

Modélisation du comportement élasto-viscoplastique d'un matériau du moteur d'Ariane 5

école _____
normale _____
supérieure _____
paris-saclay _____

Lionel GENDRE - Charles PETRY - Jean-Loup PRENSIER

Edité le 21/04/2010

Cette ressource présente et illustre la démarche de modélisation du comportement mécanique d'un matériau : l'alliage Narloy Z, utilisé dans le moteur de la fusée Ariane 5. Au cours du fonctionnement du moteur, cet alliage est soumis à des sollicitations thermiques et mécaniques importantes qui génèrent différents phénomènes physiques. Ces phénomènes sont identifiés et caractérisés à l'aide d'essais ; ces essais permettent de construire un modèle de comportement du matériau qui globalise l'ensemble de ces phénomènes, afin de pouvoir simuler le comportement de la structure. Nous exposons ici ces différentes étapes.

1 - Conditions d'utilisation

Préalablement à toute modélisation, il faut connaître les conditions dans lesquelles on envisage d'utiliser le modèle de comportement du matériau ; ces conditions sont dictées par l'application dans laquelle le matériau sera utilisé.

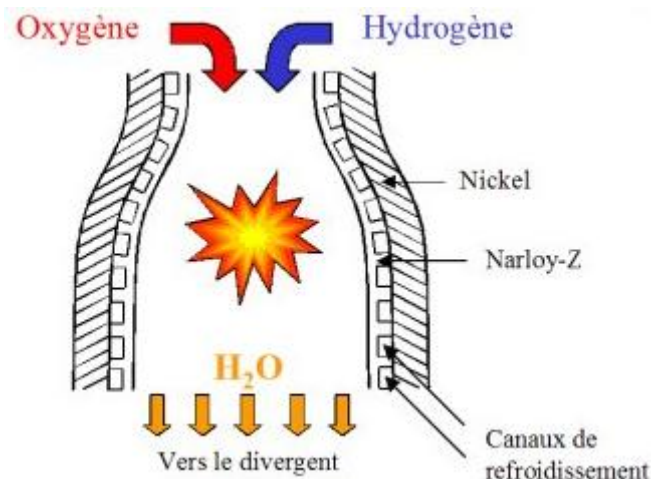


Figure 1 : La chambre de combustion du moteur d'Ariane 5

Dans cette ressource, nous nous intéressons au Narloy Z, l'alliage métallique constituant la paroi intérieure de la chambre de combustion du moteur d'Ariane 5, voir figure 1 ; l'objectif de l'étude est de dimensionner la paroi intérieure pour les phases de démarrage, de vol stabilisé et d'arrêt. Sans entrer dans les détails du fonctionnement, précisons que :

- La paroi est à la fois en contact avec le mélange en combustion, et avec le fluide de refroidissement ; de ce fait, sa température varie de -230°C à plus de 700°C et le modèle doit donc être valable sur toute cette plage ;
- Le moteur étant utilisé pour un seul lancement, il subit très peu de cycles démarrage/arrêt (tout au plus une dizaine) ; les chargements caractéristiques à considérer pour cette application sont donc soit constants, soit cycliques à très faible nombre de cycles ;
- Lors du démarrage, la montée en pression et en température est très rapide, ce qui induit des vitesses de déformations élevées (entre 10^{-2} et 10^{-1} s^{-1})

En outre, l'expérience des solutions précédentes et les calculs de pré-dimensionnement ont permis d'évaluer les valeurs extrêmes des contraintes et déformations pour cette application :

- Contraintes entre -200 MPa et 200 MPa,
- Déformations totales entre -0,03 et 0,03.

Ces conditions d'utilisation ont déterminé le choix du Narloy Z pour cette application ; une présentation détaillée de ce matériau est donnée « *Annexe : Caractéristiques du Narloy Z* ».

2 - Essais

Une fois les conditions d'utilisation précisées, il faut faire des essais afin d'identifier les phénomènes physiques influant sur la réponse du matériau et de quantifier leur effet. Le choix de ces essais dépend naturellement des conditions d'utilisation préalablement identifiées ; pour effectuer ce choix, le concepteur a tout intérêt à tirer parti de la connaissance a priori qu'il a du comportement du matériau dans ces conditions.

