

Les états solides

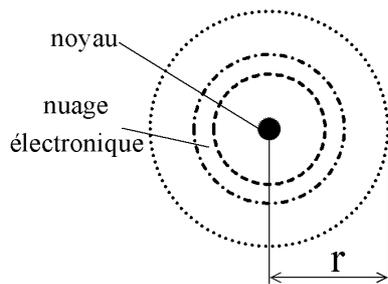
1. Cohésion de la matière

1.1. Généralités

quelques notions de physico-chimie indispensables pour comprendre l'essentiel

1.1.1. Modèle de Rutherford de l'atome

L'atome est vu en première approximation comme une sphère :

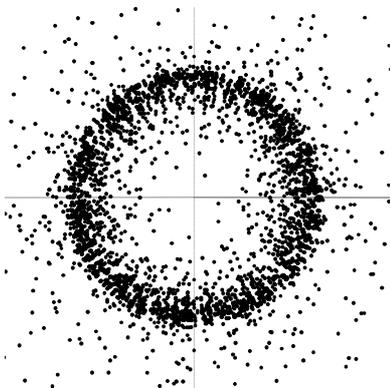


Modèle de Rutherford de l'atome

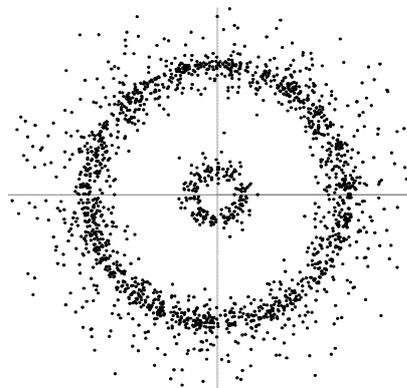
Le noyau concentre la masse. Le nuage électronique est composé de couches d'électrons ayant des énergies voisines. r est le rayon atomique aussi appelé rayon de van der Waals.

1.1.2. Modèle de Bohr

Il est issu de la théorie des quanta : l'énergie d'un électron ne peut prendre que certaines valeurs déterminées – niveaux d'énergie (voir l'annexe 1). Comme pour les photons l'électron peut être vu comme un corpuscule ou une onde ; on parle de la *dualité onde-corpuscule*. Dans le modèle ondulatoire, l'équation de Schrödinger permet de calculer les fonctions d'onde associées à la probabilité de trouver un électron dans une région autour du noyau. Les figures suivantes correspondent à ce qui pourrait être une superposition d'instantanés (clichés) où l'électron est symbolisé par un cercle noir. On visualise ainsi la probabilité spatio-temporelle de présence de l'électron dans l'espace dont le centre serait le noyau de l'atome. Plus une région est marquée de points, plus la probabilité d'y rencontrer l'électron y est forte – on l'y rencontrera d'autant plus souvent dans cette région.



Visualisation schématique de la probabilité de présence de l'électron dans le cas de l'atome d'hydrogène, orbitale "1s" (état non excité).



Visualisation schématique de la probabilité de présence de l'électron dans le cas de l'atome d'hydrogène, orbitale "2s" (état excité).

On représente souvent schématiquement la position de l'électron par son orbite moyenne

En pratique, on utilise le modèle adapté à la description convenable du mécanisme, phénomène ou de la propriété étudiée, sans sophistication superflue, les modèles les plus élaborés englobant les modèles simples.

1.2. Modèle électrostatique

Considérons deux atomes à la température 0°K (zéro absolu). La loi de Coulomb fournit le potentiel d'attraction pour ces deux atomes :

$$U_a(d) = \frac{A}{d^n} \quad (\text{loi de Coulomb})$$

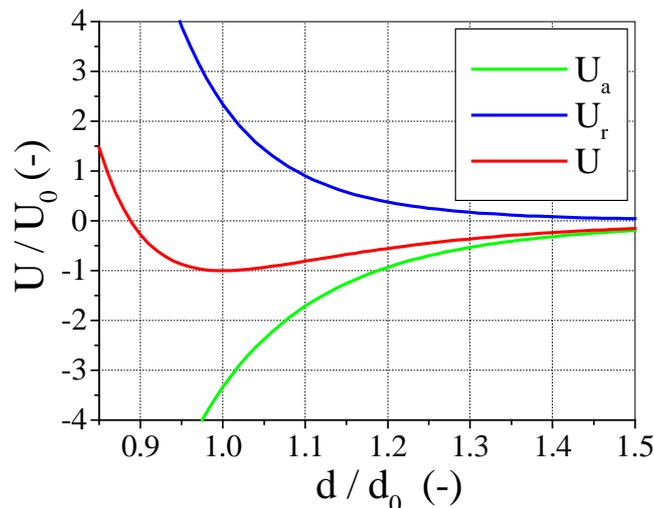
où U_a est une énergie potentielle, A est une constante négative qui dépend des charges électriques de signe contraire et n est généralement compris entre 5 et 9. La force attractive tend vers 0 lorsque les atomes sont éloignés. Cette force vaut $F_a(d) = \frac{\partial U_a(d)}{\partial d} = \frac{-n A}{d^{n+1}}$ puisque

$$U_a(d) = -\int_{\infty}^d F_a(x) dx \text{ de sorte que } U_a \rightarrow 0 \text{ quand } d \rightarrow \infty.$$

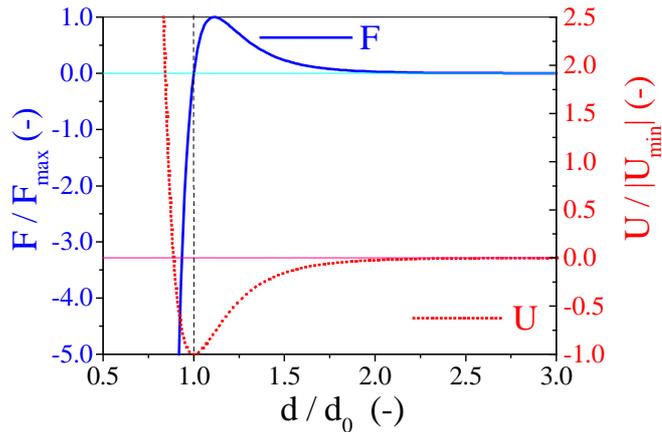
L'interpénétration des "nuages électroniques" produit une force de répulsion dont le potentiel vaut :

$$U_r(d) = \frac{B}{d^m}$$

où U_r est une énergie potentielle, B est une constante positive qui dépend du nombre de protons et d'électrons et m est supérieur à n , généralement compris entre 6 et 9 pour la liaison métallique et entre 9 et 11 pour les liaisons ionique, covalente ou de type van der Waals. La force de répulsion associée à U_r vaut $F_r(d) = \frac{\partial U_r(d)}{\partial d} = \frac{-m B}{d^{m+1}}$.



Potentiels d'attraction, de répulsion et leur somme en fonction de la distance inter atomique.



La résultante de ces forces et l'énergie de cohésion est déduite de la somme des deux contributions attractives et répulsives. On obtient donc :

$$U(d) = \frac{A}{d^n} + \frac{B}{d^m}$$

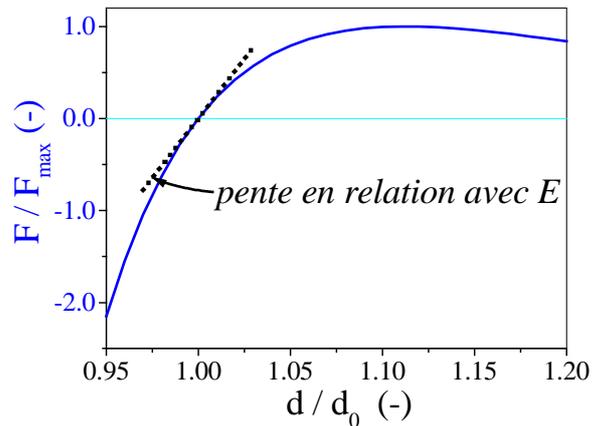
$$F(d) = \frac{\partial U(d)}{\partial d} = \frac{-n A}{d^{n+1}} + \frac{-m B}{d^{m+1}}$$

Energie de cohésion et force s'exerçant entre deux atomes en fonction de la distance inter atomique (n=8, m=11)

L'équilibre parfait des forces d'attraction et de répulsion s'exprime par $F(d_0) = 0$ ce qui correspond à la valeur minimale de $U(d_0)$ notée U_0 . d_0 est la distance inter atomique à l'équilibre. U_0 est l'énergie de cohésion ou enthalpie de sublimation ; c' est l'énergie à fournir pour éloigner les deux atomes d'une distance d telle que $d \gg r$.

Pour un matériau idéal, le module d'élasticité serait donc lié à $\partial F / \partial d$.

