Aymeric GESTIN, Maxime ZINET et Romane DUBOIS
Projet fil rouge du semestre ACT - Piste 2025-2026

Rapport de projet sur la caractérisation thermique des mycomatériaux

Sommaire:

Rapport de projet sur la caractérisation thermique des mycomatériaux..... 0
Sommaire:..... 0
Remerciements..... 1
Introduction..... 1
Contexte..... 1
Objectifs du projet..... 2
Production des échantillons..... 2
Caractérisation thermique des mycomatériaux..... 3
Conditions de l'expérience..... 3
Protocole expérimental..... 6
Résultats de l'expérience..... 6
Construction du banc d'essai..... 9
Recherche bibliographique pour le choix du banc d'essai..... 9
Méthode flash (Parker)..... 10
Méthode du calorimètre..... 12
Méthode du fil chaud..... 13
Tutoriel de fabrication du banc d'essai..... 16
Preuve de concept avec multimètre et mesure quatre fils..... 16
Les points forts du banc à essais..... 17
Limites..... 18
La perturbation de la source de courant..... 18
Les difficultés à la manipulation du banc d'essai..... 18
Les soudures à l'étain..... 19
Pistes de recherches..... 20
Forme des mycomatériaux..... 20
Générateur de tension AC..... 20
Bibliographie..... 21
Annexes..... 22

Remerciements

Dans le cadre de notre projet, nous avons pris contact avec de nombreuses personnes qui nous ont aidé à mieux comprendre les différentes facettes du projet, que ce soit sur les mycomatériaux, les bancs d'essais existant permettant des caractérisation thermiques, la possibilité d'utiliser ces derniers si disponibles ou encore le matériel nous permettant de créer ces bancs. Nous tenons à remercier chaleureusement Hamid Sailani et Iriles Yataghene, les porteurs de projet de Champiloop qui nous ont accompagnés tout au long du projet, ainsi que Martial Balland, le tuteur école de ce projet.

Merci également à Damien Bouëvin et Emilien Fillion pour leur aide sur les mycomatériaux, et à Samuel Siedel, Aurélien Khun, et Simon-Emmanuel Haim pour leur aide technique sur le banc d'essai.

Merci enfin à Matthieu Chabanol et à Christine Podda de nous avoir ouvert l'IUT MT2E pour pouvoir réaliser les expériences.

Introduction

Contexte

Fig.1 :Logo de l'entreprise Champiloop

Champiloop est une entreprise locale (située à Saint-Martin d'Hères) qui produit des champignons comestibles dans des champignonnières urbaines. La partie du champignon que l'on mange n'est que le fruit du champignon. Le champignon est aussi composé de mycélium, un réseau de filaments dans le sol qui lui sert à collecter les nutriments pour se nourrir. Afin de cultiver des champignons, Champiloop utilise des substrats, c'est-à-dire une source de nutriment, pour que le mycélium du champignon puisse se développer dedans. Le substrat est colonisé par le mycélium du champignon. Il perd de ses qualités nutritives au fur et à mesure que le champignon se nourrit. Après plusieurs cycles de maturation, le substrat est jeté.

L'entreprise s'intéresse à une manière de valoriser ce déchet. Une revalorisation possible et relativement bien documentée est la transformation de ce dernier en mycomatériau. Un mycomatériau est un matériau biosourcé composite, utilisant le mycélium afin de lier les différents déchets organiques restants en un bloc solide. Ces composés organiques sont de la sciure de bois, de la paille et du tourteau. Les mycomatériaux

semblent avoir des propriétés d'isolation phonique et thermique intéressantes. Les mycomatériaux pourraient être utilisés dans l'isolation thermique et phonique du bâtiment.

Objectifs du projet

Le projet a plusieurs objectifs.D'abord, de caractériser les propriétés thermiques de différents échantillons et recettes de mycomatériaux. Le deuxième objectif est de réaliser un banc d'essai à faible coût qui permettrait à Champiloop de réaliser ses propres tests thermiques à l'avenir sans recours à un laboratoire. Enfin, à partir de cette réalisation, le projet vise à rédiger et diffuser un tutoriel qui permettrait à des personnes intéressées de reproduire le banc d'essais.

Production des échantillons

La culture de champignons à Champiloop comporte plusieurs étapes. D'abord, les ingrédients de substrat sont mélangés, puis le mélange est inoculé avec des souches de champignons. Cette étape est faite dans un environnement le plus propre possible, pour éviter que d'autres champignons et bactéries se développent dans le substrat. L'objectif est que le champignon n'ait pas trop de compétition dans la colonisation du substrat, pour qu'il puisse se développer le mieux possible. Le pourcentage d'inoculation est choisi pour s'assurer que le champignon n'aura pas de difficulté à coloniser le substrat. Une fois le substrat inoculé, il est mis en sacs et placé pendant plusieurs semaines dans la salle d'incubation, puis dans la salle de fructification, pour que le champignon grandisse dans des conditions optimales et qu'il produise des fruits qui seront ensuite récoltés et vendus. Le substrat qui a servi à nourrir le champignon est jeté.

Pour faire des mycomatériaux, les premières étapes sont les mêmes : mélange du substrat et inoculation. Ensuite le substrat, au lieu d'être mis en sac, est mis dans un moule et pressé pour obtenir une bonne densité de substrat. Le substrat est ensuite mis dans la salle d'incubation pendant quelques semaines. Une fois que le mycélium a eu le temps de coloniser le substrat, le mycomatériau est sorti du moule et séché pendant au moins 48h.

L'objectif du projet étant de tester les mycomatériaux de Champiloop, nous avons décidé ensemble des échantillons qui seraient produits. L'idée était de tester plusieurs variétés de mycomatériaux. Il a été décidé de produire plusieurs recettes de mycomatériaux, en faisant varier deux paramètres : le temps d'incubation et la souche de champignons.

Les souches de champignon sélectionnées sont la pleurote, le shiitake, l'amadou et le reishi. Pour la pleurote, nous avons décidé d'utiliser de la pleurote avec du substrat 'épuisé' et avec du substrat 'neuf'. Le substrat neuf est du substrat qui n'a pas encore été utilisé pour faire pousser des champignons. Le substrat épuisé a déjà été colonisé par de la pleurote. Il reste du mycélium dans le bloc de substrat, qui est cassé en morceaux pour être de nouveau mélangé et réutilisé. Le shiitake est utilisé uniquement avec du substrat épuisé. L'amadou et le reishi sont utilisés avec du substrat neuf.

L'intérêt d'utiliser du substrat épuisé, c'est que c'est le déchet que Champiloop veut valoriser. Cependant Champiloop ne produit que de la pleurote et du shiitake, donc nous avons utilisé du substrat neuf pour le reishi et l'amadou.

Les temps d'incubation varient selon la souche de champignon. Pour la pleurote, le

temps optimal est de 21 jours. Pour les autres, il est de 28 jours. Les temps d'incubation testés sont le temps optimal, une semaine de moins, et une semaine de plus.

Pendant la production des mycomatériaux, nous avons fait attention à ce que le poids soit à peu près égal entre les moules pour que cela n'affecte pas les expériences. Le remplissage des moules et le tassement du substrat était fait à la main, ce qui fait que certains échantillons n'étaient pas entièrement plats. Cela a de l'importance dans les tests avec le banc d'essai plaque chaude de l'IUT MT2E. Le relief crée des espaces avec de l'air, et l'air est très isolant et change significativement les résultats.

Les échantillons sont laissés dans la salle d'incubation pour se développer. Au bout du temps fixé, on les sort des moules, on les pèse et on les met au séchage. La température de séchage est de 45°C. Les pièces sont séchées pendant au moins trois jours, et jusqu'à cinq jours. En sortie de séchage, elles sont pesées à nouveau.

Plusieurs événements ont modifié les projets de production d'échantillon: d'abord la souche de reishi n'est jamais arrivée, nous n'avons donc pas fait d'échantillon de reishi. Les pleurotes, les shiitake et l'amadou ont pu être préparés comme prévu dans les moules.

La pleurote s'est bien développée. Nous avons remarqué que les échantillons de pleurote avec du substrat épuisé avaient mieux fonctionné que les pleurotes avec du substrat neuf. Le milieu était plus colonisé, les pièces étaient plus solides et plus faciles à découper. Les pièces de pleurote 'épuisé' sont clairement plus blanches et compactes que celles de pleurotes 'neuf'. Cependant au moment du démoulage des échantillons de pleurote (neuf et épuisé), les pièces avaient du mal à se décoller et des bouts restaient accrochés aux moules. Cela leur a donné un relief, la surface n'était plus plane.

Au moment d'inoculer le shiitake, qui était en bloc avec du substrat épuisé, nous avons rajouté de l'eau pour réhydrater le substrat. L'idée était de faire un mélange 50% eau et 50% substrat. Il y avait trop d'eau dans le substrat, et le shiitake ne s'est pas développé comme prévu dans les moules. Les échantillons de shiitake sont donc inutilisables.

Les blocs d'amadou ont été moulés normalement. Au moment où nous les avons mis au séchage, nous nous sommes rendu·es compte que ce n'était pas de l'amadou qui s'était développé, mais de la pleurote. La pleurote s'est développée et a bien colonisé le substrat, cependant on observe des lignes blanches sur le bloc, qui ressemblent à des frontières entre différentes zones colonisées.

Enfin, sur l'un des blocs d'amadou, il y avait beaucoup de contamination, donc nous avons retiré cet échantillon. Les autres échantillons d'amadou sont quand même utilisables, en prenant en compte le fait que ce sont des échantillons de pleurote.

Caractérisation thermique des mycomatériaux

Conditions de l'expérience

L'IUT MT2E a dans sa salle de travaux pratiques un banc d'essai 'plaque chaude'. Le principe de ce banc d'essai est de placer l'échantillon entre deux plaques (une chaude, une froide) dans une enceinte adiabatique, et de mesurer le flux thermique qui passe entre les deux plaques.

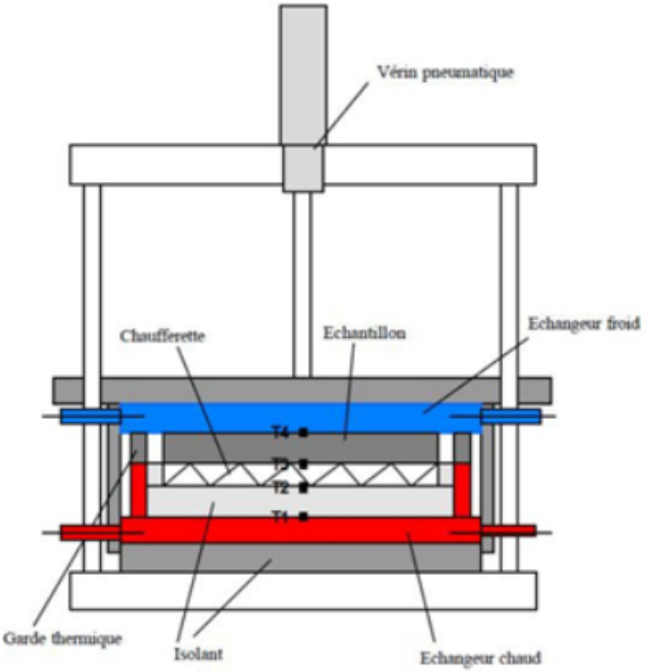


Fig. 2 : Schéma de l'expérience plaque chaude. Image issue du site du LTEN (Laboratoire de Thermique et Energie de Nantes)

Le banc d'essai de l'IUT MT2E est un banc d'essai fourni par l'entreprise P.A Hilton Ltd. La fiche technique est disponible sur le site du constructeur [1]. Le banc d'essai est composé de deux éléments, présentés ci-dessous.

