

### Question 1

Indiquez les formules chimiques des trois types de chaux utilisées dans les domaines de la construction et des travaux publics. Décrire rapidement les modes d'utilisation de ces formes de chaux.

Chaux vive :  $\text{CaO}$ . Traitement des sols argileux (amélioration de la portance par assèchement et réaction pouzzonaliqque entre la chaux éteinte et la silice des argiles), utilisation des sols sur place pour les chantiers de TPs.

Chaux éteinte :  $\text{Ca(OH)}_2$ . Utilisation sous forme de lait de chaux en addition dans les enduits/mortiers de façade. Jointage d'éléments de maçonnerie (durcissement par prise aérienne, c'est-à-dire carbonatation sous l'action du  $\text{CO}_2$  de l'air). La prise aérienne est très lente (temps caractéristique 2-3 mois).  $\text{Ca(OH)}_2$  s'appelle également portandite et est un élément constitutif de la matrice cimentaire (rôle de régulation du pH).

Chaux grasse :  $\text{CaCO}_3$ . C'est le calcaire qui résulte de la prise aérienne entre  $\text{Ca(OH)}_2$  et le  $\text{CO}_2$ . Le calcaire est aussi utilisé comme matière première pour fabriquer du ciment (75% à 80%).

### Question 2

Citez les hydrates qui se forment au cours de la prise du ciment et énoncez leurs propriétés. Donnez la définition du retrait chimique qui intervient lors de la prise du ciment ?

Nature des hydrates : CH = portlandite =  $\text{Ca(OH)}_2$ , macro-cristaux hexagonaux d'une dizaine de micro-mètres de diamètre. CH n'apporte pas de propriétés mécaniques particulières au béton, mais assure le contrôle du pH autour de 12,4 (effet tampon) pour éviter tout risque de dépassement-corrosion des armatures. C-S-H = silicate de calcium hydraté =  $x\text{CaO} \cdot y\text{SiO}_2 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ . Le C-S-H est un gel amorphe (mal cristallisé) qui offre une surface spécifique immense (200 m<sup>2</sup>/g) qui confère à cet hydrate une géométrie fractale foisonnante. Le C-S-H joue le rôle de colle des granulats (véritable liant) apporte les propriétés mécaniques du béton.

On observe un retrait d'origine chimique qui est lié au fait que le volume des hydrates formés est inférieur au volume du ciment et de l'eau qui ont réagi.

### Question 3

En quoi le ciment et le béton sont des matériaux manufacturés qui posent problème pour l'environnement ? Citez quelques chiffres clés illustrant leurs impacts.

Le béton impacte l'environnement du fait des volumes produits (3t/hab/an). Le béton est un matériau produit localement pour lequel le transport des matières premières est à éviter pour des raisons économiques et écologiques. Or, les granulats constituent une ressource épuisable. Le ciment représente 90% à 95% des émissions de  $\text{CO}_2$  liées à la production de béton (1t de  $\text{CO}_2$  représente 0,8 t de  $\text{CO}_2$  émis). Ainsi, la filière béton serait responsable de près de 9-10% des émissions de  $\text{CO}_2$  de nature anthropique (8-9% pour le ciment).

### Question 4

Vous détaillerez les différentes familles de liants minéraux qui existent pour réaliser les matériaux de constructions classiques et les mécanismes de prise qui les caractérisent.

-Liants hydrauliques (clinker, ciment hydraulique) : hydratation du ciment (processus de dissolution

des phases anhydres et de précipitation d'hydrates). Échelle des temps : 1 jour.

-Liants pouzzolaniques (pouzzolanes naturelles, cendre volante, fumée de silice). Prise pouzzolanique reposant sur une réaction entre la silice amorphe et le calcium du matériau (provenant de la chaux hydratées par exemple). Réaction lente (échelle des temps 15 jours à 1 mois)

-Liants aériens : prise par séchage (cas du plâtre) et/ou par carbonatation en présence du CO<sub>2</sub> atmosphérique (cas de la chaux). La carbonatation repose sur une réaction chimique entre la chaux hydratée et le CO<sub>2</sub> conduisant à la formation de carbonate de calcium. Cette réaction est lente (échelle des temps : 3-6 mois)

### Question 5

Quelle loi de comportement rhéologique suit le béton à l'état frais ? Quels sont les deux paramètres rhéologiques qui définissent les propriétés d'écoulement d'un béton frais Vous détaillerez comment évoluent ces deux paramètres quand le béton est vibré, quand on est en présence d'un BAP, quand un superplastifiant ou un agent de viscosité est ajouté ?

Fluide newtonien à seuil (fluide de Bingham).

