Panorama des modèles de comportement de sols et roches, de joints

Résumé :

L'objectif de ce document est de fournir une vision d'ensemble des possibilités de modélisation qui s'offrent à l'utilisateur en modélisation du comportement des sols et des roches, auxquelles on a aussi ajouté le comportement des joints pour décrire les interfaces entre milieux géomatériaux. Différents choix sont toujours possibles et le but de ce document n'est pas de se substituer à l'analyse de l'ingénieur mais bien de lui permettre de choisir plus facilement les options de modélisation, en fonction des besoins et des outils disponibles, et de l'orienter vers des documents plus spécifiques.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Table des Matières

1 Introduction....3
1.1 Généralités sur le comportement des sols et des roches, des joints....3
1.2 Objectifs....5
1.3 Ouvrages géotechniques constitués de géomatériaux comme milieux poreux....6
2 La modélisation du comportement en fonction du type d'analyse à mener....7
2.1 La phénoménologie et les modélisations du comportement des sols....8
2.2 L'identification des paramètres de comportement des sols....20
2.2.1 Paramètres physiques généraux....21
2.2.2 Paramètres élastiques....21
2.2.3 Paramètres de comportement non linéaire....22
2.3 La phénoménologie et les modélisations du comportement des roches....22
2.4 L'identification des paramètres de comportement des roches....32
2.5 Les modélisations du comportement des joints....33
2.6 L'identification des paramètres de comportement des joints....41
3 Ce que Code_Aster ne sait pas (encore) faire....41
4 Références....41
5 Description des versions de ce document....42

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1 Introduction

1.1 Généralités sur le comportement des sols et des roches, des joints

La modélisation du comportement des sols et des roches qui constituent de nombreux ouvrages géotechniques cherche à représenter des phénoménologies complexes, en particulier non linéaires en fonction des objectifs de l'étude menée. On peut par exemple s'intéresser à évaluer la capacité de portance d'une fondation, la montée des pressions d'eau, des tassements sismo-induits, l'évolution d'une zone de glissement, la marge disponible avant apparition de la liquéfaction, la tenue à long terme d'un ouvrage souterrain, l'amplification des ondes dans un bassin sédimentaire...

Le comportement mécanique des géomatériaux se caractérise par :

- une asymétrie entre états de traction et états de compression ;
- des évolutions irréversibles, à décrire par des variables internes d'histoire ;
- une *consolidation*, pour un chemin de contraintes sphériques, qui présente une forte non-linéarité ;
- une courbe « d' *état critique* », qui est une donnée du matériau, dans le plan $\log_{10} p' - e$ (*pression de confinement* , dite aussi *contrainte effective moyenne* $p' = \frac{1}{3}\mathrm{tr}(\boldsymbol{\sigma}')$ – *indice des vides* e , qui est relié directement à l' *indice de densité* D_r) où le sol quand il subit un cisaillement pur ne présente plus d'évolution des déformations volumiques (on a $\dot{\varepsilon}_p^v = 0$) ; et on atteint un plateau de résistance dans le plan pression de confinement – contraintes déviatoires $p' - q$. Pour un sol pulvérulent, la courbe « d'état critique » est plutôt rectiligne dans le plan $\log_{10} p' - e$ tandis qu'elle est incurvée pour un sol argileux. À l'état initial du sol, dans le plan $\log_{10} p' - e$ le domaine à gauche de la courbe « d' *état critique* » caractérise les situations dilatantes, tandis qu'à droite on a contractance ;
- une *dilatance* , c'est-à-dire un couplage entre comportement volumique et comportement déviatorique, variable au cours de l'évolution de la dégradation du sol et aussi de l'évolution des pressions interstitielles qui jouent sur p' . On associe le nom de Roscoe à cette phénoménologie. La phase de dilatance succède en général à une phase préalable de *contractance* ; ces deux phases sont séparées par une courbe « d' *état caractéristique* » dans le plan $p' - q$ (où on a $\dot{\varepsilon}_p^v = 0$), dépendante de l'état de consolidation, cf. par exemple [bib 27]. L' *angle de dilatance* ψ caractérise la pente de cette courbe, qui est toujours en-dessous de la courbe « d'état critique » ou superposée ;
- une *résistance* dépendant de l'histoire de chargement, croissante ou décroissante (écrouissage positif ou négatif), associée à des déformations résiduelles. Un sol dilatant peut voir sa résistance diminuer (*adoucissement*) après une étape d'écrouissage positif, tandis qu'un sol contractant peut connaître un écrouissage positif jusqu'à la rupture, décrite par la courbe « d'*état critique* » tracée dans le plan pression de confinement – contraintes déviatoires $p' - q$. L'angle de frottement interne Φ_{pp} caractérise la pente de cette courbe « d'*état critique* » dans le plan $p' - q$. Dans le cas d'une argile, ces situations sont associées à la valeur du degré de *consolidation* du sol (appelé *OCR*), tandis que pour un sable, l'état initial dans le plan $\log_{10} p' - e$ définit la caractéristique adoucissante et dilatante ou contractantes non adoucissantes du comportement ;
- une *cohésion* initiale (c'est-à-dire une résistance pour un chargement déviatorique) pour les argiles, quasiment nulle pour les sables secs, même si ceux-ci une fois saturés présentent une certaine cohésion ; la cohésion des roches est généralement bien plus élevée ;
- cette phénoménologie reflète donc une caractéristique commune : la dépendance du comportement à l'état du matériau dans le plan $\log_{10} p' - e$. Les *caractéristiques élastiques* dépendent aussi de l'indice des vides initial e_0 et de la pression de confinement : ceci caractérise une loi d'élasticité non linéaire ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- des boucles d'*hystérésis* sous chargement cyclique, dont la forme est aussi dépendante de la pression de confinement, et de l'*indice de plasticité* I_p qui est mesuré en laboratoire ;
- en particulier un matériau pulvérulent (sable...) sous chargement cyclique déviatorique contrôlé en déformation se densifie progressivement (contractance), surtout s'il est *lâche* à l'état initial (faible valeur de D_r) ; par contre si le matériau est *dense* (*sur-consolidé*) il connaît une phase d'endommagement (dilatance) après atteinte du pic, suivie de la rupture (état critique). Si l'amplitude de ces cycles est forte, on peut observer l'absence d'une stabilisation de la réponse cyclique : on n'a plus accommodation mais apparition du rochet ;
- des rigidités tangente et sécante dépendant de l'histoire de chargement ;
- une influence de la vitesse de chargement : une *viscosité* équivalente peut permettre de représenter cet effet, même s'il est difficile à quantifier pour des sables ; cette caractéristique est importante pour les argiles et les roches ; toutes les propriétés de comportement citées plus haut peuvent être dépendantes de la vitesse de chargement ;
- et enfin une forte *variabilité spatiale des propriétés* mécaniques, caractéristique d'un matériau naturel.

À ces caractéristiques communes, il convient de définir les principales différences entre un sol et une roche :

- un *sol* est caractérisé par un milieu généralement poreux ayant un comportement *meuble*, c'est-à-dire suffisamment déformable pour qu'il puisse être « travaillé » ; la loi de comportement d'un sol s'attachera principalement à caractériser son *écoulement plastique*, sa résistance sous chargement *cyclique* ; un sol peut être décrit par un milieu continu poreux de type granulaire : l'écoulement plastique et le comportement à long terme sont intimement liés à la problématique des variations de pressions interstitielles du fluide présent dans la porosité ;
- une *roche* est caractérisée par une cohésion bien plus élevée qu'un sol, et un comportement raide présentant une certaine dureté ; la loi de comportement d'une roche s'attachera principalement à caractériser la *fissuration* instantanée et différée, ainsi que la rupture en *fatigue*. L'état d'*endommagement* de la roche, à l'échelle d'un massif, est quantifié par le facteur RQD (Rock Quality Designation). Il est important de tenir compte du caractère discontinu d'un massif rocheux à l'échelle de la structure, c'est-à-dire d'incorporer dans la modélisation la prise en compte d'éventuelles fractures qui dépassent les limites de représentation de la loi de comportement. Un modèle de *joint* peut s'avérer pertinent. La porosité d'une roche est généralement beaucoup plus faible que celle d'un sol, donc le couplage hydromécanique dans les roches joue surtout sur le long terme.

Les *interfaces* des milieux constitués de géomatériaux sont en général caractérisés également par des comportements complexes : on ne peut pas toujours se contenter d'une modélisation parfaite par simple continuité des déplacements, équivalente à la continuité du vecteur-contrainte à l'interface. On définit donc un modèle de *joint*. On retrouve les phénomènes de cohésion, de dilatance comme dans les sols, et de plus, le caractère unilatéral de la rupture. Le couplage hydromécanique joue un rôle essentiel dans certains types d'application.

Les divers modèles de comportement tentent de représenter tout ou partie de ces caractéristiques.

Les paramètres des modèles de comportement sont identifiés à partir d'essais de laboratoire :

- cisaillement simple, triaxial (consolidation à différentes valeurs de confinement, en situation drainée ou non), torsion, compression isotrope, œdométrique (éprouvette cylindrique drainée soumise à une compression uni axiale monotone, et à des déplacements latéraux bloqués : obtention d'une courbe de consolidation) ;
- ces essais peuvent être monotones ou cycliques, drainé ou non drainé, à déformation imposée ou à contrainte imposée ;
- colonne résonante : obtention des modules élastiques ;
- fluage, rupture, et relaxation pour les roches ;

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

dont les résultats doivent être parfois corrigés pour refléter le chemin de contraintes réelles en place, et d'essais in situ, à des profondeurs variables dans le sol. Ces essais sont complétés par des analyses géologiques et des reconnaissances :

- SPT (*standard penetration test*), essai réalisé par enfoncement d'un tube, qui ne fournit pas de mesure directe de paramètre physique ;
- CPT (pénétromètres), essai statique monotone au cône enfoncé à vitesse constante, qui ne fournit pas de mesure directe de paramètre physique ;
- pressiomètre : obtention des modules élastiques, de la résistance et des modules de fluage ; on considère ainsi par exemple l'essai au pressiomètre « Ménard » effectué en exerçant une pression croissante contrôlée dans un forage cylindrique vertical.
- CPTU (avec mesure de la pression interstitielle) ;
- célérité des ondes de cisaillement V_s à bas niveau de déformation (*cross-hole*, SASW) ;
- essai au vérin plat afin d'évaluer l'état de contraintes initiales dans un massif rocheux.

