

Table des matières

1	Introduction	3
1.1	Généralités sur les propriétés des matériaux	3
1.2	Domaines d'utilisation des modèles	4
1.3	Les grandes classes de matériaux	5
1.4	Les essais mécaniques	6
1.4.1	Différents types d'essais	6
1.4.2	Moyens de mesure, ordres de grandeur	8
1.5	Mise en œuvre	9

Chapitre 1

Introduction

1.1 Généralités sur les propriétés des matériaux

Il est de coutume de dire que chaque secteur industriel a les performances de ses matériaux. Cela est particulièrement marquant dans le cas de l'informatique, pour laquelle les progrès sont directement liés à la densité des circuits, c'est encore le cas dans l'aéronautique, où les performances des réacteurs dépendent de la température maximale que supportent les matériaux dans les zones les plus chaudes. Les exemples de ce type peuvent être aisément multipliés, il suffit de penser aux chemins de fer (développement des aciers à rail à la fin du 19^{ème} siècle), à la construction civile (mise au point des bétons de fumée de silice), à la navette spatiale (composites, tuiles en carbone-carbone). Mais en fait, il serait plus précis de dire que les performances obtenues dépendent aussi des *connaissances* sur le matériau utilisé. Ainsi, dans le plan d'exploitation d'une mine souterraine en chambres et piliers, où il n'est bien entendu pas envisageable de choisir son matériau, il est possible de diminuer la taille des piliers si les propriétés de la roche sont bien connues.

Le fait de concevoir ainsi *au plus juste* les structures, est la marque d'une démarche qui, outre son élégance, présente deux aspects importants :

- il y a une amélioration de la sécurité, dans la mesure où il est préférable d'avoir une bonne connaissance des phénomènes physiques plutôt que d'appliquer un large coefficient de sécurité, qui s'apparente souvent à un *coefficient d'ignorance* ; par ailleurs, dans certains cas, l'utilisation de plus grandes quantités de matière peut devenir préjudiciable (ainsi, augmenter l'épaisseur d'une enceinte sous pression peut certes diminuer les contraintes, mais aussi être néfaste s'il y a des gradients thermiques dans la paroi).
- le résultat est une meilleure performance sur le plan écologique, ainsi le gain de quelques dixièmes de grammes sur chaque boîte-boisson conduit à des économies de matière première importantes, si l'on songe aux quelques milliards qui sont fabriquées chaque année ; de même, la diminution de poids permet de réduire la consommation des automobiles ou des avions.

Il faut distinguer plusieurs types de propriétés des matériaux. Dans le cas du développement des ordinateurs, ce sont essentiellement les propriétés physiques qui sont en cause, encore que les échauffements résultant de la concentration des circuits amènent maintenant à se préoccuper également de la tenue mécanique. Dans le cas du développement des moteurs d'avions, ce sont les propriétés mécaniques et les propriétés chimiques (résistance à l'environnement) qui sont déterminantes.

Les principales propriétés des matériaux se regroupent donc en :

- *Propriétés mécaniques* : (i) modules d'élasticité, (ii) limite d'élasticité, écrouissage, ductilité, (iii) viscosité, vitesse de fluage, amortissement (iv) charge à la rupture, résistance à la fatigue, à l'usure, ...
- *Propriétés physiques* : (i) conductibilité électrique, aimantation, (ii) conductibilité thermique, chaleur spécifique, (iii) température et chaleur latente de transformation, (iv) énergie de surface, de liaison, (v) transparence, ...

- *Propriétés chimiques* : (i) résistance à la corrosion, à l'oxydation, (ii) stabilité, diagrammes d'équilibre, ...

En général, le choix d'un matériau pour une application donnée est la conséquence de propriétés adaptées dans un ou plusieurs des domaines indiqués (par exemple l'aluminium est parfois utilisé dans les culasses automobiles malgré sa faible température de fusion, en raison de son faible poids et de sa bonne conductibilité thermique). Il est aussi orienté par d'autres considérations, ce sont les *performances* du matériau, au rang desquelles vont se classer des éléments technologiques et économiques, en même temps que des caractéristiques moins facilement mesurables comme l'aspect (fondamental dans le bâtiment pour les éléments de façade, pour les carrosseries automobiles, ...) :

- disponibilité, reproductibilité, fiabilité,
- usinabilité, aptitude à la mise en forme, soudabilité,
- absence de nocivité, possibilité de recyclage,
- coût,
- aspect,
- bonne caractérisation.

