

Les matériaux composites

Définition

Ils sont constitués d'au moins **deux matériaux** de natures différentes se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est **supérieur** à celui des composants pris séparément.

En général : la matrice (phase continue), et les renforts (présentant des hétérogénéités).

ex : composite à matrice organique, à matrice minérale, à matrice métallique, sandwiches...

Propriétés des composites

On les classe suivant la forme des constituants (à fibres ou à particules) ou suivant leur natures.

Les matériaux composites du génie civil

Les mélanges types sont : granulats + liant + adjuvants

Les liants sont soit hydrauliques (mortier, béton, béton armé, précontraint...), soit hydrocarbonés (enrobés bitumeux).

Il y a ensuite prise mécanique : passage du fluide au solide.

Le béton

C'est le matériau composite le plus utilisé dans le monde. Il est façonnable à volonté, à température ambiante, ne nécessite pas de cuisson et est coulé sur place ou préfaçonné. Il est ainsi accessible à tous.

Les cinq constituants du béton sont :

- le ciment (7 à 14% du volume)
- les granulats (60 à 70% du volume)
- l'eau (14 à 22% du volume)
- les adjuvants (< à 2% du volume)
- l'air (1 à 6% du volume)

En tant que liaison entre éléments, le béton peut palier aux insuffisances du matériau : il assure une résistance en traction et limite la fissuration.

Les enrobés bitumeux

Les bitumes sont l'ensemble des produits organiques naturels riches en carbone et en hydrogène, fusibles, combustibles et solubles dans le sulfure de carbone.

Le bitume sert à cimenter les briques et à assurer l'étanchéité.

Les liants hydrauliques

Classification

Liants minéraux :

Argile séchée (bauge, torchis)

Plâtre (pierre gypse cuite à 200°C)

Chaux (liant hydraulique durable)

Ciments (prompt, alumineux fondu, à maçonner, pour travaux en mer...)

La chaux

Elle est fabriquée dans un four primitif à grande flamme.

On cuit la pierre à chaux (calcite aragonique), puis la chaux s'éteint (par ajout d'eau) et elle durcit. On ajoute ensuite du sable et de l'eau pour former du mortier frais qui, par carbonatation, redonnera du calcaire. La chaux présente donc un cycle.

La chaux à riende présente une réaction lente (plusieurs années), tandis que la chaux hydraulique présente une réaction rapide.

Le ciment

Il est dit hydraulique car il durcit sous l'eau. Le durcissement est dû aux réactions chimiques d'hydratation des silicates et des aluminates de chaux.

Le ciment est formé de clinker et de gypse (régulateur de prise). Il est composé à 80% de calcaire, à 20% d'argiles et d'ajouts tels que les pyrites, la bauxite, du sable...

Le clinker Portland

Ses constituants sont broyés très finement. Ils sont mélangés (réactions en phase solides). La cuisson (en four rotatif à 1450°C) puis le refroidissement (trempe) donne le clinker, qui est ensuite broyé avec du gypse et d'autres ajouts éventuels pour former le ciment.

Les ajouts

Les pouzzolanes : naturelles ou issues de la calcination d'argiles

Les cendres volantes : matière réactive, résidus silico-alumineux issus de la combustion (en centrales thermiques) du charbon ou du lignite.

Laitiers : sous produits de l'industrie sidérurgique (surnageant).

La prise et le durcissement

Hydratation : contact d'une particule de ciment avec de l'eau.

Adsorption : fixation physique ou chimique en surface de molécules d'eau.

Hydrolyse : transformation du solide et décomposition de l'eau.

Dissolution : rupture des liaisons ioniques dans le cristal et dispersion des ions dans le liquide.

Cristallisation : germination ou nucléation puis croissance du germe.

La prise : passage de l'état de suspension de particules solides dans l'eau à un solide (qq minutes à qq heures).

Le durcissement : évolution des caractéristiques physiques et mécaniques du matériau (plusieurs mois)

Déroulement :

Période initiale : dissolution superficielle, sursaturation de silicate de calcium et formation d'ettringite.

Période « dominante » : élévation du pH, formation d'ettringite

Période de prise : précipitation portlandite

Période de durcissement : formation d'ettringite

Ralentissement : recouvrement des grains de ciment par les hydrates, diffusion de l'eau vers interface réactionnelle.

Les granulats

Ce sont des matériaux d'origine minérale tels que les **gravillons, les sables, les sablons et fillers**, qui entrent dans la composition de matériaux composites (bétons, EB...). Ils constituent le squelette du composite.

Ce sont des roches meubles (plus utilisés), des calcaires massifs, des roches éruptives ou métamorphiques.

Ils sont **roulés** (par criblage ou lavage de matériaux alluvionnaires), ou **concassés** (par concassage de roches éruptives, sédimentaires ou métamorphiques).

Les autres granulats sont légers (argile expansée, pouzzolane, billes de verre...), lourds (barytes, hématites, laitiers...) ou à base de matériaux recyclés (bétons, briques...). On peut également citer le polystyrène ou les copeaux de bois...

Dans la formulation des bétons courants, on tient compte du rapport **Gravillon/Sable**. $G = \%$ de gravillons $> 5\text{mm}$; $S = \%$ de sable passant à 5mm .

G/S influe sur la compacité (plus élevée si $G/S > 1,2$), la résistance à la compression (meilleure pour G/S supérieur à $1,2$), l'ouvrabilité (moins bonne si G/S supérieur à $1,2$).

Pour les bétons courants, G/S ne doit pas dépasser $1,2$.

