



HAL
open science

Modèle élastoplastique couplé à l'endommagement d'un mortier : effet de la dessiccation

Da Chen, Jian-Fu Shao, Nicolas Burlion, Ismael Yurtdas

► **To cite this version:**

Da Chen, Jian-Fu Shao, Nicolas Burlion, Ismael Yurtdas. Modèle élastoplastique couplé à l'endommagement d'un mortier : effet de la dessiccation. 17e Congrès Français de Mécanique, 2005, Troyes, France. hal-04276575

HAL Id: hal-04276575

<https://hal.science/hal-04276575>

Submitted on 9 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Modèle élastoplastique couplé à l'endommagement d'un mortier : effet de la dessiccation

Da Chen, Ismail Yurtdas, Nicolas Burlion, Jianfu Shao

Laboratoire de Mécanique de Lille, UMR 8107 CNRS
Polytech Lille, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve d'Ascq

Résumé :

Un modèle élastoplastique couplé à l'endommagement est proposé pour décrire le comportement mécanique des matériaux cimentaires sous contraintes de compression et de traction. Une attention particulière est accordée aux effets de la pression de confinement sur l'écoulement plastique et l'évolution de l'endommagement. En se basant sur des données expérimentales d'un mortier soumis aux essais de dessiccation, les évolutions des propriétés mécaniques en fonction de la dessiccation sont étudiées.

Abstract :

A new elastoplastic damage model is proposed to describe mechanical behaviour of cement based materials subject to tensile and compressive stresses. A particular emphasis is put on the pressure sensitivity of plastic flow and damage evolution. Based on experimental data from a mortar subject to desiccation tests, the evolution of mechanical properties as a function of desiccation process is investigated.

Mots clefs :

Mortier ; couplage comportement mécanique –dessiccation ; modélisation ; endommagement ; élastoplasticité

1 Introduction

Les matériaux cimentaires représentent les matériaux de construction les plus répandus dans de divers domaines. Ces matériaux sont souvent soumis à des sollicitations d'origines diverses. La dessiccation est un de ces processus. Il est admis que le comportement mécanique des matériaux cimentaires est affecté par la variation de la teneur en eau pendant le processus de dessiccation. La présence de la force capillaire peut engendrer une augmentation apparente des modules élastiques et de la résistance mécanique. L'hétérogénéité du matériau entre la matrice cimentaire et des granulats pourra induire un endommagement par microfissuration diffuse autour des grains. Par ailleurs, le gradient de la teneur en eau peut également induire un endommagement par effet structural. Dans cette étude, une synthèse expérimentale est présentée sur les effets de la dessiccation sur le comportement mécanique d'un mortier. Un modèle élastoplastique couplé à l'endommagement est proposé pour décrire le comportement mécanique. En se basant sur des données expérimentales, les évolutions des propriétés mécaniques en fonction du processus de la dessiccation sont étudiées. A partir de cette base, un modèle poromécanique sera proposé ultérieurement dans le cadre de la mécanique des milieux partiellement saturés.

2 Etude expérimentale

Une campagne expérimentale complète s'intéressant aux effets de la dessiccation sur le comportement mécanique multiaxiale des mortiers a fait l'objet d'une thèse [1]. Un des mortiers étudié et servant de base à l'étude de la modélisation du couplage dessiccation- comportement mécanique présentée dans la section suivante est un mortier normal. Celui-ci est de dosage pondérale eau : ciment : sable ; 0,5 : 1 : 3, et utilise un