Ici, par exemple, les niveaux de chargement élevés (en termes de contraintes et de températures) sont susceptibles de dépasser la limite élastique d'un alliage métallique comme le Narloy Z. Il faut donc s'attendre à observer des phénomènes plus complexes que de simples déformations élastiques, comme :

- Des déformations permanentes, demeurant une fois que le chargement a disparu ;
- Un comportement non instantané (c'est-à-dire que sous une contrainte constante, la déformation peut évoluer au cours du temps, et inversement) et dépendant de la vitesse de chargement, qui est ici très élevée lors de l'allumage du moteur ;
- Une forte dépendance de ces phénomènes en fonction de la température, compte tenu de la large plage de températures rencontrées dans la chambre de combustion.

Du fait de la multiplicité de ces phénomènes et de leurs dépendances, la caractérisation d'un tel comportement demande de multiples essais. Dans cette ressource nous nous limitons à des essais :

- Mécaniques : nous n'étudions que la relation entre les contraintes et les déformations,
- Isothermes, c'est-à-dire effectués à température constante,
- Uni-axiaux : le chargement n'est appliqué que dans une seule direction et la réponse n'est mesurée que dans cette même direction.

2.1 - Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental courant permettant d'effectuer ces essais est schématisé sur la figure 2 ci-dessous.

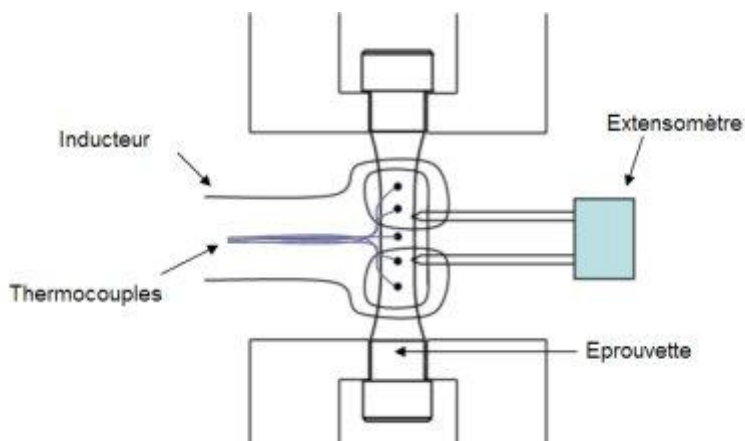


Figure 2 : Schématisation du dispositif expérimental

Ce dispositif est constitué :

- D'une éprouvette réalisée en Narloy Z ; sa géométrie est choisie de sorte que les contraintes et les déformations soient uniformes dans la zone utile, c'est-à-dire la partie cylindrique de révolution se trouvant au milieu, où sont placés les différents capteurs ;
- D'une machine de traction permettant de solliciter l'éprouvette, à l'aide d'un mors fixe et d'un mors mobile ; ce dernier peut être piloté (c'est-à-dire asservi) en effort ou en position, et la machine est munie de capteurs mesurant ces deux quantités ;
- D'un extensomètre permettant de mesurer l'allongement relatif (et donc la déformation) dans la zone utile de l'éprouvette ;
- D'un inducteur permettant de chauffer l'éprouvette à la température voulue, et de thermocouples permettant de contrôler que cette température est bien atteinte en divers points de la zone utile.

Le principe d'un essai mécanique isotherme est de porter l'éprouvette à la température voulue, puis de la solliciter selon un mode opératoire donné, en relevant à chaque instant la contrainte (à l'aide du capteur d'effort) et la déformation (à l'aide de l'extensomètre) dans la zone utile de l'éprouvette. Nous présentons ici quatre essais classiques permettant d'identifier et de caractériser les phénomènes évoqués ci-dessus.

2.2 - Essai de traction monotone piloté en déplacement

Cet essai consiste à imposer au mors mobile de la machine un déplacement qui augmente à vitesse constante. La figure 3 présente la consigne de pilotage correspondante, et la figure 4 les courbes contrainte/déformation obtenues en répétant la manipulation à trois vitesses différentes, la température étant la même pour les trois essais.