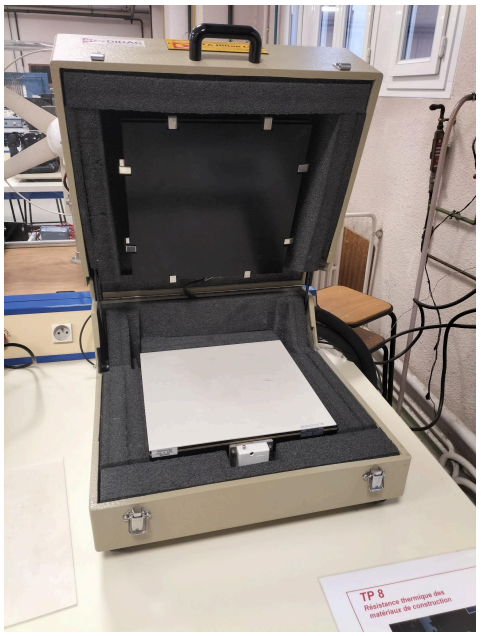


Fig. 3 : Banc d'essai (P.A Hilton Ltd.) présent à l'IUT MT2E

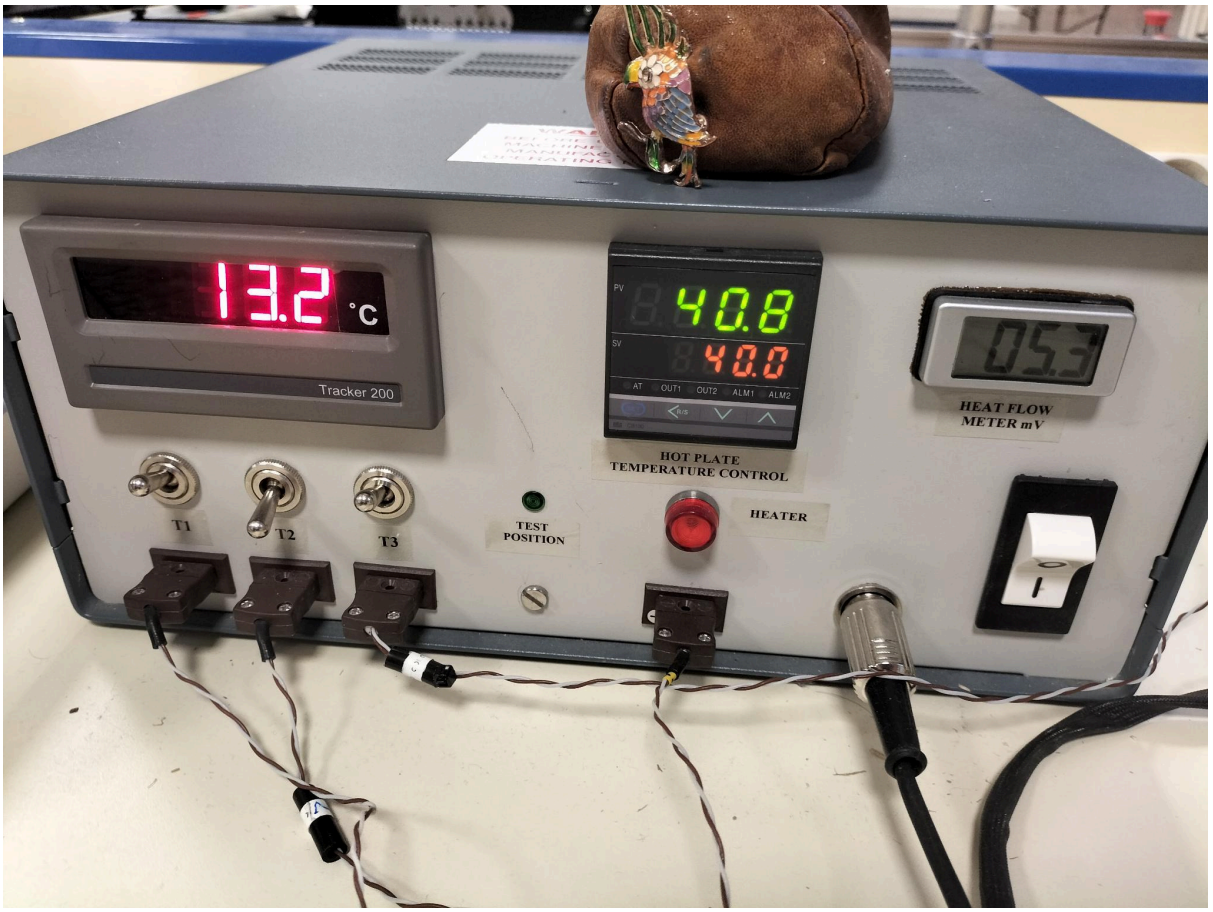


Fig. 4 : Appareil de mesure et de contrôle du banc d'essai de l'IUT

L'enceinte adiabatique contient 2 plaques entourée de matériaux isolants. La plaque froide est en bas et la plaque chaude est en haut. La plaque froide est une plaque avec un circuit d'eau froide passant en dessous. La plaque chaude est contrôlée pour conserver une température fixe de 40°C. Deux feuilles de caoutchouc sont placées entre l'échantillon et les plaques pour protéger l'échantillon. Elles sont comptées dans le calibrage de l'appareil, il faut donc absolument les utiliser pendant l'expérience. L'appareil de mesure possède trois capteurs de température : un au niveau de la plaque chaude, un au niveau de la plaque froide, et un au niveau de l'entrée de l'eau. De plus, il y a un capteur qui mesure le flux surfacique et qui renvoie une valeur de tension HFM. On peut retrouver la valeur de flux surfacique grâce à cette formule:

$$\varphi = k_1 + k_2 \cdot \bar{T} + (k_3 + k_4 \cdot \bar{T}) \cdot HFM + (k_5 + k_6 \cdot \bar{T}) \cdot HFM^2$$

Les valeurs k_1, k_2, k_3, k_4, k_5 et k_6 sont des constantes liées à l'appareil, qui ont été fixées pendant le calibrage du banc d'essai et qui sont fournies par le constructeur. Elles prennent en compte les feuilles de caoutchouc. Les valeurs sont disponibles dans le tableur des expériences de l'IUT, ainsi que dans l'énoncé de TP en annexe. Deux bancs d'essais ont été utilisés pour les expériences.

Protocole expérimental

Les échantillons qui ont été testés sont ceux qui ont une épaisseur de 5 centimètres. L'échantillon de shiitake n'a pas été testé.

Pour chaque expérience, nous avons placé deux morceaux d'échantillons. Pour que l'expérience soit concluante, il est important que l'espace entre les plaques soit entièrement rempli de mycomatériau. Nos mycomatériaux ont été produits dans des moules mesurant 30 cm par 24 centimètres, et la surface à recouvrir pour l'expérience est de 30 cm par 30 cm. Nous avons donc découpé au cutter les échantillons pour qu'ils correspondent au banc d'essai. Il y avait à chaque fois un échantillon qui mesurait 30 cm par 24 cm, et un autre qui mesurait 30 cm par 6 cm. L'objectif est de minimiser les espaces d'air pendant l'expérience. Nous avons placé les échantillons le plus près possible l'un de l'autre pour limiter les lames d'air. Nous avons aussi utilisé des petits morceaux de mycomatériaux pour remplir les trous que les échantillons avaient. Une fois que les échantillons étaient bien placés, nous avons refermé l'enceinte, et nous avons utilisé le dispositif de pression pour s'assurer que le mycomatériau est bien compressé. Il y a un étau au-dessus de l'enceinte adiabatique qui sert à faire descendre la plaque chaude jusqu'à ce qu'elle compresse l'échantillon à une pression fixe. Cela permet de s'assurer que les échantillons seront tous comprimés de la même manière, quelle que soit leur hauteur. Une fois que l'échantillon est correctement compressé, nous attendions que les températures des deux plaques et la tension HFM soit stabilisée pour relever les mesures. Les temps de mesure varient, en général une mesure prenait 15 minutes à se stabiliser. Le temps n'a pas été mesuré de manière précise pour chaque mesure.

Résultats de l'expérience

Pour chaque expérience, la température au niveau de la plaque chaude et de la plaque froide sont relevées, ainsi que la tension HFM. Les deux températures permettent de calculer l'écart de température ΔT. Le flux surfacique (φ) est obtenu à partir du la tension HFM. La résistance thermique est calculée avec la formule:

$$R = \frac{\Delta T}{\varphi}$$

La conductivité thermique (λ) est la résistance thermique divisée par l'épaisseur de l'échantillon. On a considéré que l'épaisseur est toujours de 5 centimètres. L'incertitude calculée est une incertitude de type statistique. On utilise l'écart-type et la moyenne de ΔT et de φ pour obtenir l'incertitude statistique de R:

$$\frac{\sigma_R}{\langle R \rangle} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\Delta T}}{\langle \Delta T \rangle}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varphi}{\langle \varphi \rangle}\right)^2}$$

La conductivité thermique pour chaque souche de champignon est :

Souche de champignon	Moyenne de λ ($Wm^{-1}K^{-1}$)	Pourcentage d'incertitude relative (%)
Pleurote 'épuisé'	0,0369	44,77
Pleurote 'neuve'	0,0434	45,37
'Amadou'	0,0834	31,10

La conductivité thermique de mycomatériaux réalisé au biolab néméton de grenoble a déjà été mesurée dans le cadre d'un projet mené par Emilien Fillion [2].

