

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2006 - Partie D

TITRE :

La dualité du matériau verre

Temps de préparation :2 h 15 minutes

Temps de présentation devant le jury :10 minutes

Entretien avec le jury :10 minutes

GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 15 pages

- Document principal : 13 pages
- Documents complémentaires : Glossaire (2 pages)

Travail suggéré au candidat :

Après avoir résumé brièvement le dossier, le candidat pourra par exemple :

- Insister sur les différences entre solides cristallins et verres
- Mettre en évidence les paradoxes liés au matériau verre

CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.

* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, *etc.*) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2006 - Partie D

La dualité du matériau verre

1. Introduction et historique

5

Le verre est connu et utilisé depuis très longtemps. La légende situe son berceau en Phénicie (région historique du littoral Syro-Palestinien) et en Egypte, 50 siècles avant Jésus-Christ. Son art se développe par la suite non seulement en Egypte mais également dans tous les pays du Moyen-Orient, d'Extrême-Orient et en Asie Mineure. Il apparaît en Mésopotamie dans la fabrication des perles et des bijoux : le plus ancien collier connu aurait ainsi 4000 ans. C'est également en Mésopotamie, puis en Egypte, que le verre massif apparaît. Les compositions verrières n'y sont alors pas très éloignées des compositions actuelles. Le XV^{ème} siècle avant Jésus-Christ voit l'apparition et le développement du verre creux. Sa fabrication se fait à l'aide d'un noyau de sable ou d'argile trempé dans le bain visqueux des matières premières en fusion, ou sur lequel était enroulé un cordon du liquide visqueux. Ce sont les Phéniciens qui, 300 ans avant Jésus-Christ, ont découvert la technique du soufflage pour la réalisation des objets creux. Depuis, pendant des siècles, les progrès du verre sont associés aux techniques d'élaboration et de mise en forme. La composition chimique a aussi été l'objet de nombreux travaux, ce qui a conduit à une quantité pratiquement infinie de compositions permettant de formuler des verres répondant à une fonction souhaitée.

10
15
20

Le verre est un matériau si ancien et maintenant si courant (presque indispensable) que l'on pourrait, de prime abord, se demander s'il fait encore l'objet de recherches, et si oui dans quel but. Pourtant, en dépit de son histoire déjà ancienne, le verre reste un matériau complexe et peu compris. Le seul mot « verre » peut prendre des significations variées : si dans le langage courant ce terme sert à désigner un matériau fragile et transparent, dans le langage scientifique son sens est bien plus vaste, mais aussi plus difficile à définir avec précision, et sujet à évolution. Le verre n'en a ainsi que plus d'intérêt pour la communauté scientifique.

25

Ainsi ce dossier, en revenant sur la définition thermodynamique d'un verre, essayera de montrer que ce matériau peut être présenté à la fois comme un solide ou comme un liquide et qu'en dépit d'une apparente stabilité, il s'agit en réalité d'un matériau « hors d'équilibre ».

30

La multitude des compositions possibles, qui sera également mise en évidence, nous amènera à conclure qu'il vaut mieux parler « des verres » que « du verre ». Ce point est fondamental et nécessite toute l'attention de l'ingénieur : on montrera en quoi la composition chimique influe directement sur l'obtention des propriétés macroscopiques finales du matériau.

Ces principales propriétés seront également abordées en dernière partie du dossier. Elles sont parfois opposées : transparence à certaines longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique et opacité à d'autres ; grande résistance mécanique et fragilité, deux termes souvent opposés dans le langage commun.

40

2. Qu'est-ce qu'un verre ?

2.1 Rappel sur les états de la matière

Selon la température et la pression, les composés chimiques se rencontrent sous divers états de la matière. Les trois états usuels sont le gaz, le liquide et le cristal. L'état gazeux est caractérisé par le fait que les molécules sont distantes les unes des autres. Elles sont animées d'un mouvement aléatoire, désordonné. L'état gazeux est un état désordonné non condensé. Dans l'état liquide, les molécules sont nettement plus proches les unes des autres. L'arrangement atomique est désordonné à longue distance mais peut présenter un ordre à courte distance, c'est-à-dire aux premiers voisins. Cet état condensé a la faculté de s'écouler. Le solide cristallin correspond à un arrangement ordonné des atomes suivant une séquence qui se traduit par un type de structure. Cet état condensé et ordonné présente les propriétés d'un solide. Les atomes vibrent autour d'une position d'équilibre déterminée. Ils n'ont pas la possibilité de se déplacer sur une distance plus importante.