sable normalisé (Leucate) et un ciment classique (CPJ-CEM II/B 32,5 R). Un tel mortier a l'avantage de pouvoir être reproduit par d'autres laboratoires sans difficulté majeure. Cinq jours après le coulage dans un coffrage de poutre, la poutre de mortier a été mise dans une cuve thermostatée à 20°C pendant 6 mois, pour obtenir une maturité optimale et considérer ainsi uniquement les effets de la dessiccation. En effet, il est constaté que l'augmentation de la résistance due à l'hydratation tend vers une stabilisation relative au bout d'environ 3 à 6 mois [2,3] et que les retraits endogènes et thermiques peuvent être considérés comme négligeables après 6 mois de conservation dans l'eau [4,5]. A la suite de cette période de maturation, les éprouvettes sont sorties de la cuve et séparées en trois séries différentes, de manière à pouvoir caractériser l'évolution du comportement mécanique sur une large gamme de humidité relative : éprouvettes protégées de la dessiccation par deux couches d'aluminium autocollant (éprouvettes saturées), éprouvettes laissées en dessiccation en atmosphère contrôlée ($T = 21^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, $H_r = 45\% \pm 5\%$) et éprouvettes séchées dans un four à 60°C jusqu'à poids constant ($H_r = 10\%$) puis protégées de la reprise d'eau par deux couches d'aluminium autocollant. Ensuite, nous avons effectuées des essais de compression simple et triaxiale à 15 MPa de pression de confinement, sur des éprouvettes cylindriques d'élancement de deux ($\phi 37 \times 74 \text{ mm}^2$), en fonction du temps de séchage et du mode de conservation. Notons que ce diamètre d'éprouvettes est adopté afin d'obtenir dans une période raisonnable les paramètres caractérisant l'influence de la dessiccation sur le comportement mécanique. Par ailleurs, le confinement de 15 MPa a été choisi afin de privilégier la microfissuration induite par dessiccation comme pilote du processus de rupture du matériau (pour plus de détails sur la campagne expérimentale voir [1]).

Les figures 1 et 2 montrent l'évolution des déformations axiales en fonction du temps et du mode de conservation pour les cas de compressions uniaxiale et triaxiale (par souci de clarté, les déformations transversales ne sont pas présentées). La dessiccation conduit à une augmentation des résistances (de 21 % pour le cas uniaxial et de 29 % pour le cas triaxial). Par ailleurs, l'application d'un confinement a pour conséquence une augmentation générale de la résistance indépendamment de l'état de saturation. L'augmentation de la résistance uniaxiale et triaxiale avec la dessiccation est attribuée à deux phénomènes concomitants [1,6,7] : le premier est l'effet de la dépression capillaire conduisant à une « précontrainte » du mortier qui devient plus résistant. Le second phénomène est lié aux gradients hydriques créés dans l'éprouvette au cours de la dessiccation [8,9]. La contraction des bords de l'éprouvette sur son cœur a pour conséquence une microfissuration par excès de traction mais aussi un confinement du cœur. Cette contrainte de confinement hydrique induit donc à une augmentation de la capacité portante du mortier : l'éprouvette est « auto-frettée ».

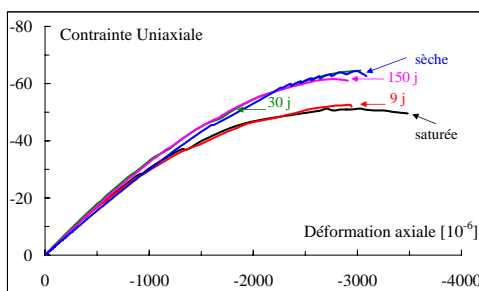


FIG. 1 – Evolution des déformations axiales en fonction de la contrainte uniaxiale.

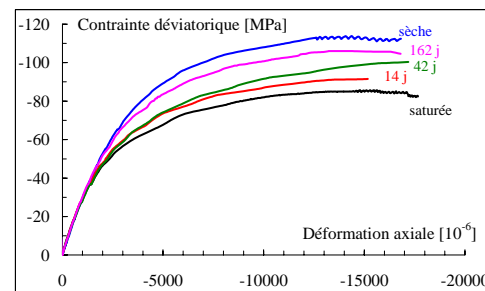


FIG. 2 – Evolution des déformations axiales en fonction de la contrainte triaxiale.

Par ailleurs, la compression des éprouvettes saturées en eau, compte tenu de la faible perméabilité de ce type de matériau, met en surpression le fluide interstitiel. Ceci a un effet moteur sur la propagation et l'ouverture des microfissures dues à la charge axiale. Plus l'éprouvette sèche, plus l'influence de surpression interstitielle diminue. Le fait de constater que l'éprouvette en dessiccation sollicitée en compression triaxiale n'atteigne pas la valeur de l'éprouvette sèche, contrairement au cas uniaxial, traduit une mise en surpression plus importante dans le cas triaxial : il faudrait provoquer un départ d'eau plus important pour atteindre la résistance de l'éprouvette sèche. En outre, le même départ d'eau diminue la plastification du matériau. Il conduit, de plus, à une diminution du module de Young et du coefficient de Poisson par microfissuration induite [1,6,7] : le matériau devient plus fragile. Cette fragilisation est également constatée sur un béton [10].

