

## Time effects in geomaterials

### Effets du temps dans les géomatériaux

Jean-Michel Pereira

Université Paris-Est, Laboratoire Navier (UMR 8205), CNRS, ENPC, IFSTTAR, F-77455 Marne-la-Vallée, France

The present paper was presented at the 'Workshop CMG14, Caractérisation et Modélisation des Géomatériaux' Biskra, 25-26 February 2014  
Published online: 28 June 2014

**Abstract:** In this paper, time effects, seen as strain rate effects and creep phenomenon, on the mechanical behaviour of geomaterials are considered. Coupling between these effects and partial saturation of geomaterials is more particularly studied. An elasto-visco-plastic model, called RASTRA, is presented and validated from the comparison with experimental data.

#### Keywords

Strain rate  
Creep  
Suction  
Partial saturation  
Elastoplasticity

© 2014 The author. Published by the Faculty of Sciences & Technology, University of Biskra. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>)

**Résumé :** Dans cet article, les effets du temps, vus comme les effets de la vitesse de chargement et le phénomène de fluage, sur le comportement mécanique des géomatériaux sont abordés. Le couplage entre ces effets et le caractère partiellement saturé des géomatériaux est plus particulièrement étudié. Un modèle élasto-visco-plastique, appelé RASTRA, est présenté puis validé sur la base d'une comparaison avec des données expérimentales.

**Mots clés :** Vitesse de chargement, fluage, succion, saturation partielle, élastoplasticité.

## 1. Introduction

Les échelles de temps considérées pour les essais de caractérisation au laboratoire du comportement de sols et roches sont souvent très différents des échelles pertinentes dans bon nombre d'applications géotechniques. Que ce soit les vitesses de sollicitation ou les temps de fluage, les essais réalisés au laboratoire sont souvent plus rapides et peuvent ne pas être représentatifs, en termes de temps caractéristiques, des applications géotechniques ciblées.

Il est donc important de bien connaître les effets du temps (définis comme la sensibilité de la réponse du matériau à la vitesse de chargement ainsi que la tendance du matériau à fluer). Cette connaissance, alliée à un cadre de modélisation bien défini, doit permettre de prédire à l'échelle de l'ouvrage le comportement dépendant du temps de ce dernier. Il a été observé expérimentalement que les paramètres environnementaux (humidité, température) jouent un rôle non-négligeable sur la réponse dépendant du temps des géomatériaux.

Après une brève revue de littérature sur les effets du temps dans les géomatériaux, un modèle élasto-visco-plastique est présenté et validé sur la base de données expérimentales. Ce modèle vise plus particulièrement à rendre compte du rôle joué par la saturation partielle sur ces effets du temps.

## 2. Quelques données expérimentales et éléments de modélisation

Les effets du temps ont été étudiés et observés pour une grande variété de géomatériaux. On peut citer les sols fins (e.g. [Bjerrum 1967 ; Vaid et Campanella 1977 ; Kim et Leroueil 2001 ; Leroueil 2006 ; Sorensen et al. 2007]), les sables (e.g. [Tatsuoka et al. 2000 ; Di Benedetto et al. 2002]), les enrochements (e.g. [Oldecop et Alon 2003 & 2007]), les roches et roches tendres (e.g. [Šuklje 1957 ; De Gennaro et al. 2003 ; Fabre et Pellet 2006 ; Priol et al. 2007]). Récemment, des articles de bibliographie sur les processus dépendant du temps dans les sols ont été proposés (Augustesen et al. 2004 ; Liingaard et al. 2004 ; Laloui et al. 2008).

Bien que souvent identifié aux phénomène de fluage (consolidation secondaire), le comportement visqueux des sols est maintenant considéré de façon moins restrictive dans le sens où il est vu comme le résultat d'une sensibilité de la réponse du matériau vis-à-vis de la vitesse de déformation. En effet, les effets du temps, au sens large, ont un effet sur le comportement apparent du sol à la fois en compression (modification de la limite élastique) et en cisaillement (modification de la résistance au cisaillement). Dans ce contexte et afin de modéliser ces aspects comportementaux, les relations classiques déformation — contraintes effectives doivent être étendues. A la suite des travaux précurseurs de Šuklje (1957), Leroueil et al. (1985) ont

Corresponding author. Tel.: +33164153548 ; fax: +33164153562.

