

MÉCANIQUE NON LINÉAIRE DES MATÉRIAUX

Jacques BESSON, Georges CAILLETAUD,
Jean-Louis CHABOCHE & Samuel FOREST

Notes de lecture

par Philippe PASQUET, SAMTECH France

"Le calcul de structures est une discipline à part entière dans laquelle la représentation des matériaux ne tient qu'une (trop) petite place." (p. 15)

" Il y a un grand risque à voir des ingénieurs insuffisamment qualifiés manipuler des outils numériques de plus en plus sophistiqués." (p. 9)

Ces deux affirmations ne sont-elles pas une éclatante justification de l'action entreprise il y a vingt-cinq ans par notre association ? La première rédaction de cet ouvrage fut d'ailleurs un support de cours remis aux participants d'une session organisée par l'IPSI en 1997. Quatre ans plus tard, l'équipe pédagogique – constituée de J. Besson, G. Cailletaud, J.-L. Chaboche et S. Forest – relève le pari de la formation sur le comportement des matériaux dans le calcul des structures et cela donne : **Mécanique non linéaire des matériaux**, publié en 2001 par HERMES Science Publications.

Nous partageons si bien cette crainte des auteurs que la science des matériaux est à l'honneur depuis plusieurs années parmi les cours à notre programme et que nous avons essayé de communiquer notre enthousiasme à propos de trois ouvrages, à notre avis fondamentaux :

J. Lemaitre & J.-L. Chaboche : *Mécanique des matériaux solides* (Bulletin Φ^2 AS XVII-1)

D. François, A. Pineau & A. Zaoui : *Comportement mécanique des matériaux* (Bulletin Φ^2 AS XIX-2)

F. Darve, P.-Y. Hicher & J.-M. Reynouard : *Les géomatériaux* (Bulletin Φ^2 AS XXII-1)

Cette récente livraison prétend à juste titre transformer ce trio majeur en carré d'as. Détaillons en les atouts.

Dans sa préface, le professeur Lemaitre vante la "*présentation moderne de la mécanique des matériaux*" qu'offre cet ouvrage. Ce modernisme s'appuie fort heureusement sur un sobre classicisme dont la marque la plus évidente nous semble être la clarté des titres. Dès la lecture de la table des matières, le lecteur sait où aller selon sa formation, ses compétences ou son intérêt. Quoi de plus simple et de plus expressif, en effet, que : *Concepts généraux - Plasticité et viscoplasticité 3D*, ... et ainsi de suite pour les sept chapitres qui suivent l'introduction, que l'on conseille naturellement de lire car elle situe bien l'originalité du propos.

Le deuxième chapitre est le véritable point d'entrée : il propose les notations et les modèles les plus élémentaires. Bien évidemment, l'exposé privilégie l'approche en variables internes, devenue classique, par rapport à l'hypothèse de dépendance entre les variables. Les quelques pages consacrées à la plasticité uniaxiale sont déjà riches d'enseignement pour l'ingénieur. Mais, au-delà des modèles, on y trouve aussi les outils (critères) et les méthodes (non linéaires, d'intégration et d'éléments finis). Pour cette dernière, il ne peut être question que de rappel de notions avec un accent mis sur l'implantation des lois de comportement.

Le troisième chapitre nous amène bien au-delà de ce qui existe dans les codes de calcul. Y sont traitées de manière parallèle les formulations plastiques – qui fournissent des réponses instantanées – et les formulations viscoplastiques – qui fournissent les effets retardés. Les auteurs proposent d'associer les deux régimes de déformations, ce qui va beaucoup plus loin que les modèles courants. Pour s'en convaincre, il n'est qu'à regarder les différences de comportement qui apparaissent quand on fait varier certains paramètres du modèle. Les industriels

devraient y trouver matière à réflexion pour motiver les "implanteurs" qui, eux-mêmes, y trouveront des cas tests pour valider leurs développements. Compte tenu de la faiblesse chronique des codes de calcul dans le domaine du comportement des matériaux, il nous paraît bon de souligner l'importance de ce chapitre, qui donne aussi des informations utiles sur les critères, les types d'érouissage (isotrope, cinématique, linéaire ou non), les effets de rochet, du durcissement, de mémoire, du vieillissement et même les modèles multimécanismes qui permettent d'introduire les matériaux sensibles à la pression hydrostatique et les matériaux poreux, type Green, Gurson ou Rousselier. Mais là, on aborde déjà la planète des outils métiers.

Le chapitre suivant nous fait momentanément redescendre vers des contrées plus familières. La mécanique de l'endommagement est largement développée depuis une quarantaine d'années. L'endommagement est, en général, consécutif à la déformation irréversible mais précède la rupture, qui modifie les conditions aux limites. Si cet aspect est volontairement laissé à l'écart, les fondements théoriques de l'endommagement font l'objet de bénéfiques développements. Les applications sont aussi présentées mais sous un angle inattendu : rien sur l'endommagement des métaux que l'on peut trouver par ailleurs, y compris dans les références ; les exemples ne portent que sur certains matériaux fragiles. De ce point de vue, le lecteur, par nature friand d'applications, pourra se sentir frustré. La partie théorique qui fait une place importante au couplage plasticité-endommagement saura-t-elle le consoler ?

Le chapitre consacré aux matériaux hétérogènes présente essentiellement les principales méthodes d'homogénéisation qui vont permettre de se rapprocher des lois établies précédemment. Des méthodes simples (moyennes arithmétiques ou loi des mélanges pour les caractéristiques linéaires), on passe au domaine d'une recherche très vivace de modèles théoriques de laboratoire ou issus de simulations numériques d'un Volume Élémentaire Représentatif. Ces calculs nécessitent des processeurs très rapides pour traiter un grand nombre d'équations dans des temps raisonnables.

Le chapitre consacré aux transformations finies décrit de manière "abordable" un domaine extrêmement délicat car, au-delà des manipulations mathématiques classiques, le but est ici de trouver une formulation acceptable, bien que dépendante du matériau et de la structure étudiés. La représentation objective est naturellement au cœur des développements.

Les deux derniers chapitres s'adressent, à des titres divers, à des spécialistes : en développement de codes de calcul pour le chapitre 7 et en matériaux extrêmes pour le 8. Le *Calcul de structures en non linéaire* s'intéresse à la programmation des méthodes de comportement dans le cadre de la MEF. Les cas généraux et particuliers sont présentés sous une forme générique permettant d'introduire aisément n'importe quel nombre de variables internes. Une telle rigueur dans les méthodes doit conduire à une utilisation plus simple des modèles et à la programmation d'un modèle quelconque par l'utilisateur lui-même. Elle permet même les comportements ultimes, tels que la gestion des modes de rupture.

Nous n'entrerons pas dans les détails du dernier chapitre. Il suffit de dire qu'il traite de la localisation des déformations, symptôme d'instabilité du comportement mais aussi, parfois, conséquence d'un défaut de maillage ou de matériau. Les développements théoriques sont assez ardues et l'on ne peut que conseiller de s'exercer avec les exemples parsemés dans ce chapitre, comme d'ailleurs dans l'ensemble de l'ouvrage.

Cette somme d'atouts fait donc de **Mécanique non linéaire des matériaux** un ouvrage de base, au sens propre du terme, qui présente de manière exhaustive les fondamentaux et offre une première approche sur des domaines très pointus. Compte tenu de la verve des auteurs et des ouvertures qu'ils proposent eux-mêmes, nous attendons avec impatience des prolongements. Or l'occasion leur sera bientôt donnée d'aborder la deuxième marche que constituent les problèmes multiphysiques. Bon courage, messieurs, et soyez assurés de notre soutien.