Rapport de Projet Low-tech Fireless Cooker

Adam, Chateau, Di Campo, Jonvel, Lecocq, Lefevre, Puybras, Tatard

Ce document est en open source sous licence Creative Commons CC-BY[1].

Vous êtes libre de partager : copier, distribuer et communiquer le matériel par tous moyens et sous tous formats ; vous pouvez adapter : remixer, transformer et créer à partir du matériel pour toute utilisation, y compris commerciale.

Vous devez créditer l'OEuvre, intégrer un lien vers la licence et indiquer si des modifications ont été effectuées à l'oeuvre. Vous devez indiquer ces informations par tous les moyens raisonnables, sans toutefois suggérer que Le Low-tech Lab Grenoble vous soutient ou soutient la façon dont vous avez utilisé son OEuvre.

1. https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Table des matières

Prologue **5**

Partie 1 : Etude technique **6**

I. Introduction 6

1. Origine et principe *6*
2. Géométrie et modèles existants *6*
3. Estimation des économies réalisables avec une MN *7*

II. Les Isolants 9

1. Introduction *9*
2. Performances thermiques *10*
3. Aspect écologique et sanitaire des isolants *10*

III. Plan 12

1. Dimensions de la marmite norvégienne *12*
2. Optimisation des performances *13*
3. Choix du matériel *15*

IV. Etudes théorique et expérimentale 16

1. Introduction *16*
2. Etude théorique *16*
3. Etude expérimentale *20*
Conclusions

Partie 2 : Etude managériale **23**

I. Objectifs 23

II. Organisation et communication 23

1. L'équipe *23*
2. Communication et ressources *24*

III. Planning 24

IV. Problèmes rencontrés 25

1. Risques et dépendances *25*
2. Crise sanitaire *26*

Annexe **28**

Bibliographie **62**

Table des figures

Figure 1 : Représentation schématique des transferts de chaleur dans la MN 6
Figure 2 : Modèle de MN s'intégrant dans une cuisine 7
Figure 3 : Schéma des étapes de cuissons possibles 8
Figure 4 : Conductivité thermique de différents matériaux 10
Figure 5 : Comparaison performance thermique/bilan CO2 de différents isolants [5] 11
Figure 6 : Dimension de notre casserole 13
Figure 7 : Plan de notre Marmite norvégienne 14
Figure 8 : Evolution temporelle de la température de la caisse 17
Figure 9 : Puissance s'échappant de la casserole en fonction de la température interne 17
Figure 10 : Evolution temporelle de la température de la caisse 18
Figure 11 : Evolution de la température interne 19
Figure 12 : Puissance s'échappant de la casserole en fonction de la température interne 19
Figure 13 : Evolution temporelle de la température de la casserole 21
Figure 14 : Evolution de la température interne 21
Figure 15 : Diagramme de Gantt avant l'épidémie Covid-19 25
Figure 16 : Diagramme de Gantt après l'épidémie Covid-19 27

Table des tableaux

Tableau 1 : Ordres de grandeurs de l'énergie consommée et de l'économie d'énergie réalisable pour un plat mijoté en fonction de différents appareils de cuisson 9
Tableau 2 : Risques sanitaires de différents isolants 11
Tableau 3 : dimension moyenne des placards 12
Tableau 4 : Dimensions des caisses de la marmite norvégienne 14

Prologue

Abstract

La sobriété et l'efficacité énergétiques sont des enjeux majeurs dans la lutte contre le changement climatique et l'épuisement des ressources. Les low-technologies ("low-tech") répondent à ces problématiques en proposant des solutions utiles, accessibles et durables. La marmite norvégienne ("fireless cooker" en anglais) est une boîte isolée thermiquement : placer les aliments préalablement chauffés à l'intérieur continue la cuisson sans apport d'énergie.

Ce travail consiste en la rédaction d'une annexe scientifique sur les résultats d'expérimentations et les performances de la marmite norvégienne, afin de faire valoir la pertinence des low-tech pour traiter les défis environnementaux et énergétiques.

La démarche est également pédagogique: cette annexe a pour but de s'adresser à un public très large, allant du particulier sans connaissances scientifiques au professeur souhaitant intégrer les low-techs dans son enseignement. Elle permet à chacun de réaliser une marmite norvégienne en faisant des choix éclairés sur les matériaux à utiliser, et met en évidence l'adéquation forte entre l'étude des low-tech et le milieu scientifique.

Les mesures expérimentales réalisées ont permis de distinguer les éléments nécessaires à la réalisation d'une marmite norvégienne efficace, comme la présence d'un écran radiatif ou les plots isolants pour poser la casserole.

Cette étude prouve l'efficacité de cette solution low-tech et montre les économies d'énergie considérables qu'elle permet. Ce travail montre également à quel point il est pertinent d'étudier de telles solutions, tant sur le plan scientifique que pédagogique.

Partie 1 : Etude technique

I. Introduction

1. Origine et principe

La marmite norvégienne (MN) est une invention ancienne, utilisée notamment dans les pays scandinaves à partir de 1870 afin de garder les plats chauds et continuer de faire cuire les aliments en entourant les marmites de vêtements ou de couvertures. Elle se composait généralement d'une marmite en fer battu étamé et d'une boîte isolatrice pouvant se refermer. Aujourd'hui, de **nombreux modèles ont été développés** et s'adaptent à différentes utilisations: randonnées, maison...

La MN est une boîte isolée thermiquement qui permet de **conserver la chaleur emmagasinée** dans la casserole lors de la première partie de la cuisson pour terminer la cuisson sans nouvel apport d'énergie. **L'importante isolation du caisson** ralentit fortement la baisse de la température, en limitant les trois modes de transfert de chaleur :

- la **conduction** (transmission de proche en proche de l'agitation thermique) grâce à l'isolation de ses parois.
- la **convection** (mouvement de fluide) grâce à sa fermeture hermétique et à la réduction des espaces vides, limitant les mouvements de l'air.
- le **rayonnement** grâce à une fine couche métallisée interne qui renvoie la chaleur radiante dans le plat de cuisson.

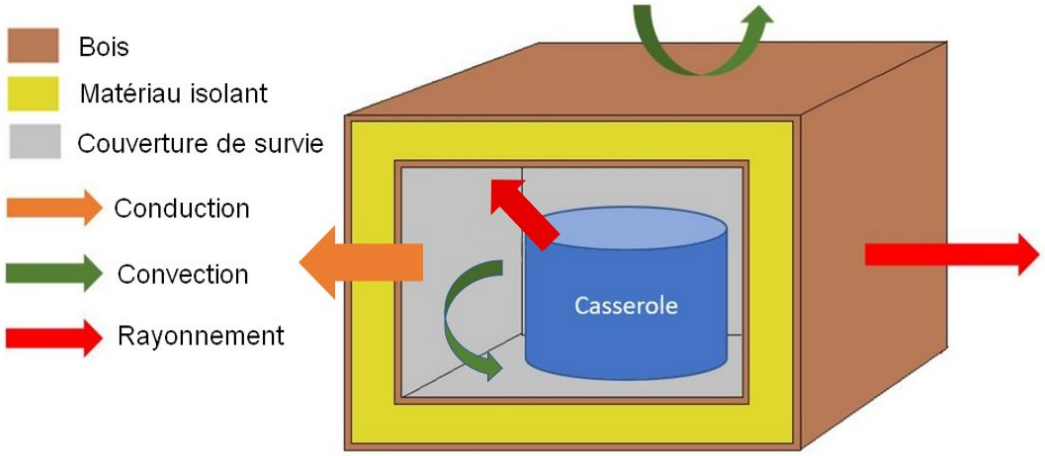


Figure 1 : Représentation schématique des transferts de chaleur dans la MN

2. Géométrie et modèles existants

Idéalement, la forme de la MN devrait être **sphérique** :

- La puissance thermique rayonnée est directement proportionnelle à la surface (annexe 1).
- Les pertes thermiques par convection sont proportionnelles à la surface d'exposition (annexe 2).

Pour un volume donné, c'est **la sphère qui propose la surface la plus faible**, réduisant au maximum les pertes thermiques. Toutefois, cette forme est difficile à construire. Notre projet se voulant **low-tech et accessible au plus grand nombre**, nous avons choisi une forme en **pavé droit**, qui apparaît comme le meilleur compromis entre performance et facilité de construction.

Un grand nombre de MN utilisent du matériel de **récupération**, comme un panier. Il peut être comblé par du carton ou des couvertures très facilement. Ce sont des modèles très peu coûteux et faciles à réaliser, mais ils sont peu pratiques (enlever la couverture à chaque utilisation, etc.). [Photo]

Il existe également des modèles pour lesquels le contenant est en **tissu** rempli d'isolant. Sa fabrication est aussi relativement simple (à l'aide d'une machine à coudre). Ce modèle a été développé par la marque Wonderbag qui les commercialise au prix de 80 euros. [Photo] Site du Wonderbag

Le modèle "**Cozy pot**", le plus léger, idéal pour des **randonnées** ou des **treks** : une couche de papier bulle forme l'isolant tandis que les feuilles d'aluminium empêchent les transferts par rayonnement. [Photo]

Enfin, le modèle le plus abouti semble être celui qui **inclut la MN au mobilier de la cuisine** pour que son utilisation soit la plus facile possible. Sa construction est souvent plus complexe, surtout lorsque nous voulons au maximum utiliser des matériaux de récupérations. On peut utiliser de l'aluminium pour éviter la perte de chaleur par rayonnement en plus de l'isolation habituelle. Les photos ci-dessous proviennent d'un tutoriel de la construction d'une MN sur youtube par la chaîne Objectif ZeroCarbon [vidéo].

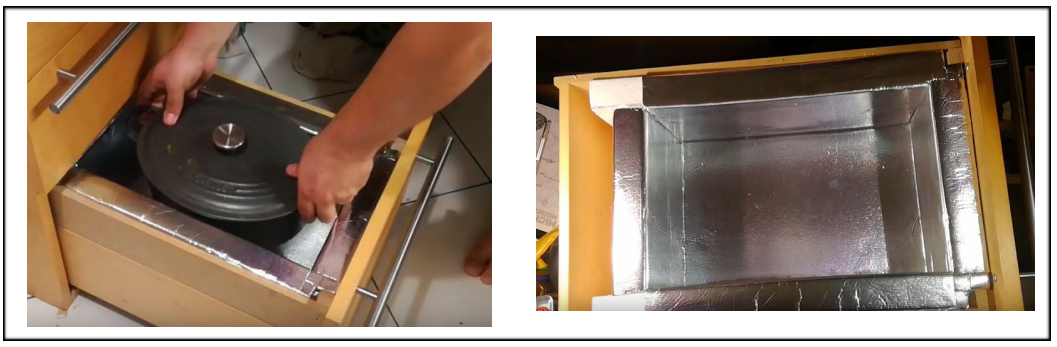


Figure 2 : Modèle de MN s'intégrant dans une cuisine

3. Estimation des économies réalisables avec une marmite norvégienne

Afin d'obtenir une première estimation des économies d'énergie que permet une MN, nous avons effectué des calculs théoriques en fonction de différents appareils de cuisson : plaque électrique, plaque à induction, gaziniere.

Nous souhaitons faire cuire quelques patates, dont le temps de cuisson est de 25 minutes dans une eau portée à ébullition. La 1ère étape consiste à porter 2,5 L d'eau à ébullition (100°C). Puis deux options s'offrent à nous : une 1ère option correspond à la cuisson standard des patates et une 2ème option correspond à la cuisson dans la MN :

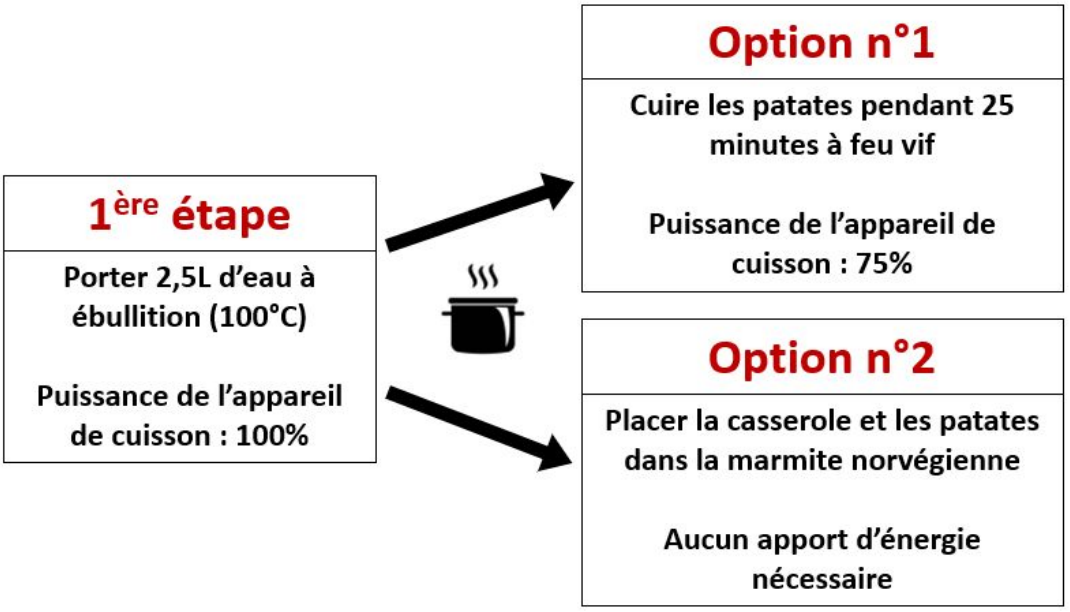


Figure 3 : Schéma des étapes de cuissons possibles

L'énergie économisée grâce à la MN (option n°2) correspond à l'énergie consommée si nous choisissons une cuisson selon l'option n°1.

$$E_{etape\,1} = P \cdot t_{chauffe}$$
$$E_{option\,1} = P \cdot t_{cuisson}$$

avec :

$$t_{chauffe} = \frac{Q_{chauffe}}{P_{utile}} = \frac{m_{eau} \cdot c_{p_{eau}} \cdot (T_{eb} - T_0)}{P \cdot \eta}$$

$E_{etape\,1}$ [J] : énergie consommée lors de l'étape 1 ($E_{option\,1}$: énergie consommée pour l'option 1)
$t_{chauffe}$ $[s]$: temps nécessaire pour porter l'eau à ébullition ($t_{cuisson}$: temps de cuisson pour l'option 1)
P $[W]$: puissance de l'appareil de cuisson
$Q_{chauffe}$ $[J]$: énergie nécessaire pour faire passer une masse d'eau m_{eau} $[kg]$ de sa température initiale T_0 (20°C) à sa température d'ébullition $T_{éb}$ (100°C)
$c_{p_{eau}}$ $[J/kg \cdot K]$: capacité thermique massique de l'eau (ie sa capacité à accumuler de l'énergie sous forme thermique)

P_{utile} $[W]$: puissance utile, réellement transmise à la casserole, prenant en compte le rendement de l'appareil de cuisson η $[S.U.]$. La puissance utile varie en fonction du type d'appareil de cuisson. Nous considérerons seulement les pertes par convection entre la surface de l'eau dans la casserole et l'air. Les pertes par conduction dans l'air et le manche et les pertes par rayonnement nous semblent négligeables.

Nous obtenons le tableau suivant :

Patates : 25 min de cuisson dans l'eau bouillante	Plaque électrique	Plaque à induction	Gazinière
Energie consommée pendant la 1ère étape	490 Wh	390 Wh	668 Wh
Energie consommée avec l'option n°1	583 Wh	875 Wh	875 Wh
Economie d'énergie réalisable avec l'option n°2	56 %	70 %	58 %

Tableau 1 : Ordres de grandeurs de l'énergie consommée et de l'économie d'énergie réalisable pour un plat mijoté en fonction de différents appareils de cuisson

Interprétation et calculs d'échelle:

Nous observons à quel point la MN peut être efficace: nous pouvons économiser jusqu'à 70% d'énergie et d'argent grâce à ce procédé !

