

CARACTERISATION GRANULAIRE

Tenant compte de l'existence d'une grande variété des roches volcaniques et leur exploitation en tant que matières premières au niveau industriel, il est impératif de soumettre les granulats prélevés à des études d'identification et de caractérisation pour une meilleure utilisation. Particulièrement, pour les pouzzolanes, si leurs compositions minéralogique et chimique sont favorables, elles peuvent être utilisées comme ajouts dans la confection de bétons. C'est dans un objectif de mieux connaître la composition des diverses pouzzolanes que nous avons effectuée des prélèvements d'échantillons et pour prévoir pratiquement leurs utilisations.

Etudes chimiques et minéralogiques des granulats

I.1.1. La diffraction des rayons X (DRX)

La diffraction des rayons X est une technique cristallographique basée sur les principes selon lesquels les rayons X en tant que radiations électromagnétiques de très courtes longueurs d'ondes sont d'un ordre de grandeur comparable aux intervalles caractéristiques des réseaux naturels. Ces rayons sont diffractés par les cristaux comme la lumière l'est par le réseau tout en donnant des phénomènes d'interférences identiques.

Les conditions de diffraction d'un rayonnement X sont définies par la relation de Bragg. [63].

$$n\lambda = 2d \cos \theta$$

avec :

- n : nombre entier désignant l'ordre de réflexion
- λ : longueur d'onde du rayonnement X
- d : distance ou espacement réticulaire
- θ : angle de diffraction = angle d'incidence

En pratique, chaque espèce cristallisée donne un spectre de diffraction propre à elle.

I.1.2. Analyse par microscope électronique à balayage (MEB)

Le MEB consiste à utiliser les électrons émis par la surface d'un solide lorsqu'elle est bombardée par un faisceau d'électrons dont l'énergie est de l'ordre de quelques KEV.

Le faisceau d'électrons émis par un filament de tungstène est en premier lieu accéléré puis concentré. Un dispositif intermédiaire permet au faisceau de balayer la surface à étudier.

Quant aux impacts, plusieurs rayonnements sont émis, mais seuls les électrons secondaires et retrodiffusés contribuent à la formation de l'image de topographie de l'échantillon qui sont reçus par un scintillateur avec un photomultiplicateur. De plus, l'image électronique s'obtient sur l'écran d'un tube cathodique avec une brillance modulée par le courant des électrons issu de l'objet.

I.1.3. Analyse par micro – sonde électronique

La micro-sonde électronique est un équipement employé en micro-analyse par émission des rayons X. Les atomes de l'échantillon sont excités par l'impact d'électrons accélérés sous des tensions comprises entre 5 et 40 KV. Le regain de l'état fondamental se fait par la libération d'une certaine quantité d'énergie relative à l'état excité. Cela se manifeste par des émissions électromagnétiques comme les rayons X ainsi que des émissions électroniques.

Un spectre de rayonnement X caractéristique correspond à chaque élément. Les raies détectées sont utilisées en général dans un domaine de tensions comprises entre 1 et 10 KV.

Une méthode d'analyse spectrométrique se fait à l'aide d'un détecteur qui, par chaque photon X reçu est conçu à émettre un signal électronique spécial correspondant à son énergie dont l'effectif d'impulsions détectées est compté. Du fait qu'on a plusieurs niveaux jointifs classés.

Caractéristiques géométriques et physiques

I.2.1. Analyse granulométrique

L'objectif de l'analyse granulométrique est de déterminer la granularité qui n'est autre que la distribution dimensionnelle d'un granulat, ce qui consiste à tamiser ce dernier sur une série de tamis à mailles carrées et à peser les refus. La déduction des tamisats permet de faire le traçage de la courbe granulométrique correspondante.



Figure n°21 : Jeu de Tamis

I.2.2. Mesure des masses volumiques

Quelques caractéristiques granulaires font l'objet de spécifications particulières aux granulats (NFP 18 307) telles que :

- La masse volumique des grains ;
- La masse volumique de la matière ;
- La masse volumique réelle des grains ;
- La masse volumique apparente du granulat.

I.2.2.1. La masse volumique apparente d'un granulat.

Cette masse s'obtient par la pesée d'un échantillon introduit sans tassement dans un volume unité. Elle peut aussi être définie pour le cas spécifique de granulats secs où ces derniers doivent être préalablement étuvés.

1.2.2. La masse volumique réelle des grains

Cette masse volumique s'obtient par le rapport de la masse sèche de l'échantillon par le volume occupé par la matière solide sans négliger les vides contenus dans les grains. Dans cette étude, notre détermination a été faite selon la norme française correspondante à la suite du prémouillage granulaire.

1.2.3. masse volumique de la matière

On obtient la masse volumique de la matière par la pesée d'un échantillon finement broyé des grains et par la mesure de son volume à l'aide d'un picnomètre.

I.3. Etude du phénomène d'alcali-réaction des granulats dans les bétons

I.3.1. Généralités

Les réactions alcalis-granulats sont des phénomènes physico-chimiques internes au béton. Elles tiennent leur origine dans la combinaison de trois réactifs : les granulats, la pâte de ciment et la phase aqueuse interstitielle.

L'ensemble des auteurs s'accorde aujourd'hui à attribuer le phénomène à la combinaison de deux facteurs essentiels : la réactivité de la silice contenue dans les granulats et la teneur en alcalins de la pâte de ciment [64], pourvu que l'eau soit présente en quantité suffisante. L'hyperbasicité du milieu est alors un facteur déterminant de la réaction.

Longtemps, l'alcali-réaction a épargné les constructions en béton. Pour des raisons liées à la protection de l'environnement, la formulation des bétons a évolué depuis quelques dizaines d'années. La diversification des granulats utilisés dans la composition du béton et l'augmentation de la teneur en alcalins de la pâte de ciment ont ainsi contribué à la multiplication des risques

Les ouvrages construits en béton répondent désormais à un cahier des charges définissant de façon très précise leur composition (granulat -ciment -eau) suivant le niveau d'exposition au risque. Dans les conditions idéales, c'est-à-dire de forte humidité, au développement de l'alcali-réaction tels que les ponts et barrages, il est interdit d'utiliser des granulats réactifs.

En général, il existe une divergence entre la réaction de la silice avec la chaux et la réaction des alcalis. La première a une forme active, accroissant avantagement la résistance des bétons. La seconde tend à causer beaucoup la détérioration à travers l'expansion du béton. De ce fait, il nous a été intéressant de miser sur le phénomène qui est une réaction compatible à l'obtention de quelques bétons de pouzzolanes naturelles.

I.3.2. Phénomène observé

Tout d'abord, les premières réactions alcalis – silice furent signalés par STATION en 1940 moyennant ses observations expérimentales sur les ouvrages dégradés [65].

Sur le plan géologique, ces cas ont été aussi enregistrés essentiellement aux U.S.A et Canada, en Australie, en Nouvelle Zélande, en Afrique du Sud, en Europe du Nord (Danemark, Island).

Il est à indiquer que les réactions alcalis – silice paraissent plus ou moins larges même si, dans certains cas, les premiers signes aient lieu à un an d'âge du béton. Elles se présentent par des fissurations unidirectionnelles dues à l'expansion du béton. Ces fissures peuvent engendrer une détérioration complète au niveau structurelle due à la chute des résistances mécaniques, selon leur importance et leur dimension.

1.3.2.1. Manifestations de dégradation

La réaction alcali–silice granulaire est à l'heure actuelle reconnue en tant qu'une réaction chimique [66] entre les ions hydroxydes aqueux des pores du béton et de formes réactives de silice qui se trouvent dans certains granulats. Cette réaction engendre la mise en œuvre de forces expansives dans le béton.

Néanmoins, les mécanismes fonctionnent d'une façon complexe et il paraît encore difficile de soutenir l'idée selon laquelle on dispose de modèles réactionnels quantifiables et indiscutables [65] [67].

1.3.2.2. Acteurs essentiels de la réaction

Le phénomène d'alcali – réaction se repose sur un certain nombre de paramètres tels que les suivant :

1.3.2.2.1. Granulats

Nous avons déjà vu généralement auparavant que les granulats siliceux comprenant des formes de silice amorphe ou mal cristallisée s'avèrent douteux au point de vue de la réaction alcali – réactivité notamment si leur altération est importante.

Quelques minéraux et roches ont fait particulièrement l'objet de l'existence de réactivité [14]. Ce sont surtout des minéraux comme l'opale, la calcédoine, la cristobalite, la tridymite, le quartz cristocristallin. En général, il s'agit des grains fissurés ou altérés avec intercalation d'illite ou des veines. Pour certaines roches, il existe des granodiorites, la pumicite, la rhyolite, l'andésite, l'obsidienne, tuff volcanique, basalte, granite, schiste etc.

On peut affirmer que certains matériaux sont plus réactifs que d'autres. Il paraît y avoir un granulat ayant une teneur critique en éléments réactifs afin que la réaction se déclenche. Par conséquent, à titre d'application, des granulats réactifs ont fait l'objet d'une utilisation avec succès dans un objectif de réduire les éventuels désordres dus à la réaction alcali– silice [12].

Il est à singulariser que l'alcali–réactivité dépend de la surface spécifique des granulats [15]. La composition des granulats parfois pris en compte se limite à l'opportunité de silice réactive, même s'il existe sur échange de base [16].