Il existe 7 séquences cristallines : cubique, quadratique, hexagonale, rhomboédrique, orthorhombique, monoclinique et triclinique.

Le schéma ci-dessous représente le triangle des changements de phase entre les trois états de la matière précédemment décrits.

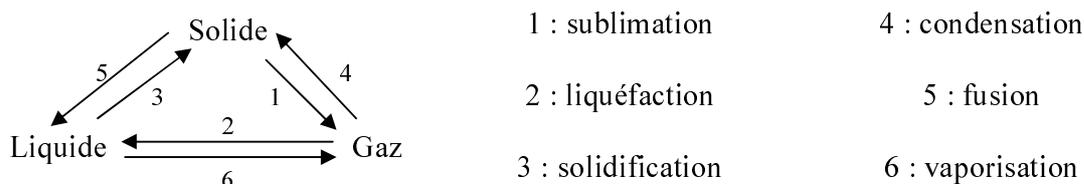


Fig.1 : les trois états de la matière

2.2 Les deux définitions d'un verre

60 2.2.1 *Le solide : un solide amorphe*

Il existe une famille de matériaux qui présentent globalement les propriétés d'un solide mais dont l'arrangement atomique ne présente pas d'ordre à longue distance, contrairement aux solides cristallins comme on vient de le voir. Ces solides, non cristallins, sont qualifiés d'*amorphes*.

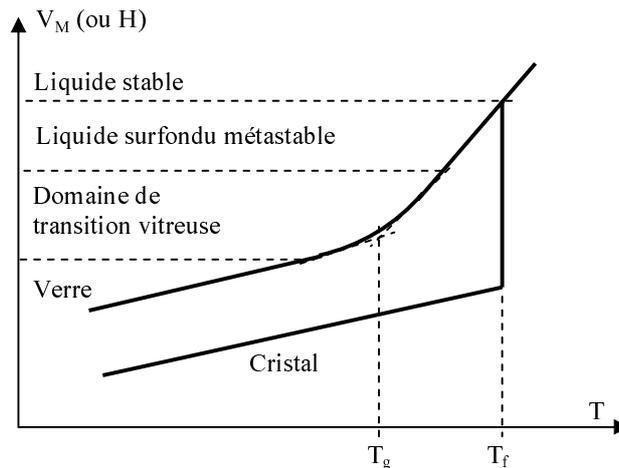
65 Si l'on observe finement la structure d'un tel solide, on s'aperçoit que chaque atome conserve son environnement caractéristique de l'état cristallin, plus ou moins distordu, tandis que l'arrangement des seconds voisins est très perturbé par rapport à un cristal.

Les verres sont des matériaux solides amorphes généralement obtenus par figeage progressif d'un liquide qui ne cristallise pas au cours d'un refroidissement suffisamment rapide. Les verres classiques doivent leur existence à la viscosité élevée de certains systèmes, comme par exemple
70 les silicates. La viscosité augmente avec le refroidissement et devient telle que l'apparition des germes de cristaux (formation d'agrégats d'atomes), et a fortiori leur nucléation (ou croissance) en un réseau périodique, est très difficile.

2.2.2 *Concepts thermodynamiques*

75 Comme vu dans le chapitre précédent, la manière classique de produire un verre consiste à refroidir un liquide suffisamment rapidement pour que la cristallisation n'ait pas le temps de se produire. L'accroissement continu de la viscosité lorsque la température diminue a pour résultat un figeage progressif du liquide jusqu'à solidification finale.

80 Pour étudier ce processus avec plus de précision, il est commode de suivre l'évolution d'une variable thermodynamique, comme par exemple le volume molaire V_M ou l'enthalpie H , en fonction de la température (cf. figure 2). Pour cela, on part d'une phase liquide à haute température (supérieure à la température de fusion T_f). L'abaissement de la température fait diminuer le volume molaire ou l'enthalpie de manière linéaire. Le liquide se contracte. Le
85 « coefficient de dilatation » est défini comme étant la pente de la courbe $V_M=f(T)$.



90 **Fig.2** : Variation du volume molaire ou de l'enthalpie en fonction de la température – Définition de la température de transition vitreuse

Lorsqu'on atteint le point de fusion (ou de solidification) deux cas peuvent se produire.