La France compte 30 millions de ménages: en supposant que chaque ménage utilise sa MN 1 fois par semaine pour faire cuire des patates, nous pourrions économiser **1 TWh d'énergie sur une année!** C'est l'énergie équivalente fournie par 86 000 tonnes de pétrole. En comparaison, la France produit chaque année environ 550 TWh d'électricité.

De plus, une cuisson au gaz peut dégager des éléments toxiques, comme du monoxyde de carbone ou du dioxyde d'azote, à des niveaux élevés, s'il n'y a pas assez de circulation d'air. Il est donc également intéressant d'utiliser la MN d'un point de vue sanitaire.

II. Les Isolants

1. Introduction

L'isolant constitue un élément clé de la MN. Sa nature est susceptible d'impacter fortement les performances de cette dernière. Nous avons donc décidé de mener une **étude préliminaire** sur divers isolants afin de réaliser une présélection avant les tests.

La **conductivité thermique** est le critère qui nous permet de donner le niveau de perméabilité d'un matériau face à la chaleur. **Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est un bon isolant thermique** Il est donc intéressant, pour choisir un bon isolant, d'avoir une conductivité thermique faible. (On sait que le meilleur isolant thermique est l'air avec une conductivité thermique de 0.035 W/m.K).

Nous avons ensuite établi un moyen simple pour récupérer chaque matériau, ou son prix d'achat, afin de **déterminer leur accessibilité**. Enfin nous avons pris en compte **le bilan carbone des matériaux** pour garder une certaine cohérence environnementale au sein de notre projet, qui s'inscrit dans une démarche low-tech. Voici une liste non exhaustive (liste exhaustive en annexe) des isolants auxquels nous avons

pensés en premier. Nous avons pris en compte les **performances d'isolation** et la **facilité d'obtention**. Nous nous pencherons par la suite sur d'autres critères qui détermineront nos choix finaux d'isolants.

- Polystyrène
- Paille
- Vêtements
- Plumes
- Ouate de cellulose

2. Performances thermiques

Pour rappel, la **conductivité thermique** (en W/m/K) est la grandeur physique caractérisant la capacité d'un matériau à transférer de la chaleur par conduction. **Plus la conductivité thermique est faible, plus le matériau est un bon isolant thermique.** Nous avons choisi d'ores et déjà décidé de **mettre de côté les métaux** dans notre étude (Acier, Fer, Cuivre ...) car ce sont des très bons conducteurs : une isolation avec un métal ne serait d'aucune utilité (conductivités supérieures à 52 W/m/K, plus de 1000 fois celle de l'air).

La conductivité thermique des différents isolants que nous avons considérés nous donne le tableau suivant :

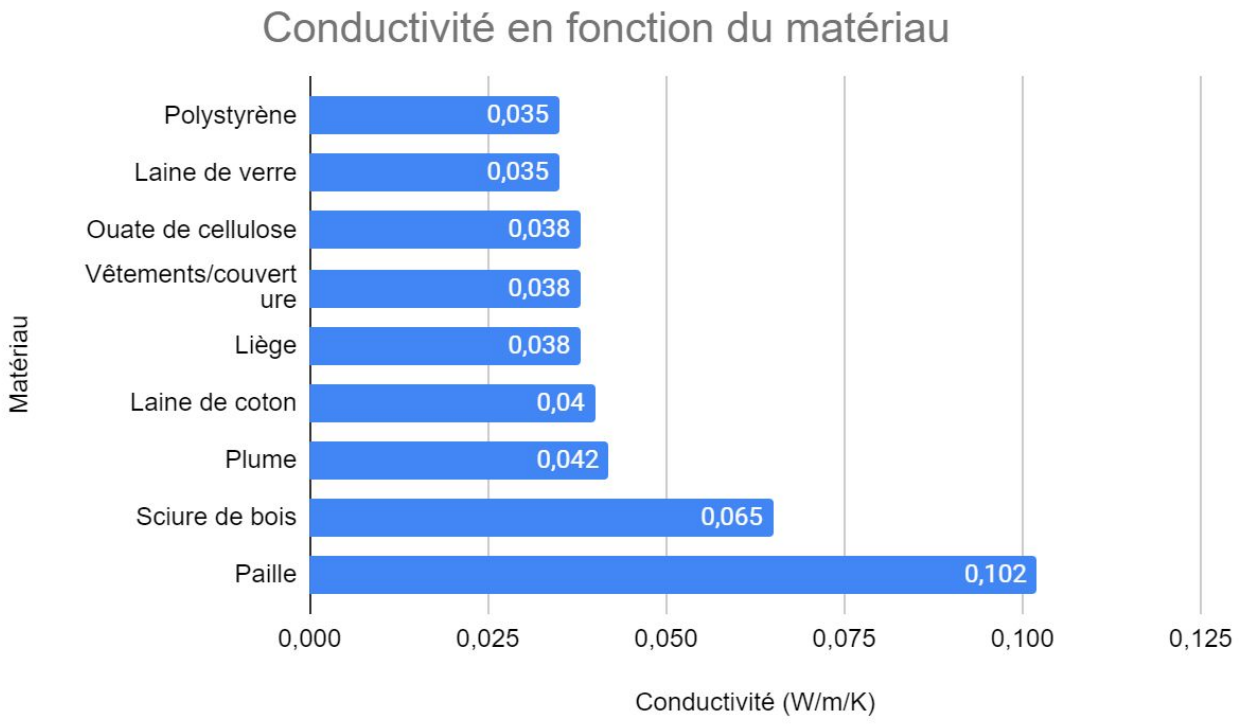


Figure 4 : Conductivité thermique de différents matériaux [3]

3. Aspect écologique et sanitaire des isolants

Il est aussi important de s'intéresser au bilan carbone de chaque isolant. Nous avons donc réalisé un graphique reliant la résistance thermique à l'impact environnemental des isolants :

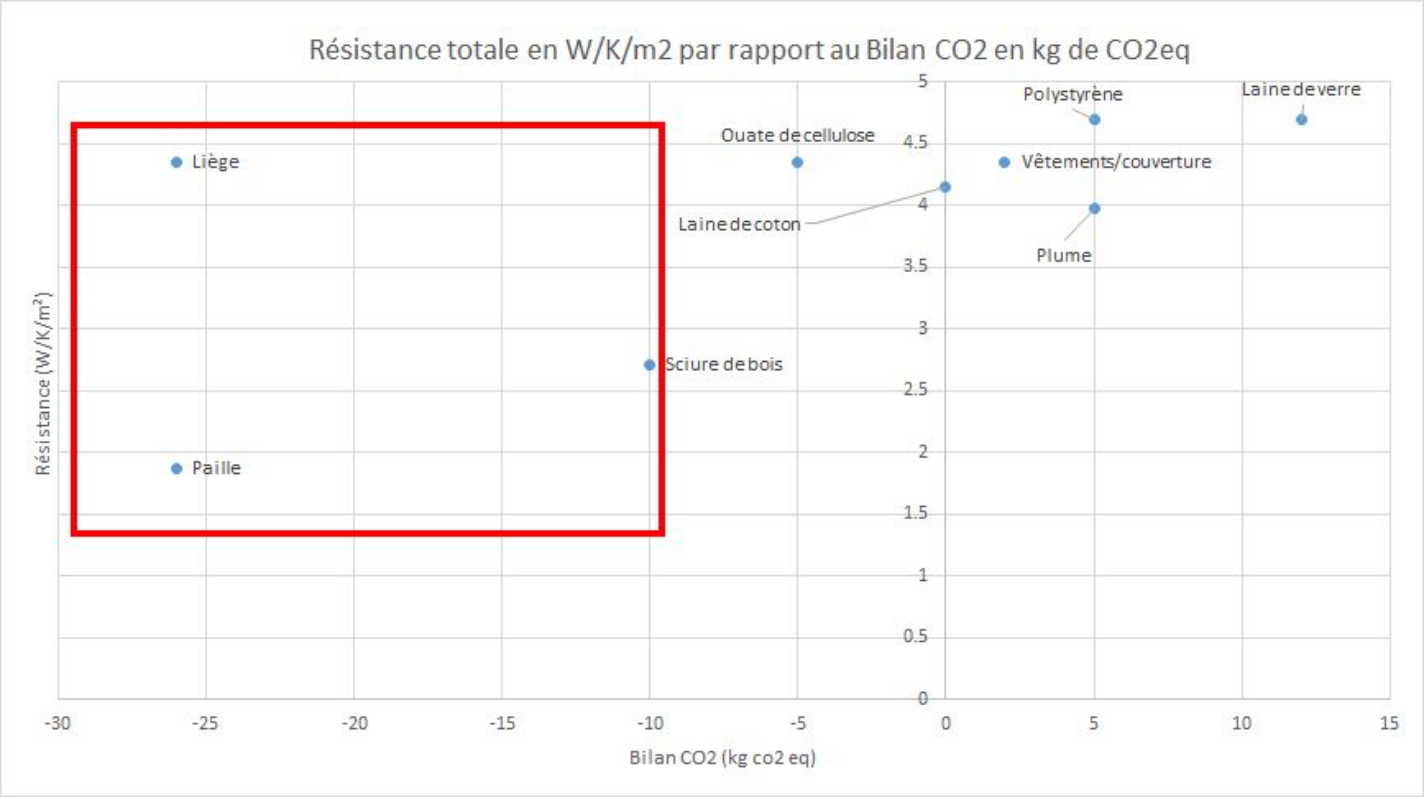


Figure 5 : Comparaison performance thermique/bilan CO_2 de différents isolants [5]

L'un des objectifs des low-tech étant de proposer des solutions ayant une empreinte carbone faible, nous avons choisi de comparer le bilan CO2 des isolants étudiés.

Nous cherchons ici à **minimiser l'impact environnemental** de l'isolant tout en ayant une bonne performance d'isolation. Ainsi, les matériaux les plus intéressants pour notre projet seront ceux présents dans la zone encadrée sur le graphique. D'après nos recherches, l'isolant proposant le meilleur compromis performance/bilan CO2 est le **liège**.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'aspect sanitaire des isolants. En effet, l'objectif étant de les placer dans la marmite norvégienne, utilisée pour la cuisson d'aliments, il est important de se renseigner sur les éventuels dangers que représente chaque isolant pour la santé.

Isolant	Risque
Polystyrène	Dégradation et danger à partir de 250°C
Ouate de cellulose	Peut contenir du sel de bore toxique
Laine de verre	Danger micro particules de verre à respirer

Tableau 2 : Risques sanitaires de différents isolants. [4]

On en déduit qu'il est préférable de ne pas utiliser de la laine de verre ou de la ouate de cellulose même si ce sont de bons isolants thermique. Il est préférable d'utiliser du **liège**, de la **paille**, de la **sciure de bois** ou des **plumes** si elles proviennent de récupération.

Pour notre projet, qui s'inscrit dans une démarche low-tech et très étroitement liée à la **protection de l'environnement**, le choix de l'isolant ne doit pas se faire uniquement en fonction des performances techniques de chaque isolant. L'impact environnemental lié à sa fabrication, son utilisation ou son recyclage est un aspect primordial. Il est alors incohérent de construire une MN en utilisant du **polystyrène** par exemple, et ce, malgré sa faible conductivité thermique.

Ainsi, **le liège, la paille, les plumes ou la sciure de bois** sont les isolants les plus adéquats. N'oublions pas que le but final de la MN n'est pas d'économiser de l'énergie uniquement lors de la cuisson mais dans **l'ensemble de la démarche**.

Outre l'aspect environnemental et sanitaire, il est important de s'intéresser à l'**accessibilité financière des isolants**. Les low-tech ayant pour but d'être accessibles à tous, nous devons prendre en compte cette variable. Les isolants ci-dessus provenant principalement de la récupération, ils sont adaptés à nos objectifs. Le liège peut être récupéré dans les bouchons de bouteilles de vin, la paille est aujourd'hui presque considérée comme un déchet, les plumes peuvent provenir de vieux coussins ou canapés (c'est notre cas), et la sciure de bois peut-être récupérée en scierie.

III. Plan

1. Dimensions de la marmite norvégienne

Pour faire le choix de la structure de la MN que nous allions réaliser, nous nous sommes d'abord demandés de quelle manière la MN devait être dessinée afin de **satisfaire aux besoins et contraintes de l'utilisateur**: la MN se situant dans la cuisine, il ne fallait pas qu'elle prenne trop de place pour ne pas gêner l'utilisateur. De ce fait, nous avons décidé de fabriquer une MN pouvant s'intégrer à **l'intérieur d'un placard de cuisine.**

Nous sommes donc allés dans un magasin de vente de mobilier de cuisine pour mesurer les dimensions de différents placards. Après avoir trouvé plusieurs dimensions (les placards n'étant jamais identiques), nous avons décidé de faire une moyenne de la hauteur, de la largeur et de la longueur de nos placards pour obtenir une **dimension moyenne de notre MN**.

Dimensions du placard	Profondeur	Largeur	Hauteur
Moyenne des dimensions (en cm)	47,5	55	33,25

Tableau 3 : dimensions moyennes des placards

2. Optimisation des performances

Par la suite, notre but était de **maximiser les performances de la MN**. Pour cela, nous avons opté pour une MN à double caisson, entre lesquels se situerait l'isolant. Pour les dimensions du caisson intérieur, nous avons mesuré les dimensions d'une casserole permettant de faire la cuisine pour 5 personnes. Comme nous voulions nous situer dans "le pire des cas", nous avons pris une casserole à queue, pour que notre **MN puisse s'adapter à la plupart des plats**. Ainsi, nous avons pu dimensionner notre caisson intérieur afin qu'il puisse accueillir la casserole, et qu'il soit le plus petit possible pour **maximiser l'espace entre les deux caissons, permettant d'accueillir l'isolant**.

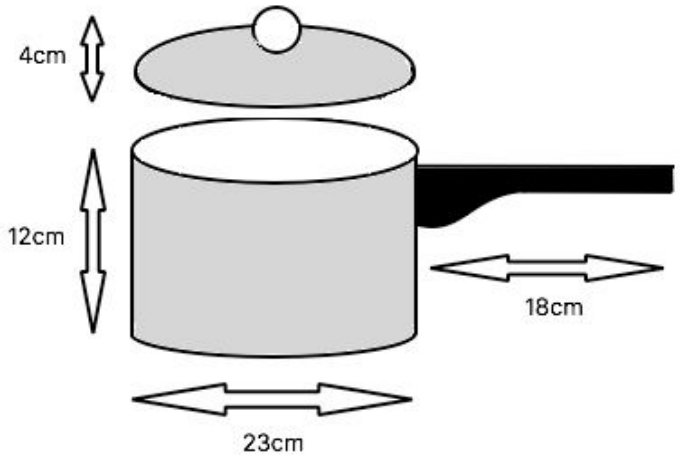


Figure 6 : Dimension de notre casserole

Afin que les deux caissons ne soient pas en contact (et éviter les ponts thermiques de conduction), et que l'isolant ne puisse être écrasé ou altéré, nous avons également décidé de mettre en place un support "de type pieds" entre le caisson intérieur et extérieur.

Pour le bien de nos expérimentations, **l'isolant doit pouvoir être changé le plus facilement possible**. Pour cela, nous avons décidé de ne pas fixer le caisson intérieur à ses pieds afin de pouvoir le retirer lors du changement de l'isolant sur la partie inférieure et celles latérales du caisson intérieur.

Pour nos tests, nous voulions ouvrir le caisson intérieur tout en ouvrant le caisson extérieur, et cela sans avoir à déplacer l'isolant. Nous avons donc opté pour **un couvercle creux commun aux deux caissons**, comportant l'isolant supérieur.

Enfin, pour éviter un trop grand échange d'air entre l'intérieur du caisson intérieur et l'extérieur, nous avons décidé de mettre en place un **joint** sur les bords supérieurs du caisson intérieur.

Pour la partie rayonnement, le pôle thermique a choisi d'utiliser une couverture de survie afin de limiter les échanges thermiques. Nous avons donc décidé de fixer cette couverture aux parois internes du caisson intérieur, maximisant l'effet de la couverture de survie.