Le béton

C'est un matériau composite (granulats, phase cimentaire, bulles d'air, eau remplissant les pores...)

On **l'observe à différentes échelles** : microscopique (pores, hydrates), mésoscopique (grains de sables, gravillons), macroscopique (matériau homogène, échelle de la structure).

C'est un matériau **évolutif dans le temps**. Il est fluide (ouvrable) à l'état frais. En durcissant, il développe des résistances mécaniques. Il peut également vieillir (endommagement mécanique, fatigue, dégradations...).

Ses performances et sa souplesse lui permettent d'être présent dans tous les domaines du bâtiment et des travaux publics : il est résistant thermiquement, en isolation phonique. De plus, il permet une grande diversité dans les formes, les couleurs et les aspects.

La précontrainte permet d'améliorer les performances et rend possible les très longues portées (structures triangulées). Il est également dans les routes.

Les qualités du béton

Une bonne résistance mécanique en compression à l'état durci, mais une mauvaise résistance en traction.

Association efficace avec l'acier (béton armé). Il permet en plus d'éviter la corrosion des armatures métalliques en raison d'un pH basique élevé (12-13).

Il est facilement malléable à l'état frais.

Bonne résistance au feu

Matériau durable

Les bétons courants ont une masse volumique de 2300kg/m³ environ.

Les bétons lourds peuvent atteindre 6000kg/m³ pour protéger des rayons radioactifs.

Les bétons à granulats légers ont une résistance élevée et sont employés dans le bâtiment ou les ponts.

Les bétons cellulaires répondent aux problèmes d'isolation dans le bâtiment.

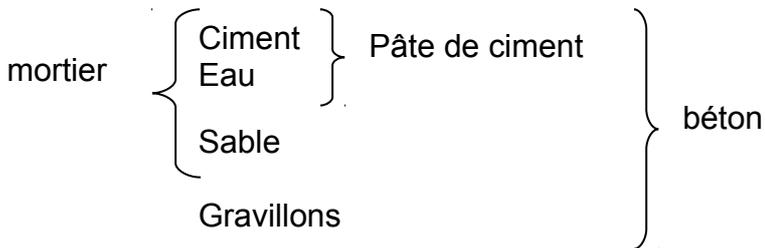
Les bétons de fibres sont plus récents (dallage, décoration, mobilier urbain...)

La composition des bétons consiste à rechercher conjointement deux qualités essentielles : résistance et ouvrabilité, variant en sens inverse.

Facteurs de composition du béton	Pour une bonne ouvrabilité	Pour une bonne résistance
Finesse du sable	Plutôt fin	Plutôt grossier
Rapport G/S	A diminuer	A augmenter
Dosage en eau	A augmenter	A diminuer
Granularité	Continue préférable	Légèrement discontinue préférable
Dimension maximale des granulats	Plutôt petite	Plutôt forte

Les constituants des bétons

Les différents constituants



Additions minérales (cendres, silices...)

Adjuvants (superplastifiants, réducteur d'eau...)

La pâte joue le rôle de lubrifiant et de colle : elle enrobe les granulats.

Le ciment

C'est une poudre fine obtenue par cuisson à haute température (1450°C) et broyage d'un mélange minéral. Il forme avec l'eau une pâte capable de faire prise et de durcir progressivement (par hydratation).

L'eau est essentielle à la prise : elle passe d'une forme libre à une forme liée dans les hydrates et participe à la résistance mécanique du matériau.

L'hydratation du ciment est exothermique.

Le **gypse est un régulateur de prise** : il retarde la réaction d'hydratation du clinker pour permettre la manipulation et le transport du béton frais. Il est ajouté lors du broyage du clinker.

Nomenclature des ciments :

composition : CEM I = ciments Portland à 95% de clinker, CEM II = ciments portland comportant des additions minérales, CEM III, IV et V = ciments de haut fourneau

classe de résistance : correspondant à une **résistance mécanique à la compression mesurée sur mortier normalité**

normes spécifiques selon l'environnement : PM = prise mer pour les environnements à forte teneur en ions chlorure, ES = eaux sulfatées pour les environnements marins ou agricoles riches en ions sulfate...

caractéristiques physiques des ciments :

la finesse de mouture de ciment, caractérisée par sa **surface spécifique** ou surface développée totale des grains contenus dans une masse donnée. Cette finesse est mesurée à l'aide d'un **perméamètre Blaine**. Elle est exprimée en cm²/g. A une augmentation de finesse correspond une augmentation des résistances précoces et une forte exothermie (induisant des gradients thermiques entre le cœur de la structure et l'extérieur et de la fissuration), mais aussi une tendance à l'événement et au retrait. En général, elle varie de 2700 à 3500 cm²/g.

la masse volumique spécifique varie de 2900 à 3200 kg/m³, soit en moyenne une densité absolue de 3,1 généralement admise. **La masse volumique apparente** est proche de 1000 kg/m³.

Les additions minérales

Elles peuvent conférer au béton des propriétés spécifiques telles que la résistance, la durabilité, la limitation de l'exothermie...

Les cendres volantes : produits de grande finesse résultant de la combustion, en centrale thermique, de combustibles minéraux solides ; elles entrent dans la composition de certains ciments en proportion variable (5 à 20%) ; on les ajoute au moment du broyage du clinker.