95 Premier cas (le plus fréquent) : pour un traitement pas trop rapide, le liquide se transforme en un cristal (il cristallise) dont le volume molaire ou l'enthalpie est bien plus faible : il se crée une discontinuité ΔV_M ou ΔH . Si l'enthalpie diminue ainsi, c'est parce qu'un solide cristallin à l'équilibre tend toujours à faire diminuer son énergie libre.

100 Deuxième cas : cependant, si le refroidissement est trop rapide et continu depuis l'état liquide stable jusqu'à une température inférieure à la température de fusion et si la viscosité des matières premières en fusion est grande, la cristallisation peut être évitée ; le liquide passe dans un domaine de température où il se trouve dans un état de surfusion. Tout s'est passé comme si le système ignorait le point de fusion. Le point représentatif dans le graphe décrit une droite prolongeant celle du liquide. On dit que le matériau se trouve dans un état « métastable ».

105 Dans le premier cas, à la fin de la cristallisation, lorsque la température continue de baisser, le nouveau solide cristallin se contracte de nouveau, la pente de la courbe étant toutefois inférieure à celle du liquide initial (environ 1/3).

110 Dans le second cas, l'abaissement de la température provoque une contraction du liquide surfondu avec un coefficient de dilatation identique à celui du liquide initial. L'état « métastable » dans lequel se trouve le liquide est un état stable mais hors d'équilibre thermodynamique qui impliquerait une minimisation de l'énergie interne : ce n'est pas l'état le plus stable. C'est cet état qui progressivement se fige pour donner naissance au verre à température ambiante. Lorsque la température diminue, la viscosité du mélange augmente (pour

atteindre plus de 10^{12} Pa.s à 550°C) et les atomes n'ont plus la même mobilité. La structure du matériau n'a pas le temps de se réarranger. Ainsi à partir d'une certaine température, la pente de
115 la courbe (et donc le coefficient de dilatation) diminue pour devenir voisine de celle du solide cristallin.

Le passage du liquide surfondu au verre est continu. Ce passage porte le nom de « domaine de transition vitreuse ». La température de transition vitreuse T_g est définie comme l'intersection des courbes extrapolées à partir du liquide et du verre. Plus la vitesse de refroidissement sera élevée,
120 plus T_g sera grande.

Remarque 1 : ce retour sur la thermodynamique du matériau verre nous permet de présenter la seconde définition retenue pour ce matériau dans le monde scientifique : « le verre est un solide non cristallin présentant une transition vitreuse ».

125 Remarque 2 : cette définition thermodynamique nous permet de comprendre pourquoi, malgré l'apparence solide du verre et ses propriétés proches des cristaux (comme par exemple le coefficient de dilatation...), certains chercheurs n'hésitent pas à dire qu'il s'agit d'un liquide, possédant simplement une très grande viscosité (environ 10^{19} Pa.s à température ambiante).

130

2.3 Le verre : un matériau hors d'équilibre

Le paragraphe 1.3 précédent a montré que le matériau « verre » résultait d'un gel progressif d'un liquide surfondu. Le verre conserve ainsi un arrangement correspondant à une température plus élevée. Son contenu d'enthalpie (et donc finalement d'entropie) est supérieur à celui du solide
135 cristallisé puisqu'une certaine entropie excédentaire y a été bloquée à partir de la transition vitreuse.

On considère maintenant le liquide surfondu à qui on fait subir un arrêt dans le processus de refroidissement dans la zone de transition vitreuse. C'est au début de ce domaine que le matériau s'éloigne de la droite caractéristique du liquide. Si le traitement isotherme (pour $T=T_1$ cf. figure
140 3) est maintenu pendant très longtemps, la structure du matériau va avoir la possibilité de se réarranger, le volume molaire ou l'enthalpie (cf. figure 3) vont évoluer dans le temps pour atteindre les valeurs de l'équilibre métastable.

