

N° d'ordre : 2940

THESE DE DOCTORAT

Présentée à

L'Université des Sciences et Technologies de Lille

Préparée à

Euro - Géomat Consulting

Spécialité

Génie Civil

Sous le titre

PELLETS D'ARGILES GONFLANTES ELABORATION ET CARACTERISATION HYDROMECHANIQUE

Par

Anne PASQUIOU

Soutenue le 14 Avril 2001 devant la commission d'examen composée de

I. Shahrour	EUDIL	Président du jury
A. Gens	UPC - Espagne	Rapporteur
J.P. Ollivier	INSA Toulouse	Rapporteur
C. Gatabin	CEA Saclay	Examineur
M. Laquerbe	INSA – Rennes	Examineur
F. Plas	ANDRA	Examineur
J.C. Robinet	EuroGeomat Consulting	Directeur de thèse
	INSA – Rennes	
G. Volckaert	SCK-CEN	Examineur

RESUME

Les structures de scellement utilisées dans le stockage des déchets radioactifs à grande profondeur doivent empêcher toute diffusion des radionucléides vers la biosphère. Le principal atout des pellets est qu'ils constituent un matériau avec une mise en place aisée. Néanmoins, la porosité des structures est alors plus importante et les pressions de gonflement sont plus faibles que dans les structures à base de briques compactées. Sachant qu'à grande profondeur les pressions hydrauliques peuvent atteindre plusieurs MPa, le premier objectif de l'étude a été de montrer que de telles pressions n'altèrent pas la pression de gonflement. Une étude bibliographique sur l'organisation structurale des milieux poreux argileux et les différentes contraintes qui y règnent, couplée à des essais d'injection sous forte pression d'eau ont permis de valider le concept des contraintes effectives dans les argiles gonflantes saturées et de montrer ainsi que les pressions hydrauliques ne sont pas un facteur limitant l'utilisation des pellets.

Différentes méthodes de fabrication des pellets ont alors été analysées. Toutes ont donné des dimensions de pellets de 20 mm et une densité sèche supérieure à $1,9 \text{ g/cm}^3$. Néanmoins, des essais d'imbibition ont montré qu'utilisées seules la porosité interpellet était trop importante pour que l'échantillon développe une pression de gonflement. Deux approches ont alors été adoptées pour diminuer la porosité : (i) mélange discrets de pellets de différentes tailles et (ii) mélange de pellets et de poudre. Dans le premier cas, des calculs numériques ont montré que, compte tenu de la fabrication des pellets, il est préférable d'utiliser au moins trois classes de pellets pour obtenir la porosité souhaitée. Dans le deuxième cas, l'introduction de pellets dans les échantillons apportent une échelle supplémentaire à la structuration des argiles (feuillelet / particule / agrégat / pellet) de telle sorte que les phénomènes transitoires sont plus marqués dans les mélanges. Néanmoins, quelque soit le milieu argileux, le fléchissement des contraintes axiale et radiale pendant l'hydratation des échantillons est à attribuer à la diminution de la résistance simultanée à l'augmentation de la pression de gonflement. Enfin, à densité sèche homogénéisée égale, les milieux hétérogènes et homogènes présentent des propriétés hydromécaniques et hydrodynamiques du même ordre de grandeur. C'est pourquoi, nous suggérons de décrire le comportement des milieux hétérogènes par une modélisation basée sur l'homogénéisation. Les premières bases d'une telle modélisation ont été posées en étudiant les propriétés hydrodynamiques du milieu considéré indéformable. Les premiers résultats sont encourageants mais il est indéniable que la modélisation devra être améliorée en introduisant un couplage avec la mécanique.

MOTS CLES : pellets, ouvrage de scellement, contraintes effectives, pression de gonflement, homogénéisation

ABSTRACT

Sealing structure, used in deep radioactive waste disposal, must prevent the radionuclides to diffuse to the biosphere. The main asset of pellets is their easy put in place. Yet porosity of such structures is higher and the swelling pressure lower in the structure performed with compacted blocks. As at such depth, hydraulic pressure could reach several MPa, the first goal of the study was to demonstrate that such a pressure doesn't alter the swelling pressure. A bibliographic study on the structural organisation of clayey media and stresses occurring in such media, associated to injection tests with high water pressure, has allowed to validate the effective stress concept in saturated swelling clays and so to show that hydraulic pressure are not restrictive for using pellets.