1.2 Domaines d'utilisation des modèles

La bonne connaissance des matériaux et leur bonne utilisation font donc intervenir trois domaines d'activité.

1. Le développement du matériau lui-même (ce secteur étant absent dans le cas des géomatériaux). Là se jouent l'évolution du matériau, la découverte de nouvelles microstructures, qui concourent à l'amélioration des performances intrinsèques.
2. La caractérisation des propriétés d'emploi. Ce point a pour but d'apporter une meilleure connaissance d'un matériau existant, (mécanismes physiques qui provoquent ou accompagnent la déformation, effets mécaniques macroscopiques), donc de réduire les incertitudes et d'augmenter la fiabilité des modèles utilisés.
3. Le travail sur les modèles numériques permet d'améliorer la représentation des pièces, structures ou domaines calculés (par amélioration des algorithmes, qui autorisent le traitement de modèles numériques plus importants, par exemple 3D au lieu de 2D).

Le cours de *Mécanique des Matériaux Solides* est consacré essentiellement à l'étude des propriétés mécaniques des matériaux (point (2)). Le point (1) est le domaine des métallurgistes et des chimistes. Le point (3) celui de la mécanique des structures. La figure 1.1 schématise les types d'opérations pour lesquelles il est fait appel aux propriétés des matériaux.

La phase de *conception* (fig.1.1a) met en œuvre une approche synthétique du problème, qui est en fait résolu par *méthode inverse*, soit : «quelle forme donner à la pièce, en quel matériau la construire pour qu'elle réponde au cahier des charges». Dans la mesure où les éléments extérieurs sont nombreux, et parfois non scientifiques, il n'y a en général pas d'autre solution que de choisir des descriptions simples des matériaux, et d'appliquer des *codes*, ou règles simplifiées. Dans la plupart des cas, cette approche est suffisante.

Il peut subsister parfois des cas litigieux (pièces de haute sécurité, ...) qui nécessitent la mise en place d'une procédure de *justification* (fig.1.1b). Au contraire de la précédente, la démarche est analytique, puisque la géométrie, les charges, le matériau, etc... sont figés, et qu'il s'agit simplement, par un calcul direct, de caractériser la bonne tenue. Cette procédure peut être employée à la construction, ou encore longtemps après la mise en route d'une installation, afin d'obtenir une *requalification* qui prolonge la durée de vie : on cherche ainsi actuellement à justifier une prolongation de la durée de vie garantie des centrales nucléaires. Ayant été conçues à l'aide de méthodes de dimensionnement simplifiées, elles peuvent sans doute voir la prévision de leur espérance de vie prolongée à l'aide de méthodes plus précises.