Échantillon à base de mycélium de reishi
75% paille / 25% sciure bois
Densité : **132 kg/m3**
Conductivité thermique : **0,044 W/m.K**

Échantillon à base de mycélium d'amadou
75% sciure bois / 25% paille
Densité : **185 kg/m3**
Conductivité thermique : **0,038 W/m.K**

Échantillon personnel à base de mycélium de pleurote
100% chènevotte (B.08)
Compacté, présence d'additifs (70g), forte quantité de mycélium (95g)
Densité : **218 kg/m3**
Conductivité thermique : **0,037 W/m.K**

Échantillon personnel à base de mycélium de pleurote
100% sciure de bois (B.03)
Non compacté, très peu d'additifs (5g), petite quantité de mycélium (39g)
Densité : **198 kg/m3**
Conductivité thermique : **0,052 W/m.K**

Fig. 5 : Résultats présentés dans le mémoire d'Emilien Fillon

Ces valeurs sont du même ordre de grandeur que celles obtenues par nos propres expériences. Les mycomatériaux ont les mêmes performances thermiques que des isolants utilisés couramment dans le secteur du bâtiment. Il existe cependant une grande variabilité dans les résultats. Une étude visant à caractériser les propriétés thermiques et mécaniques de mycomatériaux a été publiée en 2019 [3]. L'étude montre quelques valeurs de conductivité thermique:

Matériaux de construction	Conductivité thermique (W · m−1 · K−1)
Air (78% Azote N2 - 21% Oxygène O2 - 0,93% Argon Ar - 0,04% CO2)	0,025
Polyuréthane rigide (Mousse)	0,029
Laine de verre ou laine de roche	0,035
Laines ou plumes animales	0,035
Verre recyclé (Mousse)	0,035
Polystyrène expansé classe 5 selon la norme NF T 56-203	0,037
Cellulose soufflée	0,037 - 0,042
Perlite expansée	0,039
Polystyrène expansé classe 3 selon la norme NF T 56-202	0,039
Bois (Fibre de)	0,04
Chanvre (Fibre de)	0,042
Liège expansé pur	0,043
Polystyrène expansé classe 1 selon la norme NF T 56-201	0,044
Paille	0,045
Liège expansé aggloméré au brai	0,048
Vermiculite	0,048
Balsa	0,05
Verre cellulaire (d = 0,12 - 0,14)	0,05
Verre cellulaire (d = 0,13 - 0,14)	0,055
Bois - Sciure sèche	0,06 - 0,07
Verre cellulaire	0,063
Bois de cèdre	0,077
Perlite - Brique alvéolaire (Poroton)	0,08
Chanvre (Brique de)	0,085

Fig. 6 : Tableau des valeurs de conductivité thermiques d'isolants du bâtiment [4]

Les valeurs mesurées pendant nos expériences à l'IUT MT2E sont prometteurs par rapport aux isolants du bâtiment conventionnels. Cependant il y a une grande variabilité dans nos résultats, qui peut être expliquée par plusieurs facteurs. Les valeurs de flux surfaciques ont mis du temps à se stabiliser (15 minutes). De plus, les échantillons ont dû être coupés car ils ne faisaient pas la bonne taille. La plaque de l'appareil mesure 30 cm par 30 cm, et les échantillons ont une surface de 30 cm par 24 cm. Il a donc fallu découper les échantillons pour mettre un échantillon et un bout d'un autre échantillon sur la plaque. Cela

crée une lame d'air entre les échantillons, et cela peut fausser les résultats. De plus nous nous sommes rendu·es compte que si les échantillons n'étaient pas exactement plats, cela crée aussi des espaces d'air qui faussent les résultats. Nous avons essayé de combler au mieux les trous mais sans grand succès. Au vu de ces points, la variabilité des mesures semble surtout venir de la réalisation des échantillons non adaptés aux tests de l'IUT plus que des incertitudes expérimentales. En effet, les résultats pour des matériaux types utilisés dans le banc d'essais du MT2 sont plutôt constants. Pour le moment il reste donc difficile d'imputer les causes de variabilité dans les résultats à la différence de fabrication des échantillons ou à leur non adaptabilité aux expériences

Pour améliorer la précision de l'expérience, il faudrait faire des échantillons vraiment plats, et de la taille de l'appareil de mesure. Cela permettrait de ne pas créer de lames d'air et de ne pas avoir à couper les échantillons. Une autre piste d'amélioration est de passer plus de temps sur chaque échantillon, par exemple une demi-heure plutôt que quinze minutes, afin de s'assurer que la mesure est correcte. Enfin, on peut faire plus d'échantillons et donc plus d'expérience, pour réduire l'incertitude statistique.

Construction du banc d'essai

Recherche bibliographique pour le choix du banc d'essai

Avant de réfléchir à réaliser notre banc d'essais, il a d'abord été nécessaire de faire des recherches bibliographiques sur les différentes méthodes de caractérisation thermiques existantes afin de choisir la plus adaptée. Le document *théorie et pratique de la métrologie thermique* [5], détaille de manière exhaustive les différentes méthodes permettant de déterminer les paramètres thermiques. L'ambition initiale était de réaliser plusieurs bancs d'essais pour obtenir la conductivité thermique (et d'autres paramètres thermiques) de différentes manières, afin d'obtenir un moyen de comparaison entre les méthodes. Cependant, la réalisation d'un banc nécessitant au final beaucoup de temps, une seule méthode a été retenue. De plus, après nos recherches nous avons découvert que certaines méthodes ne sont pas adaptées pour la mesure thermique d'isolant ou peuvent être trop compliqué à réaliser pour un banc d'essai budget et facile à mettre en place.

Les quatres méthodes sur lesquelles nos recherches se sont portées sont la méthode flash, la calorimétrie, la méthode plaque chaude et la méthode fil chaud. Cette dernière a été retenue comme méthode pour notre banc d'essais. Le tableau suivant récapitule l'ensemble des caractéristiques, avantages et inconvénients de chaque méthode :

Méthode	Caractéristique mesuré	Type de méthode	Avantages	Inconvénients
Flash	Diffusivité thermique	Transitoire, adiabatique	Non destructif, mesure rapide, mesure de la conductivité si la capacité thermique est connue	Pas adapté aux isolants et non homogènes, prix laser, condition adiabatique complexe
Calorimétrie	Capacité thermique	Stationnaire, adiabatique	Courantes, peu chère, complément de la méthode flash, méthode de référence	Milieu aqueux nécessite une adaptation, mesure lente
Plaque chaude	Conductivité thermique	Stationnaire, adiabatique	Méthode de référence, précise, adaptée aux isolants	Long temps de mesure, banc d'essais et adiabatique complexe à réaliser
Fil chaud	Conductivité thermique	Transitoire	Mesure rapide et précise, pas de condition adiabatique, adaptée aux isolants	Sensibilité de la mesure, mise en oeuvre délicate

Méthode utilisé dans le cadre de l'IUT

Méthode utilisé pour le banc d'essais

Méthode flash (Parker)

Les informations sur la réalisation d'un banc d'essais utilisant la méthode flash viennent d'un article de "technique de l'ingénieur" [6] :

La méthode flash est la méthode de mesure de la diffusivité thermique la plus connue et la plus utilisée. Depuis sa mise au point en 1961, elle a fait l'objet de nombreux développements. Méthode de laboratoire, elle est de plus en plus envisagée comme outil de contrôle industriel, de par sa simplicité de mise en œuvre.

Un laser va délivrer un Dirac d'énergie sur un échantillon de très petite épaisseur situé dans une enceinte régulée en température. La température de l'échantillon mesuré à l'aide d'une sonde température collé sur l'échantillon, va augmenter selon une courbe caractéristique.

La diffusivité thermique est ensuite déterminée à l'aide de l'épaisseur de l'échantillon ainsi que du temps caractéristique de diffusion ; qui correspond au temps pour lequel la moitié de la température maximale est atteinte. La difficulté de la mesure vient du fait qu'elle doit être faite dans des conditions adiabatiques (sous vide) et avec une connaissance précise de l'énergie délivrée par le laser.

