



Journée Scientifique & Technique du 25 octobre 2018
CNAM, 292 rue Saint-Martin 75003 Paris, Amphi J-B Say

Microstructure des géomatériaux argileux
– conséquences pour l'ingénieur



Microstructure des sols et roches argileux gonflants

Cas des sols de la région parisienne

Pierre Delage

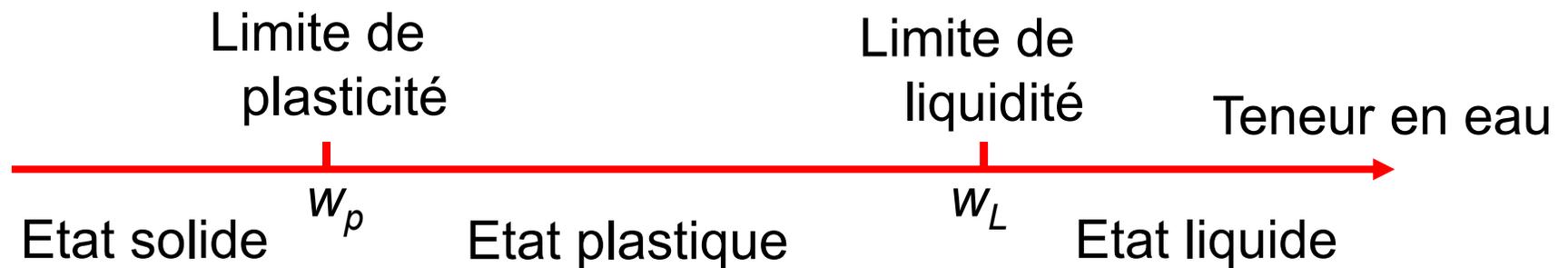
Ecole des Ponts ParisTech, Laboratoire Navier/CERMES, France

En lien avec les travaux du Groupe de travail CFMS :
« Prise en compte du gonflement des terrains argileux
pour le dimensionnement des ouvrages d'infrastructure »
(Animation H. Le Bissonais et J.F. Serratrice)

Qu'est-ce qu'un sol gonflant ?

- Montmorillonite (smectites) dans la fraction argileuse
(autres sources de gonflement possibles, non considérées ici : gypse, anhydrite,...)
- Surconsolidé (région parisienne) et plastique

Limites d'Atterberg



Indice de plasticité

Quantité d'eau nécessaire pour faire passer
de l'état solide à l'état liquide

Interaction eau-argile

Minéralogie – surface spécifique

Quand est-ce qu'un sol gonfle ?

En équilibre à l'état initial sous contrainte en place, les sols gonflants *ne gonflent pas*.

Gonflement dû à un :

- Changement de l'état de contrainte (excavation, creusement,...), plutôt rapide
- Avec apport d'eau,
 - différé (faible perméabilité du sol)
 - rapide (apport accidentel)

Construction des ouvrages

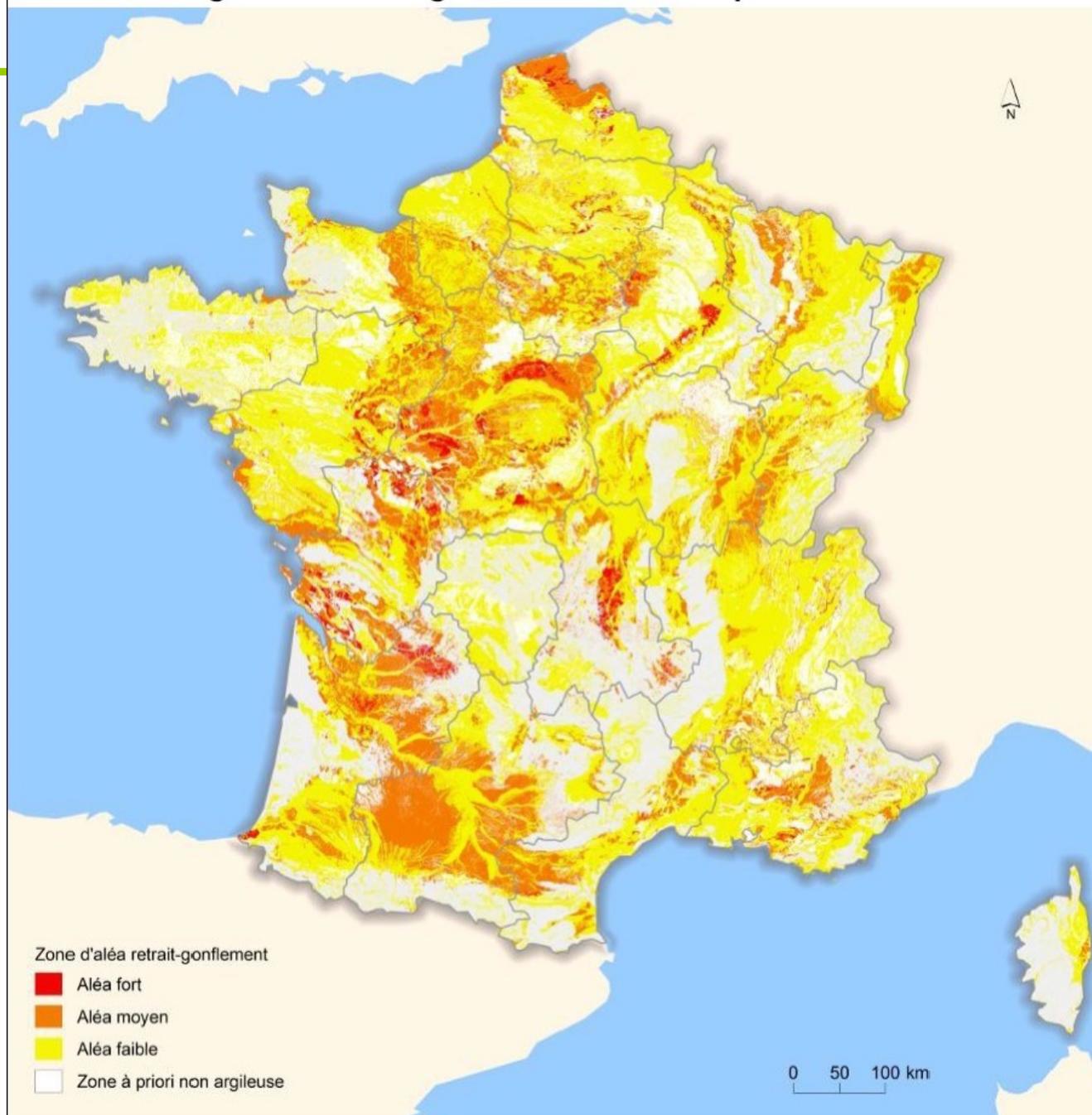
- radiers
- paroi moulées (?)

Maisons individuelles et sécheresse : rétraction - gonflement (même type de sols)

L'aléa retrait-gonflement d'argiles en France métropolitaine



École des Ponts
ParisTech



Source : ©BRGM, 2013. Traitements : SoeS, 2013

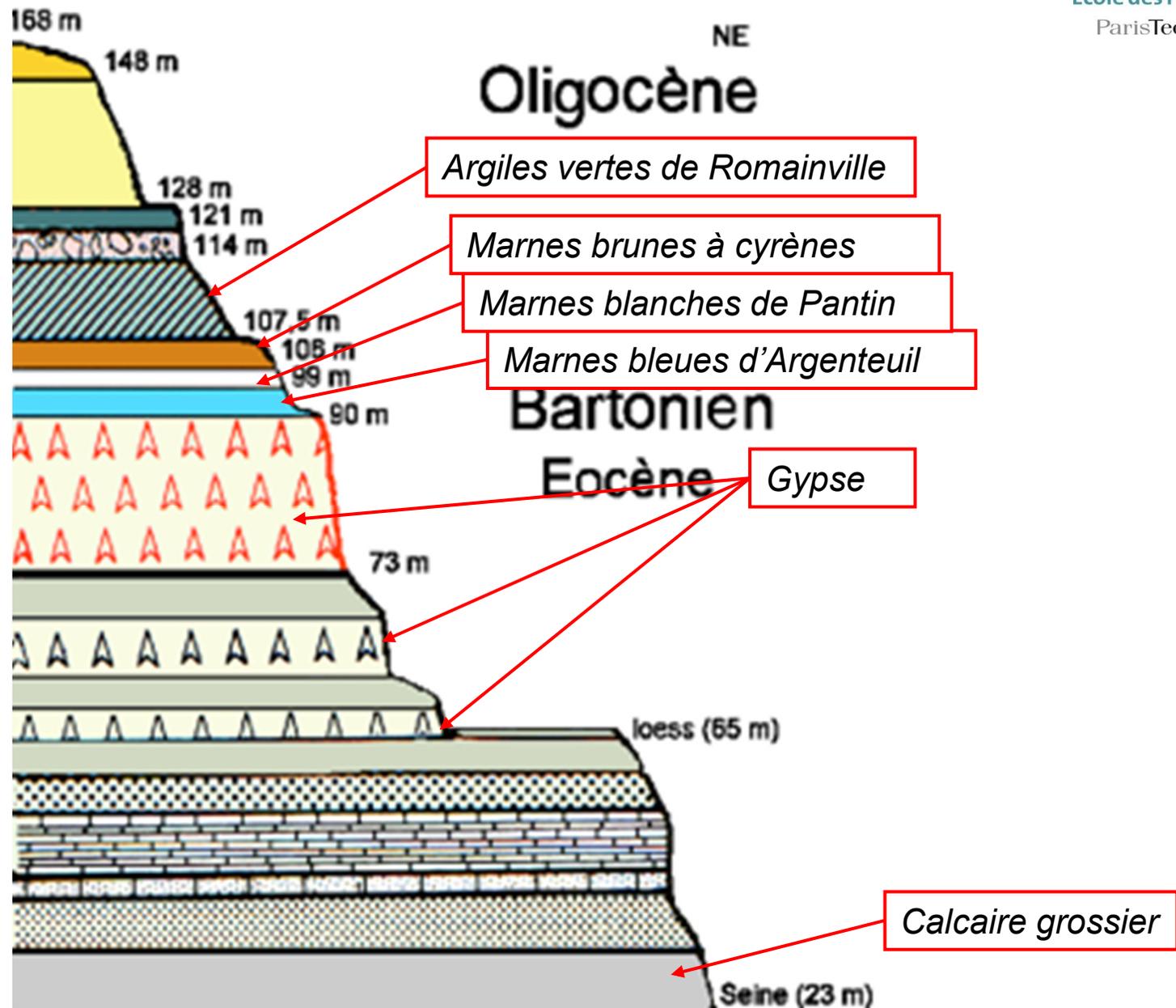
Région parisienne (Essonne)