Les pouzzolanes : produits naturels d'origine volcanique composés essentiellement de silice alumine et oxyde ferrique ; ils sont employés en cimenterie pour leurs propriétés « pouzzolaniques », cad une aptitude à fixer la chaux à température ambiante et à former des composés d'hydratation mécaniquement plus résistants. On obtient artificiellement des pouzzolanes à partir d'argile cuite. Les cendres de centrales thermiques (cendres volantes) constituent également des matériaux à caractères pouzzolaniques.

Les laitiers : résidu minéral de la préparation de la fonte dans les hauts fourneaux à partir du minerai et du coke métallurgique. Le laitier est un véritable ciment manifestant des propriétés hydrauliques, grandement activées d'ailleurs par la présence de clinker. Son hydratation est moins rapide que celle du Portland. Elle dégage moins de chaleur.

Les fillers : produits obtenus par broyage fin ou pulvérisation de certaines roches (calcaire, basalte...) naturelles ou non, agissant principalement grâce à une granulité appropriée, par leurs propriétés physiques sur certaines qualités du ciment (accroissement de la maniabilité, diminution de la perméabilité et de la capillarité, réduction de la fissuration...), les fillers sont inertes chimiquement en présence d'eau.

L'eau de gâchage

Elle est ajoutée au ciment. L'eau potable convient sans essai. Les eaux de lavage, de la nappe phréatique, de ruissellement, de rejet industriel ne doivent pas contenir trop de sels dissous et la température doit être limitée. L'eau de mer est à éviter pour le béton armé et précontraint en raison de la présence des chlorures qui entraînent la corrosion des armatures.

Son contrôle est nécessaire par analyse chimique (dosage des chlorures, des sulfates, des alcalins...).

Le rôle de l'eau est d'assurer l'hydratation du ciment (prise, durcissement) et son ouvrabilité (mise en œuvre).

Le rapport E/C :

Pour l'hydratation complète du ciment : $E/C = 0,25$

Pour l'hydratation complète du ciment + remplissage des hydrates d'eau de structure :
 $E/C = 0,42$

Pour une bonne ouvrabilité en plus : $0,4 < E/C < 0,7$

Le risque d'un excès d'eau est le ressuage et la ségrégation du béton frais, mais aussi une augmentation de la porosité capillaire du béton durci (attaques des chlorures, carbonatation...)

Les adjuvants

Ce sont les produits incorporés en faible dose lors du malaxage ou juste avant la mise en œuvre : ils provoquent la modification des propriétés du béton durci. Leur efficacité est variable suivant le dosage, la composition du ciment, la température...

Les adjuvants peuvent **modifier la rhéologie** (plastifiants, superplastifiants, réducteurs d'eau...), **modifier la cinétique d'hydratation et le temps de prise** (accélérateur de prise, retardateur de prise...), ou à **fonctions spécifiques** (entraîneurs d'air...).

Les superplastifiants neutralisent la tendance du ciment à la floculation.

Les granulats

Ils constituent le squelette granulaire du béton (sable et gravillons). Ils représentent de 60 à 80% du volume total de béton. Ils doivent remplir correctement et en totalité le moule ou le coffrage et assurer un enrobage correct des armatures.

Un squelette granulaire optimisé (le moins de vide possible) confère au béton une bonne résistance mécanique. Les granulats servent à limiter les retraites endogènes et thermiques et limitent le coût d'un béton.

Se pose le problème de la qualité de l'interface pâte de ciment / granulats où la porosité est plus élevée.

Caractéristiques géométriques :

Etendue granulaire = d_{min}/D_{max} (fines, sable, gravillons, cailloux...)

Courbe granulométrique : discontinue ou continue

Coeff d'uniformité C_u = d_{60}/d_{10} (si $C_u < 2$: la granulométrie est uniforme).

Module de finesse du sable : somme des refus pour le tamis (pour un béton : entre 2,2 et 2,8 ; en dessous : augmentation du dosage en eau, au dessus : manque de fines et perte d'ouvrabilité)

Coefficient volumétrique C_v : rapport entre le volume du grain v et le volume de la sphère circonscrite de diamètre d . Un coefficient faible correspond à un granulat présentant un certain nombre de plats, éclats et aiguilles. Un coeff élevé correspond à un granulat dit « cubique » ou « arrondi »

Coefficient d'aplatissement C_a : pourcentage massique des éléments tels que $g/e > 1,58$. g est la dimension de la maille carrée minimale à laquelle passe l'élément et e le plus petit écartement d'un couple de plans tangents parallèles.

Hydratation du ciment et constitution de la microstructure

Produits d'hydratation de la phase clinker du ciment

Plusieurs réactions chimiques sont couplées entre les différents constituants du clinker et l'eau. Les réactions sont exothermiques et thermoactivées.

Les cinétiques d'hydratation

C'est l'évolution du taux d'hydratation de chaque phase du clinker F_i en fonction du temps.

Pour modéliser l'hydratation, on calcule numériquement les temps d'épuisement du gypse et de l'ettringite (ettringite jamais épuisée pour les ciments PM et ES) ; mais également le temps d'épuisement de l'eau libre t_E (n'existe pas si $E/C > 0,42$)

Développement de la microstructure au cours du temps (pâte de ciment)

Les grains de ciment sont polyphasés et la pâte présente une structure floculée. Les points d'attraction peuvent rapidement devenir des « points de colle » sous l'effet des réactions d'hydratation formant des ponts d'hydrates liants. La rupture irréversible de ces ponts nécessite une énergie de cisaillement plus importante.

Au bout d'une heure : les grains de ciment sont recouverts d'une très fine couche d'hydrates. L'avancement de l'hydratation est inférieur à 1%. La dissolution est d'abord très active mais est rapidement freinée. La pâte reste fluide.