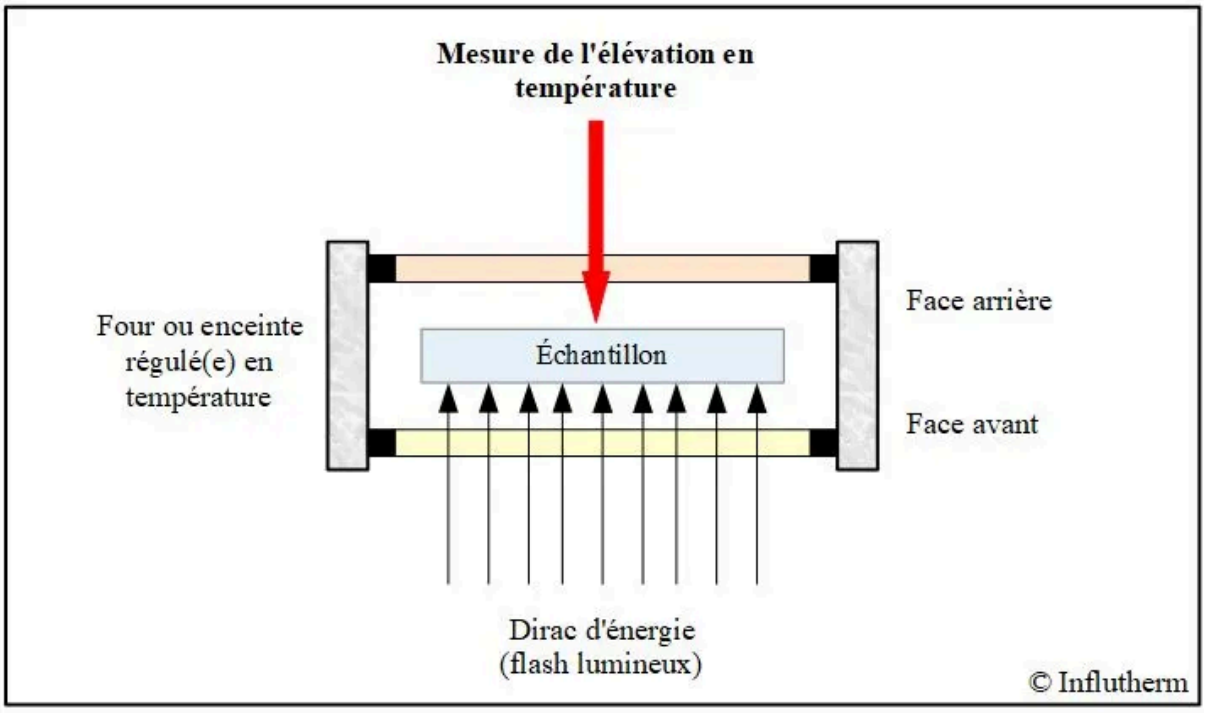


Fig. 7 : Schéma explicatif de la méthode Flash

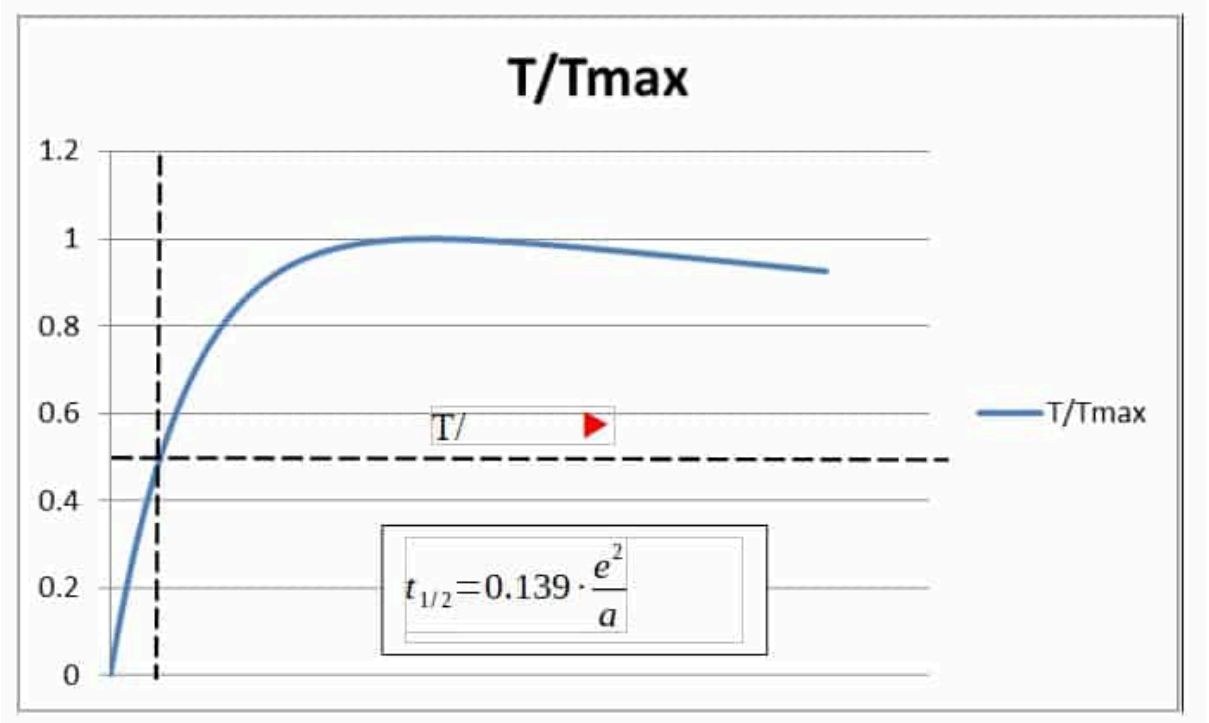


Fig. 8 : Exemple de thermogramme obtenu durant une mesure à l'aide de la méthode flash

Cette méthode ayant été pendant un temps retenu comme solution nous avons pu faire l'inventaire des fonctions à réaliser et du matériel nécessaire associé :

- Elle nécessite tout d'abord **une source d'excitation thermique** capable de délivrer des impulsions de très courte durée, de l'ordre de quelques millisecondes. Cette excitation est généralement produite à l'aide d'un **tube à éclats** ou d'un **laser**.
- Un **système de diagnostic** est ensuite requis afin de déterminer la durée et la forme de l'impulsion, ainsi que l'instant précis du dépôt d'énergie, qui constitue l'origine des temps de l'expérience. Cette mesure peut être réalisée à l'aide d'une **photodiode**, en prélevant une fraction de l'énergie du faisceau incident au moyen d'une lame séparatrice.
- L'installation doit également comporter **une enceinte expérimentale** permettant de réaliser un vide primaire. Celui-ci vise à limiter les pertes thermiques par convection, à réduire les phénomènes d'oxydation à haute température et à assurer une maîtrise correcte de la température de l'échantillon.
- La mesure de la réponse thermique repose sur l'utilisation **d'un couple thermoélectrique**, destiné à suivre les variations de température de la face arrière de l'échantillon.
- Enfin, l'ensemble du dispositif doit être complété par **un système d'acquisition et de traitement des données**, couplé à un dispositif de commande et de pilotage de l'expérience.

Solutions pour fabriquer le banc d'essai à faible coût (quitte à avoir moins de précision):

- Une solution simplifiée pourrait consister à utiliser **un laser de puissance modérée** ou **le flash d'un appareil photographique**, associé à une lentille convexe. L'objectif est d'obtenir une impulsion thermique aussi brève que possible, s'approchant d'une excitation de type Dirac.
- Le système de diagnostic décrit précédemment pourrait ne pas être mis en œuvre. Dans ce cas, l'origine des temps serait assimilée à l'instant de déclenchement du laser. Il resterait néanmoins nécessaire d'estimer l'énergie effectivement délivrée, par une mesure électrique, et d'évaluer le rendement du dispositif, notamment la fraction de l'énergie réellement absorbée par la surface de l'échantillon.
- La mise en place d'un système sous vide s'avérant complexe, l'expérience pourrait être réalisée en dehors de conditions adiabatiques. Il serait alors indispensable d'estimer les coefficients de pertes par convection. Une alternative pourrait consister à concevoir une enceinte isolante de type *« marmite norvégienne »* afin de limiter les échanges thermiques avec l'environnement.
- L'utilisation d'un **thermocouple** ne pose pas de difficulté particulière, mais une attention doit être portée à sa **bande passante**, afin de garantir une mesure correcte des variations rapides de température.
- Enfin, pour l'acquisition et le traitement des données, **une carte de type Arduino** apparaît suffisante au regard des besoins de l'expérience.

La méthode flash est principalement utilisée pour la caractérisation de matériaux métalliques ou céramiques, à partir d'échantillons de petite taille. Dans notre cas, les dimensions des échantillons sont trop importantes et la mise en œuvre nécessiterait des sources de flash à la fois coûteuses et très puissantes, présentant un risque d'inflammation des matériaux étudiés. Les autres aspects de la réalisation étaient également lourds à mettre en place. Pour l'ensemble de ces raisons, cette méthode a finalement été abandonnée.

Méthode du calorimètre

Le calorimètre est utilisé pour caractériser les propriétés thermiques de liquides ou de gaz. Bien qu'il soit possible de caractériser des matériaux solides, c'est uniquement en les immergeant dans le liquide ce qui n'est pas adapté pour les mycomatériaux ne supportant pas l'humidité. Nous pourrions cependant protéger l'échantillon de l'eau en le mettant dans une capsule comme ceci :

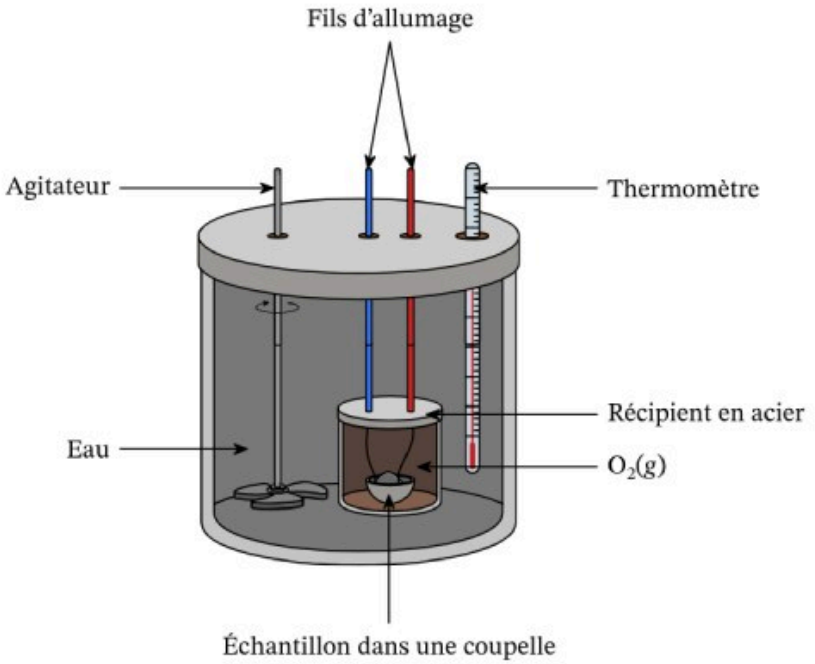


Fig. 9 : Schéma de calorimètre simplifié

Le protocole est le suivant : Nous faisons monter en température l'échantillon jusqu'à une température connue. D'une part nous avons le transfert thermique suivant :

$$Q_P = nc_{\mathrm{pm}}(T_{\mathrm{f}} - T_{\mathrm{i}})$$

où n désigne le nombre de mole, c_pm la capacité thermique molaire (J.K-1.mol-1) et T la température en kelvin (K).

Si on considère le calorimètre idéal, on a alors la capacité thermique du métal c' :

où :

- M = masse du métal
- T0 = température initiale du métal
- m = masse d'eau
- c_eau = capacité thermique massique de l'eau
- Ti = température initiale de l'eau
- Tf = température finale d'équilibre

Il manque cependant les échanges dans la capsule protectrice, à ajouter dans l'équation.

Il est aussi possible de déterminer sa capacité thermique semble les méthodes transitoires (comme par exemple la méthode flash décrite plus haut). Une alternative existante est la méthode Hod Disk ou Transient Plane Source (TPS)[7].

Il faudrait créer une capsule (en métal) où mettre le récipient et percer le couvercle sans doute.

Le calorimètre ne semble pas être un outil adapté pour la caractérisation du mycomatériaux puisqu'il sert surtout à caractériser des liquides. Il est possible de caractériser des solides tels que des métaux en les immergeant, cependant cela n'est pas possible avec les mycomatériaux étant donné qu'ils craignent l'humidité. De plus, le calorimètre ne semble pas être adapté pour les matériaux poreux.

Méthode du fil chaud

La méthode fil chaud consiste à alimenter un fil métallique en général du cuivre ou du platine par un courant constant à l'intérieur du matériau dont on souhaite mesurer le coefficient de conductivité thermique.

Pour que le modèle analytique soit valable, on adopte les hypothèses suivantes :

1. **Fil infiniment long**
   → Le problème est **unidimensionnel radial** (pas de variations axiales)

2. **Fil de rayon négligeable**
   → Assimilé à une **source linéique de chaleur**

3. **Milieu infini et homogène**

   - Conductivité thermique λ constante

   - Capacité thermique volumique ρc constante

4. **Contact thermique parfait** entre le fil et le matériau
   → Pas de résistance thermique de contact

5. **Absence de convection et de rayonnement**
   → Transfert de chaleur uniquement par **conduction**

6. **Puissance dissipée constante dans le fil**
   → Chauffage par effet Joule uniforme

7. **Régime transitoire**
   → La mesure est faite avant que les effets de bord n'apparaissent

En partant de l'équation de la chaleur en coordonnées cylindrique :

$$\boxed{\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right)} \quad \text{avec } \alpha = \frac{\lambda}{\rho c}.$$

Avec ces hypothèses la solution analytique est :

$$\Delta T(r,t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln\left(\frac{4\alpha t}{r^2}\right) + C$$

Ce qui revient à :

$$\Delta T(t) = \frac{q}{4\pi\lambda} \ln(t) + \text{constante}$$

La conductivité thermique lambda va donc pouvoir être déterminée par une régression linéaire de la variation de température en fonction de ln(t).