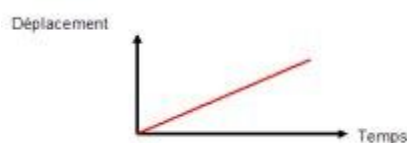


Figure 3 : Consigne de pilotage de l'essai de traction

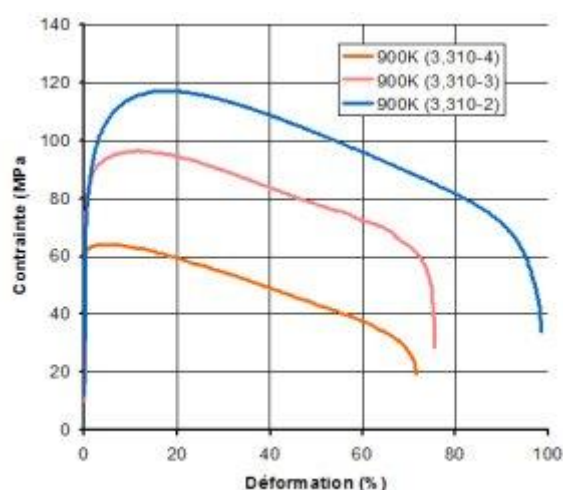


Figure 4 : Courbes de traction à 900 °K pour trois vitesses de déformation différentes

Ce type d'essai permet d'observer le comportement du matériau sous chargement monotone. Au fur et à mesure que la déformation augmente, divers phénomènes se manifestent : d'abord des déformations réversibles (que l'on modélisera par de l'élasticité), puis permanentes (plasticité), suivies d'une diminution de la contrainte apparente jusqu'à la rupture (ce qui peut être dû à la striction de l'éprouvette ainsi qu'à une perte de rigidité). En outre, on constate que les

contraintes atteintes sont d'autant plus élevées que la vitesse de déformation est importante (ce qui sera modélisé par la viscosité). Ici, tous les essais sont effectués à une seule température ; en pratique, on répète les essais à plusieurs températures différentes, de sorte à caractériser l'influence de la température.

2.3 - Essai de relaxation

Cet essai consiste à imposer entre les deux mors un allongement croissant jusqu'à un niveau donné (mise en charge), puis à maintenir ce niveau constant comme le montre la figure 5. La figure 6 présente les courbes de relaxation (contrainte en fonction du temps) obtenues à deux températures différentes.

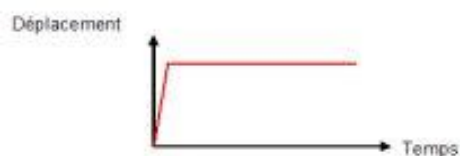


Figure 5 : Consigne de pilotage de l'essai de relaxation

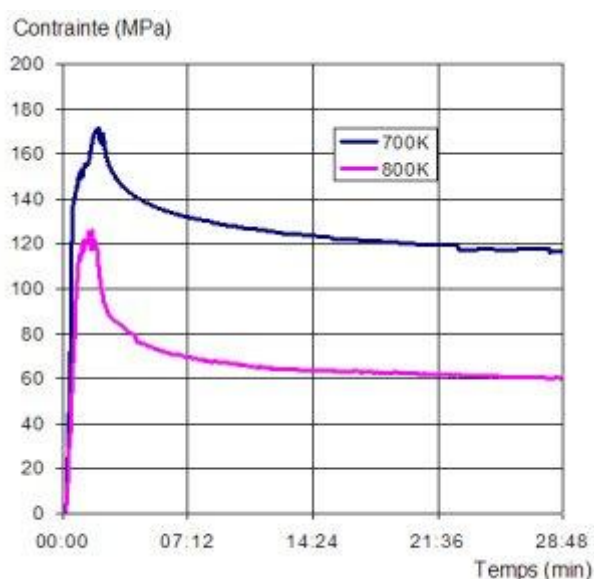


Figure 6 : Courbes de relaxation à deux températures différentes

Ce résultat illustre le caractère non instantané de la réponse du matériau : en appliquant une déformation constante à la zone utile de l'éprouvette, on obtient une contrainte évoluant au fil du temps. Le « pic » de contrainte observé après la mise en charge est habituellement modélisé par de la viscosité ; on rappelle que cette dernière se caractérise par l'existence d'une contrainte visqueuse qui s'oppose aux variations de la déformation du matériau. L'essai de relaxation provoque l'apparition, puis le « relâchement » de cette contrainte visqueuse, d'où son nom.

2.4 - Essai cyclique piloté en déplacement

Cet essai consiste à imposer entre les mors un allongement évoluant selon des cycles de charge/décharge, comme le montre la figure 7. La figure 8 présente la courbe contrainte/déformation correspondant aux cinq premiers cycles, à température ambiante.

