

Christian Lemaitre

Les propriétés physico-chimiques des matériaux de construction

Matière & matériaux | Propriétés rhéologiques & mécaniques |
Sécurité & réglementation | Comportement thermique,
hygroscopique, acoustique et optique

© Groupe Eyrolles, 2012, ISBN : 978-2-212-13392-9

EYROLLES



1.7 Caractéristiques des matériaux et courbe de cohésion

1.7.1 Dilatation thermique

Si la température n'est plus le zéro absolu, on ajoute à l'énergie interne une énergie thermique W_T . On s'aperçoit alors que sur la courbe de l'énergie interne, il faut ajouter W_T à la valeur U_0 du minimum pour se trouver en U_1 (figure 1.15), et que la position d'équilibre r^0 n'a plus de sens. Cette position d'équilibre peut en effet se trouver entre un minimum et un maximum dont les positions dépendent de la valeur de U_1 .

Les atomes vont alors entrer en vibration entre les distances minimales et maximales, avec une amplitude plus grande si la température augmente : on retrouve ici la vibration de réseau déjà évoquée plus haut.

Mais la valeur moyenne de la vibration ne reste pas centrée sur la valeur initiale de r^0 , car la courbe énergétique n'est pas symétrique : elle se déplace vers des distances plus grandes. La longueur moyenne de la liaison entre les atomes augmente pour atteindre une valeur r_1 . C'est la dilatation thermique.

Si l'augmentation de la température est ΔT , on en déduit le coefficient de dilatation thermique (en K^{-1}) de ce composé :

$$\alpha = (r_1 - r^0) / r^0 \cdot \Delta T$$

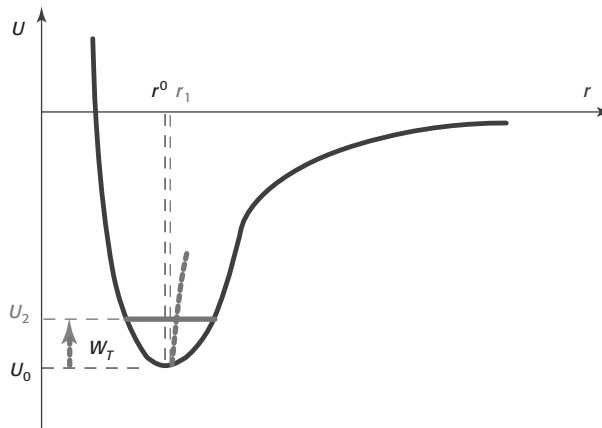


Figure 1.15. Apport d'énergie thermique : vibration et dilatation.

1.7.2 Déformation élastique

1.7.2.1 Définitions

Il est nécessaire à ce stade de définir des notions élémentaires concernant les propriétés mécaniques des matériaux, comme une déformation provoquée par une contrainte, et qui peut être une déformation élastique ou plastique ;

- l'action d'une force sur la surface d'un solide se traduit par une pression (force par unité de surface) qui est appelée *contrainte*. Cette contrainte provoque la déformation qui est la variation de la dimension rapportée à la dimension initiale. Dans le cas où un solide a une longueur L , s'il est soumis à l'action d'une contrainte de traction $\sigma = F/S$, il va d'allonger de la longueur $\Delta\ell$, la déformation est alors : $\varepsilon = \Delta\ell/L$;
- cette déformation est élastique si, après relâchement de la contrainte appliquée, le solide retrouve, par réversibilité, ses dimensions initiales. Cette déformation élastique est proportionnelle à la contrainte appliquée (loi de Hooke), et le coefficient de proportionnalité E s'appelle le *module* de Young, avec : $\sigma = E \cdot \varepsilon$;
- si ce n'est pas le cas, le relâchement de l'effort provoque un retour partiel vers les dimensions d'origine, mais il reste une déformation résiduelle appelée *déformation plastique*. Celle-ci est donc partiellement réversible.