Les extraits suivants de la thèse de Vincent Félix décrivent le processus [8].

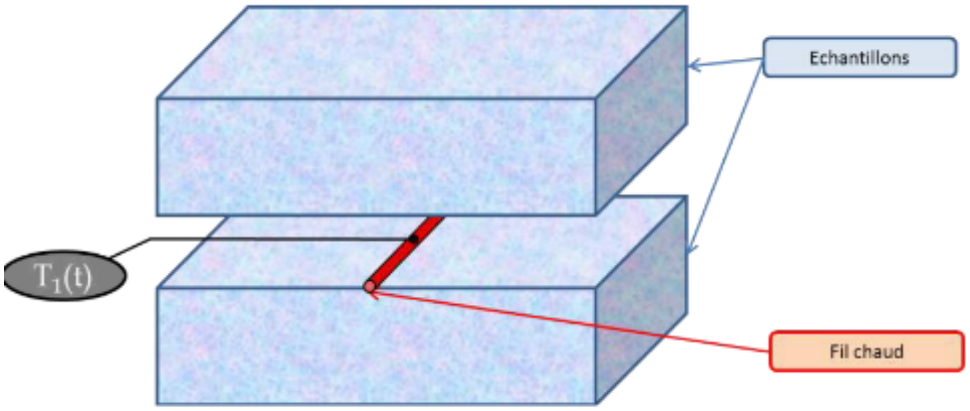


Fig. 10 : Schéma du principe de la méthode fil chaud (image issue de la thèse[8])

C'est une expérience en régime transitoire différente de l'expérience de la plaque chaude. Elle semble plus simple à mettre en place que la plaque chaude. Une des hypothèses sur laquelle l'expérience repose est que l'échantillon est un milieu semi-infini par rapport au fil chaud. Les échantillons épais sont plus pertinents. On fait chauffer le fil, et on mesure sa résistance. On peut relier la résistance avec la température du fil de platine avec la formule :

pur en fonction de sa température. L'une d'elle[37] permet de calculer la résistivité $\Re$ du platine en fonction de deux paramètres α et $\Re_o$:

$$\Re = \Re_o.(1+\alpha.T) \qquad \text{(IV.1)}$$

avec α (20°C) = $3{,}8.10^{-3}$ K^{-1} et $\Re_o$ (20°C) = $10{,}4.10^{-8}$ Ω.m

Fig. 11 : Formule reliant la résistance à la température (image issue de la thèse[9])

La courbe de la température en fonction de ln(t) attendu a cette forme:

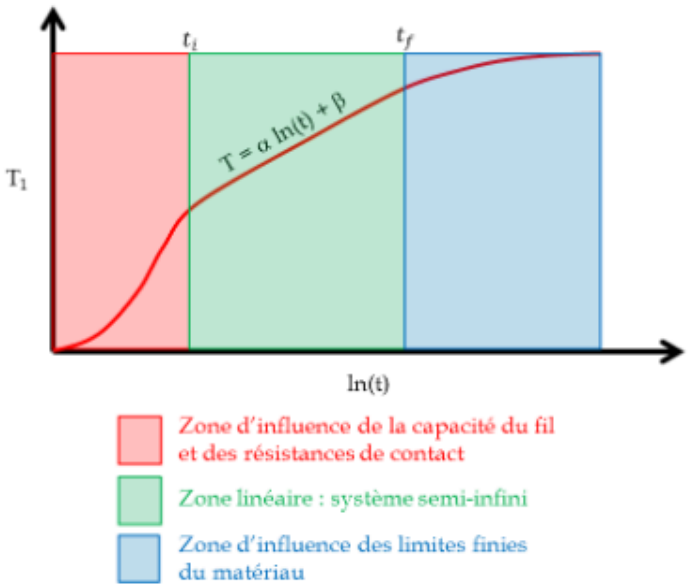


Fig. 12 : Courbe de température à l'échelle logarithmique (image issue de la thèse[8])

Le coefficient alpha sur la courbe est lié à la conductivité thermique :

$$\alpha = \frac{\phi}{4\pi L \lambda}$$

Avec :

- Phi le flux thermique qui vient du fil chauffant
- L la longueur du fil dans le mycomatériau

Nous avons donc :

$$\lambda = \frac{U^2}{4\pi L^2 \rho \alpha}$$

Avec :

- U la tension dans le fil chauffant
- ρ la résistivité du matériau du fil

Méthode plaque chaude

La méthode plaque chaude est la méthode la plus utilisée dans la métrologie dans le secteur de l'isolation. Cette méthode requiert cependant des échantillons assez gros et chaque mesure prend un temps important pour la mesure. Pour des mesures précises il faut des conditions adiabatiques (isolé du milieu extérieur) mais ce point peut être compliqué à mettre en place de manière satisfaisante. Comme observé avec l'expérience de l'IUT, les matériaux doivent également correspondre à la géométrie du banc d'essais nécessitant des adaptations.

La méthode fil chaud est la plus simple à mettre en place dans notre cas. Le matériel nécessaire est facilement accessible et les mesures peuvent se faire en quelques minutes.

Tutoriel de fabrication du banc d'essai

Dans la démarche de réalisation de notre banc d'essai, il a ensuite été décidé d'essayer de rendre ce dernier le plus accessible possible à travers un tutoriel diffusable. Cet ajout vise à faire en sorte que toute personne cherchant à développer de nouveaux isolants thermiques puisse les caractériser pour un faible coût. Ainsi au lieu de réaliser simplement un banc d'essais pour Champiloop, nous partageons un outil simple, peu cher, facile à reproduire pour toute organisation souhaitant caractériser les propriétés thermiques des matériaux.

Le tutoriel contient l'ensemble de la réalisation de la structure, de la partie électronique, étape par étape, ainsi que les liens de téléchargement de l'interface graphique et du code arduino. Nous avons voulu utiliser uniquement des composants électroniques simples et une carte arduino, ce qui a ajouté de nombreuses contraintes. Nous vous invitons à consulter le tutoriel pour mieux comprendre notre tentative d'application de la méthode fil chaud.
Lien du tutoriel

Ce qu'il faut retenir du tutoriel est que **le banc d'essai n'est pas encore fonctionnel** en particulier pour des raisons liées à la partie instrumentation de la partie électronique et de manque de temps. Si individuellement, chacun des blocs d'électronique fonctionne de la manière attendue, leur assemblage a posé des problèmes imprévus dans la réalisation initiale. La suite du rapport explore d'une part les premiers résultats plutôt encourageants, et d'autre part les limites soulevées par la réalisation du banc d'essai, ainsi que des pistes que nous proposons pour continuer ce travail prometteur.

Preuve de concept avec multimètre et mesure quatre fils

Nous avons pu partiellement tester notre banc à essai afin de caractériser thermiquement du polystyrène expansé (les raisons pour lesquelles les tests n'ont pas pu être effectués sur les mycomatériaux seront abordées dans la partie "limites" de la conclusion). La partie instrumentale arduino réalisée n'étant pas fonctionnelle, nous avons

utilisé un multimètre fourni par l'école afin de faire nos mesures dans le cadre de la méthode quatre fils. Cette expérience sert de preuve de concept de la mesure de la méthode fil chaud pour la mesure thermique d'isolant. En particulier l'utilisation de notre source de courant associée à une carte arduino a été validée pour chauffer des isolants proches des valeurs des mycomatériaux. De même l'utilisation d'un fil de platine de 80 micromètres de diamètre fournit des résultats satisfaisants pour notre application.

A l'instant t = 0, la source de courant qui chauffe le fil est allumée. A partir de cet instant, la tension U est mesurée à des intervalles de temps d'approximativement 1 seconde. Après avoir identifié la partie la plus linéaire de la courbe traçant T en fonction de ln(t), nous calculons le coefficient directeur.

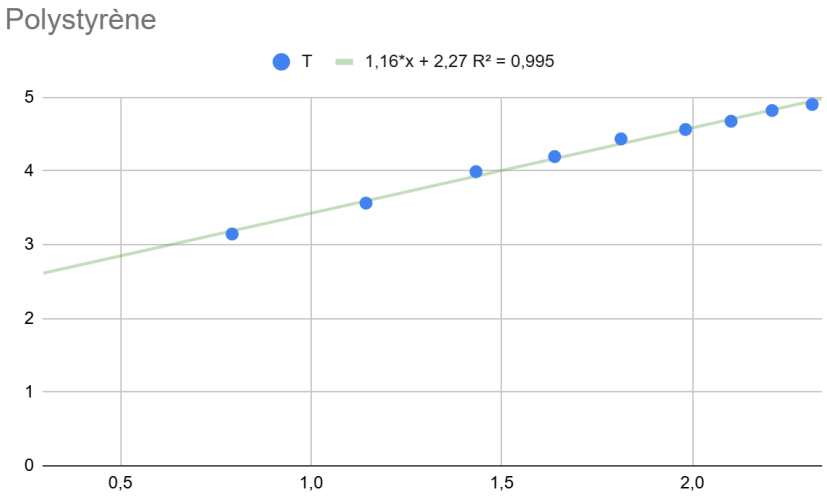


Fig. 13 : Régression linéaire de la courbe de température du fil de platine

Cette régression linéaire nous permettant de déterminer alpha, nous pouvons ensuite grâce à la formule présentée précédemment déterminer la conductivité thermique. Nous trouvons donc **λ = 32E-03 W/m.K**, résultat cohérent pour le polystyrène expansé. En divisant l'épaisseur par cette valeur, nous déterminons **R = 1.23 m².K/W**.

Les points forts du banc à essais

Les points forts générale de notre banc d'essais sont présenté dans le tableau suivant :

Critères	Positionnement	Raisons
Coût	++	Le coût des composants est faible (70 euros) mais attention à l'usage de platine.
Ergonomie utilisateur	+	La carte arduino et la création de l'interface graphique permet de faciliter la prise en main par l'utilisateur·ice en théorie.
Maniabilité	-	La manipulation du banc est complexe à cause de la fragilité du fil.
Champ d'application	-	Du faite des défauts de maniabilité seule les isolants rigide et plat peuvent être tester
Précision	N/A	Pas suffisamment de tests ont été réalisés pour quantifier les incertitudes.
Temps de réalisation	+	Le temps de réalisation n'est en soit pas très long mais beaucoup de problèmes lors de la réalisation de l'instrumentation peuvent survenir.

Chaque point peut être amélioré individuellement par des solutions données. Chacune d'entre elles risque d'avoir des répercussions sur les autres éléments. Par exemple, prendre un fil de platine va augmenter le coût et diminuer la précision en sortant du modèle de l'inertie nulle.