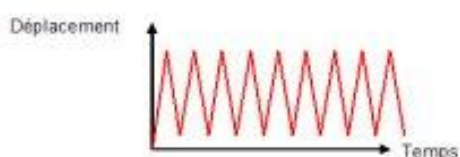


Figure 7 : Consigne de pilotage de l'essai cyclique

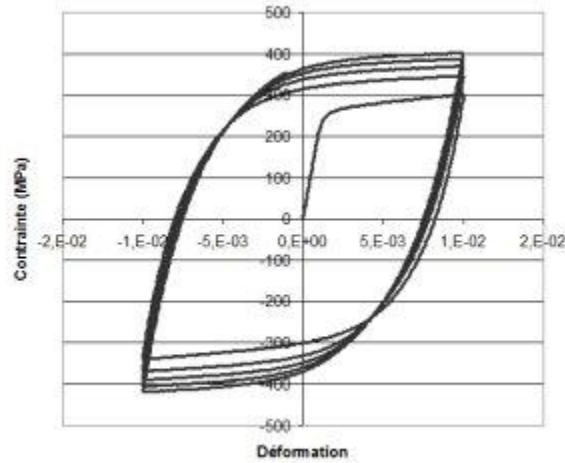


Figure 8 : Les cinq premiers cycles d'un essai de fatigue à température ambiante

Cet essai est complémentaire de l'essai de traction monotone présenté sur les figures 3 et 4 ; les phénomènes physiques mis en jeu sont généralement différents. L'apparition de « boucles » sur la courbe contrainte/déformation est directement due à la présence de déformations permanentes, modélisées par la plasticité. Un constat essentiel est que même si la déformation appliquée est faible, son action répétée peut provoquer un durcissement du matériau (comme sur la figure 8 où l'on voit les contraintes extrémales augmenter à chaque cycle) ou, au contraire, un adoucissement ; c'est le phénomène d'écroutissage.

2.5 - Essai de fluage

Cet essai consiste à exercer sur l'éprouvette un effort croissant linéairement jusqu'à une certaine valeur (mise en charge) suivi d'un temps de maintien, comme le montre la figure 9. La figure 10 présente la courbe de fluage (c'est-à-dire l'évolution de la déformation dans l'éprouvette au cours du temps) obtenue pour deux contraintes de maintien différentes, à une même température.



Figure 9 : Consigne de pilotage de l'essai de fluage

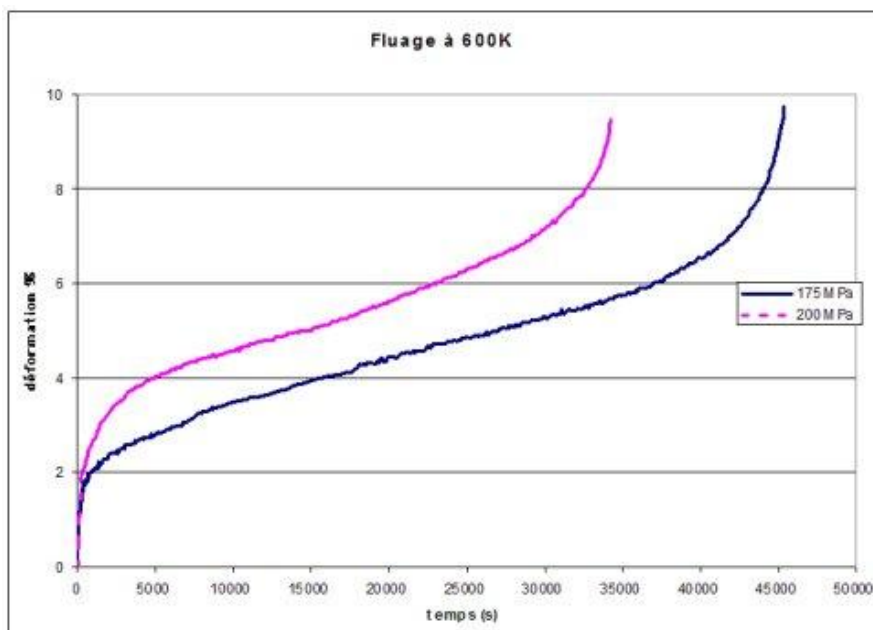


Figure 10 : Courbes de fluage à 600 °K pour deux niveaux de contraintes différents

Lorsque l'essai de fluage est réalisé à une température et sous une contrainte suffisante, on observe généralement trois étapes successives, identifiables sur les courbes de la figure 10, et correspondant chacune à des phénomènes physiques différents :

- Le fluage primaire, caractérisé par une vitesse de déformation décroissante, c'est-à-dire une « consolidation » du matériau ;
- Le fluage secondaire, caractérisé par une vitesse de déformation constante (une pente constante, sur les courbes ci-dessus) ;
- Le fluage tertiaire, caractérisé par une vitesse de déformation croissante ; la perte de rigidité du matériau et la striction de l'éprouvette amènent alors à la rupture.