Different processes have also been studied to produce pellets : all of them give pellets with sizes around 20 mm and dry density higher than $1,90 \text{ g/cm}^3$. Nevertheless, soaking test emphasised that porosity between pellets is too high to get a swelling pressure. Two approaches were then adopted to decrease this porosity : (i) mixing pellets with different sizes and (ii) mixing pellets with powder. In the first case, numerical calculation points out that, according to the processes, it would be better to use at least three different sizes to get the right porosity. In the second case, the introduction of pellets in the samples brings a new scale in the structural organisation (layer - particle - aggregate - pellet) in such a way that phenomena are more emphasized in the mixtures. Nevertheless, whatever the medium is like, the decrease of the axial and radial stresses during hydration is due to the decrease simultaneously to the increase of the swelling pressure. Finally, at same homogenised dry density heterogeneous and homogeneous samples have quite the same hydrodynamic and hydromechanical properties. That's why, it is suggested to describe heterogeneous media behaviour with modelling based on homogenisation. The first basis of such modelling has been laid down by studying hydrodynamic characteristics of a non deformable medium. First results are encouraging but it's undeniable that modelling will have to be improved by introducing hydro-mechanical coupling.

KEY WORDS : pellets, sealing structure, effective stresses, swelling pressure, homogenisation

SOMMAIRE

Liste des figures	8
Liste des tableaux	17
Liste des notations	18
Introduction générale	20

CHAPITRE 1 MILIEUX HOMOGENES

1 Distribution des contraintes dans les sols : validation du concept des contraintes effectives dans les argiles gonflantes fortement compactées

1.1 Composition des argiles

1.1.1 La phase solide

1.1.2 La phase fluide et ses interactions avec la phase solide

1.2 Distribution des contraintes dans les argiles gonflantes

1.2.1 Argiles en suspension

1.2.2 Argiles faiblement compactées

1.2.3 Argiles gonflantes fortement compactées

1.3 Répartition de l'eau dans la porosité

2 Caractérisation hydromécanique et hydrodynamique des argiles utilisées dans notre étude

2.1 Appareillages et modes opératoires

2.1.1 Essais oedométriques

2.1.2 Mesure de la pression de gonflement

2.1.3 Mesure de la perméabilité à saturation

2.1.4 Profil hydrique

2.1.5 Isotherme de sorption-désorption d'eau

2.2 Propriétés microscopiques des argiles

2.3 Propriétés macroscopiques des argiles

2.3.1 Essai oedométrique

2.3.2 Cinétique de gonflement

2.3.3 Pression de gonflement

- [2.3.4 Perméabilité à saturation](#)
- [2.3.5 Profil hydrique](#)
- [2.3.6 Isothermes de sorption-désorption](#)

3 Conclusion

CHAPITRE 2

FABRICATION DES PELLETS

1 Introduction

2 Procédés sans application de forces extérieures (bouletage)

3 Procédés avec application d'une contrainte extérieure faible ou moyenne (extrusion)

4 Procédés avec application d'une contrainte extérieure (compaction uniaxiale et agglomération)

4.1 Compaction uniaxiale

4.2 Agglomération

5 Récapitulatif

CHAPITRE 3

OPTIMISATION DE LA POROSITÉ DES MÉLANGES DISCRETS DE PELLETS

1 Introduction

2 Présentation des modèles

2.1 Modèle linéaire

- [2.1.1 Définitions](#)
- [2.1.2 Mélanges binaires](#)
- [2.1.3 Mélanges pluricomposants](#)

2.2 Modèle d'empilement

- [2.2.1 Mélanges binaires](#)
- [2.2.2 Mélanges pluricomposants](#)

2.3 Comparaison des modèles

- [2.3.1 Mélanges binaires](#)
- [2.3.2 Mélanges pluricomposants](#)

2.4 Extension à des mélanges pluricomposants de particules non sphériques

2.4.1 Définition du diamètre équivalent

2.4.2 Détermination de la porosité propre

3 Application des modèles aux pellets extrudés

3.1 Caractéristiques propres des 4 classes

3.2 Détermination expérimentale de la porosité des mélanges

3.3 Détermination numérique de la porosité des mélanges

4 Conclusion

CHAPITRE 4

COMPORTEMENT HYDROMÉCANIQUE DES MILIEUX HETEROGENES

1 Introduction

2 Appareillages

2.1 Essai sur grande cellule (CEA)

2.2 Essai sur maquette

3 Mélanges discrets de pellets

3.1 Pression de gonflement

3.2 Perméabilité à saturation

4 Caractérisation hydromécanique et hydrodynamique en laboratoire des mélanges pellets – poudre

4.1 Introduction

4.2 Compaction

4.2.1 Reproductibilité

4.2.2 Influence de la proportion de pellets

4.2.3 Influence de la taille de la cellule

4.2.4 Influence de la forme des pellets

4.2.5 Influence de la nature du constituant de remplissage

4.3 Comportement hydromécanique en régime transitoire (phase liquide)

- 4.3.1 Essai sur maquette
- 4.3.2 Mélange pellets agglomérés– kaolin
- 4.3.3 Mélange pellets-sable
- 4.3.4 Essai sur grande cellule (CEA)
- 4.3.5 Essai sur colonne
- 4.3.6 Réarrangement microstructural