Limites

La perturbation de la source de courant

Malgré ces premiers résultats prometteurs, la partie électronique lors de son assemblage n'a pas fourni les résultats attendus. Lorsqu'elle chauffe le fil de platine, la source de courant applique une tension de 0.9V qui déséquilibre le pont de Wheatstone qui est censé être équilibré et avoir une tension nulle à ses bornes. La tension du pont qui est censé varier entre 0 et 20 mV se retrouve à osciller entre 0.9 V et 0.92 V. Avec le gain de notre INA, la tension de sortie est saturée et empêche toute mesure de l'arduino. De plus, utiliser une tension continue crée des imprécisions de mesures dûes à un offset ainsi qu'à un bruit électrique présent dans l'INA. Les solutions envisagées sont soit d'alimenter la broche de l'autre pont avec la même tension pour compenser le déséquilibre du pont. L'autre plus complexe est de passer à une source d'instrumentation AC mais qui pose un certain nombre d'autres problèmes avec l'arduino. Des pistes de solution sont proposées dans la partie 'Générateur de tension AC'.

Les difficultés à la manipulation du banc d'essai

La seconde raison concerne la fragilité du fil de platine. Cette fragilité est dûe à la taille de son diamètre et la tension appliquée au fil. En effet, pour assurer le contact entre le

fil et le matériau l'étau applique un effort sur les côtés des échantillons. Mais si l'effort appliqué sur le n'est pas suffisant, des lames d'air peuvent facilement perturber la mesure. Ces éléments peuvent entraîner régulièrement des ruptures du fil ce qui nécessite des réparations fréquentes de ce dernier pouvant altérer l'utilisation du banc. De plus, nous utilisons un fil de platine qui est un matériau assez rare difficile à se procurer, et chaque rupture entraîne de la perte de manière lors des nouvelles soudures. Ces éléments rendent la maniabilité du banc relativement compliquée. Les échantillons doivent être plats, un peu malléables et également manipulés avec précaution.

Les soudures à l'étain

Les soudures à l'étain reliant le fil de platine au reste du banc d'essai peuvent avoir deux effets négatifs. Tout d'abord, la soudure ajoute une "résistance de contact" pouvant influencer la mesure. De plus, l'élévation de température au sein du fil aura pour effet d'allonger le fil (phénomène de dilatation thermique) : au regard de la documentation scientifique, il semble pertinent d'ajouter un ressort afin de contrer cet effet de dilatation (voir figure ci- dessous)

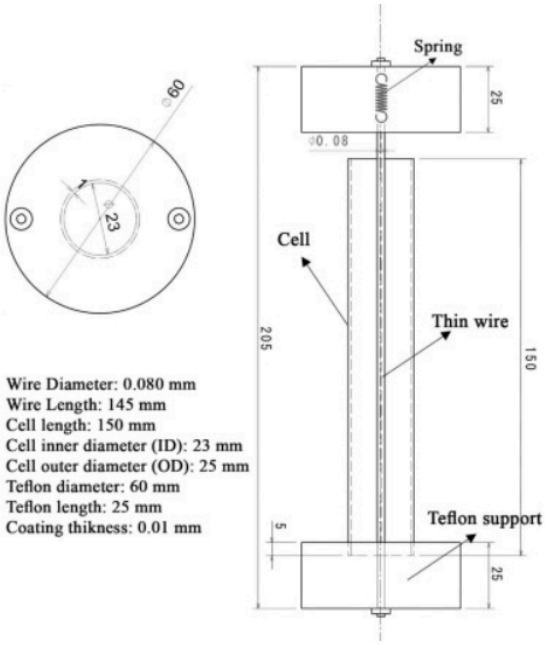


Fig. 14 : Schéma d'un dispositif intégrant un ressort (image issue de l'article[10])

Pistes de recherches

Forme des mycomatériaux

La forme des mycomatériaux fournis peut poser différents problèmes. Tout d'abord, le manque d'uniformité des dimensions entre les différents échantillons ajoute une certaine incertitude aux mesures. De plus, la forme des moules a généré des surfaces non planes comportant des cavités, ces dernières créent des lames d'air qui isolent le fil de platine et empêchent toute mesure. Enfin, les mycomatériaux fabriqués ont une face rêche et des faces lisses. Les faces lisses sont celles où le mycomatériau était en contact avec une paroi, et la face rêche est celle qui était en contact avec l'air. Les faces lisses ne sont pas plates à cause de la forme du moule, et la face rêche s'accroche au fil de platine et le casse quand nous pressons les échantillons contre le fil de platine pour éviter les lames d'air.

Générateur de tension AC

Comme expliqué dans la partie "perturbation de la source de courant", un générateur de tension alternative peut-être envisagé dans le banc d'essai [10]. Afin de créer ce dernier uniquement à l'aide d'une carte Arduino, une piste a été explorée mais semble peu concluante. En effet, cette piste reviendrait à utiliser le PWM de la carte Arduino afin de générer un signal sinusoïdal (dont nous pouvons d'ailleurs augmenter la fréquence en modifiant sur le code le prescaler de l'horloge) puis le filtrer via un filtre RC afin d'obtenir un signal DC sinusoïdal centré en une valeur positive. Afin d'ensuite obtenir un vrai signal AC, qui sera donc centré en 0, nous devons mettre en série un condensateur d'une valeur assez importante (1000 µF par exemple) pour éliminer la composante DC de notre signal et uniquement garder celle AC. Afin d'éviter une chute de tension lorsque la source AC rencontre notre pont de Wheatstone possédant une assez faible résistance équivalente, un montage AOP suiveur pourrait être intéressant. Cependant, en se limitant à l'utilisation d'une seule carte Arduino nous ne pouvons générer que du courant positif ce qui nous empêche d'alimenter correctement notre AOP suiveur. Cette idée reste cependant intéressante à explorer.

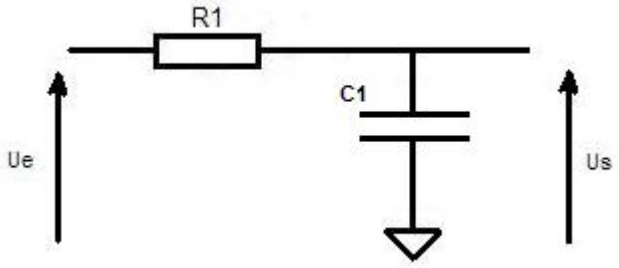


Fig. 15 : Filtre RC

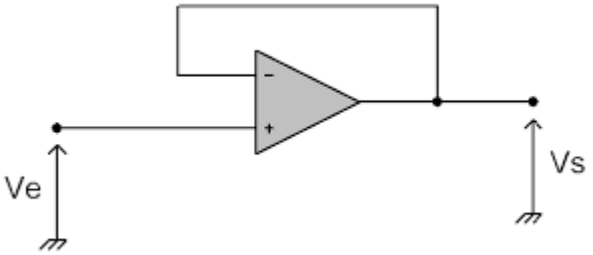


Fig. 16 : Montage AOP suiveur (Ve=Vs)

Bibliographie

[1] **PA Hilton**, *Datasheet du banc d'essai plaque chaude de l'IUT MT2E*
URL https://www.p-a-hilton.co.uk/datasheets/download/5473

[2] **Emilien Fillon**, *La culture du mycélium : Une production envisageable pour exploiter ses capacités thermiques dans le bâtiment ?*, 2024
URL https://miroirdessciences.com/wp-content/uploads/2024/09/fillion_emilien_memoire.pdf

[3] **Girometta, C., Picco, A. M., Baiguera, R. M., Dondi, D., Babbini, S., Cartabia, M., Pellegrini, M., & Savino, E.** , *Physico-Mechanical and Thermodynamic Properties of Mycelium-Based Biocomposites: A Review. Sustainability, 11(1), 281.* , **2019**
URL https://doi.org/10.3390/su11010281

[4] *Tableau des valeurs de conductivité thermiques des isolants du bâtiment*
https://bilans-thermiques.fr/infos/isolation-thermique/conductivite-thermique-materiaux

[5] **Yves JANNOT** Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Théorique et Appliquée (LEMTA), *Théorie et pratique de la métrologie thermique,* 2011
URL http://www.thermique55.com/principal/metrologiethermique.pdf

[6]**Techniques de l'ingénieur Bruno HAY, Jean-Rémy FILTZ, Jean-Christophe BATSALE**, *Mesure de la diffusivité thermique par la méthode flash*, 2004

URL
https://www-techniques-ingenieur-fr.sid2nomade-1.grenet.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/cnd-methodes-surfaciques-42586210/mesure-de-la-diffusivite-thermique-par-la-methode-flash-r2955/

[7] **Thermoconcept**, *Appareil de mesure de la conductivité thermique, méthode Hot Disk*
URL
https://www.thermoconcept-sarl.com/analyse-thermique/hot-disk-appareil-de-mesure-de-la-conductivite-thermique/

[8] **Vincent Félix**, *Caractérisation thermique de matériaux isolants légers. Application à des aérogels de faible poids moléculaire*, 2018
URL https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01749491v1/file/INPL_2011_FELIX_V.pdf

[9] **Malika Baklouti** *Détermination de la conductivité thermique effective de milieux poreux granulaires par la méthode du fil chaud en régime transitoire : modélisation et expériences. Application à la sûreté des stockages*, 2018
URL https://hal.univ-lorraine.fr/tel-01750927v1/document

[10] **Applied Thermal Engineering**, *Low cost and new design of transient hot-wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids*, 2016
URL
https://www-sciencedirect-com.sid2nomade-2.grenet.fr/science/article/pii/S135943111630816X#f0005

Annexes

Document avec l'ensemble des résultats des expériences à l'IUT MT2E

Manip_MT2E

Document ayant permis de caractériser le polystyrène expansé :

proof_of_concept_banc_champiloop

Documents de TP de l'IUT MT2E:

TP 8 – RESISTANCE THERMIQUE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION

Partie explication et théorie

Objectifs :

- Compréhension du fonctionnement de la maquette et de l'instrumentation associée.
- Détermination de la conductivité thermique d'un matériau.
- Mesure de la résistance thermique d'un élément de paroi (par exemple plaque de plâtre) et d'une paroi composée (exemple : plâtre + polystyrène).
- Etude du profil de température dans une paroi.
- Etude des transferts thermiques par conduction à travers une paroi et par rayonnement entre deux parois en influence totale.

Rédaction :

On rappelle que le compte rendu doit rendre compte de votre travail. Ainsi pour chaque manipulation on s'attend à trouver le contexte de la manipulation (« nous allons faire ..... avec ....pour.... »), un protocole rapide (éventuellement simplifié), un schéma, les résultats bruts (cela peut être en annexe, il faut alors indiquer le numéro de l'annexe), des commentaires, une analyse (souvent ce sont les réponses aux questions)

Contexte Thermique des locaux

Les performances d'un bâtiment dépendent en premier lieu de la qualité de l'enveloppe. L'enveloppe est la surface qui entoure le volume chauffé. On ne souhaite pas que la chaleur (transfert thermique) s'échappe de l'enveloppe : c'est pour cela que l'enveloppe est isolée.