Finalement, voici le plan de notre MN (réalisé avec SolidWorks) :

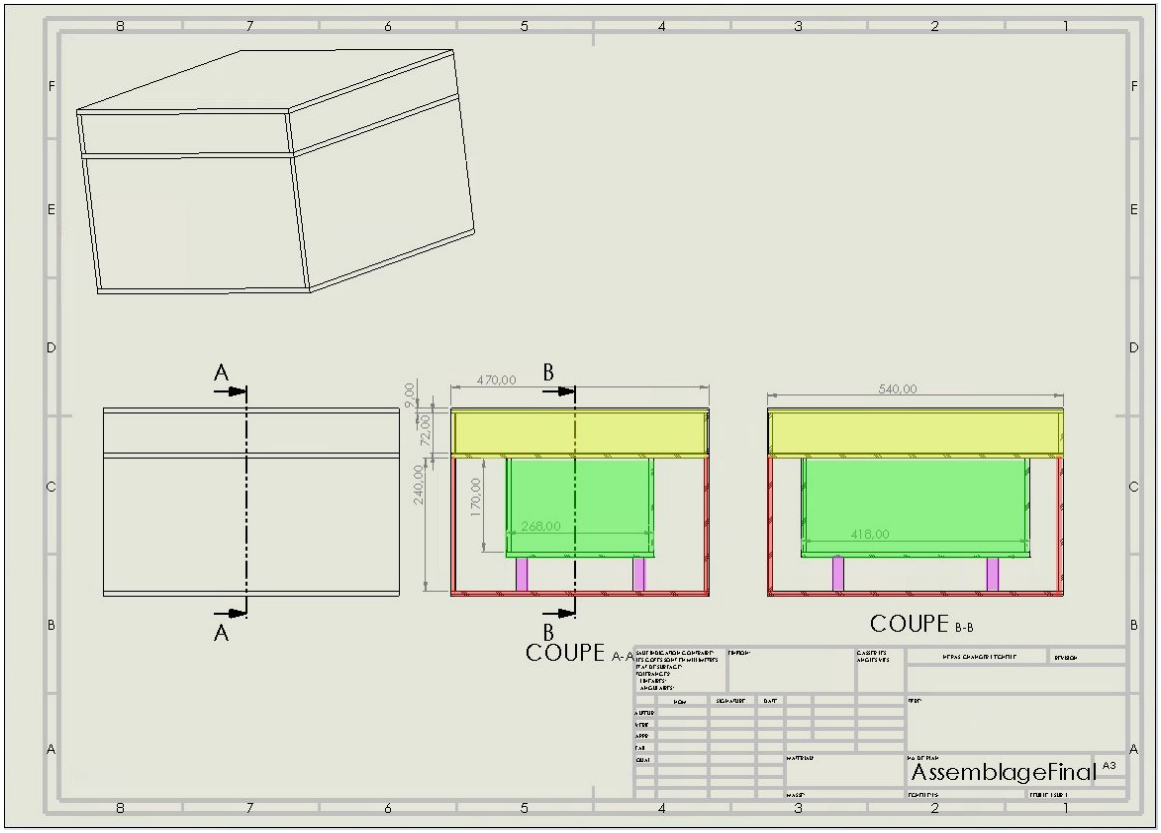


Figure 7 : Plan de notre Marmite norvégienne

Vous pouvez ainsi voir les différents éléments :

- En vert : la caisse interne
- En rouge : la caisse externe
- En jaune : le couvercle
- En violet : les pieds de la caisse interne

Le plan 3D mobile de la MN peut être téléchargé et ouvert avec Adobe Acrobat Reader : [Plan 3D de la MN] [Plans en transparence]

dimensions des caisses (en cm)	Hauteur	Profondeur	Largeur
Petite caisse	17	25	40
Grande caisse	33	47	54
Espace isolant	5	8	4
Epaisseur planche : 1.5cm			

Tableau 4 : Dimensions des caisses de la marmite norvégienne

3. Choix du matériel

Dans une démarche Low-Tech, il est important de se rapprocher au plus d'un système qui puisse être **facilement réparable**, dont les éléments sont **récupérables localement**, et ayant **l'impact environnemental le plus faible possible**. Nous avons pu obtenir la totalité des isolants à tester grâce à la récupération (cf partie isolants).

Voici la liste du matériel qui nous a été nécessaire pour réaliser la MN :

- 3 planches d'OSB (*Oriented Strand Board)* de 1200x600x9mm
  Peu chers et trouvable dans la plupart des magasins de bricolage
- 8 fermoirs à levier
  Fermeture des couvercles, assure une certaine étanchéité à l'air (évite des pertes de chaleur par convection) et une fermeture rapide.
- Une boîte de clous 35x2mm
- Un rouleau de scotch double face
  Collage de la couverture de survie sur les parois internes du petit caisson
- Des bouchons de liège (une dizaine)
  Elévation du petit caisson et de la casserole
- Une chambre à air de vélo
  Joint pour la fermeture du petit caisson

[Découpe OSB]

Problèmes sur la récupération du matériel :

Nous avons tout d'abord voulu fabriquer les caissons de notre MN à partir de matériaux de récupération. Cependant, nous avions des **exigences de précisions** pour les dimensions (pour avoir des données expérimentales exploitables), et de praticité pour changer l'isolant à chaque mesure. L'utilisation de matériaux de récupération était donc peu appropriée à nos objectifs (dimensions aléatoires des planches récupérées, etc.)

Nous avons donc décidé d'acheter notre matériel chez un fournisseur classique (Leroy Merlin). Nous avons malheureusement rencontré beaucoup de problèmes sur les stocks de matériel, et nous n'avons pas pu récupérer tous les éléments nécessaires à la construction de notre MN avant le début du confinement. De ce fait, la construction de la MN a finalement été **prise en charge par le pôle expérimentation**, qui l'a construite avec des **matériaux à disposition**.

IV. Performances de la marmite norvégienne

1. Introduction

Les résultats suivants sont un résumé de nos travaux. La totalité de notre rapport théorique et expérimental peut être trouvé en annexe :

[Rapport des mesures théoriques et numériques]
[Rapport des mesures expérimentales]

2. Etude théorique

Cette partie repose essentiellement sur la prise en compte des phénomènes thermiques associés au refroidissement de la casserole et sa mise en équation. Ce qui est intéressant avec notre problème, c'est qu'il regroupe les trois formes de transfert de chaleur : rayonnement, convection et conduction. Cependant cela le rend plus complexe à appréhender. Afin de poser des hypothèses permettant de simplifier les équations, nous avons été guidés par un professeur de thermique de l'école : Yann Bultel. Grâce à la mise en équation du problème, nous avons pu simuler sur Matlab l'évolution de grandeurs comme la température ou la puissance dissipée par notre MN. Cela nous a permis d'avoir une première évaluation des résultats attendus lors des expériences. Ceci est important car les expériences peuvent durer plusieurs heures. Leur optimisation est donc importante pour ne pas perdre de temps lors de la partie expérimentale.

L'objectif de cette analyse théorique de la Marmite Norvégienne (MN) est de comprendre les phénomènes physiques en jeux pour ensuite dimensionner au mieux la géométrie de la MN. Dans cette étude nous considérons que la casserole est placée dans une caisse en bois hermétiquement fermée, et nous étudierons l'influence de 2 paramètres : l'ajout d'une couverture de survie sur la surface interne de la caisse et l'ajout d'une épaisseur d'isolant autour de la caisse. Nous allons donc modéliser 4 cas :

- Cas 1 : casserole dans la caisse sans couverture de survie et sans isolant
- Cas 2 : casserole dans la caisse avec une couverture de survie sur la surface interne
- Cas 3 : casserole dans la caisse avec une épaisseur d'isolant
- Cas 4 : casserole dans la caisse avec une couverture de survie et avec un isolant

Le but d'une MN est d'isoler le plus possible thermiquement la casserole. Ainsi nous pouvons dès à présent dire que la configuration la plus optimale est le cas 4. Mais nous voulons savoir dans quelle mesure les deux paramètres précités influent sur les performances de la MN.

Une résolution numérique des équations régissant le comportement de la MN (équations détaillées dans l'annexe) nous donne l'évolution temporelle de toutes les températures (Casserole, Air, Caisse, Isolant). La température qui nous intéresse le plus est celle de la casserole. Mais regarder les autres températures peut être très utile pour comprendre la dynamique de la MN.

Tout d'abord regardons l'évolution temporelle de la température de la casserole :

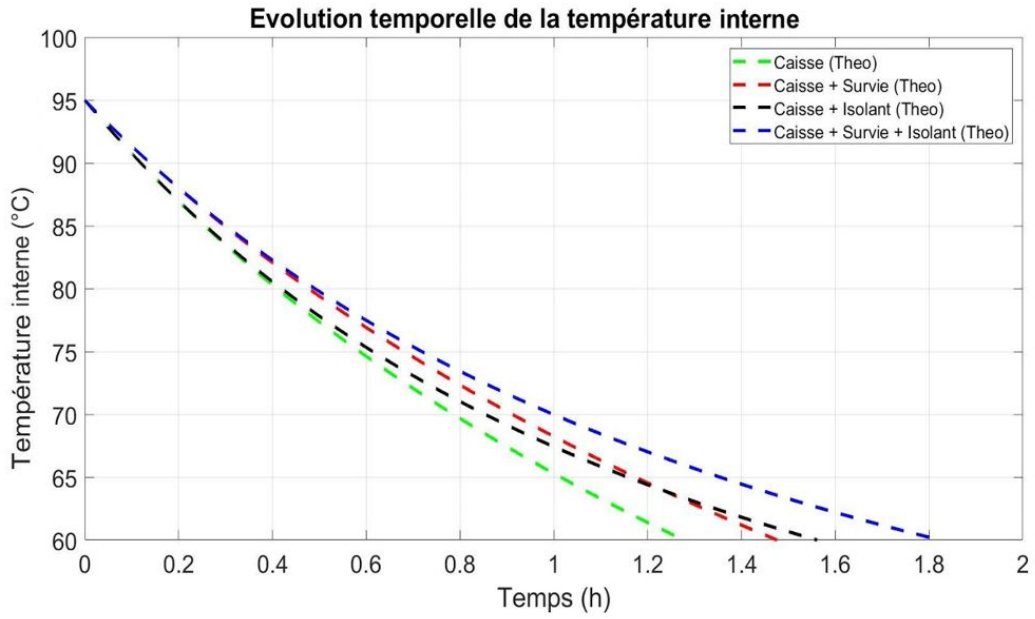


Figure 8 : Evolution temporelle de la température interne

Nous observons ici, comme nous nous y attendions, que le cas permettant la plus faible baisse de la température est le cas 4 (le pire étant le cas 1). Les deux autres cas sont des cas intermédiaires. Au début de l'expérience (entre 0 et 0.4 h), les cas 1 et 3 ainsi que les cas 2 et 4 ont une évolution similaire. Ensuite, aux environs de 1.2h et de 63°C, les cas 2 et 3 se croisent. Ainsi dans la première partie de l'expérience le cas 3 se refroidit plus vite que le 2, mais cela s'inverse aux alentours de 0.7h : le cas 2 se refroidit alors plus vite.

Pour mieux comprendre ce phénomène nous traçons l'évolution du flux sortant de la casserole en fonction de la température de celle-ci. Pour tracer cette courbe il suffit de faire la dérivée de la courbe précédente. Elle permet de bien visualiser à quelle vitesse la casserole se refroidit en fonction de sa température.

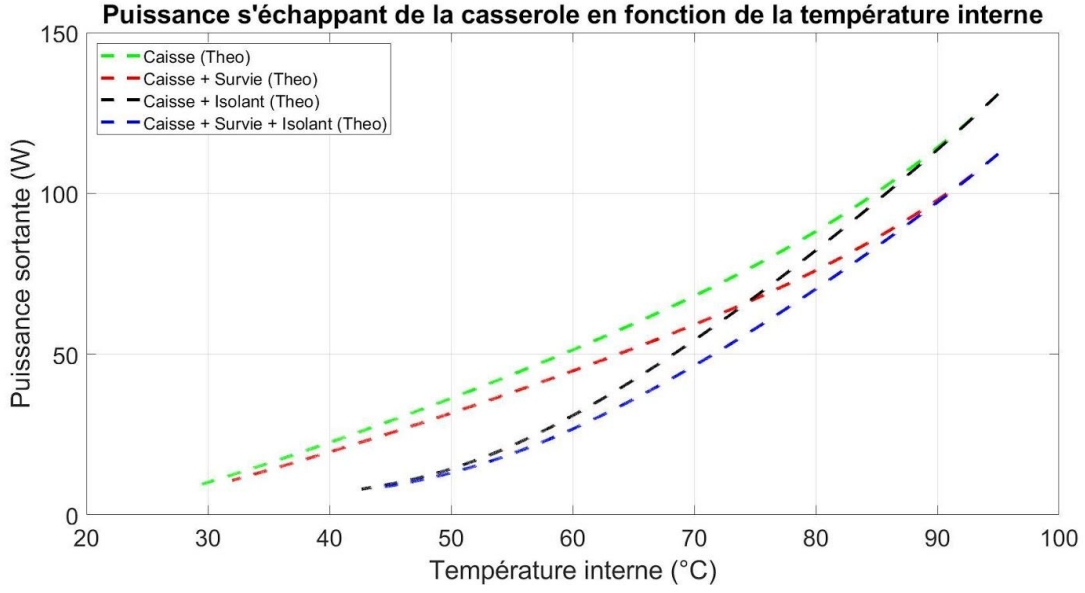


Figure 9 : Puissance s'échappant de la casserole en fonction de la température interne

Plus le flux sortant de la casserole est important, plus celle-ci se refroidit vite. Nous visualisons bien ici que le point de bascule est aux alentours de 75°C. Pour des températures supérieures le cas 2 se refroidit moins vite que le 3, et inversement pour des températures inférieures. Nous voyons que la température à laquelle s'inverse la dynamique est bien supérieure à la température à laquelle les évolutions temporelles se croisent. Cela est dû au phénomène d'inertie thermique.

A quoi est dû ce changement de dynamique ? Dans le cas 2 la couverture de survie permet de limiter les pertes de chaleur par rayonnement, alors que dans le cas 3 l'isolant permet de limiter le flux de chaleur par conduction. Or, le phénomène de radiation évolue proportionnellement à T^4 alors que la conduction proportionnellement à T. Donc pour des hautes températures il est plus intéressant de limiter le rayonnement de la casserole car il est plus important. Cette tendance s'inverse lorsque la température baisse, et il est alors plus intéressant de limiter la conduction.

Un autre phénomène est à regarder pour comprendre le gain d'efficacité en ajoutant une couche d'isolant. Traçons l'évolution temporelle de la température de la caisse.