A 2h, des cristaux d'ettringite se forment à la surface des grains. La pâte s'épaissit lentement sous l'effet de l'enchevêtrement des premiers hydrates. Les grains se connectent petit à petit en formant des agglomérats.

A 5h, la prise a lieu et un changement de structure de la couche d'hydrates superficiels survient : toutes les réactions chimiques s'accélèrent.

A 24h, le matériau est un véritable solide : on assiste à l'épuisement du gypse et à la dissolution de l'ettringite.

A un mois, l'hydratation aboutit à l'auto-dessiccation (différence entre volume apparent et volume absolu, due à la contraction le chatelier conduisant à l'apparition d'un égal volume de vides au sein du matériau) et les pores capillaires se vident peu à peu.

Les cristaux de portlandite et le gel de C-S-H

La portlandite a pour fonction essentielle de réguler le pH de la solution interstitielle.

Le gel amorphe C-S-H a une microstructure dense et de grande surface spécifique. Ils constituent la colle entre les granulats qui apportent la résistance mécanique.

Bilans volumiques

La contraction le chatelier (ou retrait chimique) :

$$V_{\text{hydrates}} < V_{\text{ciment réagi}} + V_{\text{eau réagie}}$$

Elle est partiellement empêchée lors de la prise (formation d'un squelette rigide), ce qui est à l'origine du retrait endogène ou retrait d'autodessiccation.

La porosité diminue avec le progrès de l'hydratation.

Courbe de distribution poreuse par porosimétrie au mercure :

Mesure de la porosité, de la masse volumique apparente et absolue et de la surface spécifique de la phase cimentaire ; évaluation de la distribution poreuse.

Quand le E/C diminue ou que le matériau vieillit, la porosité totale diminue, la porosité capillaire disparaît, la porosité inter-hydrates décroît et est déplacée vers les plus petits pores.

La porosité intra-hydrates des C-S-H augmente au cours de l'hydratation, mais la localisation du mode poreux intra-hydrates est indépendante du E/C et de l'âge du matériau. C'est une caractéristique intrinsèque des matériaux cimentaires qui ne dépend pas que de la nature physico-chimique du ciment.

Hydratation et propriétés mécaniques

Percolation des liaisons mécaniques et développement des propriétés élastiques

La formation des « points de colle » ne demande que très peu de matière : l'avancement de l'hydratation au seuil de percolation est très faible. La connexion est évidemment plus facile lorsque les particules sont plus proches, c'est à dire pour les faibles dosages en eau.

Les ondes de cisaillement ne se propagent que dans les amas connectés, leur propagation est donc indicative de la percolation des liens. Le seuil de percolation des liaisons mécaniques, de même que la vitesse de percolation, sont très sensibles à la teneur en eau de gâchage, qui conditionne la distance initiale entre les particules.

Importance de la qualité de l'empilement granulaire

La formulation est la recherche d'un compromis entre compacité et aptitude à l'écoulement.

L'espacement par l'eau conduit à une porosité initiale élevée, une tendance à la ségrégation, une viscosité faible, un seuil de cisaillement élevé...

Les bétons à hautes performances présentent 12 à 20% de pores capillaires, les bétons ordinaires en présentent 20 à 25% (sources de la perméabilité). Le DUCTAL ne présente pas de porosité capillaire.

Hydratation et exothermie

Les adjuvants cinétiques sont les retardateurs et accélérateurs de prise et de durcissement. Les superplastifiants ont un effet secondaire (retard de prise).

Si on augmente la température, la réaction d'hydratation est plus rapide.

Comportement mécanique des bétons

La résistance est l'aptitude du matériau à résister à un chargement (ruine par propagation de fissures).

L'auréole de transition est l'interface pâte de ciment/granulats. Localement, le E/C y est plus fort, c'est le point privilégié de propagation de fissures. Pour les bétons ordinaires, la rupture a lieu avec déchaussement des granulats. Pour les bétons à hautes performances (avec ajouts de fumées de silice), la rupture est transgranulaire.

La phase granulaire influe sur : la densité, le module élastique, la stabilité dimensionnelle, les caractéristiques physiques et chimiques, la résistance propre, la forme et la microfissuration. La pâte de ciment influe sur le degré d'hydratation et la résistance propre, fonction décroissante de la porosité.

Écoulement et ouvrabilité des bétons

Ouvrabilité des bétons

Elle est fonction des quantités d'eau et de pâte de ciment. On la mesure empiriquement : cônes d'Abrams (slump test), mini-cône (mortiers), maniabilimètre, cône de Marsh (pâtes ou coulis) ; ou physiquement : rhéomètres à bétons, estimation de paramètres intrinsèques.

Le cône d'Abrams (slump test) : on mesure l'affaissement du cône après piquage.

Maniabilimètre : on mesure le temps d'écoulement du béton pour s'étaler dans le récipient (au préalable collé à la paroi) après mise en route d'un vibreur.

Cône de Marsh : on mesure le temps d'écoulement de 500mL dans un entonnoir (méthode des coulis de l'AFREM).

Malaxage des bétons

On mélange les différents constituants pour en faire un composite macroscopiquement homogène. Le processus est géré empiriquement. On distingue trois types de malaxeurs : l'annulaire à axe vertical et pales fixes (malaxeur le plus courant), à axe vertical équipé de deux tourbillons, de type bétonnière.

Le pompage de bétons

Le transport est rapide et continu et permet d'éviter les grues.