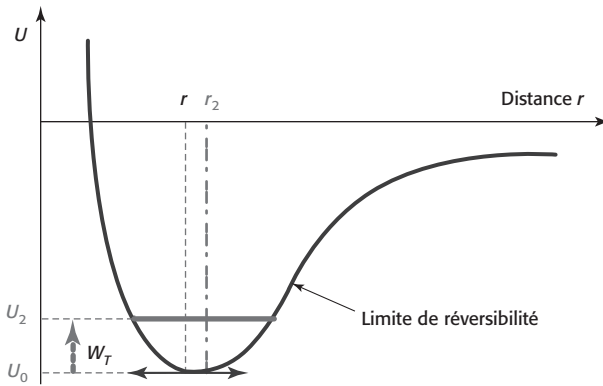


Figure 1.16. Apport d'énergie mécanique : vibration et déformation élastique.

1.7.2.2 Énergie de liaison et élasticité

L'application d'un effort mécanique est un apport d'énergie W_M . Le minimum devient égal à $U_2 = U_0 + W_M$, et on voit (figure 1.16) que la distance d'équilibre oscille entre un minimum et un maximum qui s'écartent d'autant plus que l'apport W_M est important. Le point médian se déplace à cause de la dissymétrie et on observe un allongement :

$$\Delta\ell = r_2 - r^0.$$

La déformation élastique est alors :

$$\varepsilon = (r_2 - r^0)/r^0.$$

Au-delà de la limite de réversibilité, la déformation devient plastique.

1.7.3 Déformation plastique

La déformation résiduelle permanente se manifeste après que le matériau a subi une contrainte supérieure à une valeur définie qui est une des caractéristiques de ce matériau : la limite élastique. Alors, le matériau déformé se stabilise dans un état d'équilibre nécessairement différent de son état initial. Cette modification est rendue possible par l'existence de défauts dans la

structure cristalline, et plus particulièrement de défauts qui ont une forme linéaire : les dislocations. Il faut donc aborder maintenant la notion de défauts, avant de décrire le comportement du matériau sollicité mécaniquement en présence de ces dislocations.

1.7.3.1 Cristal réel

Dans les faits, puisqu'on n'est jamais au zéro absolu, la thermodynamique montre qu'aucun cristal n'est parfait. Une structure cristalline comporte nécessairement des défauts. Ces différents défauts peuvent avoir des dimensions variables : ils peuvent être ponctuels, linéaires ou volumiques.

- *Les défauts ponctuels* (figure 1.17) correspondent à des nœuds du réseau qui sont soit inoccupés (les lacunes), soit occupés par un atome différent de celui qui devrait s'y trouver (les substitutions). Il se peut aussi qu'on trouve un atome dans la structure qui soit intercalé entre les sites normalement occupés de la structure (atomes interstitiels). On peut aussi trouver des combinaisons de ces défauts : la plus simple se décrit par un atome qui quitte sa place en laissant une lacune et en se retrouvant en position interstitielle. Ces défauts ponctuels ont une influence importante sur le comportement de ces matériaux à très haute température, car ils sont alors nombreux et accélèrent les phénomènes liés à la diffusion de matière à travers le solide.

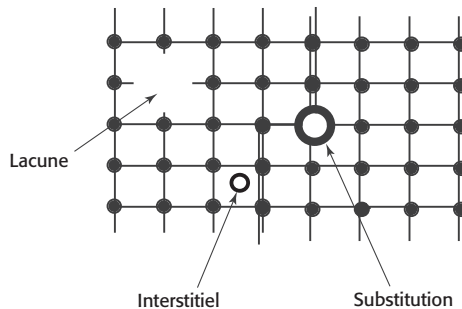


Figure 1.17. Défauts ponctuels dans un cristal.