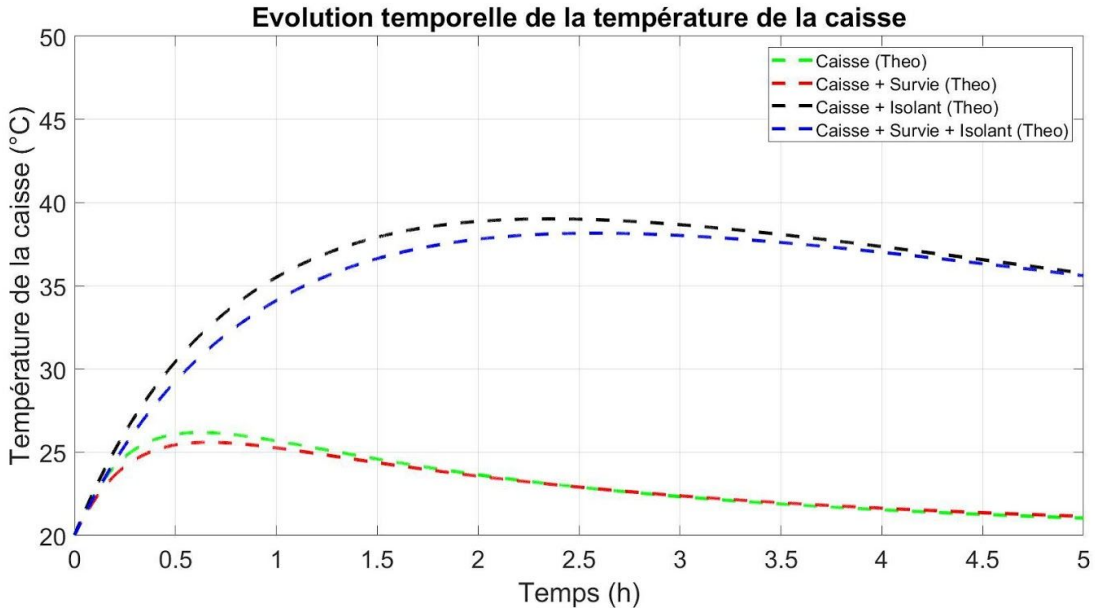


Figure 10 : Evolution temporelle de la température de la caisse

Nous voyons bien ici que dans les cas où nous avons une couche d'isolant, la température de la caisse est bien plus importante que dans les deux autres cas. Du point de vu de la caisse, sa température se stabilise lorsque le flux de chaleur qu'elle reçoit de la casserole est égal au flux qu'elle cède à l'air extérieur ou à l'isolant. Dans le cas où nous avons de l'isolant, le flux cédé un plus faible (c'est but de l'isolant), donc sa température augmente. Mais si sa température augmente le flux qu'elle reçoit de la casserole diminue, en effet la différence de température entre la casserole et la caisse diminue. Ainsi la température de la caisse augmente jusqu'à atteindre un équilibre entre le flux qu'elle reçoit et le flux qu'elle cède.

Maintenant, comparons les résultats théoriques avec les résultats expérimentaux (la présentation de l'ensemble des résultats expérimentaux est faite dans la partie suivante). Traçons le flux sortant de la casserole en fonction de la température de celle-ci pour les 4 cas en théorie et en pratique.

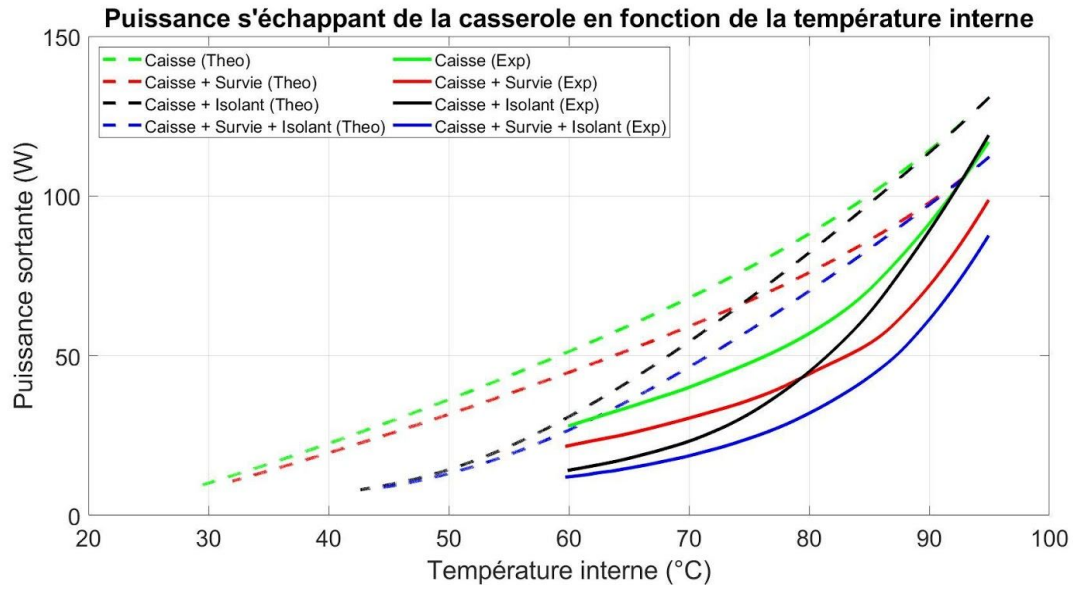


Figure 11 : Puissance s'échappant de la casserole en fonction de la température interne

Nous observons un grand écart global sur les valeurs de flux sortant. Néanmoins l'ordre de grandeur des flux reste le bon (quelques dizaines de Watts à une centaine de Watts). Notons en revanche que le schéma des courbes est le même entre les données théoriques et expérimentales, un croisement entre le cas 2 et le cas 3 entre 70°C et 80°C. Les écarts de valeurs ne permettent donc pas d'utiliser ce modèle pour estimer finement les temps caractéristiques de chaque cas :

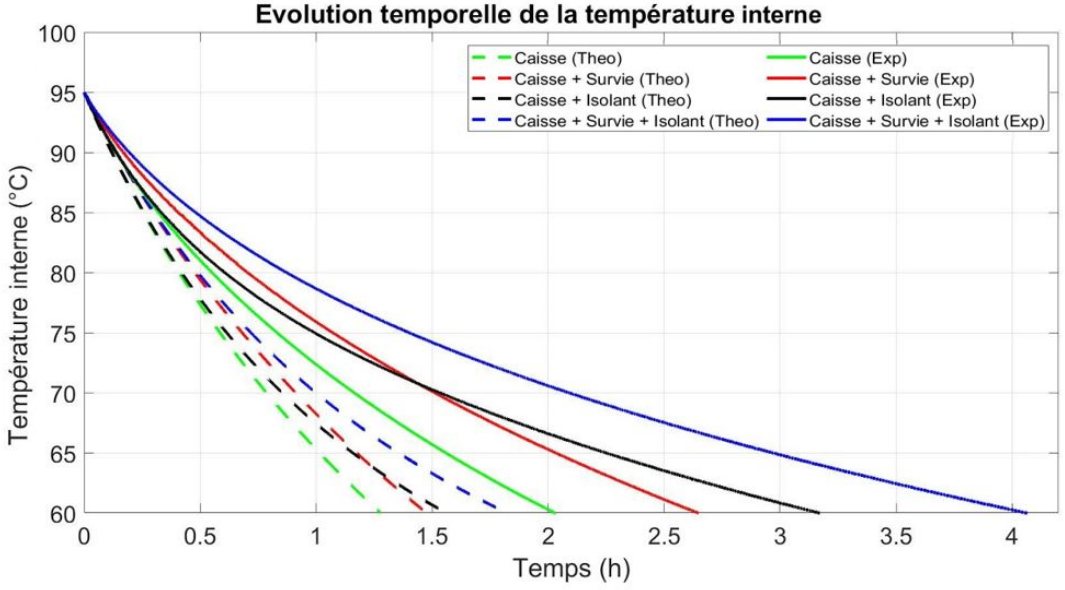


Figure 12 : Evolution temporelle de la température de la casserole

Nous voyons sur cette courbe qui compare les évolutions temporelles en théorique et en pratique que si nous regardons le temps que met la casserole pour refroidir jusqu'à 60°C il y a un écart de l'ordre d'un facteur 2.

En revanche l'approche théorique nous permet bien de comprendre l'influence de chaque paramètre de la MN sur le refroidissement de la casserole.

3. Etude expérimentale

Les mesures expérimentales ont pour objectif d'identifier les parties de la marmite qui permettent des gains de performance, de les quantifier, pour classer par ordre d'importance les différents moyens d'isolation thermique.

Voici la liste des moyens d'isolation qui ont été testés :

- Un surélèvement de la casserole grâce à des bouchons de liège coupés en deux dans le sens de la longueur (au nombre de 3), permettant de limiter la conduction par le fond de la casserole en plaçant une lame d'aire en dessous de celle-ci. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***bouchon.***
- Placer la casserole dans une caisse en bois, permettant d'emprisonner l'air autour de la casserole et donc de réduire les pertes thermiques par convection. L'épaisseur des planches de bois (environ 1 cm) permet de négliger leur résistance thermique et donc l'isolation supplémentaire qu'elles apportent. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***caisse.***
- Coller une couverture de survie sur la surface interne de la caisse en bois (partie réfléchissante face à la casserole), cela a pour but de réduire les pertes de chaleur induites par la radiation thermique de la casserole. Sans la couverture de survie le rayonnement thermique de la casserole est presque totalement absorbé par les surfaces en bois, la couverture permet de réfléchir ce rayonnement vers la casserole. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***survie.***
- Entourer la caisse en bois d'une couche d'isolant (matériau ayant une conductivité thermique faible, les matériaux à disposition sont de la paille et des vieux vêtements). Cette couche permet de réduire la conduction de la chaleur en ajoutant une épaisseur de matériau peu conducteur thermiquement. Nous utiliserons comme isolant du polystyrène (nous le déconseillons pour une construction de MN en raison de son impact environnemental) d'une épaisseur de 5cm que nous placerons autour de toute la caisse en bois. Nous appellerons ce mode d'isolation : ***isolant***.
- Nous avons fait des tests sur une glacière, qui correspond à une isolation grâce à une couche d'isolant. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***glacière.***

<u>Protocole de mesure</u> :

- Verser 2,5 L d'eau dans une casserole à l'aide d'un verre doseur.
- Mettre la casserole sur le feu, porter l'eau à ébullition.
- Placer la casserole à l'intérieur de la marmite norvégienne (ou équivalent).
- Faire tremper la sonde de température dans l'eau à l'intérieur de la casserole.
- Refermer le couvercle de la casserole et de la MN.
- Lancer l'acquisition des données de température. (L'expérience est arrêtée quand l'eau atteint 60°C)

Après réalisation des mesures suivant le protocole ci dessus nous obtenons les courbes suivantes :

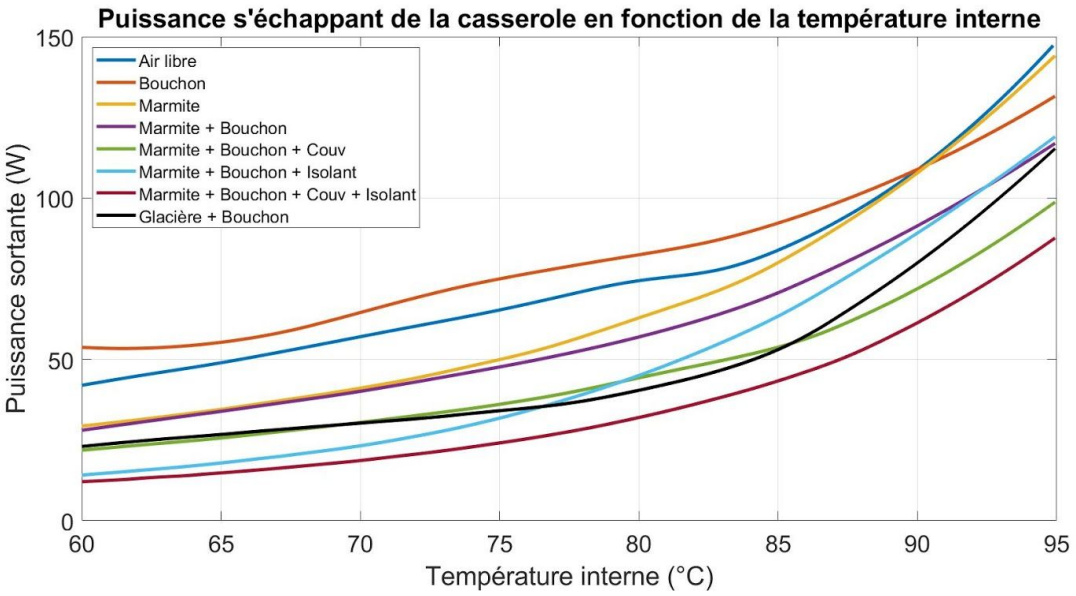


Figure 13 : Flux sortant de la casserole en fonction de la température interne

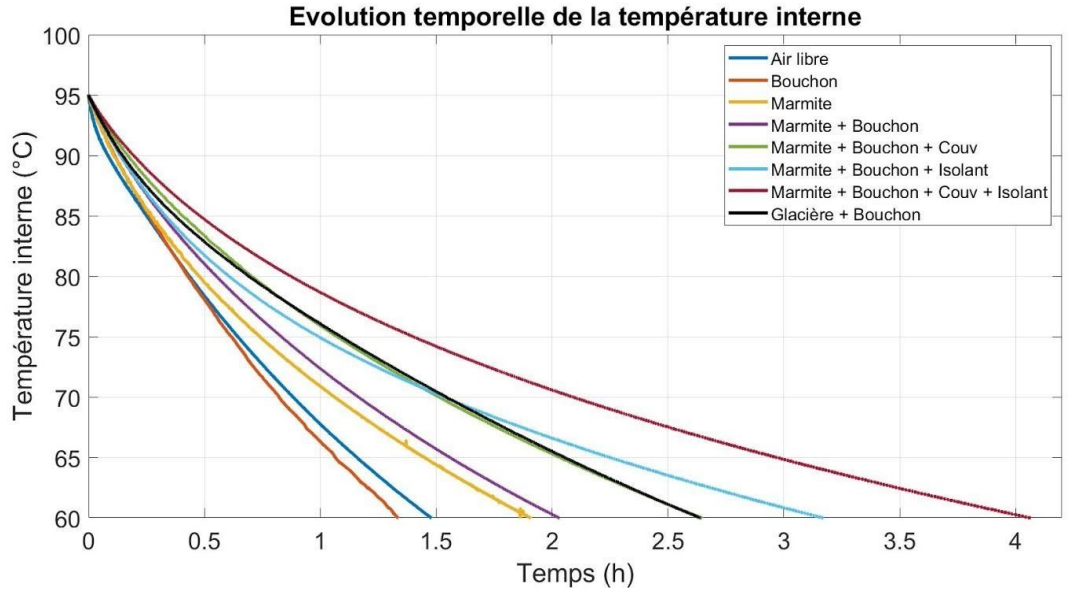


Figure 14 : Evolution de la température interne

Conclusions:

La MN la plus performante, peu importe le temps de cuisson est obtenue en équipant sa MN d'une couverture de survie, de plots pour surélever la casserole (=bouchons), et d'un isolant extérieur. Dans ces conditions il est alors possible de réaliser des cuissons de durées proches de 4h. En effet, la température au bout de 4h est toujours de 60°C. Les pertes thermiques vers l'extérieur sont les moins importantes, c'est également dans ce cas que les cuissons rapides sont les plus efficaces.

Pour des cuissons comprises entre 1h30min et 3h nous pouvons nous contenter d'une MN avec un isolant extérieur, et sans couverture de survie. En effet à partir d'1h30min, la caisse avec isolant devient plus efficace que la caisse avec couverture de survie.

Pour des cuissons inférieures à 1h30min, nos expériences nous ont permis de conclure que nous pouvons faire le choix de garder uniquement une couverture de survie dans la MN, sans isolation extérieure. Ce qui est à peu près équivalent à utiliser une glacière avec des plots à l'intérieur pour surélever la casserole quand on la pose. Ainsi si l'on possède déjà une glacière et qu'on ne souhaite pas se lancer dans la construction d'une MN, il suffit de l'utiliser comme telle pour réaliser des gains d'énergie. Cependant, nous n'invitons pas à acheter une glacière uniquement pour en faire une MN, il reste préférable de fabriquer soi-même sa caisse en bois et d'y placer une couverture de survie. En effet la fabrication industrielle de glacière en plastique engendre des émissions carbones et l'utilisation de pétrole dont on peut se passer en construisant soi-même sa MN avec des matériaux de récupération.

Pour plus d'informations sur la démarche scientifique et les résultats complets des expériences, une annexe sur les mesures expérimentales est consultable à la fin de ce document.

Partie 2 : Etude managériale

I. Objectifs

Les objectifs premiers de ce projet consistent en la rédaction d'un tutoriel de construction d'une MN et d'une annexe détaillé pour quiconque souhaite une étude approfondie de cette low-tech.

Un troisième objectif majeur, à plus long terme, est de faire connaître les Low-Techs au grand public. De ce fait, notre porteur de projet organise un webinaire en Juin sur le thème des low-techs, où nous présenterons notre projet à un auditoire très varié, composé de personnes ayant des approches très différentes des low-techs (journalistes, professeurs d'université, étudiants, etc.) En plus de cela, notre tutoriel et notre annexe seront mise en ligne en open-source sur un forum dédié des low-tech.