Ces essais produisent des relations entre nombre de cycles et CSR (cyclic stress ratio égal à τ/σ'_v), l'état de surconsolidation (OCR, relié à l'indice de plasticité I_p), CRR (cyclic resistance ratio), les courbes de dégradation cyclique $G-\gamma$. Le domaine de comportement élastique des sols est limité à de très faibles déformations : $\varepsilon<10^{-5}$.

Dans *Code_Aster*, on a adopté la convention de la mécanique des structures : les contraintes et déformations sont positives en traction, les contraintes de compression ont des valeurs négatives.

1.2 Objectifs

Le modélisateur va devoir trouver le meilleur compromis entre la complexité (des phénomènes, de la calibration des paramètres...), le coût de l'étude, la robustesse de l'intégration, et la précision ou la représentativité des résultats recherchés, selon les données disponibles (paramètres et essais de laboratoire) et les cas de validation physique disponibles dans le domaine de chargement visé par l'étude, en choisissant correctement le type de modèles de comportement, sachant qu'un grand choix de modèles de comportement est disponible dans *Code_Aster*, mais aussi dans la littérature...

Ce document est conçu pour l'aider dans cette tâche. Il rassemble des éléments déjà disponibles ailleurs dans la documentation de *Code_Aster*, et apporte également le retour d'expérience des auteurs ayant contribué à ces modèles de comportement. On expose ainsi de manière générique divers angles d'analyse comparative de ces modèles : matériaux visés, phénoménologie, caractéristiques et type de formulation de loi, modélisations utilisables avec *Code_Aster*, nombre et type de paramètres, procédure d'identification à partir des essais disponibles, nombre et type de variables internes (au sens strict : correspondant à la formulation mathématique de la loi, mais aussi variables locales utiles pour l'analyste : grandeurs d'intérêt pour l'ingénieur), cas-tests de vérification et de validation, références, publications, avis général (robustesse, développabilité...), perspectives.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

1.3 Ouvrages géotechniques constitués de géomatériaux comme milieux poreux

L'ouvrage géotechnique est constitué d'un sol, ou d'une roche, généralement poreux (la phase solide est dite squelette de sol), et cette porosité est occupée par des fluides : eau, air, gaz, air occlus, selon une saturation variable. Ces fluides s'écoulent au sein du milieu poreux et participent à la réponse mécanique ; diverses lois de diffusion régissent ces écoulements, voir [R7.01.11]. Ces lois correspondent à des phénomènes dissipatifs, par exemple la loi de Darcy qui décrit l'écoulement de la ou des phase(s) fluide(s) au sein de la matrice poreuse, et paramétrée par la (les) perméabilité(s). Selon les conditions aux limites du milieu imposées au(x) fluide(s), on se trouve en situation *drainée* ou en situation *non drainée*. On consultera la documentation pour l'utilisation des modèles de milieu poreux [U2.04.05].

La notion de « *contraintes effectives* » permet de décrire la contribution du squelette de sol à la réponse mécanique globale du milieu poreux, associée à sa cinématique, décrite par le tenseur de déformation $\boldsymbol{\varepsilon}$. C'est le principe de Terzaghi qui décompose le tenseur des contraintes totales en contraintes effectives et en contribution due au(x) fluide(s) : $\boldsymbol{\sigma}=\boldsymbol{\sigma}'-b.p_{lq}\mathbf{Id}$, où p_{lq} désigne la pression de pore (supposée positive en compression dans *Code_Aster*) dans le cas monophasique (cas *saturé*), $\boldsymbol{\sigma}'$ le tenseur des « contraintes effectives » et b le coefficient du tenseur isotrope de BIOT ; dans l'hypothèse de Terzaghi, on a : $b\rightarrow 1$.

Dans le cas où une phase gazeuse est aussi présente, on fait intervenir la saturation en liquide S_{lq} dans l'expression différentielle totale suivante : $d\,\boldsymbol{\sigma}=d\,\boldsymbol{\sigma}'-b.\left(d\,p_{gz}\mathbf{Id}-S_{lq}.d\,p_c\mathbf{Id}\right)$, où p_{gz} désigne la pression de gaz (supposée positive en compression dans *Code_Aster*) et et $p_c=p_{gz}-p_{lq}$ désigne la *pression capillaire* dite aussi *succion* (positive en non-saturé). On définit alors la notion de « *contraintes nettes* » : $d\,\tilde{\boldsymbol{\sigma}}=d\,\boldsymbol{\sigma}+b.\left(d\,p_{gz}\mathbf{Id}\right)$.

En l'absence de phase eau dans le sol, en particulier au-dessus du niveau de la nappe phréatique, on peut traiter le problème d'équilibre de l'ouvrage en situation « mécanique pure ». Sinon, on traitera le problème d'équilibre en modélisation (thermo-)hydro-mécanique couplée, avec les éléments finis correspondants.

Tandis que la présence d'une phase eau dans le sol joue peu sur la vitesse des ondes de cisaillement; au contraire, cela joue sur la vitesse des ondes de pression. Pour un un sol argileux au-dessus du niveau de la nappe phréatique, la saturation partielle joue également sur la valeur de la vitesse des ondes de pression.

Certains modèles sont conçus pour fournir une réponse mécanique en « contraintes totales » qui somment la contribution du squelette et celle de la phase « eau » et pilotent l'expression des critères.

Un modèle de comportement mécanique défini en contraintes effectives est conçu pour décrire les situations drainée et non drainée ; son identification est préférentiellement réalisée selon le type d'application envisagé, car les modèles de comportement ne modélisent pas complètement l'interaction entre squelette et phase fluide.

La transition du cas saturé au cas non saturé est délicate, à cause de la gestion de l'apparition ou disparition d'une phase ; Code_Aster traite cette transition de manière transparente à l'aide d'une modélisation de type `*HH2*` [U2.04.05]. Par ailleurs, une solution proposée dans la littérature pour traiter les situations non drainées en présence d'air occlus, au voisinage de la saturation totale consiste à adopter une compressibilité équivalente du fluide pour tenir compte de l'air occlus et d'une cohésion corrigée. Cette compressibilité équivalente peut être évaluée par exemple avec le modèle de Boutonnier, [25], et choisie comme paramètre d'entrée des modèles de *Code_Aster*.

Les joints se caractérisent par un comportement hydraulique très différent selon la direction normale au joint ou les directions tangentielles, pour lesquelles l'ouverture et la tortuosité du joint jouent de

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

manière essentielle et non linéaire. En sens inverse, l'écoulement hydraulique joue également sur les caractéristiques de rupture du joint.

2 La modélisation du comportement en fonction du type d'analyse à mener

Les sols sont d'abord des milieux poreux : leur réponse mécanique résulte du comportement du squelette solide combiné à celui de la phase liquide, voire la phase gazeuse présentes dans les porosités du sol, dont l'écoulement est caractérisé par la perméabilité.

Les modèles mécaniques pour les géomatériaux (sols, roches) peuvent pour la plupart être utilisés dans les modélisations mécaniques seules ou dans les modélisations THM, via les mot-clés KIT_HM, KIT_HHM, KIT_THM, KIT_THHM, dans le cadre de l'hypothèse des *contraintes effectives*, c'est-à-dire une hypothèse qui régit la contribution des pressions interstitielles du/des fluide(s) présents dans les porosités) à l'équilibre du milieu poreux, si l'on se trouve dans une situation quasi-saturée. Dans le cas partiellement saturé, certains modèles sont formulés en *contraintes totales*, ou contraintes nettes.

Un domaine d'étude de vérification d'un ouvrage géotechnique consiste à vérifier sa *capacité portante*, en particulier sous l'action de chargements monotones, vis-à-vis de divers modes de ruine, en particulier par cisaillement et glissement selon des *surfaces de rupture*, ou bien des *modes de ruine diffus* dans le volume de sol...

Un autre domaine d'étude de vérification d'un ouvrage géotechnique consiste en l'analyse des *tassements* sous l'action de chargements monotones ou cycliques.

Pour des chargements cycliques plus élevés, par exemple induits par un séisme, on doit analyser le risque de *liquéfaction*, par :

- *perte de résistance*, concernant plus les sols pulvérulents que les sols fins argileux. La rupture par liquéfaction se traduit par une *surpression interstitielle* croissante qui provoque alors une dé-consolidation du sol (la pression effective de consolidation du sol s'approche de zéro), qui perd brutalement sa résistance en cisaillement et donc sa capacité portante, par l'annulation des contraintes effectives. Cela peut advenir en conditions de chargement cyclique ou monotone, en conditions non drainées, en particulier pour des sables lâches. On distingue de la
- *mobilité cyclique*, pour les sols fins argileux ou dilatants, provenant de l'adoucissement et de l'évolution des pressions interstitielles, suite au franchissement de la courbe d'état critique. La *rupture par mobilité cyclique* correspond à un trajet où la contrainte moyenne effective diminue rapidement, la dilatance apparaît et la déformation déviatorique cyclique croît et s'accumule jusqu'à la ruine.

Un critère local proposé est le ratio d'excès de pression interstitielle r_u. Ce critère possède plusieurs variantes : une variante « ingénierie » où la résistance du sol est exprimée avec le niveau de contrainte verticale estimée dans l'ouvrage, une autre où celle-ci est exprimée directement à l'aide de la résistance actualisée calculée par la loi de comportement. Les deux expressions sont disponibles selon une version instantanée « différentielle » par rapport à un état initial ou instantanée absolue. Quand la valeur de r_u tend vers l'unité, alors on a « fluidisation » du sol.