N° ordre	Notation	Nom de la formation lithologique	Note lithologique	Note minéralogique	Note géotechnique	Note finale	Degré de susceptibilité
1	C/g1SF	Colluvions sur Sables de Fontainebleau	2	-	2	2,00	Faible
2	CF	Colluvions de versants et de fonds de vallons	2	-	3	2,50	Moyen
3	CE	Colluvions polygéniques	3	-	3	3,00	Moyen
4	LP	Limons des plateaux	2	2	2	2,00	Faible
5	Rfv/g1CB	Argiles à meulière de Brie	3	3	3	3,00	Moyen
6	p-IVMM	Argiles à meulière de Montmorency	3	2	3	2,67	Moyen
7	T	Dépôts tourbeux	3	-	2	2,50	Moyen
8	Fz	Alluvions récentes	2	1	2	1,67	Faible
9	Fv-w-x-y	Alluvions anciennes	1	1	1	1,00	Faible
10	PL	Sable de Lozère	2	2	3	2,33	Moyen
11	m1MG	Molasse du Gâtinais	3	3	3	3,00	Moyen
12	g1MH	Marnes à huîtres	4	3	3	3,33	Fort
13	g1CB	Calcaire de Brie et Argiles à meulière de Brie	2	2	2	2,00	Faible
14	g1AR	Glaises à Cyrènes et Argile verte de Romainville	4	4	4	4,00	Fort
15	e7MC	Marnes ludiennes (faciès de transition)	4	3	3	3,33	Fort
16	e7MS	Marnes supragypseuses	4	3	3	3,33	Fort
17	e7G	Marnes associées aux masses du gypse et Calcaire de Champigny	2	3	3	2,67	Moyen
18	e4SG	Sables et grès de Breuillet					
19	e4APS	Argile plastique et argiles sableuses de l'Yprésien					
20	e2CrBE	Marnes de Meudon	1	3	2	2,00	Faible
21	RC	Argile à silex et craie blanche à silex	3	3	3	3,00	Moyen

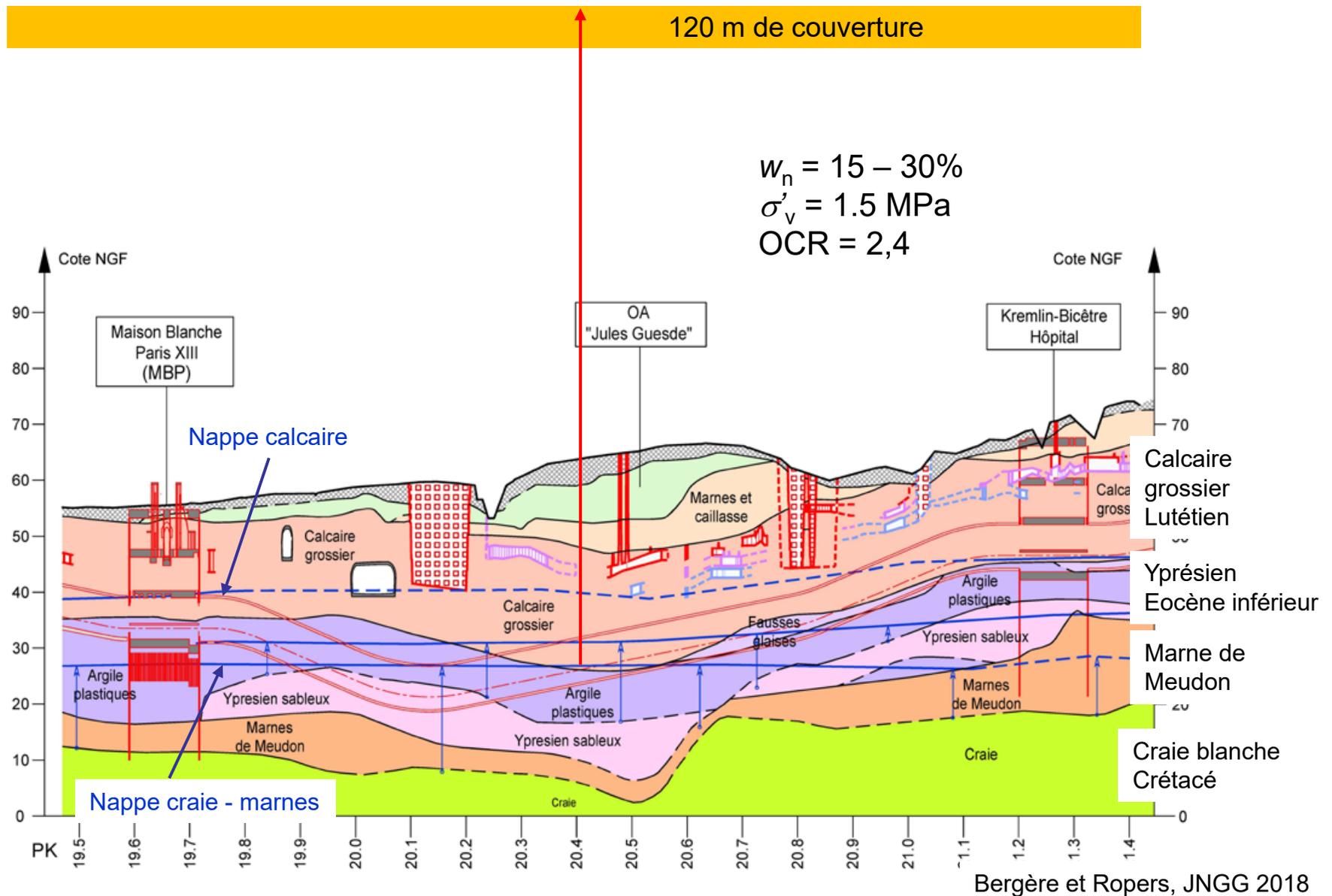
Thèse Zemenu (2009)

Les argiles plastiques de l'Yprésien et leur comportement capricieux, Bergère et Ropers, JNGG 2018