Formulation des bétons

Optimisation du squelette granulaire

La recherche d'un maximum de compacité du squelette granulaire permet de réduire la quantité de pâte nécessaire pour une ouvrabilité donnée (et ainsi réduire les coûts et les émissions de CO₂, l'exothermie...), tout en maximisant la résistance mécanique à la compression.

On peut pour cela : ajouter des fines en complément granulaire, utiliser des adjuvants superplastifiants pour défloculer les fines, utiliser des adjuvants réducteurs d'eau pour limiter le volume d'eau.

Principes de base

Une formule de béton est toujours donnée pour 1m³ de béton frais.

Ses résultats théoriques sont : la masse d'eau efficace disponible pour l'hydratation, les masses de granulats secs, les masses d'adjuvant, le volume d'air occlus (entraîné lors du malaxage ou par la présence d'un entraîneur d'air).

Il faut ensuite la corriger en calculant la masse d'eau à réellement ajouter dans la gâchée en tenant compte de l'eau déjà présente dans les granulats humides et l'adjuvant et la masse de granulats humides à introduire.

Notion d'eau efficace

C'est l'eau tout juste disponible pour l'hydratation du ciment. L'eau d'ajout est celle introduite lors de la gâchée

Les modèles de résistance

Loi empirique de Feret

Loi empirique de Bolomey

Méthode de formulation de Dreux-Gorisse

Méthode graphique d'optimisation du squelette granulaire :

- Détermination du D_{max} (conditions de ferrailage)
- Estimation du volume des fines (formule et tables)
- Estimation de V_e et V_v (conditions d'ouvrabilité recherchées : tables)
- Calcul de la masse de ciment suivant la résistance mécanique à satisfaire (formules de Feret ou Bolomey)
- Calcul des masses de granulats (à partir des courbes granulométriques : calculs de A et B puis intersection avec droite M_s : 95% sur sable et m_g : 5% sur courbe du gravillon. On obtient les proportions volumiques de sable et de gravillons)

Mesure du volume d'air occlus dans un béton

Aéromètre à béton : l'air occlus dans le béton est compressible. On applique 0,1 Mpa ; on pique ou on fait vibrer et on lit directement le volume d'air en % par rapport au volume total de béton de 1m³.

La durabilité des bétons

La porosité et la fissuration sont les portes d'entrée des agents agressifs.

Les mécanismes de dégradation

Actions mécaniques : fatigue, cycles de gel/dégel

Actions physico-chimiques : corrosion des armatures des bétons armés, dégradation de la matrice cimentaire (lessivage des hydrates...)

La corrosion des armatures est due à :

La carbonatation des bétons : action du CO₂ de l'atmosphère sur la portlandite, les silicates, l'ettringite, les alcalins... Elle entraîne une baisse du pH de 13-14 à 9, ce qui dépasse les aciers et induit leur corrosion. On détecte le front de carbonatation par projection de phénol.

La pénétration des ions chlorures : entraînement dans le mouvement d'ensemble de l'eau liquide ou gradient de concentration (transport par diffusion). La corrosion s'effectue alors par piquetage.

Réaction alcali-granulats

Elle concerne de nombreux ouvrages et se manifeste par un maillage de fissures, des exsudations de calcite et parfois de gels de silicate alcalin, des pustules ou cratères, des déformations de structures... Les désordres sont favorisés par un environnement humide.

L'origine du problème est une réaction chimique entre certaines formes de silice des granulats et la solution aqueuse des pores contenant principalement des ions hydroxydes, alcalins ou calcium... En présence d'eau, le gel formé est un gel gonflant qui apparaît à l'interface pâte/granulats.

Formation différée d'ettringite

Une élévation de température (>65°C) conduit à une plus grande quantité de sulfates pour stabiliser l'ettringite. Ainsi, pour des températures élevées, l'ettringite se dissout ou ne se forme pas.

Lorsque le béton revient à température ambiante, l'ettringite peut se former dans une matrice rigidifiée. Des micro-cristaux sont observés : dans la matrice (pores, veines, fissures...), aux interfaces matrice-granulat.

Cette formation est non-expansive dans des espaces non confinés mais elle serait expansive dans des espaces confinés.

Fissuration par retrait

Retrait plastique : origine exogène : dessiccation superficielle du béton, engendré par la dépression capillaire qui induit des contraintes de succion. Il entraîne des fissurations sous forme d'écaillage.

Retrait thermique : réactions d'hydratation du ciment exothermiques, expansions puis contractions

Retrait d'autodessiccation : contraction isotherme observée sur du béton en cours d'hydratation, conséquence de la contraction le chatelier, engendre la création de vides gazeux à l'intérieur de la porosité de la pâte de ciment.

Retrait de séchage : déséquilibre hygrométrique entre le milieu extérieur et le béton

Les bétons spéciaux

Les bétons à hautes performances (BHP) : meilleure compacité microstructurale interne. Adjonction de fumée de silice.

Bétons autoplaçants : mise en place sous son propre poids sans vibration. L'écoulement se fait sans blocage. La mise en œuvre est facilitée, la productivité améliorée et les nuisances sonores réduites. Le volume de pâte doit être plus important et on utilise des superplastifiants, des agents de viscosité...

Bétons de fibres métallique, synthétiques...

Bétons de fibres métalliques à ultra hautes performances (éléments porteurs).

Bétons légers de polystyrène

Bétons de granulats légers

Bétons cellulaires

Bétons de chanvre

...

Les liants hydrocarbonés et leurs applications

Origine des liants hydrocarbonés

Origine animale : pétrochimie...