On pourrait imaginer déduire de ce modèle la résistance à la traction (en relation avec F_{\max}) mais les défauts inhérents aux matériaux ainsi que les mécanismes d'accommodation de la déformation aux plus grandes échelles que l'échelle atomique ou moléculaire ne permettent pas d'extrapoler ce type de modèle aussi loin.



Force s'exerçant entre deux atomes en fonction de la distance inter atomique et linéarisation du comportement en $d = d_0$.

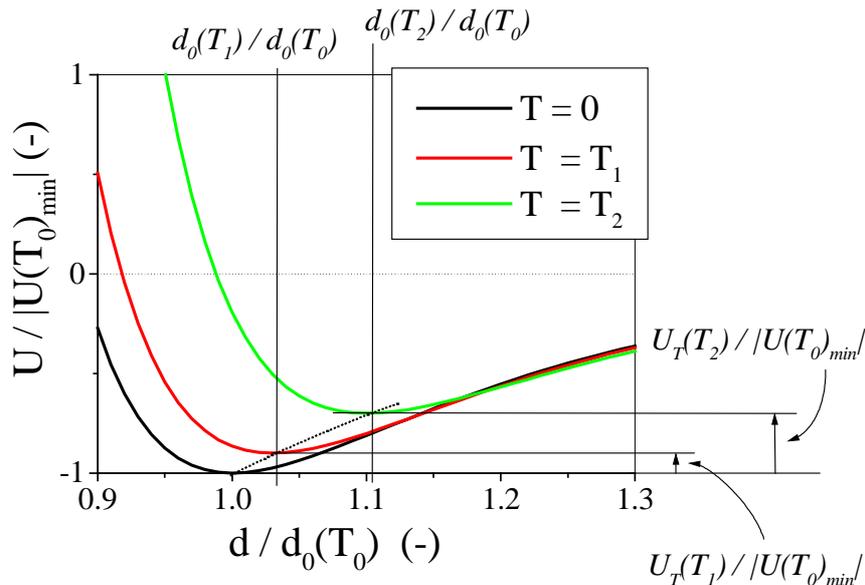
1.3. Comportement mécanique et échelles

Les propriétés mécaniques à l'échelle *macroscopiques* (échelle dont la dimension caractéristique est la taille du produit manufacturé) telles que l'élasticité et la dilatation thermique peuvent parfois (pour des matériaux homogènes) être directement reliées aux modèles atomique ou moléculaire. Il n'en est pas de même pour d'autres propriétés telles que la limite élastique ou la *résilience*. En effet, une ou plusieurs échelles intermédiaires peuvent rendre plus complexe le passage "micro-macro". Ces échelles intermédiaires sont celles où des mécanismes sont possibles. Par exemple, la limite élastique des aciers est principalement reliées aux mouvement de défauts dans le réseau cristallin. Ces défauts appelés *dislocations* permettent des glissements progressifs entre des plans atomiques en se propageant. La limite élastique théorique est surestimée (par un facteur 100 !) si on se place uniquement à l'échelle atomique en supposant un glissement cristallins par mouvement de blocs. Néanmoins, la compréhension des phénomènes physiques et mécanismes à l'échelle atomique est indispensable pour comprendre modéliser les mécanismes aux échelles intermédiaires afin de

remonter ensuite jusqu'au propriétés d'usage que nous mesurons en laboratoire. Toutes ces connaissances permettent d'optimiser les propriétés des matériaux.

1.4. Dilatation thermique

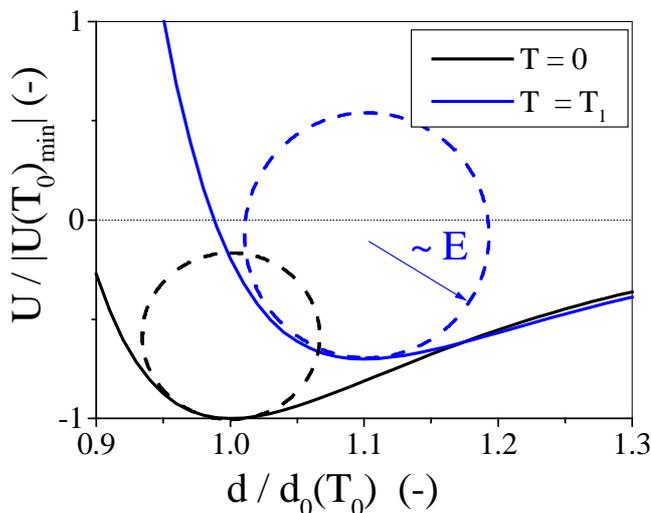
Au dessus du zéro absolu, il faut, en plus de l'énergie de cohésion, considérer qu'en la matière est stockée une énergie cinétique, $U_T(T)$, due à l'agitation thermique. Chaque atome "vibre" autour d'une position moyenne. Si la distance à $T = 0^\circ\text{K}$ est d_0 , la distance d_1 pour $T > 0^\circ\text{K}$ est plus grande que d_0 du fait de l'asymétrie des courbes $U(d)$ ou $F(d)$. En effet, lorsque les atomes se rapprochent, la force de répulsion augmente plus vite que la force d'attraction et le bilan se traduit par une augmentation de la distance d'équilibre.



Evolution schématique de l'énergie de cohésion avec la température.

Le coefficient de dilatation thermique ou linéique est donc directement lié à

$$\frac{1}{\Delta T} \frac{d_0(T + \Delta T) - d_0(T)}{d_0(T)}$$



Relation entre le module d'élasticité et la température.

On peut aussi mettre en évidence une relation entre la température et le module d'élasticité du matériau. Le module étant lié à la dérivée seconde de la courbe d'énergie de cohésion*, donc à sa courbure, plus le courbe est évasée, plus le module d'élasticité sera faible.

$$* E \sim \frac{\partial F}{\partial d} = \frac{\partial^2 U}{\partial d^2} \text{ (voir § 1.2)}$$

2. Les types de liaison

2.1. Généralités

L'électronégativité d'un élément est l'aptitude à fixer les électrons autour de son noyau. Selon leur électronégativité, les atomes ont plus ou moins tendance à compléter leur dernière couche électronique appelée *couche de valence* (voir annexe 1). L'électronégativité croît des colonnes 1 à 7 du tableau de la classification périodique des éléments. Les éléments les plus électronégatifs sont le Fluor et l'Oxygène tandis que le Césium et le Rubidium sont les moins électronégatifs. Les métaux sont généralement peu électronégatifs.

2.2. La liaison covalente

La liaison covalente est une liaison forte. Elle consiste en la mise en commun d'un ou plusieurs électrons afin de compléter la couche extérieure à huit électrons. Le nombre de premiers voisins d'un atome lié par covalence est $8 - N$ où N est le numéro de la colonne en chiffres romains dans le tableau périodique des éléments. Comme les électrons de covalence sont associés à des orbitales électroniques directionnelles, la liaison covalente a un caractère directionnel. Moins l'élément contient d'électrons, plus la liaison covalente est forte.

Exemple : le chlore ($17 e^-$ en $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$)

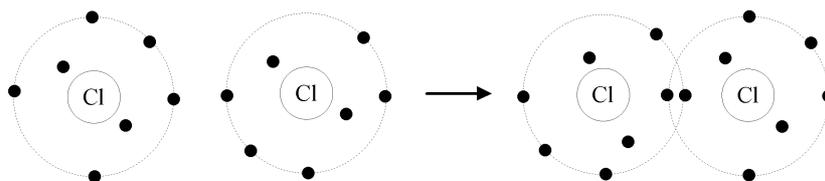


Schéma de principe pour la liaison covalente, illustré par le chlore. Seule la couche externe des électrons est représentée.

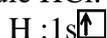
Pour qu'une *liaison homopolaire* (liaison entre éléments identiques) puisse s'établir, il faut que leur couche électronique externe soit au moins à moitié pleine (ce qui correspond aux colonnes IV B à VII B du tableau périodique).

2.2.1. Covalence proprement dite ($\uparrow \square - \square \uparrow$)

Chacun des atomes fournit un électron de sa couche externe occupant seul une case quantique (*électron impair ou célibataire*). Exemple : la molécule Cl_2 , présentée ci-avant dont la couche externe est représentée par $3s \uparrow \downarrow$ $3p \uparrow \downarrow \uparrow \downarrow$

2.2.2. Coordinence ($\uparrow \downarrow - \square$)

L'atome donneur fournit un doublet d'électrons déjà constitué dans sa couche externe et l'atome accepteur les reçoit dans une case quantique vide de sa couche externe. Exemple : la molécule HCl.



Réaction de H^+ en présence de Cl^- :



De même, H^+ réagit avec NH_3 pour donner NH_4^+ . La charge positive n'est plus attribuable à un atome d'hydrogène en particulier car ils sont devenus indiscernables. L'électron de la couche 3s est capté par H^+ .