Bien sûr il y a aussi des contraintes structurelles : le bâtiment doit tenir debout !

Ainsi une paroi est composée d'éléments porteurs (briques, béton, bloc béton, poteau en bois) et d'éléments isolants (laine d'origine minérale (laine de verre, laine de roche), laine d'origine végétale ou animale (laine de bois, laine de chanvre, laine de mouton, paille etc ...), on parle alors d'isolant bio-sourcé.

Dans ce TP on va étudier différents éléments de construction comme une plaque de plâtre et une plaque de polystyrène ainsi que leur association. C'est la conduction thermique qui assure le transfert thermique. Une lame d'air (non ventilée) est aussi un élément isolant. C'est le cas dans le double vitrage. Dans ce cas le rayonnement et la convection sont prépondérants devant la conduction de l'air.

Méthode du Débitmètre Thermique

Le concept d'un débitmètre thermique apparaît dans la norme ISO 8301:1991.

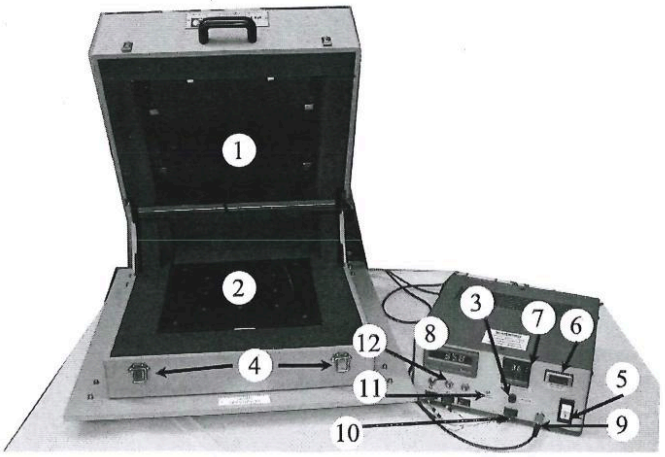
Le spécimen qui fait l'objet de l'essai est placé entre une plaque chaude et le débitmètre thermique, qui est attaché à une plaque froide. L'appareil est entouré d'isolation.

Les plaques chaude et froide sont maintenues à des températures constantes, qui sont mesurées par les thermocouples de surface.

En mesurant la sortie du débitmètre thermique et la température moyenne de l'échantillon d'essai, on peut en déduire la densité de flux conductif qui traverse l'échantillon, à l'aide de constantes d'étalonnages propres à chaque appareil, et fournies par le fabricant (voir équation * plus loin dans le sujet).

Connaissant l'écart de température aux bornes de l'échantillon, on peut en déduire la résistance thermique de l'échantillon. Puis connaissant son épaisseur, on en déduit la conductivité thermique du matériau qui constitue l'échantillon.

DESCRIPTION



Diagramme

1. Plaque Chaude
2. Plaque Froide / Débitmètre thermique
3. Lampe radiateur
4. Système d'attache
5. Interrupteur Principal
6. Indicateur Débitmètre thermique
7. Contrôleur PID
8. Indicateur de Température
9. Connecteur Débitmètre
10. Thermocouple Plaque Chaude
11. Indicateur de charge
12. Prises Capteur de Température /Sélecteur
13. Prise de la Résistance électrique
14. Connecteur Interrupteur de Charge
15. Câble d'Alimentation du H112
16. Mécanisme de Charge

Une armoire à charnière en fibres de verre abrite les composants principaux de l'ensemble (voir le schéma).

La section de base de l'armoire contient le **débitmètre thermique et la plaque froide (2)** installés sur quatre ressorts. Cet ensemble est refroidi à l'aide d'eau à température stable de manière à ce que la plaque soit sensiblement isothermique. Le débitmètre thermique est un composant qui donne une sortie en millivolts, qui sera notée HFM. L'unité a été étalonnée avant livraison (en testant des échantillons de résistance thermique connue). A partir la valeur de HFM, et de la température moyenne de l'échantillon, on déduit le flux surfacique à l'aide d'une équation d'étalonnage (*) fournie par le fabricant.

Le couvercle de l'armoire abrite la **plaque chaude chauffée électriquement (1).** Elle est chauffée par une résistance chauffante et sa température est régulée à une température de consigne par un **contrôleur PID (7)**; le fonctionnement du chauffage est indiqué par un **voyant rouge clignotant (3)**. La plaque est levée et abaissée par le **mécanisme à poignée (15)** à vis situé en haut de l'armoire. Un indicateur à cadran dans la roue permet de déterminer la hauteur du spécimen testé entre la plaque chaude et la plaque froide. Le mouvement de la plaque chaude permet d'utiliser des spécimens d'une épaisseur allant jusqu'à 75 mm. La plaque chaude (1) est protégée par un interrupteur limitant la température à 100°C.

Une isolation en mousse entoure l'ensemble de l'armoire pour empêcher la perte de chaleur.

Pour veiller à ce que la pression correcte soit appliquée au spécimen, un interrupteur optique est installé sous la plaque froide de manière à ce que la compression des ressorts à cette position donne la charge correcte. La charge correcte est affichée par l'indicateur de charge **(11) qui doit alors être éteint**.

Ne pas forcer lorsque vous fermez le couvercle : si cela ne se ferme pas il suffit de relever la plaque chaude à l'aide du volant.

L'alimentation et l'instrumentation de la plaque est fournie par un boitier externe.

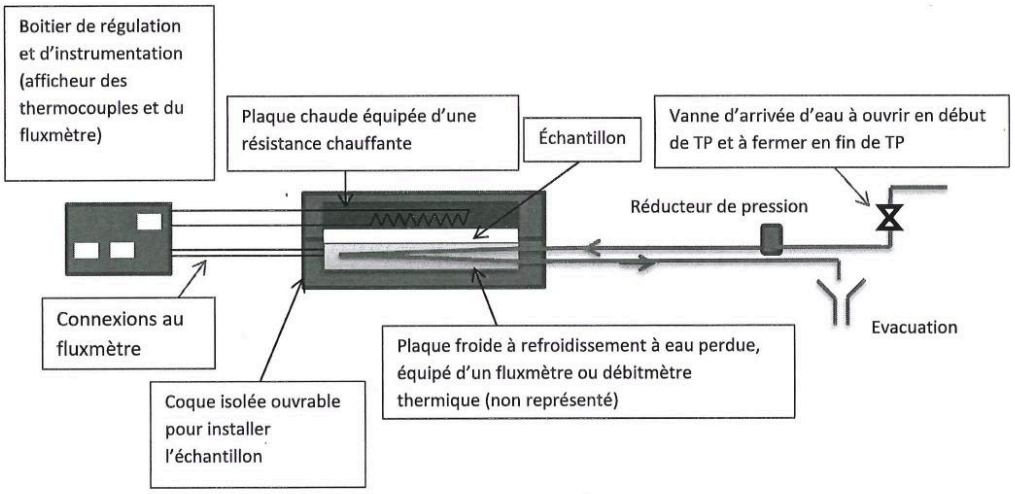
La plupart des matériaux de construction et d'isolation peuvent être testés, dans la mesure où une épaisseur adéquate est utilisée, de manière à ce que la résistance thermique (R) soit entre 0,1 et 1,4 m^2 K/W.

L'unité est livrée avec des feuilles en caoutchouc conçues pour être placées entre les échantillons et les plaques chaudes (1) et froides (2).

Il est important d'utiliser ces feuilles de caoutchouc car celles-ci ont été utilisées pour l'étalonnage de l'appareil et l'équation d'étalonnage (notée *, voir plus loin dans le sujet) fournie n'est valide que si les feuilles de caoutchouc sont à leur place.

Le but des feuilles de caoutchouc est d'éliminer les espaces d'air éventuels entre le spécimen et la plaque chaude et la plaque froide (résistances de contact)

Schéma de principe de la manipulation



Réglage et mesures

- Réglage de la consigne de température du régulateur → voir annexe 2
- Sur le boitier externe (Unité H112) se trouve un afficheur de température (8). Les interrupteurs en position relevés initialement doivent être abaissés successivement pour permettre la lecture des températures suivantes :
  - Interrupteur 1 baissé (les autres relevés) : température T_1 de la plaque chaude
  - Interrupteur 2 baissé (les autres relevés) : température T_2 de la plaque froide
  - Interrupteur 3 baissé (les autres relevés) : température T_3 de l'eau à l'entrée de la plaque froide
- Thermocouples additionnels : un lecteur de thermocouple reliés à plusieurs thermocouples fins permet de mesurer les températures entre les différents éléments d'une composition : par exemple entre la plaque de plâtre et la plaque de polystyrène. On pourra aussi mesurer la température de l'eau à la sortie de la plaque froide (évacuation).
- Débitmètre thermique : L'afficheur donne une valeur en mV, notée HFM. On en déduit le flux surfacique à l'aide de l'équation d'étalonnage fournie par le fabricant, et dont les constantes sont propres à chaque appareil :

$$\varphi = k_1 + k_2.\bar{T} + (k_3 + k_4.\bar{T}).HFM + (k_5 + k_6.\bar{T}).HFM^2 \quad (*)$$

Avec $\bar{T} = \frac{T_1+T_2}{2}$ et $\bar{T}$ doit être entré en °C dans l'éq (*)

	Serial No H112N/03719	Serial No H112N/03678
k_1 (usi)	- 47,4192	- 10,9658
k_2 (usi)	0,6490	- 0,2673
k_3 (usi)	7,6451	5,9579
k_4 (usi)	0,0150	0,0971
k_5 (usi)	0,0213	0,1027
k_6 (usi)	0,0000	- 0,0018

- Mesure du débit d'eau : on pourra au niveau de l'évacuation relever le volume d'eau écoulé pendant une durée donnée. On pourra ainsi calculer le débit d'eau dans l'installation.

Protocole type :

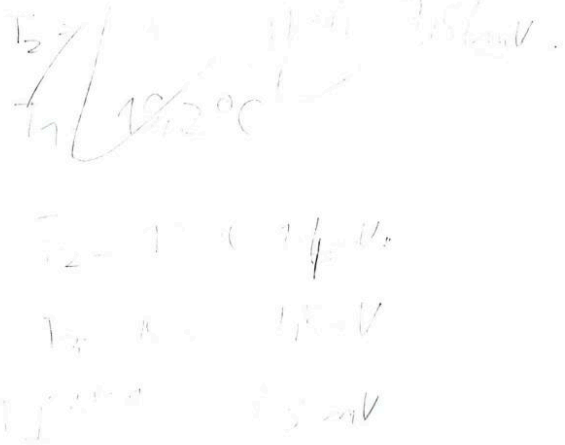
- Ouvrir la vanne située sur le circuit d'eau de refroidissement

- Placer l'échantillon dans l'unité, entre les 2 tapis de caoutchouc.