1.3.2.2.2. Proportion d'alcalis dans le ciment

Les alcalis essentiellement mobilisables sont issus dans la plupart des cas du ciment. Ainsi, il est plus raisonnable de limiter la proportion des alcalis des ciments pour la mise en œuvre de granulats douteux. Selon LEA [13], la silice réactive semble comporter une surface interne élevée conduisant à l'hydratation ainsi qu'à la rupture de ses liaisons du type silice – oxygène par les actions d'alcalis. De cette constatation, l'alcali–réaction paraît être régie par le rapport alcalis / silice réactive.

1.3.2.3. Problématique

Au-delà de l'identification des réactifs, le scénario de la réaction est, quant à lui, très controversé. S'agissant notamment du site de formation du gel gonflant, deux principaux courants de pensée divisent la communauté scientifique.

Le premier définit les réactions alcalis-granulat comme des réactions topo-chimiques, c'est-à-dire que le gel gonflant se forme à l'interface pâte de ciment/granulat puis migre dans l'espace accessible, c'est-à-dire la porosité connectée aux sites de réaction. La mise en pression du gel, par production continue à l'interface pâte/granulat, est alors le moteur de cette migration.

Le second fait appel à la notion de mécanisme réactionnel trans-solution. Dans ce cas, le raisonnement s'appuie sur un processus de migration des réactifs nécessaires à la formation du gel gonflant des sites réactionnels(granulat) vers les zones « éloignées » de tout granulat. Le moteur de cette diffusion étant la différence de concentration entre les zones à forte concentration silicates (granulats) et les zones qui en sont dépourvues. Le gel gonflant se forme alors par combinaison des réactifs dans un « environnement favorable ». Il s'alimente alors par absorption d'eau.

Etant donné que le mécanisme de réaction alcalis-silice est parfaitement maîtrisé il s'avère impératif, si besoin est, de le vulgariser dans de nombreux pays et de prendre de mesures préventives nécessaires. Une étude préliminaire des ressources de granulats est obligatoire sur la réactivité potentielle. Cette mesure fait l'objet d'application sur nos échantillons de pouzzolanes à matrice basaltique : plus ou moins riche en alcalis selon des analyses chimiques(Biblio DEA), et en particulier ceux qui se rapportent à une certaine proportion en silice amorphe. Il est à noter que ces pouzzolanes ont aussi manifesté une réactivité pouzzolanique qui s'avérait être bonne.

I.4. Confection du béton

I.4.1. Etude des mélanges

L'expérimentation des mélanges des granulats a été faite en prenant comme gros granulats des gravillons de pouzzolanes naturelles provenant du site d'Ambohinaorina. Le choix de ce site est dû à la fois à l'abondance locale de ces produits et leur sensibilité aux alcalis (proportion d'alcalis la plus faible de tous les granulats).

La partie fine des mélanges est constituée par un ciment CPJ 35 provenant de la cimenterie HOLCIM et dans la plupart des cas des fines de taille inférieure ou égale à 100 μ issu du broyage des pouzzolanes d'Ambohinaorina. Il est incontestable que le rôle que le ciment peut jouer par sa nature de granulats est discutable, mais c'est surtout à long terme, donc durant la phase de durcissement.

Pour les bétons ternaires, nous avons utilisé comme granulats moyens un sable normal qui se présente comme un granulat presque non poreux.

D'une manière générale, l'eau influe légèrement sur le mélange granulaire. Le milieu diélectrique que forme d'eau dans le mélange change effectivement les forces intergranulaires, notamment pour les grains les plus fins [17]. Néanmoins, la règle régissant les mélanges est parfois conservée, et encore mieux pour les mélanges renfermant une quantité de fines raisonnables.

Les paramètres essentiels à respecter sont :

- Le prémouillage des granulats poreux ;
- Le malaxage du mélange ;
- La mise en place du béton ;
- La consistance du béton

La définition de ces paramètres qui doivent être respectés le mieux possible durant toute l'expérimentation va être décrite ci-après.

1.4.1.1. Le prémouillage des granulats poreux

Le prémouillage des granulats de pouzzolanes est effectué avant leur introduction dans le malaxeur [1] [4]. Le mode de prémouillage qui est constaté le plus bénéfique est l'immersion par laquelle des granulats sont immergés totalement dans l'eau au cours d'une durée permettant d'atteindre le palier observé sur les courbes d'absorption. Cette opération se fait généralement pendant une trentaine de minutes. Après, les granulats sont égouttés pendant 5 minutes environ avant d'être introduits dans le malaxeur. A noter que le procédé de prémouillage présente un avantage d'être rapide, efficace, et uniforme sur tout l'échantillon.

1.4.1.2. Le malaxage du mélange

Le malaxeur utilisé a un axe vertical selon les prescriptions de CORMON [1], pour des raisons d'efficacité. Cet auteur et aussi nous même ont enregistré une nette perturbation de la durée de malaxage sur les caractéristiques des bétons obtenus, et surtout les RT et RC comparées à 28 jours.

La variation des propriétés d'un béton est vraisemblablement causée par la formation des fines ou par le changement de la taille des granulats qui s'émettent pendant le malaxage. Une autre cause possible de ces changements est la forme granulaire de pouzzolane qui peut être soit brute et déchetée soit plus arrondie par le malaxage.

1.4.2. Perturbation morphologique des grains sur les résistances mécaniques

Pour mieux définir le rôle de la forme des grains sur les résistances mécaniques, nous avons utilisé de granulats pouzzolaniques sur deux échantillons d'un béton dosé à 450 kg/m³. Le premier échantillon renfermant des granulats de forme brute a été utilisé comme pour tous les autres essais. Dans le deuxième échantillon, nous avons introduit des granulats de classe pareille à ceux du premier échantillon ; cependant, ces granulats ont été préalablement roulés par un malaxage prolongé dans l'eau durant à peu près 30 minutes. Les fines en ont été écartées par simple rétention dans l'eau. Les résistances moyennes à 28 jours ont été de 14 MPa pour l'échantillon renfermant des granulats naturels et 16,9 MPa pour celui qui a subi le traitement de malaxage. Cela a constitué une augmentation relative de 20% par rapport au béton de référence. De cette expérience, on peut dire que la forme des grains peut augmenter nettement les résistances mécaniques des bétons de granulats légers.

1.4.3. Modalité de mise en place du béton

Cette mise en place est parfois perturbée par le poids volumique des grains du fait de l'important rôle joué par la gravité dans une telle opération. L'effet pervers peut ainsi avoir lieu.

Le malaxage des bétons est une opération industrielle devant à la fois assurer l'homogénéisation des constituants et leur permettre un agencement mésoscopique satisfaisant. Cette dernière action devient plus délicate pour des formules de béton de plus en plus complexes : aujourd'hui, cette constante évolution des bétons réclame des propriétés d'usage de qualité croissante dans des délais de fabrication toujours plus courts.

Les bétons de granulats légers se trouvent généralement impropres à l'application des méthodes les plus utilisées dans la mise en place. Cela tend à entraîner soit à l'important retrait du béton ; notamment s'il est plein et mou [23], soit à une ségrégation marquée.

Ainsi, il est parfois recommandé d'éviter la vibration pour la confection des bétons légers [1]. Nous avons élaboré un damage léger comme moyen de serrage du béton pour cause de l'action directe qu'il produit sur les grains les forçant à se mettre en contact mutuel. Par ce moyen, le phénomène de ségrégation disparaît et le retrait se réduit progressivement.

I.4.4. Consistance du béton

Cette consistance forme une propriété principale selon BARON [17]. Son importance c'est d'avoir une conception à l'aptitude à la mise en service du béton.

I.5. Elargissement de l'expérimentation aux mélanges ternaires

Par définition, le béton est un mélange hydraté de gros granulats, de sable et de ciment (avec ou sans fines). L'étude des mélanges ternaires est indispensable. Cette étude se fait par un simple élargissement de celle menée sur les mélanges à deux constituants.

Précisons le domaine de validité qui est fonction des dosages en ciment, en granulats et en eau et des conditions de mise en œuvre avant de procéder à cette étude.

I.5.1. Le dosage en ciment des bétons

Le dosage en ciment comme il est pratiqué pour les bétons des granulats légers est fonction généralement de la méthode de composition mise en œuvre ainsi que la résistance mécanique cherchée. Les expressions mathématiques de dosage en ciment sont parfois reliées à la quantité d'eau de gâchage sous la forme du rapport E/C ou l'inverse. Ce rapport qui est scrupuleusement contrôlé doit être minimisé.

D'une manière générale, on utilise des ciments Portland à des dosages compris entre 250 et 450 kg/m³.

I.5.2. Quantité des granulats utilisés

Cette quantité varie énormément en fonction des méthodes. Cependant, parfois les méthodes de compacité maximale se rencontrent dans la composition des bétons à granulats légers [24].

Le calcul des quantités des granulats utilisés nous entraînera à définir les mélanges selon que le béton que nous envisageons d'obtenir, soit plein, soit caverneux.

I.5.3. L'eau de gâchage

Est un ingrédient essentiel du béton, il joue deux fonctions principales: confère au béton sa maniabilité à l'état frais (ses propriétés rhéologiques) et assure l'hydratation des grains de ciment pour une prise et un durcissement.

Une fois la prise et le durcissement achevés, l'eau de gâchage résiduelle devient un constituant à part entière de la microstructure du béton, jouant ainsi un rôle essentiel dans le comportement de matériau durci, avec effets sur le plan mécanique mais aussi sur celui de la durabilité.