2.2.3. Liaisons multiples

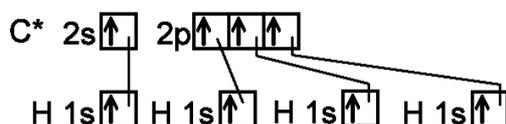
Les atomes peuvent mettre plusieurs doublets d'électrons en commun. Par exemple :

Double liaison pour O_2 : $O=O$ parfois représenté par $:\ddot{O}=\ddot{O}:$

Triple liaison pour N_3 : $N\equiv N$ parfois représenté par $:N\equiv N:$

2.2.4. Cas particulier du carbone

La chimie du carbone est parfois appelée la chimie du vivant. Le carbone ${}^{12}_{6}C$ a ses 6 électrons en $1s^2 2s^2$ et $2p^2$ ou encore $1s\uparrow\downarrow 2s\uparrow\downarrow 2p\uparrow\uparrow$ dans son *état fondamental* et pourtant il peut former 4 liaisons covalentes (il est "tétravalent"). Il peut donc être dans un *état de valence*, noté C^* , et représenté par $1s^2 2s^1$ et $2p^3$ ou encore $1s\uparrow\downarrow 2s\uparrow 2p\uparrow\uparrow\uparrow$. Ceci permet de former par exemple la molécule CH_4 .

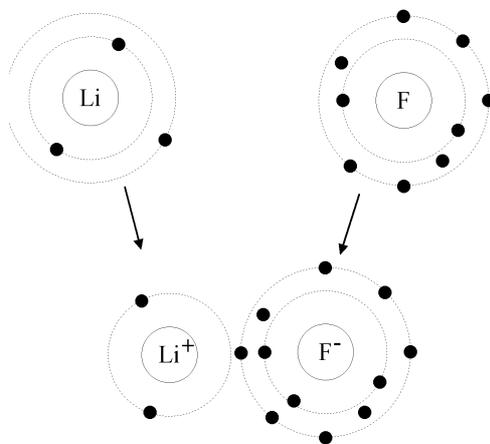


Détails des quatre liaisons covalentes du Méthane.

Un cas analogue est celui du phosphore avec deux configurations possibles. $P 3s\uparrow\downarrow 3p\uparrow\uparrow\uparrow$ se lie à 3 Cl par trois liaisons covalentes pour former la molécule PCl_3 tandis que $P^* 3s\uparrow 3p\uparrow\uparrow\uparrow 3d\uparrow\uparrow\uparrow$ se lie à 5 Cl par cinq liaisons covalentes pour former la molécule PCl_5 .

2.3. La liaison ionique

La liaison ionique est une liaison forte. Elle est obtenue par perte et gain d'électrons, ce qui confère une polarisation aux atomes. Un atome qui a donné un électron devient un ion positif ou *cation*. Un atome qui a accepté un électron devient un ion négatif ou *anion*. Les atomes tendent à compléter leur couche électronique extérieure.

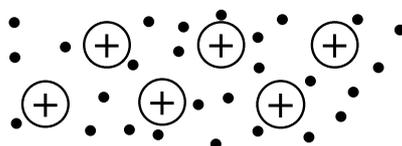


Formation du fluorure de lithium par liaison ionique.

La tendance à la liaison ionique entre deux éléments est dépendante du nombre d'électrons de valence. Par exemple dans le cas des éléments des colonnes VIB et VIIB du tableau de la classification périodique des éléments, éléments qui ont beaucoup d'électrons de valence, avec ceux des colonnes IA et IIA qui ont peu d'électrons de valence. La liaison ionique est d'autant plus forte que les électrons qui mis en jeu sont fortement liés au noyau (cas où le nombre d'électrons Z petit). La liaison ionique n'est pas directionnelle. Elle ne peut concerner deux éléments identiques.

2.4. La liaison métallique

La liaison métallique est une liaison forte. Elle consiste en la mise en commun des électrons de valence. Ils se forment un "nuage électronique" d'électrons délocalisés autour d'un ensemble d'ions. Lorsqu'un atome possède moins de 4 électrons sur la couche extérieure il est dit *électropositif*. C'est le cas des métaux. De 4 à 8 électrons, l'atome est dit électro-négatif. Exemples ${}_{11}\text{Na}$ dont les couches 1(K) et 2(L) sont complètes et $3s^1$. La liaison métallique crée des structures compactes hautement symétriques. La liberté des électrons favorise la conduction électrique.



Représentation schématique de la liaison métallique. Les noyaux sont les ions positifs baignant dans un nuage d'électrons.

2.5. Les liaisons mixtes

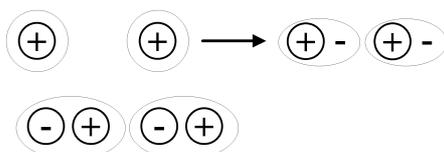
En réalité les liaisons pures sont rares. Par exemple HCl qui forme un dipôle H^+-Cl^- car les électrons sont d'avantage attirés par le noyau de l'atome de Chlore sont liés de façon ionique, Cl étant plus électro-négatif que H. Dans le cas du NaCl, la situation est moins simple puisque la liaison est ionique à 65 % et covalente à 35 %. Les colonnes les plus à droites du tableau de la classification périodiques des éléments correspondent à un caractère plus covalent de la liaison. En résumé, deux influences sont opposées :

- attraction des électrons par les noyaux (électro-négativité),
- capacité à partager des électrons

Toutes les liaisons pures et les liaisons mixtes sont fortes. Toutes les liaisons homopolaires (pas de différence d'électro-négativité) sont exclusivement covalentes. Toutes les liaisons *hétéropolaires* (liaison d'éléments différents) ont un caractère mixte.

2.6. Les liaisons de faible intensité

La *liaison de van der Waals* est une des liaisons faibles. Elle consiste en la formation d'un dipôle permanent. L'agitation thermique pouvant facilement briser cette liaison le point de fusion du solide constitué est donc bas. Les *forces de Keesom et de Debye* entre molécules polaires (*dipôles permanents ou induits*) sont aussi à l'origine de liaisons faibles.



Représentation schématique d'un dipôle induit (haut) et d'un dipôle permanent (bas).

La *liaison hydrogène ou pont hydrogène* est aussi à l'origine d'une liaison faible, par exemple dans le cas de la glace. Le seul proton de l'atome d'hydrogène attire peut les électrons qui se retrouvent localisés vers les noyaux plus lourds. En conséquence la molécule constituée est polarisée et chaque atome d'hydrogène est chargé positivement.

Enfin, les *forces de London* sont à l'origine de la solidification des gaz rares (ou nobles) aux très basses températures bien qu'il s'agisse d'atomes neutres ou de molécules non polaires. C'est le couplage du mouvement des électrons qui, donnant naissance à des dipôles instantanés, est à l'origine de cette liaison.

2.7. Tendances générales

Les propriétés physiques des matériaux sont fortement liées aux types de liaison qui assurent la cohésion à l'état solide. Le tableau ci-après résume les tendances générales.

Type de liaison	Exemple	Nature de la liaison	T_f	E	α	σ	Ductilité
Covalente	Diamant 7 éV/at.	e^- partagés et localisé	++	++	---	---	---
Ionique	NaCl 3.3 éV/at.	Echange d' e^- et attraction électrostatique	++	++	---	---	---
Métallique	Na 1.1 éV/at. Cu 3.5 éV/at. Ti 4.8 éV/at.	Nuage d' e^- en commun	+	+	-	+	++
Van der Waals	H ₂ 0.01 éV/at. CH ₄ 0.1 éV/at. Cl ₂ 0.3 éV/at.	Attraction dipolaire	---	---	++	---	-

Tableau récapitulatif des tendances générales pour quelques propriétés physiques.

T_f : °K ou °C, température de fusion E : MPa, module d'Young (si isotrope) ou raideur élastique α : °C ⁻¹ , coefficient de dilatation thermique ou linéique σ : Ohms ⁻¹ m ⁻¹ , conductivité électrique Ductilité : allongement à rupture par exemple	--- très faible - faible + peu élevé ++ élevé
--	--

Légende du tableau

Espace pour reproduire le tétraèdre de synthèse

3. Organisation de la matière à l'état solide

3.1. Généralités

Les états solide et liquide sont appelés *états condensés* de la matière. On distingue deux cas pour l'état solide, les états *amorphes* et *cristallins*. Pour les matériaux purs, la température de fusion est précisément définie. Pour les matériaux issus de mélange, on définira une plage de température de fusion dans laquelle les caractères fluides et solides des propriétés mécaniques se manifestent conjointement. C'est par exemple le cas des bitumes.

