
Dilatation thermique

Professeur : Sylvie Pommier

Page : <https://www.universite-paris-saclay.fr/fr/sylvie-pommier>

Adresse 61, avenue du Président Wilson 94235 Cachan

Laboratoire LMT

e-mail: sylvie.pommier@ens-paris-saclay.fr

1.1 Descriptif de l'UE

Volume horaire :82h

1.1.1 Objectifs de l'Unité d'Enseignement

Cette unité d'enseignement a pour objectif de donner les éléments de base permettant d'effectuer un choix de matériau pour une application mécanique donnée. Les matériaux seront classés en grandes familles et les principaux types de comportement et de rupture des matériaux seront présentés par famille. A l'issue de ce cours vous saurez lire et utiliser les données d'une feuille de propriétés d'un matériau et utiliser des indices de performances pour effectuer un choix de matériau.

1.1.2 Contenu de l'Unité d'Enseignement

◇ Cours 1

Comportement thermo-élastique (ρ , E , ν , α). Les grandes familles de matériaux. Essais et observations, origine physique, modélisation unidimensionnelle, indices de performance. Exemples de relation microstructure/propriétés. Cas des polymères : élastomères, thermoplastique et résines, comment le module d'Young et le coefficient de dilatation thermique évoluent selon le degré de réticulation et la température.

◇ ED 1 : *Choix de matériau pour la réalisation d'une aile d'avion.*

◇ Cours 2

Le comportement élasto-plastique ($R_{p0.2\%}$, R_m , $A_{\%p}$, H_v , H_B). Essais (traction, dureté) et observations, modélisation unidimensionnelle du comportement. Cas des métaux. Exemples de relation microstructure/propriétés : comment la limite d'élasticité et/ou la dureté évolue pour un matériau biphasé selon la fraction volumique de phase « dure ».

◇ *ED 2 : Le modèle unidimensionnel d'Asaro pour la contrainte d'écoulement et l'écroutissage cinématique d'un matériau bi-phasé.*

◇ *Cours 3 : suite du cours 2*

Le comportement élasto-plastique ($R_{p0.2\%}$, R_m , $A_{\%p}$, H_v , H_B). Cas des métaux. Origine physique de la plasticité (n.b. pas de dislocations, seulement les systèmes de glissement). Critères de plasticité, du mono-cristal, de Tresca, de Von Mises.

◇ *ED 3 : Exploitation d'un essai de traction simple, détermination du module d'Young, de la limite d'élasticité, de la contrainte maximum et de l'allongement à rupture. Application : détermination du seuil de plastification d'une pièce soumise à un chargement non-uniaxial.*

◇ *Cours 4 et Cours 5*

La rupture brutale et la transition ductile/fragile (K_{IC} , K_{CV} , σ_0 , m). Essais, observations et mécanismes de rupture pour :

- Des éprouvettes sans défauts pré-existants (paramètres de Weibull σ_0 , m)
- Des éprouvettes avec défauts pré-existants (K_{IC} , K_{CV})

Comment appliquer ces concepts pour le dimensionnement à la rupture d'une pièce.

◇ *ED 4 : Rupture du verre. Analyse de résultats de rupture d'éprouvette, détermination des paramètres de Weibull. Application pour le dimensionnement d'un réservoir sphérique sous pression interne ou externe, (casque de scaphandre).*

◇ *Cours 6*

La rupture par fatigue (limite d'endurance σ_f , loi de Paris C, m). Essais, observations et mécanismes de rupture pour :

- Des éprouvettes sans défauts pré-existants (limite d'endurance σ_f)
- Des éprouvettes avec défauts pré-existants (loi de Paris, C, m)

Notion de facteur d'intensité des contraintes et comment appliquer ces concepts pour le dimensionnement à la fatigue d'une pièce.

◇ *ED 5 : Choix de matériaux et manipulation d'indices de performances pour la réalisation d'un réservoir cylindrique sous pression (bouteille de plongée).*

◇ *Travaux Pratiques*

2 TP parmi 4 sujets. Pour chacun de ces TP, étude du protocole expérimental, actionneurs, asservissement, capteurs, résolution, précision ...