Paramètres rhéologiques : viscosité (Pa.s) et seuil d'écoulement (Pa)

Quand un béton est vibré ou un superplastifiant est ajouté : le seuil d'écoulement chute.

Pour un BAP, le seuil d'écoulement est proche de zéro grâce à l'ajout d'un superplastifiant afin de limiter le blocage des granulats entre les ferrailles. Cependant le risque est que ce béton ségrège (instabilité des gravillons conduisant à un béton inhomogène). Pour limiter ce danger, la viscosité du béton doit être accrue en augmentant le volume de fines dans la pâte et/ou en utilisant des agents de viscosité (éthers de cellulose par exemple).

### Question 6

Écrire les deux lois de comportement macroscopiques permettant de décrire les transferts de masse dans les matériaux poreux (relation entre le flux et le moteur du transport), en explicitant les variables intervenant dans ces lois et les unités. Indiquer de quelle manière la perméabilité intrinsèque d'un milieu poreux et le coefficient de diffusion effectif dépendent de la microstructure.

Lois de Darcy et de Fick.

Darcy :  $v_1 = -K_1/\mu_1 \text{ grad}(P_1)$

$v_1$  : vitesse de filtration (m/s)

$K_1$  : perméabilité intrinsèque (m<sup>2</sup>)

$\mu_1$  : viscosité dynamique (Pa.s)

$P_1$  : pression du liquide (Pa)

Fick :  $j = -D \text{ grad}(c)$

$j$  : flux molaire (mol/m<sup>2</sup>/s)

$D$  : coefficient de diffusion effectif (m<sup>2</sup>/s)

$c$  : concentration molaire (mol/m<sup>3</sup>)

$K_1$  : effet de la taille des pores au carré (loi de Poiseuille), de la porosité et de la tortuosité.

$D_{eff}$  : dépend essentiellement de la porosité et de la tortuosité.

Partie mécanique des matériaux (3 points – 6 questions)

### Question 7 (0,5)

Donnez des synonymes à :

- Elastique = réversible
- Plastique = irréversible

#### Question 8 (0,5)

Donnez un ordre de grandeur de la limite d'élasticité d'un acier de béton armé : 500 MPa

Donnez un ordre de grandeur du module d'élasticité :

- de l'acier : 210 GPa
- du béton : 35 GPa
- du bois, dans le sens des fibres : 10 GPa

#### Question 9 (0,5)

A l'aide d'un schéma du comportement d'un acier, expliquez ce qu'est l'écroutissement ? Quelles sont les conséquences mécaniques de l'écroutissement ?

L'écroutissement se produit lorsque l'on dépasse la limite d'élasticité du matériau. La conséquence est que la limite d'élasticité après écroutissement est plus élevée. C'est donc un moyen de l'augmenter. Par contre, on se rapproche de la contrainte à rupture : le matériau est donc moins déformable avant rupture (on perd de la ductilité).

#### Question 10 (0,5)

Qu'appelle-t-on résistance caractéristique ?

Les matériaux de génie civil ont une résistance qui varie (un peu pour l'acier et beaucoup pour les bétons ou le bois). Pour tenir compte de cette variabilité on ne dimensionne pas les pièces avec une résistance moyenne mais avec une résistance caractéristique qui est un fractile de la distribution (par exemple fractile à 5% pour le béton ce qui signifie que sur l'ensemble d'une fabrication 95% des bétons testés auront une résistance supérieure)

#### Question 11 (0,5)

Qu'est ce que le fluage d'un matériau? Pourquoi ce phénomène est-il important pour les structures en béton précontraint ?

Le fluage correspond à la déformation différée d'un matériau sous charge. Il est important pour les structures précontraintes car il conduit à une diminution de l'effort dans les câbles de précontrainte. Pour contrecarrer cet effet on doit ajouter une part supplémentaire de précontrainte.

#### Question 12 (0,5)

A l'aide d'un schéma de la microstructure du bois, expliquez pourquoi celui-ci a un comportement orthotrope ?

Pourquoi fabrique-t-on des bois transformés comme le lamellé collé ?

Le bois a un comportement orthotrope compte tenu de sa structure très orientée (cf schéma du cours). Il a donc un comportement très différent selon les directions.

Le bois a de plus des défauts. L'utilisation en lamellé collé permet d'éliminer ceux-ci et d'avoir une résistance caractéristique plus élevée.

## Partie ACV

### 1) Expliquer pourquoi l'analyse de cycle de vie (ACV) devient et va devenir un outil important à considérer dans le secteur de la construction?