4.4 Comportement hydromécanique en régime transitoire (phase vapeur)

4.5 Comportement hydromécanique en régime permanent à l'état saturé

- 4.5.1 Pression de gonflement
- 4.5.2 Déformation de gonflement
- 4.5.3 Perméabilité à saturation

5 Modélisation des comportements hydrodynamiques des mélanges pellets – poudre d'argile : homogénéisation

5.1 Principe de la méthode

5.2 Caractéristiques hydrodynamiques des 2 phases

5.3 Etude paramétrique

- 5.3.1 Influence du pas de temps (Δt)
- 5.3.2 Influence du temps d'imbibition
- 5.3.3 Influence du gradient hydraulique

5.4 Détermination de la perméabilité intrinsèque équivalente

5.5 Détermination de la perméabilité relative

6 Conclusion

Conclusion générale _____ **172**

Bibliographie _____ **175**

INTRODUCTION GENERALE

Cette étude s'inscrit dans le contexte plus général de la caractérisation chimio-thermo-hydro-mécanique des argiles gonflantes en vue du stockage des déchets radioactifs en site profond. Plusieurs mises en forme sont actuellement envisagées, chacune d'elle correspondant à un ouvrage spécifique :

- ↪ Les briques fortement compactées ($\rho_d > 1,8 \text{ g/cm}^3$), obtenues par compactage de poudre, formeraient la barrière ouvragée entre les colis de déchets et le site d'accueil,
- ↪ Les milieux granulaires, à base de pellets, constitueraient les scellements de puits et les scellements en galerie,
- ↪ L'argile injectée ou damée servirait essentiellement dans la conception des remblais.

En tout état de cause, quel que soit leur positionnement, toutes ces structures devront protéger la biosphère des radionucléides relâchés par les colis, et elles devront donc, a minima, constituer une barrière hydraulique. Les argiles gonflantes sont alors particulièrement intéressantes car elles ont une perméabilité à saturation très faible, une capacité de rétention des radionucléides relativement importante et un pouvoir d'auto-cicatrisation à l'état saturé du fait de leur pouvoir gonflant. Cependant, à l'état confiné, ces mêmes argiles peuvent générer de très fortes pressions de gonflement sur les parois des ouvrages et il est indispensable de connaître leurs valeurs pour pouvoir dimensionner les ouvrages de confinement. Or, dans le cas d'une utilisation des argiles en formation géologique profonde, elles peuvent être soumises à des pressions hydrostatiques supérieures à leur pression de gonflement et il a donc fallu vérifier que ces pressions hydrostatiques n'altéraient pas les propriétés de l'argile, notamment sa pression de gonflement. En effet, bien que la mise en place des milieux granulaires soit plus aisée que la mise en place des briques, elle entraîne aussi une densité sèche homogénéisée, et donc une pression de gonflement, plus faible. Autrement dit, l'utilisation des pellets ne peut être envisagée que si les structures à base d'argile ne nécessitent pas des pressions de gonflement initiales très élevées. Une étude bibliographique a donc été réalisée sur l'origine des propriétés de gonflement selon le niveau de compactage de l'argile. Cette étude a été suivie de la validation du concept des contraintes effectives dans

les argiles gonflantes saturées. Par opposition aux milieux granulaires à base de pellets, nous considèrerons que les échantillons d'argile compactée constituent un milieu homogène car les dimensions des cellules (quelques cm) sont nettement supérieures à la taille des agrégats (quelques μm à quelques mm). L'analyse des milieux homogènes fait donc l'objet du 1^{er} chapitre.

Une fois validée l'utilisation des pellets dans les stockages, nous avons, dans un 1^{er} temps, recherché quelles méthodes pouvaient être employées pour leur fabrication. Différentes méthodes ont été étudiées, depuis l'échelle du laboratoire jusqu'à l'échelle semi-industrielle, donnant des formes diverses. Toutes sont présentées dans le chapitre 2.