E-mail address: jeanmichel.pereira@enpc.fr

URL: <http://navier.enpc.fr/~pereira/>

démontré expérimentalement sur des argiles soumises à une compression uniaxiale qu'une extension naturelle consiste à incorporer la vitesse de chargement comme variable d'état supplémentaire. En d'autres termes, l'état d'un sol est entièrement décrit par une relation unique entre la contrainte verticale, la déformation verticale et le taux de déformation verticale ( $\dagger_v; v_v; \dot{v}_v$ ). Cette loi rhéologique est couramment appelée comportement isotach (Šuklje 1957).

Plusieurs approches ont été proposées pour la modélisation du comportement dépendant du temps des géomatériaux. De nombreux modèles sont basés sur l'hypothèse élasto-visco-plastique de Perzyna (Malvern 1951 ; Perzyna 1964). Ces modèles sont souvent qualifiés de modèles à sur-contrainte (« over-stress models »). Des modèles de ce type sont présentés dans Adachi and Oka (1982), Fodil et al. (1997), Datcheva et al. (2001), Collin et al. (2002), De Gennaro et al. (2003), Alonso et al. (2005), Yin et al. (2007). Un défaut majeur de ces modèles à sur-contrainte réside dans le faible sens physique porté par leurs paramètres visqueux et dans la façon de déterminer ces paramètres. Une procédure essai-erreur est d'ailleurs généralement nécessaire pour les caler.

Divers modèles ont été développés en adoptant la notion de temps équivalent (ou de référence) due à Bjerrum (e.g. [Bjerrum 1967 ; Borja et Kavazanjian 1985 ; Krogsboll 1998 ; Yin et Graham 1999 ; Vermeer et Neher 2000 ; Yin et al. 2007 ; Hickman et Gutierrez 2007]). Dans ces modèles, les déformations viscoplastiques évoluent en logarithme du temps et sont parallèles entre elles (time-lines) pour différents temps de charge soutenue (fluage). La Figure 1 illustre ce comportement isotach idéal. Dans la mesure où le temps apparaît explicitement dans les équations de comportement, ces modèles peuvent souffrir de quelques inconvénients dans le cas d'histoires de chargement complexes si l'origine des temps n'est pas définie convenablement.

Finalement, d'autres modèles utilisent le concept de surface de charge non-stationnaire (Non-Stationary Flow Surface — NSFS) ou cadre élastoplastique étendu (e.g. [Dragon et Mroz 1979 ; Nova 1982 ; Lemaitre et Chaboche 1985 ; Liingaard et al. 2004]). Dans ce cas également, le temps est souvent considéré de façon explicite en tant que variable interne.

Bien que de nombreuses contributions soient dédiées à la description du comportement mécanique dépendant du temps de géomatériaux saturés, quelques modèles seulement se sont attachés au cas de matériaux partiellement saturés. Les états partiellement saturés correspondent pourtant à une situation couramment rencontrée en pratique puisque les géomatériaux sont soumis de façon répétitive à des cycles d'humidification-séchage d'origine naturelle ou produits par l'activité humaine. Quelques exemples peuvent être donnés. En géotechnique conventionnelle, les ouvrages en terre sont soumis aux interactions avec l'atmosphère et sont donc sujets à désaturation. Dans l'ingénierie minière, l'excavation de galeries pour exploiter de la craie, par exemple, induit une désaturation de la roche à proximité des parois des piliers et des cavernes. Dans les ouvrages de stockage de déchets radioactifs, une barrière ouvragée constituée d'argile compactée partiellement saturée est envisagée dans certaines configurations, comme en France et en Suisse. Le stockage géologique de dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ) dans des réservoirs profonds implique également des géomatériaux partiellement saturés (Pijaudier-Cabot et Pereira 2012 ; Vallin et al. 2013).