Carrières de gypse de Cormeilles en Parisis

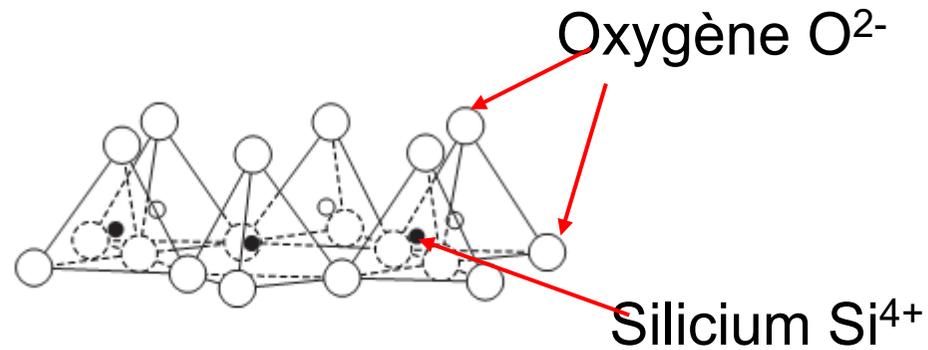


Ligne 14 sud : Maison blanche - Kremlin-Bicêtre

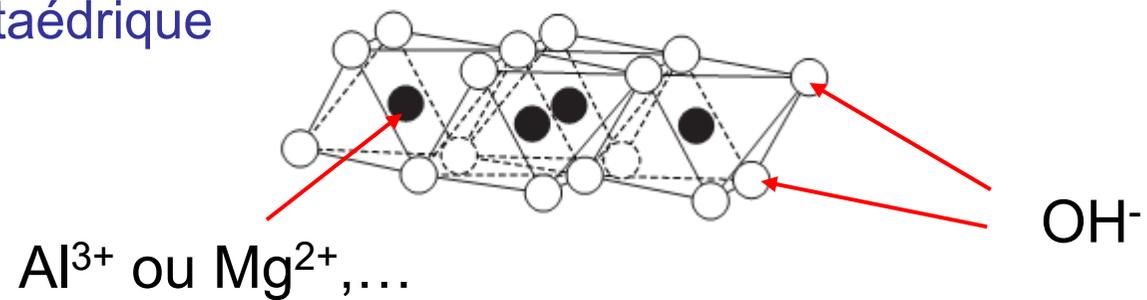


Minéraux argileux

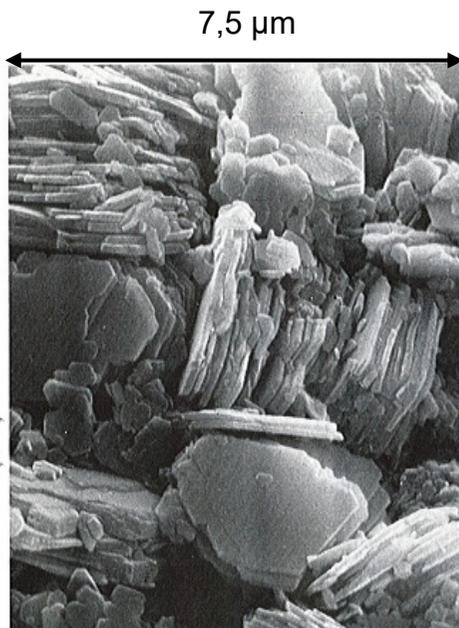
Couche tétraédrique



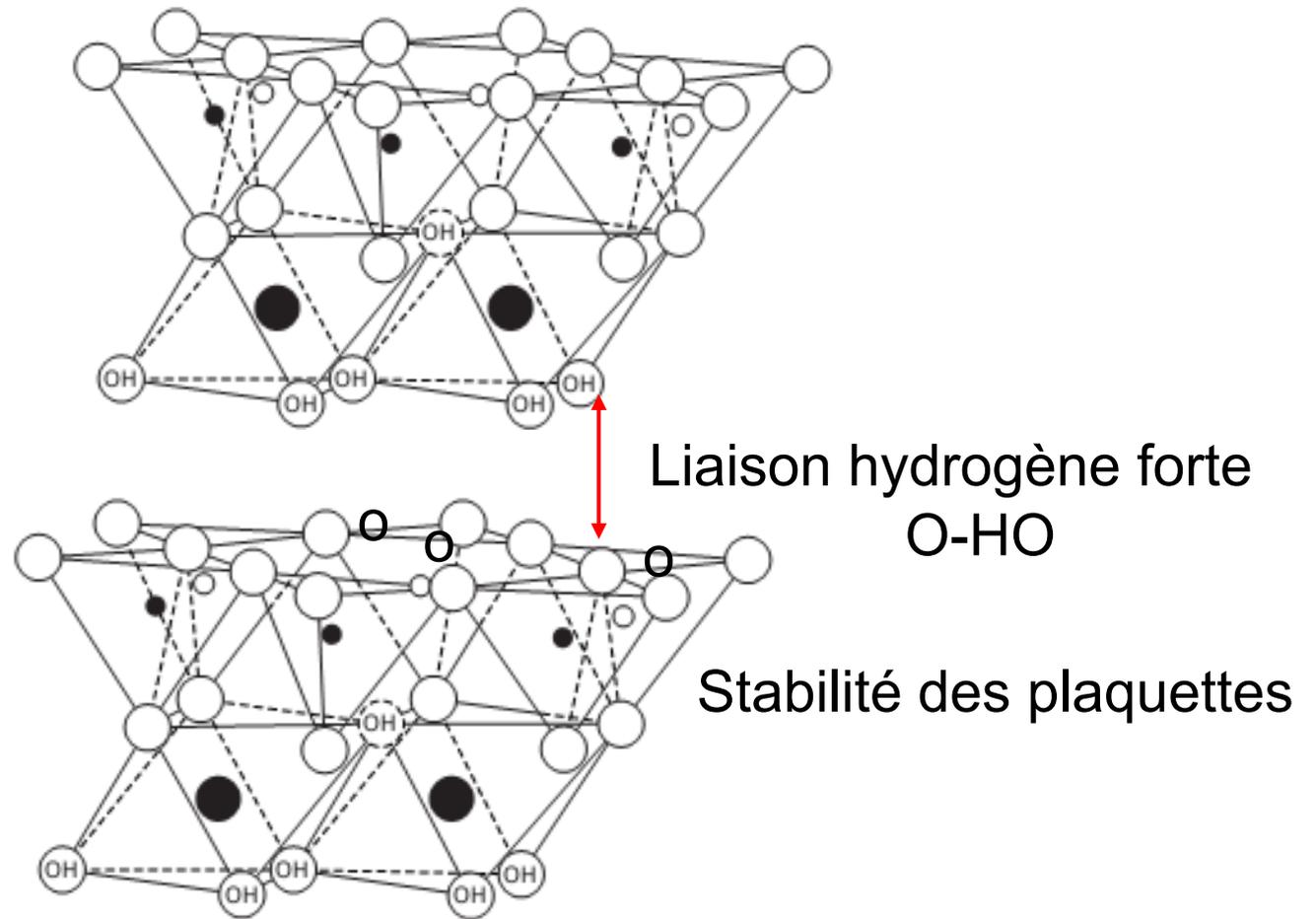
Couche octaédrique



Kaolinite

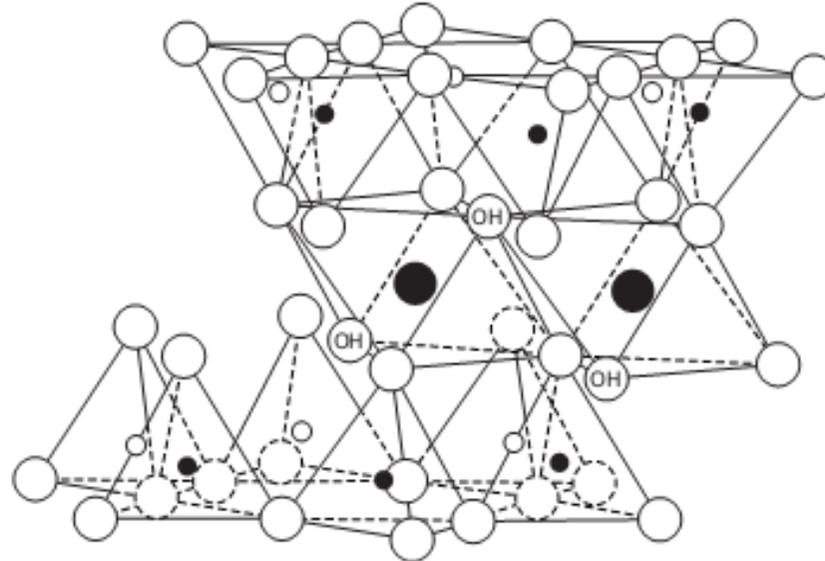


Tovey 1971, in Mitchell & Soga 2005

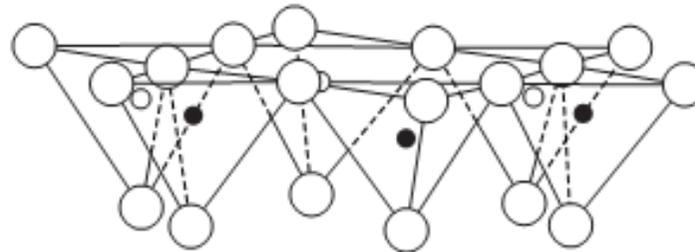


Smectite (montmorillonite) : 1 octa et 2 tétra

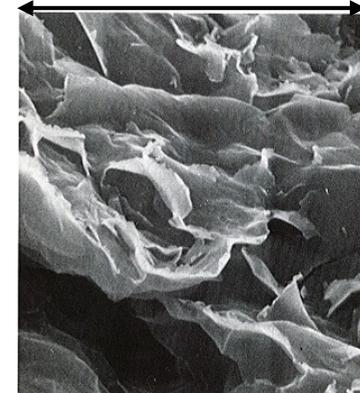
9.6 Å = 0.96 nm
à l'état sec



cations échangeables (Ca^{++} , Na^+ pour compenser le déficit électrique)



7,5 µm

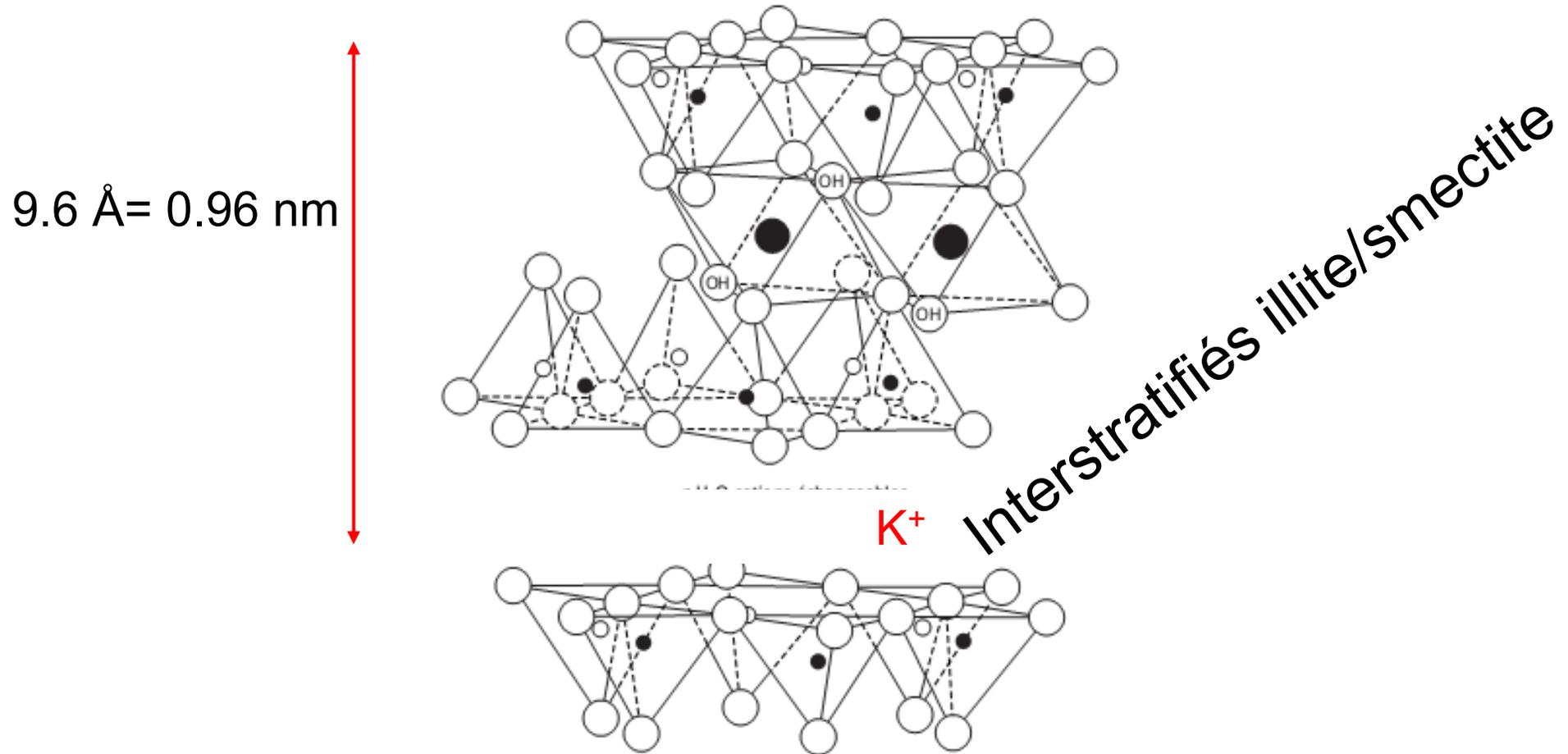


Suspension de smectite
Tovey 1971, in Mitchell & Soga 2005

Molécules d'eau autour des cations: hydratation
PLAQUETTES INSTABLES : GONFLEMENT INTERFOLIAIRE

D'après Mitchell and Soga (2005)

Illite : 1 octa et 2 tétra + lien K⁺

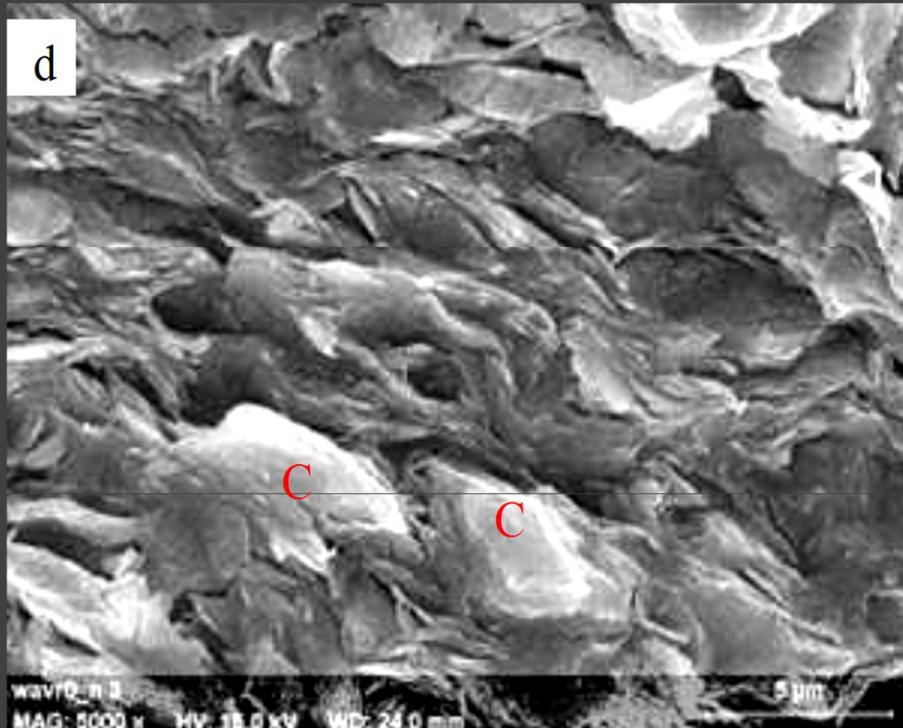


Assemblage fixe, mica analogue (muscovite)

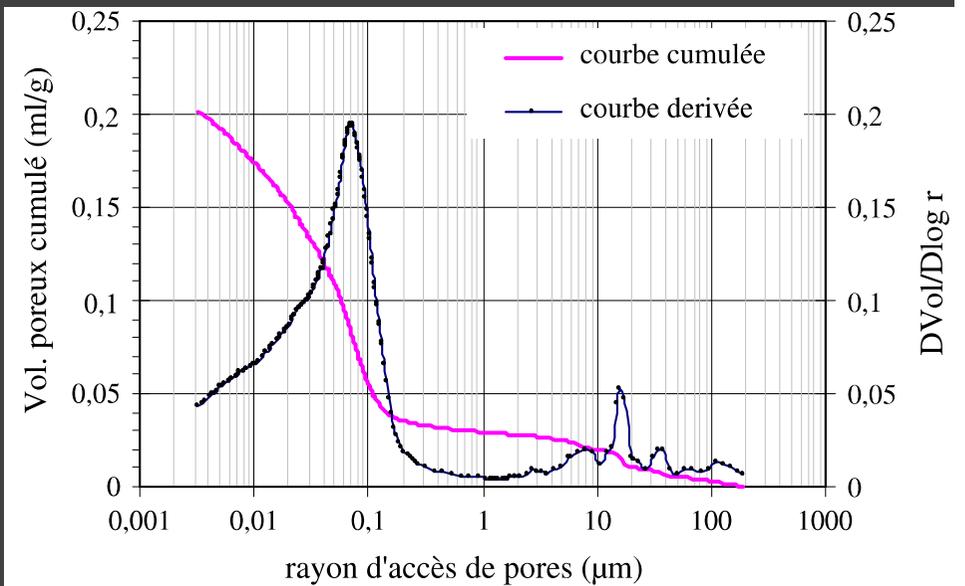
Analyses minéralogiques (Zemenu 2009)