Par la suite, nous nous sommes intéressés au comportement hydromécanique spécifique des milieux hétérogènes. En effet, à l'état initial désaturé, ces milieux sont fortement hétérogènes et l'objectif de l'étude est alors de comprendre les différents processus de saturation et de mise en charge mécanique lors de l'hydratation, afin de déterminer le degré d'homogénéisation à l'état saturé final. En outre, Marshall et Dhir (1986) ont montré que, statistiquement, l'arrangement aléatoire de sphères de même dimension donne une porosité entre les particules de 40%. Puisqu'en outre la porosité de particules sphériques est plus faible que la porosité de particules non sphériques, la structure aura toujours une porosité au moins égale à 40% et aura donc une perméabilité trop importante. Deux voies ont alors été prospectées pour diminuer cette porosité : (i) mélanger des pellets de différentes tailles ou (ii) mélanger les pellets avec de la poudre. Le 3^{ème} chapitre est donc consacré à l'optimisation de la porosité de mélanges discrets de pellets. Deux approches ont été adoptées : (i) une approche dite linéaire (Sedran et al. 1994a, 1994b, Yu et al., 1987) qui considère que l'arrangement des pellets dépend essentiellement de la classe dont la fraction volumique est la plus importante et est compensé par des fonctions d'interaction entre les classes ; (ii) une approche dite d'empilement (Marshall et Dhir, 1986) qui considère que l'arrangement du mélange est contrôlé par la classe dont le diamètre est le plus important. Ces deux approches ont été validées sur des mélanges de particules sphériques (binaires ou pluri-composants) puis élargies aux mélanges de particules non sphériques en introduisant un diamètre particulaire équivalent (Yu et al., 1996).

Enfin le 4^{ème} chapitre concerne l'étude expérimentale du comportement hydromécanique des milieux hétérogènes, constitués soit d'un mélange discret de

pellets (bouletées ou extrudées) soit d'un mélange pellets-argile. L'objectif des essais est d'analyser l'évolution de la structure interne des mélanges, initialement hétérogènes, pendant l'hydratation, pour déterminer l'état final du milieu et comparer ses propriétés aux propriétés d'un milieu initialement homogène dont la densité sèche est identique. Pour comprendre cette transformation, différents paramètres ont été étudiés, tels que la nature minéralogique des deux constituants, la densité sèche homogénéisée du mélange ou la taille des cellules. La deuxième partie pose les premières bases pour procéder à une modélisation par homogénéisation. Seule la partie hydraulique a été formulée et la méthode est basée sur les travaux de Renard (1997).