Dans de telles conditions, le couplage entre les effets de la saturation partielle et du taux de déformation doit être considéré. Cet aspect a été étudié récemment par Oldecop et Alonso (2003 ; 2007) dans des enrochements, dans le projet Pasachalk 2 (2004) ou par Priol (2005), Priol et al. (2007) et De Gennaro et al. (2004) dans de la craie, par Herbstová et Herle (2009) dans des argiles et par Muñoz-Castelblanco et al. (2011) dans un loess naturel. Les principaux résultats de ces travaux indiquent que les changements d'humidité modifient le taux de fluage et la sensibilité de la contrainte de préconsolidation apparente vis-à-vis du taux de déformation. Cependant, il n'existe pas ou peu de modèle capable de rendre compte des effets couplés du taux de déformation et de l'humidité.

De Gennaro et al. (2009), Pereira et De Gennaro (2009) et De Gennaro et Pereira (2013) ont proposé un modèle visqueux, développé et validé pour des craies, appelé RASTRA et qui tient compte des effets du temps au moyen d'une loi d'érouissage dépendant du taux de chargement.

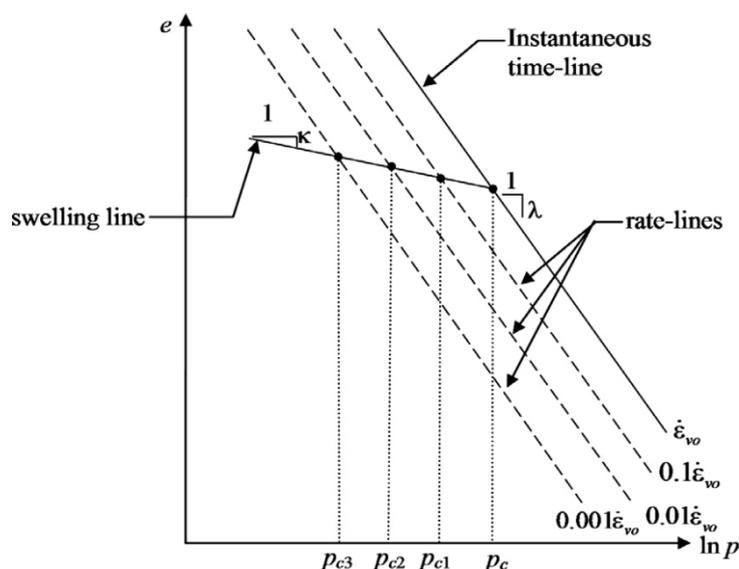


Fig. 1. Réponse isotach idéale d'un sol sensible aux effets du temps (d'après Hickman et Gutierrez 2007).

Dans la suite de cet article, le modèle RASTRA est présenté de façon synthétique et quelques essais expérimentaux sur des sols différents, saturés et partiellement saturés, sont reproduits à l'aide de ce modèle.

### 3. Modèle élasto-visco-plastique RASTRA

Le modèle RASTRA (pour « RATE of STRAIN ») se base sur un cadre élasto-plastique généralisé. Il peut être considéré comme une extension du modèle de Barcelone pour les sols non-saturés (BBM) développé par Alonso et al. (1990), ce modèle étant lui-même une extension du modèle Cam-Clay modifié (MCC). Dans ce cadre, la limite élastique (contrainte de préconsolidation) dans l'état saturé  $p_0^*$  (i.e. celle qui est définie dans le modèle MCC) est définie comme suit :

$$p_0^* (v_v^p, \dot{v}_v) = p_0^{ref} \left( \frac{\dot{v}_v}{\dot{v}_v^{ref}} \right)^{r(s)} \exp \left( \frac{1+e}{\gamma} v_v^p \right) \quad (1)$$

Il s'agit de la définition classique (écrouissage porté par la déformation volumique plastique) mis à part le fait que la contrainte de préconsolidation de référence (état vierge de toute déformation plastique) dépend maintenant de la vitesse de chargement (voir les deux coefficients précédant l'exponentielle dans le terme de droite de l'équation ci-dessus).