On pourra utiliser l'opérateur POST_LIQUEFACTION [U4.84.41], en post-traitement d'un calcul d'équilibre non linéaire.

Il est possible d'utiliser pour discrétiser la cinématique du milieu : des éléments finis volumiques 3D [R3.01.00] ou surfaciques 2D, quand cela est possible, en ayant recours à des hypothèses simplificatrices telles que déformations planes, contraintes planes ou axisymétrie, avec ou sans la prise en compte du couplage hydromécanique.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Par ailleurs, pour réduire les difficultés associées aux lois de comportement en phase dilatante qui produisent une perte d'unicité de solutions, *Code_Aster* propose des méthodes de régularisation, notamment par premier gradient de dilatation volumique, cf. [R5.04.03] et les éléments finis associés.

Remarque 1 :

> *On fera la distinction entre* vérification *et* validation *: la vérification s'entend au sens des équations modélisées et exprimées dans le logiciel tandis que la validation désigne la confrontation des résultats du modèle dans le logiciel par rapport à des mesures expérimentales faisant référence, dans des situations représentatives des applications visées.*

Remarque 2 :

> *Les lois de comportement ci-après sont formulées en petits transformations (HPP), mais il est possible avec Code_Aster de les utiliser dans un cadre de grandes transformations (modèles* `GDEF_LOG` *pour de grandes déformations plastiques et* `GROT_GDEP` *en restant en* petites déformations *) pour des études en mécanique pure.*

2.1 La phénoménologie et les modélisations du comportement des sols

Voici tout d'abord une liste de matériaux rencontrés en géomécanique et leur phénoménologie.

Matériaux	Phénoménologie
argile gonflante, bentonite	Hydromécanique couplée. élasticité non linéaire isotrope, dépendant de la pression capillaire.
sol pulvérulent, graves	Hydromécanique couplée. Élasticité (non) linéaire. Écoulement plastique déviatorique et volumique, dilatance, frottement interne et cohésion, état critique. Cas de traction traité par un écoulement élastoplastique parfait. Contraintes dépendant de la pression capillaire. Souvent en situation drainée, car souvent très perméable.
sol granulaire, sables, silts	Hydromécanique couplée. Élasticité (non) linéaire. Écoulement plastique déviatorique et volumique, contractance, dilatance, frottement interne et cohésion. Écrouissage mixte ; état critique. Liquéfaction. Cas de traction traité par un écoulement élastoplastique parfait. Contraintes dépendant de la pression capillaire. L'amortissement croît avec le niveau d'amplitude de distorsion cyclique, mais on observe que lorsque le confinement augmente, pour une même distorsion, l'amortissement diminue.
sols argileux	Hydromécanique couplée. Élasticité (non) linéaire. Écoulement plastique déviatorique et volumique, contractance, dilatance et cohésion. Écrouissage mixte ; état critique. Cas de traction traité par un écoulement élastoplastique parfait. Contraintes dépendant de la pression capillaire. L'amortissement croît avec le niveau d'amplitude de distorsion cyclique, mais on observe que

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	lorsque l'indice de plasticité I_p (en %) augmente, pour une même distorsion, l'amortissement diminue. L'effet de la surconsolidation OCR sur l'amortissement semble négligeable.

Les tableaux suivants décrivent les modèles de comportement :

- 'GONF_ELAS' ;
- 'MOHR_COULOMB' ;
- 'CJS' ;
- 'CAM_CLAY' ;
- 'HUJEUX' ;
- 'IWAN' ;
- 'BARCELONE'.

Matériaux représentatifs	**Phénoménologies**	**Nom Code_Aster et type de loi**	**Mise en œuvre Code_Aster**	
type « argile gonflante » (bentonite...)	Contrainte nette ($\boldsymbol{d}\widetilde{\sigma}=\boldsymbol{d}\sigma+dP_{gz}\mathbf{Id}$) dépendant de la pression de gonflement qui elle même dépend de la succion (ou pression capillaire). Effet de la dilatation thermique.	'GONF_ELAS' élastique non linéaire isotrope	modélisations supportées	HHM, THHM
			Paramètres	mots-clés ELAS (3) et GONF_ELAS (2)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	0
			Cas-tests reproduisant le comportement	gonflement d'une cellule d'argile que l'on sature progressivement : plan (wtnp119a,b,c,d), axi (wtna110a,b,c,d) et 3D (wtnv136a,b,c,d)
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.41]. LAEGO.
Avis général	Retour d'expérience limité.			
Robustesse, développabilité	Loi simple.			
Publications	Gerard P. et al., « Numerical Modelling of Coupled Mechanics and Gas Transfer around Radioactive Waste in Long-Term Storage » Journal of Theoritical and Applied Mechanics, Sofia, 2008, vol. 38, No 1-2, pp. 25-44 (définition de la loi et benchmark)			
Publications EDF				
Perspectives	Pas à ce stade.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « sol pulvérulent »	Comportement à la rupture d'un sol sous chargement monotone. Modèle multi-critère caractérisé par l'intersection de 6 plans dans l'espace des contraintes principales. Il n'est pas borné dans la direction des contraintes sphériques de compression. Écoulement plastique parfait. Cohésion, dilatance et frottement interne. Pas de « mobilisation » progressive de la plasticité en cisaillement.	'MOHR_COULOMB' en contraintes effectives, HPP élasticité linéaire isotrope, élasto-plastique non associée	modélisations supportées	3D, 2D (D_PLAN, C_PLAN, AXIS), THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et MOHR_COULOMB (3)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	3 déformation plastique volumique $V1$; norme des déformations déviatoriques $V2$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0). $V3$
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent consistant. Deux multiplicateurs plastiques au maximum à la fois.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV232 (essai triaxial drainé monotone), SSNV233 (essai de torsion drainé monotone), WTNV142 (essai triaxial non drainé monotone), COMP012 (essai triaxial drainé monotone).
			Cas-tests de validation physique	SSNP104 (en monotone : semelle rigide posée sur un sol) ,
			Références	Doc [R7.01.28].
Avis général	Modèle simple, robuste, de première analyse en monotone ; très usité. Les critères de rupture sont écrits en fonction des contraintes principales majeure et mineure, donc ils sont indépendants de la contrainte intermédiaire. Modèle peu utilisé dans le domaine des barrages en béton et en remblai [selon CIH]. Envisagé : développement de versions modifiées des modèles de MOHR_COULOMB.			
Robustesse, développabilité	La matrice tangente calculée est meilleure que celle obtenue par perturbation. Cependant, il et préférable de formuler la loi en termes d'invariants. Il est envisagé de développer cette formulation avec l'outil MFront.			
Publications				
Perspectives	Mise à jour du cas de validation car actuellement les résultats ne sont pas en cohérence avec des modélisations similaires faites avec Z-soil.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « sol pulvérulent, granulaire »	Modèle multi-critère et multi-mécanismes : • un mécanisme élastique non linéaire, • un mécanisme plastique isotrope, avec écoulement normal ; • un mécanisme plastique déviatoire non associé (avec état critique). Modèle hiérarchisé comprenant plusieurs niveaux de complexité : deux surfaces de charge : sollicitations isotropes (avec écrouissage isotrope) et sollicitations déviatoriques (avec écrouissage mixte). Surface de charge de rupture par valeurs limites associées aux variables d'écrouissage. Modèle inadapté à l'état actuel à l'étude de la liquéfaction.	'CJS' élasticité linéaire (CJS1) ou non linéaire (CJS2 et CJS3) élasto-plastique à écrouissage déviatoire isotrope (CJS2) ou cinématique non linéaire (CJS3). en contraintes effectives, HPP.	modélisations supportées	3D, 2D, THM CONT_PLAN, CONT_1D (par DE BORST)
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et CJS (6 à 16, selon le niveau du modèle choisi)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	16 en 3D et 14 en 2D. seuil isotrope $V1$; angle du seuil déviatoire $V2$; composantes du tenseur d'écrouissage cinématique, distance normalisée au seuil déviatoire, rapport entre le seuil déviatoire et le seuil déviatorique critique, signe du produit contracté de la contrainte déviatorique par la déformation plastique déviatorique, indicateur d'activation de mécanismes (0 à 3).
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent en vitesse. Deux multiplicateurs plastiques : un pour l'isotrope un pour le déviatoire. Méthode de la sécante pour l' élasticité non linéaire. Procédure de relaxation à l'intérieur des	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV135 (essai triaxial drainé CJS1), SSNV136 (essai triaxial drainé CJS2), SSNV154 (essai triaxial drainé CJS3), WTNV100 (essai triaxial non drainé CJS1).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.13]. B. CAMBOU, K. JAFARI, « Modèle de comportement des sols non cohérents », Revue Franç.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