Nous devons donc explorer ce projet sous plusieurs aspects: scientifique d'abord, en produisant un annexe rigoureuse présentant les études théoriques, les expériences, les résultats, et les conclusions; social ensuite, car le contenu de notre annexe doit pouvoir être compris par un lecteur n'ayant pas ou peu de connaissances scientifiques.

II. Organisation et communication

1. L'équipe

Notre équipe est composée de 8 membres venant de 3 filières différentes :

Filière HOE : Jean Adam, Célia Puybras
Filière ME : Erwann Tatard
Filière SEM : Louis Chateau, Axel Di Campo, Hugo Jonvel, Marin Lecocq, Alexandre Lefevre

La diversité de notre équipe nous permet d'aborder les différents aspects du projet de manière plus aisée et rigoureuse. Nous nous sommes donc répartis en plusieurs pôles en fonction des spécialités et goûts de chacun :

Le pôle bibliographie : son but est de rassembler le plus d'informations possibles sur la MN, de les organiser et de les référencer : son origine historique, ses différentes géométries, les calculs théoriques des performances.
Membres : Jean Adam, Marin Lecocq

Le pôle finance : il s'occupe de la réalisation des bons de commande pour les divers matériaux et équipements nécessaires à la réalisation du projet. Il réalise aussi les potentiels ordres de mission.
Membre : Axel Di Campo

Pôle plans : le but de ce pôle est de réaliser les plans de la MN utilisée pour réaliser les expériences. Ils s'appuient notamment sur la bibliographie qui aura listé les différentes technologies.
Membres : Axel Di Campo, Louis Chateau

Pôle isolants : ils ont comme objectif de faire la liste des isolants possibles pour l'isolation de la MN. Les critères de performance, de respect de l'environnement, d'accessibilité du matériau en récupération, d'émission de CO2... sont pris en compte dans le choix des isolants sélectionnés.
Membres : Célia Puybras, Alexandre Lefevre

Pôle modélisation/mesures : le but de ce pôle est de déterminer si une modélisation numérique à partir d'une étude théorique de la marmite est nécessaire et, si oui, la réaliser. Réaliser le protocole de mesure des tests de performance de la MN construite dans le but de comparer différentes géométries et isolants.
Membres : Erwann Tatard, Hugo Jonvel

Le responsable du projet: Louis Chateau, dirige l'équipe, veille à répartir les tâches, fixe des deadlines et communique avec les encadrants responsables du projet : Martial Balland et Kevin Loesle.

Le correspondant technique, Jean Adam, sensibilisé aux low-techs avant le projet, facilite la coordination avec le Low-Tech Lab Grenoble.

La secrétaire, en charge des rapports de réunion ainsi que de la mise en place des étapes du projet (production d'un diagramme GANTT par exemple): Célia Puybras.

2. Communication et ressources

Les réunions sont tenues une fois par semaine en présence de l'encadrant responsable du projet. Elles débutent par un retour de tous les pôles sur leurs objectifs de la semaine. Nous vérifions s'ils ont été atteints, et si ce n'est pas le cas, nous essayons de comprendre pourquoi et mettons en place des mesures pour remédier au problème.

Les objectifs atteints décrits précédemment et les éventuelles mesures prises sont reportés dans le rapport hebdomadaire. Le compte rendu général est mis à jour de manière continu par les différents membres des pôles. Un pôle peut être dissous si sa tâche est terminée (ex: pôle bibliographie); ses membres se répartissent ensuite dans d'autres pôles, ou de nouvelles tâches leurs sont affectées.

Dès le début du projet, un Drive a été créé et rendu accessible à tous les membres du projet, ainsi qu'aux encadrants responsables. Nous avons toujours travaillé directement sur ce Drive, ce qui nous a permis de faire des modifications accessibles en temps réel, même si nous n'étions pas ensemble physiquement. Sa bonne organisation et la répartition claire des dossiers nous ont permis de continuer notre travail de rédaction sans accroc majeur à l'annonce du confinement.

III. Planning

Phase 1 : Avant construction

Lors des premières séances nous avons principalement récupéré des informations sur la MN, afin de constituer la bibliographie, de bien s'approprier la technologie, et de saisir les enjeux du projet. Nous avons ensuite distribué des rôles pour chacun d'entre nous afin d'être le plus efficace sur chaque domaine, c'est ce qui constitue les pôles décrits précédemment.

Nous avons passé les commandes de matériel pour les pôles isolant et capteurs par le biais du responsable financier. Nous avons rencontré quelques difficultés pour la commande des matériaux et des capteurs. Pour la commande des matériaux, nous avons dû nous y reprendre à trois fois avant d'avoir la commande finale, ce à cause des stocks indisponibles chez Leroy Merlin, ne ne pouvions pas retirer une commande incomplète afin de respecter le protocole d'achat pour les projets d'ingénierie. Au moment où la commande finale était correcte, le confinement a commencé et nous n'avons donc jamais pu récupérer les matériaux que nous avions commandés pour construire notre MN.

Concernant les capteurs, nous avons dû faire deux commandes espacées, car nous avions eu des difficultés à anticiper la totalité des composants nécessaires aux mesures à effectuer pour les expériences. Comme nous avions fait la première commande assez tôt, nous avons pu recevoir la deuxième avant le confinement et donc réaliser les mesures.

Phase 2 : Construction

En raison des mesures de confinement, la construction de la MN n'a pas pu être réalisée comme nous le voulions. Elle a été faite entièrement en matériaux de récupération et suivant un plan différent que celui auquel nous avions pensé. Nous avons quand même pu construire une MN avec une caisse intérieure, une couverture de survie, et de l'isolant extérieur (mais seulement du polystyrène). Il manque donc la caisse extérieure et les différents isolants, mais la capacité d'isolation du polystyrène est comparables aux matériaux que nous avions prévus de tester.

Phase 3 : Tests / essais

Comme la phase de construction, la phase de tests a été faite en période de confinement. Nous n'avons pas pu récupérer et utiliser les isolants comme nous l'avions planifié. En revanche, les test effectués se sont révélés concluant et exploitables: nous avons pu mettre en évidence l'effet des différents éléments de la MN en obtenant des résultats variés.

Phase 4 : Rédaction de l'annexe

La rédaction de l'annexe scientifique participe à rendre notre projet social, et ainsi à sensibiliser la population aux low-techs. Elle sera composée des plans détaillés de notre MN, des chiffres clés permettant de se représenter les économies énergétiques et financières réalisées, et d'un tutoriel de montage. En parallèle de ce contenu grand public, nous prendrons soin d'apporter une grande rigueur scientifique afin d'apporter une preuve plus poussée de l'intérêt d'un tel système autant dans son utilisation que dans son apport pédagogique.

Un diagramme de GANTT a été réalisé afin de prévoir au mieux les séances et d'évaluer l'impact des éventuels risques (voir figure 15).

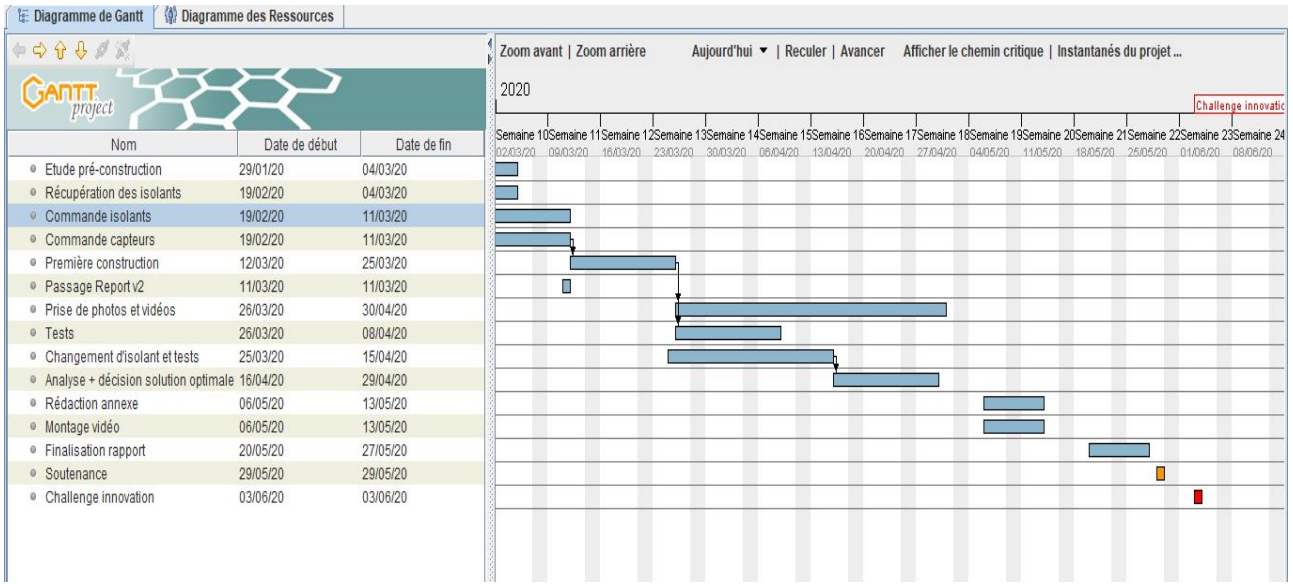


Figure 15 : Diagramme de Gantt avant l'épidémie Covid-19

IV. Problèmes rencontrés

1. Risques et dépendances

- ➢ Risques majeurs du projet : mesures des expériences non exploitables; impossibilité de modéliser correctement les phénomènes physiques.
- ➢ Actions pour réduire les risques :
  - Mesures : reproduire les expériences de la manière la plus identique possible
  - Modélisation : demander l'aide d'un professeur de thermique
- ➢ Dépendances du projet :
  - Capteurs thermiques pour réaliser les mesures
  - Disponibilité du matériel nécessaire à la réalisation de la MN
  - Possibilité d'utiliser les matériaux dans le FabLab
- ➢ Actions pour sécuriser nos propres livrables :
  - S'assurer que chaque pôle remplie bien sa tâche, que le livrable est rédigé au fur et à mesure du projet et non pas uniquement à la fin

2. Crise sanitaire

La crise du Covid 19 et la situation de confinement que nous avons vécu à partir du 17 mars 2020 nous ont obligé à nous réorganiser. Les objectifs ont dû être revus à la baisse par rapport à ceux que nous nous étions fixés. En effet, il n'était plus possible de construire la MN en suivant les plans initiaux et de récupérer et tester autant de matériaux que prévu. Il a donc fallu nous adapter à cette situation particulière mais nous avons tout de même pu proposer un rendu cohérent avec les objectifs initiaux.

Avant le confinement, nous avions reçu le matériel nécessaire pour effectuer nos mesures mais pas celui permettant de construire la MN.

A partir du 17 mars, Hugo Jonvel et Alexandre Lefèvre qui ont été confinés ensemble, ont eu la possibilité de construire une MN “avec les moyens du bord” et ont pu réaliser des expériences dans de bonnes conditions. Le reste du groupe a continué à travailler sur la rédaction du rapport.

Après une petite période d’adaptation au début du confinement, nous nous sommes concentrés sur la rédaction du rapport et avons suivi en parallèle l’avancée des expériences et manipulations. La liste des isolants testés a été réduite: seuls les bouchons de liège, la couverture de survie et le polystyrène (malgré son mauvais impact environnemental) ont pu être utilisés.

Nous avons donc adapté notre diagramme de Gantt aux conditions du confinement:

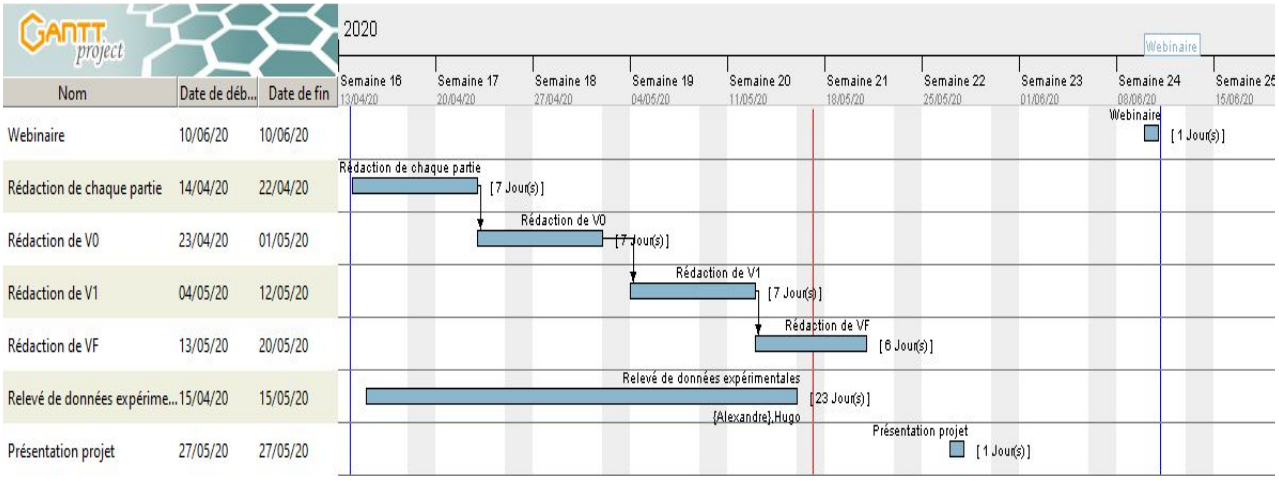


Figure 16 : Diagramme de Gantt après l’épidémie de Covid-19

Annexe

Annexe 1: puissance thermique échangée par rayonnement [1] [Retour lecture]

$$\Phi ech - ray = S1\sigma(T14 - T24)$$

Φech-ray [W]: puissance échangée entre la surface 1 (S1[m2]) et la surface 2 (S2[m2])
σ: constante de Stephan (5,67.10-8 [W.m-2.K-4])
T1 et T2 [K ou °C]: température de S1 et de S2

En considérant que la MN est S1 et les murs de la pièce S2 (S1 complètement entourée par S2), on conclut que S1 doit être la plus faible possible pour limiter la puissance échangée S2. Pour un volume donné, c'est la sphère qui offre la plus petite surface.

