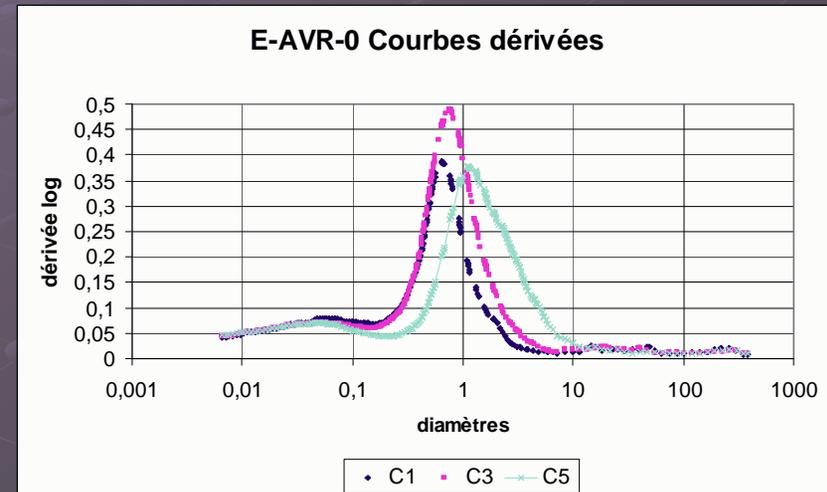
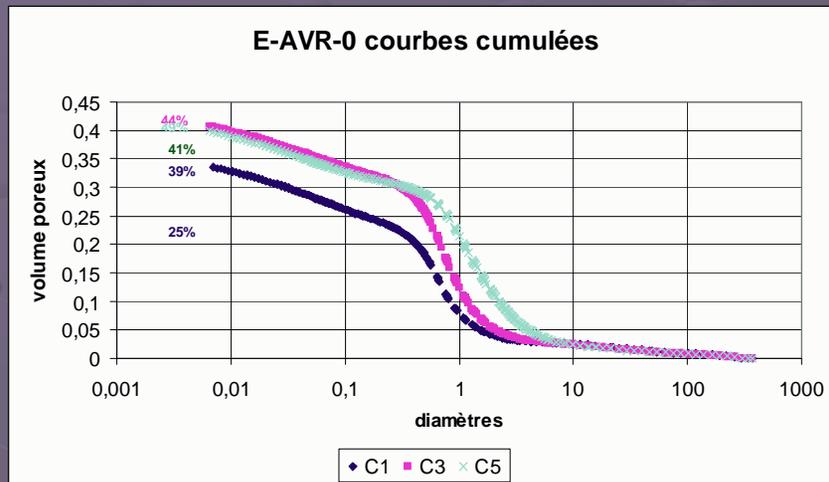


- Le taux de gonflement du cycle 1 est contrôlé par W_o ;
- La fissuration est responsable de la déformation maximale et de la cinétique plus rapide du cycle n°2 ;
- Stabilisation de la déformation à partir du cycle 3 ;
- Déformation retrait-gonflement n'est pas entièrement réversible \Rightarrow évolution structurale.



Evolution structurale au cours des cycles humectation-dessiccation

Argile verte de Romainville



Centre de Géosciences, EMP

Aptitude au retrait-gonflement des sols argileux

- Minéralogie
- Structure
- Caractéristiques géotechniques
- Caractéristiques hydriques
- Caractéristiques mécaniques
- **Facteurs de prédisposition au phénomène du retrait - gonflement**

Facteurs de prédisposition au phénomène de retrait -gonflement

- Granularité du sol
- Nature minéralogique des argiles (présence de smectites)
 - Limites d'Atterberg,
 - Valeur de bleu,
 - Surface spécifique, CEC
- Présence d'autres minéraux non argileux
- Structure
- Etat initial (w%, succion, indice des vides, poids volumique)
- Etat de consolidation du sol (normalement consolidé ou surconsolidé)
- L'ensemble de ces facteurs interdépendants permet d'appréhender l'aptitude du sol au phénomène de retrait-gonflement
 - Taux de gonflement,
 - Pression de gonflement