

UM5MES03 – Comportement non linéaire des solides (Nonlinear behaviour of solids)

Djimeddo Kondo

2025-08-29 10:51:06 +0200

Informations générales

Title (EN)	Nonlinear behaviour of solids
Titre (FR)	Comportement non linéaire des solides
Nom du ou de la responsable de l'UE	Djimeddo Kondo
Nombre d'heures de cours / Amount of class hours	20
Volume h TD / Amount of exercise hours	10
ECTS	3
Semestre	Automne (S3)
Semester	Sept-Jan (S3)
Periode (pour les cours M2)	Sept-Nov
Quarter (for M2 classes)	P1
Langue	Français
Language	Français
Localisation	PMC (Jussieu)
Lien vers l'emploi du temps / trad en	https://calendar.google.com/calendar/embed?src=uarpr9gmur
Code de l'UE	UM5MES03

Informations pédagogiques

Contenu (FR)

Cet enseignement vise à donner aux étudiants un cadre unifié pour la formulation des lois de comportement mécaniques non linéaires, et à leur considération dans le contexte du calcul de structures. Le point de vue adopté est pour l'essentiel macroscopique et phénoménologique, avec cependant des éléments de micromécanique des matériaux qui viennent justifier ou enrichir ce point de vue.

Après un rappel des différentes classes de lois de comportements thermomécaniques non linéaires, on présentera le cadre thermodynamique des processus irréversibles, l'objectif

principal étant la formulation de lois de comportement régies par des mécanismes dissipatifs identifiés. Le rôle clef des deux principes de la thermodynamique, et notamment de l'inégalité de Clausius-Duhem qui en résulte, sera souligné.

Suivra un exposé du cadre des Matériaux Standards Généralisés (MSG) pour lequel la formulation des lois constitutives repose sur : - un choix éclairé des variables d'état incluant les variables internes correspondant aux types de comportements considérés ; - l'introduction d'un potentiel thermodynamique (en général l'énergie libre d'Helmholtz), fonction de l'ensemble des variables d'état et décrivant l'état thermodynamique du matériau ; - le choix d'un potentiel de dissipation fournissant les lois d'évolution des variables internes.

Ce cadre des MSG servira ensuite à construire et étudier de manière unifiée les grandes classes de modèles de comportements thermomécaniques, allant de la thermoélasticité à la thermo-élastoviscoplasticité. On évoquera brièvement la mécanique de l'endommagement.

Seront également décrites les équations régissant les évolutions thermomécaniques, nécessitées par la résolution de problèmes de structures qui jalonneront l'ensemble de l'enseignement. Ceci sera systématiquement complété par l'exposé du cadre variationnel associé.

Plan succinct de l'UE

- Bref rappel des concepts de base de la mécanique des milieux continus, et des divers comportements des matériaux de structure ;
- Lois de bilan en thermomécanique des milieux continus : bilan de quantité de mouvement, bilan d'énergie et bilan d'entropie. Présentation de l'inégalité de Clausius-Duhem, et des dissipations (intrinsèque et thermique) ;
- Cadre des Matériaux Standards Généralisés : méthode générale de formulation des lois de comportement ; rôle de l'inégalité de Clausius-Duhem. Notions de variables d'état, de variables internes, de fonctions d'état et de potentiels thermodynamiques. Équation de la chaleur ;
- Construction et identification des grandes classes de modèles de comportement : rappels des modèles rhéologiques fondamentaux à base de ressort, patin et amortisseur. Cas des matériaux thermoplastiques, des matériaux thermo-viscoélastiques (modèle de Kelvin-Voigt, modèle de Maxwell) ;
- Élastoplasticité et applications : formulation de modèles élastoplastiques parfaits. Prise en compte de l'écrouissage (isotrope et/ou cinématique). Calculs thermomécaniques et résolution de problèmes simples de structures élastoplastiques ;
- Quelques notions sur des lois couplant élasticité et endommagement isotrope ;
- Comportements élastoviscoplastiques : présentation de quelques modèles de comportement dépendant du temps ; effet régularisant de la viscosité.

Content (EN)

This course aims to provide students with a unified framework for formulating nonlinear mechanical behavior laws and considering them in the context of structural analysis. The perspective adopted is essentially macroscopic and phenomenological, with some elements of micromechanics introduced to justify or enrich this view.