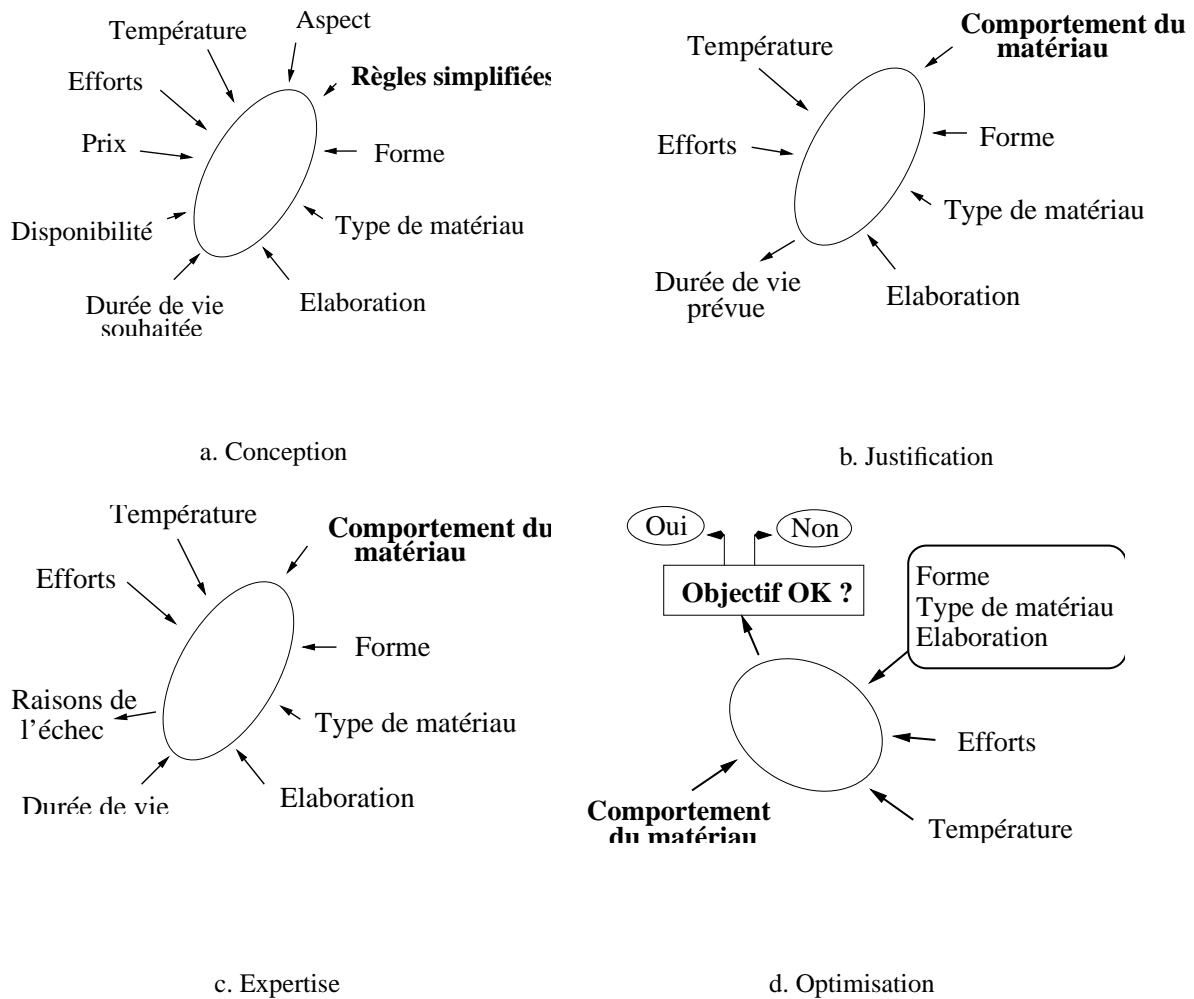


FIG. 1.1 – Opérations industrielles où intervient le comportement des matériaux

Il faut encore avoir recours à des modèles plus précis dans le cas de l'*expertise* (fig.1.1c) puisqu'une telle opération intervient après qu'un problème, grave ou non, soit apparu. Le point important ici est d'être capable de mettre en regard les modèles utilisés et les phénomènes physiques qui se sont produits.

L'*optimisation* (fig.1.1d) va tendre à se généraliser, grâce à l'arrivée de calculateurs suffisamment puissants pour qu'il soit envisageable d'effectuer plusieurs dizaines de fois le calcul de la structure à étudier.

1.3 Les grandes classes de matériaux

Ce cours va s'efforcer de faire référence à une grande variété de matériaux solides. Les modèles qui seront considérés s'appliquent aux métaux, aux céramiques, aux polymères, aux composites, au bois, au béton, aux sols (sables et roches), aux biomatériaux (os, tissus).

Il y a deux grandes voies permettant d'avoir accès aux propriétés mécaniques de ces matériaux :

1. Une *approche déductive*, qui cherche à prendre en compte la microstructure du matériau en vue de déterminer ses propriétés macroscopiques. Ainsi un métal sera considéré comme un *polycristal*, agrégat de grains d'orientations cristallographiques différentes, et au comportement individuel parfaitement caractérisé, un composite se verra représenté par sa matrice et ses fibres, un béton par la matrice et les granulats... Cette approche choisit donc de modéliser l'hétérogénéité des matériaux, en vue de mieux prévoir le comportement moyen global (par exemple si les proportions

des constituants changent). Elle est donc relativement riche, de par son principe même, mais elle est également lourde à mettre en œuvre, si bien que son utilisation est encore limitée à la prévision du comportement des matériaux, dans l'optique de mieux comprendre leur «fonctionnement» et d'améliorer leurs propriétés mécaniques.