Le matériau passe d'un comportement élasto-plastique faiblement endommageable à celui fortement endommageable.

3 Modélisation du comportement mécanique des matériaux cimentaires soumis à la dessiccation

Un modèle elasto-plastique couplé à l'endommagement isotrope est élaboré. Celui-ci est capable de reproduire les principaux aspects du comportement mécanique observés.

3.1 Caractérisation plastique

Nous nous plaçons dans l'hypothèse des petites transformations. Nous supposons que les déformations et leurs variations sont constituées d'une partie élastique et d'une partie plastique :

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^e + \varepsilon_{ij}^p, \quad d\varepsilon_{ij} = d\varepsilon_{ij}^e + d\varepsilon_{ij}^p \quad (1)$$

Nous faisons appel à la notion de contrainte effective d'endommagement pour modéliser le couplage entre la plasticité et l'endommagement. Du point de vue physique, la création de microfissures modifie la microstructure du matériau et induit une redistribution des contraintes dans le volume matériel non fissuré. Afin de tenir compte de cette influence, dans le cas isotrope, nous modifions le tenseur des contraintes σ nominal par un tenseur de contraintes effectives d'endommagement $\tilde{\sigma}$ [11].

$$\tilde{\sigma}_{ij} = \tilde{\sigma}_m \delta_{ij} + \tilde{S}_{ij} \quad \text{avec} \quad \tilde{\sigma}_m = \frac{\sigma_m}{1 - \alpha H(\varepsilon_v) d} \quad \text{et} \quad \tilde{S}_{ij} = \frac{S_{ij}}{1 - \beta d} \quad (2)$$

Les deux paramètres α et β caractérisent la dégradation des propriétés mécaniques par l'endommagement. La fonction de Heaviside est introduite pour prendre en compte l'effet unilatéral dû à la refermeture de microfissures. En se basant sur le modèle élastoplastique proposé par Pietruszczak et al. [14] pour des bétons, la surface de rupture est exprimée dans le plan $(I, \bar{\sigma})$ sous la forme suivante :

$$F = c_1 \left[\frac{\bar{\sigma}}{h(\theta) f_{c0}} \right] + c_2 \left[\frac{\bar{\sigma}}{h(\theta) f_{c0}} \right]^2 - \left[c_3 + \frac{I}{f_{c0}} \right] = 0 \quad (3)$$

$$\text{où } \bar{\sigma} = \sqrt{3\tilde{J}_2} = \sqrt{\frac{3}{2} \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}}, \quad I = -tr(\tilde{\sigma}), \quad \theta = \sin^{-1} \left(\frac{3\sqrt{3} \tilde{J}_3}{2 \bar{\sigma}^3} \right), \quad \tilde{J}_2 = \frac{1}{2} \tilde{S}_{ij} \tilde{S}_{ij}, \quad \tilde{J}_3 = \det \tilde{S}.$$

Dans ces expressions, I et $\bar{\sigma}$ sont respectivement la contrainte moyenne et la contrainte déviatorique effectives d'endommagement. f_{c0} désigne la résistance en compression uniaxiale du matériau non endommagé. La fonction $h(\theta)$ permet de prendre en compte la dépendance de la surface de charge vis-à-vis du troisième invariant des contraintes. Pour des raisons de simplicité et comme l'accent est mis sur le couplage hydromécanique, nous avons choisi pour l'instant $h(\theta) = 1$.

À partir de la surface de rupture, on peut définir la surface de charge plastique :

$$f_p = \bar{\sigma} - \alpha_p(\gamma_p) h(\theta) \bar{\sigma}_c = 0, \quad \bar{\sigma}_c = \frac{-c_1 + \sqrt{c_1^2 + 4c_2(c_3 + I/f_{c0})}}{2c_2} f_{c0} \quad (4)$$