La quantité d'eau utilisée ou plus précisément le rapport eau/ciment a une forte influence sur la porosité du béton, sa perméabilité, les résistances mécaniques, la durabilité, la microstructure, la cinétique d'hydratation, etc [16]. L'eau de gâchage peut avoir plusieurs origines, mais seule l'eau potable est présumée conforme aux exigences de la norme NF EN 1008 [14], les autres comme l'eau récupérée de la fabrication de bétons, eaux d'origine souterraine, eaux naturelles de surface et eaux de rejet industriel, eau de mer et eaux saumâtres, doivent être soumises à des essais de contrôle préliminaire ainsi que les essais chimiques et mécaniques.

Pour une fabrication commode des bétons légers, le contrôle du dosage est inéluctable.

Dans le cas général, nous avons opté pour la minimisation des quantités d'eau de gâchage ; nous avons évité chaque fois le délayage des granulats.

I.6. Mode de mise en place du béton

Il ne faut pas oublier que, dans un béton, le mortier doit avoir une consistance telle qu'il puisse maintenir les gros granulats en suspension et que, dans un mortier, la pâte de ciment doit avoir une consistance telle qu'elle puisse maintenir les grains de sable en suspension, et qu'il faut en outre que les grains de ciment forment une suspension stable dans l'eau. Quand une de ces trois conditions ou les trois ensemble, ne sont pas remplies, le béton resse, et/ou l'on voit apparaître un phénomène de ségrégation.

Le béton est d'autant plus étanche que la quantité d'eau de gâchage est faible, que le serrage est plus énergique et que les vides qui peuvent subsister n'ont pas de communication avec l'atmosphère.

I.6.1. Serrage

La mise en place est souvent influencée par le poids volumique des grains à cause de l'important rôle que joue la gravité dans cette opération.

Les bétons de granulats légers en général se trouvent donc impropres à l'application des méthodes usuelles de mise en place qui tendent à provoquer soit d'importants retraits des bétons durcis, soit une ségrégation dans la masse du béton, surtout lorsqu'il est plein et mou [24].

Pour ces raisons, il est souvent recommandé [23] de ne pas vibrer les bétons légers.

Nous avons adopté un damage léger en bois comme moyen de serrage du béton, à cause de l'action directe qu'il produit sur les grains, les forçant à se mettre en contacts mutuels. Par ce moyen, le phénomène de ségrégation disparaît, et le retrait est réduit.

I.6.2. Coffrages

Durant la mise en place du béton, une partie des granulats vient s'immobiliser contre les parois du coffrage et, au cours de la vibration, le centre des gros granulats ne peut pas s'approcher plus près des parois du coffrage que de leur rayon. Le volume occupé par le vide entre les gros granulats est donc plus important que dans le béton de masse. Ce phénomène conditionne en partie la microstructure du béton de peau qui est plus riche en particules fines et en pâte de ciment.

Malgré les précautions prises, les coffrages en bois se détériorent rapidement. Aussi, surtout lorsqu'il doit y avoir répétition de faces de même module, employons-nous des coffrages métalliques qui donnent, eux aussi, de belles faces au décoffrage.

Nous avons conçu des coffrages aptes à résister aux efforts consécutifs aux effets dynamiques du serrage.

I.6.3. Séchage

Le séchage met en jeu des phénomènes complexes d'adsorption/désorption moléculaire et d'évaporation/condensation qui se produisent à l'échelle microscopique.

Les caractéristiques d'un béton durci dépendent grandement des conditions de conservation qui déterminent, dans une large mesure, les réactions d'hydratation et la porosité du matériau. Lorsque le durcissement d'un béton s'effectue dans l'eau, on observe une réduction progressive de la porosité. Il en est tout autrement si le mûrissement a lieu en contact direct avec

l'atmosphère et si aucune précaution de cure humide n'est prise. Nous entretiendrons par arrosage (7 jours) l'humidité nécessaire dans le béton pour en assurer la prise et le durcissement dans de bonnes conditions. Il sera protégé du soleil pour éviter un retrait trop rapide entraînant des fissures.

I.6.4 Décoffrages

Après démoulage ou décoffrage et en l'absence de cure, le béton d'enrobage proche de la surface perd rapidement son eau par dessiccation et l'hydratation de cette couche est limitée. Le degré d'hydratation est alors plus faible et la porosité plus élevée.

En principe, pour un béton normal, le décoffrage ne doit être effectué qu'après prise complète. En fait, nous considérons que le durcissement est suffisant et permet le décoffrage au bout de 7 jours pour nos échantillons.

Dans un premier temps, la procédure expérimentale adoptée pour les caractérisations physique et chimiques et l'étude de l'alcali réaction a été décrite. Le principe de base réside dans le choix des matériels utilisés.

Dans un deuxième temps, les Perturbations morphologiques des grains sur les résistances mécaniques ont été sommairement présentées.

Les différentes techniques énumérées sont utilisées pour avoir une bonne idée sur le mode de mise en place du béton.

II. CARACTERISATION MECANIQUE

L'analyse de béton durci comportera deux parties bien distinctes : les essais pour la détermination des différentes caractéristiques du béton et la recherche du dosage en ciment utilisé sur béton durci, à partir de l'analyse chimique. Ces essais, effectués à partir des éprouvettes, ont pour objet de déterminer les diverses caractéristiques du béton.

Ces essais s'appliquent aux bétons hydrauliques à usage courant, utilisés dans le domaine du bâtiment et des travaux publics.

Les caractéristiques mesurées sont :

- Résistance à la compression simple par l'essai de compression
- Résistance en flexion, par l'essai de flexion
- Résistance à la traction par l'essai de fendage

II.1. Essai de compression

L'essai consiste à presser une éprouvette bien déterminée entre deux plateaux d'une presse, avec une vitesse de chargement constante, jusqu'à rupture de l'éprouvette. Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques d'élancement égal à 2, Soit obtenues dans des moules indéformables et étanches qui sont généralement en acier, en matière plastique ou en carton, Soit prélevées par carottage du béton durci de l'ouvrage. Dans ce cas, un élancement différent peut être admis après accord entre les parties.

La machine d'essais est une presse de force appropriée qui doit être contrôlée et étalonnée, et dont les plateaux ou contre plateaux doivent avoir des dimensions égales ou légèrement à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essais.

Il conviendra d'éviter la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles seront retirées du milieu dans lequel elles auront été conservées pour être transférées à la salle d'essais.

L'influence d'une dessiccation est d'autant plus sensible que l'éprouvette à celles des faces de l'éprouvette soumise à l'essai.

L'éprouvette étant essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0,001. Eventuellement, calculer son poids volumique, en divisant son poids par le volume correspondant.

II.2.1. Rectification des extrémités

II.2.1.1. Accessoires pour le surfaçage

Les éprouvettes présentent des hétérogénéités en surface malgré le talochage soigné effectué lors de sa fabrication. Un surfaçage s'avère donc indispensable afin de garantir la planéité des surfaces et l'application d'une sollicitation axiale homogène sur l'ensemble de la surface.

1. Un appareillage spécifique, composé essentiellement :
 - d'un fond, surface horizontale rectifiée, destiné à recevoir le produit de surfaçage préalablement amené à la consistance voulue
 - d'un dispositif de guidage vertical de l'éprouvette rigidement solidaire du fond, permettant de mettre celle ci en contact avec le produit de surfaçage.
2. Un récipient, chauffé électriquement avec thermostat : la température de maintien à la consistance voulue du produit de surface est comprise entre +120°C et +130°C.
3. Une louche pour homogénéiser le mélange et prélever la quantité nécessaire
4. Un maillet non métallique.

L'ensemble de ce matériel est placé sous une hotte à aspiration forcée

II.2.1.2. Préparation du produit de surfaçage

Préparer un mélange constitué en poids par :

- 60% de fleur de soufre
- 40% de sable dur et fin, de granularité inférieure à 0,5 mm

Remplir le récipient aux trois quarts de sa contenance avec le produit de surfaçage préalablement homogénéisé. Mettre le thermostat sur la division correspondant à la température de +150°C. Remuer le mélange de temps en temps avec la louche jusqu'à fusion complète, et, dès que la consistance convenable est atteinte, ramener le thermostat à une température comprise entre 120°C et 130°C.

II.2.1.3. Mode opératoire du surfaçage

- ✓ Mettre à niveau l'appareil
- ✓ Essuyer soigneusement la face à surfacier
- ✓ Appliquer une mince couche d'huile sur le fond de l'appareil de surfaçage
- ✓ Homogénéiser avec la louche le produit de surfaçage, prélever en une seule fois la quantité voulue et la verser en la répartissant sur le fond de l'appareil
- ✓ Laisser descendre l'éprouvette lentement en se servant du dispositif de guidage vertical. Lorsque le produit est solidifié, frapper l'éprouvette à la main ou au maillet, pour la décoller du fond de l'appareil
- ✓ Recommencer les opérations précédentes pour l'autre face de chargement
- ✓ Vérifier, en frappant la face surfacée avec les doigts repliés si celle-là ne sonne pas creux, sinon la briser avec un marteau, et recommencer l'opération de surfaçage.

La faible concentration en particules de sable dur à la surface de l'éprouvette est négligeable compte tenu de sa faible épaisseur.