Eléments de réponse

- secteur responsable de beaucoup de problèmes env. comme la conso d'énergie, émissions de GES, production de déchets, etc. (slide)
- la consommation d'énergie primaire limitée aux postes réglementaires (RT 2012) fait désormais jeu égal avec la consommation d'énergie primaire nécessaire à la fabrication des matériaux et la mise à disposition du bâtiment (p. ex. pour une durée d'étude de 50 ans)
- L'ACV permet d'évaluer de manière multicritère une variante de conception en regardant d'autres aspects que les émissions de CO<sub>2</sub> (Bilan Carbone) ou la conso d'énergie (RT).

### 2) Décrivez les étapes normalisées (ISO 14040) d'une ACV ainsi que leurs sous-étapes ?

Eléments de réponse:

- Définition des objectifs et du champ de l'étude (définition de l'unité fonctionnelle (sa qualité, quantité et son unité), expliquer la définition des frontières, de la règle de coupures et des allocations)
- Inventaire de Cycle de Vie (collecte des données sur chaque processus unitaire à partir de BDD générique ou chez un industriel)
- Evaluation des impacts (traduction du bilan de flux en impacts potentiels ou en dommages sur l'environnement : exemple d'indicateur potentiel de réchauffement climatique, acidification, eutrophisation etc.)
- Interprétation des résultats (normalisation des indicateurs en équivalent habitants)

### 3) Quelles sont les démarches en cours pour appliquer l'ACV au secteur de la construction en France (citez en au moins 3)?

Eléments de réponse:

- utilisation possible de l'ACV du matériaux jusqu'au quartier
  - démarche de déclarations environnementales de produits (de type EPD, FDES) menées avec les industriels. En France, il existe des bases de données ACV nationale comme INIES
  - développements de logiciels adaptés pour les acteurs du bâtiment permettant d'évaluer
    - Impact des matériaux et produits de construction
    - Impact des conso d'énergie réglementaires et spécifiques
    - Impact des conso d'eau
    - Impact de la construction ou déconstruction d'un bâtiment
  - mise en place d'approche performancielle comme HQE Performance avec des valeurs de référence par indicateur ACV et par typologie de bâtiment pour que les utilisateurs de logiciels d'ACV bâtiment puissent comparer leur variante / à la moyenne ou à la meilleure pratique.  
(p. ex. un bâtiment moyen en France émet ~10 kg eq-CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/an lié à la fabrication des produits de construction et d'équipements)
- Ces valeurs de références préfigurent la mise en place de classes de confiance (A, B, C, D) similaire à celles observées actuellement pour le DPE (énergie/CO<sub>2</sub>) sur les postes réglementaires.

## Question 4 (0,5)

Expliquez comment l'énergie grise des matériaux pèse dans les bilans énergétiques des bâtiments ?

## Matériaux thermostructurés

1 - En matière d'isolation les appellations isolants NF, SIPA et VIP sont utilisées, à quoi correspondent elles (gamme de conductivité, matériau, épaisseurs pour RT2012, densité) ; situer également l'acier et le béton en terme de propriétés (conductivité, densité) ?

béton  $800 < \lambda < 1300 \text{ mW/m.K}$   $d = 1 \text{ à } 2.4$  ,

$\lambda < 65 \text{ mW/m.K}$  isolant NF, laine minérale  $30 < \lambda < 40 \text{ mW/m.K}$ ,  $d = 0.4 - 0.6$ ,  $120 < \rho_{ep} R = 4$   
RT2012 < 160

$\lambda < 65 \text{ mW/m.K}$  isolant NF, Polystyrène  $29 < \lambda < 37 \text{ mW/m.K}$ ,  $d = 0.3-0.4$ ,  $100 <_{ep} R=4$   
RT2012 < 120

$\lambda < 65 \text{ mW/m.K}$  isolant NF, Polyuréthane  $22 < \lambda < 30 \text{ mW/m.K}$ ,  $d = 0.4-0.6$ ,  $70 <_{ep} R=4$   
RT2012 < 100

$\lambda < 25 \text{ mW/m.K}$  SIPA , Aerogels  $20 < \lambda < 30 \text{ mW/m.K}$ ,  $d = 0.2$ ,  $30 <_{ep} R=4$  RT2012 < 50

$\lambda < 15 \text{ mW/m.K}$  PIV ,Aérogels ss vide  $4.2 < \lambda < 5 \text{ mW/m.K}$ ,  $d = 0.1$ ,  $10 <_{ep} R=4$  RT2012 < 20

Un SIPA est un panneau isolant a pression atmosphérique

Un PIV est un panneau isolant sous vide

2- Expliquez l'intérêt de la loi de Knudsen

La loi de Knudsen a la forme suivante,

$$\lambda_{cg} = \lambda_{g0} / (1 + 2A l_m / \delta)$$

$\lambda_{g0}$  = molecular gaz conductivity

$\delta$  = mean void diameter

$l_m$  = Mean free path (air :  $l_m = 70 \text{ nm}$ )

A = specific gaz constant

Elle montre que deux leviers sont possibles :

(i) Diminuer la taille des pores

(ii) Intérêt du passage sous vide ou sous un gaz autre que l'air

3- Indiquer les trois composantes majeures de la conductivité, et la méthodologie utilisée pour les diminuer. Vous pouvez prendre comme exemple un PSE38.