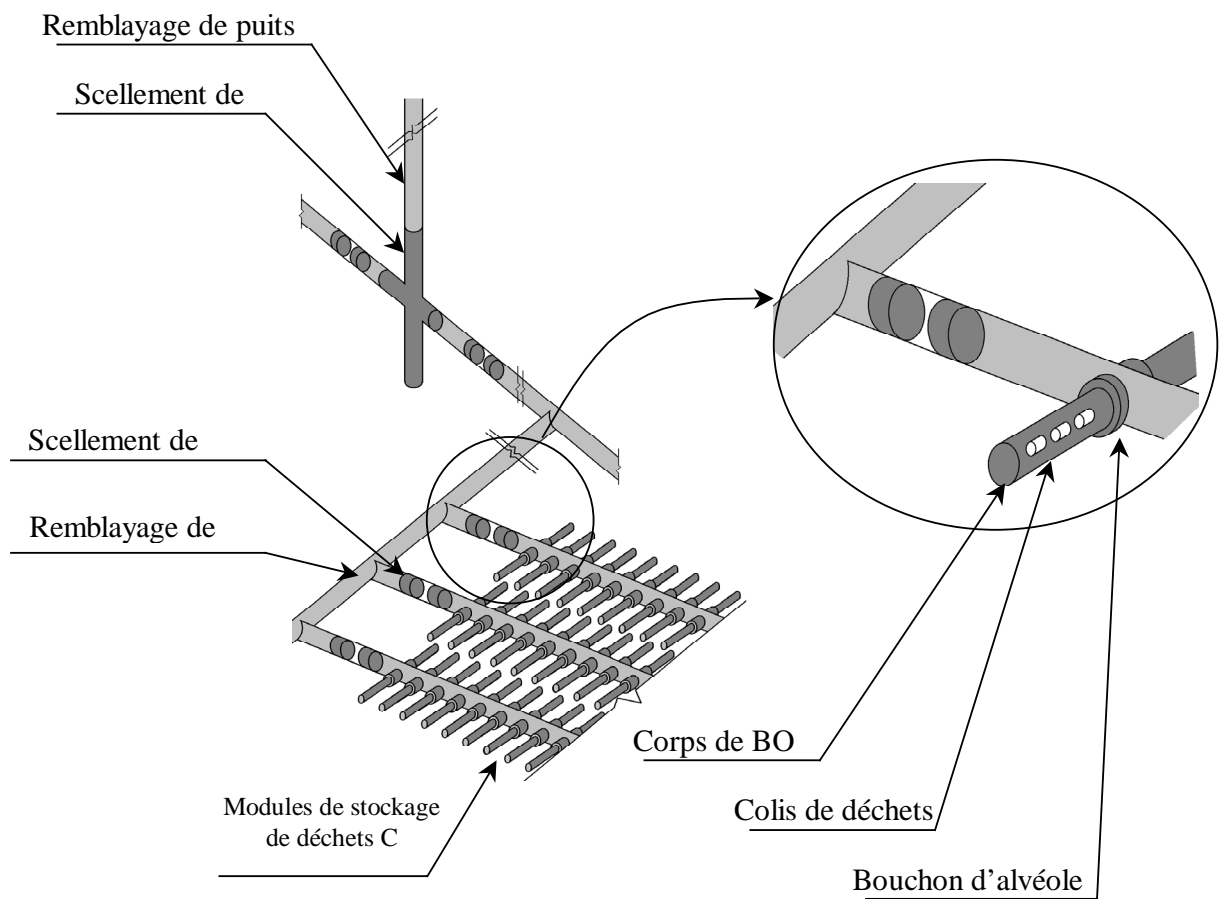


Figure I-1 -1 Distribution des argiles dans un stockage de déchets en site profond

CONCLUSION GENERALE

□ Validation du concept des contraintes effectives

L'étude des milieux homogènes a notamment permis de valider le concept des contraintes effectives dans les argiles gonflantes, autrement dit même lorsque le milieu est soumis à une pression hydraulique importante, ses propriétés, en particulier sa pression de gonflement, ne sont pas altérées.

$$\sigma' = \sigma_{\text{ext}} - P \cdot \downarrow$$

Les contraintes hydrauliques n'imposent donc pas d'avoir une pression de gonflement initiale élevée, c'est-à-dire une densité sèche initiale élevée. Ainsi, les contraintes hydrauliques ne représentent pas un obstacle à l'utilisation des pellets. Par ailleurs, nous avons également pu définir la notion de pression de gonflement, étant donné que, quelle que soit l'anisotropie du milieu à l'état désaturé, le milieu saturé est toujours à l'état isotrope.

Par ailleurs, les études bibliographiques ont montré que les propriétés hydromécaniques et hydrodynamiques des argiles gonflantes dépend essentiellement de leur ratio $\text{Na}^+ / \text{Ca}^{2+}$: plus ce ratio est important, et plus l'affinité de l'argile pour l'eau est importante. C'est pourquoi une argile sodique a une pression de gonflement plus élevée et une perméabilité à saturation plus faible qu'une argile calcique. Néanmoins quelle que soit l'argile, la pression de gonflement croît exponentiellement avec la densité sèche alors que la perméabilité décroît suivant une fonction exponentielle.

□ Fabrication des pellets

L'étude des pellets a réellement commencé par leur fabrication. Plusieurs méthodes ont été testées et toutes donnent des pellets de très bonne qualité ($\rho_d > 1,9 \text{ g/cm}^3$) et une étude paramétrique systématique des paramètres de fabrication peut certainement encore améliorer leurs performances. Le choix du procédé sera donc orienté par la forme des pellets qui sera choisie ainsi que par la rentabilité du système.

□ Mélange discret de pellets

La détermination numérique de la porosité des mélanges discrets de particules sphériques a donné des résultats proches des résultats expérimentaux, et ce quelle que soit l'approche utilisée. Toutefois une approche linéaire simule mieux la porosité d'un mélange binaire alors qu'une approche par empilement simule mieux la porosité d'un mélange pluri-composant. Par ailleurs, l'utilisation d'un diamètre équivalent, basé sur le comportement des particules au compactage, proposé par Yu et al. (1996), pour déterminer la porosité d'un mélange de particules de forme quelconque donne de très bons résultats. Ainsi, quelque soit la forme des particules, il est possible d'abaisser la porosité de 40% à 20%, en ne mélangeant que 2 classes de grains. Toutefois, une telle diminution ne peut avoir lieu que si le rapport de diamètre équivalent est inférieur à 0,05. Or, les techniques de fabrication donnent des dimensions minimales de quelques centimètres : (i) le bouletage donnent des densités sèches intrapellet très faibles lorsque les dimensions sont petites, (ii) l'agglomération impose une taille minimale des pellets pour qu'elles puissent se détacher des frettes. Seules le compactage uniaxial et l'extrusion pourrait donner des petites pellets de bonne qualité. Cette éventualité devra être vérifiée. Supposons que quelle que soit la technique, la taille minimale est de 2 cm. La 2^{ème} classe de grains devra alors avoir une taille d'au moins 40cm, ce qui laisse présager des problèmes de gradient de densité au sein des pellets. Pour éviter ce problème, il est donc préférable d'utiliser des mélanges pluricomposants.

