

---

---

# Loi de comportement à surface limite pour les argiles naturelles

**Sanae AHAYAN<sup>1</sup>, Z.YIN<sup>2</sup>, P.KOTRONIS<sup>3</sup>, F.COLLIN<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Ecole Centrale de Nantes, Département GeM, Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : sanae.ahayan@ec-nantes.fr

<sup>2</sup> Ecole Centrale de Nantes, Département GeM, mail : zhenyu.yin@ec-nantes.fr

<sup>3</sup> Ecole Centrale de Nantes, Département GeM, mail : panagiotis.kotronis@ec-nantes.fr

<sup>4</sup> Université de Liège, Département ArGEnCo, mail : f.collin@ulg.ac.be

---

*RÉSUMÉ. Ce travail présente la formulation d'une nouvelle loi de comportement à surface limite pour les argiles naturelles surconsolidées. Elle se base sur la théorie de l'état critique, et introduit une nouvelle loi d'écroissage rotationnel et une nouvelle fonction de distance. La loi d'écroissage rotationnel proposée respecte les différentes conditions de chargement, assure l'unicité de l'anisotropie à l'état critique, comme elle limite les rotations excessives de la surface de charge. La fonction de distance permet une évolution progressive de la plasticité à l'intérieur de la surface limite, et cela sans aucun paramètre supplémentaire. Le modèle est validée sur des essais triaxiaux drainés et non drainés sur les argiles d'Otaniemi et LCT pour différentes valeurs d'OCR.*

*ABSTRACT. This work presents a critical state bounding surface constitutive model for describing the behavior of natural clays for a wide range of overconsolidation ratios. A novel rotational hardening rule is presented, and a hardening function is introduced to describe the evolution of the bounding surface. The proposed model provides more realistic description of numerous elements of clay behavior. The rotational hardening law respects different loading conditions. It provides the uniqueness of anisotropy at the critical state, and limits the excessive rotations of the yield surface. The hardening function allows a smooth transition of stresses within and on the bounding surface. Verification is done against published results of drained and undrained tests in triaxial compression and extension, on the samples with various overconsolidation ratios.*

*MOTS-CLÉS : loi de comportement, argile, anisotropie, plasticité, écroissage, surface limite*

*KEYWORDS: constitutive law, clay, anisotropy, plasticity, hardening, bounding surface*

---

## 1. Introduction

Les argiles naturelles se caractérisent par une anisotropie inhérente, qui reflète la structure microscopique des sols, et une anisotropie induite par le chargement, qui est celle des sols initialement isotropes ayant subi des surcharges historiques.

L'anisotropie induite par le chargement est une caractéristique du comportement mécanique des sols dont l'existence est bien connue dans le cas des sols déposés par couches au cours de leur formation [TAV 90]. Plusieurs modèles anisotropes ont été proposés en imposant une rotation de la surface de charge avec le chargement : [SEK 77], [DAF 86a], [WHE 03],... Ces modèles utilisent une loi d'érouissage rotationnel qui lie la variation de la rotation de la surface de charge aux déformations plastiques ([HAS 98] , [YIN 15]...).

D'autres auteurs combine l'anisotropie à la déstructuration [KAR 05] . Ils supposent que la taille et/ou le centre de la surface de charge dépend de la dégradation de la structure argileuse [GEN 93] [NOV 03] [BAU 04],...

Ces modèles prévoient peu de flexibilité pour décrire le changement du module plastique avec la direction du chargement. Ils sont incapables de reproduire la dégradation de la rigidité durant le chargement, comme tout modèle élastoplastique avec une seule surface de charge. Le recours à une théorie avancée de plasticité est alors nécessaire pour modéliser finement le comportement des argiles.

Les modèles à surface limite permettent d'introduire une transition de plasticité dans le domaine élastique [JOC 17], [YAO 09],... Ces modèles proposent deux surfaces de charges : une surface limite, qui suit l'évolution des variables d'érouissage, et une surface de charge intérieure, définie par l'état de contrainte actuel. Ces modèles utilisent un érouissage cinématique et une fonction de distance pour déterminer l'évolution relative des deux surfaces de charge [DAF 86b].

Ce travail représente la formulation d'une nouvelle loi de comportement à surface limite pour les argiles naturelles. Elle se base sur la théorie de l'état critique, et introduit une nouvelle loi d'érouissage rotationnel et une nouvelle fonction de distance. Le modèle reproduit aussi la dégradation de la structure argileuse. La loi est validée sur des essais triaxiaux drainés et non drainés sur les argile d'Otaniemi [KAR 08] et LCT [GEN 82].