Par ordre croissant : La conductivité du squelette solide ( $5 \text{ mW/m.K}$ ), la conductivité radiative ( $8 \text{ mW/m.K}$ ), la conductivité gazeuse ( $22 \text{ mW/m.K}$ ),

La conductivité radiative peut être diminuée en pavant l'espace par des particules de tailles microniques opacifiantes ex Sic, TIO2

La conductivité gazeuse peut être diminuée en diminuant la taille des pores pour qu'elle soit inférieure au libre parcours moyen de l'air soit  $70 \text{ nm}$

4 - Donner la définition d'un système constructif en utilisant des exemples. Quels sont les paramètres qui interviennent dans sa prescription et son utilisation.

Un système constructif est un assemblage composite de matériau élaboré industriellement qui répond à un besoin utilisateur, facilite une étape constructive. Son cahier des charges est normatif, mais aussi fonctionnel et implique l'outil de production, la manutention, la mise en en service, et l'utilisation en service.

Ex plaque de plaque au plâtre pour pièce humide ; brique monomur, PIV, Panneau PET avec remplissage d'aerogels,

1

## Partie optique des matériaux (1,5 points – 3 questions)

### Question 1 (0,5)

Définir le facteur de réflexion d'un matériau opaque et le facteur de transmission d'un matériau transparent. Bien préciser à quoi correspondent les grandeurs photométriques qui apparaissent dans les formules, ainsi que leurs unités.

Facteur de réflexion  $\rho = M_r / E$ , avec :  $M_r$  l'exitance de la surface en réflexion (lux, symbole  $lx = \text{lumen} / \text{m}^2$ ) qui correspond au flux réfléchi par unité de surface, et E l'éclairement de la surface (lux) qui correspond au flux incident par unité de surface.

Facteur de transmission  $\tau = M_t / E$ , avec :  $M_t$  l'exitance de la surface en transmission (lux, symbole  $I_x = \text{lumen} / \text{m}^2$ ) qui correspond au flux transmis par unité de surface, et  $E$  l'éclairement de la surface (lux) qui correspond au flux incident par unité de surface.

### Question 2 (0,5)

Qu'appelle-t-on une surface de Lambert ? Quel autre nom peut-on lui donner ? Donner un exemple.

Une surface de Lambert est une surface qui diffuse la lumière incidente de façon équivalente (=isotrope) dans toutes les directions. On l'appelle aussi surface diffusante. Exemples : béton, matériau peint avec de la peinture mate, bois.

### Question 3 (0,5)

Quelle propriété optique des matériaux est exploitée dans le Laser Cut Panel ? Expliquer le principe de fonctionnement de ce matériau. Quel(s) intérêt(s) ce matériau présente-t-il dans le contexte de l'écoconstruction de bâtiments ?

Le Laser Cut Panel est un panneau de plastique acrylique dans lequel de fines lames d'air parallèles ont été découpées au laser. L'indice de réfraction du plastique acrylique est supérieur à celui de l'air, de telle sorte que la lumière dont l'angle d'incidence est supérieur à un angle critique  $i_0$  subit une réflexion totale (Bonus : la proportion de lumière qui subit cette réflexion totale, par rapport à celle qui est transmise sans réflexion totale dépend principalement de l'espace entre deux lames d'air.)

Le Laser Cut Panel contribue à la réduction de la consommation énergétique liée à l'éclairage intérieur des bâtiments. Utilisé comme vitrage, il induit une redirection d'une partie de la lumière naturelle incidente vers le plafond de la pièce. L'intérêt est double : i) la lumière naturelle redirigée vers le plafond est diffusée dans la pièce, et en particulier dans le fond de la pièce, où la lumière transmise directement ne parvient pas ; l'éclairement en fond de pièce dû à la lumière naturelle est ainsi augmenté, ce qui permet de diminuer l'éclairage artificiel complémentaire. ii) les risques d'éblouissement dus à la lumière solaire directe sont amoindris, augmentant le confort visuel et permettant de réduire l'utilisation de protections solaires.