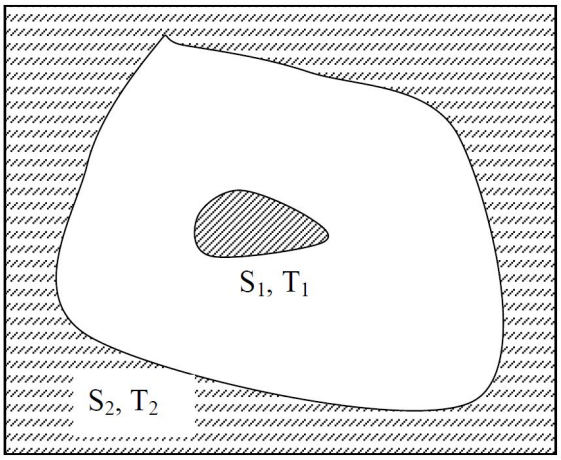


Schéma simplifié représentant S2 complètement entouré par S1

Annexe 2: puissance thermique échangée par convection [2] [Retour lecture]

$$\Phi ech - conv = Sh(Tp - Tf)$$

Φech-conv [W]: puissance échangée entre la paroi de surface S[m2] et le milieu
h [W.m-2.K-1]: coefficient de transfert thermique
Tp et Tf [K ou °C]: respectivement, température de la paroi et de du milieu

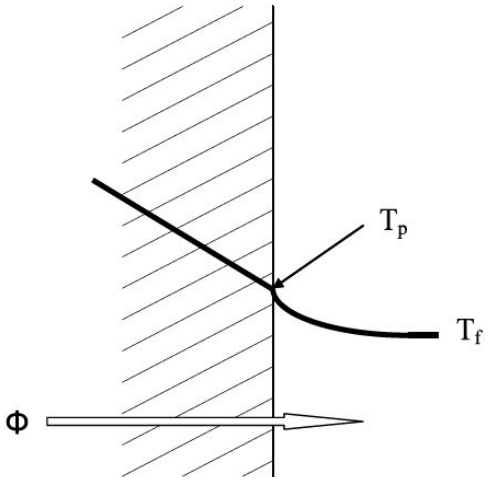


Schéma simplifié du flux thermique convectif entre une paroi (partie hachurée) et son milieu

Marmites norvégiennes panier/carton [Retour Lecture]

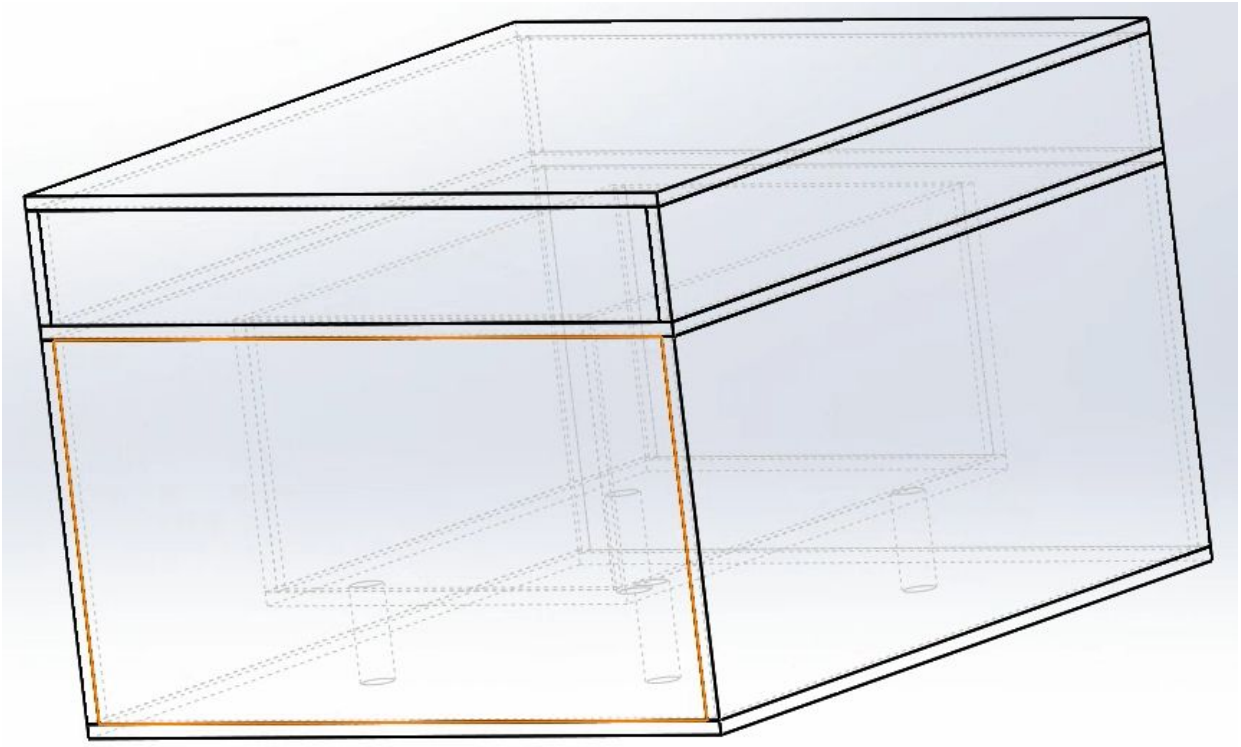
Marmites norvégiennes wonderbag [Retour Lecture]

Marmite norvégienne cozy pot [Retour Lecture]

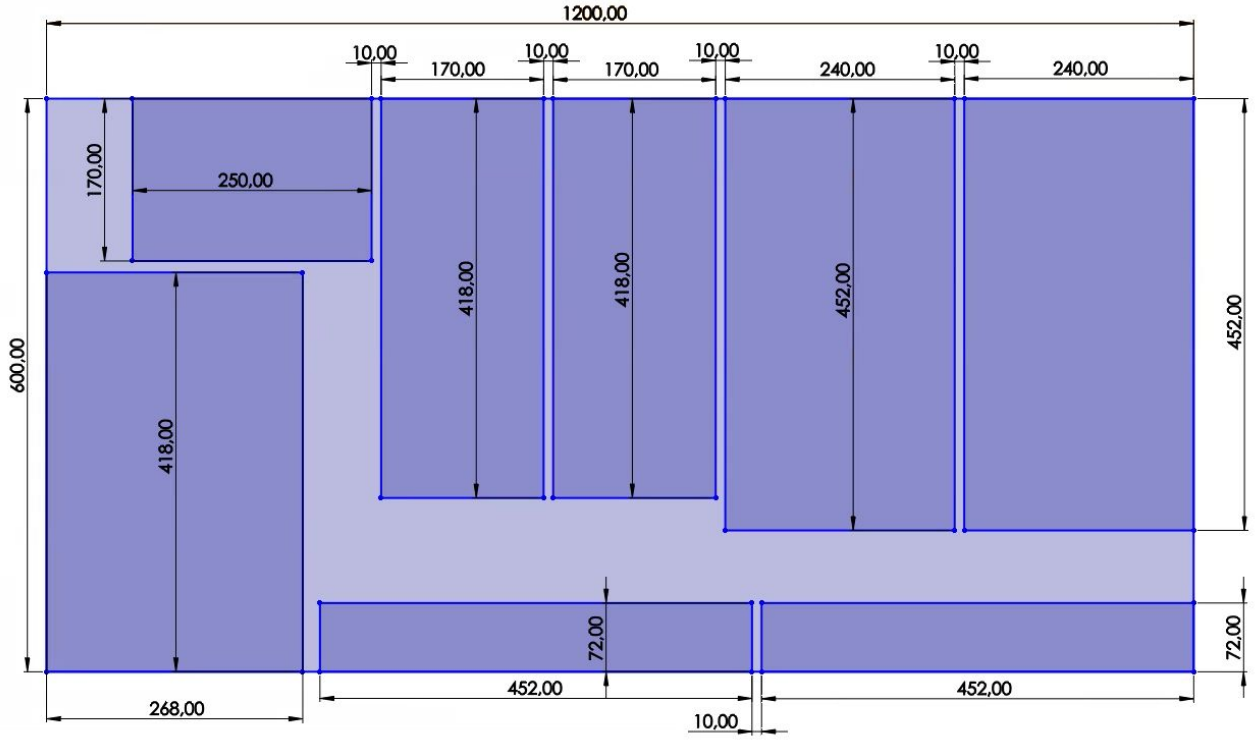
Liste exhaustive des isolants : [Retour Lecture]

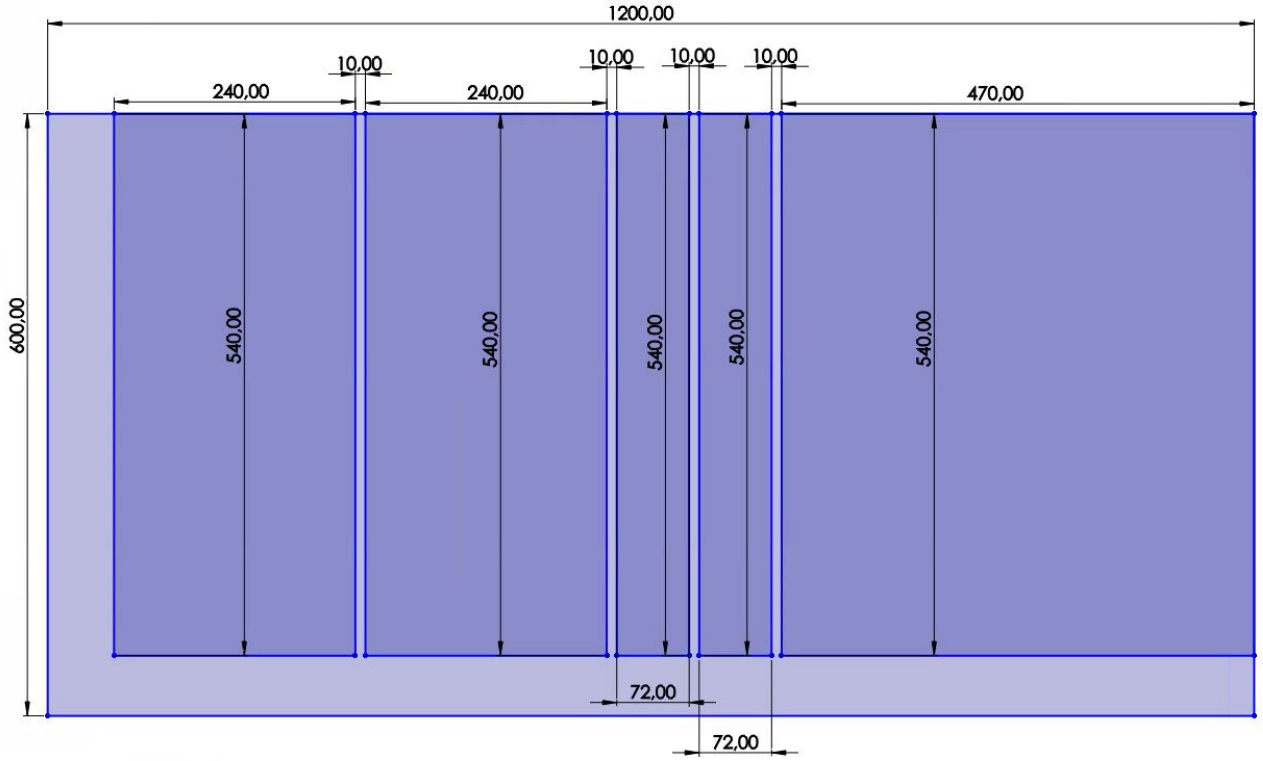
Isolant	Conductivité thermique (W/m.K)	Moyen de récupération	Prix	Bilan CO2 (kg CO2 eq/UF)
Polystyrène	0.035	Marché (caisse poisson)	-	très faible
Paille	0.102	ferme	0 €	-26
Ouate de cellulose	0.038	chantier	0.58 €/kg	-5
Laine de verre	0.035	chantier	0 €	12
Air	0.025	-	-	-
Vêtements / couvertures	0.039	magasins de vêtements / invendus	-	2
Papier / Journaux	0.05	Ecole	0 €	
Sciure de bois	0.065	scierie	0 €	
Laine de coton	0.040			
Plume (canard)	0.042	récupération	0 €	5
Liège (expansé)	0.038	cave à vin	0 €	-26
Carton	0.048	Marché	0 €	

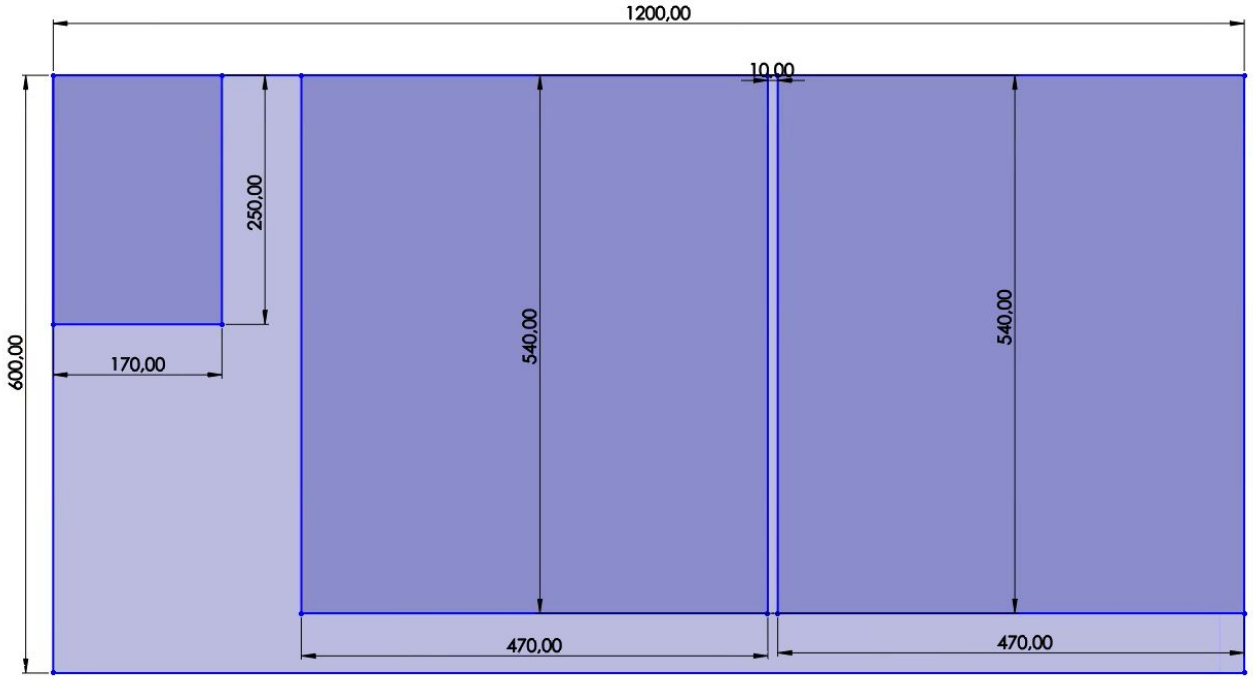
Plan de la MN fermée en transparence : [Retour Lecture]



Différentes découpes des planches d'OSB pour fabriquer notre MN : [Retour Lecture]




1200,00
10,00
10,00
10,00
10,00
240,00
240,00
470,00
600,00
540,00
540,00
540,00
540,00
540,00
72,00
72,00


1200,00
10,00
250,00
600,00
170,00
540,00
540,00
470,00
470,00

[Retour lecture]

Rapport de l’approche théorique et de la simulation numérique

Table des matières

Rapport de l’approche théorique et de la simulation numérique 32

I. Introduction 35

II. Phénomènes physiques 35
1. La conduction thermique 35
2. La convection thermique 36
3. Les échanges thermiques par radiation 37
4. Notion d’inertie thermique 39

III. Description des cas considérés 40
Cas 1 : Caisse 40
Cas 2 : Caisse + couverture de survie 41
Cas 3 : Caisse + couche d’isolant 41
Cas 4 : Caisse + couverture de survie + couche d’isolant 42

IV. Simulation numérique 42

V. Résultats et comparaisons avec les mesures expérimentales 43

VI. Conclusion 46

I. Introduction

L'objectif de cette analyse théorique de la Marmite Norvégienne (MN) est de comprendre les phénomènes physiques en jeux pour ensuite dimensionner au mieux la géométrie de la MN. Dans cette étude nous considérons que la casserole est placée dans une caisse en bois hermétiquement fermée, et nous étudierons l'influence de 2 paramètres : l'ajout d'une couverture de survie sur la surface interne de la caisse et l'ajout d'une épaisseur d'isolant autour de la caisse. Nous allons donc modéliser 4 cas :

- Cas 1 : casserole dans la caisse sans couverture de survie et sans isolant
- Cas 2 : casserole dans la caisse avec une couverture de survie sur la surface interne
- Cas 3 : casserole dans la caisse avec une épaisseur d'isolant
- Cas 4 : casserole dans la caisse avec une couverture de survie et avec un isolant

Le but d'une MN est d'isoler le plus possible thermiquement la casserole. Ainsi nous pouvons dès à présent dire que la configuration la plus optimale est le cas 4. Mais nous voulons savoir dans quelle mesure les deux paramètres précités influent sur les performances de la MN.