II.2.2. Condition de l'essai

- ✓ Mise en place et centrage de l'éprouvette
- ✓ Nettoyer les faces de chargement des plateaux ou contre_plateaux, ainsi que celles de l'éprouvette surfacée
- ✓ Placer l'éprouvette, face de l'arasement vers le haut



Figure n°22 : Ecrase béton

- ✓ La centrer par l'emploi d'un gabarit de centrage s'appuyant sur l'éprouvette elle-même, et non sur le produit de surfacage.
- ✓ Mise en charge
- ✓ Veiller à ce que le contact entre plateaux et éprouvette soit uniforme
- ✓ Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette. La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à 0,5 Mpa par seconde avec une tolérance de 0,2 Mpa par seconde, ce qui correspond à un accroissement de force de 10 ± 4 KN/s pour une éprouvette de format 16x32 cm.

II.2. Essai de fendage

Le présent mode opératoire a pour objet de décrire les différentes phases de l'essai pour la détermination d'une caractéristique du béton essayé, dite « résistance au fendage ». L'essai consiste à presser, suivant deux génératrices diamétralement opposées, une éprouvette bien déterminée, entre deux plateaux d'une presse, avec une vitesse de chargement constante, jusqu'à rupture de l'éprouvette

II.2.1. Eprouvtes

Les éprouvettes doivent être des éprouvettes cylindriques d'élancement égal à 2 :

1. Soit obtenues dans des moules indéformables et étanches qui sont généralement en acier ou en matière plastique, mais non en carton,
2. Soit prélevées par carottage du béton durci de l'ouvrage. Dans ce cas, un élancement différent peut être admis après accord entre les parties.

Il conviendra d'éviter la dessiccation des éprouvettes depuis le moment où elles seront retirées du milieu dans lequel elles auront été conservées pour être transférées à la salle d'essai. L'influence d'une dessiccation est d'autant plus sensible que l'éprouvette est petite et surtout si elle a été conservée dans l'eau.

L'éprouvette étant essuyée ou nettoyée, la peser avec une erreur relative inférieure à 0,001. Eventuellement, calculer son poids volumique, en divisant son poids par le volume correspondant.

II.2.2. Machine d'essais

La machine d'essais est une presse de force appropriée qui doit être contrôlée et étalonnée.

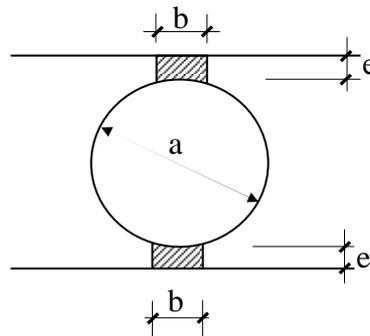


Figure n°23 : Machine d'essais

Les bandes de chargement, en contreplaqué neuf ayant les dimensions $b = (0,09 \pm 0,01) a$ et $e = 4 \pm 1$, sont utilisées en une seule fois.

Placer l'éprouvette et les bandes de chargement entre les plateaux de la presse Appliquer la charge d'une manière continue et sans chocs jusqu'à rupture de l'éprouvette. La vitesse de chargement doit être constante pendant toute la durée de l'essai et égale à $0,05 \text{MPa}$ par seconde avec une tolérance de $0,01 \text{MPa}$ par seconde.

II.3. Comportement et performances mécaniques

Les granulats légers entraînent une modification du comportement et des niveaux de performances mécaniques du béton. En effet, le granulat léger est poreux donc moins résistant qu'un granulat usuel. Le fonctionnement mécanique et le mode de rupture des bétons légers sont donc modifiés par rapport à ceux d'un matériau contenant des granulats rigides.

Si le béton contient des granulats rigides plus résistants que le mortier, ceux-ci constituent les points durs du système. Les contraintes imposées au matériau, entraînent des déformations notables dans le liant et négligeables dans le granulat. Des zones de concentrations de contraintes naissent donc dans le mortier, qui fissure. L'adhérence entre les granulats et le mortier étant insuffisante pour supporter les niveaux de sollicitation imposés, la fissuration du mortier se produit autour des grains qui se décollent de la pâte de ciment. La résistance du béton est donc pilotée par la résistance de la zone servant d'interface entre le mortier et le granulat rigide. A l'inverse, dans le cas du béton léger contenant des granulats de faible résistance, les contraintes cheminent à travers la pâte, contournant les « points faibles » du matériau. Le Mortier subit des niveaux de sollicitation élevés et les déformations de la pâte et des granulats sont importantes. Une fois les granulats écrasés, ils ne participent plus vraiment à la résistance du matériau et le mortier finit par céder. La résistance en traction des granulats pilote donc la résistance en compression du béton léger. Ce mode de rupture est possible car les granulats légers possèdent une surface poreuse importante qui crée une excellente adhérence entre la pâte et le grain. Ce n'est donc pas la liaison au niveau de la surface de contact qui est détruite comme dans le cas de granulats rigides mais le granulat qui cède.

Une nuance existe cependant dans le cas de granulats très déformables même si leur résistance reste modérée. En effet, sous l'effet des contraintes le mortier va se déformer et le granulat va faire de même par contact granulat-mortier. Comme le granulat peut supporter des niveaux de déformation supérieurs à ceux du mortier, c'est ce dernier qui va fissurer sous l'effet des contraintes et le granulat, n'ayant pas atteint son seuil de rupture, ne sera pas détruit. La rupture du béton se fait dans ce cas précis par rupture du mortier et non par rupture des granulats.

Ainsi, les caractéristiques des granulats sont déterminantes dans les performances des bétons légers, comme le montrent entre autres le travail expérimental et l'étude statistique de [44]

Bien que le béton soit principalement conçu pour résister à la compression, la connaissance de ses propriétés en traction est importante pour une description complète de son comportement matériel.

Les essais sont réalisés dans des conditions environnementales contrôlées et maîtrisées, notamment sous une température de 20 °C et une humidité relative proche de 0 %.

III. CARACTERISATION THERMO-ACOUSTIQUE

L'étude du comportement thermique et acoustique d'un matériau de construction, constitue un élément important à prendre en compte dans un habitat. Les paramètres thermique et acoustique auxquels nous nous intéressons dans cette étude sont la conductivité thermique (λ), la diffusivité thermique et le coefficient d'absorption, qui contribuent à une meilleure connaissance du comportement thermo acoustique des matériaux d'isolation et de construction.

III.1. Caractérisation thermique

Les propriétés de transferts thermiques sont directement liées aux constituants, à la matrice solide, réseau poreux et aux interactions entre les différents types de transferts existant dans le matériau. Les propriétés isolantes des matériaux de construction se quantifient au travers de deux paramètres usuels : la conductivité thermique λ et la diffusivité δ . Ceux-ci dépendent des caractéristiques intrinsèques des constituants, de la microstructure du matériau et des conditions de conservation (rôle de l'eau).

Pour décrire de manière au moins qualitative les phénomènes qui ont lieu dans le béton suite à une élévation de température, on prend en considération une paroi en béton dans des conditions initiales standard c'est-à-dire température ambiante et pression atmosphérique. En général, on peut imaginer de petites différences (externe – interne), un taux d'humidité et d'hydratation le long de l'épaisseur de la paroi non parfaitement homogène à cause de la chaleur relâchée pendant la maturation du béton c'est-à-dire on peut imaginer plus d'hydratation à l'intérieur du mur.

Un béton usuel à base de granulats rigides, contient de l'air, dû à l'arrangement de la phase solide (squelette granulaire) et à la prise de liant. Or, l'air immobile conduit faiblement la chaleur. Les bétons à base de granulats légers ont donc été développés, car ils permettent d'augmenter la proportion volumique d'air dans le matériau (i.e. la porosité), en ajoutant l'air intra-particule (i.e. du granulat). A titre comparatif, un béton hydraulique ($\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de 2,0 W/ (m.K) tandis qu'un béton d'argile expansé ($\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$) a une conductivité thermique de 0,60 W/ (m.K).

Un deuxième élément permettant de caractériser les propriétés thermiques des matériaux est la chaleur massique ou chaleur spécifique C en J/(kg.K). Cette grandeur caractérise la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de l'unité de masse de 1°C. Plus la chaleur massique sera élevée, plus le matériau aura besoin d'énergie pour que sa température augmente. Il sera donc moins sensible aux variations de températures du milieu extérieur. Un coefficient C élevé traduit une forte inertie thermique donc une tendance du matériau à peu évoluer lorsque les conditions extérieures changent. Il sert ainsi de régulateur de la température à l'intérieur de la structure.

Enfin, à partir de la conductivité λ et de la chaleur massique C , on définit la diffusivité a ($J/(m.K)$). Cette grandeur caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans un corps. Plus la valeur de a est faible, plus la chaleur met de temps à traverser le matériau. Ainsi, le pouvoir isolant du matériau dépend non seulement de la valeur de λ mais également de la vitesse de transfert thermique traduite par a .

III.1.1. Mesure de la conductivité thermique

Le choix d'une méthode de mesures de la conductivité thermique dépend de certains paramètres. En effet, lorsque le choix de la combinaison matériau-précision se pose de manière précise, de nombreux paramètres sont à prendre en compte :

- Le type de régime thermique car il peut être stationnaire, transitoire, ou quasi établi.
- Le type de forme géométrique du milieu (2D, 3D, axisymétrique, ...)
- Les dimensions et les rapports de dimensions.
- La simplicité de la méthode.
- Les tolérances (ou précisions) de certains paramètres.