## Questions sur la partie acoustique:

1- Citer et décrire les 3 effets de dissipation possible d'une onde acoustique dans un matériau poreux à vocation acoustique.

Les 3 effets de dissipation sont:

-dissipation par **effets visqueux** (frottement du fluide (air) sur le squelette);

-dissipation par **effets thermiques** (échanges de chaleur avec le squelette: compression-détente);

-dissipation « mécanique » (**déformation élastique** du squelette),

2-Quelles sont les principales différences entre laine de roche et laine de verre?

La laine de roche est fabriquée à partir de basalte ( $2900\text{kg}/\text{m}^3$ ) alors que la laine de verre est fabriquée à partir de silice ( $2500\text{kg}/\text{m}^3$ ), **la laine de roche est donc plus dense**. La différence importante entre les deux est principalement dans leur constitutions :

**La laine de verre est constituée de fibres longues dites hydrophiles.**

**La laine de roche est constituée de fibres courtes dites non hydrophile.**

L'eau, l'humidité circule beaucoup moins dans de la laine de roche que de la laine de verre.

A savoir, une laine de roche ou de verre humide n'isole plus.

Lors de la fabrication de la laine de roche, température de fusion dans le cubilot:  $1400^\circ\text{C}$ , pour la laine de verre: température dans le four  $1050^\circ\text{C}$ ,

*Sinon performances acoustiques très proches (dépend des formulations...).*

3- A quoi correspondent géométriquement la tortuosité et les longueurs caractéristiques visqueuses et thermiques d'un matériaux poreux à vocation acoustique?

*Tortuosité: « mesure du désordre »  $\alpha_{inf}=(l_2/l_1)^2$  avec  $l_1$  épaisseur du matériau et  $l_2$  longueur du chemin effectué par l'onde acoustique dans le matériau avant de le traverser.*

*Longueur caractéristique visqueuse:  $\Lambda$ : « taille moyenne des connexions entre pores » (rayon de ces connexions): longueur caractéristique des effets de dissipation visqueux,*

*Longueur caractéristique thermique:  $\Lambda'$ : « taille moyenne des pores » (rayon de ces pores): longueur caractéristique des effets de dissipation thermique,*

4- Un matériau à vocation acoustique et à pores cylindriques droites parallèles possède une tortuosité de 1. Quelle sera sa tortuosité si le fabriquant incline les pores d'un angle de 15°?

*Nouvelle tortuosité= $(1/\cos(\theta))^2$  avec  $\theta=15^\circ$*

*Nouvelle tortuosité=1,0718*

## Partie polymères

1. Citer 2 polymères naturels et 3 synthétiques

Naturels : protéines, cellulose, hydrocolloïdes, huiles végétales (oligomères)

Synthétiques : Poly Chlorure de Vinyle (PVC), polyester, polyamide, aramide (exemple Kevlar), polyéthylène, polypropylène, polystyrène.

2. Quelle différence y a-t-il entre une matière plastique et un matériau polymère ?

- Une matière plastique est déformable, et peut ainsi être mise en place par moulage. On peut mouler des polymères, pour faire par exemple des gobelets, des coques pour l'électronique, des capots pour l'automobile. Mais il existe des matériaux plastiques non polymères : la pâte à pain, l'argile ont des comportements plastiques.

- Plastique peut être opposé à élastique : qui se déforme puis revient à sa forme d'origine.

- Les polymères donnent naissance à 3 grandes familles : les fibres artificielles, les matériaux plastiques, et les élastomères. Donc les plastiques ne représentent qu'une part des polymères.

3. Dans le bâtiment, les polymères servent à fabriquer des tuyaux (PVC en général), des mousses isolantes (polystyrène). Citer d'autres applications à forte valeur ajoutée des polymères.

- isolants électriques
- géotextiles

4. Qu'est-ce qu'une distribution des masses molaires ?

Les polymères sont constitués d'un mélange de molécules de taille variable : courtes, moyennes ou longues. Il ne possède donc pas une masse molaire unique, comme les molécules chimiques habituelles, mais un ensemble de masses, qui constituent une distribution statistique. Cette distribution possède des moments d'ordre 1,2, etc...

5. Qu'est-ce que la viscosité, et quels sont les facteurs qui l'influent ?

La viscosité est l'aptitude d'un fluide à s'écouler plus ou moins vite. Au niveau microscopique, elle dépend de la faculté d'une molécule en mouvement à entraîner ses voisines.

Elle dépend de 2 facteurs principaux :

- la longueur de la macromolécule (ou sa masse molaire)
- les interactions entre les molécules polymères, liées à leur caractère polaire ou apolaire.