2. Une *approche inductive*, de nature phénoménologique, qui, à l'inverse, cherchera simplement à caractériser le comportement d'un élément de volume représentatif (EVR). Faisant alors abstraction de la structure fine du matériau, cette méthode de travail consiste à déterminer les relations de cause à effet qui existent entre les variables constituant les entrées et les sorties du processus étudié. Elle trouve une justification dans le fait que des phénomènes de l'échelle microscopique très divers peuvent conduire, après des effets de moyenne, à des réponses globales de même nature. Par contre, leur emploi aveugle peut être dangereux s'il s'agit d'appliquer le modèle hors de son domaine de détermination initial. Il reste que cette méthode est, dans bien des cas, la seule applicable dans un cadre industriel. Le choix de l'élément de volume représentatif est bien entendu fondamental : celui-ci doit être suffisamment grand par rapport aux hétérogénéités du matériau, et rester petit par rapport aux gradients de contraintes et de déformations dans la structure. Il faut par exemple une trentaine de grains dans la partie utile d'une éprouvette de traction, qui sert à déterminer les propriétés d'un métal. Le tableau 1.1 donne des exemples de tailles raisonnables pour quelques matériaux courants.

1.4 Les essais mécaniques

Il y a une grande variété de comportements présentant des non-linéarités liées à la déformation ou au temps. Il est donc indispensable de les caractériser expérimentalement. Les essais mécaniques sur de petits spécimens, ou *éprouvettes* sont donc à la base de toutes les études. Ils vont donc être brièvement caractérisés ici. L'observation des caractéristiques expérimentales va permettre d'identifier les types de comportement fondamentaux qu'il importera de simuler.

Il existe de nombreux essais qui permettent de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux. Certains sont normalisés (AFNOR, Association Française de Normalisation ; ISO, International Standardisation Organisation ; ASTM, American Society for Testing and Materials) ; il s'agit d'essais simples à réaliser, reproductibles, servant à donner des informations sur les seuils de charge qui produisent des déformations irréversibles, ou encore la rupture. Ils sont utilisés par les ingénieurs en contrôle et caractérisation. En revanche, et pour caractériser plus finement les matériaux, les chercheurs ont recours à des moyens d'essais plus complexes, mettant en œuvre des chargements multiaxiaux ou anisothermes. La présentation qui est donnée ici est très succincte. Des essais spécifiques d'un matériau ou d'un domaine industriel seront détaillés au cours des différentes séances.

1.4.1 Différents types d'essais

Essai d'écroutissage : Un essai de traction ($\sigma > 0$) ou de compression ($\sigma < 0$) réalisé à vitesse de déformation constante sur un matériau réel donne des résultats en termes d'efforts et de déplacement, que l'on cherche ensuite à convertir en une courbe contrainte-déformation (σ en fonction de ϵ). Dans le cas des métaux et des matériaux composites par exemple, les *éprouvettes* sont des cylindres munis en général de têtes d'amarrage filetées ou des plaques de section rectangulaire. Pour les roches (et pour les métaux en grandes déformations), les expériences sont réalisées sur des cylindres, qui sont comprimés entre les plateaux d'une presse. Pour le cas de la *compression simple*, il faut porter une grande attention aux conditions aux limites, en autorisant le meilleur glissement possible sur les appuis, faute de quoi se développent dans l'éprouvette des champs de contrainte et de déformation complexes (mise en tonneau de l'échantillon).

Les courbes obtenues à l'aide de cet essai ont typiquement l'allure indiquée en figure 1.2 lorsque le comportement du matériau observé est indépendant de la vitesse (comportement de plasticité

indépendante du temps). Le comportement fait apparaître une partie linéaire (élasticité) suivie d'une partie non linéaire, au cours de laquelle la pente diminue dans le diagramme déformation–contrainte, au point de devenir éventuellement négative.

- R_e désigne la limite d'élasticité "vraie", ou limite de proportionnalité,
- $R_{0,2}$ désigne la limite d'élasticité conventionnelle, qui correspond à une déformation inélastique de 0,2%,
- R_m désigne la résistance à la traction,
- A_h désigne l'allongement correspondant à la contrainte maximale,
- A_r désigne l'allongement à la rupture.