- Argile verte de Romainville
 - Illite : +++ (très abondant) 25%
 - Kaolinite : ++ (abondant) 10%
 - Smectite et interstratifiés illite/smectite : ++ 18%
 - Carbonates : 9 – 22%
- Marne bleue d'Argenteuil
 - Illite : +++
 - Kaolinite : +
 - Smectite et interstratifiés illite/smectite : ++
 - Carbonates : 20 – 64%

Argile de Romainville : microstructure



Etat naturel, ($w = 29,8\%$)

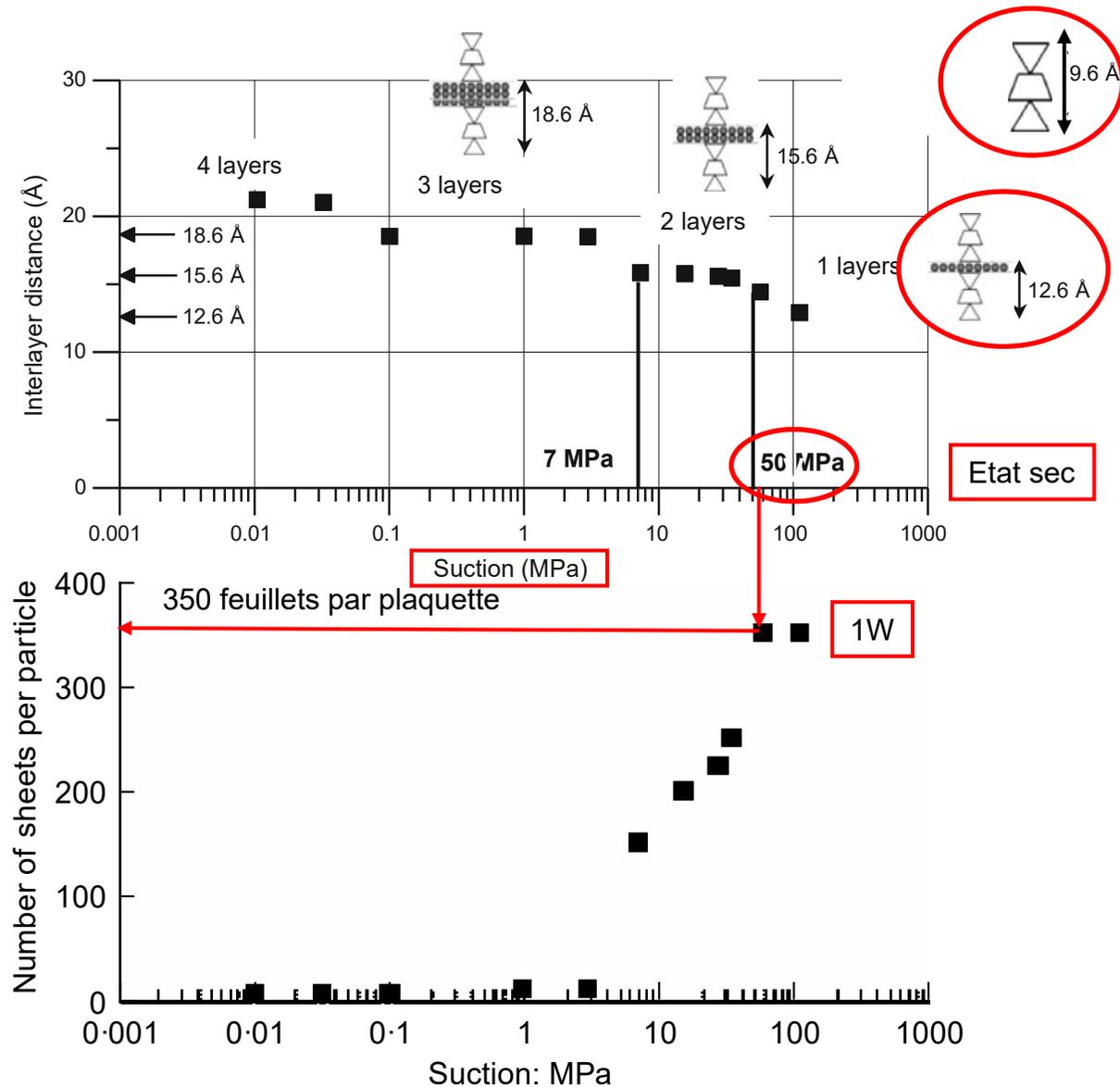


Mécanismes de gonflement

- Cristallin : intra particulaire
- Osmotique : inter particulaire

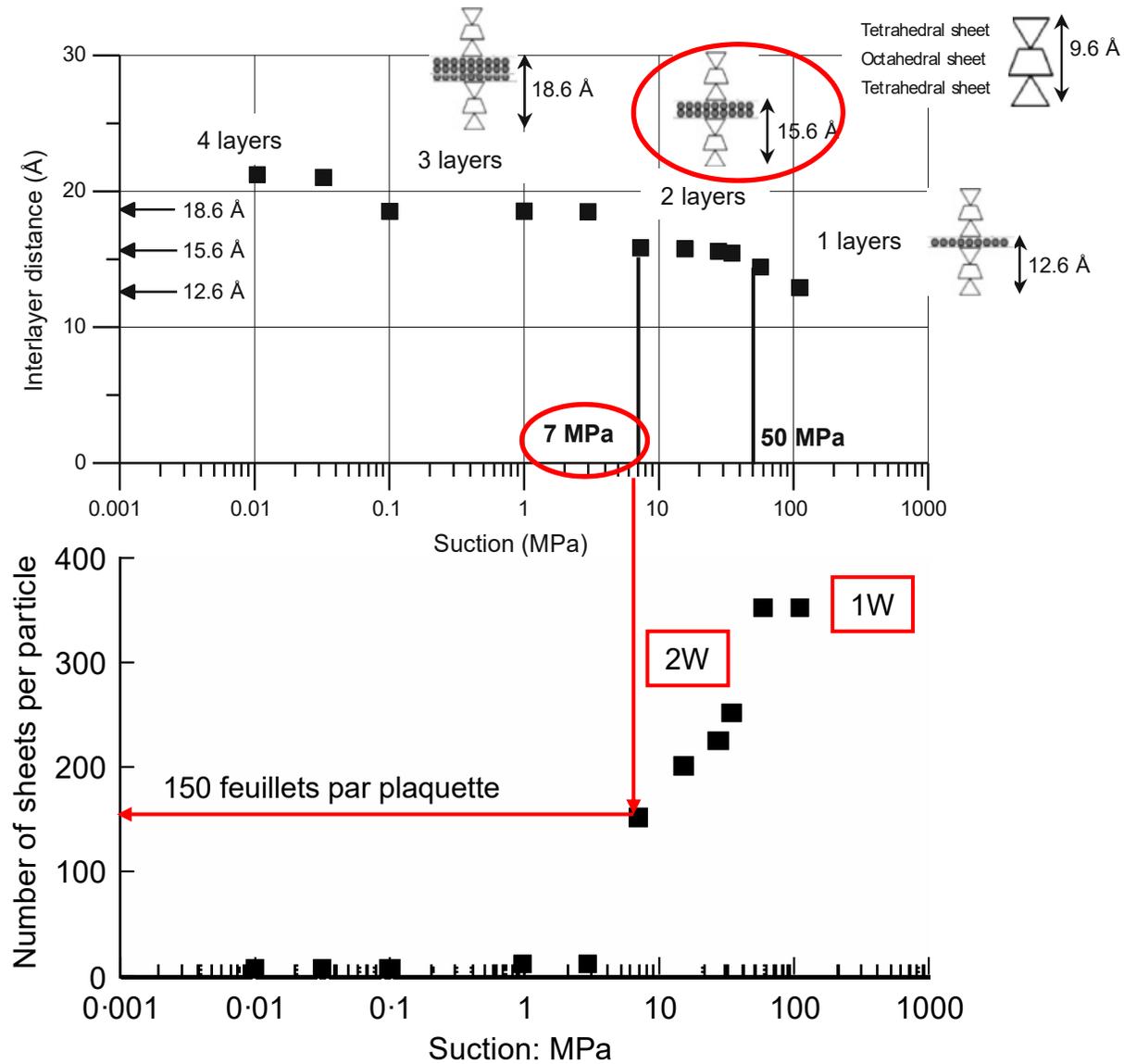
Hydratation d'une montmorillonite compactée MX80

Gonflement cristallin, intra-particulaire



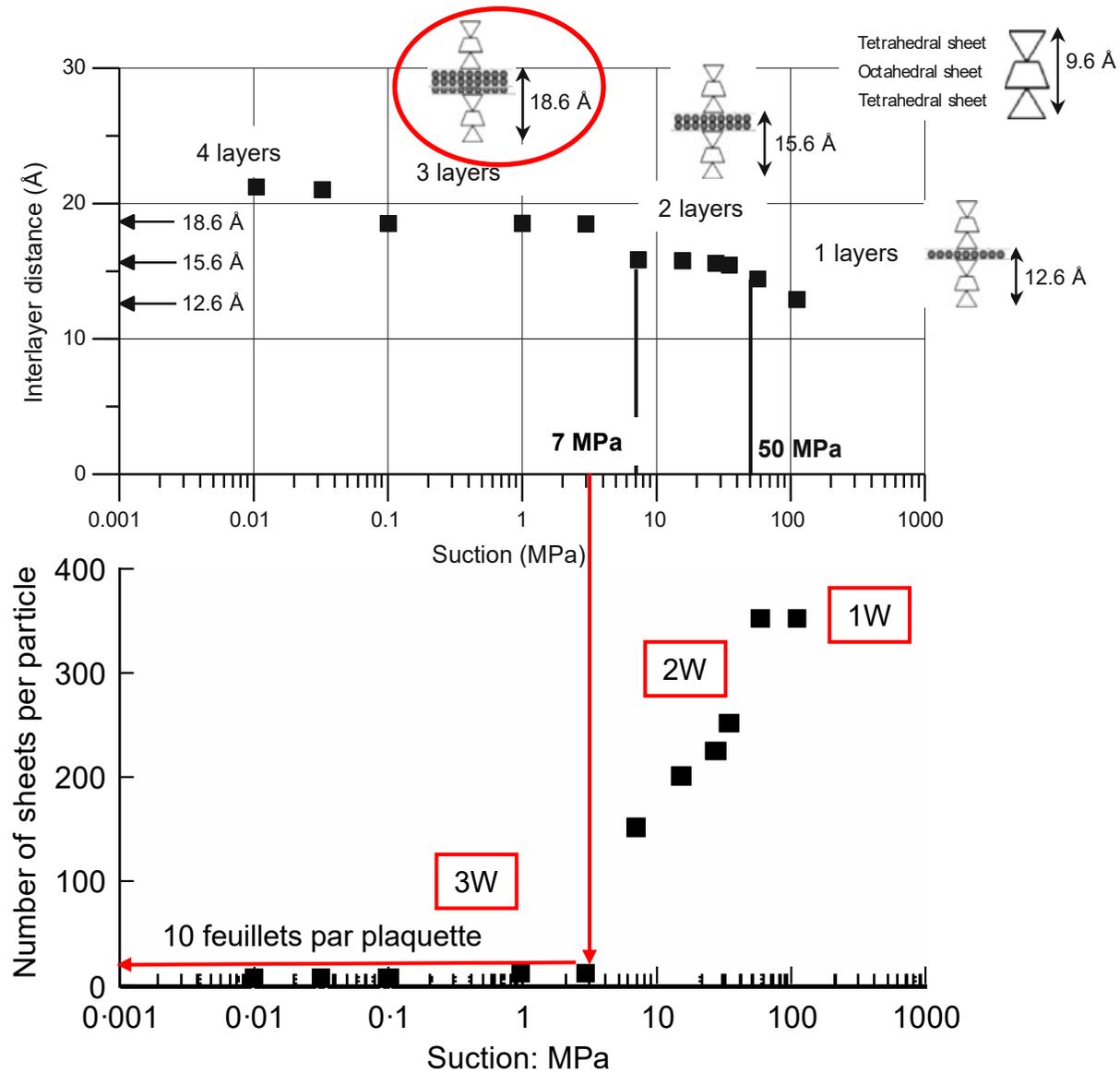
D'après Sayiouri, Tessier and Hicher 2004