$\alpha_p(\gamma_p)$ est la fonction d'écroutissage en fonction de la variable d'écroutissage γ_p et est une fonction croissante entre 0 et 1, quand $t \rightarrow 1, f \rightarrow F$. Elle est définie par :

$$\alpha_p(\gamma_p) = \frac{\gamma_p}{A_1 + \gamma_p}, \quad d\gamma_p = \frac{\sqrt{\frac{2}{3} de_{ij}^p de_{ij}^p}}{\phi_p}, \quad e_{ij}^p = \varepsilon_{ij}^p - \frac{1}{3} \varepsilon_{kk}^p \delta_{ij}, \quad \phi_p = (-I / f_{c0})^{B_1} \quad (5)$$

La fonction ϕ_p est introduite pour le cas où l'écroûissage dépend fortement de la pression de confinement. Notons que le paramètre A_1 dans l'expression (5) contrôle la cinétique de l'écroûissage plastique mécanique.

Les observations expérimentales montrent qu'après une phase de contraction, il y a transition vers une dilatation volumique plastique. Cette dernière est généralement attribuée à la création et à la croissance de microfissures. Une loi d'écoulement non associée doit donc être utilisée pour décrire cette transition. En se basant sur le modèle plastique de Pietruszczak et al. [14]. L'expression suivante est utilisée :

$$g_p = \bar{\sigma} + \eta_c h(\theta) \bar{I} \ln\left(\frac{\bar{I}}{\bar{I}_0}\right) = 0, \quad \bar{I} = c_3 f_{c0} + I \quad (6)$$

où \bar{I}_0 définit le point d'intersection de la surface du potentiel plastique avec l'axe de \bar{I}

3.2 Caractérisation d'endommagement

Dans notre modèle, nous supposons une distribution de microfissure isotrope. La variable scalaire de l'endommagement représente la densité de microfissure $d = Na^3 / \Omega$, où N est le nombre de fissures dans chaque direction, a le rayon moyen de microfissures et Ω le volume élémentaire représentatif. Le module d'incompressibilité effectif, k^{hom} , et le module de cisaillement effectif, μ^{hom} , du matériau endommagé sont respectivement les fonctions de la variable d'endommagement. L'énergie élastique du matériau endommagé est exprimée par

$$\Psi^e = \frac{1}{2} [k^{\text{hom}} (\varepsilon_v^e)^2 + 2\mu^{\text{hom}} e_{ij}^e e_{ij}^e], \quad k^{\text{hom}} = k_0 [1 - \alpha H(\varepsilon_v) d], \quad \mu^{\text{hom}} = \mu_0 (1 - \beta d) \quad (7)$$

où ε_v^e représente la déformation volumique élastique e_{ij}^e sont les composantes du tenseur des déformations élastiques. $H(\varepsilon_v)$ est la fonction de Heaviside, introduite pour tenir compte de l'effet unilatéral lié à la refermeture de microfissures. Les deux paramètres α et β caractérisent la dégradation des propriétés mécaniques par l'endommagement. Leurs valeurs peuvent être identifiées expérimentalement ou par des considérations micromécaniques. Pour des raisons de simplicité, dans la présente étude, nous avons pris $\alpha = 1$ et $\beta = 1$. Ainsi, la loi de comportement s'écrit :

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial \psi}{\partial \varepsilon^e} = 2\mu^{\text{hom}} e_{ij}^e + k^{\text{hom}} \text{tr} \varepsilon^e \delta_{ij} \quad (8)$$

En se basant sur les travaux de Mazars [15], le critère d'endommagement est exprimé sous la forme suivante :

$$f_d = A_2 - \frac{A_2}{\exp[B_3(Y_d - Y_d^0)]} - d = 0 \quad (9)$$

où, Y_d est la force motrice associée à l'endommagement et est exprimée par

$$Y_d = \left[\frac{1}{2} \alpha k_0 (\langle \varepsilon_v^e \rangle^2 + \langle \varepsilon_v^p \rangle^2) + \beta \mu_0 (e_{ij}^e e_{ij}^e + e_{ij}^p e_{ij}^p) \right] / \phi_d, \quad \phi_d = (-I / f_{c0})^{B_2} \quad (10)$$

où $\langle \varepsilon_v \rangle = 0$ si $\varepsilon_v \leq 0$, et $\langle \varepsilon_v \rangle = \varepsilon_v$ si $\varepsilon_v > 0$. La fonction ϕ_d est introduite pour décrire l'influence de la pression de confinement sur l'évolution de l'endommagement. Dans le domaine d'extension, cette influence