Nombre de méthodes ont été élaborées pour la mesure de la conductivité des matériaux de construction. Ainsi, il mérite d'exposer le principe d'un certain nombre d'entre elles.

III.1.1.1. Méthodes usuelles de mesure.

Une distinction entre différentes méthodes s'appuie sur la définition du régime thermique temporel du milieu. Ainsi nous pouvons faire référence à deux classes : Les mesures stationnaires, et instationnaires.

Les méthodes en régime stationnaire sont conçues pour mesurer les conductivités thermiques des milieux isolants [68]. Elles consistent à supposer le milieu en équilibre thermique, et soumis à un flux stationnaire en fonction du temps. Le principe de mesure repose sur l'exploitation des mesures de la température en divers points du milieu, ainsi en s'appuyant sur la loi de Fourier et les conditions aux limites nous pouvons déterminer les grandeurs physiques du milieu. Le champ d'application de ces méthodes est limité. Dans la littérature, on peut citer certaines méthodes : la méthode de la plaque chaude gardée [69], la méthode de la barre [46], la méthode des boîtes [47], et la méthode du flux radial [48]. D'une façon générale, ces méthodes de mesure présentent des difficultés expérimentales tel que :

- L'existence de résistance de contact.
- Les fuites axiales et radiales.
- Les difficultés de mesure de la température surtout celles de la surface.

Ces méthodes de mesure ne sont pas destinées à mesurer toutes les grandeurs physiques. En effet, avec ces méthodes seules la conductivité thermique et la résistance de contact sont mesurées, limitant ainsi leurs champs d'application.

Le champ d'application des méthodes instationnaires est très vaste, grâce à plusieurs avantages :

- mesures directes des paramètres thermophysiques du milieu
- durée d'excitation thermique courte
- faciles à mettre en oeuvre

Les mesures de la conductivité thermique par les méthodes instationnaires consistent à exploiter des signaux de températures répartis dans un milieu en régime transitoire. Le principe de mesure s'appuie sur un modèle développé à partir de l'équation de conservation de l'énergie qui permet de trouver une relation directe entre les paramètres d'entrée et les grandeurs mesurées. Ces méthodes constituent un progrès incontestables dans la caractérisation

thermophysique des milieux et donnent de bons résultats de mesures. En contreparties de ses bons résultats, ces méthodes présentent un défaut dû à un grand nombre de limitations liées aux difficultés d'analyse des données obtenues, problème de mise au point de matériaux à étudier, et au problème de l'évaluation de la précision de la méthode. De nombreuses méthodes instationnaires ont vu le jour pour les mesures de la conductivité thermique, nous pouvons citer : méthode fil chaud [50, 51], plan chaud [52, 53], ruban chaud [54,55], pastille chaude [54], et Hot Disk [55, 56].

III.1.1.1.1. La méthode à flux et à température imposée.

Cette méthode s'applique à un système plan qui se trouve dans un régime permanent. On l'appelle également « méthode de la plaque chaude gardée » ou par simplicité « Méthode de POENSGEN ».

On place deux échantillons analogues de part et d'autre d'une plaque chauffante formant de trois zones comprenant :

- Une zone de mesure ;
- Une zone de garde ;
- Une zone de surchauffe.

Cette plaque est aussi munie des résistances chauffantes où est intercalée de plaques d'uniformisation thermique. Les échantillons ont leurs faces extérieures en contact avec des échangeurs à l'intérieur des quels circule un fluide isotherme. Les prélèvements thermiques se font par des thermocouples disposés aux interfaces.

La relation suivante permet d'obtenir le coefficient de conductivité thermique au régime permanent établi :

$$\lambda = \Phi e / S \Delta T$$

où :

- Φ : flux dissipé dans la zone de mesure.
- e : épaisseur des échantillons.
- S : surface de la zone de mesure.
- ΔT : différence thermique entre la face chaude et la face froide de l'échantillon.

Cette méthode est régie par la norme française NF x 10021 pour le calcul de la conductivité thermique en régime permanent. Elle s'applique essentiellement aux matériaux ayant une forme plane, aux isolants, ou faiblement conducteurs avec une bonne tenue mécanique. La dimension des plaques soumises à l'échantillonnage est 50x50x7, 5 cm.

Cependant, un certain nombre d'inconvénients s'observent sur la méthode de la plaque chaude gardée surtout du fait qu'elle exige des temps opératoires qui sont toujours longs et aussi à cause des nombreuses heures causées par l'établissement du régime permanent. Ce qui perturbe la possibilité de faire une mesure quotidienne.

A priori, l'opération n'est possible que sur matériaux secs. Il est à noter que les échantillons n'ont pas des faces perfectionnées comme celles des bétons cavernes qui s'écartent de cette méthode.

III.1.1.1.2. Méthode à température imposée

L'exemple de la méthode appelée « méthode de la boîte chaude gardée » n'est plus à démontrer par son efficacité. De cette méthode, on procède sur un mur expérimental de part et d'autre de deux chambres d'essais (1) et (2) dans lesquelles les températures d'air sont réglables.

Pour ce faire, on place un caisson formant la boîte chaude sous une température isolée de la salle d'essai. Ce caisson occupe une surface de 1m² de la paroi du mur à tester où le reste est utilisé comme garde.

Les déperditions pour 1m^2 de mur dans les conditions d'essai sont représentées par l'énergie qu'on doit offrir au caisson afin de maintenir sa température correspondant à celle de la température de la chambre de mesure (1).

De cette méthode, on peut calculer le coefficient de transmission de la surface K qui s'exprime par :

$$K = \Phi / S \Delta T$$

Avec :

- Φ : flux dissipé dans le caisson,
- S : surface de mesure (1m^2 en général),
- ΔT : Ecart thermique de l'air entre les deux chambres.

En outre, cette méthode est parfois employée en vue de tester les murs hétérogènes formés de blocs manufacturés.

Au fond, il s'agit d'une méthode longue, exorbitante et se réserve au cas spécifique des matériaux hétérogènes en cas d'impasse méthodologique.

III.1.1.1.3. La méthode des boîtes

Cette méthode est élaborée par le laboratoire d'études thermiques et solaires de l'université Claude Bernard de LYON. Au début, la méthode des boîtes est basée aux mesures de coefficients de conductivité et de diffusivité de température des matériaux de construction. En particulier, elle présente un avantage au niveau de la rapidité et de la simplicité de la mesure. Les essais de la température ont été faits au moyen de cellules de mesure par la méthode des boîtes, et qui ont fait l'objet de la présente étude.

Néanmoins, afin d'avoir la meilleure précision de la mesure voulue, il nous a été plus que nécessaire d'ajouter un certain nombre d'aménagements à cette méthode pour avoir des résultats d'essais plus fiables.

La méthode originale et les modifications constituant nos apports vont être exposées ci-dessous.

La composition des éléments de l'installation est déduite ci-après :

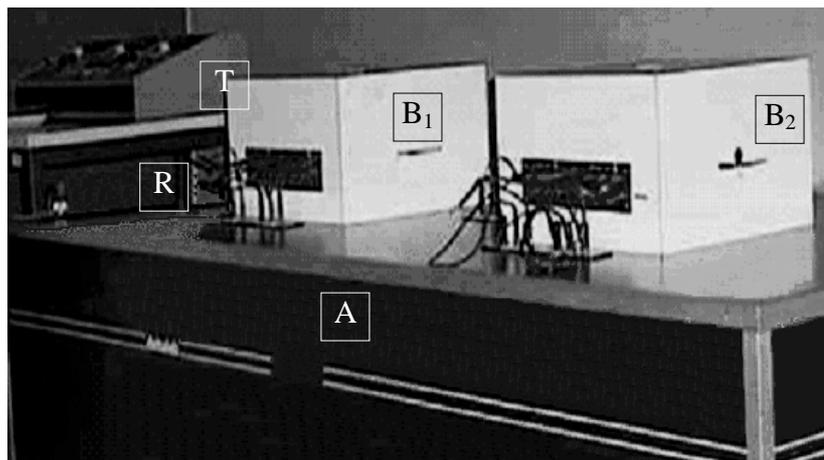


Figure n°24 : Installation de mesure de conductivité thermique

- Un réservoir (A) de $200 \times 100 \times 80$ cm avec un échangeur de température ;
- Un régulateur (R) thermique de fluide alimentant l'échangeur ;
- Deux boîtes en styrodur (B) dont chacune est disposée d'un émetteur de chaleur
- Une console (T) est conçue à opérer la commande.

➤ L'émetteur de chaleur (C) (cf figure n° 18) est formé d'un film chauffant offrant un flux de chaleur sur la face supérieure de l'échantillon fixé dans une boîte (B).

Les capteurs thermiques de surface et d'ambiance se répartissent dans différents endroits de l'appareil, et principalement sur les deux faces de l'échantillon (E) qui sont des thermo-sondes à résistance de platine

Les sondes sont mises en connexion à la console de contrôle et de mesure, donnant des informations instantanées.

Un par un, le film chauffant est régi par un courant disposé d'un auto-transformateur variable. La puissance dissipée par la résistance chauffante se calcul par la mesure au multimètre de la résistance et de la tension aux bornes de ce dispositif.

Les échantillons soumis à ces essais ont une forme parallélépipède avec un côté de 27 cm et une épaisseur qui varie de 2 à 7 cm.