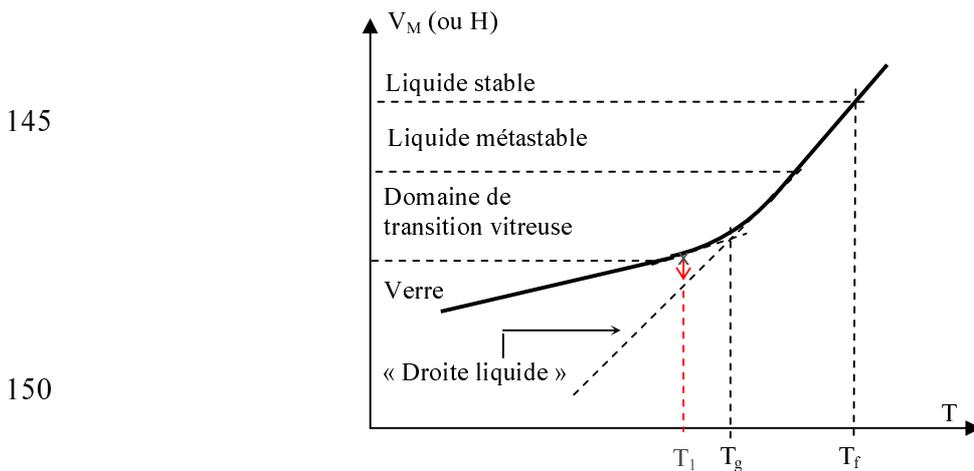


Fig.3 : traitement isotherme d'un verre dans la zone de transition : phénomène de stabilisation

On dit alors que le *verre est stabilisé*. Le matériau a évacué son entropie excédentaire. Le point représentatif dans le graphe de la figure 3 rejoint la droite « liquide » qui est la droite d'équilibre. Lorsque l'on fait subir un même traitement à une température inférieure au domaine de transition vitreuse, la structure souhaiterait se réarranger mais l'évolution est infiniment lente en raison de la très grande viscosité. Le verre formé ne peut rejoindre sa droite d'équilibre et ne peut minimiser son énergie. Il n'est donc pas dans son état d'équilibre thermodynamique : c'est un *système hors d'équilibre*.

Ainsi apparaît un certain paradoxe : le verre est unanimement reconnu comme un matériau durable, stable chimiquement, d'une grande inertie chimique. C'est la raison pour laquelle il est utilisé comme récipient pour les réactions chimiques en laboratoire par exemple : il n'altère pas ou n'est pas altéré par les agents et/ou les produits de la réaction. Mais c'est également un matériau thermodynamiquement hors d'équilibre, dont la structure est instable. Cette instabilité n'est pas chimique, elle est physique.

3. Fabrication des verres

170 3.1 Principe fondamental

On l'a vu : pour fabriquer un verre, il convient d'empêcher, au cours du refroidissement des matières premières, la formation de germes de cristaux (la « germination ») et leur croissance en un réseau périodique (la « croissance cristalline »). Deux conditions sont indispensables pour arriver à cet objectif. En premier lieu, la vitesse de refroidissement adoptée doit être grande. Cette

175 condition est purement technique et n'est liée qu'au processus industriel. La viscosité du mélange, ensuite, doit aussi être grande afin de freiner le réarrangement des atomes. Ceci dépendra directement des matières premières utilisées.

3.2 Les principales matières premières et leur fonction

180 Des substances à l'état vitreux existent rarement à l'état naturel. On en trouve parmi les roches éruptives (par exemple les Obsidiennes, lave fondue arrivant à la surface de la croûte terrestre et y subissant un brusque refroidissement) et les tectites (verres naturels consécutifs à une brusque élévation de température à la suite d'ondes de choc puissantes, par exemple les impacts de météorites). Le composé majoritaire de ces verres est la silice SiO_2 qui, fondue, présente une très
185 grande viscosité.

Dans la fabrication industrielle, la silice est également l'oxyde formateur de verre par excellence. Elle constitue sous sa forme vitreuse (quartz fondu à 1500°C , une des températures les plus importantes de l'industrie, puis refroidi) un réseau tridimensionnel désordonné. D'autres oxydes formateurs de réseau, capables d'apporter la viscosité demandée, peuvent être utilisés en
190 remplacement d'une partie de la silice : par exemple l'anhydride borique B_2O_3 et l'oxyde de Plomb PbO . L'utilisation de ces oxydes apporte des propriétés particulières au matériau ; elle dépend donc de la destination souhaitée pour le verre fabriqué. Ainsi B_2O_3 va permettre de constituer des verres de borosilicate dont le plus connu est le Pyrex[®] et dont les caractéristiques sont, d'une part un faible coefficient de dilatation et, d'autre part de faibles pertes diélectriques
195 (propriétés intéressantes dans l'industrie des ampoules ou des lampes). PbO est un excellent fondant qui entre dans la fabrication des verres industriels les plus fusibles : le cristal. Le cristal (d'Arques, de Baccarat...) est donc un verre très pur ; on comprendra qu'il porte très mal son nom !