Etat naturel : pétrole brut..

Origine végétale : traitement de la houille, cokerie, goudron brut...

Distillation directe

Brut : élimination des eaux dans un four

Passage en tour atmosphérique : pression normale

Brut réduit dans un four

Tour sous pression réduite dite sous-vide...

Le bitume est un résidu de distillation sous-vide...

Le résidu sous-vide est désasphalté : bitume pigmentable

Le résidu est soufflé (on fait passer à très haute température une masse d'oxygène sur le résidu pour le durcir) : bitume oxydé

Dans les raffineries, on procède à des « cocktails de bruts » qui sont des mélanges formulés de pétrole brut pour certains bitumes.

Le bitume

C'est un mélange complexe d'hydrocarbures ; on y trouve des traces de métaux lourds. Sa composition générique est :

Huiles saturées
Huiles aromatiques
Résines
Asphaltènes (poudre noire en suspension dans une phase huileuse)

} maltènes

Les principaux essais de caractérisation

Pénétrabilité à l'aiguille : masse de 100g sur une aiguille : pdt 5s à 25°C, on mesure dH dans une masse de bitume (en 1/10mm). Le bitume oxydé est moins susceptible thermiquement.

Température de ramollissement bille et anneau : on laisse tomber une bille sur un diaphragme de bitume et on ajoute 5°C toutes les minutes. On mesure dH.

Température de fragilité Fraass : on descend d'un °C toutes les minutes et on exerce une flexion à chaque fois : on relève la cassure et on garde la température Fraass (°C). Les bitumes mous cassent à -15°C, les durs à -8/-9°C.

Essai de durcissement simulé RTFOT : on oxyde un film de bitume et on tourne à 15tours/min. On compare les caractéristiques entre avant et après le test.

Définition de la viscosité

Viscosité : $\eta = \frac{\sigma}{\tau}$; c'est la résistance du fluide qd on le met en mouvement.

Avec contrainte de cisaillement : $\sigma = \frac{F}{S}$

Et taux de cisaillement : $\frac{|v|}{e}$

La viscosité dynamique est mesurée à l'aide de cylindres coaxiaux ou du cône-plan.

Densité relative...

Vieillessement à long terme PAV : 20 heures à 90°C (2,1 Mpa)

Module de rigidité des bitumes

Module = contrainte/déformation relative = constante pour une température et temps de charge donnée.

Solide et élastique : droites (module en fonction du temps de charge)

Corps viscoélastique : décroissances paraboliques

Corps visqueux : droites décroissantes

Pour une sollicitation sinusoïdale sur un matériau viscoélastique, la déformation est déphasée par rapport à l'effort appliqué. On peut alors définir un module de rigidité complexe.

Fabrication des bitumes purs

En ligne ou par bacs.

En France : 35/50 ou 50/70 (graves bitumes / bétons bitumeux)

Les bitumes spéciaux doivent leurs caractéristiques aux procédés par lesquels ils sont produits (bitumes durs, multigrades, liants de synthèse clairs, liants pigmentables...)

Les bitumes industriels (autres usages que la construction et l'entretien des routes) : bitumes oxydés obtenus par soufflage (air à 250/290°C). Leur application principale est l'étanchéité.

Bitume modifié par des polymères : un élastomère ou plastomère est ajouté et donne une consistance à chaud au bitume et une certaine souplesse à froid.

Une meilleure souplesse à froid entraîne un élargissement du domaine de plasticité. Au delà, le bitume ramollit ce qui provoque orniérages et ressuges (plaques noires dues à la remontée du liant au dessus des gravillons), ou encore des fissurations et des rejets. Le bitume modifié concilie les avantages des bitumes durs et bitumes mous.

La modification entraîne également une meilleure résistance à l'arrachement et une augmentation de la rigidité du liant.

Cohésion au mouton pendule

Un pendule vient frapper un cube lié à un support. On mesure l'énergie nécessaire à l'arrachée du cube (angle du pendule après le choc). La valeur caractéristique est la valeur maximale de la cohésion.

Essai de traction : on tire un filet de bitume.

Retour élastique

On étire le bitume modifié, on mesure son retour à la normale : le bitume pur ne présente pas de retour : le modifier lui donne son élasticité. On pratique également des cocktails de modifiés.

Les liants anhydres

Ajouter du kérosène peut fluidifier le bitume, car le kérosène contient beaucoup de composants volatiles et un point d'éclair très bas (explosif).

Ajout d'huiles : fluxés

Ajout de brai de pétrole, de goudron routier : composés

Bitume et fluxant (enduits superficiels, enrobés stockables à T°C ambiante) = bitume fluxé. Gain en viscosité, adhésivité, vitesse de séchage, caractéristiques stabilisées (durcissent en séchant).

Pseudo viscosité STV (standard test viscosity) : c'est le temps d'écoulement en secondes (50mL à 25°C dans un diamètre de 10mm).

Emulsion

C'est la dispersion d'un liquide dans un liquide. L'émulsion de bitume est la dispersion d'un liant bitumineux dans de l'eau (ne marche que si on ajoute du tensioactif). On les mélange puis on les passe dans une turbine. Les particules se repoussent électriquement à cause du tensioactif : l'émulsion est réussie.

En France, on ne pratique que des émulsions cationiques : charge positive. Ses caractéristiques sont la teneur en eau, la viscosité, la rupture (séparation d'avec l'eau), l'adhésivité et la stockabilité...

Indice de rupture : masse de fines nécessaire à la rupture de 100g d'émulsion.