3.1.1. Solidification pour un corps pur

S'il s'agit d'un corps pur, le passage de l'état liquide à l'état solide se fait pour une température précisément définie, T_f , température de fusion. A cette température, la diminution de l'amplitude de l'agitation thermique des atomes ou molécules ¹ est telle que ceux-ci peuvent se lier. Ceux-ci s'agitent alors autour d'une position moyenne qui devient fixe ce qui produit un ordre à grande distance dans la matière. Dans le cas des métaux, des cristaux se forment à partir de *germes de cristallisation*. Ces germes sont d'autant plus nombreux que la température diminue vite. La taille des grains cristallins est donc d'autant plus petite que la température diminue vite.

3.1.2. Solidification pour des mélanges ou alliages

Lorsque, par exemple, il s'agit d'un système binaire, i. e. alliage de deux corps purs la température de fusion/solidification n'est plus précisément définie. Il existe une plage de température dans laquelle coexistent les phases liquide et solides. Plus le nombre de corps constituant la matière sont nombreux, plus complexe est la description du comportement aux alentours de la zone des températures de fusion. On parle de ramollissement du solide qui devient progressivement liquide. On se reportera, par exemple, aux *diagrammes d'équilibre des phases* pour approfondir les connaissances dans ce domaine.

3.2. Solides amorphes

Lorsque la solidification est suffisamment rapide pour figer les atomes ou molécules dans les positions spatiales (l'ordre à courte distance) qu'ils avaient à l'état liquide il se forme un solide amorphe. On parle alors de *verre*. Le caractère amorphe est souvent associé à la transparence du matériau comme dans le cas des verres de silice ou des verres organiques (polymères tels que PolyMéthacrylate de Méthyle, PolyCarbonate, PolyStyrène...).

3.3. Solides cristallins

Lorsque la solidification est suffisamment lente pour permettre une organisation spatiale des atomes ou molécules qui minimise l'énergie potentielle de conformation, un ordre à grande distance est possible et il se forme un solide cristallin. Cette "compaction" entraîne une masse volumique plus élevée que le même matériau à l'état amorphe. En *cristallographie*, on cherche à définir le motif de base qui se répète. C'est notamment le cas des métaux dont les structures cristallines classiques sont cubique à faces centrées (12 voisins), hexagonale compacte (12 voisins), cubique centrée (8 voisins). Les cristaux qui se forment croissent à partir de germes de cristallisation. Les joints de grains cristallins sont d'autant plus nombreux que ces germes ont été nombreux.

¹en fait, c'est leur énergie cinétique qui diminue

3.3.1. Défauts dans les réseaux cristallins

Pour comprendre, voire maîtriser, les propriétés mécaniques des matériaux, il faut considérer toutes les échelles pertinentes depuis celle des atomes jusqu'à celle du produit manufacturé. Par exemple, dans le cas des métaux, il faut particulièrement considérer l'échelle des dislocations et celle des grains pour comprendre les mécanismes de déformation.

Type	Nature	Ordre de grandeur typique pour les métaux à 20°C
Lacunes	Défaut ponctuel	Concentration = 10^{-15}
Défauts interstitiels	Défaut ponctuel	Concentration = 10^{-30}
Atomes étrangers	Défaut ponctuel	Concentration = 10^{-30}
précipités	"Défaut" ponctuel	5 nm à 0.1 μm
Dislocations (vis, coin, mixte)	Défaut linéaire	10^6 à 10^{12} cm/cm ³
Mâcles	Défaut surfacique	Variable selon la taille des grains (1 μm à 1 cm)
Joints de grains	Défaut surfacique	Variable selon la taille des grains (1 μm à 1 cm)

Défauts cristallins dans les métaux.

4. Propriétés mécaniques des métaux

4.1. Élasticité

Lorsque l'orientation des grains (cristaux) est aléatoire, l'élasticité est isotrope. Elle est linéaire et peu dépendante de la température et de la vitesse de sollicitation lorsque le métal est sollicité à des températures ambiantes bien inférieures à sa température de fusion. Ses caractéristiques élastiques sont étroitement liées aux distances inter atomiques et aux potentiels d'attraction répulsion. Pour l'élasticité et encore bien plus pour la plasticité, il faut distinguer les caractéristiques locales (1 grain) qui diffèrent de celles d'une grande population de grains. Le coefficient de Poisson, ν , vaut environ 0.33.

4.2. Plasticité

Les mêmes remarques que pour l'élasticité sont valables. En revanche, contrairement aux caractéristiques élastiques, les caractéristiques de la plasticité sont sensibles à la microstructure du métal. Les déformations plastiques ("permanentes", "résiduelles") impliquent uniquement des distorsions², c'est à dire qu'elles conservent le volume ou la densité du métal. Les allongements à rupture sont de l'ordre de quelques % à quelques dizaines de %.

² La déformation plastique générée par une contrainte de cisaillement s'appelle distorsion.

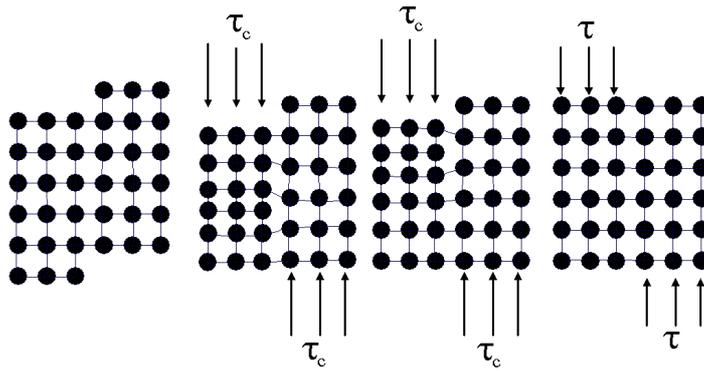


Schéma de principe montrant le déplacement d'une dislocation coin dans un cristal. Une dislocation préexistante traverse une région du cristal pour laisser une déformation plastique résiduelle (déformation permanente).

Un métal est un agrégat de grains cristallins. Bien que ces grains aient des propriétés mécaniques anisotropes, un grand nombre de grains présente généralement des propriétés mécaniques isotropes. Ceci est dû à la répartition généralement aléatoire des directions cristallographiques. Lorsqu'un métal est soumis à une sollicitation mécanique, à l'échelle microscopique, chaque grain subit une sollicitation mécanique qui peut être différente de la sollicitation moyenne appliquée à l'échelle macroscopique. Un grain est capable de se déformer plastiquement sous l'effet d'un cisaillement. Cette déformation plastique correspond à des glissements entre plans d'atomes, dans différents plans du cristal³. Pour un métal qui n'a encore subi aucune déformation plastique, la sortie du domaine élastique se fait donc progressivement jusqu'à ce que tous les grains participent à la déformation plastique. La limite élastique correspond donc au mouvement des dislocations et non à la contrainte bien plus élevée qui correspondrait à des déplacements relatifs de blocs rigides. Cependant la contrainte macroscopique – moyenne – appliquée évolue peu au cours de cette mise en déformation plastique de tous les grains.

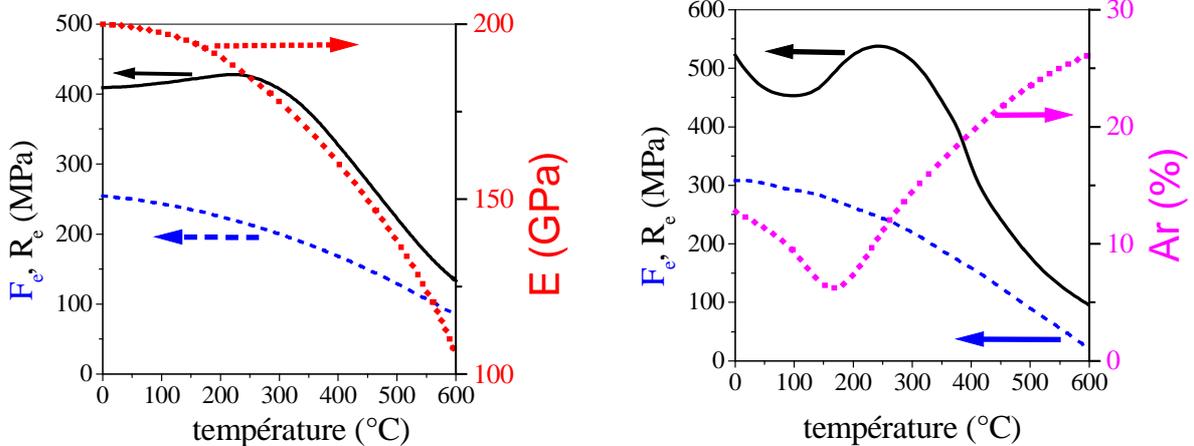
Métal	Module d'Young macroscopique (GPa)	Coef. de Poisson	Densité (kg / m ³)	Coef. De dilatation linéaire (°C ⁻¹)	Conductivité thermique (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Température de fusion (°C)
Al	68	0.33	2700	2.5 10 ⁻⁵	210	660
Ag	76	0.38	10500	1.96 10 ⁻⁵	420	962
Cu	110	0.34	8960	1.65 10 ⁻⁵	385	1083
Fe	200	0.29	7870	1.2 10 ⁻⁵	76	1535
Mg	44	0.35	1740	2.6 10 ⁻⁵	160	649
Ni	210	0.31	8880	1.3 10 ⁻⁵	61	1455
Ti	116	0.34	4500	0.9 10 ⁻⁵	17	1660
Zn	90	0.25	7100	3.1 10 ⁻⁵	110	420
Pb	14	0.42	11340	2.9 10 ⁻⁵	33	327
Sn	42	0.33	5765	2.4 10 ⁻⁵	63	232

Quelques caractéristiques physiques de métaux purs à 20°C.