est négligeable, nous avons alors pris si $I \leq 0.1 \text{MPa}$, $I = 0.1 \text{MPa}$. L'évolution de l'endommagement est décrite par :

$$d = A_2 - \frac{A_2}{\exp[B_3(Y_d - Y_d^0)]} \quad (11)$$

3.3 Simulations numériques

Dans cette section, nous présentons la comparaison des simulations numériques avec les données expérimentales sur le mortier normal afin de montrer la capacité du modèle à reproduire l'évolution du comportement mécanique multiaxiale. Sur la Figure 3, nous présentons les variations des principaux paramètres mécaniques en fonction du degré de saturation. Il a été montré que le module élastique augmente légèrement en fonction de la dessiccation. La résistance mécanique devient plus élevée quand le matériau est désaturé, ceci se traduit essentiellement par l'augmentation de coefficient de frottement (paramètres c_1 et c_2). Nous comparons sur la figure 4 les résultats du modèle et des expériences en compression uniaxiale et triaxiale déviatorique (à 15 MPa de confinement) pour le cas où les éprouvettes sont saturées : le modèle proposé traduit assez fidèlement l'évolution du comportement mécanique expérimental. Cette même constatation est également faite pour les éprouvettes en dessiccation et sollicitées en compression uniaxiale (figure 5) et triaxiale (figure 6).

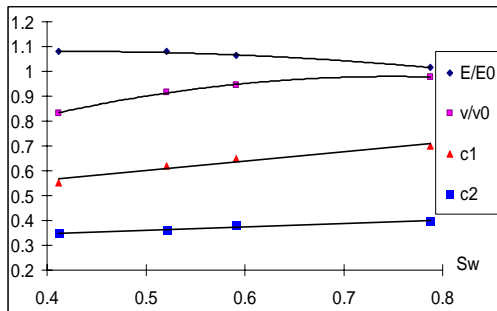


FIG. 3 – L'évolution des paramètres en fonctions du degré de saturation.

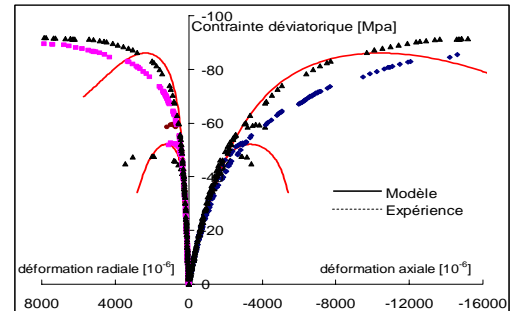


FIG. 4 – Comparaison entre les données expérimentales et les simulations en compression uniaxiale et triaxiale après 9-14 jours de dessiccation.

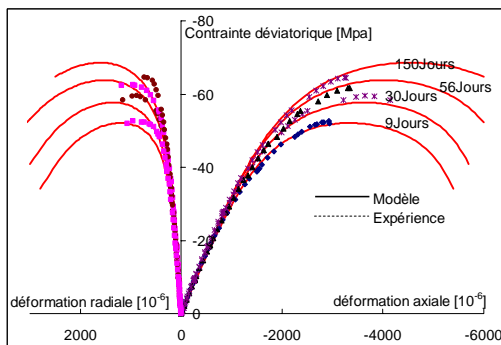


FIG. 5 – Comparaison entre les données expérimentales et la simulation du comportement uniaxial à différents temps de séchage.

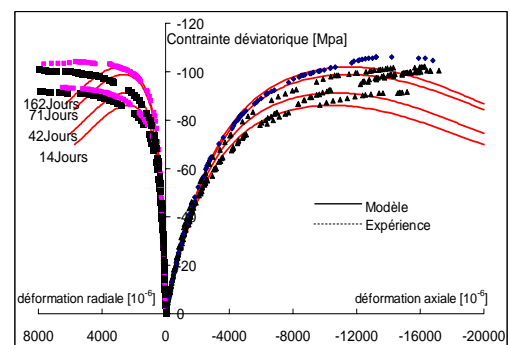


FIG. 6 – Comparaison entre les données expérimentales et la simulation du comportement triaxial à différent temps de séchage.