- *Les défauts linéaires*, ou dislocations, correspondent à des irrégularités dans la périodicité de la structure qui créent des sortes de « marches » à l'intérieur du matériau. Il y en a de deux sortes : les dislocations coin et les dislocations vis. Pour une dislocation coin, la marche est perpendiculaire à la ligne du défaut, et pour une dislocation vis, elle est parallèle. Pour des raisons de simplicité nous nous bornerons ici à décrire ce qui se passe avec les dislocations coin, sachant que le processus est similaire avec les dislocations vis, mais plus difficile à décrire à cause de ses aspects tridimensionnels.
- Une dislocation coin (figure 1.18) se décrit comme si on avait introduit un demi-plan nouveau d'atomes dans la structure, tout comme un coin glissé pour caler une porte. On obtient ainsi une ligne d'atomes en plus dans la partie où ce demi-plan existe que dans l'autre partie. Le bord de ce demi-plan est la ligne de défaut symbolisée par un T renversé, et la « marche » obtenue dans le matériau est bien perpendiculaire à cette ligne.
- *Les défauts en volume* sont de plusieurs natures : les joints de grains sont les surfaces qui délimitent le cristal (ou « grain » dans un solide polycristallin) et sont en

contact avec le cristal voisin, les macles sont des zones du cristal qui se sont stabilisées au cours de la solidification de façon à ce que le réseau « maclé » soit la reproduction du cristal non maclé mais avec une transformation de symétrie par rapport à un plan (le plan de macle). Certaines impuretés peuvent aussi occasionner des défauts en volume. Ces défauts ont une incidence sur la déformabilité du matériau, mais modifient peu le mécanisme de la plasticité.

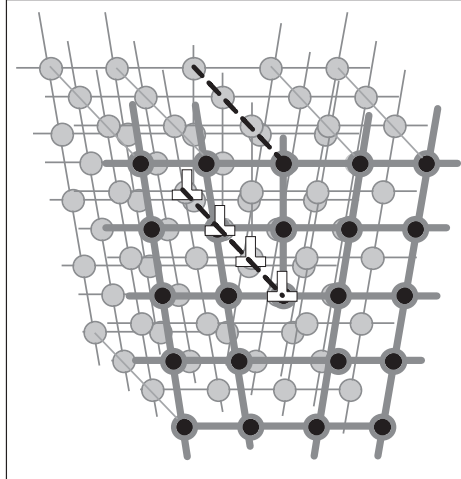


Figure 1.18. Dislocation coin.

1.7.3.2 Mécanisme de la déformation plastique

Si un cristal contenant une dislocation coin est sollicité par une contrainte de cisaillement qui s'applique parallèlement à la « marche », le solide va se déformer. La figure 1.19 représente ce cas dans un plan perpendiculaire à la ligne de dislocation. La déformation a tendance à faire glisser cette ligne dans un plan appelé *plan de glissement*. Alors dans ce plan, il y a rupture d'une liaison avec un atome qui s'éloigne, cette liaison se reformant avec un autre atome qui

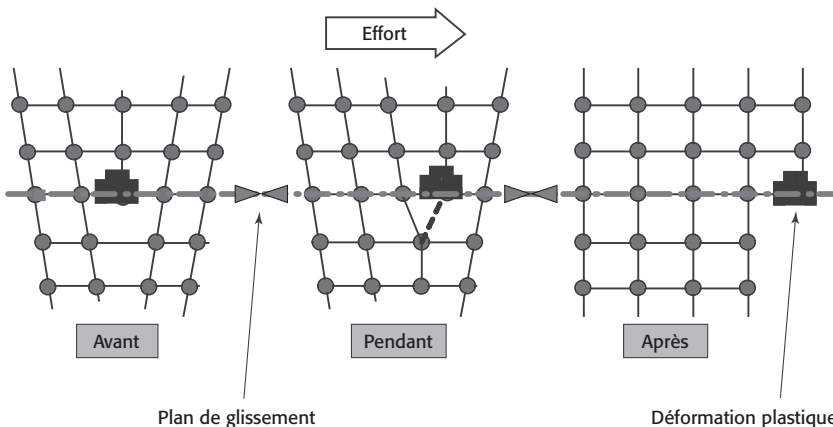


Figure 1.19. Glissement d'une dislocation coin.

s'est rapproché lors de la déformation. Si l'effort se poursuit, le glissement continue de proche en proche. Au bout du cristal, on fait alors finalement apparaître une vraie marche à la surface externe, le reste du cristal s'étant rapproché du cristal parfait ; on est en présence d'une déformation permanente : la déformation plastique. Sans dislocation, un même résultat aurait nécessité la rupture simultanée de toutes les liaisons au niveau du glissement, donc la rupture du matériau, ce qui demande une énergie bien plus considérable, puis la réunion des deux parties ainsi créées !