## 2. Loi de comportement dans les conditions triaxiales

Le modèle développé se base sur les hypothèses suivantes dans le plan triaxial :

- Le sol est anisotrope.
- Les déformations plastiques se développent tout au début du chargement.
- Les variables d'érouissage dépendent des incréments de déformations plastiques volumiques et déviatoriques.

- La surface limite est de type Cam-Clay modifié et inclinée dans le plan des contraintes. La variation de cette inclinaison est régie par une loi d'érouissage rotationnel, ce qui représente l'évolution de l'anisotropie avec le chargement.

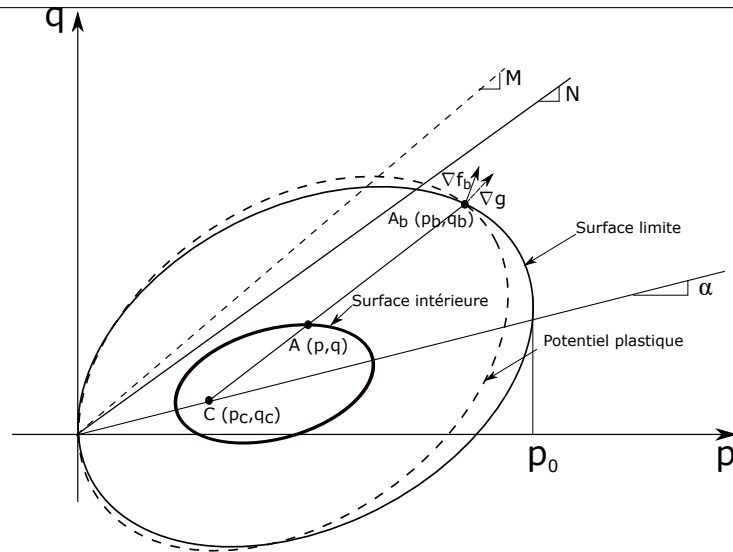
- La taille de la surface limite est déterminée par la contrainte moyenne effective maximale. Cette variable d'état suit le même érouissage isotrope que le Cam-Clay modifié.

Le point  $A(p, q)$  dans la Figure 1 représente l'état de contrainte actuel. Ce point définit la surface de charge intérieure. Celle-ci est homothétique à la surface limite par rapport au point de projection  $C$ . Un état de contrainte « image »  $A_b$  est définie comme la projection de l'état de contrainte actuel  $A$  sur la surface limite par rapport au centre de projection  $C$ . Les états de contrainte  $A$  et  $A_b$  sont liés par l'équation suivante [DAF 86b] :

$$\begin{aligned} p_b &= p_c + b(p - p_c) \\ q_b &= q_c + b(q - q_c) \end{aligned} \quad [1]$$

Avec :

$$b = \frac{p_b}{p} = \frac{q_b}{q} \quad [2]$$



**Figure 1.** Surface intérieure, surface limite et potentiel plastique dans le plan triaxial

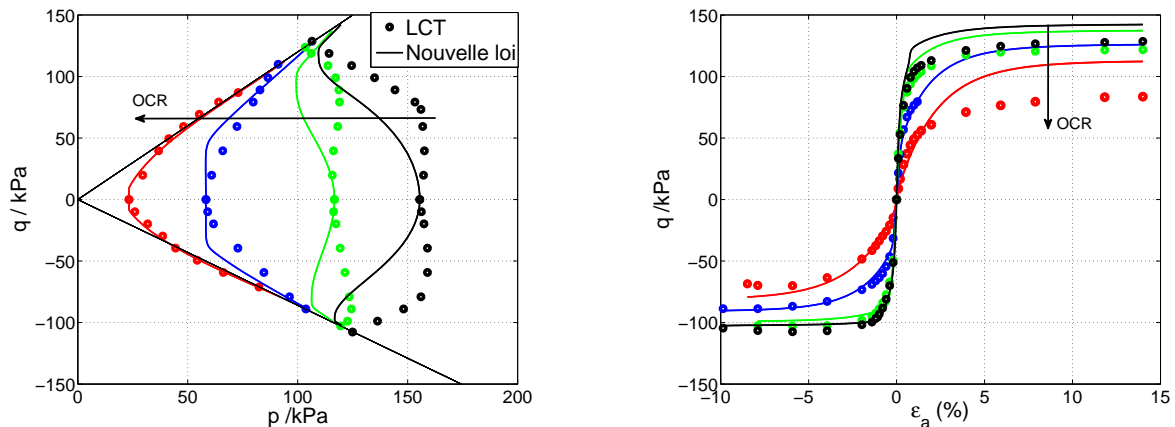
La loi d'écoulement prend la même forme elliptique inclinée que la surface limite, mais cette dernière a une valeur différente de la pente de la droite d'état critique.