³ Ceci justifie que la déformation plastique des métaux s'effectue à volume constant.

Métaux et alliages	Limite d'élasticité (MPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à rupture (%)
Aluminium pur	20 (recuit) à 100 (écroui)	45 à 120	50 à 7
Al-7075 recuit	100	225	16
Al-7075 trempé	500	570	11
Fer pur recuit	120	250	38
Acier au carbone	430 à 1800	800 à 2800	14 à 1.6

Caractéristiques mécaniques de métaux purs et alliages à 20°C.



Variations des caractéristiques de deux aciers de type acier doux avec la température.

4.3. Limite élastique et critères de plasticité

La limite élastique est souvent mesurée en traction uniaxiale. Ceci correspond, par exemple, au cas particulier de l'état de contrainte dans une poutre fléchie en absence d'effort tranchant significatif. Dans le cas général, il faut considérer que le métal est dans un état de contrainte triaxial et être capable de définir la limite élastique. Pour les métaux, les critères de plasticité sont indépendants de la pression hydrostatique, i.e. seuls les cisaillements interviennent dans le critère⁴. Les critères les plus classiquement utilisés sont celui de Tresca, associé à la plus grande contrainte de cisaillement, et celui de von Mises, associé à l'énergie de cisaillement. Dans le repère principal des contraintes ces critères s'expriment :

$$\text{Critère de Tresca : } (\sigma_1 - \sigma_3) / 2 < \sigma_y \Leftrightarrow \text{élasticité}$$

$$\text{Critère de von Mises : } \sqrt{1/2\{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2\}} < \sigma_y \Leftrightarrow \text{élasticité}$$

où σ_y désigne la limite élastique (indice y pour "yield stress") et $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$ désignent les contraintes dans le repère principal.

⁴ Cette quasi-insensibilité à la pression hydrostatique n'est généralement pas le cas des sols ou des polymères dont les critères sont dits piézo-dépendants.

Exemple. Considérons une poutre fléchie par un moment fléchissant M_z et soumise à un effort tranchant T_y et à un effort normal N_x . En utilisant les notations usuelles du cours de résistance des matériaux, si la théorie des poutres s'applique, on peut écrire que :

$$\sigma = \frac{N_x(x)}{A} + \frac{M_z(x) y}{I_{Gz}}$$

et que :

$$\tau = \frac{T_y(x) S(y)}{b I_{Gz}}$$

à une altitude y dans la poutre à une abscisse x . On calcule ensuite les contraintes principales qui valent $\sigma_1 = 1/2\{\sigma + \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}\}$, $\sigma_2 = 0$ et $\sigma_3 = 1/2\{\sigma - \sqrt{\sigma^2 + \tau^2}\}$ dans ce cas particulier où les contraintes autres que σ et τ sont nulles. Enfin, on calcule la combinaison de ces contraintes qui correspond au critère convenable pour le métal utilisé (von Mises le plus souvent) que l'on compare à la donnée matériau σ_y , mesurée en laboratoire. Cet exemple permet de comprendre les règles de calcul aux ELU (couplages entre M_{ELU} , T_{ELU} et N_{ELU}) en construction métallique.

4.4. Ecrouissage

On appelle *durcissement des métaux ou écrouissage* l'augmentation de la contrainte d'écoulement plastique, i. e. de la limite élastique, σ_y , avec la déformation plastique. Son origine est essentiellement liée au mouvement des dislocations au sein des grains métalliques. Les dislocations sont des défauts d'empilement dans la structure cristalline. Le mouvement de ces défauts permet de "faire glisser" progressivement un plan cristallin sur un autre et ainsi le métal peut accommoder la déformation qui lui est imposée (avant rupture bien sûr). Citons quelques propriétés des dislocations :

- les dislocations ne peuvent pas traverser les joints de grains,
- les dislocations se repoussent - des forces thermodynamiques tendent à les éloigner au maximum pour minimiser l'énergie potentielle de la structure cristalline,
- lorsqu'une dislocation croise un obstacle tel qu'une autre dislocation⁵ (dans d'autres plans de glissement) ou un gros précipité⁶ elle se dédouble⁷.

En conséquence, au cours de la déformation plastique, l'empilement des dislocations aux joints de grains ainsi que leur multiplication rend les glissements de plus en plus difficiles. La contrainte doit donc augmenter pour que la déformation plastique puisse se poursuivre. Réciproquement, si la déformation plastique est imposée, le métal oppose de plus en plus de résistance.

4.5. Fluage et relaxation

Fluage et relaxation ont la même origine physique et ne se différencient que par les conditions aux limites lors des tests de laboratoire. Il s'agit de mesurer une déformation permanente fonction du temps pour une contrainte inférieure à la limite élastique⁸. Dans le cas du fluage on maintient une contrainte constante tandis que dans le cas de la relaxation on maintient une déformation constante. Les déformations de fluage sont possibles dans les métaux à basses températures, typiquement pour $T < 0.5 T_f$, par réarrangements atomiques. Ceux-ci sont favorisés par la présence de lacunes. A plus hautes températures, des

⁵ Les dislocations progressent dans plusieurs plans de glissement distincts au sein d'un même cristal.

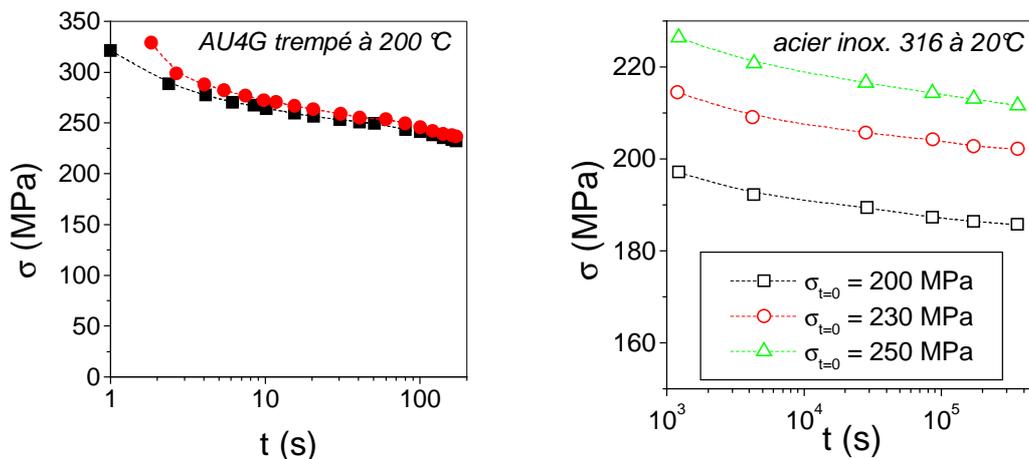
⁶ Elle peut cisailer les petits précipités.

⁷ Mot clef pour approfondir : "source de Frank et Read".

⁸ Au delà de la limite élastique on parlera de viscoplasticité.

mouvements de dislocations contribuent fortement au fluage. Le fluage/relaxation est un mécanisme thermiquement activé.

Espace pour reproduire les schémas de principe des essais de fluage et relaxation

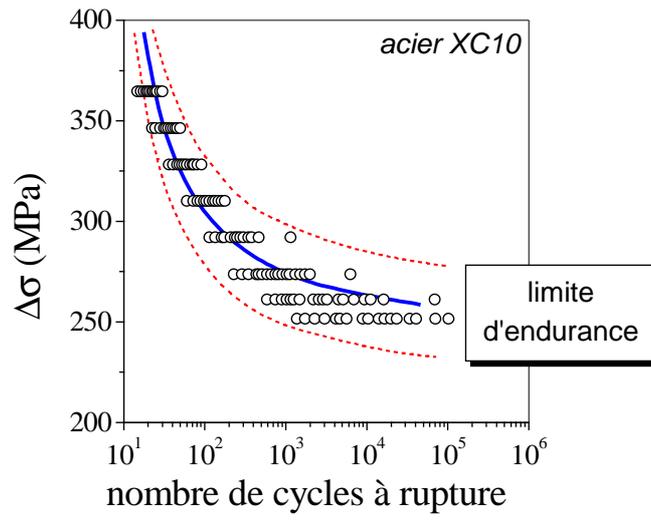


Exemples de résultats d'essais de relaxation sur métaux.

