

## COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX

Dominique FRANÇOIS, André PINEAU, André ZAOUI

### Notes de lecture

par Philippe PASQUET, CISI Saclay

Nombre de calculs de structures sont effectués avec l'hypothèse de comportement élastique linéaire des matériaux. Cette restriction est largement justifiée dans la plupart des cas, notamment en ce qui concerne les calculs vibratoires ; mais s'il est intéressant d'évaluer les modes propres (ainsi que les fréquences de résonance) des structures, il faut prendre garde à l'usage qui en est fait. Par exemple, est-il correct de conserver cette hypothèse – sous-jacente pour les calculs de modes propres – pour des recombinaisons servant à calculer la réponse à des sollicitations aléatoires, cycliques, demi-sinus ? Il est bien connu que le comportement des matériaux dépend de nombreux facteurs (température, temps, amplitude des chargements, déformations, vitesse de déformation ...) mais les codes de calculs généralistes ne permettent que rarement une modélisation fine des matériaux.

Tout se passe comme si, les numériciens mettant au point des algorithmes de plus en plus performants et les rhéologistes des lois de comportement elles aussi de plus en plus performantes, ces deux mondes s'ignoraient au détriment des ingénieurs de conception.

L'ouvrage de Dominique François, André Pineau et André Zaoui (paru aux éditions HERMES), **Comportement mécanique des matériaux**, fédère les différentes approches et propose une conception moderne de l'enseignement de la mécanique des matériaux. Il facilite donc le dialogue entre ces deux communautés.

Les deux volumineux tomes sont le fruit d'une association entre plusieurs universités et grandes écoles pour mettre sur pied un DEA "Mécanique et Matériaux". L'enseignement commun, fruit de cette association, nous laisse espérer que les futurs ingénieurs, chercheurs, enseignants, pratiqueront un même langage, ce qui, convenons-en, ne pourra qu'offrir de nombreux avantages.

Les sciences des matériaux sont, comme les sciences de l'ingénieur, au carrefour de nombreuses disciplines. Ce livre les représente de manière naturelle : introduction aux propriétés chimiques, physico-chimiques, physiques, toutes remises en perspective dans un cadre thermodynamique. Une fois n'est pas coutume, la consultation de la table des matières fournit une bonne indication sur l'ensemble des sujets traités : sont successivement analysés les comportements élastiques, élastoplastiques, élastoviscoplastiques, la mécanique de l'endommagement, de la rupture et des contacts. Voilà pour le contenu qui offre, avec les différentes annexes, environ 1000 pages d'une lecture quelquefois ardue, mais toujours enrichissante et agréable.

Avançons maintenant dans une lecture plus précise. Dans la conception des structures, il est très important de bien choisir le matériau. Les travaux récents permettent de conforter ce choix par le calcul dans les meilleures conditions. Faut-il privilégier sa résistance (à la déformation ou à la rupture), un compromis entre résistance et ductilité, ou bien encore sa durée de vie ou sa capacité d'adaptation ? Chacun, selon ses besoins, répondra à cette question, mais l'important est d'en bien mesurer les conséquences.

Cet ouvrage devrait nous y aider. Avant sa lecture, il nous semblait naturel de penser que le comportement le plus "simple" était le comportement élastique. Nous avons certes raison, mais quelle erreur de le considérer comme simple ! En effet, il apparaît que l'origine de l'élasticité est double : elle peut être décomposée en une partie provenant de la variation de l'énergie interne et une autre provenant de la variation de l'entropie. Telle est la source de cette erreur. Nous sommes en effet habitués à (voire déformés par) l'utilisation des matériaux métalliques pour lesquels le second terme est négligeable, ce qui n'est pas vrai pour d'autres matériaux, les élastomères par exemple, pour lesquels au contraire ce terme est prépondérant.

On comprendra encore mieux la différence entre ces deux termes si l'on se souvient que la variation de l'entropie fait en général intervenir les grands déplacements. Le chapitre sur les comportements élastiques comprend aussi une description de l'anisotropie et des hétérogénéités et des différents essais permettant de les caractériser par valeurs moyennes ou par bornes. On peut regretter, là comme dans l'ensemble du travail, la très faible place accordée à des développements sur l'hyperélasticité.

Le chapitre concernant l'élastoplasticité est l'un des deux plus importants de l'ouvrage. Il est bon d'avoir à l'esprit le domaine de validité de l'approximation élastoplastique qui correspond "à des chargements infiniment lents ou alors très rapides". Dans le premier cas, la réponse est stabilisée (les effets d'inertie sont négligeables) ; dans le second, la viscosité n'a pas le temps de manifester son influence.

On s'apercevra qu'il est possible de traiter de manière simultanée la plasticité et la viscoplasticité comme il est possible de coupler plasticité et endommagement. Même s'il est important de connaître les mécanismes qui entraînent la plastification, l'ingénieur sera surtout concerné par la description des différents types d'érouissage (avec lesquels nous étions déjà familiarisés depuis Lemaître et Chaboche) et des critères les plus couramment utilisés dans les codes de calculs. Tresca, Coulomb, von Mises ou Hill sont analysés d'un point de vue théorique et sont agrémentés de description d'essais simples qui montrent, par exemple, qu'ils dépendent davantage de l'état de contrainte – et donc de l'histoire – que de l'incrément de contrainte.