- Charger ensuite l'échantillon à l'aide du volant (16) jusqu'à ce que le voyant vert indicateur de charge (11) s'éteigne.

- Observer la température de l'eau de refroidissement T_3 et régler en conséquence, sur le contrôleur PID (7), la température de consigne de la plaque chaude pour obtenir une différence de 15-20°C aux bornes de l'échantillon. La plupart du temps, la température de la plaque chaude sera consignée à **40 °C.**

- Une fois le régime permanent obtenu, relever les valeurs de HFM, T_1 et T_2. Le niveau de stabilisation thermique est mieux indiqué par la surveillance de la valeur de HFM, car le débitmètre thermique est l'instrument le plus sensible.



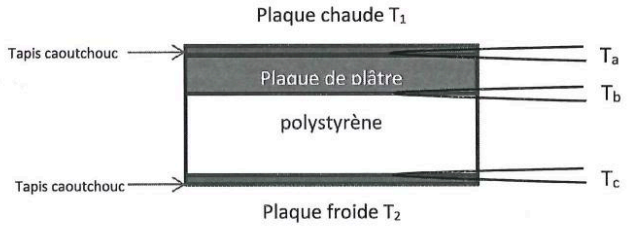
Partie expérimentale

I. Etude d'un élément

Groupe 1 : plaque de plâtre / Groupe 2 : polystyrène

1. En suivant le protocole type explicité ci-dessus, déterminez la résistance thermique de votre échantillon, puis la conductivité thermique du matériau correspondant. Comparez avec les valeurs de la littérature. Pour connaître l'épaisseur de l'échantillon, vous pourrez utiliser un pied à coulisse.
   Echangez avec l'autre groupe la valeur de résistance thermique de vos échantillons respectifs, vous en aurez besoin pour la suite.
2. Il est possible de déterminer expérimentalement le flux traversant l'échantillon sans passer par le fluxmètre intégré à la manipulation mais en s'intéressant à l'eau froide qui parcourt la plaque froide.
   a. Rappeler l'expression de la puissance prélevée par la circulation d'eau froide.
   b. Donner un protocole pour réaliser des mesures permettant de déterminer cette puissance (allez, on vous aide il y a une différence de température et un débit... à mesurer..). En parler à l'enseignant et réaliser la mesure de débit.
   c. En procédant à l'envers : Connaissant le flux thermique qui traverse l'échantillon (question 1.), calculer alors la différence de température que l'on est censé mesurer.
   d. Conclure !

II. Etude d'une composition : ITE dans le cas hiver pour les groupes 1 et 2



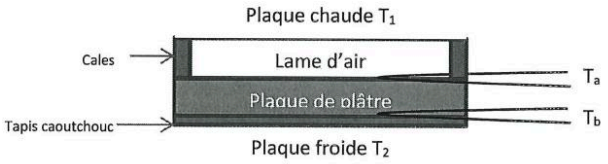
Précision : la plaque de plâtre simule ici la structure (ex. béton, briques...) d'une paroi réelle d'un bâtiment.

1. Réaliser le montage en insérant les thermocouples additionnels entre les différentes couches.
2. Faire un relevé au cours du temps des températures T_1, T_2, T_b. Relever les valeurs toutes le 5 min jusqu'à stabilisation (environ 30 min). Une fois le régime permanent atteint, relever les valeurs de T_1, T_2, T_a, T_b et T_c.
3. Durée d'obtention du régime permanent : tracer l'évolution des températures T_1, T_2, T_b en fonction du temps dans un même graphique. Indiquer sur le graphique les zones correspondant au régime transitoire (RT) et au régime permanent (RP). Commentez.
4. En régime permanent : tracer dans un tableur le profil de températures T=f(x) dans l'échantillon composite.

5. Calculez le flux thermique traversant l'échantillon en appliquant la loi de Fourier à l'élément dont vous avez précédemment déterminé la conductivité (plaque de plâtre pour le groupe 1, et polystyrène pour le groupe 2).
6. Cette composition est-elle une association série ou parallèle des éléments ? Qu'est-ce que cela signifie sur le flux qui traverse l'échantillon entier ?
7. Calculez la résistance thermique totale de l'échantillon entier en utilisant les températures T_1 et T_2 mesurées à ses bornes.
8. Vérifiez que la résistance totale obéit bien à la loi obtenue dans la partie préparation.
9. Elargir au cas d'une paroi type RT2012 (bloc béton + isolant + plâtre + Résistances superficielles intérieure et extérieure) : donner le profil théorique de température attendu

III. Transfert thermique par rayonnement entre 2 parois en influence totale

Réalisez le montage suivant afin de créer une lame d'air entre la plaque chaude et la plaque de plâtre. Utilisez les 4 cales prévues à cet effet. Utilisez également le scotch pour maintenir le thermocouple (T_a) en contact avec la plaque de plâtre. Mettre en chauffe.



Flux net : Différence de flux partant d'une surface et du flux arrivant sur la surface

Flux échangé : Différence entre le flux émis par S_1 et absorbé par S_2 et du flux émis par S_2 et absorbé par S_1

Compréhension de la manipulation :

Par quel mode de transfert (conduction, convection, rayonnement) la plaque de plâtre transmet-elle la chaleur ? Par quel(s) mode(s) de transfert la plaque de plâtre échange avec la plaque chaude ? **Expliquer à votre professeur comment se fait le transfert thermique.**

1. Relevez T_1, T_2, T_a, T_b en régime permanent.
2. Connaissant la conductivité de la plaque de plâtre, déterminez le flux conductif à travers la plaque de plâtre.
3. Justifier que ce flux à travers la plaque de plâtre est aussi le flux net allant de la plaque chaude à la plaque de plâtre.
4. En déduire la résistance thermique de la lame d'air en appliquant la définition de R_{th}. L'annexe 3 donne la résistance thermique de lames d'air non ventilées. Extraire la valeur correspondant à notre cas. Est-elle en accord avec votre résultat ? (Donner l'écart relatif)
5. Déterminez le flux échangé par rayonnement entre la plaque chaude et la face supérieure de la plaque de plâtre (c'est aussi le flux net de la plaque chaude !), considérés comme des corps noirs en influence totale. (Formule à connaître !)
6. En déduire le flux convectif entre les deux plaques. Comment justifier le résultat (ou que pensez-vous du flux convectif entre ces deux plaques...).

Te = 16,2°C

16,1

60 sec

Annexe 1 : Spécifications techniques

Module pédagogique d'étude de la conductivité thermique des matériaux de construction - H112N.

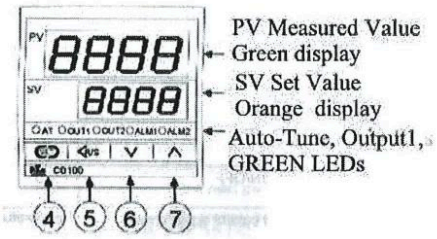
- Banc de table conforme à la norme internationale ISO 8301.
- Le module utilisera une plaque chauffante électrique avec régulation type PID et une plaque refroidie à l'eau comprenant un fluxmètre thermique à haute sensibilité.
- Les échantillons à tester seront de dimension 300mm x 300mm
- Epaisseur maximale de l'échantillon : 75mm
- Température maximale de la plaque chaude : 70°C.
- Boîtier isolé thermiquement afin de limiter les pertes thermiques.
- Système de mise en charge assurant une force de serrage identique pour tous les essais.
- Fluxmètre thermique connecté en sortie à un afficheur numérique sur une console auxiliaire d'instrumentation et de contrôle.
- Des thermocouples spéciaux seront placés de part et d'autre de la plaque de matériaux à étudier et permettront de déterminer le gradient de température à travers l'échantillon et d'en déduire la conductivité thermique.
- Un pied à coulisse de précision sera fourni pour permettre de mesurer l'épaisseur de l'échantillon in situ.
- Le module permettra d'empiler des échantillons de matériau pour effectuer des mesures en série L'alimentation électrique et l'affichage des mesures de température sera effectuer par une unité de service extérieur pouvant servir à d'autres modules expérimentaux.
- Dimensions et poids : 450 x 450 x 500mm - Poids: 20 kg

Annexe 2

Réglage de Température de la Plaque Chaude

Le contrôleur de température de la plaque chaude température est un appareil numérique PID (Proportionnelle Intégrale Dérivée) qui fait fonctionner un relais interne solide qui à son tour contrôle l'alimentation des résistances de 500W sur la plaque chauffée. La valeur mesurée (affichage vert) est détectée par un thermocouple de type T dédié sur la plaque chauffée.

Le contrôleur de température de la plaque chaude possede les éléments suivants.

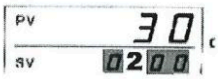


Control Buttons

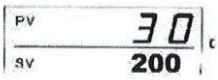
Pour régler la température de la procédure est illustrée comme suit l'évolution de la valeur fixée à 200°C.

Appuyez sur la touche **SET** (4) pour saisir la valeur SV de réglage. Les chiffres les plus brillants sont les chiffres réglables.

Appuyez sur la touche R </ S (5) pour passer au chiffre suivant vers la gauche. Ceci peut être répété autant de fois que nécessaire. Dans l'exemple le chiffre a été déplacé dans la colonne des "centaines".



Appuyez sur la touche **UP** ∧ (7) pour augmenter la valeur affichée. Dans l'exemple présent la valeur affichée est de 2. La touche **BAS** ∨ (6) permettra de réduire le nombre indiqué.



Après avoir réglé tous les chiffres, appuyez sur la touche **SET** (4). Toutes les valeurs définies (SV) brillent légeremnet et l'appareil tournera en mode de fonctionnement normal.

À la suite de la procédure ci-dessus, il esst possible d'établir toutes les températures requises de la plaque chaude.

Notez que sur l'unité H112N la température maximale fixée est de 100 ° C.

Annexe 3 : Lame d'air – résistance thermique

Source :

https://energieplus-lesite.be/donnees/les-transferts-hygrothermiques/l-enveloppe/la-resistance-thermique-des-couches-d-air/

Épaisseur d de la couche d'air [mm]	Direction du flux thermique		
	ascendant	horizontal[1]	descendant
0 < d < 5	0,00	0,00	0,00
5 ≤ d < 7	0,11	0,11	0,11
7 ≤ d < 10	0,13	0,13	0,13
10 ≤ d < 15	0,15	0,15	0,15
15 ≤ d < 25	0,16	0,17	0,17
25 ≤ d < 50	0,16	0,18	0,19
50 ≤ d < 100	0,16	0,18	0,21
100 ≤ d < 300	0,16	0,18	0,22
300	0,16	0,18	0,23
[1] valable pour une direction du flux de chaleur qui ne dévie pas de plus de ± 30° du plan horizontal.			

En présence d'une lame d'air peu ventilée, on pourra considérer par simplification la moitié de la résistance donnée dans ce tableau pour une épaisseur équivalente.
La résistance thermique d'une lame d'air fortement ventilée sera considérée comme nulle.