En outre, la figure 7 illustre l'évolution du comportement mécanique pour des pressions de confinement de 0, 15, 30 et 50 MPa à l'état saturé. Même si nous n'avons pas tous les essais pour la comparaison, nous trouvons cependant une bonne tendance : au fur et à mesure de l'augmentation de la pression de confinement, la résistance à la rupture augmente également, et le comportement prédit du matériau devient plus ductile.

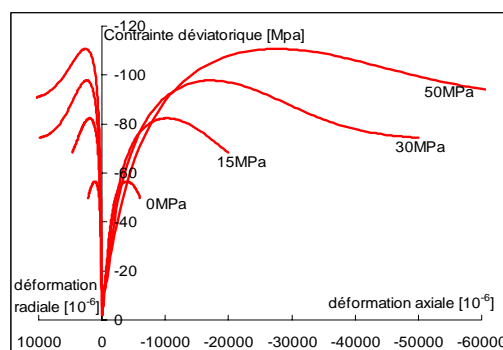


FIG. 7 – Simulations numériques en compression triaxiale en fonction du confinement après 9-14 jours de dessiccation.

4 Conclusions

Un modèle élastoplastique avec endommagement isotrope a été formulé. La comparaison des simulations numériques et les données expérimentales sur un mortier montre que le modèle reproduit les principaux aspects du comportement mécanique d'un mortier en fonction de la dessiccation : la dégradation des propriétés élastiques, les déformations plastiques mécaniques, la transition contractance- dilatance et la forte influence de la pression de confinement.

5 Références Bibliographiques

- [1] I. Yurtdas, Couplage comportement mécanique et dessiccation des matériaux à matrice cimentaire : étude expérimentale sur mortiers, Thèse de doctorat de l'Université des Sciences et Technologies de Lille et de l'École Centrale de Lille, Lille, (2003).
- [2] H. J. Gilkey, The moist curing of concrete, *Engineering news-record* 119 (1937), pp. 630-633.
- [3] S. L. Wood, Evaluation of long-term properties of concrete, *ACI Mater. J.* 88 (6) (1991), pp. 630-643.
- [4] V. Baroghel-Bouny, J. Godin, Experimental study on drying shrinkage of ordinary and high-performance cementitious materials, in: V. Baroghel-Bouny, P.-C. Aïtcin (Eds), *Shrinkage of Concrete*, RILEM Publication PRO 17, Paris, France, (2000) pp. 215-232.
- [5] R. Le Roy, Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performance Thèse de doctorat de l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC n° OA22, Paris, (1996).
- [6] I. Yurtdas, N. Burlion, F. Skoczylas, Triaxial mechanical behaviour of mortar: effects of drying, *Cem. Concr. Res.* (2004), pp. 1131-1143.
- [7] I. Yurtdas, N. Burlion, F. Skoczylas, Experimental characterisation of the drying effect on uniaxial mechanical behaviour of mortar, *Mater. Struct.* (2004), pp. 170-176.
- [8] F. M. Bartlett, J. G. MacGregor, Effect of moisture condition on concrete core strengths, *ACI Materials Journal* 91 (3), 1994, pp. 227-236.
- [9] S. Popovics, Effect of curing method and moisture condition on compressive strength of concrete, *ACI Journal* 83 (4) (1986) 650-657.
- [10] N. Burlion, F. Bourgeois, J.F. Shao, Coupling damage-drying shrinkage : experimental study and modelling, in: V. Baroghel-Bouny, P.-C. Aïtcin (Eds.), *Shrinkage of Concrete*, RILEM Publications PRO 17, Paris, France, (2000), pp. 315-339.
- [11] Lemaitre J. (1992), *A Course on Damage Mechanics*, Second Edition, Springer-Verlag, Berlin.
- [12] A. S. Chiarelli, J. F. Shao and N. Hoteit, Modeling of elastoplastic damage behavior of a claystone , *International Journal of Plasticity* (2003), pp. 23-45
- [13] M. R. Salari, S. Saeb, K. J. Willam, S. J. Patchet and R. C. Carrasco, A coupled elastoplastic damage model for geomaterials, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* (2003), pp. 2625-2643.
- [14] Pietruszczak S., Jiang J. & Mirza F.A., An elastoplastic constitutive model for concrete, *Int J. Solids & Structures* (1988), 24 (7), 705-722
- [15] Mazars J., Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Thèse de Doctorat d'Etat de l'Université Paris 6, (1984).