Néanmoins, des essais de gonflement ont été réalisés sur des échantillons constitués d'une ou deux classes de pellets pour confirmer ou infirmer le fait que la diminution de la porosité n'est pas assez importante pour que l'échantillon développe une pression de gonflement. Le 1^{er} essai a été réalisé avec une seule classe de pellets bouletées (diamètre 20 mm) alors que le 2^{ème} essai a été réalisé avec deux classes de pellets extrudées (diamètres 20 et 5 mm). La porosité des échantillons était respectivement de 60% et 55 %, correspondant à une porosité interpellet de 45 % et 33%. Nous n'avons alors observé aucune pression de gonflement car tout le pouvoir gonflant de l'argile a été utilisé pour combler les espaces interpellets.

□ Mélange pellets - poudre

Tous les essais réalisés avec des mélanges pellets – poudre ont montré qu'à saturation, quelle que soit l'argile, la pression de gonflement et la perméabilité à saturation des mélanges sont du même ordre de grandeur que celles des argiles compactées, dès lors que les densités sèches homogénéisées des deux types d'échantillon sont égales. Par ailleurs, nous avons montré que les contraintes radiales et axiales augmentent en plusieurs étapes pendant l'hydratation des échantillons hétérogènes ou homogènes et que ces différentes étapes sont probablement dues au fait que l'hydratation des argiles entraîne simultanément deux phénomènes antagonistes que sont l'augmentation de la pression de gonflement et la diminution de la résistance. Par ailleurs, rappelons que l'argile a une structure à 3 échelles (feuillelet / particule / agrégat) alors que les milieux hétérogènes ont une structure à 4 échelles (feuillelet / particule / agrégat / pellet). Or nous utilisons des cellules dont les dimensions sont de l'ordre de la taille des pellets et c'est pourquoi les phénomènes sont plus marqués avec les échantillons hétérogènes qu'avec les échantillons homogènes. Ainsi, si les cellules étaient de l'ordre de grandeur des agrégats (c'est à dire quelques millimètres), les profils des argiles compactées présenteraient des phénomènes beaucoup plus marqués, plus proches des profils obtenus avec les mélanges. De même, si la taille des pellets devenait négligeable devant les dimensions des cellules, les profils cinétiques de gonflement ne devraient plus présenter d'effondrement.

BIBLIOGRAPHIE

- Belanteur N. (1995), " Contribution à l'étude des comportements mécaniques et thermo-mécaniques des argiles remaniées, saturées et fortement consolidées, Thèse de doctorat, Université d'Orléans
- Bolt G.H. (1955), "Analysis of the validity of the Gouy-Chapman theory of the electric double layer", J. Colloid Sci., N°10, pp 206-218
- Bolt G.H. (1956), "Physico-chemical analysis of the compressibility of pure clays", Geotechnique, n°6, vol 2, pp 86-93
- Chapman D.C. (1913), " A contribution to the theory of electro-capillarity", Philosophical Magazine, n°25 , pp 475 -481
- De Larrard F. & Buil M. (1987), "Granularité et compacité dans les matériaux de génie civil", Materials and Structures, Vol 20, pp 117-126
- Dixon D.A., Gray M.N., Baumgartner P. & Rigby G. (1986), "Pressure acting on waste containers in bentonite based materials", Proc. 2nd international conference on radioactive waste management, Winnipeg, Canada, pp 221-227
- Dixon D.A., Gray M.N. & Thomas A.W. (1985), " A study of the compaction properties of potential clay-sand buffer mixtures for use in nuclear fuel waste disposal", Engineering geology, n°21, pp 247-255
- German R.M. (1989), "Particle packing characterisation", 1st edition, Metal Powder industries federation, Princeton, N.J.
- Gouy G. (1919), "Sur la constitution de la charge électrique à la surface d'un électrolyte", annales de Physique, Paris, Série 4, n°9, pp 457-468
- Graham J., Gray M.N., Sun R.C. -C. & Dixon D.A. (1986), "Strength and volume change characteristics of a sand-bentonite buffer", Proc 2nd International Conference on radioactive waste management, Winnipeg, Canada, pp 188-194
- Graham J., Saadat F., Gray M.N., Dixon D.A. & Zhang Q.Y.(1989), "Strength and volume change characteristics of a sand-bentonite buffer", Can. Geotech., Vol 26, pp 292-305
- Graham J., Oswell J.M. & Gray M.N. (1992), "The effective stress concept in saturated sand-clay buffer", Can. Geotech., Vol 29, pp 1033-1043
- Haughey D.P. & Beveridge G.S.G. (1969), Can. J. Chem. Eng., Vol 47, pp 130