4.6. Fatigue

On désigne par fatigue l'endommagement des matériaux sous sollicitations mécaniques cycliques, alternées ou simplement variables. En laboratoire, on caractérise les matériaux à la fatigue presque toujours avec des sollicitations cycliques⁹. Lorsque le matériau est sollicité au-delà de sa limite élastique, le nombre de cycles à rupture est faible et l'on parle de fatigue oligocyclique. Certains matériaux admettent une limite d'endurance, c'est à dire qu'il existe une sollicitation en dessous de laquelle la rupture n'est jamais observée. La rupture, lorsqu'elle intervient, s'amorce sur des défauts intrinsèques (microfissure, crique...) ou extrinsèques (rayure, poinçonnement...) qui croissent jusqu'à la ruine de la structure. On représente souvent la tenue en fatigue à l'aide de courbe de Wöhler.

⁹ On remarque que, la plupart du temps, comme dans le cas des séismes par exemple, ce ne sont pas les données matériaux qui manquent mais le spectre de la sollicitation qui est méconnu.



Courbe de Wöhler illustrant des résultats d'essais de fatigue.

4.7. Exercice 1. Dilatation différentielle dans les matériaux composites

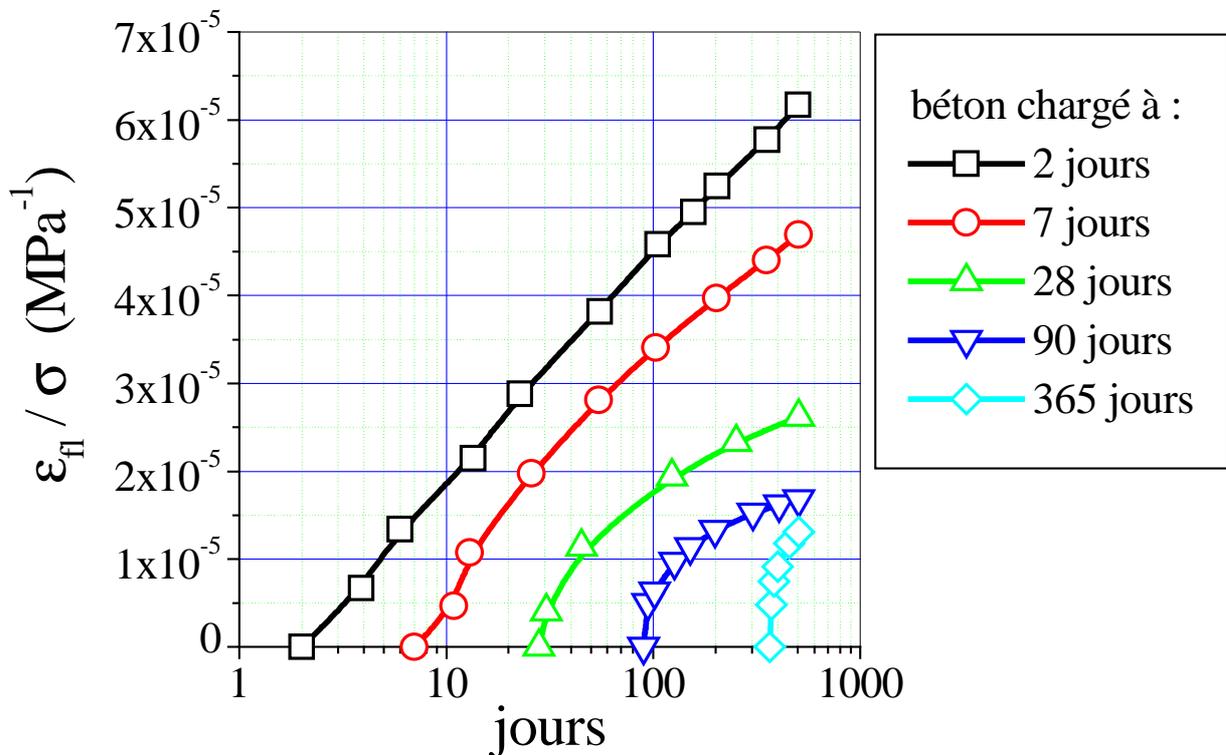
Si l'on souhaite fabriquer un matériau composite, il faut, entre autres, se soucier des dilatations différentielles liées à la température. Il faut pour cela connaître les plages de températures d'utilisation ainsi que les limites admissibles en traction et compression des matériaux que l'on souhaite associer.

Prenons l'exemple du béton armé. Le coefficient de dilatation thermique du béton varie de 7 à 13 $\mu\text{m}/\text{m}^\circ\text{C}$ et son module d'Young se situe généralement entre 20 et 40 GPa. Considérons une section de béton de 25 x 25 cm^2 armée longitudinalement par 4 HA 16. Si l'on suppose que le béton a durci à 30 $^\circ\text{C}$ et qu'il passe à -10 $^\circ\text{C}$, calculez les contraintes dans les aciers et le béton liées à la dilatation thermique différentielle.

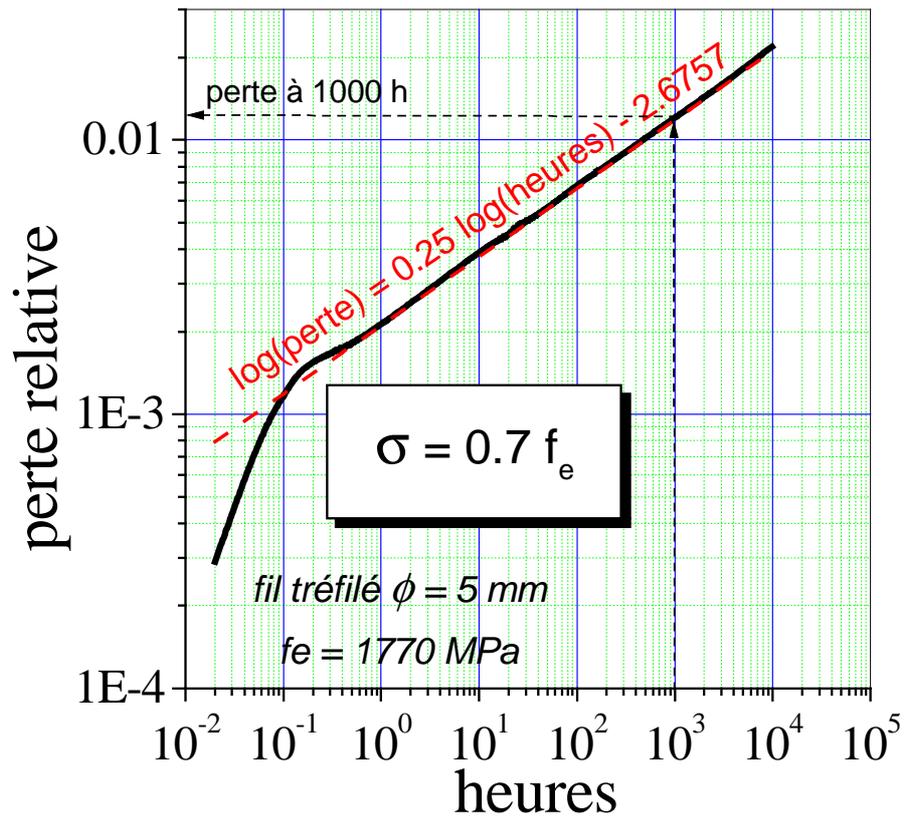
4.8. Exercice 2. Perte de précontrainte dans les aciers

Le fluage/relaxation des aciers, en concomitance avec le fluage/relaxation du béton, sont à l'origine des pertes de précontrainte dans les structures en béton précontraint. Les aciers de précontraintes sont des aciers à haute teneur en carbone et donc à très haute limite élastique.

On considère un potelet préfabriqué de section carrée, 5 x 5 cm^2 , en béton précontraint. L'armature est un fil tréfilé de diamètre 5 mm positionnée au centre de la section. Il est précontraint à 0.7 f_e , soit 1240 MPa. Le module d'Young du béton est évalué à 35 GPa. A l'aide des informations contenues dans les deux figures suivantes, estimez les pertes de précontraintes à 28, 100 et 1000 jours. Compte tenu du durcissement accéléré lié à l'étuvage, on pourra considérer que le béton est mis en précontrainte à 28 jours. Justifiez que l'on parle dans ce cas de relaxation des aciers et de fluage du béton.