1.7.4 Rupture du matériau

Si la contrainte devient plus importante, il est possible d'atteindre une valeur de cet effort pour laquelle on obtiendra la rupture de liaison, car l'énergie $W_R = U_R - U_0$ mise en jeu sera plus grande que l'énergie des liaisons. Pour un effort de traction, la déformation conduit à écarter les atomes les uns des autres dans la direction de la traction. La courbe de cohésion (figure 1.20) montre qu'à la rupture, la distance qui les sépare est r_A .

L'allongement à la rupture est aussi une des caractéristiques mécaniques d'un matériau. Il s'écrit :

$$A\% = 100 * (r_A - r^0) / r^0$$

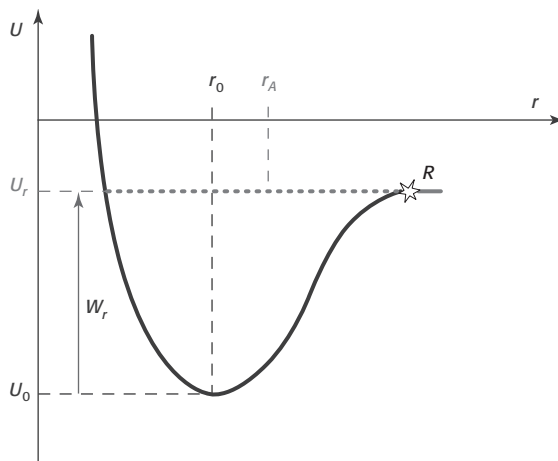


Figure 1.20. Allongement à la rupture.

1.8 Propriétés fonctionnelles des matériaux

Le choix des matériaux en construction mécanique ou dans le secteur du BTP est conditionné par les caractéristiques qui sont requises par le cahier des charges, ainsi que par des considérations de coût.

L'approche « science des matériaux » qui a été abordée jusqu'ici a permis de mettre en évidence que de nombreuses caractéristiques peuvent être prises en compte. Celles qui seront finalement importantes dépendent de la fonction que l'on veut faire jouer au matériau. On peut citer les fonctions suivantes (liste non exhaustive) :

- masse et masse volumique ;
- tenue aux efforts mécaniques ;
- tenue aux sollicitations climatiques ;
- tenue à la température et aux incendies ;
- tenue dans le temps (solubilité, vieillissement, corrosion...) ;
- isolation ou conduction thermique ;
- isolation ou conduction électrique ;
- isolation, absorption ou transmission acoustique ;
- perméabilité ou étanchéité à l'humidité ;
- viscosité ;
- porosité ;
- propriétés optiques, transmission ou absorption des rayonnements lumineux ;
- couleur et esthétique ;
- granulométrie ;
- facilité de mise en œuvre ou de remplacement ;
- développement durable ;
- environnement, éco-propriétés, coût global.

De plus, il convient de se préoccuper toujours de deux aspects importants :

- la facilité d'approvisionnement ;
- le coût financier.

Souvent, ces propriétés sont liées entre elles ; il est difficile d'avoir un matériau à la fois isolant électrique, conducteur de la chaleur, transparent, léger, perméable à l'humidité, facile à se procurer et peu onéreux. Il faudra alors trouver des compromis, parfois en mettant en place des multimatériaux comportant plusieurs couches.

De plus, il sera question dans un autre chapitre des relations qu'il peut y avoir entre variations de température et humidité dans des locaux : agir sur une propriété peut en modifier une autre. Il faut y prêter attention.