D'autres oxydes, dits modificateurs de réseau, peuvent entrer dans la composition des verres. Ces
200 oxydes ont comme propriété principale de dépolymériser le réseau des oxydes formateurs. Ils sont employés pour les différentes propriétés qu'ils apportent non seulement au matériau final mais aussi au matériau en cours de fabrication. L'oxyde de sodium Na_2O est le plus utilisé, son introduction abaisse la viscosité et la température de fusion du mélange. La fabrication du verre est ainsi facilitée puisque l'on peut travailler à des températures plus faibles. La présence de tels
205 ions peut être un inconvénient toutefois pour le matériau final à cause de leur mobilité qui

augmente les pertes diélectriques et nuit à l'inertie chimique. Cet inconvénient cesse d'en être un et est même exploité pour utiliser des verres comme électrolyte solide (milieu conducteur ionique) ou pour la trempe chimique (voir glossaire). Si l'on souhaite diminuer la mobilité des ions sodium, il est possible de les remplacer en partie par de l'oxyde de calcium CaO. On exploite ainsi l'effet dit « alcali-mixte » : réduction par plusieurs ordres de grandeur de la mobilité d'un ion alcalin lorsque l'on en remplace une partie par un autre ion alcalin.

Beaucoup de verres industriels sont des verres silicosodocalciques. D'autres oxydes encore peuvent être utilisés afin d'élaborer des verres spécifiques à une destination précise ; le tableau ci-dessous en dresse une liste non exhaustive (Source : techniques de l'ingénieur).

215

| Composition chimique | Verre à vitre (silico-sodocalcique) | Verre de laboratoire (borosilicate de sodium) | Un type de verre pour ampoule électrique | Un type de verre pour scellement basse température | Verre pour lampe à vapeur de sodium | Verre E : fibre de renfort pour composites | Verre pour fertilisation des sols | Verre crist |
|--------------------------------|-------------------------------------|---|--|--|-------------------------------------|--|-----------------------------------|-------------|
| SiO ₂ | 72 | 80 | 61 | 5 | 8 | 54,5 | 37,5 | 51 |
| B ₂ O ₃ | | 12,5 | 1 | 17 | 48 | 8,5 | | |
| P ₂ O ₅ | | | | | | | 20,2 | |
| Al ₂ O ₃ | 2 | 2 | 16 | | 24 | 14,5 | | |
| PbO | | | | 64 | | | | 39 |
| CaO | 9 | | 10 | | 6 | 22 | 7,9 | |
| MgO | 3 | | | | | | 7,9 | |
| BaO | | | 12 | | | | | |
| Na ₂ O | 14 | 5,5 | | | 14 | | 8,9 | 1,7 |
| K ₂ O | | | | | | | 8,9 | 7,6 |
| Fe ₂ O ₃ | | | | | | | 4,8 | |
| ZnO | | | | 14 | | | | |
| MnO ₂ | | | | | | | 3,9 | |

Les compositions données ne prennent pas en compte les oxydes en quantité mineure.

Tab.1 : composition de quelques verres industriels (exprimée en pourcentage massique)

L'art de l'ingénieur est d'associer au mieux les différentes matières premières en vue de fabriquer un produit ayant des propriétés bien spécifiques. « Le véritable créateur n'est pas celui qui, par hasard, émet des hypothèses, mais celui qui, connaissant les moyens dont il peut disposer, les groupe par le raisonnement et associe leurs immenses qualités pour en faire une réalité » (Albert Caquot, membre de l'Institut, 1881-1976).

220

225 **4. Etude de certaines propriétés des verres**

Dans ce chapitre nous allons nous focaliser sur deux propriétés caractéristiques des verres et qui illustrent la complexité et la dualité que l'on rencontre dans ces matériaux : la transparence et la fragilité.

230

4.1 Transparence du verre

La transparence est peut-être la propriété la plus remarquable du verre. Elle est unique parmi les matériaux de construction. C'est une propriété essentielle pour le vitrage (on dit que « le verre a la propriété de réunir deux milieux séparés »), l'optique ou l'éclairage. C'est aussi une propriété très appréciée pour l'emballage.

235

Cette transparence n'est cependant pas totale. Pour bien mettre en évidence ce phénomène, nous allons revenir sur le spectre des ondes électromagnétiques (voir glossaire et figure 4).