- Essais de traction sur acier. Eprouvettes lisses et entaillées. Exploitation des données et identification des propriétés matériau $R_{p0.2\%}$, R_m , E , $A_{\%p}$. Rôle de la triaxialité des contraintes, sur l'effort maximal à rupture et sur l'allongement à rupture (lisse/entaillée).
- Essai de traction et de compression sur le béton. (essai Brésilien, essai de compression d'un cylindre). Modes de rupture en traction, en compression. Exploitation des données et identification des propriétés matériau, E , contrainte maximale en traction, en compression, mise en évidence de la croissance de l'endommagement en traction.

- Essai de traction sur élastomère. Exploitation des données en présence de grandes déformations, utilisation de la corrélation d'image et mesures de déformation. Identification des propriétés matériau, module et évolution du module, contrainte au pic, contrainte plateau....
- Essai de fatigue, propagation d'une fissure dans une éprouvette d'acier travaillant en flexion rotative. Mesure de la longueur de fissure en surface, calcul du facteur d'intensité des contraintes, tracé de la loi de Paris et identification des paramètres C et m.

◇ *Pré-requis*

Cours de mécanique des milieux continus, notions de contrainte et de déformation. Résolution de problèmes d'élasticité linéaire.

◇ *Modalités de contrôle des Connaissances*

Examen écrit 50%

Travaux pratiques 50%, la note de TP est établie à partir des comptes rendus de TP qui doivent être établis à partir du modèle fourni.

◇ *Références bibliographiques*

- Polycopié du cours : Mécanique des Matériaux, S. Pommier
- M. Ashby et D. Jones (1990), Matériaux, Tomes 1 (Propriétés et Applications), Dunod
- D. François, A. Pineau, A. Zaoui, (1993), Comportement mécanique des matériaux, tomes 1 et 2, Hermes, Paris

2 REMARQUES ET CONSIGNES GENERALES

2.1 Remarques

- Ce polycopié est organisé en chapitres qui suivent plus ou moins le déroulement des séances de cours. Vous trouverez à la fin de chaque chapitre une fiche résumé. Les notions synthétisées dans ces fiches résumés sont les notions minimales à connaître à l'issue de ce cours et sur lesquelles vous serez interrogés lors de l'examen final.
- Le polycopié contient par ailleurs un grand nombre de compléments, qui ne seront pas tous évoqués en cours. L'examen final portera, nécessairement sur les notions de bases mais aussi sur les compléments qui auront été évoqués en cours. L'examen ne portera pas sur les notions qui n'auront pas été évoquées en cours même si elles sont dans le polycopié.
- Vous trouverez également dans ce polycopié les sujets des enseignements dirigés de cette année et quelques sujets d'enseignements dirigés ou d'examen proposés les années précédentes. Vous pouvez vous entraîner sur ces sujets complémentaires et vous adresser aux membres de l'équipe pédagogique pour vérifier si vos résultats sont corrects.
- Vous trouverez également à la fin du polycopié les sujets des travaux pratiques.

2.2 Consignes générales pour la rédaction d'un compte rendu de travaux pratiques

2.2.1 Préambule

Le port de la blouse est OBLIGATOIRE.

Le non-port de la blouse sera pris en compte dans la notation (partie comportement en TP).

2.2.2 Objectifs scientifiques

Préciser les objectifs de l'étude réalisée lors de la séance de travaux pratiques. Vous justifierez alors les moyens mis en places (partie 3) et le protocole expérimental (partie 4) vis-à-vis de ces objectifs. On ne vous demande pas dans un compte rendu de TP de mettre par écrit ce que vous avez fait durant la séance, mais d'expliquer (brièvement mais clairement) pourquoi l'expérience a été conduite de cette manière compte tenu de ce qu'on cherche à déterminer.

2.2.3 Moyens expérimentaux utilisés

Selon les cas :

- Décrire le type de machine (machine de traction mécanique, électromécanique, hydraulique, polisseuse, rhéomètre plan-plan, cône-plan,...) et son principe de fonctionnement.
- Décrire les capteurs utilisés (principe, gamme, plage utilisée pour l'essai, bruit, origine du bruit...) et leur emplacement.
- Décrire la mesure (répétabilité, résolution,...).

2.2.4 Protocole expérimental

- Décrire le matériau étudié.