Sur de nombreux aspects, des réglementations européennes, françaises ou locales ont été mises en place, afin d'assurer la sécurité ou de préserver le patrimoine d'un secteur géographique. Le choix des matériaux est alors orienté : on aura grand intérêt à s'en tenir informé, et à tenir compte des règles de sécurité (dimensionnement, tenue au feu, sollicitations climatiques, règles sanitaires...).

1.9 Les classes de matériaux

Les matériaux de l'ingénieur ou de l'architecte peuvent être classés de façons diverses. En se basant sur la science des matériaux telle qu'exposée plus haut, on peut proposer sept classes de matériaux.

1.9.1 Sols et pierres

La terre est un mélange de trois constituants minéraux de base dans des proportions variables, additionné de composants organiques provenant de la décomposition des végétaux.

Ces trois constituants minéraux sont – comme pour les sols – le sable, l’argile et le calcaire. Les caractéristiques des sols sont liées à leur composition, mais aussi à leur granulométrie et à leur degré d’humidité.

L’étude des sols fait l’objet de la géologie, et s’applique dans la géotechnique. (Voir *Mise en œuvre et emploi des matériaux de construction* dans la même collection.)

Les pierres proviennent soit du sous-sol, soit d’une sédimentation à la suite d’une longue immersion dans les temps géologiques, suivie ou non d’une transformation plus ou moins importante. On peut en trouver dans les constructions en pierre, mais aussi en toiture, comme les lauzes ou les ardoises.

Le ciment est une pierre artificielle broyée, fabriquée à partir de chaux et d’argile.

1.9.2 Métaux et alliages

Les métaux sont des éléments chimiques comme le fer, le cuivre, l’aluminium, le zinc, le titane... issus du traitement de certains minerais par l’industrie métallurgique. Bien souvent, les métaux sont utilisés à l’état combiné avec un autre élément ou plusieurs autres éléments. Les aciers sont ainsi des alliages de fer et de carbone, les aciers inoxydables sont des alliages de fer et de chrome contenant souvent du nickel, et parfois d’autres constituants supplémentaires. Les métaux sont très utilisés en construction mécanique et dans le BTP.

1.9.3 Céramiques

Les céramiques sont des composés chimiques contenant un ou plusieurs éléments métalliques entrant dans leur composition. Certaines se trouvent dans la nature, on élabore alors ces céramiques par cuisson des argiles du sol : ce sont les terres cuites. Celles-ci sont utilisées pour de nombreux objets de la vie courante (vaisselle, sanitaires, bibelots...), mais aussi en construction (briques, carrelages, tuiles).

Il existe aussi des céramiques élaborées industriellement, constituées d’oxydes, de carbures ou de nitrures métalliques : elles sont souvent utilisées dans des applications hautes températures (fours, radiateurs, moteurs...).

1.9.4 Verres

Les verres sont des matériaux fabriqués à partir de mélanges de sable et de soude, comportant un peu de magnésie (comme fondant) et portés à la fusion. Le liquide, en refroidissant, donne naissance à un verre de sodo-silicate. On peut introduire du fluor pour créer des verres en fluoro-silicate. Les verres sont utilisés pour fabriquer des objets ménagers ou des vitrages dans l’automobile ou la construction.

1.9.5 Polymères

Les polymères sont des molécules organiques qui sont obtenues en assemblant bout à bout par synthèse des éléments (monomères) de chaînes moléculaires. Ces molécules très longues se pelotonnent entre elles et confèrent ainsi au matériau ses caractéristiques.

Ce sont des polyesters, des polycarbonates, des polyéthylènes... On distingue les polymères thermoplastiques et thermodurcissables. L'utilisation de ces matériaux est en pleine expansion, notamment dans les industries du transport (aviation, automobile).

1.9.6 Élastomères

Le caoutchouc, la silicone, le néoprène, sont des élastomères dont les utilisations sont spécifiques. Le premier est utilisé pour la fabrication de pneumatiques, mais pour faire parfois des joints d'étanchéité. C'est pour améliorer l'étanchéité qu'on utilise quelquefois les deux autres.