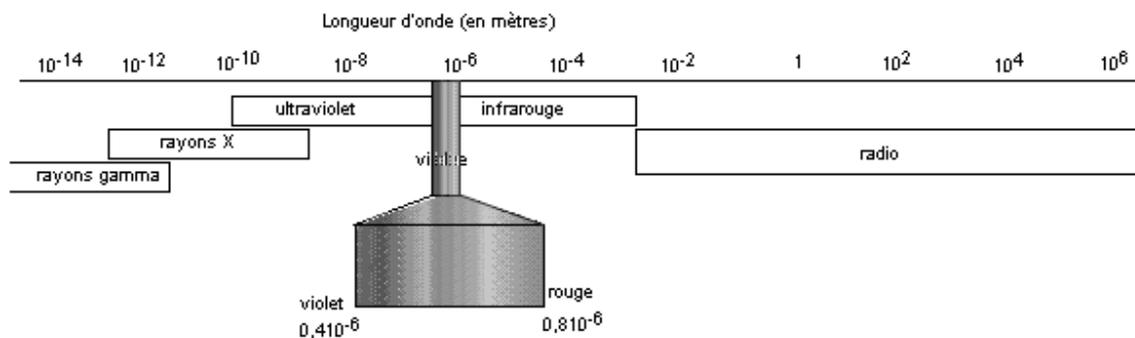


Fig.4 : spectre des ondes électro-magnétiques

240

Ce spectre exprime la décomposition d'un rayonnement électromagnétique en fonction de sa longueur d'onde. Il permet de modéliser plusieurs phénomènes physiques (chaleur, lumière, radioactivité...), et s'étend des rayons gamma aux ondes radio, en passant par les ultra-violets, le visible ou encore le domaine du rayonnement thermique en général (échange de chaleur entre deux corps à des températures différentes : de 0.8 à 50 μm).

245

Le mouvement moléculaire qui existe au sein de la matière est à l'origine de l'émission, pour tout corps à une température supérieure à 0 Kelvin, d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques. Le soleil, dont la température de surface est estimée à 6000K, émet de façon prépondérante dans une bande de longueurs d'onde allant de 0.1 à 4 μm . Dans ce domaine on trouve :

- 250
- le rayonnement UV ;
 - le visible qui s'étend de la couleur « violet » de la lumière (environ 400 nm), à la couleur « rouge » (environ 800 nm) ;
 - les infrarouges dits proches (de 800 nm à 4 μm).

Un corps à température ambiante ($T \approx 293\text{K}$) émettra en revanche dans une bande de longueur d'onde centrée autour de 10 μm et comprise dans l'infrarouge dit moyen (de 4 à 30 μm).
255

Un corps qui reçoit un rayonnement électromagnétique peut en réfléchir une partie, en absorber une autre et, pour certains matériaux seulement, en transmettre le reste.

L'intensité du rayonnement transmis I est fonction du rayonnement incident I_0 d'après la loi de Beer-Lambert (cf. figure 5) où x est l'épaisseur traversée du matériau et α son coefficient d'absorption :
260

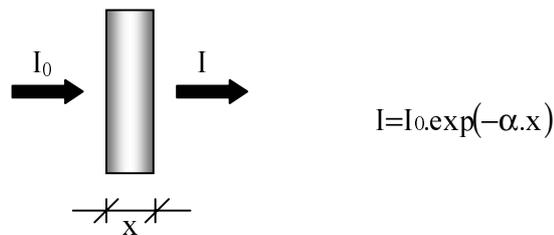


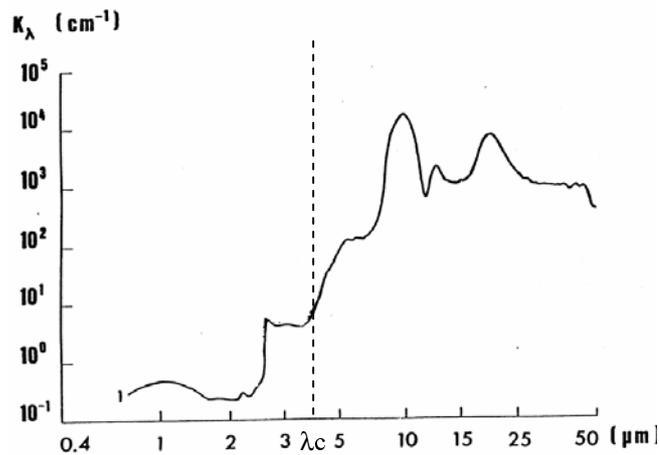
Fig.5 : définition des rayonnements incident et transmis – Loi de Beer-Lambert