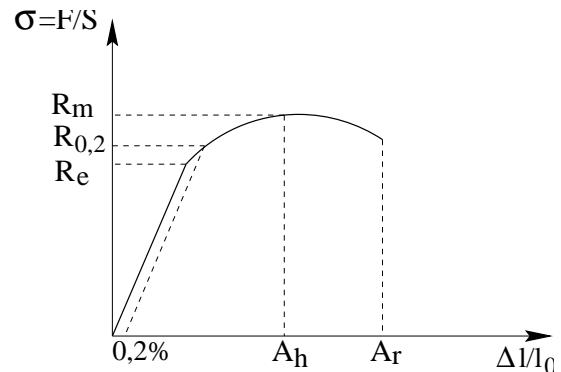


FIG. 1.2 – Schéma d'un essai de traction simple

Quoique d'apparence simple, il s'agit en fait d'un essai dont l'interprétation peut devenir délicate, puisque la diminution de pente observée peut recouvrir des phénomènes physiques très différents, et surtout que le passage à des pentes négatives est en général lié au fait que le champ de déformation n'est plus uniforme. En traction sur un métal, ceci correspond à des phénomènes qui peuvent être d'origine métallurgique (bandes de Lüders) ou géométrique, lorsque les déformations sont trop importantes *striction* au centre de l'éprouvette. Une approche élémentaire due à *Considère* indique que l'apparition de la striction se produit lorsque l'égalité $d\sigma/d\varepsilon = \sigma$ est vérifiée. Dans le cas des roches, l'adoucissement est en général lié à des phénomènes d'endommagement, qui introduisent des désordres dans le matériau étudié.

La figure 1.3 quant à elle montre l'allure des courbes obtenues lorsque le matériau testé est sensible à la vitesse. Les courbes expérimentales en pointillés sont situées entre deux courbes théoriques *limites* correspondant, l'une à une vitesse de déformation *infinie* (comprendre : grande), et l'autre à une vitesse *nulle* (comprendre : faible). Cette dernière courbe est importante, puisqu'elle représente la réponse du matériau durant les transformations quasi-statiques et décrit son comportement à long terme. Il s'agit de l'ensemble des points $(\sigma-\varepsilon)$ représentant les états par lesquels passe le matériau pendant que la déformation augmente à vitesse quasiment nulle (succession d'états d'équilibre limite).

Essai de fluage : Lorsqu'une éprouvette est soumise à une traction simple (essai monodimensionnel sous une contrainte σ et une déformation ε), si, à partir d'un certain état, la contrainte est maintenue constante, la déformation restera constante (absence de déformations différées dans le temps) s'il n'y a aucune viscosité. En fait, dans le cas d'un matériau réel (conçu par l'homme ou existant déjà dans la nature), des déformations différées (phénomène de viscosité) seront alors observées de façon à peu près systématique, à tel point qu'il faut admettre que tous les matériaux réels présentent ce phénomène de viscosité, pourvu qu'une période de temps suffisamment grande soit considérée. Ainsi, si une éprouvette cylindrique d'une roche saline (NaCl : sel gemme, KCl : potasse) d'une dizaine de centimètres est soumise à une pression axiale d'une dizaine de MPa, pression maintenue constante, et que sa hauteur est mesurée au bout d'une journée, puis une journée plus tard avec une précision absolue de 1mm, alors, à température ambiante, aucune variation de longueur ne sera détectée. Il ne faut pas en déduire que les roches salines à température ambiante ne présentent pas de viscosité, car, en augmentant la précision de la mesure ou en attendant plus longtemps (un mois de fluage par exemple), il est possible d'observer des déformations

différées.

Essai de relaxation : Une autre manière de caractériser la viscosité d'un matériau est de le soumettre à un essai de relaxation, dans lequel la déformation de l'éprouvette est maintenue constante après une prédéformation initiale. Plus le comportement du matériau présente une composante visqueuse importante, et plus la contrainte chute rapidement, pour atteindre éventuellement une valeur nulle. Cet essai est essentiellement réalisé sur les métaux et les polymères.

Essai triaxial : Comme indiqué précédemment, certains matériaux ne peuvent pas être testés simplement en traction, en raison de leur très faible résistance, ou de leur forte sensibilité aux décentrages des lignes d'amarrage (béton, céramique). Ils sont alors testés en compression, ou en flexion. La compression uniaxiale sur des cylindres a déjà été décrite, mais il est parfois nécessaire d'avoir recours à un mode de sollicitation où les bords latéraux sont contenus (*essai triaxial*) : l'échantillon est soumis latéralement à une pression hydrostatique qui assure son maintien, ce qui permet par exemple de tester des matériaux pulvérulents (argiles, sables).