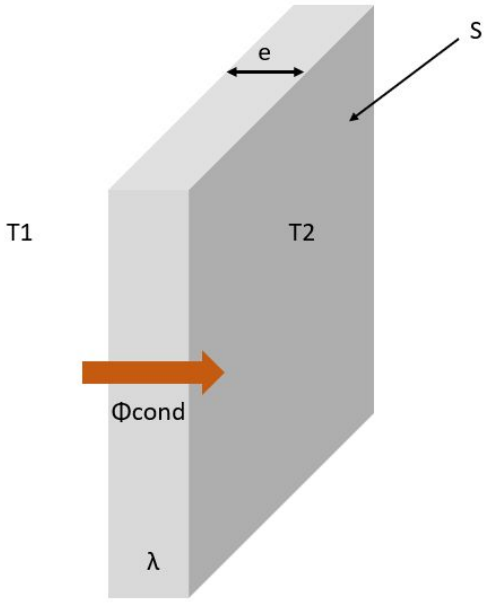
II. Phénomènes physiques

Nous souhaitons dans cette étude modéliser les phénomènes thermiques qui entrent en jeux dans le comportement de la MN. Nous allons d'abord expliciter ces phénomènes, puis les mettre en équation.

1. La conduction thermique

La conduction thermique est la transmission de proche en proche de l'agitation thermique, sans transport de matière. Elle est induite par une différence de température dans un même milieu ou entre deux milieux.

Dans notre cas nous considérons une conduction thermique unidirectionnelle, perpendiculaire aux parois de la MN.



Considérons un pavé d'épaisseur e et de surface S, d'un matériau ayant une conductivité thermique λ. La **conductivité thermique** d'un matériau quantifie sa capacité à conduire la chaleur et s'exprime en W/m/K, **plus sa valeur est élevée plus le matériau conduit la chaleur**.
Les deux surfaces du pavé ont des températures différentes, l'une à T1 et l'autre à T2.
Cette différence de température induit donc un flux de chaleur entre ces deux surfaces. Nous quantifions ce flux par l'égalité suivante :

$$cond = \frac{T_1 - T_2}{R_{cond}}$$
$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda S}$$

R_{cond} est appelé résistance de conduction.

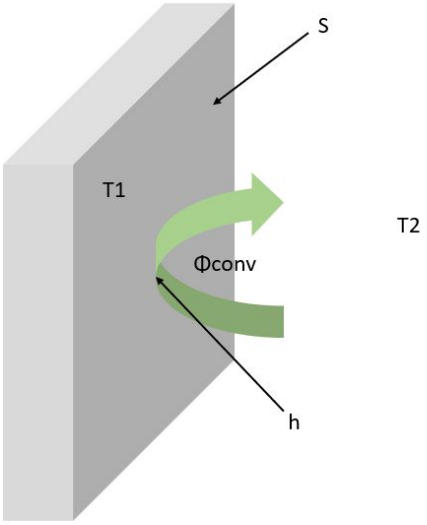
Nous pouvons faire une analogie électrique avec la loi d'Ohm (U = R.I), en admettant que les températures sont l'équivalent des potentiels, les flux de chaleur l'équivalent des courants et les résistances de conduction l'équivalent des résistance électriques. Ainsi :

$$\Delta T = R_{cond} * cond$$

Dans le cas de notre MN nous souhaitons limiter au maximum cette conduction thermique. Nous voulons donc rendre R_{cond} la plus grande possible. Pour cela nous allons agir sur 2 paramètres. La conductivité, en choisissant un matériau avec un λ très faible : c'est ce qui caractérise les matériaux isolants. Nous allons également augmenter l'épaisseur *e* de cet isolant.

2. La convection thermique

La convection est le transport de chaleur par un fluide en mouvement donc avec un transport de matière. Nous parlons aussi de convection (ou conducto-convection) lorsqu'il y a échange de chaleur entre une paroi et un fluide en mouvement. C'est ce phénomène qui nous intéresse dans notre cas.



Considérons une surface S à la température T1, en contact avec un fluide à la température T2.
L'échange thermique entre la paroi et le fluide est décrit par la loi de Newton :

$$_{conv} = h * S * (T_1 - T_2)$$

h est le coefficient d'échange par conducto-convection (W/m²/K). Il dépend principalement de la vitesse du fluide dans la zone proche de la paroi. Dans le cas d'une convection naturelle, c'est-à-dire sans vent, la valeur de h est de l'ordre de 10 W/m²/K.
Ici aussi nous pouvons faire l'analogie électrique en posant :

$$R_{conv} = \frac{1}{hS}$$

Nous obtenons alors la relation suivante : $\Delta T = R_{conv} * {}_{conv}$
A l'intérieur de notre caisse l'estimation de h est plus compliquée car l'air est emprisonné dans la caisse. Mais nous avons une très grande différence de température entre la casserole et les parois internes de la caisse, ainsi nous considérons que cette différence de température induit un mouvement de l'air, et donc des échanges thermiques par convection
Pour comprendre comment estimer le coefficient h dans ce cas, nous vous redirigeons vers un cours de thermique sur la convection naturelle[1].
Dans le cas de la MN, mettre la casserole dans un caisse hermétiquement fermée permet de réduire la possibilité de mouvement de l'air autour de la casserole. Cela permet aussi d'éviter le renouvellement de l'air : l'air va augmenter en température et la différence de température ΔT entre la casserole et l'air sera moins élevée, réduisant ainsi le flux de convection.

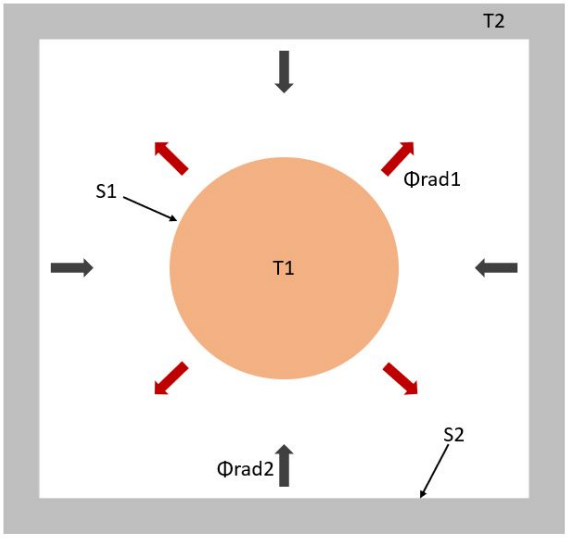
3. Les échanges thermiques par radiation

Les échanges thermiques par radiation sont des transferts de chaleur portés par des ondes électromagnétiques, notamment les infrarouges. En effet tout corps ayant une température non nulle (c'est-à-dire supérieur à 0 Kelvin) émet des ondes électromagnétiques. L'émission de ces ondes nécessite de l'énergie, ici de l'énergie thermique, et cette énergie est transportée par l'onde. La quantité de rayonnement émis par un corps dépend de sa température, plus la température est élevée plus le flux de rayonnement est élevé. Elle dépend aussi de la nature du matériau, des corps à la même température mais constitués de matériaux différents ne vont pas émettre le même flux de rayonnement.
Le flux de chaleur rayonné par un corps s'écrit :

$$_{r} = e * S * \sigma * T^4$$

Où e est l'émissivité du corps en question, compris entre 0 et 1 (dans le cas d'un corps noir, e = 1)
S est la surface du corps rayonnant
σ est la constante de Stephan-Boltzmann ($\sigma = 5,67.10^{-8}\ W.m^{-2}.K^{-4}$)
T est la température du corps

[1] TRANSFERTS THERMIQUES CONVECTIFS, Chapitre 4, Philippe Marty,
http://www.legi.grenoble-inp.fr/people/Philippe.Marty/cours-convection-M2.pdf



Flux échangé entre deux corps noirs, selon le schéma précédent:

Soit notre casserole à la température T1 et la paroi de la caisse à une température T2. Nous considérons ici que ce sont tous les deux des corps noirs (cas idéal), c'est-à-dire qu'ils émettent un flux de rayonnement selon la loi précédemment citée et qu'ils absorbent tout le rayonnement arrivant sur leur surface.

Le flux échangé (Φr) entre la casserole et la caisse est la différence entre le flux allant de la casserole à la caisse ($\Phi rad1$) et le flux entre la caisse et la casserole($\Phi rad2$).

Une dernière notion est à introduire, le facteur de forme. Dans l'exemple du schéma précédent nous pouvons bien visualiser que la totalité du rayonnement émis par la casserole va être intercepté par la caisse. Par contre, le rayonnement de la caisse ne va pas être en totalité reçut par la casserole, une partie va être reçu par la caisse. Le rapport entre le rayonnement émis par un corps 1 et celui qu'un corps 2 reçoit réellement de 1 est appelé facteur de forme. Ainsi le facteur de forme de la casserole vers la caisse ($F_{casserole-caisse}$) est de 1, et celui de la caisse vers la casserole ($F_{caisse-casserole}$) est de S1/S2.

$$r = rad1 - rad2$$
$$rad1 = F_{casserole-caisse} * S_1 * \sigma * T_1^4 = S_1 * \sigma * T_1^4$$
$$rad2 = F_{caisse-casserole} * S_2 * \sigma * T_2^4 = S_1 * \sigma * T_2^4$$
$$r = S_1 * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

Si nous considérons que la casserole est un corps gris (cas réel), d'émissivité e, alors :

$$r = e * S_1 * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

Dans le cas d'un corps gris l'émissivité est inférieure à 1, le corps émet un flux radiatif plus faible mais absorbe moins les rayonnements arrivant sur sa surface. Le rayonnement non absorbé est alors réfléchi. Ainsi, du point de vue de la casserole nous pouvons identifier 3 flux :

$$absorbé = a * S_1 * \sigma * T_2^4$$
$$réfléchi = r * S_1 * \sigma * T_2^4$$
$$émit = e * S_1 * \sigma * T_1^4$$

Avec e : l'émissivité, a : l'absorptivité, r : la réflectivité
Sachant que $a = e \; et \; r = (1 - a)$

Et si nous considérons que ce sont deux corps gris :

$$r = \frac{1}{\frac{1-e_1}{S_1 e_1} + \frac{1}{S_1} + \frac{1-e_2}{S_2 e_2}} * \sigma * (T_1^4 - T_2^4)$$

Pour trouver ce dernier résultat, un système d'équation est à résoudre.

Pour approfondir nous mettons un lien vers un cours [1].

Placer une couverture de survie sur la surface interne de la caisse permet de baisser l'émissivité de cette surface et donc d'augmenter la réflexivité. Ainsi le rayonnement émis par la casserole est réfléchi par la couverture de survie vers la casserole. Une partie de ce rayonnement est alors absorbée par la casserole. Cela limite donc les pertes thermiques de la casserole.

4. Notion d'inertie thermique

Tout corps massique a une certaine capacité à stocker l'énergie thermique. Cela se caractérise par sa capacité thermique massique (C) qui s'exprime en $J.K^{-1}.kg^{-1}$. Mesurer la température d'un corps revient à mesure la quantité d'énergie thermique que celui-ci stocke.

Considérons un corps de masse $m = 1 \; kg$, de capacité thermique massique $C = 100 \, J.K^{-1}.kg^{-1}$, qui passe de la température $T_1 = 10°C$, ($10°C = 273 + 10 = 283 \, K$) à la température $T_2 = 20°C$. L'énergie supplémentaire E accumulée par le corps suite à cette élévation de température est :

$$E = C * m * (T_2 - T_1) = 100 * 1 * (20 - 10) = 1000 \, Joule$$

Ainsi, lorsqu'un flux de chaleur entre dans un corps, la température de ce dernier augmente, par exemple de l'eau que nous faisons chauffer sur une plaque de cuisson. Et si un flux de chaleur sort de corps, alors sa température baisse, c'est ce que nous voulons éviter avec la MN, en limitant le flux de chaleur sortant de la casserole.

Nous pouvons alors dire que la variation d'énergie thermique d'un corps ($C * m * dT$) sur un intervalle de temps dt est égale à la différence entre l'énergie thermique entrant dans le corps ($E_{entrant} = {}_{entrant} * dt$) et l'énergie thermique sortant du corps ($E_{sortant} = {}_{sortant} * dt$) :

$$C * m * dT = E_{entrant} - E_{sortant} = {}_{entrant} - {}_{sortant}) * dt$$

Et donc :

$$C * m * \frac{dT}{dt} = {}_{entrant} - {}_{sortant}$$

III. Description des cas considérés

Dans cette partie nous allons mettre en équation les différentes configurations de la MN qui nous intéressent grâce aux précédentes descriptions des phénomènes physiques en jeu.

Cas 1 : Caisse

Dans cette configuration, la casserole est à l'intérieure d'une caisse en bois et la distance entre la surface de la casserole et les parois de la caisse est de l'ordre de 5 à 10 cm. La casserole ne touche pas les parois de la caisse, nous considérons qu'elle est surélevée (dans nos expériences nous l'avons surélevé avec des bouchons en liège), cela permet d'éviter la conduction entre la casserole et les parois de la caisse.

Les phénomènes physiques à prendre en compte sont donc les suivants (nous raisonnons en termes de flux de chaleur) :

- Flux par convection de la casserole vers l'air intérieur de la caisse

$$conv1 = h_{int} * S_{casserole} * (T_{casserole} - T_{air})$$

- Flux par convection de l'air intérieur de la caisse vers les parois intérieures de la caisse

$$conv2 = h_{int} * S_{intCaisse} * (T_{air} - T_{paroiIntCaisse})$$

- Flux de radiation de la casserole vers les parois intérieures de la caisse

$$rad = \frac{1}{\frac{1-e_{casserole}}{S_{casserole}e_{casserole}} + \frac{1}{S_{casserole}} + \frac{1-e_{bois}}{S_{intCaisse}e_{bois}}} * \sigma * \left(T^4_{casserole} - T^4_{caisse}\right)$$

$$Notons\ \alpha = \frac{1}{\frac{1-e_{casserole}}{S_{casserole}e_{casserole}} + \frac{1}{S_{casserole}} + \frac{1-e_{bois}}{S_{intCaisse}e_{bois}}}$$

- Deux flux de conduction, un à travers la première moitié de l'épaisseur de bois et l'autre sur la deuxième moitié de bois (couper en deux l'épaisseur de bois nous permettra d'intégrer l'effet d'inertie du bois)

$$cond1 = \frac{T_{paroiIntCaisse} - T_{Caisse}}{R_{cond1}}$$
$$cond2 = \frac{T_{Caisse} - T_{paroiExtCaisse}}{R_{cond2}}$$

- Flux par convection de la paroi extérieure de la caisse vers l'air extérieur

$$conv3 = h_{ext} * S_{extCaisse} * (T_{paroiExtCaisse} - T_{ext})$$

Nous ajoutons les masses thermiques (inertie thermique des différents corps) de l'eau de la casserole, de l'air intérieur de la caisse, du bois de la caisse :

$$\begin{cases} m_{eau} * C_{eau} * \dfrac{dT_{eau}}{dt} = -\Phi_{conv1} - \Phi_{rad} \\ m_{air} * C_{air} * \dfrac{dT_{air}}{dt} = \Phi_{conv1} - \Phi_{conv2} \\ m_{bois} * C_{bois} * \dfrac{dT_{caisse}}{dt} = \Phi_{conv2} + \Phi_{rad} + \Phi_{cond1} - \Phi_{cond2} - \Phi_{conv3} \end{cases}$$

Nous obtenons alors un système de 3 équations différentielles non linéaire (que nous résolvons numériquement, voir partie Simulation numérique).

Cas 2 : Caisse + couverture de survie

Dans cette configuration nous ajoutons juste une couverture de survie sur la surface interne de la caisse en bois. La mise en équation est donc exactement la même. La seule chose qui change est que nous remplaçons l'émissivité du bois par l'émissivité de la couverture de survie.

$$e_{bois} \approx 0,9$$
$$e_{couverture} \approx 0,1$$

Ainsi les réflexivités sont les suivantes :

$$r_{bois} = 1 - e_{bois} \approx 0,1$$
$$r_{couverture} = 1 - e_{couverture} \approx 0,9$$

La couverture de survie reflète environ 90% du rayonnement qu'elle reçoit, alors que le bois seulement 10%.
Attention : la couverture de survie reflète 90% du rayonnement seulement sur sa face argentée, le côté doré a une réflexivité plus faible.