Rupture-adhésivité : décantation, floculation, coagulation, prise puis mûrissement. Adhésivité : 100g de granulats lavés et séchés avec 150g d'émulsion : après 1minute, lavage puis mesure de la surface recouverte. Après 16heures à 60°C dans l'eau : mesure de la surface recouverte.

Essai dit « à la plaque vialit » : on fait tomber une bille sur une plaque retournée en équilibre sur 3 clous. On compte les graviers tachés : caractérise l'adhésivité.

Les enduits superficiels

Différentes structures : monocouche (gravillons sur liant), double gravillonnage (forte rugosité), bicouche, monocouche prégravillonné...

Les enrobés à froid : émulsion de bitume rupture lente

L'enrobage est incomplet : il n'y a pas de refroidissement nécessaire.

Les enrobés stockables : ils contiennent du bitume fluxé (pour la maniabilité) ; ils sont utilisés pour reboucher temporairement.

La couche de roulement est monocouche ou bicouche.

Les enrobés coulés à froid sont fabriqués directement dans la machine (malaxé, produit très fluide qui donne de l'étanchéité).

Cohésion mesurée au cohésivimètre Bénédicte. Abrasion : WTAT

Les enrobés à chaud

Coupe d'une chaussée : arase de terrassement puis plate-forme support de chaussée puis couches d'assises puis couche de surface.

L'enrobé à chaud est fabriqué et répandu à chaud de :

Granulats (gravillons, sables, fines fillers, agrégats d'enrobés)

Liants hydrocarbonés (bitumes pur, modifié, spécial)

Ajout éventuels dans le malaxeur (polymère, caoutchouc, fibres...)

En surface, l'enrobé est uni, adhérent, évite le bruit, a des propriétés photométriques et a une couleur esthétique. Ils ont une bonne durée de vie, bonne tenue à l'eau, résistants à l'orniérage, un bon module de rigidité et résistants en fatigue.

Enrobés épais ($e > 5$), minces, très minces, ultraminces (non normalisés), à usages spéciaux (colorés, sols industriels, anti-kérosène...)

Les enrobés épais pour couches d'assise : grave bitume, enrobés à module élevé...

Les enrobés pour couches de surface : bétons bitumeux semi grenus, aéronautiques, souples, à modules élevés...

Les enrobés minces pour couches de roulement : bétons bitumeux minces, drainants, cloutés...

On peut définir la teneur en liant, le module de richesse, la masse volumique réelle, la masse volumique apparente (mesurable volumétriquement, hydrostatiquement, par gammadensimètre sur chantier ou banc gamma)

Essai PCG : presse à cisaillement giratoire (pour le comportement au compactage d'un enrobé... mesure de la teneur en vides fonction du nombre de girations, de l'effort de cisaillement...)

Essai duriez : résistance mécanique à la compression (écrasement d'une éprouvette dans une presse et mesure de la résistance...).

Influence des facteurs de composition :

Sur le % de vides : teneur en liant, %de fines, %de sable...

Sur la tenue à l'eau : nature du liant, nature des granulats...

Essai Marshall : écrasement d'une éprouvette diamétralement avec confinement. Mesure de la compacité Marshall (% de vides)

Essai d'orniérage LCPC : mesure d'une ornière créée par roulement d'une roue (exprimée en % de l'épaisseur de la plaque). Influence des facteurs de composition : angularité des sables, teneur en liant, nature du liant, susceptibilité du liant...

coeff. de poisson : dI/dL ; module $E = \sigma/\epsilon$ (dL/L)

Physico-Chimie des matériaux

Comportement au feu des matériaux

La protection fixe deux critères : la réaction au feu (qualifie la facilité à s'enflammer et alimenter le feu en 5 catégories M0 à M4) et la résistance au feu (3 critères de C1 à C3).

Propriétés thermiques

Grandeurs thermiques

Conductivité, coeff. d'échange, chaleur massique, diffusivité, effusivité, propriétés radiatives...

Trois niveaux d'échelle

Macro, micro et submicroscopique

Trois modes de transfert

Conduction, convection, rayonnement (phénomènes internes ou surfaciques)

Loi de Fourier

$\varphi = -\lambda \frac{dT}{dx}$ (λ conductivité thermique, du 1/1000 à la centaine).

Résistance thermique

Indépendante de la température : $R = \int_{S_1}^{S_2} \frac{dS}{\lambda(s) \cdot S(s)}$

Influence de la température sur la conductivité des fluides

Gaz : conductivité croissante avec la température

Liquides : diminue qd la température augmente

Variations linéaires en première approximation

Diffusivité

$a = \frac{\lambda}{\rho c}$; rapport entre conductivité et chaleur spécifique volumique.

Caractérise la vitesse de migration de la chaleur au sein du milieu.

Effusivité

$b = \sqrt{\lambda \rho c}$; capacité d'un matériau à réagir à un apport de chaleur (régime variable). Sensation physiologique des températures.

Nombres sans dimension dans un problème de conduction

Nombre de Biot : rapport entre la résistance thermique interne du milieu et la résistance thermique externe.

Nombre de Fourier : rapport entre la vitesse de transfert et la vitesse de stockage de la chaleur (caractérise la pénétration de la chaleur en régime variable).

Propriétés radiatives

Réfectivité : permet la détermination des autres caractéristiques...

Matériau opaque : son épaisseur est telle qu'aucune fraction du rayonnement incident n'est transmise (fonction de la longueur d'onde, des propriétés intrinsèques, de l'état de surface...)