Il est à noter que cette préconsolidation de référence évolue comme la puissance de la vitesse de déformation (voir Figure 2). Ce choix se fonde sur des observations expérimentales sur de nombreux matériaux (cf. section précédente (Leroueil 2006)) est étendue ici au cas des sols non-saturés. Les données disponibles pour les sols partiellement saturés sont peu nombreuses. Dans ce contexte, une relation linéaire entre le coefficient  $\alpha$  et la succion est considérée :  $\alpha(s) = \alpha_{sat} + b s$ . Cette hypothèse semble toutefois réaliste dans le cas des craies étudiées dans Priol (2005) et Priol et al. (2007) et les enrochements (Oldecop et Alonso 2003 et 2007), au moins dans des domaines de suctions courants. Il est à noter toutefois que cette relation ne peut être étendue pour des succion très élevées ; une valeur plancher pour  $\alpha$  doit donc être envisagée dans ce modèle.

Concernant la détermination des paramètres, il convient de déterminer la pression de préconsolidation apparente pour un taux de déformation de référence puis le paramètre  $\alpha$  qui donne l'évolution de cette contrainte avec le taux de déformation. Ce paramètre d'évolution doit être déterminé pour le cas saturé et pour plusieurs valeurs de succion afin de caler la relation linéaire mentionnée plus haut entre  $\alpha$  et la succion. Il est intéressant de noter que le paramètre  $\alpha$  est strictement égal au rapport  $C_\alpha/C_v$ , qui implique deux paramètres couramment déterminés lors des reconnaissances géotechniques.

### 4. Validation et simulation de données expérimentales

Les simulations présentées ici sont menées avec un jeu de paramètres calés sur des données expérimentales obtenues sur une craie de carrière prélevée près d'Estreux, France (Nguyen 2008). Ce jeu est donné au Tableau 1. La Figure 3 montre les résultats de trois compressions isotropes à succion contrôlée (conditions saturées drainées (i.e. succion nulle) et suctions de 0,2 MPa et de 1 MPa). Dans chaque cas, la phase de compression (menée à vitesse de déformation fixe) est poursuivie d'une phase de fluage, réalisée numériquement en diminuant le taux de déformation. Le modèle est bien capable de prédire un écrouissage apparent lorsque la succion augmente (il s'agit d'une caractéristique issue du modèle BBM). Il est intéressant de voir que le fluage dépend de la succion (la pente de l'indice des vides avec le logarithme du temps diminue lorsque la succion augmente).

La Figure 4 montre la simulation d'un essai oedométrique sur une craie non-saturée suivi d'une saturation sous contrainte verticale constante. A titre de comparaison, cette simulation est réalisée en utilisant le modèle RASTRA ainsi qu'avec le modèle BBM (qui est obtenu simplement à l'aide de RASTRA en imposant une valeur de  $\alpha$  nulle quelle que soit la succion et la vitesse de déformation). Les autres paramètres, communs aux deux modèles, sont identiques pour les deux simulations. On voit clairement que l'ajout d'une composante visqueuse permet de rendre compte de façon nettement plus satisfaisante de la déformation volumique observée expérimentalement lors de ce qui est appelé l'effondrement dû à la saturation de l'éprouvette.