		itérations de Newton pour éviter certains problèmes d'oscillation. Procédure de traitement des états de contraintes de traction.		Géotech. n°44, pp. 43-55, 1988.
Avis général	Dans le modèle CJS, le rayon de rupture est corrélé à la pente de dilatance maximale. Force de CJS : les grandeurs calculées sont facilement interprétables. Faiblesses de CJS : comment définir le domaine élastique (module limité à un module sécant) ? Et la décharge avec ce modèle est tout le temps élastique. Les cycles semi-alternés sont mal reproduits. Les courbes $G-\gamma$ obtenues avec CJS sont inadéquates. Sur un essai triaxial drainé puis non drainé, il manque une élasticité anisotrope. Et on liquéfie trop rapidement en cyclique. L'écrouissage déviatoire mixte pourrait être amélioré. Faire aussi évoluer l'écrouissage isotrope (car les cycles semi-alternés sont mal reproduits). Le niveau CJS4 (cyclique) n'a pu être mis en œuvre : une formulation robuste à l'époque de l'implantation dans *Code_Aster* n'ayant pas été disponible. Le modèle CJS est peu utilisé : car la phénoménologie est réduite. Jamais utilisé en séisme. Peu de publications. Le comportement CJS1 est équivalente au critère de Mohr-Coulomb et ne tient pas compte du radoucissement.			
Robustesse, développabilité				
Publications				
Perspectives	Il est envisagé la suppression de CJS dans Code_Aster. Formulation mise à jour du modèle dans J. Duriez, E. Vincens, Constitutive modelling of cohesionless soils and interfaces with various internal states: an elasto-plastic approach, Computer and Geotechnics, vol 63, pp. 33-45, 2014. Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « sols argileux », « compressibles », normalement consolidés, poroplastiques.	Modèle multi-critère et multi-mécanismes : • une relation élastique isotrope non linéaire (partie déviatorique linéaire et une partie volumique non linéaire), • un mécanisme plastique isotrope associé • un mécanisme plastique déviatorique non associé, Une surface de charge écrouissable (écrouissage négatif et positif, régi par une seule variable scalaire) en forme d'ellipses dans le diagramme des deux premiers invariants des contraintes ($tr(\boldsymbol{\sigma})$, $\|(\boldsymbol{\sigma})\|_{VM}$). État critique caractérisé par une variation de volume nulle : droite séparant les zones de dilatance (adoucissement) et de contractance (durcissement) du matériau. Déformations irréversibles sous chargement hydrostatique correspondant à une réduction importante de la porosité. Cadre des « matériaux standard non généralisés »	'CAM_CLAY' appelé Cam-Clay modifié en contraintes effectives, HPP élasticité non linéaire isotrope sur les directions de charge hydrostatique et linéaire sur les directions déviatoriques élasto-plasticité durcissante ou adoucissante règle d'écoulement isotrope normal dilatations thermoélastiques possibles	modélisations supportées	3D, 2D, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2, de fait pas utilisés) et CAM_CLAY (8)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	7. Pression critique $V1$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0) $V2$; contrainte de confinement $V3$; contrainte équivalente $V4$; déformation plastique volumique $V5$; déformation plastique équivalente $V6$; indices de vides $V7$.
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent en vitesse égal à l'opérateur tangent cohérent. Un seul multiplicateur plastique.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV160 (Essai de compression monotone hydrostatique), SSNV202 (Essai oedométrique monotone drainé), WTNV122 (Essai triaxial non drainé).
			Cas-tests de validation physique	SSNP136 (Test de fondation filante en monotone drainé).
			Références	Doc [R7.01.14] BURLAND J.B., ROSCOE K.H. "On the generalized stress-strain behaviour of wet clay", Engineering Plasticity, Heyman-Leckie, Cambridge, 1968.
Avis général	Modèle simple, robuste, de première analyse en monotone ; très usité. Pas applicable pour			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	les sables. Nombre de paramètres peu élevé, ce qui rend le modèle très simple d'emploi. Limitation du modèle : l'alignement des points critiques sur une droite de pente M fixée : cette hypothèse est remise en question pour des matériaux très cohésifs. Il est nécessaire de recaler cette pente M pour plusieurs plages de contrainte moyenne. Il est reconnu que ce modèle sous-estime les déformations déviatoriques pour des argiles sur-consolidées. L'écrouissage positif du matériau s'annule dès qu'on arrive sur l'état critique. D'autres modèles permettent que l'écrouissage puisse encore être positif un peu au-delà : modèle de Hujeux par exemple. Une étude de validation indépendante réalisée avec l'université de Liège et le code Lagamine a été réalisée en 2012 : sur le cas d'une fondation filante en modélisation mécanique simple puis HM et également sur le cas de la consolidation d'une colonne de sol. Elle a conclu sur l'identité des résultats obtenus par les deux outils de calcul, les différences étant imputées aux divers choix possibles d'éléments finis hydromécaniques et de finesse de maillage, voir doc [U2.04.05].
Robustesse, développabilité	Défaut actuel de Code_Aster : le module de cisaillement élastique reste constant, donc à forts niveaux de chargement hydrostatique, le coefficient de Poisson fait tendre le comportement vers l'incompressibilité, ce qui bloque le couplage avec les pressions interstitielles. Il faut vérifier initialement la cohérence entre les valeurs des modules de compressibilité et de cisaillement. Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.
Publications	
Perspectives	On propose d'introduire dans CAM_CLAY la possibilité de choisir de fournir G ou ν .

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « limons, sables et argiles sableuses, normalement consolidées ou sur-consolidées, graves »	Modèle multi-critère et multi-mécanismes élastoplastiques monotones et cycliques (4+4). Élasticité non linéaire. Comportement sous chargement monotone et cyclique. Capacité à décrire l'état du matériau jusqu'à la liquéfaction. Prise en compte de la droite d'état critique. Prise en compte de la droite de dilatance (ou droite caractéristique). Décomposition sur trois plans orthogonaux fixes (c'est le repère cartésien du modèle) Anisotropie (orthotropie) induite. Critère d'écrouissage évoluant de celui de Mohr-Coulomb à celui de Cam-Clay (paramètre b) dans chaque plan. Phases de dilatance et de contractance du matériau (concept de frottement interne). Dans le domaine dilatant, la surface de charge rétrécit. Traitement de de l'écrouissage cyclique avec	'HUJEUX' en contraintes effectives, HPP critère régulier évoluant de type Mohr-Coulomb à Cam-Clay dans chaque plan orthotrope Loi d'écoulement déviatorique non associée. Loi d'écoulement de consolidation associée. variables mémoratrices discrètes (transition de mécanisme). Traitement de la restauration des variables d'écrouissage en décharge.	Modélisations supportées	3D, 2D, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et HUJEUX (16, dont mesurables : 6) Le paramètre b en particulier aide à distinguer les cas sableux du cas argileux: forme de la surface de charge...
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	50. facteurs d'écrouissage des mécanismes déviatoires et isotrope monotones et cycliques ; déformation volumique plastique cumulée ; variables mémoratrices ; indicateurs d'état des mécanismes monotones et cycliques ; critère de Hill (densité de travail du second ordre), angle de frottement apparent.
		Intégration implicite des relations de comportement. Heuristique de gestion des prédicteurs. Mécanisme élastoplastique de traitement des cas de traction avec un léger écrouissage.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV197 (essai triaxial drainé), SSNV204 (consolidation cyclique drainée), SSNV205 (cisaillement cyclique drainé), SSNV207 (cisaillement cyclique avec microdécharge), SSNV208 (essai biaxial drainé sur sable d'Hostun) , WTNV133 (Essai triaxial non drainé consolidation puis cyclique), WTNV134 (Essai triaxial non drainé

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	plusieurs surfaces seuils. Mécanisme élastoplastique parfait de traitement des cas de traction.			cyclique hydromécanique) .
			Cas-tests de validation physique	WTNV132 (construction par couches d'une colonne de sol), WDNP101 (construction par couches d'une colonne de sol hydromécanique puis séisme).
			Références	Doc [R7.01.23]. Doc [U2.04.08].