- Hausner H.H. (1972), Proc. Of the 1st Conf; Compaction and Consolidation of particulate matter, Brighton, UK, pp 7-12
- Hueckel T. (1992), "On effective stress concept and deformation in clays subjected to environmental loads : discussion", Can. Geotech., Vol 29, pp 1120-1125
- Hofmann U., Weiss A. Mehler A. & Scholtz A. (1956), Nat. Ac. Publ., pp 273-287
- Komine H. & Ogata N. (1994), "Experimental study on swelling characteristics of compacted bentonite", Can. Geotech., vol 31, pp 478-490
- Komine & N. Ogata (1996), "Prediction for swelling characteristics of compacted clays", Can. Geot., vol 33, pp 11-22
- Lajudie A., Raynal J., Petit J.C. & Toulhoat P. (1995), "Clay based materials for engineered barriers : a review", Mat. Res. Soc. Symp. Proc., vol 353, pp 221-230
- Lambe T.W. (1953), "The structure of inorganic soil", Proc. Am. Soc. Civ. Engrs 79, separate 315
- Lambe T.W. & Asce M. (1958a), "The engineering behavior of compacted clay", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, N° 1655., pp 1-35
- Lambe T.W. (1958b), "The structure of compacted clay", Journal Soil Mech. Fdns Div. Am. Soc. Civ. Engrs 84, SM 2, pp 1-34
- Lambe T.W. (1960a), "A mechanistic picture of shear strength in clay", Conf. Shear Strength Soils, Colorado, pp 503-532
- Lambe T.W. (1960b), "Discussion on factors controlling the strength of partly saturated cohesive soils", Conf. Shear Strength Soils, Colorado, pp 1094-1095
- Low P.F. (1979), "Nature and properties of water in Montmorillonite-Water system", American Journal of Soil Science Society, n° 42, pp 651-658
- Lee H.C. & Wray W.K. (1995), "Techniques to evaluate soil suction - a vital unsaturated soil water variable", Unsaturated soils/sols non saturés, Alonso et Delage (eds), pp 615-622
- Marshall J.S. & Dhir V.K. (1986), "On the prediction of porosity of beds composed of mixtures of spherical particles", Chemical Engineering Communication, vol. 48, pp. 261-285
- Mendel J. (1974) "Introduction à la mécanique des milieux continus déformables", eds Académie Polonaise des Sciences, Warszawa
- Milewski J.V. (1973), "A study of the packing of fibers and spheres", Thèse, Rutgers University, New Brunswick, NJ

- Mitchell J.E. (1960), "The application of colloidal theory to the compressibility of clays", *Interparticle forces in clay water electrolyte systems*, Melbourne : CISRO, 2.92-2.98
- Mitchell J.K. (1976), "Fundamentals of soil behaviour", John Wiley & Sons, New York
- Ninham B.W. (1981), "Surface forces – the last 30 A°", *Pure and applied chemistry*, n°5, pp 2135-2147
- Renard P. & De Marsilly G. (1997), "Calculating the equivalent permeability : a review", *Advances in water resources*, vol 20, pp 253-278
- Renard P. (1997), "Modélisation des écoulements en milieu poreux hétérogènes, calcul des perméabilités équivalentes", thèse, Ecole des Mines de Paris, Centre d'Information Géologique.
- Robinet J.C., Pasquiou A., Jullien A. & Belanteur N. (1997), "Expériences de laboratoire sur le comportement thermo-hydro-mécanique des matériaux argileux remaniés gonflants et non gonflants", *Revue Française de Géotechnique*, n°81, pp 53-80
- J.C. Robinet, A. Pasquiou, J.M. Palut & L. Noynaert (1996) "Etude des transferts hydriques entre le massif argileux et les excavations dans un laboratoire souterrain pour le stockage de déchets radioactifs Essai Phebus", EUR 17792FR, 220 p
- Saadat F. (1989), "Constitutive modelling of the behaviour of a sand-bentonite mixture", Ph-D thesis, Department of Civil Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Canada
- Sedran T., De Larrard F. & Angot D. (1994a), "Prevision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide - I - Fondements théoriques et étalonnage du modèle", *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, Vol 194, pp 59-70
- Sedran T., De Larrard F. & Angot D. (1994b), "Prevision de la compacité des mélanges granulaires par le modèle de suspension solide - II - Validation cas des mélanges confinés", *Bull. liaison Labo. P. et Ch.*, Vol 194, pp 71-86
- Sposito G. (1984), "The surface chemistry of soils", Oxford University Press, Oxford
- Sridahan A. (1971), "Effective stress theory of shrinkage phenomena", *Can. Geotech.*, n°8, vol 4, pp 503-512