Le coefficient d'absorption α peut s'écrire en fonction de la longueur d'onde λ du rayonnement incident et de $K(\lambda)$ l'indice d'absorption :
265

$$\alpha = \frac{4\pi}{\lambda} K(\lambda)$$

La figure 6 représente l'évolution de l'indice d'absorption d'un verre silicosodocalcique en fonction des longueurs d'onde du rayonnement. On peut y distinguer deux zones correspondant à deux comportements complètement opposés : une zone où l'indice K est petit et une zone où cet indice est très grand. La longueur d'onde séparant ces deux zones est appelée longueur d'onde de coupure λ_c . λ_c dépend de la composition et de l'épaisseur du verre. Pour un verre de 6 mm d'épaisseur (épaisseur courante des vitrages), la longueur d'onde de coupure est égale à 4 μm.
270

275



280

Fig.6 : indice d'absorption en fonction de la longueur d'onde – mise en évidence de la longueur d'onde de coupure

285

Ainsi, si on émet sur un verre un rayonnement électromagnétique dont les longueurs d'onde sont inférieures à λ_c , $K(\lambda)$ est faible et I tend vers I_0 : le verre transmet intégralement le rayonnement incident ; il est transparent. C'est le cas pour le domaine du visible (on voit à travers le verre) et le proche infrarouge (le verre laisse passer le rayonnement thermique du soleil : la température derrière une fenêtre s'élève). En revanche, pour tout rayonnement de longueur d'onde supérieure à λ_c , $K(\lambda)$ devient très grand et I tend vers 0. Le rayonnement incident n'est plus transmis par le verre ; le matériau devient opaque.

290

Le verre est ainsi dit *semi-transparent* : opaque pour certaines longueurs d'onde et transparent pour d'autres.

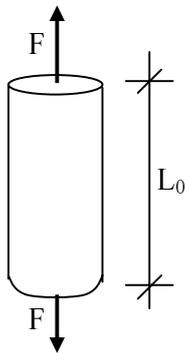
295

Cette propriété, duale, explique par exemple l'effet de serre. L'art de l'ingénieur, ici aussi, sera d'organiser les structures en verre en tirant profit le mieux possible de cette dualité et en essayant d'en limiter les conséquences non recherchées. C'est en particulier dans le bâtiment (fabrication de fenêtres, de verrières...) que ce problème se pose.

4.2 Propriétés mécaniques

300

La particularité du comportement mécanique du verre peut se mettre en évidence par la réalisation d'un essai de traction sur le matériau mené jusqu'à rupture (cf. figure 7).



F : effort appliqué croissant de 0 à F_{rupture}

L_0 : longueur initiale de l'éprouvette en verre

L : longueur de l'éprouvette à l'instant t (l'effort de traction allonge l'éprouvette donc $L > L_0$)

$\Delta L = L - L_0$ allongement de l'éprouvette

S : section de l'éprouvette

Fig. 7 : représentation schématique d'un essai de traction et principales notations

305

Au cours de cet essai de traction, on enregistre la valeur de la contrainte de traction $\sigma = F/S$ exercée dans le matériau à l'instant t ainsi que la valeur de la déformation correspondante $\epsilon = \Delta L/L_0$.

Sous l'action de cette contrainte de traction, le verre va se déformer de manière élastique. On a
310 proportionnalité entre la contrainte σ et la déformation ϵ (loi de Hooke) :

$$\sigma = E \cdot \epsilon$$

Le coefficient de proportionnalité, noté E, est appelé module d'élasticité ou module d'Young. Il est homogène à une contrainte.

Cette déformation élastique, qui est réversible, va se poursuivre jusqu'à la rupture du matériau,
315 laquelle survient brusquement. Un tel comportement est dit *fragile* par opposition au comportement ductile des aciers par exemple (voir glossaire). Le verre est l'exemple le plus éloquent des comportements fragiles.

Le terme fragile est l'un des termes les plus mal employés dans le langage courant. Il est souvent associé à un matériau présentant de très faibles résistances. Ceci est une erreur, le terme fragile
320 définit simplement un matériau ne présentant aucune déformation irréversible avant sa rupture.