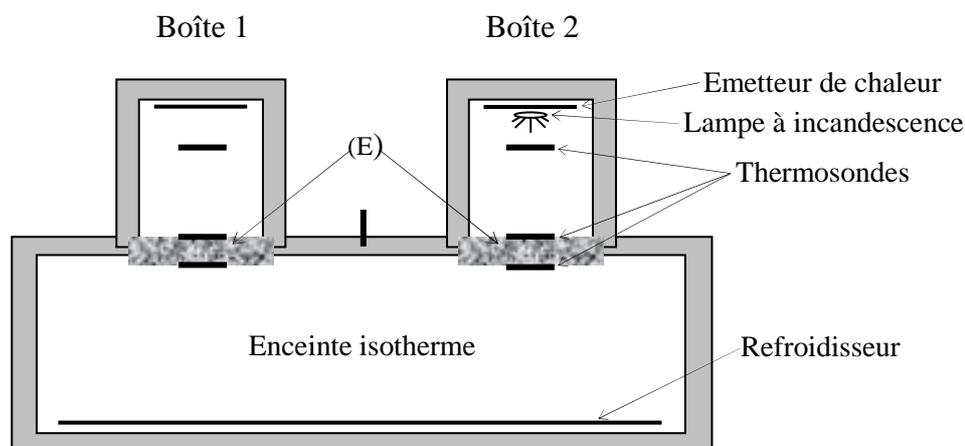


Figure n°25 : Schéma de principe de la machine thermique

Si on considère un régime permanent, où l'écoulement de chaleur est supposé non directionnel et traversant un mur homogène d'épaisseur e sous températures uniformes T_1 et T_2 aux deux faces.

L'équation du flux de chaleur ϕ qui traverse la face A de l'échantillon, de la figure n°19, s'exprime par:

$$\phi = (\lambda/e) (T_2 - T_1) A$$

On peut en déduire la conductivité thermique par la relation suivante :

$$\lambda = \phi e / (T_2 - T_1) A$$

En pratique, les échanges thermiques entre la boîte et l'extérieur ne sont pas toujours nuls.

La raison en est dans la difficulté à obtenir de manière uniforme une température T_B à l'intérieur de la boîte égale à celle à l'extérieur T_A .

Ainsi, une certaine déperdition est donc enregistrée ϕ_0 telle que le flux devient :

$$\Phi_T = \phi + \phi_0 \text{ et } \phi_0 = C' / (T_A - T_B)$$

Où C' est le coefficient de déperdition de la boîte

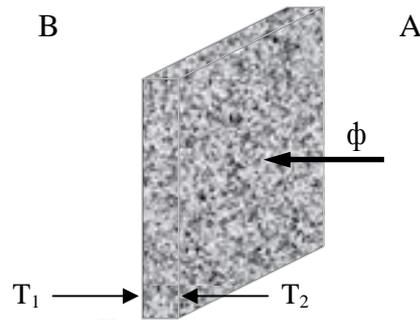


Figure n°26 : Flux de chaleur traversant la face A de l'échantillon

La valeur théorique du coefficient de déperdition C' se détermine ordinairement par les formules de Carslaw et Jeager d'un côté, et par celle de Langmuir de l'autre côté. Ceci étant du fait de la forme parallélépipède de la boîte. Les premières expressions font état de l'écoulement de chaleur traversant un dièdre en régime permanent, les deuxièmes établissent la valeur du coefficient de forme pour les coins d'un cube.

D'après les caractéristiques de la boîte (figure n°21), on obtient la relation suivante :

$$C' = \frac{4\lambda' ab}{d} + \frac{\lambda' a^2}{d'} + \frac{8b\lambda' (\text{Log } 1/2 + 2\text{Arctg } 1)}{\pi} + \frac{8a\lambda' (\text{Log } 5/8 + 1/\text{Arctg } 2 + 2\text{Arctg } 1/2)}{\pi} + \frac{0,6d^2}{a^2}$$

avec:

$$\frac{\lambda'}{d} = \frac{1}{(d_1/\lambda_2 + d_2/\lambda_2)}$$

et

$$\frac{\lambda'}{d'} = \frac{1}{(d_1/\lambda_2 + d_2/\lambda_2)}$$

Où :

- a : côté de la base carrée de la boîte chaude B
- b : hauteur inférieure d'une boîte B
- d_1 : épaisseur de styrodur d'une paroi verticale de B
- d_2 : épaisseur de contre plaqué entourant la boîte
- $d = d_1 + d_2$ et $d' = 2 d_1 + d_2$
- λ_1 : conductivité thermique du styrodur
- λ_2 : conductivité thermique du contre plaqué

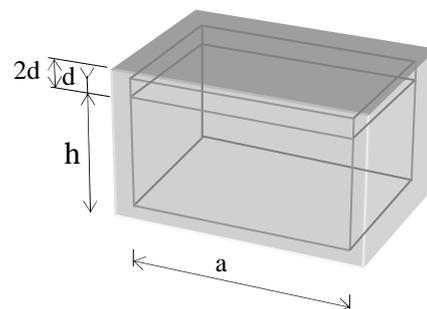


Figure n°27 : Partie supérieure de la boîte chaude

La valeur de C' est obtenue expérimentalement par le moyen de deux mesures différentes de la conductivité de la température sur un échantillon donné. Au niveau de chauffage, deux tensions U_1 et U_2 peuvent être appliquées tout en notant les deux écarts de températures correspondants $(T_a - T_B)_1$ et $(T_a - T_B)_2$.

$$\frac{1}{(T_2 - T_1)_1 [U_1^2 / R + C' (T_a - T_B)_1]} = \frac{1}{(T_2 - T_1)_2 [U_2^2 / R + C' (T_a - T_B)_2]}$$

III.1.1.1.4. Méthode du Hot Disk

Cette technique s'intéresse à la mesure simultanée de la conductivité thermique, et donne par déduction la capacité thermique des matériaux. Le dispositif expérimental est simple de mise en oeuvre. Une sonde composée d'une résistance thermique est placée en sandwich entre deux parties de l'échantillon à étudier.

Cette méthode repose sur un modèle qui considère la sonde sous forme d'anneaux sources concentriques (avec un rayon noté r_s). La profondeur de pénétration du flux P_p joue un rôle déterminant pour l'estimation de propriétés thermophysiques du milieu, et définie par l'équation suivante :

$$P_p = K \sqrt{t_{exc} \lambda}$$

où K est une constante, et t_{exc} est la durée de l'excitation thermique.

La méthode donne de bons résultats pour les estimations de la conductivité thermique.

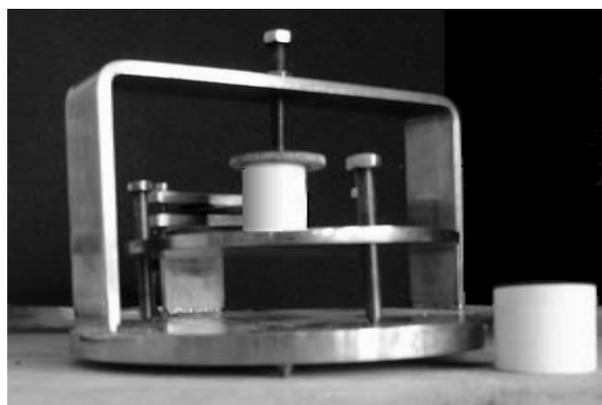


Figure n°28 : Dispositif expérimental de la méthode du Hot Disk

III.1.2. La diffusivité thermique

Le grand nombre de méthodes appliquées dans le cadre des mesures de diffusivité thermique de matériaux du génie civil sont généralement non stationnaires : ces méthodes utilisent la réponse thermique d'un ou plusieurs points d'un échantillon dont l'une des faces est soumise à une excitation qui varie avec le temps.

La méthode appelée « du signal » bref est largement développée du fait de la facilité de mise en œuvre qu'elle présente, et de l'importance des domaines d'application qu'elle couvre relativement aux propriétés thermiques et aux températures.

Parmi les modèles essentiels utilisés pour calculer les propriétés thermiques d'un échantillon soumis à une impulsion brève, à savoir : modèle de Parker et Al, modèle de Degiovanni (Biblio n°), nous avons surtout considéré celui proposé par R. Yezou [72].

III.1.2.1. *Modèle proposé par YEZOU*

Ce modèle s'applique aux éprouvettes carrées en béton de 50cm de côté et d'épaisseur comprise entre 1 à plus de 5 cm présentant tous les avantages de la méthode flash.



Figure n°29: Dispositif expérimental

Le système conçu par l'auteur est constitué par de :

- Une lampe de 1000 W émettant un flux bien distribué sur une surface de 30 à 40 cm de diamètre ;
- Un écran isolant permettant d'acheminer le faisceau de rayonnement sur l'échantillon en isolant ce dernier des rayonnements parasites à la suite de l'arrêt de la lampe.
- Un bloc détecteur thermique muni de deux doigts en cuivre brasés d'éléments semi-conducteurs

Une chaîne d'enregistrement galvanométrique pour les matériaux conducteurs ainsi qu'une chaîne à enregistreur potentiométrique pour les isolants.

III.1.2.2 Analyseur de propriétés thermiques Hot Disk

Notre préoccupation est de trouver une méthode fiable pour la caractérisation thermique des milieux granulaires. La technique choisie se vaudra rapide, et précise. Le choix de la méthode de mesure reste un choix ouvert, mais il faudra nécessairement adapter la méthode choisie en fonction de l'aspect physique du milieu et des moyens disponibles dans notre laboratoire.