Essai de flexion : Il est réalisé sur des barrettes, avec 3 (fig.1.4a) ou 4 (fig.1.4b) points d'appuis, ce dernier cas permettant de bénéficier d'une zone centrale dans laquelle le moment est uniforme. Il est essentiellement utilisé avec des matériaux fragiles, dont le comportement sera élastique. La plastification, associée au fait que le comportement en traction et en compression peut être différent, conduit à des redistributions de contraintes complexes dans l'éprouvette, si bien que le dépouillement de l'essai lui-même peut nécessiter un calcul de structure.

Dans un même ordre d'idée, il existe également des essais de flexion rotative, dans lesquels une éprouvette en rotation, encastrée à une extrémité, subit un effort perpendiculaire à son axe, si bien que les points de la surface extérieure voient leur état de contrainte passer alternativement de la traction à la compression. Ces essais sont utilisés pour déterminer la "limite de fatigue", sollicitation en dessous de laquelle le matériau résistera à un chargement répété.

Essai de torsion : Réalisé sur éprouvette pleine, cet essai est essentiellement utilisé à haute température pour connaître l'aptitude à la mise en forme des métaux. L'avantage de ce type d'essai est d'éviter la striction. Par contre, il est d'interprétation difficile, dans la mesure où l'état de contrainte et déformation n'est pas uniforme. Il est possible de remédier à ce dernier inconvénient, en adoptant comme éprouvettes des tubes minces, qui peuvent être instrumentés localement, à l'aide de jauges ou d'extensomètres.

Essai de dureté : Largement employé comme moyen de contrôle, il mesure la résistance à la pénétration d'indenteurs de diverses formes, par exemple une bille d'acier de gros diamètre (10 mm) dans le cas de l'essai Brinel, ou une pyramide diamant à base carrée, l'angle entre les faces opposées étant de 136° pour l'essai Vickers. Une relation empirique indique que, dans les aciers doux, la dureté Vickers (force/dimension de l'empreinte) est de l'ordre de 3 fois la résistance à la traction.

Essai Charpy : Il permet de caractériser sur un barreau entaillé le passage d'un mode de rupture ductile, accompagné de déformation inélastique, donc à forte énergie, à un mode de rupture fragile, présent à plus basse température, qui ne met en jeu que des énergies faibles. Cette étude se fait en rompant l'éprouvette sous impact à l'aide d'un mouton-pendule, et en mesurant l'énergie absorbée lors de l'impact : le résultat s'exprime en joules par centimètre carré de section résiduelle, et est dénommé résilience.

Essais complexes : Outre les essais de traction-torsion sur tube, il existe d'autres moyens de générer des états de contraintes multiaxiales contrôlés dans des éprouvettes. C'est le cas d'essais de traction-compression interne sur tube, ou encore d'essais sur des éprouvettes cruciformes.

1.4.2 Moyens de mesure, ordres de grandeur

La bonne connaissance de la précision des mesures effectuées est fondamentale pour pouvoir considérer d'un œil critique les résultats obtenus dans un essai mécanique.

- Les forces ou les contraintes sont généralement mesurées avec des dynamomètres, dont la précision relative est de l'ordre de 10^{-3} .
- Les déplacements fournissent une information moyenne sur ce qui se passe dans une zone de l'éprouvette. Les capteurs doivent donc être fixés si possible dans une zone où les déformations sont homogènes, faute de quoi des hypothèses, ou un calcul de structure seront nécessaires pour analyser les résultats de l'essai. Les capteurs classiques, inductifs ou à jauges de déformation, assurent une précision absolue de l'ordre de $1\mu\text{m}$. Des développements spécifiques, ou l'utilisation d'extensomètres optiques peuvent permettre d'abaisser cette limite à $0,2\mu\text{m}$. Dans tous les cas, il est préférable d'effectuer une mesure locale de la déformation, ce qui permet de faire abstraction des phénomènes complexes prenant naissance hors de la partie *utile*, de section constante.
- L'information locale sur la déformation donnée par une jauge de déformation (fil résistant collé sur une éprouvette, qui se déforme avec elle, si bien que la résistance électrique change) est en général plus précise que la précédente, puisqu'il est possible de mesurer des déformations de l'ordre de 10^{-7} . Néanmoins les jauges ne fonctionnent pas à haute température, et sont susceptibles de se décoller en cours d'essai.
- La température est une des grandeurs les plus difficiles à maîtriser. Les thermocouples (utilisant l'effet Peltier) fournissent en général une précision théorique inférieure au degré. Par contre, il peut être très délicat de venir positionner un thermocouple sur l'éprouvette, sans générer de résistance thermique de contact, et sans que la mesure soit perturbée par le milieu environnant.
- La méthode électrique s'avère être un complément utile des méthodes citées ci-dessus, lorsqu'il s'agit de mettre en évidence l'endommagement ou la rupture d'une éprouvette conductrice. Elle consiste à faire circuler un courant continu de forte intensité dans l'éprouvette, et à mesurer la variation de potentiel sur deux prises de potentiels situées au voisinage de la partie utile. Les étalonnages peuvent s'effectuer sur des configurations de référence (fissures calibrées), ou par le calcul. Il est possible d'accéder à des variations de potentiel de l'ordre de 1mV , ce qui correspond en général à des fissures de l'ordre de quelques dixièmes de millimètres.