Il s'agit donc d'un essai relativement complexe ; prévoir la tenue en fluage d'un matériau est généralement une problématique importante pour les applications faisant intervenir des hautes températures.

3 - Modélisation

Une fois les essais effectués, il faut choisir un modèle de comportement adapté. Ce modèle doit rendre compte, de manière globale, de tous les phénomènes observés expérimentalement dans les conditions d'utilisation du matériau, et ses valeurs numériques doivent être identifiées de sorte à correspondre le mieux possible aux essais.

Naturellement, il est inutile de modéliser les phénomènes qui ne se manifesteront pas lors du fonctionnement du produit ; ainsi, les phénomènes de striction et de perte de rigidité visibles sur les courbes de traction (figure 4) et de fluage (figure 10) ne se produisent qu'à des niveaux de déformation élevés (supérieurs à 5%), qui ne sont jamais atteints lors du fonctionnement de la chambre de combustion. En revanche, on observe des déformations réversibles, des déformations permanentes et un comportement non instantané ; pour globaliser ces phénomènes, un choix possible est un modèle de comportement élasto-viscoplastique. Dans ce qui suit, nous expliquons partiellement la construction de ce modèle, dans le cas uni-axial, en distinguant les différents phénomènes modélisés.

3.1 - Déformations réversibles : élasticité

A des niveaux de chargement suffisamment faibles, les déformations sont réversibles, et disparaissent lorsque le chargement disparaît. On modélise ceci en écrivant que la contrainte est une fonction mathématique de la déformation. Ici, l'allure rectiligne du début des courbes de la figure 4 montre que cette fonction semble linéaire. On a donc :

$$\sigma = E\varepsilon^e$$

où σ représente la contrainte, E le module d'Young et ε^e la déformation élastique. Le module d'Young correspond à la pente de la partie rectiligne d'une courbe de traction (figures 4 et 8) ; il varie généralement avec la température, mais ne dépend pas de la vitesse de chargement, comme le montre la figure 4.

3.2 - Déformations permanentes : plasticité

A des niveaux de chargement supérieurs, on observe l'apparition de déformations permanentes, qui restent en place lorsque le chargement disparaît. Pour modéliser ce phénomène, on écrit habituellement la déformation comme la somme d'une partie élastique, proportionnelle à la contrainte selon la relation ci-dessus, et d'une partie plastique :

$$\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^p$$

où ε représente la déformation totale et ε^p la déformation plastique. Cette dernière est initialement nulle, et devient non nulle une fois que la limite d'élasticité du matériau est franchie. Elle ne disparaît pas lorsque la contrainte disparaît, et ne s'exprime donc pas directement comme une fonction de la contrainte. Au lieu de cela, ses variations dépendent de l'histoire du chargement ; le modèle de comportement correspondant est appelé loi d'évolution.

Cette loi d'évolution modélise le phénomène d'écrouissage : on observe (par exemple sur les figures 4 et 8) que la limite élastique apparente, c'est-à-dire la contrainte au-delà de laquelle les déformations permanentes surviennent, évolue en même temps que ces déformations permanentes. Plus précisément, deux cas de figure sont possibles :

- Soit la contrainte est inférieure à la limite élastique apparente, auquel cas la déformation plastique n'évolue pas : on dit que le matériau est dans le domaine élastique (ce sont les parties rectilignes des figures 4 et 8),
- Soit la contrainte est égale à la limite élastique apparente, et cette dernière évolue de concert avec les déformations plastiques du matériau : c'est le domaine plastique (ce sont les parties « courbes » des figures 4 et 8). La contrainte ne peut jamais dépasser la limite élastique apparente.