Le verre illustre bien cette confusion : sa résistance en traction pour les objets courants varie entre 30 et 200 MPa et peut atteindre plusieurs GigaPascals pour les éléments les plus fins (fibre de verre fraîchement réalisée n'ayant subi aucune manipulation). Elle est, en comparaison, plus grande de plusieurs ordres de grandeur que celle du béton (environ 3 MPa pour un béton
325 ordinaire).

5. Conclusion

Le matériau Verre est tellement utilisé et tellement ancien qu'il pourrait paraître presque banal.

330 C'est pourtant un matériau très complexe, qui ne cesse d'étonner la communauté scientifique. Et ceci à plusieurs niveaux et de plusieurs points de vue. Pour l'appréhender correctement, il est indispensable de faire appel à plusieurs disciplines : chimie, mécanique mais aussi physique générale (thermodynamique, optique...).

335 On ne compte plus les paradoxes que ce matériau soulève et met en évidence : il est à la fois solide et liquide, transparent et opaque, très fragile et très résistant, ou encore stable et instable...

Autant de propriétés que l'ingénieur doit comprendre, utiliser lorsque cela est nécessaire ou lutter contre leurs conséquences dans le cas contraire.

GLOSSAIRE

340

Trempe chimique :

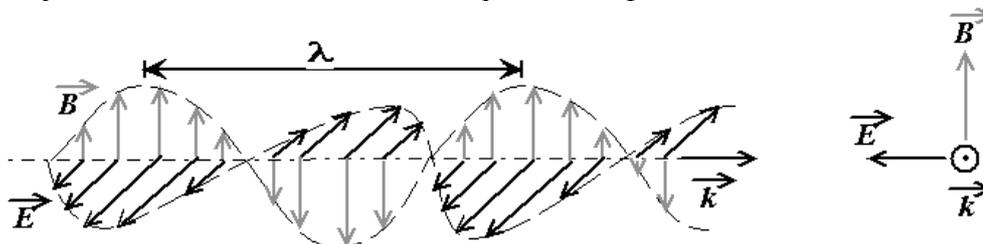
Procédé industriel basé sur les échanges ioniques se produisant par diffusion. En immergeant une pièce de verre à tremper chimiquement dans un bain de sels fondus appropriés, on provoque des échanges superficiels ; les cations alcalins du verre diffusent depuis la surface vers le bain et sont
345 remplacés par les cations du sel fondu cheminant en sens inverse. On peut par exemple remplacer les ions Na^+ (de rayon ionique $r = 0.98\text{\AA}$) du verre par des ions K^+ . Ces ions plus volumineux ($r = 1.33\text{\AA}$) entrent dans le réseau et provoquent son expansion, donc la mise en compression superficielle des couches du matériau.

Ce procédé a pour objectif d'augmenter la résistance mécanique du matériau. Il est par exemple
350 utilisé pour les hublots d'avion ou le pare-brises de TGV.

Ondes électromagnétiques :

Une onde électromagnétique est une oscillation couplée du champ électrique et du champ magnétique. Cette oscillation se caractérise par une longueur d'onde λ :

355



360

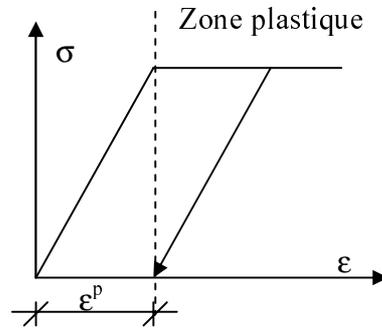
Représentation schématique des ondes électromagnétiques

Ductilité :

Soumis à un essai de traction, un acier aurait présenté un comportement dit plastique après sa
365 phase élastique. La rupture aurait été précédée d'une phase de déformation plastique, dans laquelle le matériau se déforme de manière irréversible. Ceci peut être mis en évidence au cours de l'essai en déchargeant le matériau (retour à l'état de contrainte nulle). La déformation permanente qui résulte est notée ϵ^p sur le schéma ci-dessous. Cette possibilité de déformation permanente est un avantage puisque c'est un moyen d'avertir le concepteur que la structure arrive

370 dans un état critique. Un matériau fragile ne présente aucune plasticité macroscopique ; une structure construite dans un tel matériau ne présente aucun symptôme avant de casser.

375



Courbe contrainte-déformation obtenue sur un essai de traction uniaxial sur un matériau ductile

380