Le modèle de comportement proposé utilise dix constantes, dont cinq sont les constantes du Cam-Clay Modifié, une constante pour la loi d'écroutissage rotationnel, une pour le potentiel plastique et trois constantes pour la déstructuration.

L'originalité de cette loi consiste au développement d'une fonction de distance sans aucun paramètre supplémentaire, seulement en se basant sur le calcul de dilatance. La loi d'écroutissage rotationnel proposée respecte les différentes conditions de chargement, assure l'unicité de l'anisotropie à l'état critique, comme elle limite les rotations excessives de la surface de charge.

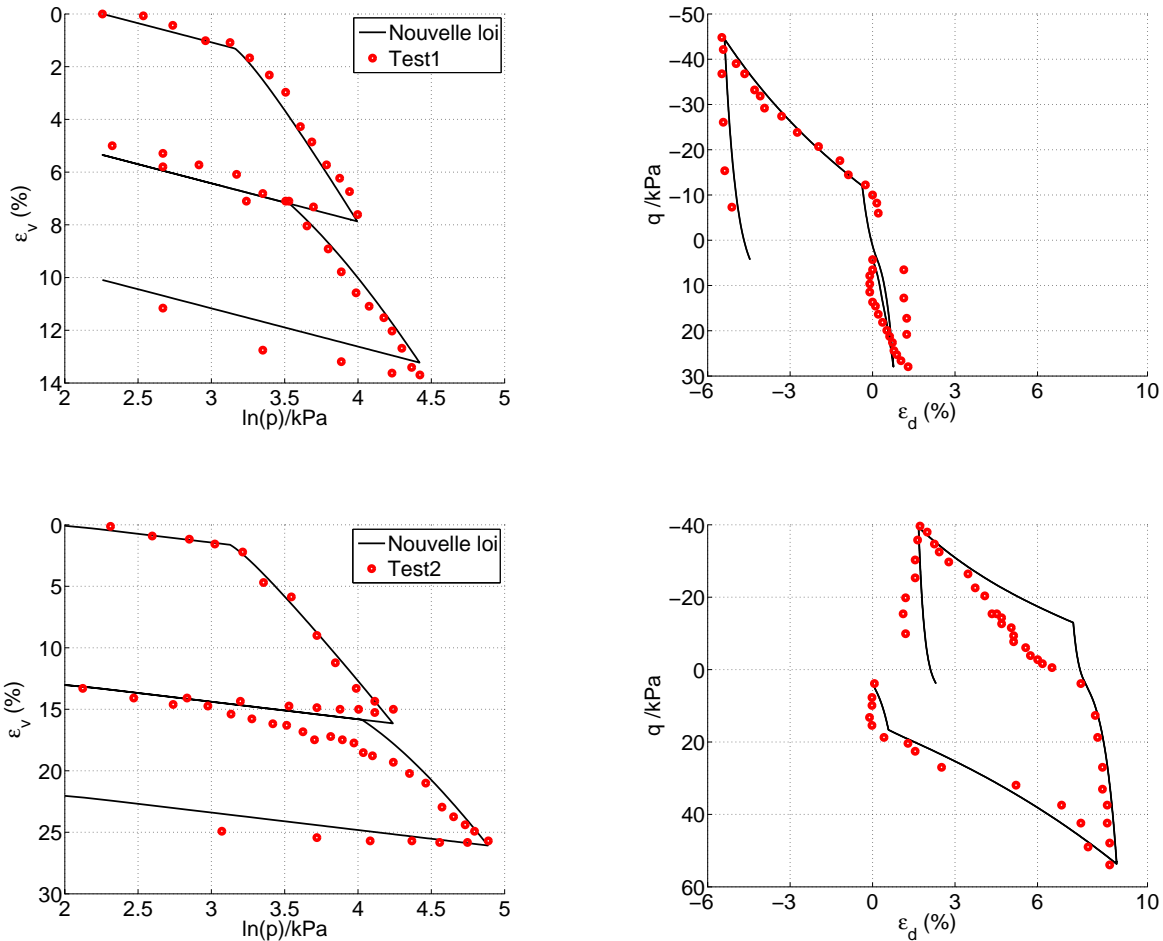
### 3. Validation

La Figure 2 représente la modélisation des essais triaxiaux non drainés sur l'argile isotrope LCT sous différents OCR (10,4,2,1.5). Afin de valider la fonction de distance proposée, l'écroutissage rotationnel a été annulé et la loi d'écoulement a été considérée associée ( $f = g$ ). Les résultats présentés ont été simulés seulement avec les paramètres du Cam-Clay modifié.