- Décrire et justifier la géométrie des éprouvettes utilisées.
- Décrire et analyser le montage de l'éprouvette (correction du défaut d'alignement,...).
- Faire le schéma du système avec les différents capteurs. Préciser ce que mesurent ces capteurs.
- Décrire la sollicitation appliquée. Préciser quelles sont les mesures réalisées.

2.2.5 Résultats et analyse

Tout résultat obtenu, même inattendu, est un résultat qu'il convient d'analyser.

- Décrire le traitement des données mis en œuvre pour analyser les résultats (ex : comment à partir d'une mesure d'effort, trace-t-on la contrainte ?). Discuter, le cas échéant, les hypothèses inhérentes à ce traitement et les éventuels écarts à ces hypothèses qui se produisent lors de la séance de TP (ex. la section utilisée pour calculer la contrainte est la section initiale, mais le matériau se déforme beaucoup, cette hypothèse est discutable)
- Interpréter les résultats.
- Répondre aux questions posée dans le sujet de TP.

2.2.6 Remarque

Divers polycopiés, livres, revues techniques ainsi que les techniques de l'ingénieur sur internet sont à votre disposition. Ils ne doivent en aucun cas sortir du laboratoire de matériaux.

3 INTRODUCTION

◇ Objectifs

La maîtrise de nouveaux matériaux a permis de véritables révolutions dans l'histoire des technologies. Les grandes périodes de la préhistoire sont d'ailleurs définies par les matériaux maîtrisés, âge de pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. La science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application technologique. La conception d'un nouvel objet technique peut passer par une sélection de matériau dans une base existante (objectif du cours de L3) mais aussi par la conception d'un nouveau matériau adapté au mieux à l'application visée et de son procédé de fabrication (objectifs des cours de M1 et M2).

On distingue deux grandes catégories de matériaux :

(1) les matériaux de structure, qui seront l'objet de ce cours et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.

(2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme par exemple les matériaux piézo-électriques qui délivrent un effort lorsqu'on les soumet à une différence de potentiel électrique.

Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux reste considérable. L'objectif de ce cours n'est donc pas de les étudier de manière exhaustive, mais de se donner les éléments de compréhension permettant de trouver pour une application particulière la solution matériau la plus adaptée.

Une solution matériau pour une application comprend trois volets, le matériau constituant le composant, le procédé de mise en œuvre du composant et la tenue en service de ce composant. Nous nous limiterons à l'étude de la relation entre le matériau et sa tenue en service, sans étudier sa mise en œuvre et plus généralement la relation entre le procédé et le matériau qui sera l'objet de modules de spécialité en M1 ou M2.

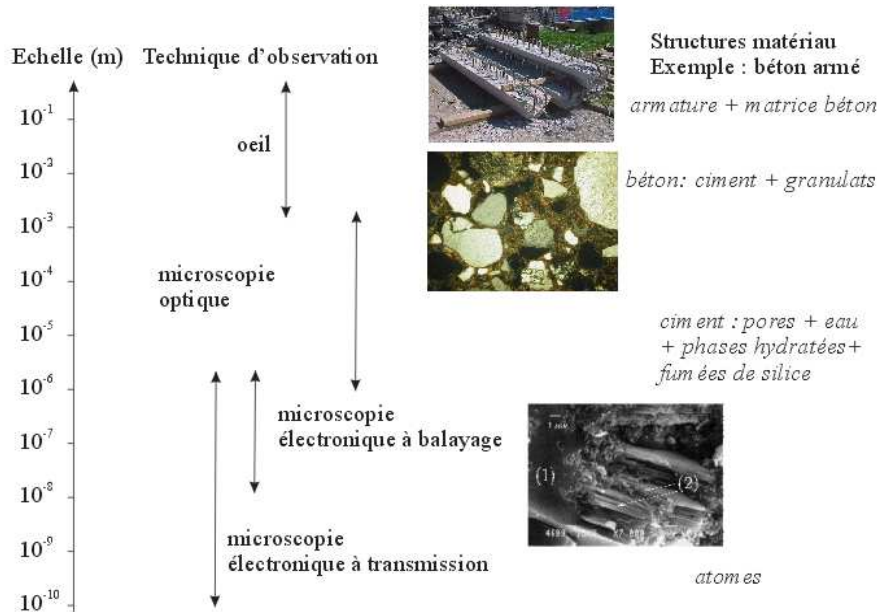
Le cours de cette année concernera donc les propriétés mécaniques (comportement thermo-élastique, plasticité, rupture différée par fatigue et rupture brutale, fragile ou ductile) des grandes familles de matériaux. L'accent sera mis sur les relations entre la structure du matériau et ses propriétés mécaniques. Ce lien est souvent le résultat d'un changement d'échelle entre le comportement des éléments constitutifs de la microstructure (échelle « micro ») et le comportement mécanique à l'échelle macroscopique (échelle « macro »), nous procéderons donc à des changements d'échelle.

