

1. Introduction:

La réponse d'une structure à une sollicitation dépend de multiples variables de l'environnement. L'identification des paramètres associés permet de décrire le comportement en tenant compte de l'interaction avec l'environnement. La modélisation de ce comportement fait appel à des outils spécifiques de description en s'appuyant essentiellement sur 3 méthodes.

2. Les méthodes :

- La méthode expérimentale : Les résultats permettant l'identification sont déduits à partir d'essais expérimentaux. L'identification requiert l'exploitation de données expérimentales.

- La méthode théorique : Les paramètres caractérisant le comportement sont déduits à partir de formulations mathématiques par une résolution d'une suite d'équations.

- La méthode numérique : Le modèle est représenté par des images virtuelles, faisant appel à l'outil informatique par l'exécution d'un programme informatique. Cette méthode est devenue un complément incontournable des méthodes analytiques et expérimentales dans l'analyse du comportement des structures.

3. Les outils :

La résolution des problèmes suivant les trois méthodes nécessite chacune une méthodologie spécifique : la méthode expérimentale utilise des manipulations expérimentales grâce à des moyens matériels. La méthode théorique, fait appel à des calculs mathématiques, utilisant des résolutions analytiques. La méthode numérique, fait appel à des ordinateurs, pour l'élaboration de logiciels et des codes de calcul donnant des représentations virtuelles.

Cependant, malgré les avancées réalisées au niveau expérimental, théorique et numérique, les chercheurs pensent qu'il reste du chemin à parcourir avant d'arriver à une maîtrise parfaite de la prédiction de certains phénomènes physiques. Des modèles de comportement intégrant divers phénomènes physiques ont été développés. Avec l'avènement des puissants calculateurs, parallèlement au développement de la méthode des éléments finis, des simulations pour des formes complexes ont été rendues possibles.

3.1. La méthode expérimentale ou la modélisation empirique :

Des essais expérimentaux ou des manipulations sont nécessaires dont l'objectif est d'identifier les phénomènes physiques influents sur la réponse du matériau et quantifier leurs effets de manière découplée. Les essais mécaniques par exemple permettent de caractériser l'effet d'un chargement mécanique pour des conditions données (la réponse du matériau varie en fonction de la vitesse, de la température, de la géométrie et d'autres paramètres). Le principe est de travailler sur un échantillon de matière, lui appliquer un chargement mécanique et mesurer sa réponse. Il est possible d'appliquer une force, auquel cas on mesurera la réponse en terme de déplacement, ou d'appliquer un déplacement et de mesurer la force résultant de la résistance du matériau à se déformer.

Pour ce faire il faut donc :

- une éprouvette (dont la géométrie est à définir)
- un dispositif de sollicitation mécanique (dispositif expérimental classique)

Le plus simple est d'appliquer un chargement dans une seule direction et de regarder la réponse suivant cette même direction (ce n'est pas parce que le chargement est unidirectionnel que la réponse l'est, comme l'illustre l'effet Poisson par exemple). Ces essais peuvent servir plutôt dans la phase de validation (validation du modèle de comportement du matériau).

L'essai de référence permettant de dissocier les comportements élastique et plastique est l'**essai de traction**. Au cours de cet essai, on peut en effet observer l'établissement successif de ces deux modes de déformation; dans une première phase, la relation contrainte / déformation est linéaire et réversible. Puis, lorsqu'une valeur critique de la contrainte est atteinte (limite d'élasticité), cette relation évolue de façon fortement non linéaire, traduisant l'apparition de la plasticité. En se basant sur les résultats de l'essai de traction de base (Fig. 1), on dissocie trois modes de déformation prépondérants.

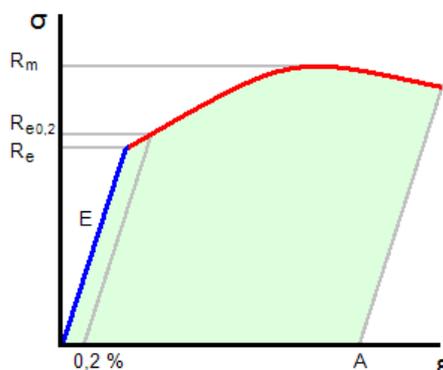


Figure 1: Exemple de Courbe de traction

Le **premier mode** correspond à un phénomène de **déformation réversible**. Pour ce mode de déformation, si l'on arrête la sollicitation, la déformation reprend sa valeur initiale. Le phénomène est appelé **élasticité**. Pour la plupart des métaux, le

phénomène d'élasticité est qualifié de « linéaire », c'est-à-dire que la relation observée expérimentalement entre contrainte et déformation élastique est linéaire

Le **second mode** correspond à un mode de **déformation irréversible**, appelé **plasticité**. Pour ce mode de déformation, si l'on arrête la sollicitation, la déformation ne reprend pas sa valeur initiale. Le matériau se trouve alors dans un état dit « écroui ». Ces deux modes de déformation sont supposés indépendants du temps, c'est-à-dire que la cinétique de chargement n'influe pas sur leur évolution. L'élasticité et/ou la plasticité permettent en général de modéliser le comportement des métaux à température ambiante.