Gonflement cristallin



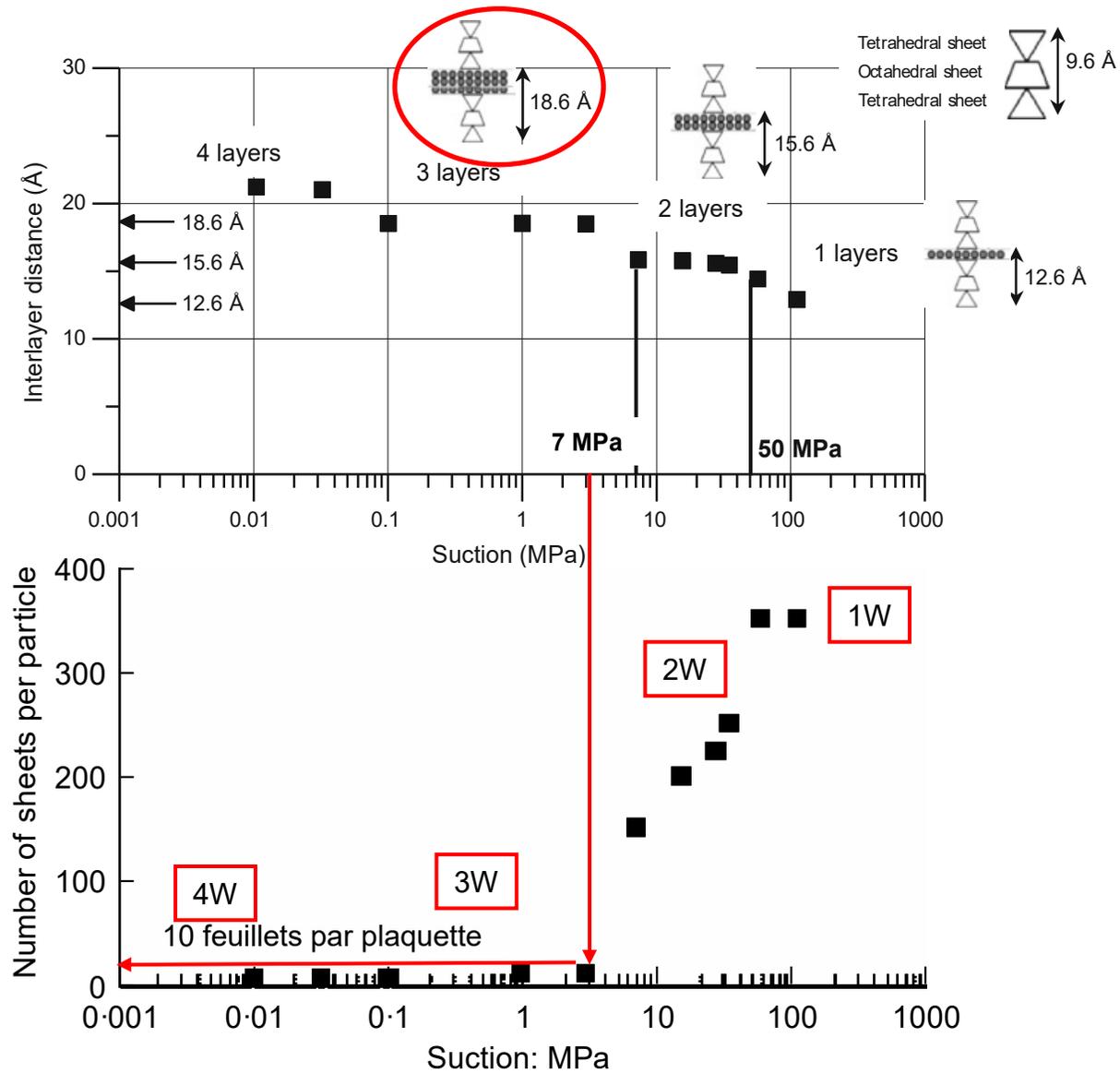
D'après Sayiouri, Tessier and Hicher 2004

Gonflement cristallin



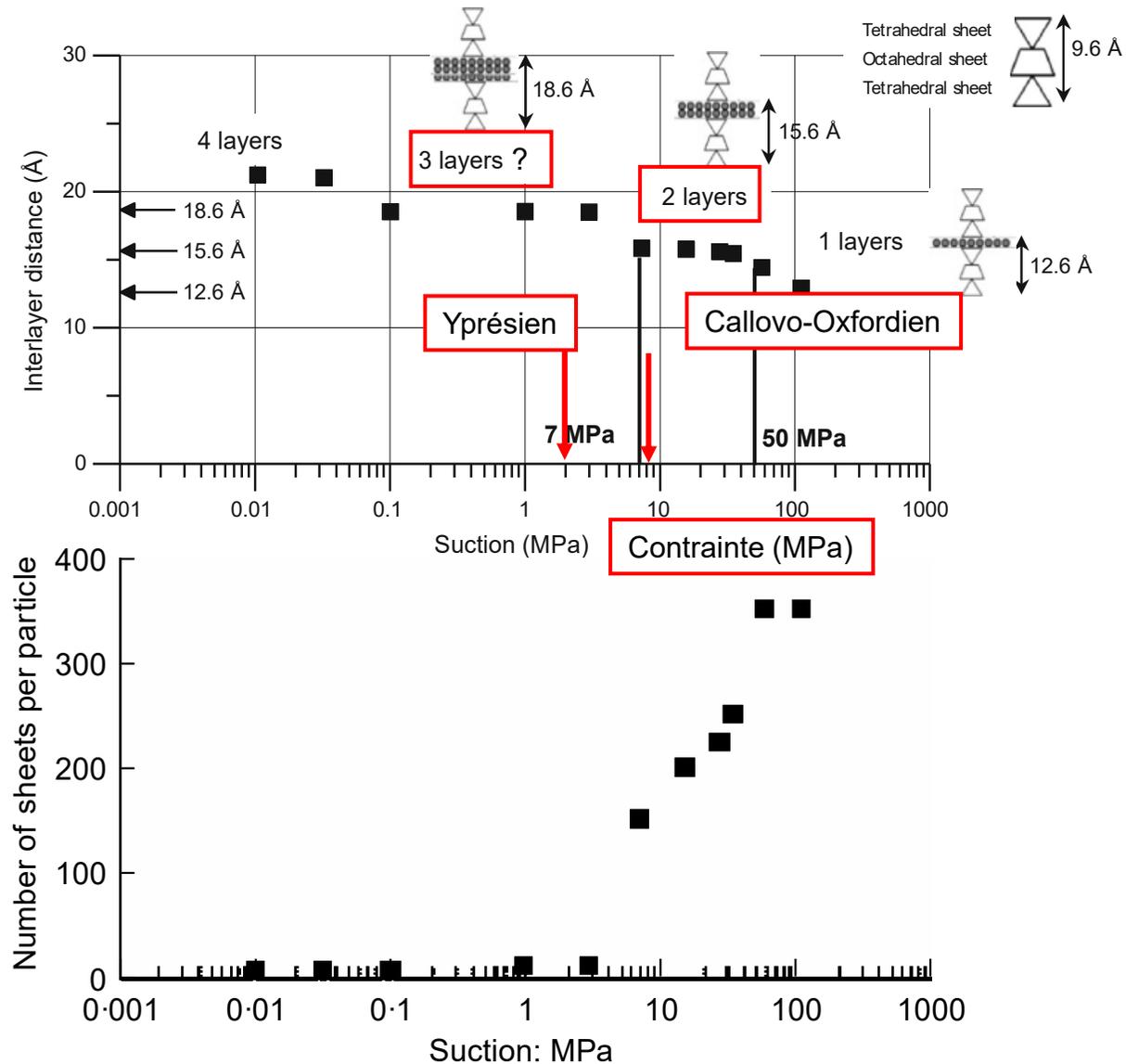
D'après Sayiouri, Tessier and Hicher 2004

Gonflement cristallin



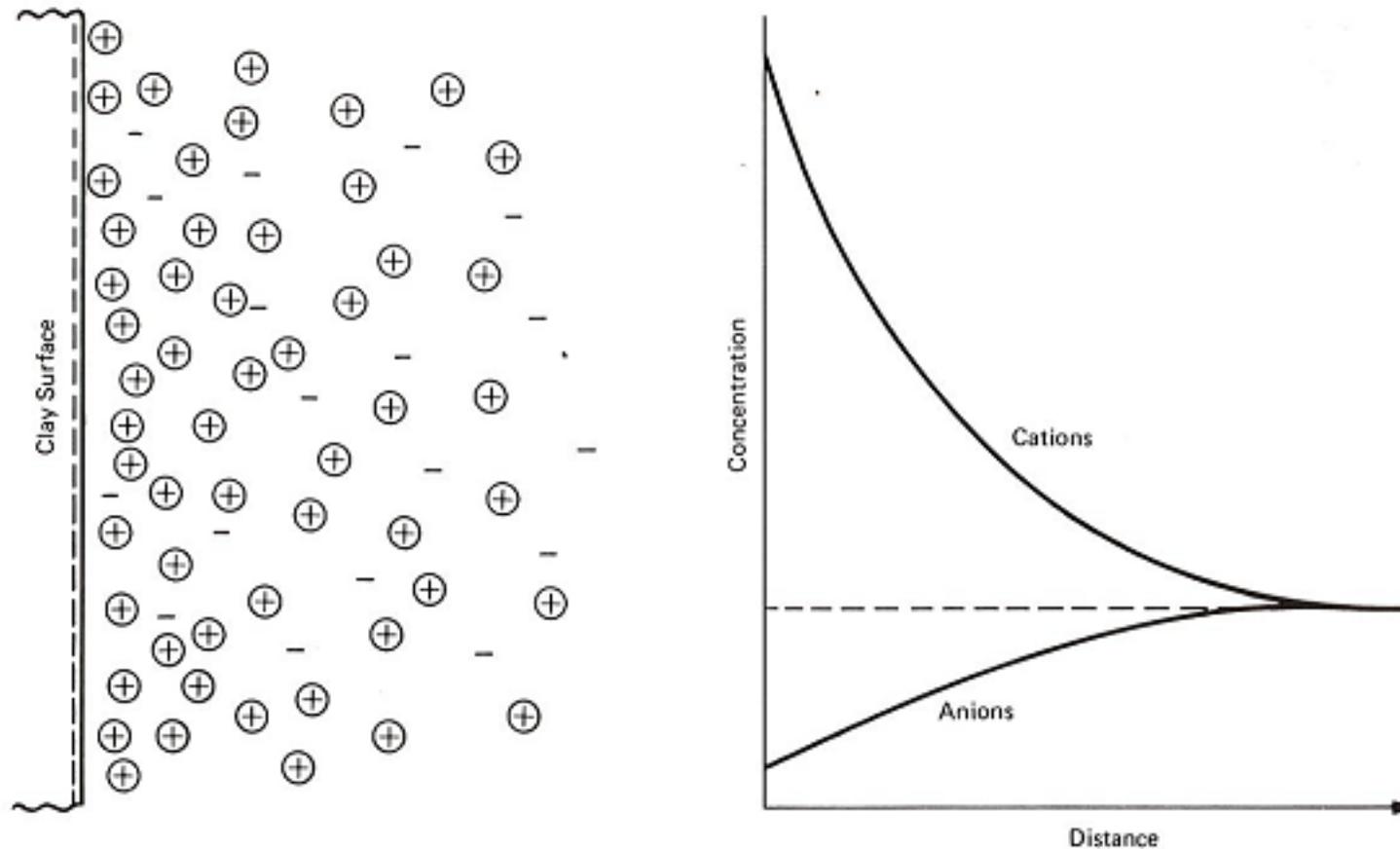
D'après Sayiouri, Tessier and Hicher 2004