◇ Notion de volume élémentaire représentatif du matériau

En effet, on caractérise les propriétés d'un matériau à **une échelle donnée**. A cette échelle le matériau est considéré comme homogène et continu. Si l'échelle à laquelle est caractérisée la propriété est comparable à l'échelle de l'hétérogénéité interne du matériau, les résultats seront alors **dispersés**. Il faudra réaliser de nombreux essais pour déterminer une valeur moyenne et une distribution statistique de la propriété.

Prenons un exemple très simple, la détermination de la masse volumique du béton armé. La masse volumique peut-être caractérisée à l'échelle métrique. Elle est fonction de la fraction volumique de béton multipliée par la masse volumique du béton et de la fraction volumique d'acier multipliée par la masse volumique de l'acier. A une échelle inférieure, centimétrique, la masse volumique du béton sera fonction de la fraction volumique de granulats et de pâte cimentaire. Et ainsi de suite pour les échelles inférieures...

Ainsi, peut-on optimiser une propriété du matériau à une échelle donnée en fonction de la connaissance du comportement de ses constituants. Cette démarche de changement d'échelle, tantôt qualitative, tantôt quantitative est couramment employée en science des matériaux.



Chaque propriété est donc associée à une échelle caractéristique (volume ou surface élémentaires représentatifs) au delà de laquelle elle peut être considérée comme une moyenne représentative du matériau. A chaque échelle sont associés des moyens de mesure et d'observation adaptés.

Moyennes pour un volume

Masse volumique
Coefficient de dilatation thermique
Capacité calorifique
Conductibilité thermique
Coefficient de viscosité
Module d'élasticité, module de Young
Coefficient de Poisson
Limite d'élasticité
Contrainte à rupture
....

Moyennes pour une surface

Emissivité
Tension de surface
Coefficient de frottement
....

◇ Familles de matériaux

L'objectif est donc d'établir les relations entre les propriétés mécaniques à une échelle donnée et la structure du matériau à une échelle inférieure. Le cours est organisé par classe de comportement mécanique (comportement thermo-élastique, plasticité, rupture différée par fatigue et rupture brutale, fragile ou ductile) et illustré à chaque fois à l'aide d'une ou plusieurs familles de matériaux.

Tableau 1 : Ordres de grandeurs de propriétés selon la famille de matériau

Propriété	Métaux	Céramiques	Polymères
Densité ρ [kg/m ³]	8000	4000	1000

	(2000..22000)	(2000..18000)	(900..2000)
	$10 \cdot 10^{-6}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$100 \cdot 10^{-6}$
Dilatation thermique α [1/K]	($1 \cdot 10^{-6}$.. $100 \cdot 10^{-6}$)	($1 \cdot 10^{-6}$.. $20 \cdot 10^{-6}$)	($50 \cdot 10^{-6}$.. $500 \cdot 10^{-6}$)
Capacité calorifique c_p [J/(kg·K)]	500	900	1500
	(100..1000)	(500..1000)	(1000..3000)
Conductivité thermique k [W/(m·K)]	100	1	1
	(10.. 500)	(0.1.. 20)	(0.1.. 20)
Température de fusion ou de transition vitreuse T_m [K]	1000	2000	400
	(250..3700)	(1000..4000)	(350..600)
Module d'élasticité, module de Young E [GPa]	200	200	1
	(20..400)	(100..500)	(10^{-3} ..10)
Coefficient de Poisson	0.3	0.25	0.4
	(0.25..0.35)	(0.2..0.3)	(0.3..0.5)
Contrainte à rupture σ_Y [MPa], noté également σ_R ou R_m	500	100	50
	(100..3500)	(10..400 tract.) (50..5000 compr.)	(10..150 tract.) (10..350 compr.)
Dureté	Moyenne	Haute	Basse
Usinabilité	Bonne	Très mauvaise	Très Bonne
Résistance à l'impact	Bonne	Mauvaise	Très Mauvaise
Résistance au fluage thermique	Moyenne	Excellente	Très mauvaise
Conductivité électrique	Haute	Très faible	Très faible
Résistance à la corrosion	Moyenne	Excellente	Bonne