Néanmoins, à plus haute température, on constate que la cinétique de chargement influence fortement la réponse du matériau. De façon générale, pour un chargement à déformation imposée, plus la vitesse de chargement augmente, plus la contrainte résultante est importante. 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). Par ailleurs, si l'on stoppe brusquement la sollicitation, on observe une relaxation progressive de la contrainte (essai de relaxation).

Une telle phénoménologie peut être retranscrite par un **modèle dit de « viscosité »**, qui **traduit les interactions entre le temps et les modes de déformation élastique et / ou plastique**. Il s'agit **d'un troisième mode** de déformation qui est intrinsèquement couplé aux deux premiers. **Pour les métaux**, on observe en général une **influence du temps sur la plasticité mais pas sur l'élasticité**. **Le comportement est donc qualifié d'« élasto-viscoplastique »** (par opposition aux comportements « viscoélastiques » plus souvent observés sur des matériaux types polymères, pour lesquels le temps intervient sur le comportement élastique).

3.2. La méthode mathématique ou la modélisation analytique :

La théorie utilisée impose d'utiliser un modèle de comportement établissant une relation contrainte/déformation pour le matériau considéré. Le modèle doit rendre compte, de manière globale, de tous les phénomènes observés expérimentalement dans les conditions d'utilisation d'un matériau, et ses valeurs numériques doivent être identifiées de sorte à correspondre le mieux possible aux essais.

Dans le cas de l'essai de traction, l'objectif est donc de s'approprier une démarche de modélisation du comportement du matériau, en identifiant les types de modèles de comportement qui s'y rattachent (élasticité, plasticité) et identifier quantitativement les valeurs inconnues des paramètres du modèle de comportement choisi, et valider ensuite le modèle.

La relation recherchée entre la contrainte et la déformation pour toute la gamme de sollicitations du matériau envisagée (température, vitesse, cycle de sollicitation, etc...) est construite en intégrant des lois d'évolution des différentes variables du modèle. Ces lois d'évolution permettent de modéliser les effets de phénomènes physiques au sein du matériau.

Dans un calcul de structure, il est nécessaire que le modèle de comportement permette de modéliser les effets des différents phénomènes physiques sur l'état du matériau qui le compose. Lorsque les modèles simples de comportement ne sont pas valables et ne décrivent pas correctement le comportement observé, des modèles de comportement phénoménologiques plus élaborés et plus représentatifs de la réalité physique sont alors construits.

3.3. La méthode numérique ou la Simulation :

La méthode numérique se base sur l'outil informatique. Grâce à la méthode des éléments finis, le comportement de la structure est étudié en déduisant des résultats au sein de chaque région, de chaque élément.

La simulation numérique, permet actuellement de visualiser virtuellement le comportement d'un métal dans l'outil et entreprendre des analyses quasi quantitatives sur des modèles représentatifs de pièces réelles. Le développement de ces méthodes a favorisé l'utilisation de logiciels industriels permettant la simulation des essais, pouvant se substituer entièrement ou en partie à l'expérimentation coûteuse. Ces méthodes nous épargnent la mise au point de prototypes, et nous permettent une prise de décision facile, d'où un gain de temps et de coût. Comme la plus part des résultats sont déterminés à partir d'essais pour lesquels les conditions ne sont pas représentatives des conditions dans lesquelles sont réalisées les pièces complexes, l'introduction des méthodes numériques permet la prise en compte de tous les paramètres entrant en jeu dans l'identification d'un phénomène, en permettant la variation des paramètres opérationnels et les critères pouvant influencer le comportement. Ce qui conduit à des résultats plus variés que les démarches précédentes.

L'implantation numérique des modèles de comportement est une étape cruciale dans la qualité de prédiction de divers phénomènes en calcul de structures. En effet, la richesse physique de ces modèles peut être compromise par les erreurs liées à l'approximation numérique de la solution exacte du problème, qui n'est généralement pas connue. L'étude des performances des schémas d'intégration est nécessaire, afin de s'assurer de la précision de la solution recherchée.

Le résultat de la résolution est l'état local du matériau, c'est à dire l'état des contraintes, des déformations et des variables internes correspondantes. Pour chaque modèle de comportement est associé un algorithme d'intégration. Ces schémas seront appliqués successivement au modèle élasto-plastique et ensuite au modèle couplé à l'endommagement.

Les progrès des méthodes numériques et l'augmentation des performances des ordinateurs permettent grâce à des simulations, de prédire le comportement des systèmes complexes. L'industrie utilise de plus en plus la simulation numérique, validée par des expériences, pour raccourcir le cycle de développement de ses nouveaux produits.

Conclusion :

Les approches "réelle" "analytique" et "virtuelle" sont bien évidemment complémentaires et les prédictions obtenues grâce aux expériences, aux équations et aux algorithmes, doivent être validées. Sauf cas très exceptionnel, le modèle mathématique ne peut être utilisé tel quel; il est impératif de lui appliquer des méthodes dites numériques (*méthodes numériques*) afin que des résultats concrets puissent être obtenus.