Gonflement cristallin : extension aux contraintes



D'après Sayiouri, Tessier and Hicher 2004

Gonflement inter-particulaire : théorie de la double couche



Distribution des anions et cations à proximité de la plaquette
Répulsion électrique, distances 100 – 800 Å (plus grandes)

Gonflement inter-particulaire : théorie de la double couche

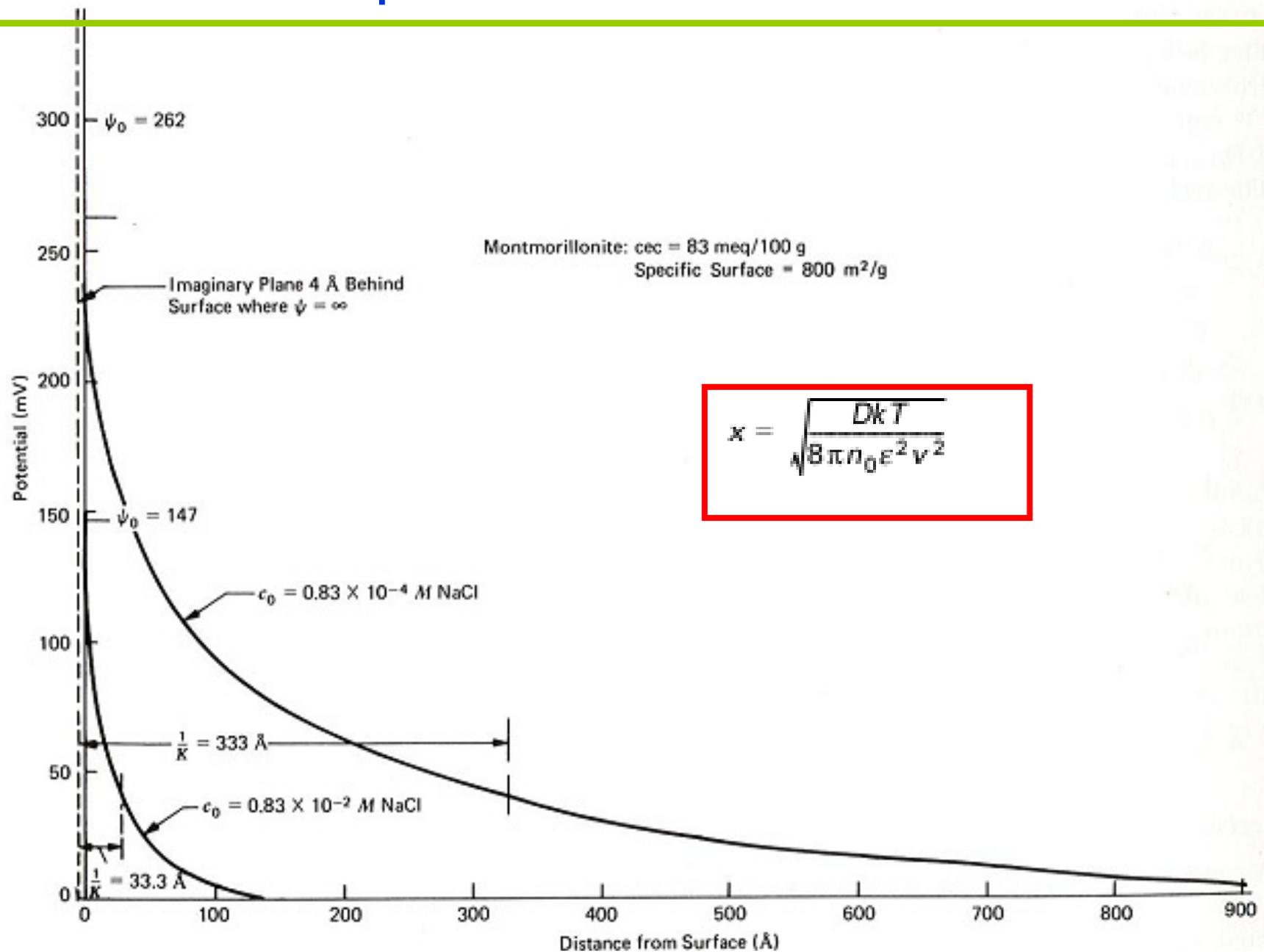
Distribution de la concentration des cations

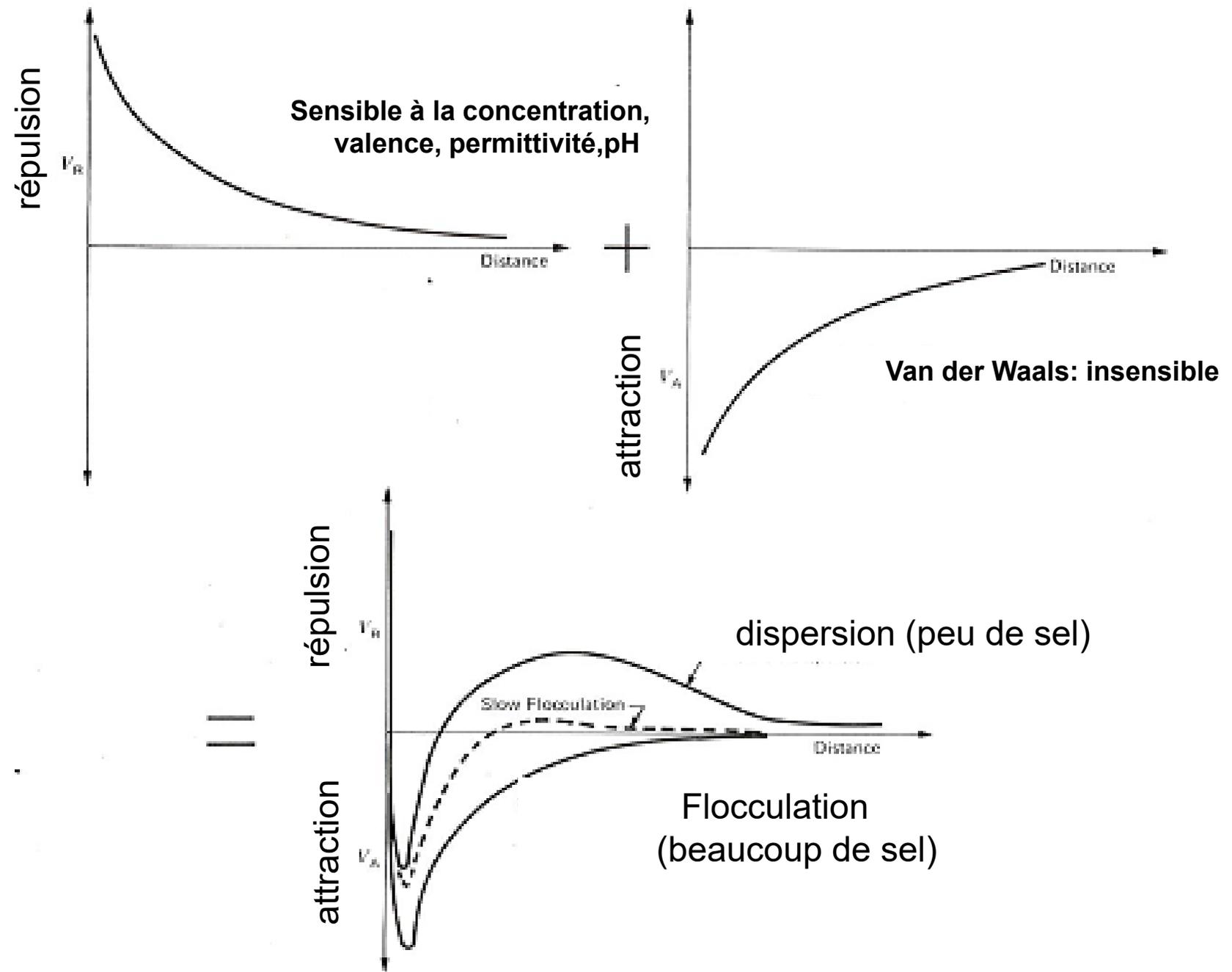
« Epaisseur » de la double couche

$$x = \sqrt{\frac{DkT}{8\pi n_0 \epsilon^2 v^2}} \quad (5)$$

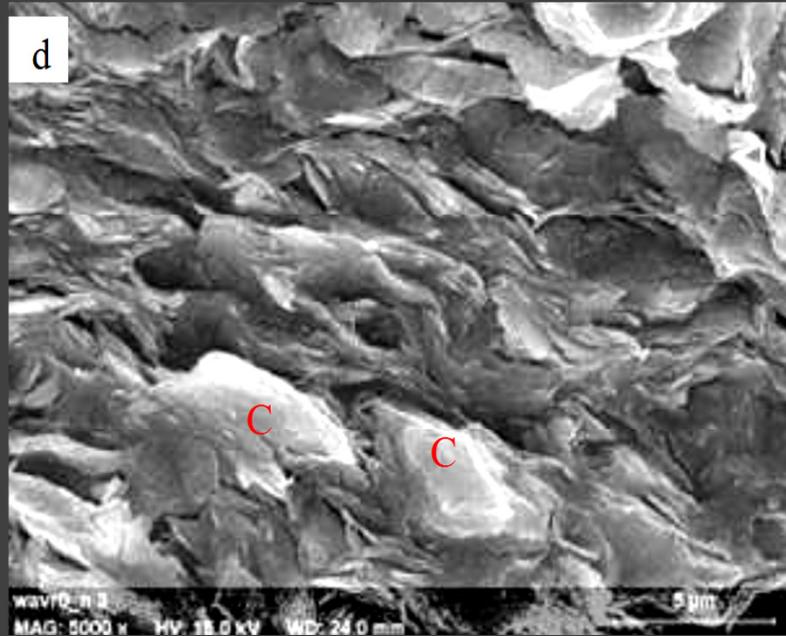
- avec
- D la permittivité relative (constante diélectrique) du milieu,
 - k la constante de Boltzmann ($k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$),
 - T la température thermodynamique,
 - n_0 une concentration ionique de référence, en un point loin de l'argile,
 - ϵ la charge électronique élémentaire ($\epsilon = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$),
 - v la valence des cations.