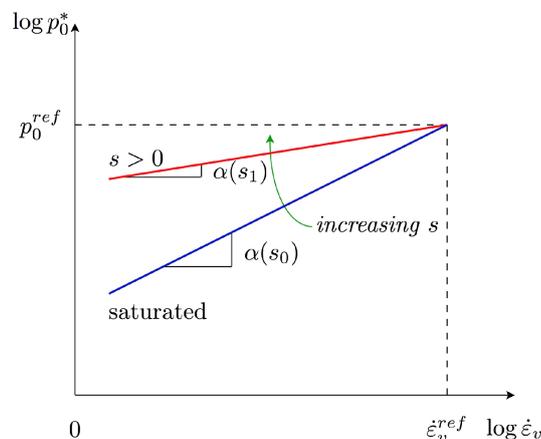
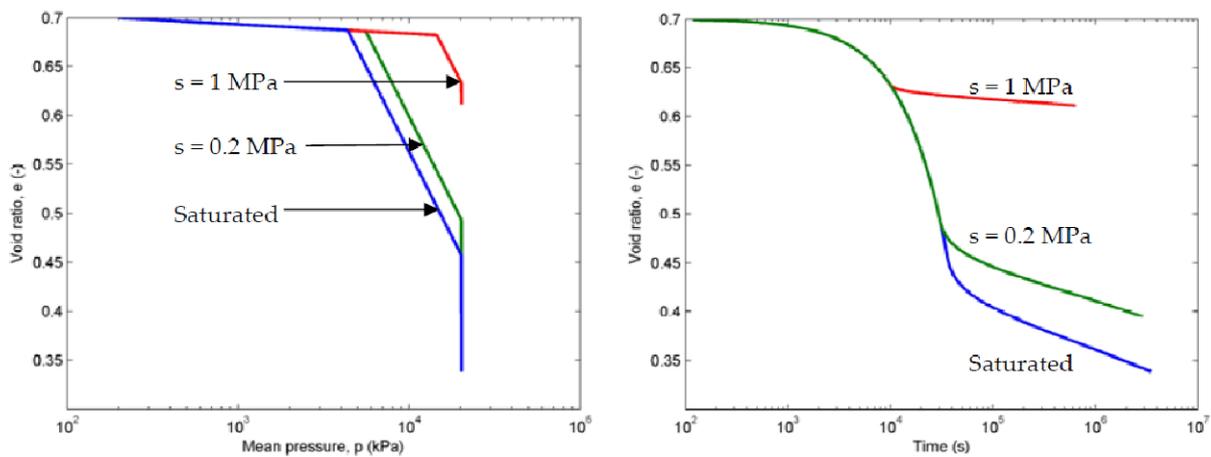


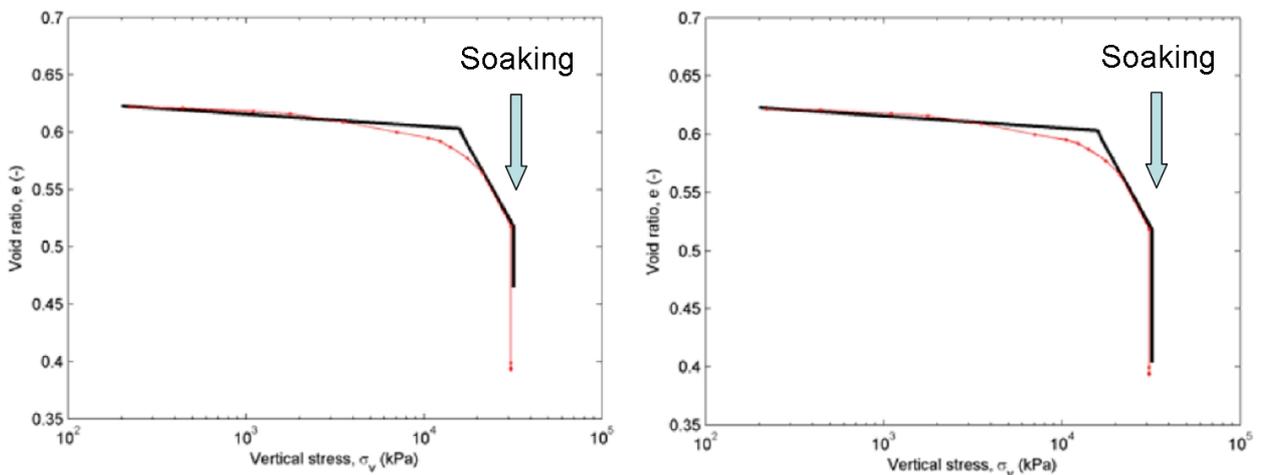
Fig. 2. Représentation schématique de l'évolution de la contrainte de préconsolidation avec le taux de déformation et la succion.