Courbes maîtresses pour le fluage d'un béton.



Relaxation d'un acier de précontrainte.

4.9. Solution de l'exercice 1. Dilatation différentielle dans les matériaux composites

Conformément aux règlements de construction en béton armé et/ou précontraint en vigueur, nous considérerons que le module d'Young des aciers vaut $E_a = 200$ GPa. On considérera que celui du béton, E_b , varie entre 20 et 40 GPa.

Section d'acier : 4 HA 16 $\Omega_a = 8.04$ cm²

Section de béton : $\Omega_b \approx 625$ cm²

Variation de température : $\Delta T = -30 - 10 = -40$ °C

Coefficients de dilatation : pour l'acier $\alpha_a = 1.2 \cdot 10^{-5}$ et pour le béton α_b varie de 0.7 à $1.3 \cdot 10^{-5}$.

Coefficients de dilatation : pour l'acier $\alpha_a = 1.2 \cdot 10^{-5}$ et pour le béton α_b varie de 0.7 à $1.3 \cdot 10^{-5}$.

Les sections droites restent droites (hypothèse de Navier) donc les déformations dans l'acier et le béton sont identiques. Ceci s'exprime par :

$$\epsilon_a = \epsilon_b \quad (1)$$

où ϵ_a et ϵ_b sont respectivement les déformations dans l'acier et le béton. La déformation dans l'acier est la somme d'une déformation d'origine thermique ϵ_a^{th} et d'une déformation d'origine mécanique ϵ_a^m . Il en est de même pour le béton. On peut donc écrire que :

$$\epsilon_a = \epsilon_a^{th} + \epsilon_a^m = \epsilon_b^{th} + \epsilon_b^m = \epsilon_b$$

où $\epsilon_a^{th} = \alpha_a \Delta T$ et $\epsilon_b^{th} = \alpha_b \Delta T$ et $\epsilon_a^m = \sigma_a / E_a$ et $\epsilon_b^m = \sigma_b / E_b$, σ_a et σ_b étant respectivement les contraintes dans l'acier et le béton. Il vient donc :

$$\alpha_a \Delta T + \sigma_a / E_a = \alpha_b \Delta T + \sigma_b / E_b$$

Par ailleurs, les contraintes liées à la dilatation différentielle sont auto-équilibrées, c'est à dire qu'elles n'engendrent pas d'effort normal extérieur. On peut donc exprimer l'équation d'équilibre par :

$$\sigma_a \Omega_a + \sigma_b \Omega_b = 0 \quad (2)$$

En combinant les équations (1) et (2), il vient :

$$\sigma_a = \frac{(\alpha_a - \alpha_b) \Delta T}{1 / E_a + \Omega_a / (\Omega_b E_b)}$$

Application numérique.

α_b (°C ⁻¹)	E_b (GPa)	σ_a (MPa)	σ_b (MPa)
$0.7 \cdot 10^{-5}$	20	-35.5	0.45
$0.7 \cdot 10^{-5}$	40	-37.6	0.48
$1.3 \cdot 10^{-5}$	20	7.1	-0.091
$1.3 \cdot 10^{-5}$	40	7.5	-0.096

Remarque : en toute rigueur, le problème étant tridimensionnel, il faudrait aussi considérer l'effet des incompatibilités de déformation thermique radiale induites par la dilatation différentielle. Dans le cas général ($\alpha_a \neq \alpha_b$), le diamètre de l'acier change avec la température de façon différente de "son logement" dans le béton. Les déformations thermiques induisent donc des déformations élastiques qui rendent compatibles les déformations totales.

4.10. Solution de l'exercice 2. Perte de précontrainte dans les aciers

Conformément aux règlements de construction en béton armé et/ou précontraint en vigueur, nous considérerons que le module d'Young des aciers vaut $E_a = 200$ GPa et que celui du béton, E_b , vaut 40 GPa et qu'ils varient pas, en première approximation, avec le temps.

Section d'acier : $\Omega_a = 0.196$ cm²

Section de béton : $\Omega_b \approx 25$ cm²

L'équilibre implique qu'en l'absence d'effort extérieur l'intégrale des contraintes normales sur la section soit nulle, ce qui se traduit par :

$$N_a + N_b = \sigma_a \Omega_a + \sigma_b \Omega_b = 0 \quad (1)$$

Estimons que $\sigma_a = 1240$ MPa (traction) donc $N_a = \sigma_a \Omega_a = 19.6 \cdot 1240 \approx 24$ KN en traction. Il vient $\sigma_b = -\sigma_a \Omega_a / \Omega_b \approx -9.7$ MPa. Les déformations correspondantes en traction et compression uniaxiales valent $\varepsilon_a = \sigma_a / E_a \approx 0.62$ % et $\varepsilon_b = \sigma_b / E_b \approx -2.43 \cdot 10^{-4}$. A l'aide des figures fournies dans l'énoncé, il est possible de calculer les pertes de précontraintes à 28 jours en faisant l'hypothèse de petites variations des contraintes et déformations, i. e. en considérant celles-ci constantes dans l'intervalle de temps considéré.

Perte de précontrainte de l'acier à 28 jours, soit $h = 672$ heures :

perte = $10^{(0.25 \log(h) - 2.6757)} \approx 0.0107$ d'où $\sigma_a(28 \text{ jours}) \approx 1240 - 0.0107 \times 1240 \approx 1227$ MPa.

Pendant cette même période le béton flue en compression sous l'action de -9.7 MPa. Le fluage est estimé, en lecture graphique, à $1.26 \cdot 10^{-5} \cdot 9.7 \approx 1.22 \cdot 10^{-4}$ en compression donc $\varepsilon_b(28 \text{ jours}) = \varepsilon_b(t=0) + \varepsilon_{fl}(28 \text{ jours}) \approx -2.43 \cdot 10^{-4} - 1.22 \cdot 10^{-4} \approx -3.65 \cdot 10^{-4}$. Par définition, la déformation de fluage se fait à contrainte constante. Cette contrainte est maintenue par l'acier, supposée constante dans l'intervalle de temps considéré. Mais réciproquement le béton maintient l'acier tendu. L'hypothèse de Navier étant toujours valable, la déformation dans l'acier et le béton sont égales. L'acier subit donc une variation de déformation identique à celle du béton, soit $\varepsilon_a(28 \text{ jours}) = 62 \cdot 10^{-4} - 1.22 \cdot 10^{-4} \approx 60.8 \cdot 10^{-4}$. La variation de contrainte dans l'acier liée à la modification de la déformation qui lui est imposée vaut $\Delta\sigma_a(28 \text{ jours}) = \varepsilon_{fl}(28 \text{ jours}) E_a \approx -1.22 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^5 \approx -24.4$ MPa, c'est à dire que $\sigma_a(28 \text{ jours}) \approx 1227 - 24.4 \approx 1203$ MPa. La perte totale à 28 jours est donc estimée à 3 % de la précontrainte initiale, ce qui valide l'hypothèse de contrainte quasiment constante dans le béton durant les 28 jours considérés. En comparant la déformation de fluage et la déformation initiale de l'acier, on valide aussi l'hypothèse de maintien d'une déformation de l'acier quasiment constante.

Perte de précontrainte de l'acier à 100 jours, soit $h = 2400$ heures :

Il faut actualiser les valeurs puis estimer le cumul des effets du temps.

A $t = 28$ jours, $\sigma_a = 1203$ MPa, $\varepsilon_a \approx 60.8 \cdot 10^{-4}$, $\sigma_b = -\sigma_a \Omega_a / \Omega_b \approx -9.4$ MPa. Il est loisible d'estimer que la perte liée à la relaxation dans l'acier correspond au différentiel de la perte à 28 et 100 jours appliquée à la contrainte actualisée, ce qui donne :

$$\Delta\text{perte} \approx 10^{(0.25 \log(2400) - 2.6757)} - 0.0107 \approx 0.0148 - 0.0107 = 0.0041$$

$$\text{d'où } \Delta\sigma_a(28 \text{ jours} \rightarrow 100 \text{ jours}) \approx 0.0041 \times 1203 \approx 4.9 \text{ MPa}$$

$$\text{puis } \Delta\varepsilon_{fl}(28 \text{ jours} \rightarrow 100 \text{ jours}) \approx 1.92 \cdot 10^{-5} - 1.26 \cdot 10^{-5} \times -9.4 \approx -6.2 \cdot 10^{-5},$$

en appliquant la même règle de cumul que pour la relaxation basée sur le différentiel entre 28 jours et 100 jours appliqué à la contrainte actualisée. De même que précédemment, on peut raisonnablement estimer que :

$$\Delta\sigma_a(28 \text{ jours} \rightarrow 100 \text{ jours}) = \varepsilon_{fl}(28 \text{ jours} \rightarrow 100 \text{ jours}) E_a \approx -6.2 \cdot 10^{-5} \cdot 2 \cdot 10^5 \approx -12.4 \text{ MPa}$$

de sorte qu'au total la perte de précontrainte entre 28 et 100 jours vaut environ $12.4 + 4.9 = 17.3$ MPa, soit $\sigma_a(100 \text{ jours}) \approx 1203 - 17.3 \approx 1186$ MPa, c'est à dire environ 4.3 % de la précontrainte initiale.