Avis général	Capacité à modéliser un large éventail des traits observés du comportement des sols, en particulier les situations de chargements cycliques. Soumis à des cycles répétés, un sable se densifie : le domaine élastique croît vers le domaine de rupture : le modèle de Hujeux permet de représenter cette phénoménologie. Ce modèle introduit une dépendance de la surface de charge en fonction des déformations déviatoriques sans modifier la règle d'écoulement volumique de dilatance, ce qui permet de mieux modéliser les déformations déviatoriques que le modèle de Cam-Clay. La fonction dite d'« entrelacement » dans le critère régulier paraît mal choisie pour les matériaux granulaires, mais plus adaptée pour les argiles => on pourrait choisir dans la formulation une fonction puissance et non pas une fonction log ! La courbe d'état critique n'est pas droite mais doit être incurvée comme selon ce qu'on observe dans les essais. De plus, l'état ultime n'est pas toujours sur la droite d'état critique. Par ailleurs, ce modèle ne prend pas en compte l'influence de la contrainte intermédiaire en 3D sur la résistance pic. La reproduction de la stabilisation volumique observée lors des essais cycliques en cisaillement pur n'est pas correcte. On observe aussi que ce modèle donne un amortissement hystérétique surévalué (sur les courbes $D-\gamma$). Des procédures de recalage des paramètres ont été établies, orientées selon le type d'étude visée (dynamique cyclique par exemple), utilisant des essais triaxiaux, de compression isotrope, et de cisaillement cyclique. Le modèle nécessite la présence d'un état initial de consolidation. Difficultés de calibration car il y a dix paramètres non mesurables directement et neuf paramètres mesurables.
Robustesse, développabilité	La complexité de la gestion des mécanismes rend la résolution onéreuse en temps de calcul et donc pénalisante pour des études industrielles. Quelques problèmes de manque de robustesse ont été relevés, mais une meilleure heuristique de gestion de l'intégration locale est proposée. On observe des difficultés de gestion lors de l'intégration numérique des 4 mécanismes couplés. Faibles perspectives de développement.
Publications	D. Aubry, JC Hujeux, F. Lassoudière et Y. Meimon. A double memory model with multiple mechanisms for cyclic soil behavior. Int. Symp. on Numerical Models in Geomechanics, Zürich, p.3-13, 1982.
Publications EDF	*Mémoires de doctorat* : Foucault A. Modélisation du comportement cyclique des ouvrages en terre intégrant des techniques de régularisation. Juin 2010. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00534665. Rapti I. Numerical modeling of liquefaction-induced failure of geostructures subjected to earthquakes. Avril 2016. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01329628.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	Articles : Rapti, I., Modaressi, A., Foucault, A., Lopez-Caballero, F., Voldoire F. Coupled S-P wave propagation in nonlinear regularized micromorphic media. Volume 77, July 2016, Pages 106–114. Rapti, I., Lopez-Caballero, F., Modaressi, A., Foucault, A., Voldoire F. Liquefaction analysis and damage evaluation of embankment-type structures. Acta Geotechnica, 2/2018, DOI: 10.1007/s11440-018-0631-z. *Conférences* : Kham, M., Kolmayer, Ph., Lopez-Caballero, F., Mondoloni, A. Numerical Modelling of dynamic response and pore water pressure build-up in earthdams subjected to strong seismic loadings. 7th ICEGE Conference, Roma, 2019. *Benchmarks* : CFBR/JCOLD, Prenolin...
Perspectives	Couplage perméabilité – dégradation du sol, anisotropie. Influence de la non saturation sur les modes de rupture et potentiel de liquéfaction. Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques. Il est envisagé d'introduire un écoulement élastoplastique en traction avec un léger écrouissage isotrope artificiel au lieu de la plasticité parfaite actuellement en place, afin de faciliter la convergence d'incréments de chargement difficiles.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type «granulaire» et argile dans une gamme de chargement éloignée de la ruine	Matériau isotrope. Comportement déviatorique cyclique et dégradation du module de cisaillement. Réponse volumique élastique linéaire (pas de mécanisme volumique, donc pas adapté en présence de couplage HM) Formulation rhéologique série-parallèle d'où décomposition additive des déformations 12 mécanismes d'écrouissage cinématique linéaire (Prager), chacun pour diverses gammes de déformation déviatorique. Seuils fixes. Ne représente pas la dilatance ; pas de droite d'état critique. Règle d'écoulement associé.	'IWAN' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D , D_PLAN
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et IWAN (4, dont les deux modules élastiques dont on déduit la compressibilité constante et deux qui décrivent la dégradation du module de cisaillement, dont on déduit les paramètres d'écrouissage cinématique)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	103. composantes du tenseur de déformations élastiques ; multiplicateurs plastiques scalaires des surfaces de charge ; composantes des tenseurs d'écrouissage cinématique ; valeurs des 12 surfaces des charge.
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent. Avec Mfront.	Cas-tests reproduisant le comportement	COMP012 (cisaillement cyclique avec CALC_ESSAI_GEOMECA), SSNV205 (cisaillement cyclique drainé), SSNV207 (cisaillement cyclique avec microdécharge)
			Cas-tests de validation physique	SDLS128 (colonne de sol sous cisaillement cyclique)
			Références	Doc [R7.01.38]
Avis général	Il s'agit d'un modèle de comportement simple permettant de reproduire les courbes de dégradation du module de cisaillement au cours de cycles. Cependant, les courbes d'amortissement équivalent ne sont pas toujours satisfaisantes. Facilité de calibration et d'utilisation. Ce modèle ne permet pas de représenter la rupture par liquéfaction des sols : la			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	compressibilité reste constante. Ce modèle ne permet pas de représenter la mobilité cyclique, car il n'y pas de fonction de dilatance.
Robustesse, développabilité	Modèle robuste. Les aspects de comportement volumique et rupture peuvent être développés : par exemple de modèle de Prévost.
Publications	IWAN W. D., On a class of models for the yielding behaviour of continuous and composite systems, Journal of Applied Mechanics, 89 (13), pp. 612-617, 1967.
Publications EDF	Alves Fernandes, V., Caudron, M., Vandeputte, D. Impact of Nonlinear 1D Site Effects Estimated From Measurements And Numerical Simulations at the KiK-net KSRH10 Site. 16th European Conference on Earthquake Engineering (16th ECEE), 18-21 June 2018, Thessaloniki, Grèce.
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques. Il serait possible de prendre en compte de la pression moyenne dans la fonction de charge déviatorique, avec un critère 3D de type van Eekelen ou Prévost. Il serait aussi utile d'améliorer l'ergonomie : les coefficients d'élasticité E et Nu doivent être fournis à deux endroits.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « sols non saturés »	Élastoplasticité. Dans le dans le cas saturé, il s'agit du modèle Cam-Clay. Deux critères : un critère de plasticité mécanique (celui de Cam-Clay) et un critère hydrique contrôlé par la succion (ou pression capillaire).	'BARCELONE' en contraintes totales, HPP	modélisations supportées	KIT_HHM KIT_THHM
			Paramètres	mots clés ELAS (2), CAM_CLAY (6) et BARCELONE (14)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	5. Pression critique $V1$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0) $V2$; seuil hydrique $V3$; indicateur d'irréversibilité hydrique $V4$; cohésion $V5$.
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent.	Cas-tests reproduisant le comportement	WTNV123 (Essai triaxial à succion fixée) ; WTNV124 (Essai de désaturation-consolidation) ;
			Cas-tests de validation physique	WTNV126 (Chemins mixtes de saturation-consolidation)
			Références	Doc [R7.01.17]
Avis général	Ce modèle ne fonctionne qu'en non saturé. Retour d'expérience limité.			
Robustesse, développabilité	Il existe dans la littérature une version en contraintes effectives, à partir de la formulation du modèle de Cam-clay.			
Publications	Alonso, E. Gens, A., Josa, A. « A constitutive Model for Partially Saturated Soils » Geotechnique, 40 (1990), 405-430			
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.			

2.2 L'identification des paramètres de comportement des sols

On utilise des essais sur éprouvettes de sol : essais triaxiaux (cisaillement, domaine de déformations moyennes et élevées), essais œdométriques (mesure de la compressibilité et de la consolidation), essais de compression isotrope (même s'ils sont plus difficiles à réaliser), essais cycliques, alternés et semi-alternés, essais à la colonne résonante (domaine des faibles déformations $\leq 5.10^{-4}$). Il convient de faire le lien entre les

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

paramètres des modèles de comportement résultant des mesures expérimentales et les paramètres d'intérêt mesurés in-situ pour l'ingénieur tels que « l'indice de plasticité », « l'indice des vides », résistance cyclique à la liquéfaction (CSR), résistance au cône (CPT)...

Les essais doivent être réalisés avec diverses indices de densité D_r (associées à l'indice des vides e_0) et diverses pressions de confinement (pour bien identifier l'état critique notamment) et en conditions drainées et non drainées.

2.2.1 Paramètres physiques généraux

Une première classe de paramètres physiques généraux caractérise le matériau :

- masse volumique du sol sec ρ_s,
- masse volumique du sol saturé,
- porosité initiale φ_0,
- indice des vides $e_0=\frac{\varphi_0}{1-\varphi_0}$ ou indice de densité D_r,
- courbe granulométrique,
- degré de saturation initial S_0,
- indice de plasticité I_p, lié à l'angle de frottement interne ϕ_{pp} et aux limites d'Atterberg,
- perméabilité au liquide et/ou au gaz.

2.2.2 Paramètres élastiques

La seconde étape consiste en l'identification des paramètres élastiques fournie à *Code_Aster* (module de compressibilité drainé K_0, module de cisaillement G_0 en situation drainée), très dépendants de la pression de confinement $P_{réf}$ ou contrainte moyenne (via l'indice de vides). La donnée du coefficient des terres au repos k_0 aide à établir l'élasticité initiale du matériau en place.

On rappelle que le module de Young et le coefficient de Poisson sont exprimés par :

$$E_0=\frac{9K_0G_0}{3K_0+G_0} \qquad \text{et} \qquad \nu_0=\frac{3K_0-2G_0}{6K_0+2G_0}$$

Les expressions en situation drainée font intervenir le coefficient de Biot et distinguent la compressibilité drainée du milieu poreux et la compressibilité des grains solides K_s :

$$\frac{1}{K_s}=\frac{1-b}{K_0}$$

Pour un sol constitué de grains (sables, graves), il peut être nécessaire de fournir un paramètre décrivant la dépendance non linéaire entre la rigidité et la contrainte appliquée.

Remarques :

- la confrontation de prédictions numériques à une mesure réalisée in-situ sur l'ouvrage, pour des chargements à bas niveau (en géophysique : exploitation du bruit ambiant par exemple), constitue une approche pertinente pour une analyse d'ouvrage existant.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- il est cependant difficile d'évaluer les caractéristiques anisotropes initiales, liées à la formation géologique des sols en place.

Les essais réalisés in-situ sont effectués par exemple à l'aide d'un pressiomètre (dilatation radiale), de pénétromètres dynamiques.

2.2.3 Paramètres de comportement non linéaire

Les étapes suivantes consistent en l'identification des paramètres associés à la description de la cohésion de la résistance (critère de rupture) et de l'écrouissage, des domaines de contractance et de dilatance, dépendants de la consolidation (cas « normalement consolidé », « sur-consolidé »). En particulier on rappelle que l'angle de dilatance ψ est inférieur ou égal à l'angle de frottement interne Φ_{pp}. On notera que l'équilibre naturel d'une pente constituée d'un matériau non cohésif et saturé ou sec impose que l'angle de frottement Φ_{pp} soit supérieur à celui de la pente.

En cyclique, on cherche à identifier les courbes de *dégradation* $G-\gamma$, $D-\gamma$ et le CSR.

Code_Aster propose une commande spécifique d'aide à l'identification des paramètres de comportement des sols : CALC_ESSAI_GEOMECA , cf. [U4.90.21]. Elle permet de simuler pour un point matériel différents trajets de chargement caractéristiques d'essais géomécaniques usuels en laboratoire, monotone/cyclique, drainé/non drainé, et de post-traiter les résultats obtenus.

Pour son utilisation, il convient de choisir le comportement, les paramètres matériau nécessaires, et les données de chargement de l'essai considéré.

2.3 La phénoménologie et les modélisations du comportement des roches

Les roches sont essentiellement classées selon leur niveau de résistance en compression simple (Unconfined Compressive Strength: UCS), lui-même associé à leur histoire géologique (formation) et à la porosité. Le tableau ci-dessous résume leur phénoménologie.