**Tableau 1.** Paramètres du modèle RASTRA pour la craie d'Estreux.

Description	Paramètre	Unité	Valeur
Gonflement élastique (suction)	$\kappa_s$	—	0,0005
Gonflement élastique (contrainte)	$\kappa$	—	0,005
Indice de compressibilité plastique saturé	$\lambda(0)$	—	0,12
Coefficient de Poisson	$\nu$	—	0,3
Pente de la droite d'état critique	$M$	—	1,07
Réduction de la compressibilité avec la suction	$r$	—	0,94
Evolution de la réduction de la compressibilité avec la suction	$\beta$	MPa <sup>-1</sup>	0,5
Pression de référence (courbe LC)	$p^c$	MPa	0,002
Suction limite (surface SI)	$s_0$	MPa	30
Taux de déformation de référence	$\dot{v}_v^{ref}$	s <sup>-1</sup>	0,5
Contrainte de préconsolidation de référence	$p_0^{ref}$	MPa	15,5
Evolution de la préconsolidation avec le taux de déformation (état saturé)	$r_{sat}$	—	0,108
Evolution de $\alpha$ avec la suction	$b$	MPa <sup>-1</sup>	0,106
Valeur minimale de $\alpha$	$r_{min}$	—	0,035



**Fig. 3.** Réponse type du modèle RASTRA dans le cas d'une compression isotrope à suction contrôlée (cas saturé drainé et suctions de 0,2 et 1 MPa) suivie d'une phase de fluage. Gauche : indice des vides en fonction de la contrainte moyenne. Droite : indice des vides en fonction du temps.



**Fig. 4.** Essai oedométrique sur la craie d'Estreux non-saturée suivi d'une saturation sous charge verticale constante. Gauche : modèle BBM. Droite : modèle RASTRA.

## 5. Conclusion

Une synthèse bibliographique sur les effets du temps dans les géomatériaux a été présentée. Elle a montré que la sensibilité de la réponse vis-à-vis de la vitesse de déformation concernait de nombreux types de sols et roches. Cette sensibilité est fortement liée au phénomène de fluage et présente un couplage fort avec l'état de saturation du matériau. Dans ce contexte, un modèle élasto-visco-plastique pour sols partiellement saturés a été présenté et comparé à ces résultats expérimentaux. Il a été montré que ce modèle rend compte correctement des phénomènes observés expérimentalement.

## Remerciements

Le modèle présenté ici est le fruit d'une collaboration avec Vincenzo De Gennaro (Schlumberger, Pau, France) lorsqu'il était enseignant-chercheur à l'ENPC. L'auteur du présent article tient à remercier chaleureusement son collègue pour l'ensemble des travaux qui ont mené au travail qui est présenté ici de façon synthétique. Les lecteurs intéressés sont d'ailleurs invités à consulter la publication récente de De Gennaro et Pereira (2013) où le modèle RASTRA est présenté plus en détails.