Emissivité : loi de Kirchhoff... augmentation forte avec la direction dans les GLO. Métaux : variation quasi-linéaire avec la température. Diélectriques : forte au voisinage des fréquences de résonance du réseau cristallin et parfois très faibles en dehors de ces plages, fortement dépendantes des impuretés... Dépendance variable à l'égard des températures. L'émissivité croît avec la rugosité.

Transferts thermiques dans les milieux poreux

Conductivité thermique équivalente d'un milieu poreux : modèles divers, bornée par ces modèles.

Echanges radiatifs dans les milieux poreux : définition d'une conductivité thermique de rayonnement.

Cas des isolants fibreux : conductivité équivalente fonction de la phase gazeuse, de la phase solide, du rayonnement... fortement dépendante de la porosité ; décroissance forte aux faibles masses volumiques...

Typologie des bruits dans le bâtiment

Isolation/correction

Correction : fait de maîtriser l'énergie sonore réfléchi sur les parois d'un local pour diminuer le niveau sonore et améliorer les qualités d'écoute.

Isolation : fait de réduire ou d'éviter la transmission sonore d'un local à un autre ou de l'extérieur vers un local...

Contexte réglementaire

Réglementation basée sur une exigence de résultats (établissements d'enseignement, de santé, à usage d'habitation, hôtels...)

Mesure du coeff. d'absorption sabine

Tr vide puis Tr avec matériau : α_S puis α_W

Mesure de l'indice d'affaiblissement acoustique

Salle réverbérante en émission et en réception. Mesures du $R(f)$ puis R_w

Combles perdus : isolation en vrac entre solives (vermiculite, flocons laine minérale, perlite...)

Combles aménagés : isolation en une couche sous chevrons et entre pannes

Toitures sèches métalliques : isolation sous pannes en faux plafond suspendu (réduction du volume à chauffer)

Toitures étanches sur bac acier : isolation support d'étanchéité fixée mécaniquement

Toitures étanchées sur maçonnerie : isolation inversée sur isolation existante

Contre-cloison maçonnée : isolation thermo-acoustique des murs extérieurs derrière une contre-cloison maçonnée

Doublages collés : complexe de doublage collé

Doublage sur ossature : isolation sous ossature métallique et plaque de plâtre

Doublages sur ossature : détail montage en neuf et rénovation

Cloisons sèches : cloisons et doublages de très hautes performances acoustiques

Isolation par l'extérieur : isolation en laine de verre derrière bardage ventilé

Bardages métalliques : panneaux sandwichs isolants

Revêtements absorbants

Panneaux mureaux (mousse d'aluminium)

Dalles plafond – flochage

Planchers bas maçonnés (isolation sous chape flottante)

Planchers d'étages maçonnés (isolation acoustique de faible épaisseur sous dalles de panneau de particules)

Planchers légers en rénovation (isolation sous dalles de panneau de particules)

Planchers par le dessous (isolation sous plancher bois, sur ossature métallique ou isolation en pose rapportée)

Faux plafonds

Tuyauteries – conduits (isolation thermo-acoustique des conduits aérautiques par l'intérieur)

Carrelages

Stratifié

Parquets en bois

Revêtements textiles, moquettes

Revêtements en fibres naturelles

Revêtements plastiques (vinyles)

Linoléum

Liège

Parois en verre

Portes...

Comportement mécanique mono-dimensionnel des matériaux du génie civil

Approche pragmatique : simplifier la description du comportement
Essais de caractérisation homogènes (teste tous les volumes élémentaires d'un matériau de la même manière) et non destructifs.

Comportements mono-dimensionnels

Trois comportements de base : élasticité, viscosité, plasticité (+ combinaisons...)

Acier : élastoplasticité (linéaire puis non retour à l'état initial)

Viscoélasticité : bitume (d'abord élastique puis visqueux)

Viscoplasticité : pâte de dentifrice

Elasticité

un milieu est parfaitement élastique si son comportement est entièrement réversible. Le chemin en décharge est confondu avec le chemin en charge.

Q charge ; q déformation

$Q=f(q)$; $dQ=f'(q)dq$ (cas linéaire : loi de Hooke $Q=kq$)

Schématisation : le ressort

Viscosité

Un milieu est visqueux pur s'il existe une relation bi-univoque entre le paramètre de charge Q et le paramètre de vitesse de déformation dq/dt .

$Q=g(dq/dt)$

Cas linéaire : $Q=ndq/dt$ (viscosité constante : fluide newtonien).

Schématisation : le dashpot

Plasticité

Un milieu est plastique pur s'il est irréversible, indépendant de la vitesse de sollicitation et présente un seuil de contrainte pour l'apparition de la déformation plastique.

A partir d'un certain niveau de charge : s'écroule.

Schématisation : le patin frottant

Comportements complexes

En série : les q s'ajoutent (déformation) et les Q sont égaux (charges)

En parallèle : les Q s'ajoutent et les q sont égaux

Fonction de fluage : déformations constantes si l'état de contrainte est constant.

Fonction de relaxation : variation de l'état de contrainte si le matériau est maintenu à un état de déformation constant.

Modèle de Maxwell : viscoélasticité fluide (dashpot + ressort)

Modèle de kelvin : viscoélasticité solide (parallèle dashpot/ressort)

Corps de Bingham : viscoélastoplasticité (parallèle dashpot/patin + série ressort)

Essais de caractérisation

Essais simples et normalisés

- Essais de traction/compression
- De flexion
- De compression diamétrale
- De torsion
- De cisaillement (boîte de Casagrande)