1.5 Mise en œuvre

La manière dont sont stockées et utilisées les connaissances en matériau et en mécanique a considérablement évolué au cours des vingt dernières années. Le recours à l'informatique est général, avec le développement de bases de données, de sites internet proposant leurs services, et les codes de calcul de structures notamment. Cette floraison ne dispense pas de développer une compréhension profonde des modèles utilisés en simulation. Sans les capacités de juger de la bonne tenue de ses résultats, un ingénieur ou un chercheur peut en effet se laisser porter par l'apparente facilité d'utilisation qu'apportent des interfaces-utilisateurs de plus en plus conviviales, et fournir des résultats, en couleur, tout à fait aberrants. Cette conséquence est d'autant plus probable que le modèle est complexe, et le comportement non linéaire est une source inépuisable de résultats erronés.

Pour tâcher d'éviter cet écueil, il faut en passer par un apprentissage manuel des ordres de grandeurs et des méthodologies de calcul. On sera ainsi mieux armé pour aborder l'indispensable outil numérique.

Matériau	Type d'hétérogénéité	Taille de l'EVR
Métaux	cristal, 10-100mm	1mm
Polymères	molécules, 10-50mm	1mm
Céramiques	grains, 1-10mm	0,1mm
Bois	fibres, 0,1-1mm	10 mm
Béton	granulats, 1cm	10 cm
Argiles	grains, 1-10mm	1mm

TAB. 1.1 – Exemples de volumes élémentaires représentatifs (la taille de l'EVR désigne la dimension du côté du cube élémentaire considéré).

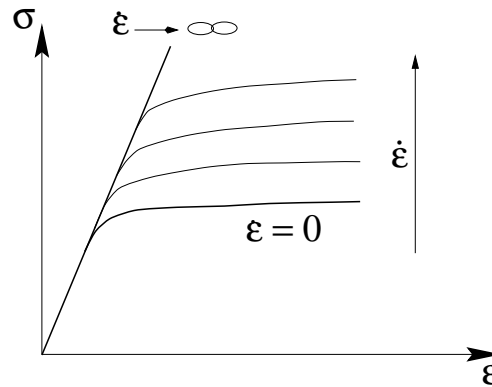


FIG. 1.3 – Réponse d'un matériau viscoplastique en traction simple

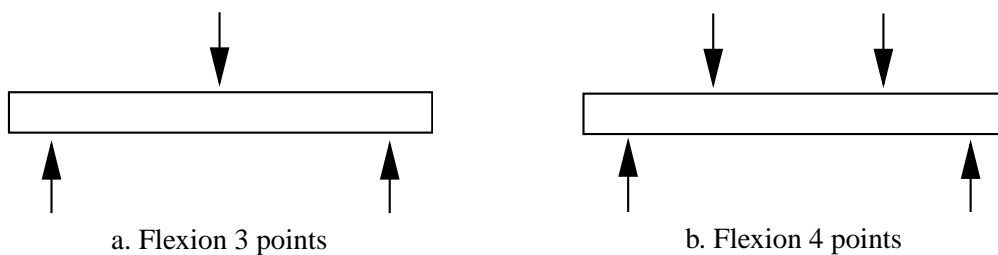


FIG. 1.4 – Schémas d'essais de flexion.