**Figure 2.** Modélisation et résultats expérimentaux des essais triaxiaux non drainés de l'argile LCT pour différentes valeurs d'OCR (2,1.5,4 et 10)

La Figure 3 représente la modélisation des essais triaxiaux drainés de l'argile d'Otaniemi. Cette argile, fortement anisotrope, a été choisie pour valider la loi d'écroutissement rotationnel.



**Figure 3.** Modélisation et résultats expérimentaux de deux essais triaxiaux drainés sur l'argile d'Otaniemi

#### 4. Conclusion

La loi de comportement proposée permet de modéliser plus finement le comportement de l'argile naturelle. Grâce à une nouvelle fonction de distance, le comportement des argiles surconsolidées est modélisé correctement seulement avec les paramètres du Cam-Clay Modifié.

En plus, le modèle proposé reproduit l'anisotropie induite par le chargement à l'aide d'une nouvelle loi d'écroutissement rotationnel, les essais modélisés montrent une bonne corrélation avec les données expérimentales.

#### Bibliographie

##### 5. Bibliographie

- [BAU 04] BAUDET B., STALLEBRASS S., « A constitutive model for structured clays », *Géotechnique*, vol. 54, n° 4, p. 269–278, Thomas Telford Ltd, 2004.
- [DAF 86a] DAFALIAS Y. F., « An anisotropic critical state soil plasticity model », *Mechanics Research Communications*, vol. 13, n° 6, p. 341–347, Elsevier, 1986.
- [DAF 86b] DAFALIAS Y. F., « Bounding surface plasticity. I : Mathematical foundation and hypoplasticity », *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 112, n° 9, p. 966–987, American Society of Civil Engineers, 1986.

- [GEN 82] GENS A., Stress-strain and strength characteristics of a low plasticity clay, PhD thesis, Imperial College London (University of London), 1982.
- [GEN 93] GENS A., NOVA R., « Conceptual bases for a constitutive model for bonded soils and weak rocks », *Geotechnical engineering of hard soils-soft rocks*, vol. 1, n° 1, p. 485–494, Balkema : Rotterdam, 1993.
- [HAS 98] HASHIGUCHI K., CHEN Z., « Elastoplastic constitutive equation of soils with the subloading surface and the rotational hardening », *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, vol. 22, n° 3, p. 197–227, London ; New York : J. Wiley, c1977-, 1998.
- [JOC 17] JOCKOVIĆ S., VUKIĆEVIĆ M., « Bounding surface model for overconsolidated clays with new state parameter formulation of hardening rule », *Computers and Geotechnics*, vol. 83, p. 16–29, Elsevier, 2017.
- [KAR 05] KARSTUNEN M., KRENN H., WHEELER S. J., KOSKINEN M., ZENTAR R., « Effect of anisotropy and destructuration on the behavior of Murro test embankment », *International Journal of Geomechanics*, vol. 5, n° 2, p. 87–97, American Society of Civil Engineers, 2005.
- [KAR 08] KARSTUNEN M., KOSKINEN M., « Plastic anisotropy of soft reconstituted clays », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 45, n° 3, p. 314–328, NRC Research Press, 2008.
- [NOV 03] NOVA R., CASTELLANZA R., TAMAGNINI C., « A constitutive model for bonded geomaterials subject to mechanical and/or chemical degradation », *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, vol. 27, n° 9, p. 705–732, Wiley Online Library, 2003.
- [SEK 77] SEKIGUCHI H., « Induced anisotropy and time dependency in clay », *9th ICSMFE, Tokyo, Proc. Speciality session 9, 1977*, 1977.
- [TAV 90] TAVENAS F., LEROUÉIL S., « Laboratory and in situ stress-strain-time behaviour of soft clays », *Int Symp Geotech Eng Soft Soils Mexico City*, vol. 2, p. 1–46, 1990.
- [WHE 03] WHEELER S. J., NÄÄTÄNEN A., KARSTUNEN M., LOJANDER M., « An anisotropic elastoplastic model for soft clays », *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, n° 2, p. 403–418, NRC Research Press, 2003.
- [YAO 09] YAO Y., HOU W., ZHOU A., « UH model : three-dimensional unified hardening model for overconsolidated clays », *Geotechnique*, vol. 59, n° 5, page451, 2009.
- [YIN 15] YIN Z.-Y., YIN J.-H., HUANG H.-W., « Rate-dependent and long-term yield stress and strength of soft Wenzhou marine clay : experiments and modeling », *Marine Georesources & Geotechnology*, vol. 33, n° 1, p. 79–91, Taylor & Francis, 2015.