Une sonde constituée d'une double spirale de nickel sur un support isolant est positionnée entre deux échantillons du matériau à caractériser. Autre que la conductivité thermique le Hot Disk permet aussi de mesurer la diffusivité thermique et la chaleur spécifique

Nous avons comparé les résultats obtenus par la méthode R Yezou avec le dispositif de Hot Disk..

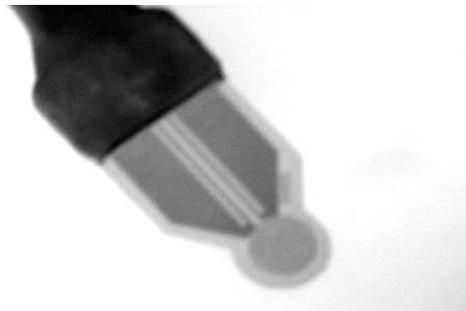


Figure n°30 Sonde en Kapton

III.1.2.3 Détermination de la diffusivité thermique des bétons

A la suite de l'enregistrement d'une courbe se rapportant à la réponse normalisée (figure n°) (Biblio n°) pour une durée d'excitation thermique t_0 , la détermination suit la démarche ci-après :

1. Choix des valeurs empiriques de la diffusivité a et du coefficient d'échange p ;
2. On détermine le temps $t_{\max th}$ du maximum de la courbe théorique. La première itération sur la diffusivité permet d'obtenir l'égalité $t_{\max th} = t_{\max exp}$ correspondant au maximum de la courbe expérimentale.
3. Une première itération ensuite sur p , permet la comparaison thermique normalisée expérimentalement. $T_{exp}(t_1)$ à son homologue théorique $T_{th}(t_1)$ pour une valeur du temps T_1 fixée. La valeur de p varie en fonction de l'une ou de l'autre des irrégularité $T_{exp}(t_1) > T_{th}(t_1)$ ou $T_{exp}(t_1) < T_{th}(t_1)$
4. A chaque modification de la valeur de p , une nouvelle itération est appliqué sur a jusqu'à ce que l'égalité $T_{exp}(t_1) = T_{th}(t_1)$ soit obtenue.

III.1.3. La chaleur massique

Un certain nombre de méthodes existent pour le calcul de la chaleur massique des solides. Le choix d'une méthode est principalement guidé par la plage des variations thermiques utilisées et la précision recherchée.

Des mesures précises sont ordinairement obtenues à l'aide d'un calorimètre pour des températures variant de 0 à 500°C. Des calorimètres existent comme le calorimètre à flux et le calorimètre à chute. Pour nos travaux, la chaleur massique a simplement été déduite de l'équation entre la masse volumique, la conductivité et la diffusivité thermique :

$$C = \frac{\lambda}{\rho a}$$

III.2. Caractérisation acoustique

Les éducateurs dans les établissements scolaires ou secondaires ont une priorité : transmettre des connaissances, c'est-à-dire des savoirs faire ou être, sous les formes les plus variées. Ils utilisent donc pour cela différents supports, et l'un des supports privilégiés reste encore le discours verbal. Une perturbation dans la qualité de l'environnement sonore peut alors réduire l'efficacité de la tâche d'apprentissage. Les établissements d'enseignement sont donc des exemples de bâtiments publics où le confort sonore a des conséquences sur leur qualité d'usage. Ainsi, ce projet de recherche a pour but aussi de proposer une composition du béton léger que peut utiliser dans un établissement comme isolation acoustique.

III.2.1. Evaluation d'une grandeur passive

L'onde est déformée lors de sa propagation, c'est-à-dire que ses composantes fréquentielles sont modifiées. Cette dispersion est due aux différents constituants du béton dont les propriétés mécaniques influencent la propagation de l'onde ; il s'agit d'obstacles. Ces obstacles sont les différents constituants du béton. Lorsque l'onde rencontre un obstacle, elle se réfléchit partiellement ou complètement. Cela dépend de la taille de l'obstacle. La taille des obstacles et son module d'Young déterminent quels sont les composantes fréquentielles de l'onde qui sont transmises et réfléchies. Une partie de l'énergie de l'onde est dispersée. L'atténuation de l'onde

est une fonction du trajet parcouru, de la composition du béton et plus particulièrement de la taille des granulats.

L'absorption est une grandeur passive, au même titre qu'une capacité ou une inductance en électricité, ce qui signifie que la grandeur en question n'est pas accessible directement, mais seulement en réaction à un signal excitateur. La mesure d'absorption implique donc de disposer d'une source de signal et pas seulement d'un appareil d'observation.

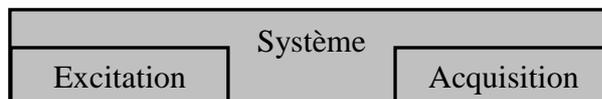


Figure n°31: Structure du système de mesure

III.2.1.1. tube de Kundt

Ce dispositif est un des moyens de référence de mesure en incidence normale des propriétés acoustiques d'un matériau. Il permet d'évaluer le coefficient d'absorption α d'un matériau sur toute la gamme de fréquences testées. La méthode de mesure repose sur le fait qu'en deçà d'une fréquence particulière appelée fréquence de coupure propre à chaque type de tube en fonction de sa géométrie et indépendamment du matériau testé, l'onde propagée est une onde plane. Le fait de travailler en incidence normale avec des parois rigides permet de se situer dans un cadre connu, pour lequel on sait traduire le phénomène de propagation de manière théorique. La direction de propagation des ondes incidente et réfléchi est la même.

L'appareil est constitué d'un tube rigide fermé de section carrée de 85 mm de côté et 1,20 m de long. Les parois sont les plus réfléchissantes possibles. La fréquence de coupure correspond à cette taille de tube est de 2020 Hz. Le signal utilisé a une fréquence allant de 100 à 2000 Hz, ce qui est inférieur à la fréquence de coupure. On mesure en deux points le champ de pression acoustique dans le tube aux abords de l'échantillon sous l'effet d'ondes stationnaires. On connaît alors les fonctions de transfert des signaux émis et réfléchi donc le coefficient d'absorption α du matériau.

Le PRO-515 est un système complet permettant d'appliquer la méthode des ondes planes du tube de Kundt, conformément aux normes ISO-10534 et ASTM E-1050. Il est composé de :

- 2 tubes de Kundt de taille différente, chacun contenant une source d'onde acoustique plane large bande,
- des microphones 1/4" et des porte-échantillons réglables,
- un générateur de bruit interne (Symphonie) ou externe,
- un amplificateur/survolteur large bande à deux voies.

Associé à un logiciel dédié compatible Windows, le PRO-515 permet de mesurer facilement et de façon fiable le coefficient d'absorption " α " des matériaux poreux.



Figure n°32 : PRO-515

Une des principales problématiques de la mesure d'absorption en tube d'impédance provient de la forme des échantillons qui doivent parfaitement s'insérer dans le tube. Pour des échantillons rigides, on utilise des échantillons découpés au même diamètre que le tube, avec une légère tolérance négative afin de s'assurer qu'ils soient bien insérés dans le tube.

III.2.1.2. Formule physique

Le comportement acoustique étant relativement complexe, le cas d'un écoulement dans un tube cylindrique va être traité afin d'exposer les phénomènes se produisant lors de la propagation du son. Ceci permettra de comprendre les mécanismes physiques mis en jeu et de définir les paramètres qui sont utilisés dans la caractérisation des propriétés acoustiques.

Nous avons donc utilisé un tube cylindrique. A l'une de ses extrémités est un couvercle métallique contre lequel s'appuie l'échantillon **E** à étudier. Le couvercle se visse et nous pouvons par conséquent l'enlever, changer le matériau et le remettre.

Le problème de transmission de l'énergie acoustique, qui est fonction des coefficients d'absorption d'un matériau, a au moins deux intérêts, l'un d'ordre pratique lié à notre confort personnel, l'autre d'ordre fondamental, car transmission implique propagation, vibrations de structures, rayonnement, chapitres clés de l'acoustique.

Nous allons démontrer à partir des formules fondamentales [41] comment peut-on trouver le coefficient d'absorption d'un matériau.

Considérons une onde incidente tombante sur un échantillon **E**, placée sur le fond d'un tube cylindrique, dont on veut mesurer le coefficient d'absorption :

$$\Delta_{pi} = A \cos(\omega t + qx)$$

L'onde de retour a pour expression :

$$\Delta_{pr} = B \cos(\omega t - qx)$$

Avec $\omega = \frac{2\pi}{T}$ et $q = \frac{2\pi}{\lambda}$. T est la période et la quantité λ est appelée la longueur d'onde. Les grandeurs ω et q jouent comme T et λ des rôles analogues l'un vis-à-vis de l'espace, l'autre vis-à-vis du temps, mais q n'a pas reçu de nom particulier, tandis que ω est appelée la pulsation.

Le quotient $\frac{B}{A}$ est le coefficient de réflexion $re^{j\delta}$. δ étant le décrement d'espace, fonction de ω c'est-à-dire de la fréquence.