1.9.7 Composites

Les matériaux composites sont constitués de mélanges de plusieurs constituants. Il en existe donc de nombreux exemples. On en trouvera trois ci-après :

- les composites à base de polymères. Ce sont des polymères renforcés par des fibres ou des tissus qui améliorent notablement la résistance mécanique du polymère seul. Souvent, l'amélioration est favorisée davantage dans une direction que dans les autres. On fabrique de très nombreux objets avec ces composites artificiels ;
- le bois. Tout comme ci-dessus, le bois est une combinaison de fibres de celluloses orientées qui baignent dans la lignine. C'est donc un composite naturel. Ses applications sont très nombreuses, notamment dans le domaine de la construction, où il allie souplesse, résistance et légèreté ;
- le béton. Le béton est composé de ciment en poudre, de sable et de gravier (et parfois d'additifs) ; mélangé à de l'eau, il solidifie en quelques heures grâce à une réaction spontanée d'hydratation. On l'utilise abondamment dans le secteur du BTP, car il confère aux ouvrages bâtis une masse et une résistance suffisantes pour répondre aux sollicitations auxquelles ils sont soumis. Il faut noter que ce matériau résiste mal à la traction, ce qui a amené à mettre en œuvre le béton armé, qui comporte en plus une armature métallique.

1.10 Les matériaux de construction

Dans le domaine du BTP, les matériaux sont souvent considérés en fonction de leur utilisation courante, certains d'entre eux pouvant se retrouver dans plusieurs catégories. Cela permet de mieux appréhender les choix de matériaux si on les destine à telle ou telle application.

On distingue en effet quatre grands types de matériaux de construction.

1.10.1 Les sols

C'est sur le sol que s'appuient toutes les constructions. Il est nécessaire de tout commencer par une caractérisation des propriétés du sol, et de prévoir les interventions éventuelles destinées à le consolider pour répondre aux sollicitations qu'il devra subir.

1.10.2 Les matériaux de structure

On demande aux matériaux de structure d'assurer la stabilité et la sécurité d'une construction, notamment au niveau des sollicitations mécaniques et de la tenue au feu. On utilisera de façon différente ceux dont la masse est importante, assurant ainsi la stabilité de la structure, et ceux qu'on met en œuvre pour alléger certaines parties des structures pour économiser la matière.

Pour apporter de la masse, on fait appel aux terres cuites (comme les briques), à la chaux, au ciment, au béton... Pour économiser la matière, on emploie les métaux (essentiellement les aciers), ou le bois (notamment pour les charpentes).

1.10.3 Les matériaux d'enveloppe

L'enveloppe d'une construction concerne toutes les parties qui sont en contact avec l'extérieur. Il s'agit essentiellement de la couverture et des façades.

Pour les toitures (ou couvertures), on dispose de terre cuite ou de béton (pour les tuiles), de pierres (ardoises, lauzes), de métaux (cuivre, zinc, acier...) et de végétaux (chaumes).

Pour les façades (et les pignons), on retrouve certains matériaux de structure (béton, briques de terre cuite, chaux...), le bois (bardages), et des roches (pierres). Les vitrages font partie des façades ; le verre est donc un matériau d'enveloppe.

On demande aux matériaux d'enveloppe d'assurer, entre autres choses, l'isolation thermique et l'étanchéité de la construction.

1.10.4 Les matériaux de second œuvre

Ces matériaux sont essentiellement ceux utilisés pour la finition intérieure des constructions. Le plus courant d'entre eux est le plâtre, qui sert d'enduit sur les murs et les plafonds, et qui peut être le matériau des cloisons. On retrouve là encore le bois (cloisons, menuiseries, parements), certains métaux, et des matériaux polymères ou composites (menuiseries).

On demande à ces matériaux de participer à l'isolation thermique et à l'isolement acoustique, ainsi qu'à la régulation de l'humidité, tout en ne négligeant pas la tenue au feu.