Effet de sels sur l'épaisseur de la double couche

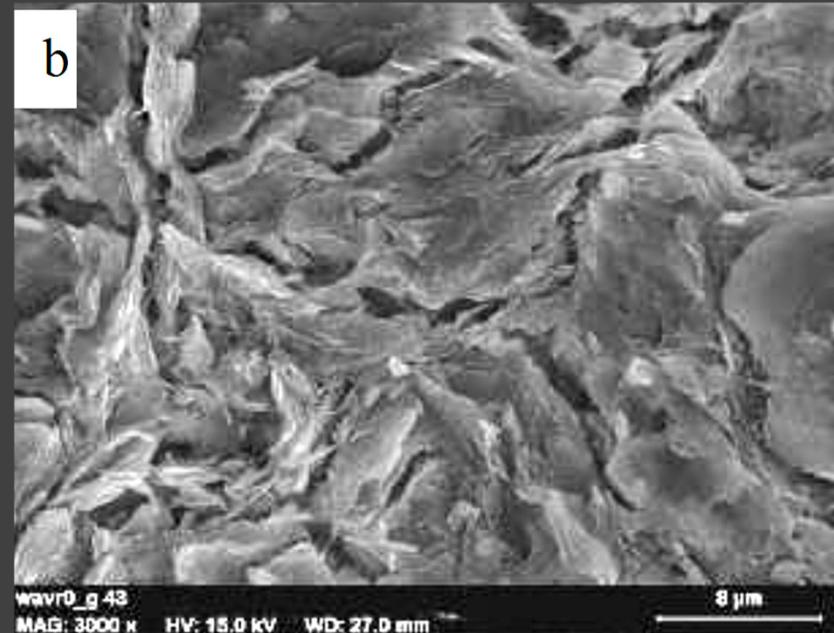




Effet du gonflement : argile de Romainville

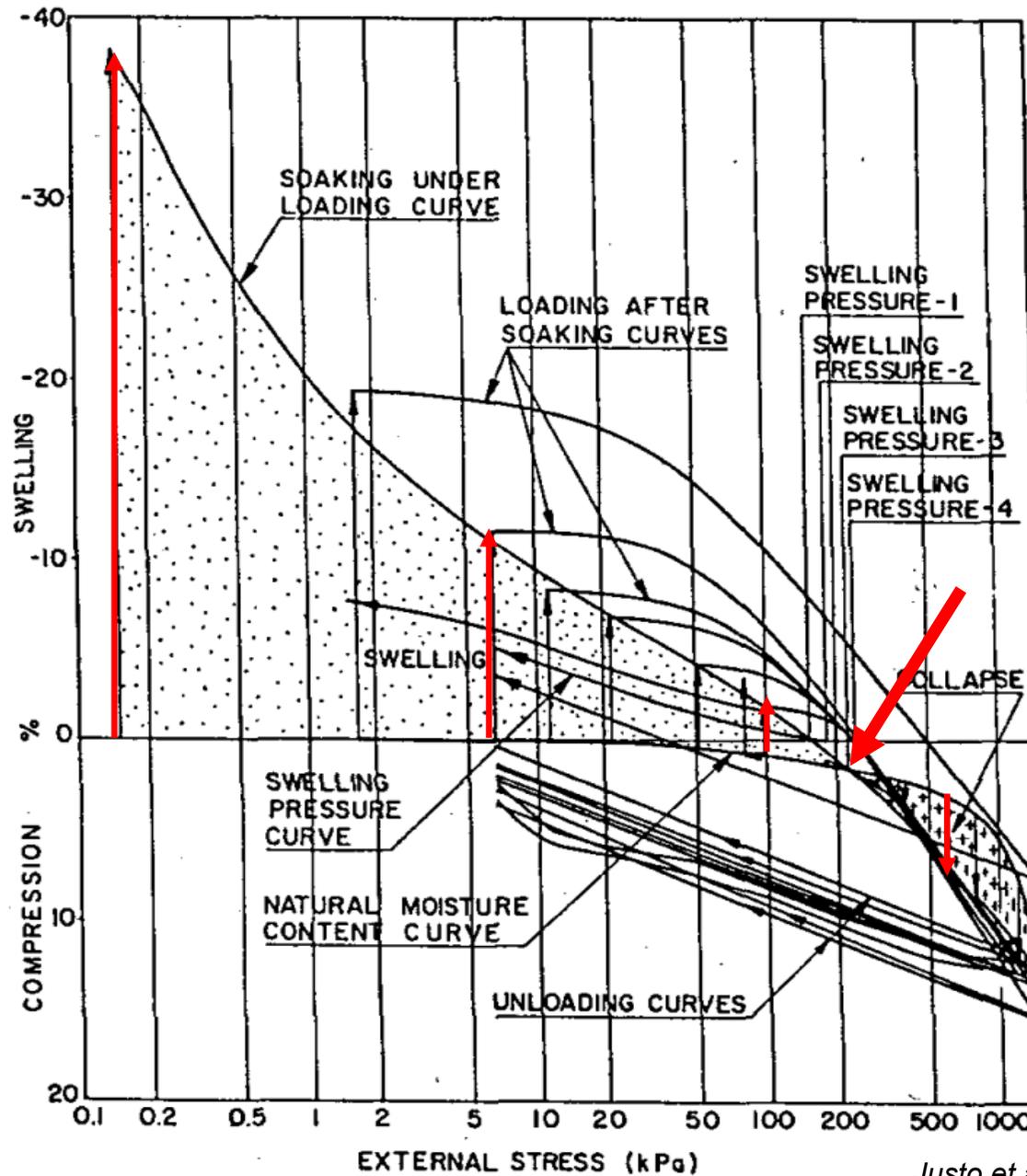


Etat naturel, ($w = 29,8\%$)



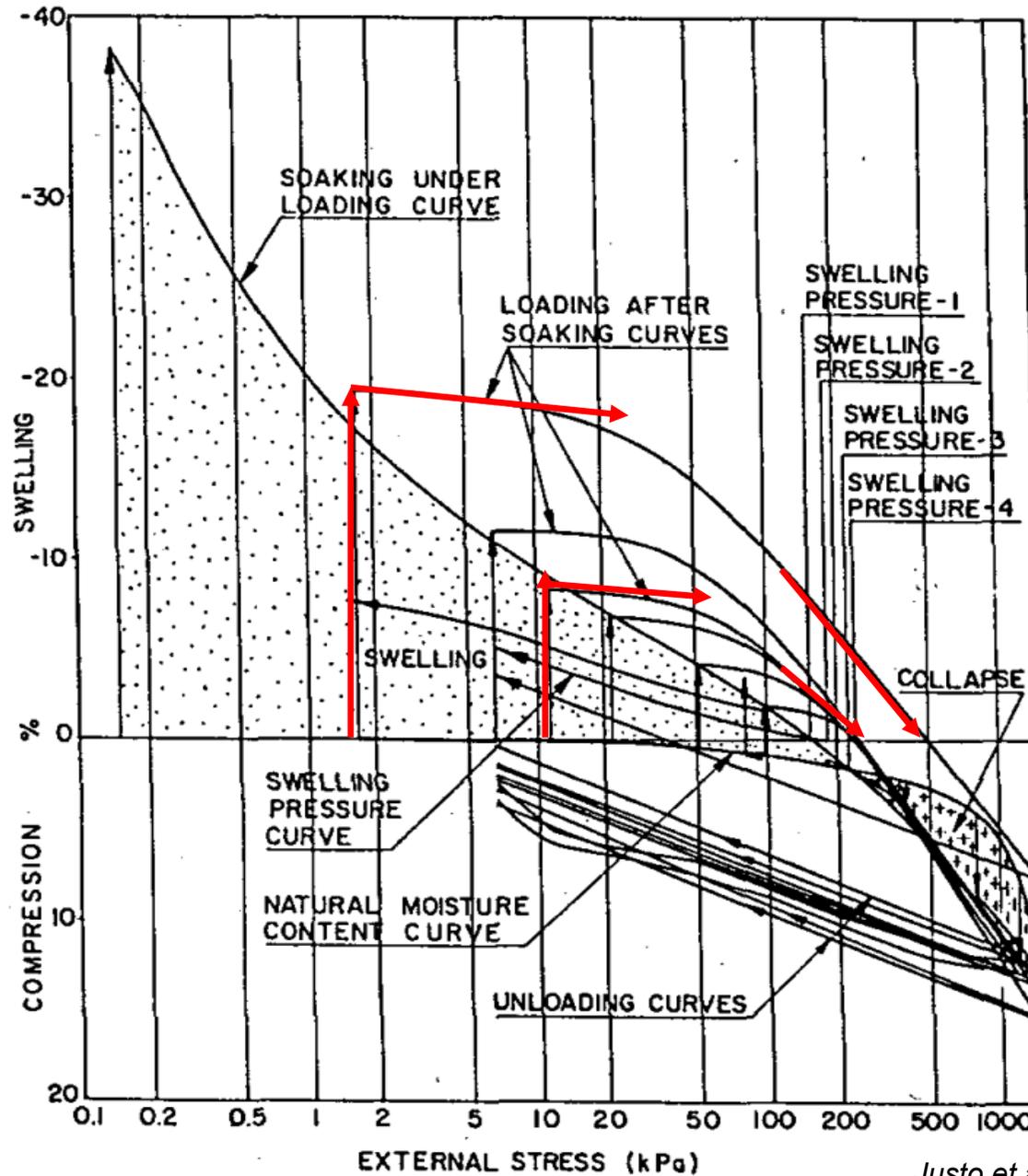
après gonflement de 10,4%
($w = 37,5\%$)