## Références

- Adachi, T., F. Oka (1982) Constitutive equations for normally consolidated clays based on elasto-viscoplasticity. *Soils Found* 22(4):57–70.
- Alonso, E.E., A. Gens, A. Josa (1990) A constitutive model for partially saturated soils. *Géotechnique* 40(3):405–430.
- Alonso, E.E., S. Olivella, N.M. Pinyol (2005) A review of Beliche dam. *Géotechnique* 55(4):267–285.
- Augustesen, A., M. Liingaard, P.V. Lade (2004) Evaluation of time-dependent behaviour of soils. *Int J Geomech (ASCE)* 4(3):137–156.
- Bjerrum, L. (1967) Engineering geology of Norwegian normally-consolidated marine clays as related to settlement of buildings. *Géotechnique* 17: 181–118.
- Borja, R.I., E.A. Kavazanjian (1985) Constitutive model for the stress-strain-time behaviour of wet clays. *Géotechnique* 35(3): 283–298.
- Collin, F., Y.J. Cui, Ch. Schroeder, R. Charlier (2002) Mechanical behaviour of chalk reservoir: numerical modelling of water sensitivity and time dependence effects. In: *Proc. ISRM 2003 – technology roadmap for rocks mechanics, South Africa*.
- Datcheva, M., R. Charlier, F. Collin (2001) Constitutive equations and numerical modelling of time effects in soft porous rocks. *Lect Notes Computer Sci.* 1998: 222–229.
- De Gennaro, V., P. Delage, Y.J. Cui, Ch. Schroeder, F. Collin (2003) Time-dependent behaviour of oil reservoir chalk: a multiphase approach. *Soils Found* 43(4): 131–148.
- De Gennaro, V., P. Delage, G. Priol, F. Collin, Y.J. Cui (2004) On the collapse behaviour of oil reservoir chalk. *Géotechnique* 54(6): 415–420.
- De Gennaro, V., J.M. Pereira, M.S. Gutierrez, R.J. Hickman (2009) On the viscoplastic modelling of saturated and partially saturated porous chalks. *Ital Geotech J* 1–2009:44–64.
- De Gennaro, V., J.M. Pereira (2013) A viscoplastic constitutive model for unsaturated geomaterials. *Computers and Geotechnics* 54(Oct): 143–151.
- Di Benedetto, H., F. Tatsuoka, M. Ishihara (2002) Time-dependent shear deformation characteristics of sand and their constitutive modelling. *Soils Found* 42(2): 1–22.
- Dragon, A., Z. Mroz (1979) A model for plastic creep of rock-like materials accounting for the kinetics of fracture. *Int J Rock Mech Min Sci.* 16: 253–259.
- Fabre, G., F. Pellet (2006) Creep and time-dependent damage in argillaceous rocks. *Int J Rock Mech Min Sci.* 43:950–960.
- Fodil, A., W. Aloulou, P.Y. Hicher (1997) Viscoplastic behaviour of soft clay. *Géotechnique* 47(3): 581–591.
- Herbstová, V. (2009) Herle I. Structure transitions of clay fills in North-Western Bohemia. *Eng Geol* 104(3–4): 157–166.
- Hickman, R.J., M.S. Gutierrez (2007) Formulation of a three-dimensional rate-dependent constitutive model for chalk and porous rocks. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 31(4): 583–605.
- Kim Y.T., S. Leroueil (2001) Modelling the viscoplastic behaviour of clays during consolidation: application to Berthierville clay in both laboratory and field conditions. *Can Geotech J* 38(3): 484–497.
- Krogsboll, A. (1998) Constitutive model with time deformations. *Eng Geol* 49:285–292.
- Laloui, L., S. Leroueil, S. Chalindar (2008) Modelling the combined effect of strain rate and temperature on one-dimensional compression of soils. *Can Geotech J* 45: 1765–1777.
- Lemaitre, J., J.L. Chaboche (1985) *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, 532 p.
- Leroueil, S., M. Kabbaj, F. Tavenas, R. Bouchard (1985) Stress-strain-strain rate relation for compressibility of sensitive natural clays. *Géotechnique* 35(2): 159–180.
- Leroueil, S. (2006) The isotache approach. Where are we 50 years after its development by Prof. Šuklje *Proc. 13th Danube-European Conf. on geotechnical engineering, Ljubljana vol. 2, pp. 55–88*.
- Liingaard, M., P. Augustesen, P.V. Lade (2004) Characterization of models for time-dependent behavior of soils. *Int J Geomech ASCE* 4(3): 157–177.
- Malvern, L.E (1951) The propagation of longitudinal waves of plastic deformation in a bar of material exhibiting a strain rate effect. *J Appl Mech* 18: 203–208.
- Muñoz-Castelblanco, J.A., P. Delage, J.M. Pereira, Y.J. Cui (2011) Some aspects of the compression and collapse behaviour of an unsaturated natural loess. *Géotech Lett* 1(April-June): 17–22.
- Nguyen, H.D., V. De Gennaro, P. Delage, C. Sorgi (2008) Retention and compressibility properties of a partially saturated mine chalk. In: *Proc. unsaturated soils: advances in geo-engineering, E-UNSAT, Durham, UK*.
- Nova, R. (1982) A viscoplastic constitutive model for normally consolidated clays. In: *Proc. IUTAM Conf. on Def. and failure of Granular Materials, Delft. pp. 287–95*.
- Oldecop, L.A., E.E. Alonso (2003) Suction effects on rockfill compressibility. *Géotechnique* 53(2): 289–292.