Matériaux	Phénoménologie
Roche, massifs rocheux	Élasticité (non) linéaire. Écoulement (visco-)plastique (fluage) déviatorique et volumique, cohésion et dilatance.
Basalte, granit, marbre...	Forte résistance en compression simple ($>100\,MPa$)
Calcaire, schiste...	Résistance en compression simple médiane ($25-100\,MPa$)
Craie, roche altérée	Résistance en compression simple faible $5-25\,MPa$)
argilite (quasi roche)	Élasticité (non) linéaire. Écoulement viscoplastique (fluage) déviatorique et volumique,

Figure 2.3-1: Phénoménologie de roches intactes [28]

Les tableaux suivants décrivent les modèles :

- 'DRUCK_PRAGER'

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

- 'DRUCK_PRAGER_N_A'
- 'VISC_DRUCK_PRAG'
- 'HOEK_BROWN';
- 'LAIGLE';
- 'LETK';
- 'LKR'.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « roche »	Matériau isotrope. Cohésion et écrouissage, soit linéaire soit parabolique (avec contrainte ultime), frottement interne (dilatance). Un seul mécanisme d'écoulement plastique associé. Le critère de résistance conjugue la contribution sphérique et déviatorique des contraintes. Il n'est pas borné dans la direction des contraintes sphériques de compression. Forme linéaire du critère en $J_2, tr(\boldsymbol{\sigma})$.	'DRUCK_PRAGER' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et DRUCK_PRAGER (6)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	3. Déformation plastique déviatorique cumulée $V1$; Déformation plastique volumique cumulée $V2$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0) $V3$.
		Intégration implicite analytique des relations de comportement. Opérateur tangent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSND104 (cas en déformations planes, chargement monotone). SSNP124 (Essai biaxial drainé avec un comportement adoucissant). SSNV168 (Essai triaxial drainé avec un comportement adoucissant), WTNA101 (Essai triaxial non drainé avec un comportement adoucissant).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.16]
Avis général	Il s'agit d'un modèle de comportement simple, à utiliser pour le pré-dimensionnement avant emploi de modèles de vérification plus compliqués. Le critère est un cône inscrit dans la pyramide du critère de MOHR-COULOMB : il est donc régulier, sauf au sommet du cône (état hydrostatique pur). Ce modèle peut être employé pour des roches, mais sa rhéologie est assez éloignée des résultats expérimentaux.			
Robustesse, développabilité	Ce modèle possède une règle d'écoulement associé : le problème incrémental est donc un problème de minimisation convexe, qui conduit à une résolution robuste.			
Publications	D.C.DRUCKER, W.PRAGER, *Soil mechanics and plastic analysis for limit design*. Quarterly			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	of Applied Mathematics 10, 157–165. 1952.
Publications EDF	
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
Type « roche »	Matériau isotrope. Un seul mécanisme d'écoulement plastique non associé, qui permet de mieux représenter la dilatance : l'angle de dilatance varie avec la déformation plastique. Le critère de résistance conjugue la contribution sphérique et déviatorique des contraintes. Le potentiel plastique se différencie donc de la surface de charge. Écrouissage linéaire ou parabolique. Coefficient de dilatation thermique constant.	'DRUCK_PRAGER_N_A' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (3) et DRUCK_PRAGER (8)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	3. Déformation plastique déviatorique cumulée $V1$; déformation plastique volumique cumulée $V2$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0) $V3$.
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSND104 (cas en déformations planes, chargement monotone).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.16]
Avis général	Il s'agit d'un modèle de comportement simple, à utiliser pour le pré-dimensionnement avant emploi de modèles de vérification plus compliqués. Inutilisé au CIH.			
Robustesse, développabilité	Ce modèle possède une règle d'écoulement non associé : le problème incrémental peut connaître des difficultés de convergence.			
Publications				
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « argilite »	Matériau isotrope. Un seul mécanisme viscoplastique. Cohésion, dilatance et écrouissage isotrope linéaire par morceaux (avec seuil de pic et seuil ultime). Écoulement non associé. Potentiel d'écoulement viscoplastique distinct de surface de charge viscoplastique. Avec loi de fluage viscoplastique (loi puissance de type Perzyna).	'VISC_DRUCK_PRAG' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et VISC_DRUC_PRAG (14)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	4. Déformation viscoplastique déviatorique cumulée $V1$; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0) $V2$; position du point de charge par rapport au seuil $V3$; nombre d'itérations locales $V4$.
		Intégration implicite des de comportement. Opérateur tangent cohérent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV211 (Essai triaxial drainé), WTNV137 (Essai triaxial drainé), WTNV138 (Essai triaxial non drainé).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.22]
Avis général	Il s'agit d'un modèle de comportement simple, à utiliser pour le pré-dimensionnement avant emploi de modèles de vérification plus compliqués. Inutilisé au CIH.			
Robustesse, développabilité				
Publications				
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques et également la déformation plastique volumique cumulée.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « roches »	Élasticité isotrope linéaire, élasto-plasticité avec écrouissage positif puis négatif (durcissement pré-pic puis adoucissement post-pic). Transition contractance-dilatance plus précoce que le pic de résistance. Critères de rupture écrits en fonction des contraintes principales majeure et mineure. Forme quadratique du critère en $J_2, tr(\boldsymbol{\sigma})$. Potentiel d'écoulement plastique non associé de type Drücker-Prager. Effet de la dilatation thermique.	'HOEK_BROWN' HPP Version en contraintes effectives : 'HOEK_BROWN_EFF', Pour un couplage formulé en contraintes totales, utiliser la version 'HOEK_BROWN_T0T'	modélisations supportées	3D, 2D D_PLAN, AXI, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (3) et HOEK_BROWN (11)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	3 déformation irréversible majeure ; déformation volumique plastique cumulée ; indicateur d'activation de la plasticité (1) ou non (0).
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent cohérent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNA116 (Essai triaxial axisymétrique) ; SSNV184 (Essai triaxial) ; WTNV128 (Essai non drainé en contraintes effectives) ; WTNV129 (Essai non drainé en contraintes totales)
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.18]
Avis général	C'est la loi la plus simple en mécanique des roches et dont l'usage est le plus répandu parmi les praticiens. On note cependant que la contrainte principale intermédiaire n'intervient pas dans le critère de rupture, ce qui est contraire à l'observation expérimentale.			
Robustesse, développabilité				
Publications	E. Hoek and E. T. Brown. The Hoek-Brown failure criterion	a 1988 update. In J. Curran, editor, Proceedings of the 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, pages 31-38, 1988.		
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « roches »	Cohésion et dilatance. Plasticité déviatorique. Écrouissage. Prise en compte de la cohésion et de la dilatance. Effet de la dilatation thermique.	'LAIGLE' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D D_PLAN, AXI, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et LAIGLE (14)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV158 (Essai triaxial drainé) ; SSNV158 (Essai triaxial non drainé) ;
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.15]
Avis général	Ce modèle enrichit la phénoménologie décrite par le modèle 'HOEK_BROWN' (comportement post-pic).			
Robustesse, développabilité	Le retour d'expérience est correct dans Code_Aster.			
Publications	F. Laigle. Modèle Conceptuel pour le Développement de Lois de Comportement adaptées à la Conception des Ouvrages Souterrains. PhD thesis, 2004.			
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « massif rocheux » assimilé à un milieu continu	Comportement élasto visco-plastique : deux mécanismes irréversibles couplés. Élasticité non linéaire. Pour un trajet de contrainte purement hydrostatique, le comportement reste élastique non linéaire. Critère de clivage. Fragile ou ductile selon le confinement ; dilatance (définition d'un état caractéristique). écrouissage positif en pré pic et un écrouissage négatif en post-pic avec dilatance. Cinétique de fluage. Visco-plasticité type Perzyna.	'LETK' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D D_PLAN, AXI , THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et LETK (28)
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	7. variables d'écrouissage élastoplastique et élasto visco-plastique ; indicateur de contractance (0) ou de dilatance (1) ; indicateurs de plasticité et de visco-plasticité..
		Intégrations implicite ou explicite des relations de comportement. Opérateur tangent.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV206A (Essai triaxial) ; WTNV135A (Essai triaxial drainé).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Kleine, Laigle, 2007 Doc [R7.01.24]
Avis général	Ce modèle constitue la loi de comportement de référence, utilisé pour le dimensionnement instantané et différé des ouvrages souterrains. Dilatance et la viscosité sont essentielles pour décrire le comportement des roches. Forme et paramètres de la surface et des seuils sont basés sur le modèle Hoek & Brown, avec ajout de la contrainte intermédiaire, d'un pilotage de la résistance en cisaillement par l'extension et la compression dans l'expression du seuil.			
Robustesse, développabilité	La version implicite est beaucoup plus robuste que la version explicite.			
Publications	A. Kleine. Modélisation Numérique du Comportement des Ouvrages Souterrains par une Approche Viscoplastique. PhD thesis, LaEGO, INPL, 2007.			
Publications EDF				
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques. Le modèle 'LKR' constitue une version plus avancée de ce modèle.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
type « massif rocheux » assimilé à un milieu continu	La phénoménologie couverte reprend celle du modèle 'LETK'. Le mécanisme plastique est caractérisé par un écrouissage positif en régime pré-pic et négatif en régime post-pic. L'état critique résiduel est purement frottant : il n'y a plus de cohésion et l'angle de dilatance s'annule. On peut activer ou non le couplage entre les mécanismes plastique et viscoplastique déviatorique (via les variables internes d'écrouissage). La température influence les écrouissages plastique et viscoplastique. Coefficient de dilatation thermique constant.	'LKR' en contraintes effectives, HPP	modélisations supportées	3D, 2D D_PLAN, AXI, THM
			Paramètres	mots clés ELAS (2) et LKR (27)
			Paramètres variables avec la température	oui
			Nombre de variables internes et signification	12 variables d'écrouissage des mécanismes plastique et viscoplastique ; déformation plastique équivalente ; indicateur de contractance (0) ou de dilatance (1) ; indicateur de viscoplasticité ; déformations plastique et viscoplastique, équivalentes et volumiques ; indicateur des régimes pré- ou post-pic.
		Intégration implicite des relations de comportement. Opérateur tangent cohérent complet.	Cas-tests reproduisant le comportement	SSNV206 (essai triaxial), WTNV135 (essai triaxial drainé),
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.40]
Avis général	Ce modèle constitue la loi de comportement de référence pour les études de tenue de dimensionnement instantané et différé des ouvrages souterrains.. Dilatance et la viscosité sont essentielles pour décrire le comportement des roches avec dépendance à la température. Forme et paramètres de la surface et des seuils sont basés sur le modèle Hoek & Brown, avec ajout de la contrainte intermédiaire, d'un pilotage de la résistance en cisaillement par l'extension et la compression dans l'expression du seuil.			
Robustesse, développabilité	Bon retour d'expérience dans Code_Aster. Convergence numérique plutôt robuste car intégration implicite de la loi.			
Publications EDF				
Publications	Raude S. Prise en compte des sollicitations thermiques sur les comportements instantané et différé des géomatériaux . PhD thesis, UL, 2015.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

	Raude, S & Laigle, F & Giot, R & Fernandes, R. (2015). A unified thermoplastic/viscoplastic constitutive model for geomaterials. Acta Geotechnica. 11. 10.1007/s11440-015-0396-6.
Perspectives	Il conviendrait de développer le calcul de la densité de puissance dissipée par les mécanismes plastiques. Prise en compte du comportement anisotrope structurel provenant de l'histoire de formation de la roche.