Ces deux chapitres, d'une importance incontestable, composent le premier tome de l'ouvrage, *Elasticité et plasticité*. La matière en est enrichie par de nombreux exercices et différents tableaux de valeurs pour différents matériaux. Ces deux types de comportement étant de très loin les plus habituels – à défaut d'être aussi simples qu'on pouvait le penser – la présence de ce premier tome dans toutes les bibliothèques d'entreprise paraît indispensable.



Le chapitre traitant de la viscoplasticité – dont la rédaction est en (grande) partie due à Georges Cailletaud – nous familiarise avec un comportement où la déformation inélastique est dépendante de la vitesse du chargement, ce qui implique un certain nombre de traitements spécifiques. Ce comportement est en général lié à des températures élevées même si, nous dit l'auteur, il est possible de mettre en évidence une viscoplasticité à température faible. Ici encore, l'ingénieur sera plus intéressé, dans un premier temps, par la description des modèles et l'écriture des lois. Il retiendra que le comportement viscoplastique peut être considéré comme une généralisation du comportement élastoplastique dans lequel la déformation non linéaire est instantanée alors que, dans le cas viscoplastique, elle est retardée.

En chemin, l'auteur fait le point sur différents phénomènes qui peuvent être utiles au calculateur confronté aux choix offerts par les codes de calculs : on laissera au lecteur le loisir de rechercher les différences entre hypothèses '*strain hardening*' et '*time hardening*', ou entre érouissage cinématique ou isotrope, et dans quels cas employer l'un ou l'autre.

Une fois mise en évidence la nécessité d'utiliser les lois de comportement les plus correctes, se pose le problème de la connaissance, puis de la prise en compte, des limites acceptables. Une limite dépassée peut conduire à différents dommages. Si la taille des endommagements est faible, il faudra les intégrer dans les lois de manière à obtenir un modèle homogénéisé : on parlera alors de mécanique de l'endommagement. Dans le cas contraire, on appliquera les résultats de la mécanique de la rupture. Les différents modes d'endommagement pouvant conduire à la ruine sont parfaitement décrits pour toutes les catégories de matériaux (métaux évidemment, mais aussi verre, céramique, béton, composites, polymères, milieux poreux). On comprendra mieux, à la lecture de ce chapitre, l'importance de la caractérisation des matériaux, mais aussi la difficulté de sa mise en œuvre, qui nécessite dans bien des cas l'utilisation de techniques sophistiquées pour accéder aux différents paramètres.

Le développement plus ou moins rapide des endommagements conduit inéluctablement à l'apparition de fissures macroscopiques. La mécanique de la rupture doit permettre de prévoir la propagation des fissures en fonction des matériaux, des sollicitations et de la taille des défauts. En d'autres termes, son but est de déterminer à partir de quelle taille ceux-ci conduisent à la rupture non prévisible par l'usage des critères de plastification. Le cadre décrit par l'ouvrage est élémentaire : il s'intéresse uniquement à la forme des équations et à leurs solutions en élasticité linéaire bidimensionnelle qui, seule, autorise la superposition des modes d'ouverture.

Pour de plus amples détails, on se reportera aux ouvrages spécialisés – qu'ils soient cités en références : Bui (Masson), Labbens (Pluralis), ou non : Barthélémy (Eyrolles), Pluvinaud (Cepadues) – tous en français. Néanmoins, le lecteur dispose ici de l'essentiel : facteur d'intensité de contraintes  $K$ , taux de restitution  $G$  et même intégrale de contour  $J$ , ainsi que les relations liant ces quantités. Parmi les méthodes décrites, celle des éléments finis se taille la part du lion puisqu'elle est sans rivale dès qu'il s'agit d'étudier des géométries complexes.

Un petit chapitre est consacré à la mécanique des contacts, qui peut entraîner des dommages particuliers. Les mécanismes de roulement et de frottement sont souvent à l'origine de fissures ou de ruptures. Ils conduisent à des phénomènes qui, comme l'usure, sont encore peu étudiés. Le lecteur trouvera ici un certain nombre de résultats de référence et de valeurs de coefficients.

Ce volume, *Viscoplasticité, endommagement, rupture* est, comme le précédent, complété par des exercices qui permettent d'approfondir les notions rencontrées dans le texte et de présenter quelques applications pratiques. Les termes employés dans l'ouvrage n'étant pas très familiers, les auteurs ont très judicieusement introduit un glossaire définissant les mots les plus fréquents et donnant leur traduction en anglais.

Dans les annexes, on trouvera également les formules de passages entre divers systèmes de coordonnées. Qui n'a jamais recherché la formule du laplacien en coordonnées sphériques ? Evidemment, on y trouvera aussi nombre de valeurs numériques, au moins pour les matériaux les plus courants.

L'ensemble de cet ouvrage s'adresse donc à de nombreux publics, car les théoriciens y trouveront les résultats pratiques dont ils sont avides et les praticiens, les justifications à leurs hypothèses concernant le comportement des matériaux.