- Oldecop, L.A., E.E. Alonso (2007) Theoretical investigation of the time-dependent behaviour of rockfill. *Géotechnique* 57(3): 289–302.
- Pasachalk 2 (2004) Mechanical behavior of partially and multiphase saturated chalks fluid-skeleton interaction: main factor of chalk oil reservoirs compaction and related subsidence – part 2. Final report, EC Contract no. ENK6-2000-00089.
- Pereira, J.M., V. De Gennaro (2009) Time dependent behaviour of fluids filled geomaterials: application to reservoir formations. In: Proc. 4th biot conference on poromechanics, June 8–10, 2009. Columbia University, New York.
- Perzyna, P. (1964) The constitutive equations for rate sensitive plastic materials. *Quart Appl Mech* 20: 321–32.
- Pijaudier-Cabot, G., J.M. Pereira editors (2012) *Geomechanics in CO2 storage facilities*. London: ISTE-Wiley.
- Priol, G. (2005) *Comportement mécanique d'une craie pétrolifère – comportement différé et mouillabilité*. Doctoral Thesis, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris.
- Priol, G., V. De Gennaro, P. Delage, T. Servant (2007) Experimental investigation on the time dependent behaviour of a multiphase chalk. In: T. Schanz, editor. *Springer Proc. Physics 112, Experimental unsaturated soil mechanics*, pp. 161–7.
- Sorensen, K.K., B.B. Baudet, B. Simpson (2007) Influence of structure on the time- dependent behaviour of a stiff sedimentary clay. *Géotechnique* 57(1): 113-124.
- Šuklje, L (1957) The analysis of the consolidation process by the isotache method. In: Proc. 4th Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., London, vol. 1, pp. 200–206.
- Tatsuoka F., F. Santucci de Magistris, K. Hayano, J. Koseki, Y. Momoya (2000) Some new aspects of time effects on the stress-strain behaviour of stiff geomaterials. *Proc. Int. Conf. on the geotechnics of hard soils-soft rocks*, pp. 1285–1371.
- Vaid, Y.P., R.G. Campanella (1977) Time-dependent behaviour of undisturbed clay. *J Geotech Eng Div ASCE* 103(GT7): 693–709.
- Vallin, V., J.M. Pereira, A. Fabbri, H. Wong (2013) Numerical modelling of the hydro- chemo-mechanical behaviour of geomaterials in the context of CO2 injection. *Int J Numer Anal Meth Geomech* 37(17): 3052–3069.
- Vermeer, P.A., H.P. Neher (2000) A soft soil model that accounts for creep. In: Proc. beyond 2000 in computational geotechnics 10 years of PLAXIS international, Balkema, Rotterdam, pp. 249–261.
- Yin, J.H., J. Graham (1999) Elastic viscoplastic modelling of the time-dependent stress- strain behaviour of soils. *Can Geotech J* 36: 736–745.
- Yin, Z.Y., P.Y. Hicher, Y. Riou, H.W. Huang (2007) An elasto-viscoplastic model for soft clays. *Soil and rock behaviour and modelling. Geotech Special Publ* 150, ASCE, pp. 312–219.