En effet, les matériaux de structure peuvent être classés en quatre grandes familles, selon la nature des liaisons entre les atomes, dont on peut résumer les propriétés principales comme suit :

(1) Les métaux (liaisons métalliques). Ce sont les matériaux les plus employés pour les applications structurales et pour l'essentiel des métaux ferreux (90% ferreux, les non-ferreux étant des alliages de Al, Cu, Ni et Ti). Ils sont capables de se déformer de manière permanente (ductiles) ce qui permet de réaliser des opérations de mise en forme par déformation plastique (emboutissage, forge, estampage...) ou d'assemblage par déformation plastique (rivetage, clinchage...) et leur donne une excellente résistance à la rupture en service. Par ailleurs les matériaux métalliques sont denses, et bons conducteurs thermiques et électriques.

(2) Les céramiques (liaisons ioniques, solides inorganiques) Ce sont les matériaux les plus anciens et les plus couramment utilisés en génie civil (pierre, brique, verre...). On peut (ex. béton) généralement les mettre en oeuvre à l'état pâteux. Ils ne deviennent fragiles qu'après la prise. Ces matériaux sont résistants à l'abrasion, mais pas aux chocs, moins denses que les métaux, isolants thermique et électrique, généralement poreux et fragiles.

(3) Les polymères (liaisons covalentes + liaisons faibles, solides organiques). Ces matériaux sont récents si on se réfère aux matériaux de synthèse mais il existe également un grand nombre de polymères naturels (fibres végétales par exemple). Ce sont de larges macromolécules organiques, comme par exemple le polyéthylène $-(C_2H_4)_n-$ dont le nombre de monomères n varie entre 100 et 1000 et la masse molaire de $M=10^0..10^3$ kg/mol. Les matières plastiques ont l'avantage de pouvoir être mises en forme par déformation plastique ou injection à l'état liquide. Elles peuvent être thermoplastiques (recyclables et ductiles, comme les métaux) ou thermodurcissables. Elles sont en général mauvais conducteurs thermique et électrique et très peu denses.

(4) Les composites et matériaux structuraux, ce sont des combinaisons hétérogènes de matériaux issus de ces trois familles, mais dont la structure est définie en fonction de l'application (béton armé, composite carbone-epoxy, composite aluminium-SiC etc...) ou bien se développe naturellement sous l'effet des sollicitations mécaniques ou thermique (ex. bois : fibres de lignine dans une matrice de cellulose, ou métaux texturés par déformation plastique intense).

Le Tableau 1 présente quelques ordres de grandeurs des valeurs moyennes et des fourchettes de quelques propriétés par grande famille de matériaux.

◇ Sources bibliographiques

- Matériaux (Tomes 1 et 2) , Michael F. Ashby, Davis R.H. Jones, Dunod, 1991
- Les techniques de l'ingénieur.
- Physique de l'état solide, Charles Kittel, Dunod, 1983
- Mécanique des matériaux solides, Jean Lemaître, Jean louis Chaboche, Dunod, 1996
- Matériaux Polymères, Relation Structure-Propriétés, Jacques Verdu ENSAM, 1992
- Comportement mécanique des matériaux, D. François, A. Pineau, A. Zaoui, tomes 1 et 2, Hermès, Paris, 1993
- Eléments de Metallurgie Physique, La Documentation Française, Paris, 1977.
- Etude de la plasticité et application aux métaux, D. Jaoul, Dunod, Paris 1965.
- Matériaux Polymères. Propriétés Mécaniques et Physiques, H. H. Kausch et col, Traité des Matériaux vol. 14. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 2001.
- Matériaux et propriétés, Y. Berthaud, Polycopié, 2004.
- Dislocations, J. Friedel, Pergamon, Oxford, 1964.
- Introduction to dislocations, D. Hull, J. Bacon, International series on materials science and technologie, Pergamon, Oxford, ,1984.