- Sridahan A. & Venkatappa Rao G. (1973), "Mechanisms controlling volume change on saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechn.*, Vol 23, N°3., pp 35 9-382
- Sridahan A. & Venkatappa Rao G. (1979), "Shear strength behaviour of saturated clays and the role of the effective stress concept", *Geotechn.*, Vol 29, N°2., pp 177-193
- Sridahan A. & Jayadeva M.S. (1982), "Double layer theory and compressibility of clays", *Geotechn.*, Vol 32, N°2., pp 133-144
- Stovall T., De Larrard F. & Buil M. (1986) "Linear packing density model of grain mixtures", *Powder Technology*, vol 48, pp 1-12
- Terzaghi K. (1926), "The mechanics of adsorption and of the swelling of gels", *Colloid symposium monograph*, New York, Chemical catalog Co., pp 5 8-78
- Terzaghi K. (1936), "The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear", *Proc. 1st International Conference on Soil Mechanics*, vol 1, pp 5 4-5 6
- Tessier D. (1984), "Etude exérimentale de l'organisation des matériaux argileux", *Thèse de doctorat d'état*, Université Paris VII
- Touret O. & Pons C.H. (1989), "Etude de la répartition de l'eau dans les argiles saturées aux fortes teneurs en eau", *Clay minerals*, n° 25 , pp 217-223
- Van Olphen H. (1963), " An introduction to clay colloid chemistry", *Interscience*, New York
- Verveij E.J.W. & Overbeek J.T.G. (1948), "Theory of the stability of lyophobic colloids", *Elsevier*, Amsterdam
- Volckaert G., Bernier F. & Dardaine M. (1996a), "Demonstration of the in situ application of an industrial clay-based backfill material - Bacchus 2", *EUR 16860 EN/FR*
- Volckaert G., Bernier F., Alonso E., Gens A., Samper J., Villar M ; Martin-Martin P.L., Cuevas J., Campos R., Thomas H., Imbert C. & Zingarelli V. (1996b), "Thermal-hydraulic-mechanical and geochemical behaviour of the clay barrier in radioactive waste repositories (model development and validation)", *EUR 16744 EN*
- Volckaert G., Dereeper B., Put M., Ortuz L., Gens A., Vaunat J., Villar M.V., Martin P.L., Imbert C., Lassabatère T., Mouche E. & Cany F. (2000), " A large scale in

- situ demonstration test for repository sealing in an argillaceous host rock – RESEAL Project – Phase 1”, EUR 19612 EN
- Wan A.W.L., Gray M.N. & Graham J. (1995), “On the relations of suction, moisture content and soil structure in compacted clays”, *Unsaturated soils/sols non saturés*, Alonso et Delage (eds), pp 215 -222
- Yu A.B. & Standish N. (1987), “Calculation of multi component mixtures of particles”, *Powder technology*, vol 5 2, pp 233-241
- Yu A.B. & Standish N. (1988), “An analytical parametric theory of the random packing of particles”, *Powder technology*, vol 5 5 , pp 171-186
- Yu A.B. & Standish N. (1991), “Estimation of the porosity of particles mixtures by a linear -mixture packing model”, *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 30, n° 6 , pp. 1372 – 1385
- Yu A.B., Zou R.P. & Standish N. (1992), “The packing of ternary mixtures of non spherical particles”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol 75 , pp 2765 -2772
- Yu A.B. & Standish N. (1993a), “A study of the packing of particles with a mixture size distribution”, *Powder Technology*, vol. 76 , pp. 113-124
- Yu A.B. & Standish N. (1993b), “Limitation of proposed mathematical models for the porosity estimation of non spherical particle mixtures”, *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 32, pp. 2179-2182
- Yu A.B. & Standish N. (1993), “Characterisation of non spherical particles from their packing behaviour”, *Powder technology*, vol 74, pp 205 -213
- Yu A.B., Standish N. & Mc Lean A. (1993), “Porosity calculation of binary mixtures of non spherical particles”, *J. Am. Ceram. Soc.*, vol 76, pp 2813-2816
- Yu A.B., Zou R.P., Standish N. & Xu D.L. (1992), ‘Effect of particle size distribution on porosity of packed particles”, *proceedings of the 1st international particle technology forum*, vol 2, Denver, Août 1994, eds American institute of chemical engineers (New York)
- Yu A.B., Zou R.P. & Standish N. (1996), “Modifying the linear packing model for predicting the porosity of nonspherical particle mixtures”, *Industrial & engineering chemistry research*, vol. 35 , pp. 3730-3741
- Yu A.B., Bridgwater J. & Burbidge A. (1997), “On the modelling of the packing of fine particles”, *Powder Technology*, vol. 92, n° 3 , pp. 185 -194
- Zhang Z.P., Yu A.B. & Dodds J.A. (1997), “Analysis of the pore characteristics of mixtures of disks”, *Journ. Of Colloï ds and Interface Science*, vol. 195 , pp. 8-18

Zou R.P. & Yu A.B. (1996), "Evaluation of the packing characteristics of monosized nonspherical particles", Powder technology, vol 88, pp 71-79