En un point d'abscisse x quelconque, l'on aura

$$\Delta_p = (Ae^{jqx} + B e^{-jqx}) e^{j\omega t} = (Ae^{jqx} + rAe^{j(\delta - qx)}) e^{j\omega t}$$

$$\Delta_p = Ae^{j(\omega t + qx)} [1 + re^{j(\delta - 2qx)}]$$

Le module a pour expression

$$|\Delta_p| = A \left([1 + r \cos(\delta - 2qx)]^2 + r^2 \sin^2(\delta - 2qx) \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$= A \left(1 + 2r \cos(\delta - 2q)x + r^2 \right)^{\frac{1}{2}}$$

Les maxima et minima ont respectivement pour amplitude

$$\Delta_{pM} = A(1+r) \text{ et } \Delta_{pm} = A(1-r)$$

D'où

$$n = \frac{\Delta_{pM}}{\Delta_{pm}} = \frac{1+r}{1-r} \text{ ou } r = \frac{n-1}{n+1}$$

Les énergies sont proportionnelles aux carrés des surpressions [Biblio n°].

Le coefficient d'absorption aura donc pour valeur :

$$\alpha = \frac{A^2 - A^2 r^2}{A^2} = 1 - r^2 = 1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 = \frac{4n}{(n+1)^2}$$

$$\alpha = \frac{4}{n+2+\frac{1}{n}}$$

III.2.1.3. Dispositif expérimental

Chaque échantillon est placé dans un moule étanche. Les parois du moule sont collées les unes avec les autres par des joints en silicone. De plus, il est souhaitable que l'échantillon adhère le plus possible aux parois afin d'éviter les parasites créés par l'action des ondes sur d'éventuelles poches d'air qui seraient présentes le long des faces du moule. Les échantillons sont donc conservés dans leur moule d'origine pendant la prise et de séchage. Enfin, l'étanchéité entre les pièces du système (moule, tube, haut-parleur) est assurée par des joints élastiques de robinetterie. On évite ainsi les fuites d'air, qui auraient tendance à augmenter le coefficient d'absorption mesuré par le dispositif.

III.2.2. Méthode de la réverbération

Nous plaçons une certaine surface du béton à tester dans une salle réverbérante, conçue pour que sa durée de réverbération, lorsqu'elle est vide, soit la plus longue possible. Les mesures des durées de réverbération T_1 avant introduction et T_2 après introduction permettent de calculer le coefficient d'absorption. En effet, une partie de l'énergie acoustique dans le local est absorbée par le béton, ce qui a pour effet de diminuer la réverbération.

Pour calculer le coefficient α_2 du béton, nous avons utilisé la formule de Sabine [39] qui relie de façon simple la durée de réverbération, au volume du local et à l'aire d'absorption équivalente du local.

Il est à noter que la salle réverbérante est construite de telle façon que toutes les parois aient un coefficient d'absorption faible et homogène.

L'aire d'absorption équivalente A en m^2 pour chaque tiers d'octave est donnée par :

$$A = 0,16 \frac{V}{T}$$

où : V est le volume de ce local en m^3 .

Lorsque la salle est vide :

$$A_1 = 0,16 \frac{V}{T_1} = S_1 \alpha_1, \text{ où } S_1 \text{ est la surface totale des parois du local.}$$

Lorsqu'on introduit une surface S_2 du béton à tester, ayant un coefficient α_2 à déterminer, on recouvre donc la même surface S_2 de paroi du local qui avait un coefficient α_1 . L'aire d'absorption équivalente A_2 après introduction, devient donc :

$$A_2 = S_2 \alpha_2 + (S_1 - S_2) \alpha_1$$

La mesure de la durée de réverbération, après introduction du béton, donne une valeur T_2 :

$$T_2 = 0,16 \frac{V}{A_2}$$

Nous en déduisons :

$$\alpha_2 = \frac{0,16V}{S_2} \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right) + \frac{0,16V}{S_1} \times \frac{1}{T_1}$$

La méthode de mesure du coefficient d'absorption en chambre réverbérante la plus classique est la méthode de Sabine, par comparaison des temps de réverbération.

Pour mesurer la section efficace d'absorption d'un matériau dans une salle réverbérante, il était nécessaire d'avoir à disposition un grand nombre de plaque de béton. Nous avons ainsi effectué les mesurages avec trente échantillons dont la fréquence de résonance est d'environ 300 Hz. Leur composition impose cependant de petites différences caractéristiques entre eux, impliquant un changement de la fréquence de résonance. L'absorption a pu être mesurée à différentes fréquences ainsi que pour différentes dispositions des bétons.

Mesurer la longueur, la largeur et la hauteur de la salle avec le double-mètre. En déduire sa surface et son volume.

Différentes valeurs moyennes peuvent être obtenues, basées sur les spectres ou sur les courbes de décroissance pour chaque bande de fréquence. Le spectre du temps de réverbération peut aussi être calculé sur la base d'une moyenne des courbes de décroissance.

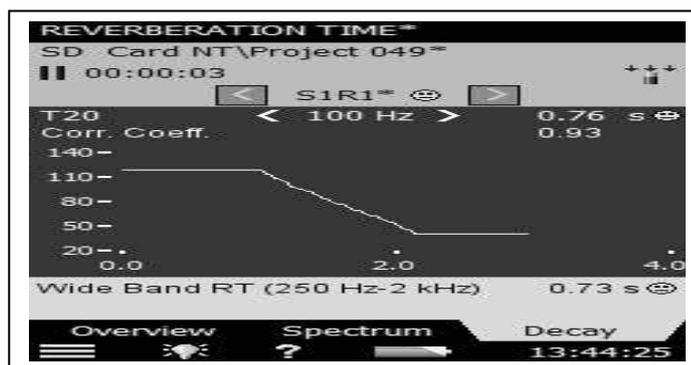


Figure n°33: Affichages types d'un appareillage 2250-F L'écran schématise la courbe de décroissance.

Pour déterminer le temps de réverbération de la salle et par la suite son coefficient d'absorption nous allons utiliser le sonomètre. Nous allons procéder de la façon suivante :

- Mettons sous tension le sonomètre
- Le MENU apparaît dans l'écran avec l'option Mesure noircie
- Appuyons sur la touche contextuelle de droite (cette touche permet de valider)
- L'écran pour la mesure du temps de réverbération est maintenant accessible : on voit T 60 avec Analyse > 1/1 16Hz-16 kHz qui est la bande passante d'analyse.
- Appuyons sur la touche contextuelle de droite et attendre quelques secondes (l'appareil calcule). Nous voyons par la suite sur l'écran le niveau sonore ambiant de la salle (maquette) par bandes de fréquences.
- Appuyons sur la touche contextuelle de droite. Nous voyons au bas de l'écran Esc Tir Mettons nous près du microphone et créons un bruit impusif : tape fort une seule fois entre nos deux mains pour faire ce bruit impusif. La mesure se déclenchera uniquement quand le seuil de 90 dB sera dépassé. Claquons donc fort des mains, sinon l'écran persistera.
- Attendre quelques secondes, car le sonomètre fait des calculs. Nous voyons apparaître sur l'écran la décroissance du niveau sonore, le Tr (noté sur l'écran T 60) ainsi que la fréquence d'analyse f noircie au bas de l'écran à gauche.
- Appuyons sur le Joystick (+) pour visualiser la décroissance du niveau sonore à la fréquence $f = 125$ Hz. Lisons sur l'écran la valeur du Tr correspondant à cette fréquence.
- Appuyons sur le Joystick (+) pour visualiser la décroissance du niveau sonore à la fréquence $f = 250$ Hz. Lisons sur l'écran la valeur du Tr correspondant à cette fréquence.
- Reconnaissons l'opération jusqu'à la fréquence $f = 1000$ Hz. Un appui sur les touches (+) et (-) permet de faire défiler la bande spectrale d'analyse.

Pour éteindre l'appareil débranchons-le du secteur et appuyons sur le bouton rouge marche arrêt quelques secondes jusqu'à ce qu'aucun menu n'apparaisse sur l'écran.

Pour obtenir un bâtiment confortable sur le plan thermo_acoustique, il convient de réfléchir dès la conception sur la manière de favoriser une bonne isolation thermo_acoustique. De nombreux facteurs sont déterminants pour assurer ce confort sonore : le choix des matériaux, l'orientation du bâtiment, les détails techniques de mise en oeuvre. Nous orientons nos recherches sur les caractéristiques thermo-acoustiques du béton de pouzzolane.

Le premier chapitre a pour but principal la description de la phase expérimentale. La méthodologie expérimentale adoptée a été présentée, au travers des paramètres de formulation étudiés en fonction des objectifs préalablement définis et de la description des montages expérimentaux auxquels sont associées des procédures d'essais spécifiques.

Dans le cadre de cette thèse, plusieurs moules ont été utilisés selon le type d'essais à réaliser. En ce qui concerne les aspects mécaniques, des moules cylindriques en carton sont utilisés (hauteur 320 mm et diamètre 160 mm). En thermique, des dalles de 27 cm de côté et 5cm d'épaisseur sont fabriquées. En acoustique, des prismes de hauteur 10, 20 et 30 cm et de côté 8,5 cm sont utilisés. Ces différentes tailles d'échantillons sont liées aux dispositifs de mesures (boîtes thermiques, tube de Kundt) dont les dimensions sont imposées.

Pour le gâchage du béton, l'eau potable est toujours utilisable, mais, si on doit utiliser une autre eau la norme NF EN 1008 précise les conditions d'utilisation d'une eau de gâchage.