Perte de précontrainte de l'acier à 1000 jours, soit $h = 24000$ heures :

On procède comme précédemment :

A $t = 100$ jours :

$$\sigma_a = 1185 \text{ MPa}, \varepsilon_a \approx 60.8 \cdot 10^{-4} - 6.2 \cdot 10^{-5} \approx 60.2 \cdot 10^{-4}, \sigma_b = -\sigma_a \Omega_a / \Omega_b \approx -9.3 \text{ MPa}.$$

$$\Delta \text{perte} \approx 10^{(0.25 \log(24000) - 2.6757)} - 0.0148 \approx 0.0263 - 0.0148 = 0.0115$$

$$\text{d'où } \Delta \sigma_a(100 \text{ jours} \rightarrow 1000 \text{ jours}) \approx 0.0115 \times 1185 \approx 13.6 \text{ MPa}$$

$$\text{puis } \Delta \varepsilon_{fl}(100 \text{ jours} \rightarrow 1000 \text{ jours}) \approx 2.94 \cdot 10^{-5} - 1.92 \cdot 10^{-5} \times -9.3 \approx -9.5 \cdot 10^{-5},$$

$$\Delta \sigma_a(100 \text{ jours} \rightarrow 1000 \text{ jours}) = \varepsilon_{fl}(100 \text{ jours} \rightarrow 1000 \text{ jours}) E_a \approx -9.5 \cdot 10^{-5} \times 2 \cdot 10^5 \approx -19 \text{ MPa}$$

de sorte qu'au total la perte de précontrainte entre 100 et 1000 jours vaut environ $13.6 + 19 = 32.6$ MPa, soit $\sigma_a(1000 \text{ jours}) \approx 1185 - 32.6 \approx 1152$ MPa, c'est à dire environ 7 % de la précontrainte initiale.

A propos des intervalles de temps choisis : si l'on avait considéré que fluage et relaxation se font à contrainte et déformations constantes, i. e. si l'on n'actualise pas les valeurs, on aurait obtenu les résultats suivants :

$$\Delta \sigma_a \approx 10^{(0.25 \log(24000) - 2.6757)} \times 1240 \approx 32.6 \text{ MPa} \text{ et } \varepsilon_{fl} \approx 2.94 \cdot 10^{-5} \times -9.7 \approx -2.85 \cdot 10^{-4}$$

d'où $\sigma_a(1000 \text{ jours}) \approx 1240 - 32.6 - 2.85 \cdot 10^{-4} \times 2 \cdot 10^5 \approx 1150$ MPa donc on aurait légèrement surestimé les valeurs (on surestime d'autant plus que l'on choisit des intervalles de temps longs pour actualiser les valeurs).

Concomitance des effets de fluage et relaxation : L'exemple traité montre que l'on peut en première approximation considérer que l'acier est soumis à une déformation constante et donc utiliser les résultats d'essais de relaxation de ce matériau. De même, il montre que le béton est soumis en première approximation à une contrainte constante et on peut donc utiliser les résultats des essais de fluage de ce matériau. Les pertes liées au fluage et à la relaxation sont du même ordre de grandeur. Leur proportion dépend du rapport Ω_a / Ω_b .

5. Annexe 1 : Indications concernant la position des électrons autour du noyau

Atome : constitué de N neutrons, Z protons et électrons (e^-)

Nombre de masse : $A = N + Z$

Un **nucléide** est noté A_ZX et prononcé "AZX" et définit par A et Z. Par exemple, les nucléides ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ et ${}^{37}_{17}\text{Cl}$ sont deux **isotopes** de l'atome de Chlore. Un **élément** est définit par le nombre Z. Par exemple l'élément Chlore est noté ${}_{17}\text{Cl}$.

Les quatre nombres quantiques

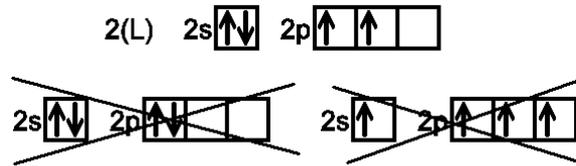
symbole	nom	valeurs
n	principal	1, 2, 3, 4... $n \geq 1$ dénomination de la couche K, L, M...
l	secondaire ou azimutal	0, 1, 2... $(n-1)$ $0 \leq l \leq (n-1)$ dénomination de la sous couche s, p, d, f
m	Magnétique	-1, -1+1, ..., 0, ...1-1, 1 $-1 \leq m \leq l$ case quantique
s	spin	-1/2 +1/2

L'organisation du nuage électronique

couche n =	sous couche l =	case quantique m =	spin s =	nombre d' e^-	
1 dénomination K	0 dénomination 1s	0	-1/2, +1/2	2	
2 dénomination L	0 dénomination 2s	0	-1/2, +1/2	2 8	
	1 dénomination 2p	-1	-1/2, +1/2		
		0	-1/2, +1/2		
3 dénomination M	1 dénomination 3p	1	-1/2, +1/2	6	
		0	-1/2, +1/2		
		1	-1/2, +1/2		
	2 dénomination 3p	2	-2	-1/2, +1/2	10
			-1	-1/2, +1/2	
			0	-1/2, +1/2	
			1	-1/2, +1/2	
2	-1/2, +1/2				
etc	

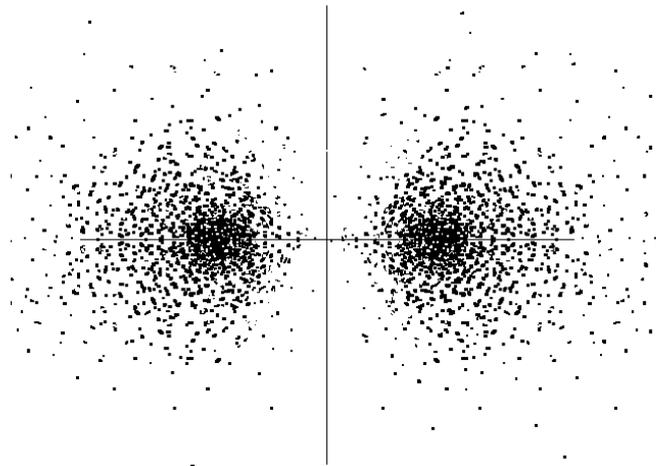
$n = 1$ correspond à la trajectoire la plus proche du noyau. Lorsque n augmente, l'électron tend à s'éloigner du noyau et son niveau d'énergie augmente. Le niveau d'énergie augmente aussi lorsque l augmente : le niveau d'énergie croît des sous couches s, p, d à f.

Représentation classique et remplissage des couches électroniques :



Le remplissage se fait dans l'ordre suivant 1s puis 2s, 2p, 3s, 3p, 4s, 3d, 4p, 5s, 4d, 5p, 6s, 4f, 5d, 6p, 7s... (voir la règle de Klechkowski dans les ouvrages spécialisés).

Contrairement aux orbitales de type s qui possèdent une symétrie sphérique, les orbitales p ont un caractère directionnel (selon x, y et z)



Visualisation schématique de la probabilité de présence de l'électron autour du noyau dans le cas de l'orbitale "2 p" (état non excité).

6. Annexe 2 : Ouvrages de références

Chimie physique, cours, par Paul Arnaud aux éditions Dunod.

Des matériaux, par Jean-Paul Baïlon et Jean-Marie Dorlot aux Presses internationales Polytechniques.

Introduction à la science des matériaux, par Jean P. Mercier, Gérald Zambelli et Wilfried Kurz aux Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.

7. Annexe 3 : Classification périodique des éléments

Li : Solide à 25°C, sous 1 bar
Br : Liquide à 25°C, sous 1 bar
He : Gaz à 25°C, sous 1 bar
Tc : Obtenu par synthèse

■ Gaz nobles
■ Non-métaux
■ Semi-conducteurs
■ Métaux
■ Lanthanides et actinides

1	IA 1 H	IIA 4 He																	VIII 2 He					
2	3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
3	11 Na	12 Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VIII				IB	II B	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar					
4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr						
5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe						
6	55 Cs	56 Ba	71 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn						
7	87 Fr	88 Ra	103 Lw	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Uun	111 Uuu	112 Uub												
			■ Lanthanides et actinides																					
Série des Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb								
Série des Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No								