2.4 L'identification des paramètres de comportement des roches

On utilise des essais sur éprouvettes de roche : essais triaxiaux (cisaillement, domaine de déformations moyennes, effectués sur un échantillon non confiné de roche), essais de fluage et relaxation, essais de compression isotrope. Ces essais sont réalisés à différentes températures. D'autres essais sur échantillon de roche sont pratiqués : essais d'indentation au cône par exemple pour évaluer les caractéristiques élastiques, prolongés jusqu'à rupture, essais d'extension, essais brésiliens. Enfin, certains essais sont effectués in-situ, par exemple l'évaluation du *RQD*.

Une première classe de paramètres caractérise le matériau :
- masse volumique de la roche sèche,
- masse volumique de la roche saturée,
- porosité,
- degré de saturation,
- perméabilité,
- *RQD* (Rock Quality Designation index), qui évalue les discontinuités présentes dans la roche (altération).

Une seconde classe de paramètres caractérise mécaniquement le matériau :
- paramètres élastiques (statiques, dynamiques),
- paramètres de fluage, paramètres de comportement cyclique,
- résistance en compression uni-axiale non confinée,
- paramètre de résistance de Hoek-Brown,
- célérités des ondes P et S.

Code_Aster propose une commande spécifique d'aide à l'identification des paramètres de comportement des roches pour les modèles 'DRUCK_PRAGER' : CALC_ESSAI_GEOMECA , cf. [U4.90.21]. Elle permet de simuler pour un point matériel différents trajets de chargement caractéristiques d'essais géomécaniques usuels en laboratoire, monotone/cyclique, drainé/non drainé, et de post-traiter les résultats obtenus.

Pour son utilisation, il convient de choisir le comportement, les paramètres matériau nécessaires, et les données de chargement de l'essai considéré.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

2.5 Les modélisations du comportement des joints

Les *interfaces* des milieux constitués de géomatériaux doivent aussi être modélisés. On ne peut pas toujours se contenter d'une modélisation parfaite par simple continuité des déplacements, équivalente à la continuité du vecteur-contrainte à l'interface, complétée pour un milieux poreux par la continuité des pressions interstitielles.

Le joint se présente comme une discontinuité, rugueuse, éventuellement renforcée par un matériau de remplissage.

Code_Aster dispose d'éléments finis particuliers de *joint* pour des études en mécanique pure en 2D et en 3D (XXX_JOINT).

Des éléments finis particuliers de *joint* pour des études hydromécaniques couplées (XXX_JOINT_HYME en 2D et en 3D et XXX_JHMS seulement en 2D) sont aussi disponibles : voir [R3.06.09] et [R7.02.15] : ils représentent le déplacement et la pression de fluide dans le joint, notamment un écoulement de fluide à l'intérieur (loi cubique, voir [R7.01.25]). L'introduction du fluide dans le joint modifie la contrainte mécanique normale.

Les éléments finis de *joint* (ou fissure) pour des études hydromécaniques couplées (milieu saturé) en 2D, à support 1D, voir [R7.02.15], (PLAN_JHMS , AXIS_JHMS) visent à modéliser la discontinuité de déplacement à travers le joint et l'écoulement darcéen dans le long du joint. On considère que le champ de pression est continu à travers l'interface, tandis que les discontinuités de flux sont autorisées à travers l'interface (contrairement aux éléments finis XXX_JOINT _HYME) et une loi cubique décrit le flux volumique en fonction du gradient de pression le long de l'interface : la perméabilité intrinsèque est donc cubique en fonction de l'ouverture du joint (discontinuité de déplacement normal).
Les paramètres de modélisation du comportement hydraulique du joint (perméabilité, porosité, module de Biot, viscosité fluide...) sont ceux des milieux poreux, cf. [R7.01.11].

On peut ainsi prendre en compte la propagation des sous-pressions à une interface béton-rocher, un écoulement fluide au sein d'une fissure dans un milieu poreux. Le tableau ci-dessous indique pour chaque famille d'éléments les mailles support, dégénérées, qui ont une dimension en plus par rapport à la géométrie de l'interface, et les degrés de liberté.

Éléments finis	Maille support	Degrés de liberté
XXX_JOINT pour des maillages linéaires P1 et quadratiques P2, en 2D et 3D.	QUAD4 ; QUAD8 HEXA8, PENTA6 ; HEXA20, PENTA15	Déplacements des deux parois.
XXX_JOINT _HYME pour des maillages quadratiques en hydromécanique, en 2D et 3D.	QUAD8 HEXA20, PENTA15	Déplacements P2 des deux parois ; pressions P2 dans le plan de l'interface.
XXX_JHMS compatibles avec les éléments THM du massif en 2D ou avec les éléments mécanique pure 2D si le massif est imperméable. Axisymétrique et déformations planes	QUAD8	Déplacements des deux parois P2 ; pressions P1 des deux parois. Un multiplicateur de Lagrange P0 hydraulique.

Les tableaux suivants décrivent les modèles de comportement de *joint* à affecter à des interfaces entre milieux continus, modélisés par des éléments finis de *joint* :

- 'JOINT_MECA_RUPT' ;
- 'JOINT_MECA_FROT' ;
- 'JOINT_BANDIS' ;
- 'CZM_LIN_REG' et 'CZM_EXP_REG'

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
joints béton/rocher ou joints béton/ béton avec aspérités	comportement élastique à très faible déplacement. Loi cohésive et rupture progressive entre les lèvres d'un joint. Non interpénétration des lèvres du joint. Seuil de rupture tangentielle piloté par la rupture normale. Régime de glissement sans frottement. Pas de rupture tangentielle sous cisaillement pur. Prise en compte de l'influence d'un fluide sur la mécanique via la pression. Écoulement fluide de Poiseuille, qui est régularisé pour des ouvertures de joint très faibles. Prise en compte de deux procédés industriels : clavage et sciage ; par exemple la pression locale de coulis injecté.	'JOINT_MECA_RUPT' loi élastique cohésiv e adoucissante exprimée sur le saut de déplacement normal positif . En compression, contact élastique pénalisé. Coefficient de pénalisation du contact. Intégration implicite, la matrice tangente est non-symétrique. La localisation due à l'adoucissement est gérée nativement par la géométrie aplatie des EF d'interface.	modélisations supportées	XXX_JOINT , XXX_JOINT _HYME
			Paramètres	mots-clés SIGMA_MAX (seuil critique de rupture en traction) et KT, KN (rigidités en sollicitations normale et tangentielle) paramètre de pénalisation du contact PENA_CONTACT. mot clé PRES_CLAVAGE, qui identifie la pression de coulis injecté mot clé SCIAGE, qui identifie l'épaisseur de la bande sciée. RHO_FLUIDE masse volumique et VISC_FLUIDE la viscosité dynamique du fluide.
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	11. Dont : indicateur de dissipation, indicateurs d'endommagement normal et tangentiel. sauts normal et tangentiel. 18 dans le cas XXX_JOINT_HYME : dont : gradient de pression, flux hydraulique dans le repère global, pression de fluide.
			Cas-tests reproduisant le comportement	SSNP142 (rupture et glissement avec sous pressions d'un joint de barrage, en 2D et en 3D). SSNP162 (en mécanique pure et

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

				en hydro-mécanique couplée, en 2D et en 3D). SSNP143 (procédés de clavage et de sciage).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.25].
Avis général	Seule loi disponible pour représenter les joints des barrages en béton et les procédés industriels associés.			
Robustesse, développabilité	Difficultés de convergence possibles ; cependant plusieurs types d'application montrent une bonne capacité du modèle grâce à l'intégration implicite.			
Publications				
Publications EDF	CFRAC 2010			
Perspectives	Développement d'une formulation énergétique complète. Calcul des énergies dissipées. Autre piste : lien renforcé avec la loi de type `CZM_xxx_REG`.			