Essais de gonflement : essais parallèles



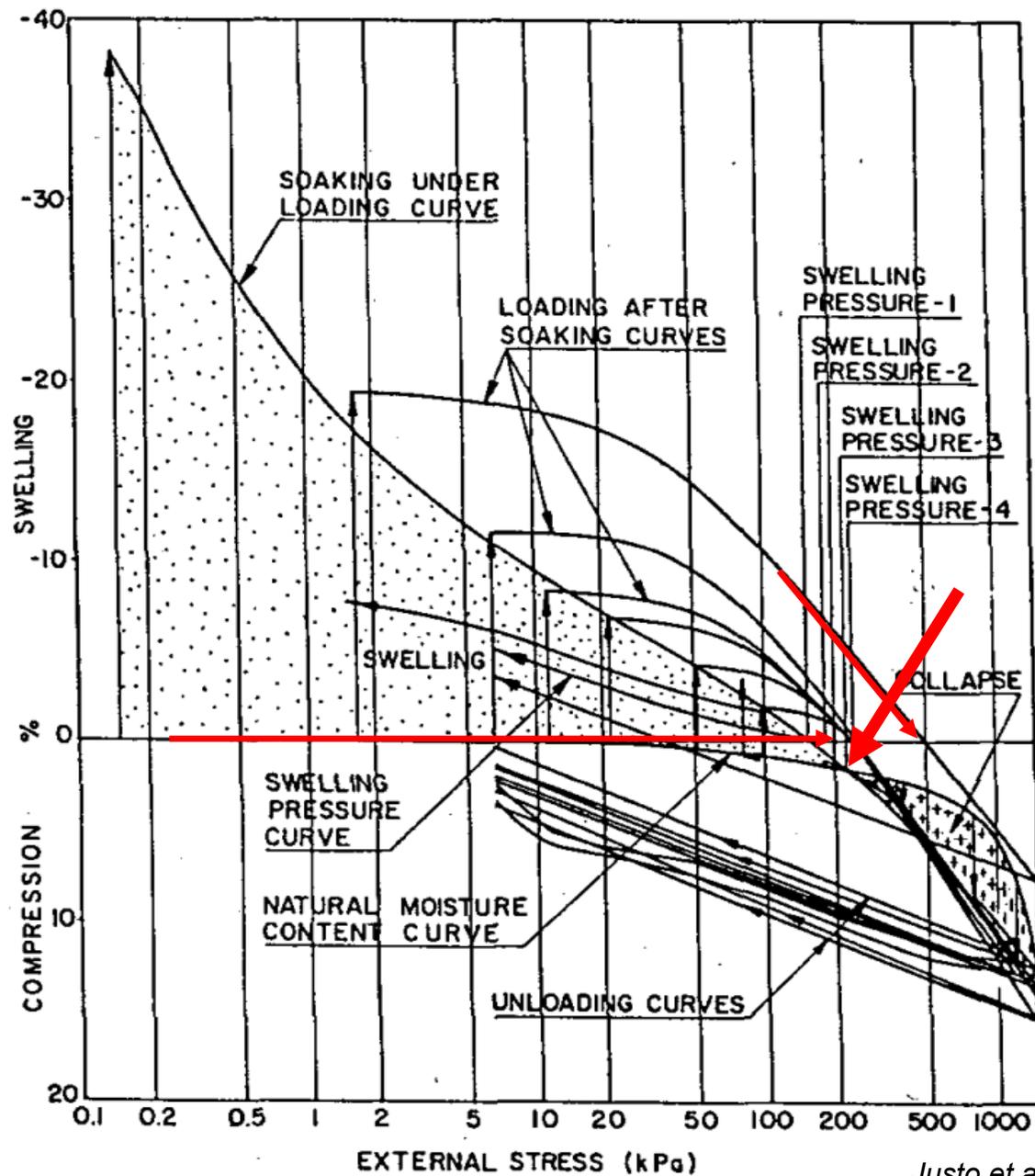
Justo et al. (1984), in Alonso et al. (1987)

Essais de gonflement - compression



Justo et al. (1984), in Alonso et al. (1987)

Essais de gonflement à volume constant



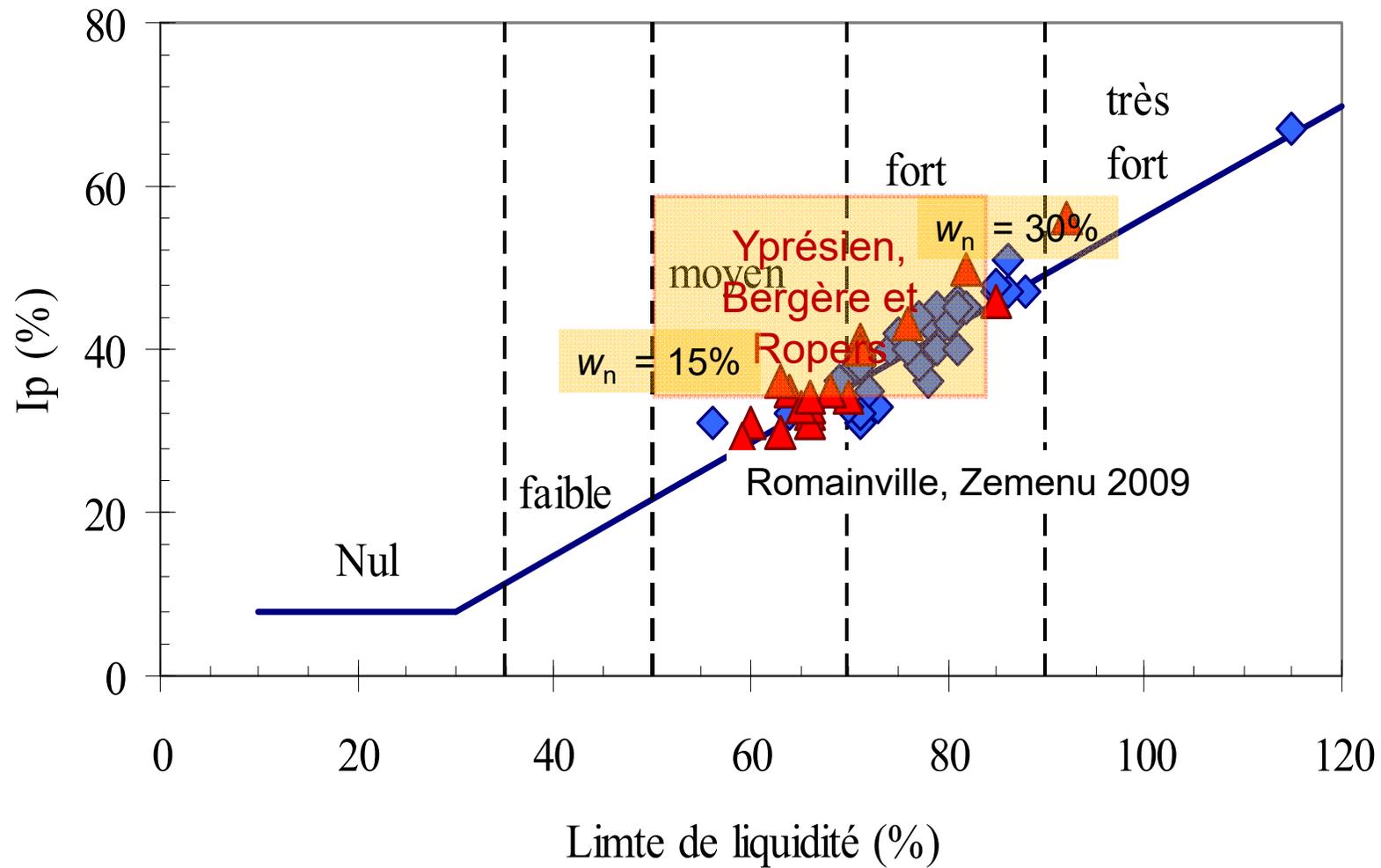
Justo et al. (1984), in Alonso et al. (1987)

Essais de gonflement sur sols naturels : problèmes

(Bergère et Ropers 2018)

- Délai de réalisation après extraction (6 mois Piètre conservation des carottes
 - zones remaniées
 - échantillons sans paraffine aux extrémités
 - échantillons ayant gonflé dans la gaine
- Essais triaxiaux
 - Longue période de consolidation / délais contractuels
 - Gonflement sous saturation (50 kPa), **adoption de la contrainte en place**
 - Faible perméabilité (consolidation primaire incomplète)
 - Avec diamètre 50 mm : consolidation de 170h ($I_p = 33$) et 224h ($I_p = 50$)
 - Qualité du drainage ?

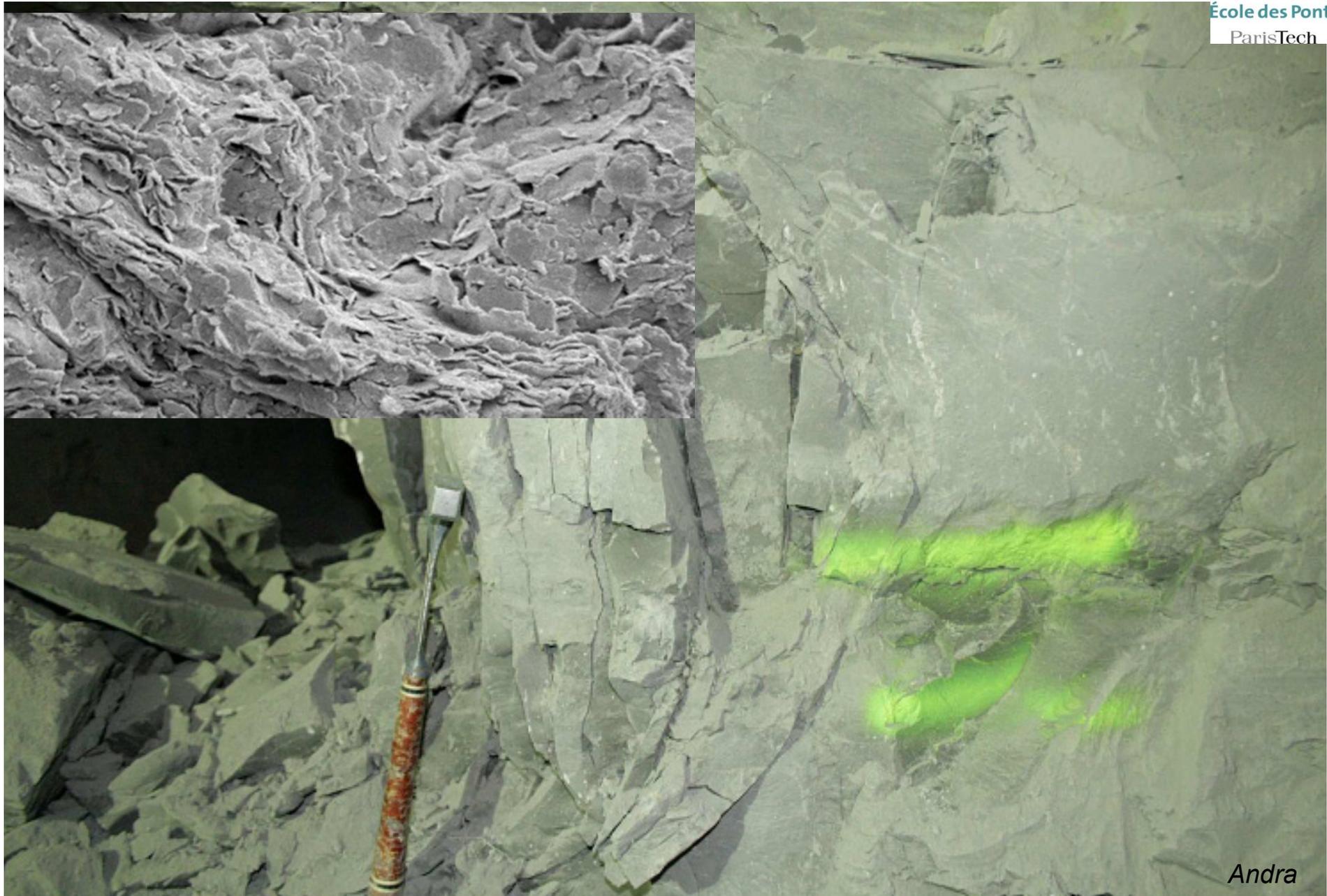
Potentiel de gonflement, Daksanamurthy et Raman (1973)



Conclusion

- De nombreux niveaux de sols gonflants dans le bassin parisien
- En équilibre à l'état naturel
- Gonflement : changement état de contrainte + apport d'eau
- Impact sur les infrastructures en construction (groupe CFMS) ?
 - Radier : à prendre en compte
 - Soutènements : probablement pas
- Minéralogie
- Mécanismes de gonflement
 - Cristallin (nW)
 - Inter-particulaire (double couche)
- Caractérisation du gonflement
 - Pression de gonflement ?
 - Qualité des éprouvettes
 - Qualité de la pratique des essais
 - Corrélation avec les paramètres
- Variabilité naturelle
- Hydrogéologie locale

Argilite du Callovo-Oxfordien, Bure, profondeur 490 m



Effet du gonflement

Grains arrachés pendant la fracture à l'état congelé (25% calcite, 20% quartz)

Matrice argileuse (50%)

Pyrite

Fissures de gonflement

Surface verticale 10.0kV x850 10µm