Ce dernier cas correspond au phénomène d'écrouissage et est typiquement modélisé par une relation de la forme suivante :

$$|\sigma - X| - R = \sigma_y$$

où σ_y désigne la limite élastique initiale, et X et R sont respectivement nommées variable d'écrouissage cinématique et variable d'écrouissage isotrope. Ces deux quantités varient en fonction de la déformation plastique, selon des lois d'évolution qui ne sont pas détaillées ici ; on emploie classiquement des lois simples (fonctions exponentielles ou puissances), faisant intervenir un petit nombre de paramètres facilement identifiables à partir des résultats des essais.

Les variables d'écrouissage modélisent les modifications apparentes de la limite d'élasticité au fil des déformations plastiques. Lors d'un chargement monotone (figure 4), elles agissent conjointement, de manière indissociable ; pour distinguer leurs rôles respectifs, il faut examiner la réponse du matériau sous chargement cyclique (figure 8). Sur cette figure, l'écrouissage isotrope (R) correspond ainsi à une dilatation du domaine élastique et peut être relié à l'augmentation de la « hauteur » des boucles (en contrainte) au fil des cycles, tandis que l'écrouissage cinématique (X) correspond à une translation du domaine élastique et peut être relié à la forme des cycles. C'est pourquoi l'identification d'un modèle de comportement plastique nécessite toujours des résultats obtenus sous chargement monotone *et* sous chargement cyclique.

3.3 - Dépendance temporelle : viscoplasticité

Le modèle précédemment décrit correspond à une réponse dépendant de l'histoire du chargement, mais instantanée : aucun temps caractéristique n'intervient, contrairement à ce qui est observé lors des essais de fluage et de relaxation (figures 6 et 10), et l'influence de la vitesse de chargement (visible sur la figure 4) n'est pas prise en compte. En réalité, le domaine de validité des modèles élasto-plastiques est limité à des températures relativement basses ; au-delà, les effets visqueux doivent être modélisés.

Pour ce faire, un constat important est que la viscosité n'influe pas sur les déformations réversibles (élastiques), mais n'entre en jeu qu'à l'apparition des déformations permanentes (plastiques). Le modèle de comportement employé couple donc la viscosité avec la plasticité, mais pas avec l'élasticité, d'où son nom de modèle élasto-viscoplastique. Pour écrire ce modèle, on modifie la relation d'écrouissage comme suit :

$$|\sigma - X| - R - \sigma^v = \sigma_y$$

où σ^v est la contrainte visqueuse. Cette contrainte s'oppose à la déformation permanente du matériau, comme on peut le constater sur les figures 6 et 10 ; elle est fonction de la vitesse de déformation plastique et on la modélise classiquement par une loi de viscosité du type :

$$\sigma^v = K(\dot{\varepsilon}^p)^N$$

où K et N sont des paramètres, pouvant être identifiés facilement à partir des courbes de relaxation (figure 6). Au final, un modèle élasto-viscoplastique simple comporte une dizaine de coefficients, pouvant tous dépendre de la température (ou d'autres variables d'environnement). Si l'application le justifie, il est naturellement possible de choisir des modèles plus complexes.

4 - Validation

Enfin, une fois les paramètres identifiés, la dernière étape est la validation du modèle de comportement. Cette validation consiste d'une part à réaliser un essai sur une éprouvette réelle, et d'autre part à simuler le déroulement de cet essai au moyen du modèle de comportement, afin de quantifier l'écart entre les deux réponses obtenues.

Pour valider le modèle, on emploie généralement des essais mécaniques anisothermes, afin d'observer les couplages thermo-mécaniques et de vérifier si ces couplages sont bien pris en compte dans le modèle retenu, tout en s'approchant au plus près des conditions d'utilisation réelles du matériau. Si l'écart entre l'essai et la simulation est trop important, on fera évoluer le modèle de comportement afin de corriger cet écart ; la modélisation du comportement d'un matériau est donc une tâche complexe faisant l'objet de travaux de recherches, parmi lesquels ceux de l'auteur principal de cette ressource.

5 - Conclusion

La démarche de modélisation du comportement mécanique d'un matériau comprend ainsi les étapes suivantes :

- Caractériser les conditions d'utilisation du matériau, à partir de l'application considérée ;
- Faire des essais, pour identifier et quantifier les phénomènes physiques se produisant dans les conditions d'utilisation du matériau ;
- Construire un modèle de comportement permettant de globaliser les phénomènes observés expérimentalement, et identifier au mieux ses valeurs numériques ;
- Valider ce modèle à l'aide d'autres essais.