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
joints béton/rocher ou joints béton/ béton	comportement élastique à très faible déplacement et restant élastique pour la partie normale. non-interpénétration des lèvres en contact. frottement entre les lèvres d'un joint, en glissement pur (avec phase d'adhésion). Pas de perte de résistance à la traction. Prise en compte de l'influence d'un fluide sur la mécanique via la pression. Écoulement fluide de Poiseuille, qui est régularisé pour des ouvertures de joint très faibles. Amortissement visqueux normal et tangentiel, si l'élément de joint est en compression et possiblement dans les phases de traction.	'JOINT_MECA_FROT' C'est une variante élastoplastique de la loi de Mohr-Coulomb, qui ne porte que sur la partie tangentielle. loi d'écoulement globale non-associée. Coefficient de pénalisation : assurant la régularisation avec un paramètre d'écrouissage isotrope. Intégration implicite, la matrice tangente est calculée en implicite.	modélisations supportées	XXX_JOINT, XXX_JOINT_HYME
			Paramètres	Mots-clés MU (coefficient de frottement de Coulomb) et ADHESION (limite d'adhésion). rigidité normale, rigidité tangentielle. RHO_FLUIDE masse volumique et VISC_FLUIDE la viscosité dynamique du fluide. Mots-clés AMOR_NOR et AMOR_TAN (amortissement normal et tangentiel) ; mot clé COEF_AMOR (cas où le joint n'est pas en compression).
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	11. Dont : indicateur de glissement, indicateur d'ouverture, sauts normal et tangentiel de déplacement, contrainte mécanique normale. 18 dans le cas XXX_JOINT _HYME : dont : gradient de pression, flux hydraulique dans le repère global, pression de fluide.
			Cas-tests reproduisant le comportement	SSNP142 (rupture et glissement avec sous pressions d'un joint de barrage, en 2D et en 3D). SSNP162 (en mécanique pure et en hydro-mécanique couplée, en 2D et en

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

				3D). SDNV138 (joint entre deux plots de barrage en 3D, sous séisme, sans adhésion ni fluide).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.01.25].
Avis général				
Robustesse, développabilité				
Publications				
Publications EDF				
Perspectives				

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
Joints (fissures) rocher/rocher dans un milieu poreux.	Le comportement mécanique de la discontinuité est décrit par la loi de Bandis, en contraintes effectives, entre la contrainte effective normale et l'ouverture de joint normale. Cette loi est élastique non linéaire. Sur la direction tangentielle, le comportement est supposé élastique. Peut être associée à une loi de zone cohésive régularisée : propagation de la fissure par une loi adoucissante : CZM_LIN_REG ou CZM_EXP_REG, voir [R7.02.11]. Fluide interstitiel avec couplage hydromécanique ; apports massiques de fluide. Non-interpénétration des lèvres en contact. Écoulement fluide de Poiseuille, qui est régularisé pour des ouvertures de joint très faibles.	'JOINT_BANDIS' Coefficient de pénalisation : assurant la régularisation du contact des lèvres. Paramètre de régularisation de l'énergie pour l'adhérence. Intégration implicite, la matrice tangente est calculée en implicite. Usage avec des relations de comportement RELATION_KIT pour décrire le fluide ('LIQU_SATU', 'HYDR_UTIL',).	modélisations supportées	XXX_JHMS
			Paramètres	Rigidité normale initiale, rigidité tangentielle. DMAX ouverture asymptotique du joint ; GAMMA coefficient empirique de rugosité des parois. OUV_FICT (paramètre de régularisation loi de Poiseuille si le massif est imperméable pour traiter l 'écoulement dans la fissure quasi-fermée) Mots-clés (contrainte critique à la rupture) et (énergie de rupture) pour la loi de zone cohésive.
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	2 (en plus de celles liées à la loi cohésive éventuelle) : variation de la masse volumique, ouverture du joint.
			Cas-tests reproduisant le comportement	WTNA111 (joint avec couplage hydromécanique, en axisymétrique). WTNP125 (déplétion d'un réservoir, en 2D plan). WTNP126 (injection de gaz dans un milieu poreux fracturé, en 2D plan).
			Cas-tests de validation physique	WTNP128 (essai de fendage par coin du béton sous pression de fluide, en 2D plan, avec loi de zone cohésive).
			Références	Doc [R7.02.15].

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avis général	
Robustesse, développabilité	Faible retour d'expérience.
Publications	BANDIS, S., et al. "Fundamentals of rock joints deformation", 1983, Int. J. Rock Mech. mining Sci. Geomech. Abstr., 20(6), 249-68.
Publications EDF	Benoît Carrier, Sylvie Granet. Numerical modeling of hydraulic fracture problem in permeable medium using cohesive zone model. Engineering Fracture Mechanics, Elsevier, 2012, 79, pp.312-328.
Perspectives	

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Matériaux représentatifs	Phénoménologies	Nom Code_Aster et type de loi	Mise en œuvre Code_Aster	
joints béton/rocher ou joints béton/ béton en mécanique pure	comportement élastique à très faible déplacement. Loi cohésive et rupture progressive entre les lèvres d'un joint. Non interpénétration des lèvres du joint. Même seuil de rupture tangentielle et normale. Régime de glissement sans frottement. La courbe d'adoucissement est linéaire pour le modèle CZM_LIN_REG ou exponentielle pour CZM_EXP_REG.	'CZM_xxx_REG' loi élastique cohésiv e adoucissante associée exprimée sur la norme du vecteur saut de déplacement . En compression, contact élastique pénalisé. Coefficient de pénalisation du contact. Intégration implicite, la matrice tangente est symétrique. La localisation due à l'adoucissement est gérée nativement par la géométrie aplatie des EF d'interface.	modélisations supportées	XXX_JOINT sur mailles linéaires QUAD4 en 2D (plan ou axis) ou 3D (PENTA6 et HEXA8)
			Paramètres	Mots-clés GC (densité d'énergie de surface critique) et SIGMA_C (contrainte critique) Paramètre de pénalisation du contact PENA_CONTACT. Paramètre de pénalisation de l'adhérence PENA_ADHERENCE .
			Paramètres variables avec la température	non
			Nombre de variables internes et signification	9. Dont : indicateur de dissipation, valeur de l'énergie dissipée, valeur de l'énergie résiduelle courante, sauts normal et tangentiels.
			Cas-tests reproduisant le comportement	SSNP118 (en statique, pilotage en mode 1, en 2D PLAN_JOINT puis avec 3D_JOINT) ; SSNP133 (propagation de fissure par rupture fragile en statique, avec snap-back, en 2D PLAN_JOINT) ; SSNA115 (arrachement d'une armature rigide, en statique, en 2D AXIS_JOINT) ; SSNV199 (propagation de fissure par rupture fragile en statique, en 3D, 3D_JOINT) ; SDNS105 (essai d'arrachement en dynamique, en 2D).
			Cas-tests de validation physique	
			Références	Doc [R7.02.11].

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

Avis général	Il s'agit de la loi la plus simple et la plus robuste pour représenter la rupture d'un joint en mécanique pure.
Robustesse, développabilité	
Publications	
Publications EDF	Doctorat J.Laverne, Formulation Énergétique de la Rupture par des Modèles de Forces Cohésives : Considérations Théoriques et Implantations Numériques, UNIVERSITE PARIS XIII, 2004.
Perspectives	

2.6 L'identification des paramètres de comportement des joints

Il est admis en général que la limite d'adhésion à l'interface est inférieure ou égale à la valeur de la cohésion du matériau le moins résistant en contact à l'interface.

3 Ce que *Code_Aster* ne sait pas (encore) faire

Aucun modèle n'est disponible de manière directe dans *Code_Aster* pour représenter :
- la dépendance de la perméabilité avec l'état de dégradation du géomatériau ;
- la dépendance de la cohésion à l'état de saturation.

4 Références

1. LEMAITRE J., CHABOCHE J.L. : « Mécanique des matériaux solides », Ed. Dunod (1985).

2. [U2.04.05] Notice d'utilisation du modèle THM.

3. [U2.04.08] Calculs statiques et dynamiques d'ouvrages géomécaniques avec la loi de Hujeux.

4. [U4.51.11] Comportements non linéaires, § 4.3.8.

5. [U4.90.21] Opérateur CALC_ESSAI_GEOMECA.

6. [R3.06.09] Éléments finis de joint mécaniques et éléments finis de joint couplés hydromécanique.

7. [R5.04.03] Modélisations second gradient.

8.[R7.01.11] Modèles de comportement THHM.

9. [R7.01.13] Loi CJS en géomécanique.

10. [R7.01.14] Loi de comportement CAM_CLAY.

11. [R7.01.15] Loi de comportement de LAIGLE.

12. [R7.01.17] Loi de comportement des milieux poreux : modèle de BARCELONE.

13. [R7.01.18] Loi de comportement de HOEK_BROWN modifiée.

14. [R7.01.23] Loi de comportement cyclique de Hujeux pour les sols.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)

15. [R7.01.24] Loi de comportement viscoplastique LETK.

16. [R7.01.25] Lois de comportement des joints de barrages : JOINT_MECA_RUPT et JOINT_MECA_FROT.

17. [R7.01.28] Loi de Mohr-Coulomb.

18. [R7.01.38] Loi d'Iwan pour le comportement cyclique de matériaux granulaires.

19. [R7.01.39] Loi de Rankine.

20. [R7.01.40] Modèle de comportement LKR.

21. [R7.01.41] Loi de comportement des milieux poreux : GONF_ELAS.

22. [R7.02.11] Lois de comportement cohésives : CZM_xxx_xxx et pilotage du chargement.

23. [R7.02.15] Modélisation des fissures avec couplage hydromécanique en milieu poreux saturé.

24. ALVES FERNANDES V. « Analyse des modèles de comportement cyclique des sols pour la réponse sismique des ouvrages en remblai ». Note EDF, 6125-1714-2017-04046-FR.

25. BOUTONNIER L. « Comportement hydromécanique des sols fins proches de la saturation. Cas des ouvrages en terre : coefficient B, déformations instantanées et différées, retrait/gonflement ». Doctorat INPG, 2007.

26.CAMBOU B., Di PRISCO C. « Constitutive Modelling of Geomaterials ». Revue Française de Génie Civil, vol. 4, n°5. Ed. Hermes, 2000.

27. LUONG M., Phénomènes cycliques dans les sols pulvérulents. Rev Fr Géotech, (10), 1980.

28. HOEK E., MARINOS P., and BENISSI M. « Applicability of the geological strength index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens schist formation ». Bull. Eng. Geol. Env., 57 :151–160, 1998.

29. VERMEER, P., de BORST, R.. Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock, HERON 29, pp. 1-64, 1984.

5 Description des versions de ce document

Version *Code_Aster*	Auteur(s) Organisation(s)	Description des modifications
14.4	F.Voldoire EDF-R&D/ERMES	Texte initial. Ce document a bénéficié des apports de V.Alves-Fernandes, S.Granet, K.Kazymyrenko, M.Kham, S.Raude.

Document diffusé sous licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html)