After a review of the various classes of nonlinear thermomechanical behavior laws, we will present the thermodynamic framework of irreversible processes. The main objective is the formulation of behavior laws governed by identified dissipative mechanisms. The key role of the two principles of thermodynamics, particularly the Clausius-Duhem inequality, will be emphasized.

This will be followed by an introduction to the framework of Generalized Standard Materials (GSM), for which the formulation of constitutive laws relies on: - an informed choice of state variables, including internal variables corresponding to the types of behaviors considered; - the introduction of a thermodynamic potential (generally the Helmholtz free energy), a function of the set of state variables that describes the thermodynamic state of the material; - the choice of a dissipation potential providing the evolution laws for the internal variables.

This GSM framework will then be used to construct and study in a unified way the major classes of thermomechanical behavior models, ranging from thermoelasticity to thermoelastoviscoplasticity. Damage mechanics will also be briefly discussed.

The equations governing thermomechanical evolutions will also be described, as they are necessary for solving structural problems throughout the course. This will systematically be complemented by the presentation of the associated variational framework.

Course Outline

- Brief review of the basic concepts of continuum mechanics and the various behaviors of structural materials;
- Balance laws in thermomechanics of continua: momentum balance, energy balance, and entropy balance. Presentation of the Clausius-Duhem inequality and dissipation mechanisms (intrinsic and thermal);
- Framework of Generalized Standard Materials: general method for formulating constitutive laws; role of the Clausius-Duhem inequality. Concepts of state variables, internal variables, state functions, and thermodynamic potentials. Heat equation;
- Construction and identification of major classes of behavior models: review of fundamental rheological models based on springs, sliders, and dampers. Case of thermoplastic materials, thermo-viscoelastic materials (Kelvin-Voigt model, Maxwell model);
- Elastoplasticity and applications: formulation of ideal elastoplastic models. Consideration of hardening (isotropic and/or kinematic). Thermomechanical analysis and resolution of simple elastoplastic structural problems;
- Some notions of laws coupling elasticity and isotropic damage;
- Elastoviscoplastic behaviors: presentation of time-dependent behavior models; regularizing effect of viscosity.

Mots clés (FR)

Matériaux Standards Généralisés, comportement non linéaire, thermomécanique, inégalité de Clausius-Duhem, variables internes, plasticité, viscoélasticité

Keywords (EN)

Generalized Standard Materials, nonlinear behavior, thermomechanics, Clausius-Duhem inequality, internal variables, plasticity, viscoelasticity

Prérequis (FR)

Mécanique des milieux continus, Equations aux dérivées partielles

Pre-requisites (EN)

Continuum mechanics, partial differential equations

Modalité d'évaluation

100% examen écrit

Assessment

100% final written exam

Bibliographie

H. Ziegler, An introduction to thermomechanics, North Holland, 1983

P. Germain, Q. S. Nguyen, P. Squat, Continuum Thermodynamics, J. Appl. Mech., ASME 50, 1010-1021, 1983.

J. Lemaître, J. L. Chaboche, Mechanics of Solids Materials, Cambridge University Press, 1990

G. Maugin, The thermomechanics of plasticity and fracture , Cambridge University Press 1992

Q. S. Nguyen, Stability and Nonlinear Solids Mechanics, Wiley, 2000

M. Fremond, Non Smooth Thermomechanics, Springer Verlag, 2002,

J. Lubliner, Plasticity Theory. Dover Publications Inc., Mineola, New York, 2008.

H. Maitournam, Matériaux et Structures inélastiques, Editions de l'Ecole Polytechnique, 2016

- H. Ziegler, *An Introduction to Thermomechanics*, North Holland, 1983.
- P. Germain, Q. S. Nguyen, P. Squat, *Continuum Thermodynamics*, J. Appl. Mech., ASME 50, 1010–1021, 1983.
- J. Lemaître, J. L. Chaboche, *Mechanics of Solid Materials*, Cambridge University Press, 1990.
- G. Maugin, *The Thermomechanics of Plasticity and Fracture*, Cambridge University Press, 1992.

- Q. S. Nguyen, *Stability and Nonlinear Solid Mechanics*, Wiley, 2000.
- M. Frémond, *Non-Smooth Thermomechanics*, Springer Verlag, 2002.
- J. Lubliner, *Plasticity Theory*, Dover Publications Inc., Mineola, New York, 2008.
- H. Maitournam, *Matériaux et Structures Inélastiques*, Éditions de l'École Polytechnique, 2016.

Version PDF