Cas 3 : Caisse + couche d'isolant

Ici nous revenons au cas 1 concernant la partie radiation, c'est-à-dire que nous reprenons l'émissivité du bois. Mais nous ajoutons une épaisseur d'isolant autour de la caisse, cela ajoute des résistances de conduction par rapport au modèle du cas 1.
Les flux de chaleur en jeu :

- Flux par convection de la casserole vers l'air intérieur de la caisse

$$_{conv1} = h_{int} * S_{casserole} * (T_{casserole} - T_{air})$$

- Flux par convection de l'air intérieur de la caisse vers les parois intérieures de la caisse

$$_{conv2} = h_{int} * S_{intCaisse} * (T_{air} - T_{paroiIntCaisse})$$

- Flux de radiation de la casserole vers les parois intérieures de la caisse

$$_{rad} = \alpha * \sigma * \left(T^4_{casserole} - T^4_{caisse}\right)$$

- Deux flux de conduction : un à travers la première moitié de l'épaisseur de bois et l'autre sur la deuxième moitié de bois (couper en deux l'épaisseur de bois nous permettra d'intégrer l'effet d'inertie du bois)

$$cond1 = \frac{T_{paroiIntCaisse} - T_{caisse}}{R_{cond1}}$$
$$cond2 = \frac{T_{caisse} - T_{paroiExtCaisse}}{R_{cond2}}$$

- De même que précédemment mais à travers la couche d'isolant

$$cond3 = \frac{T_{paroiExtCaisse} - T_{isolant}}{R_{cond3}}$$
$$cond4 = \frac{T_{isolant} - T_{paroiExtIsolant}}{R_{cond4}}$$

- Flux par convection de la paroi extérieure de l'isolant vers l'air extérieur

$$conv3 = h_{ext} * S_{extIsolant} * (T_{paroiExtIsolant} - T_{ext})$$

L'isolant ajoute au modèle une masse thermique :

$$\begin{cases} m_{eau} * C_{eau} * \frac{dT_{eau}}{dt} = -\Phi_{conv1} - \Phi_{rad} \\ m_{air} * C_{air} * \frac{dT_{air}}{dt} = \Phi_{conv1} - \Phi_{conv2} \\ m_{bois} * C_{bois} * \frac{dT_{caisse}}{dt} = \Phi_{conv2} + \Phi_{rad} + \Phi_{cond1} - \Phi_{cond2} - \Phi_{cond3} \\ m_{isolant} * C_{isolant} * \frac{dT_{isolant}}{dt} = \Phi_{cond2} + \Phi_{cond3} - \Phi_{cond4} - \Phi_{conv3} \end{cases}$$

Nous nous retrouvons cette fois avec un système de 4 équations différentielles non linéaires, que nous allons encore résoudre numériquement.

Cas 4 : Caisse + couverture de survie + couche d'isolant

Enfin, pour ce cas, nous gardons le même système d'équations que dans le cas 3 mais en remplaçant l'émissivité du bois (0,9) par l'émissivité de la couverture de survie (0,1).

IV. Simulation numérique

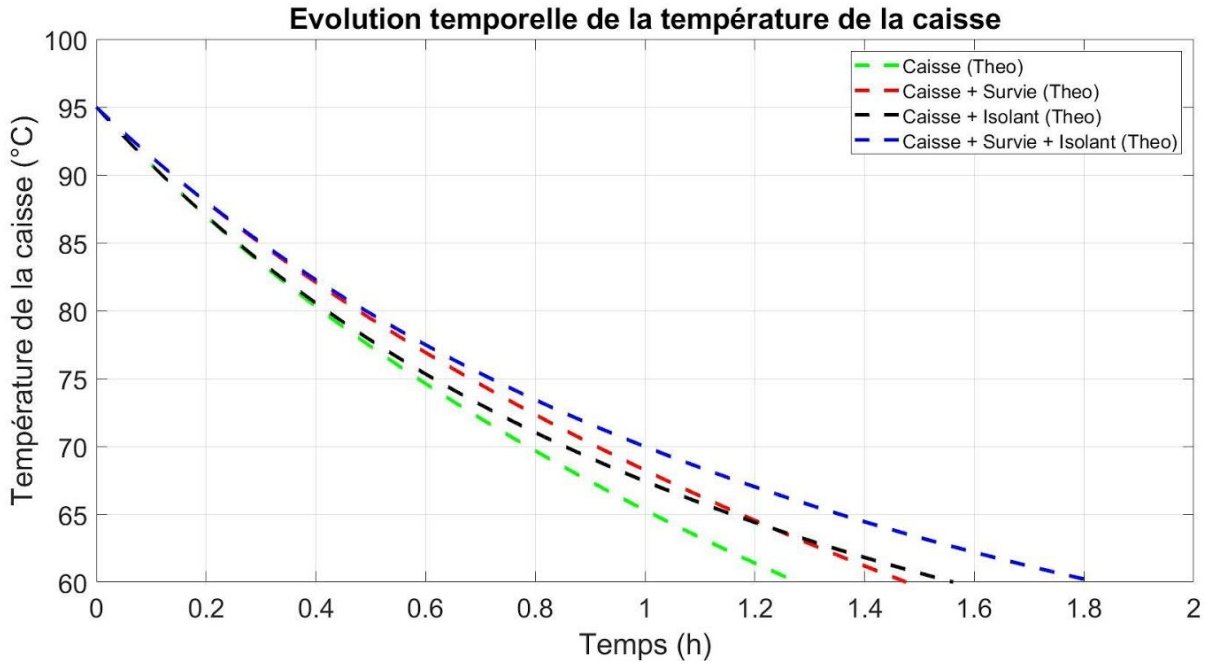
Les résolutions numériques des systèmes d'équations précédents ont été réalisées avec Matlab. Sous Matlab la fonction ode45 permet de résoudre un tel système d'équation différentielle. Cette fonction renvoi alors l'évolution temporelle des températures sur la durée que nous lui avons donnée. Pour connaître la puissance sortant de la casserole il suffit de dériver l'évolution temporelle de la température de la casserole.

Les détails du code réalisé pour résoudre ces équations n'est pas intéressant dans ce rapport. Ainsi nous n'en discuterons pas plus. Pour télécharger les codes Matlab suivez ce lien.

V. Résultats et comparaisons avec les mesures expérimentales

La résolution numérique décrite précédemment nous donne l'évolution temporelle de toutes les températures (Casserole, Air, Caisse, Isolant). La température qui nous intéresse le plus est celle de la casserole. Mais regarder les autres températures peut être très utile pour comprendre la dynamique de la MN.

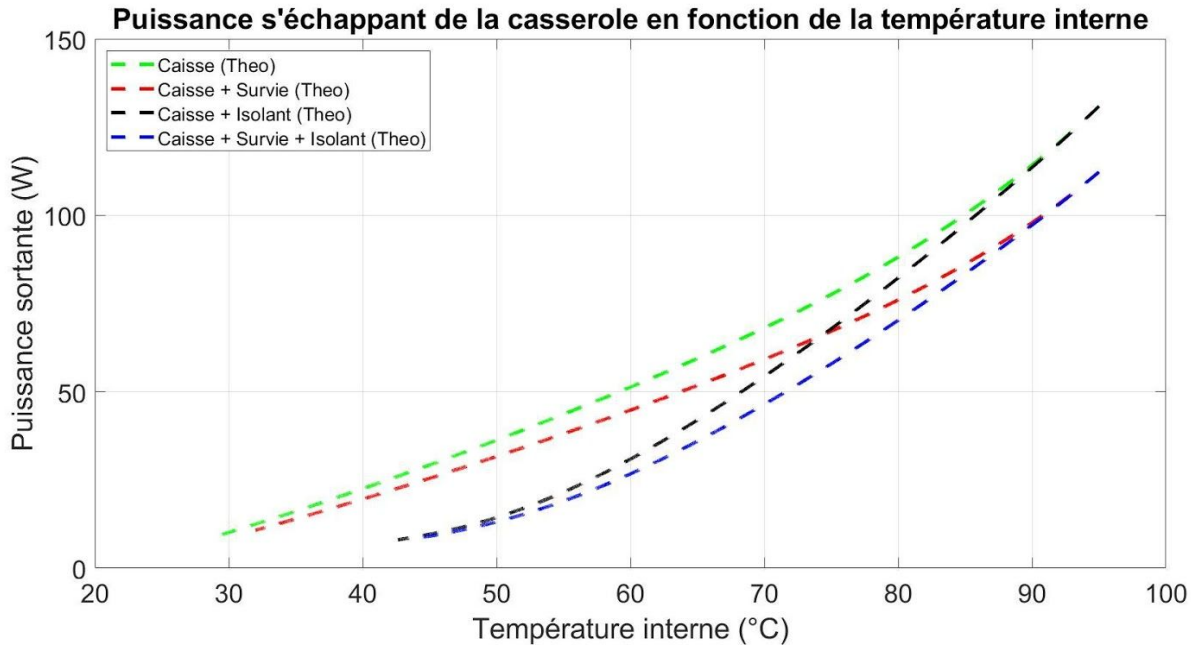
Tout d'abord regardons l'évolution temporelle de la température de la casserole :



Nous observons ici, comme nous nous y attendions, que le cas permettant la plus faible baisse de la température est le cas 4 (le pire étant le cas 1). Les deux autres cas sont des cas intermédiaires.

Au début de l'expérience (entre 0 et 0.4 h), les cas 1 et 3 ainsi que les cas 2 et 4 ont une évolution similaire. Ensuite, aux environs de 1.2h et de 63°C, les cas 2 et 3 se croisent. Ainsi dans la première partie de l'expérience le cas 3 se refroidit plus vite que le 2, mais cela s'inverse aux alentours de 0.7h : le cas 2 se refroidit alors plus vite.

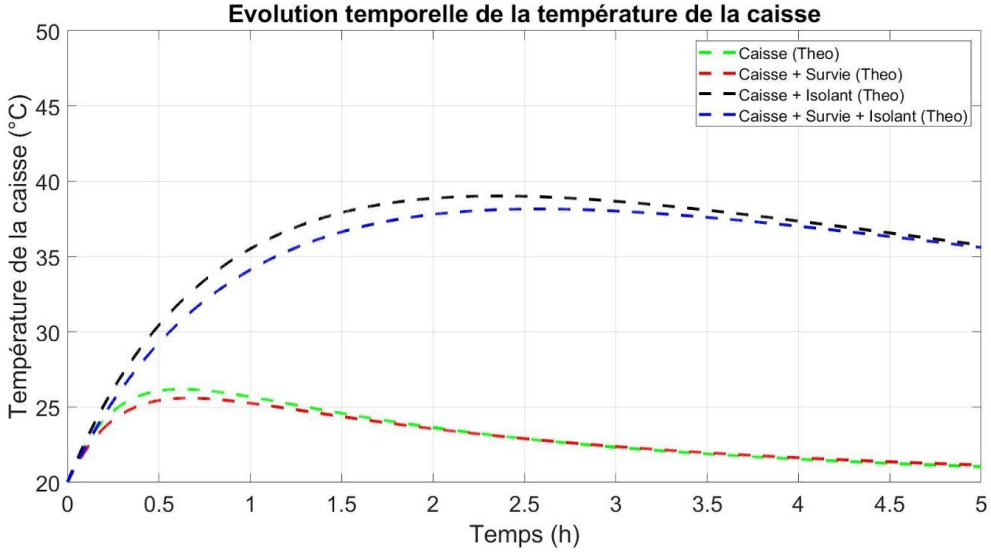
Pour mieux comprendre ce phénomène nous traçons l'évolution du flux sortant de la casserole en fonction de la température de celle-ci. Pour tracer cette courbe il suffit de faire la dérivée de la courbe précédente. Elle permet de bien visualiser à quelle vitesse la casserole se refroidit en fonction de sa température.



Plus le flux sortant de la casserole est important, plus celle-ci se refroidit vite. Nous visualisons bien ici que le point de bascule est aux alentours de 75°C. Pour des températures supérieures le cas 2 se refroidit moins vite que le 3, et inversement pour des températures inférieures. Nous voyons que la température à laquelle s'inverse la dynamique est bien supérieure à la température à laquelle les évolutions temporelles se croisent. Cela est dû au phénomène d'inertie thermique.

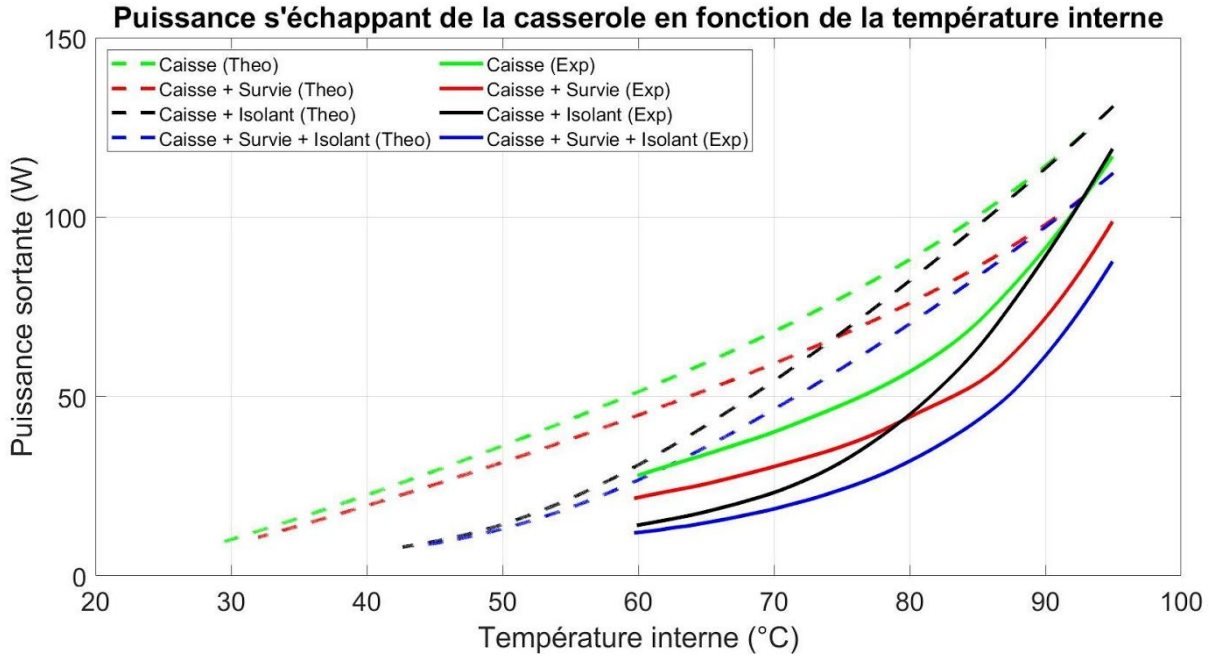
A quoi est dû ce changement de dynamique ? Dans le cas 2 la couverture de survie permet de limiter les pertes de chaleur par rayonnement, alors que dans le cas 3 l'isolant permet de limiter le flux de chaleur par conduction. Or, le phénomène de radiation évolue proportionnellement à T^4 alors que la conduction proportionnellement à T. Donc pour des hautes températures il est plus intéressant de limiter le rayonnement de la casserole car il est plus important. Cette tendance s'inverse lorsque la température baisse, et il est alors plus intéressant de limiter la conduction.

Un autre phénomène est à regarder pour comprendre le gain d'efficacité en ajoutant une couche d'isolant. Traçons l'évolution temporelle de la température de la caisse.



Nous voyons bien ici que dans les cas où nous avons une couche d'isolant, la température de la caisse est bien plus importante que dans les deux autres cas. Du point de vu de la caisse, sa température se stabilise lorsque le flux de chaleur qu'elle reçoit de la casserole est égal au flux qu'elle cède à l'air extérieur ou à l'isolant. Dans le cas où nous avons de l'isolant, le flux cédé un plus faible (c'est but de l'isolant), donc sa température augmente. Mais si sa température augmente le flux qu'elle reçoit de la casserole diminue, en effet la différence de température entre la casserole et la caisse diminue. Ainsi la température de la caisse augmente jusqu'à atteindre un équilibre entre le flux qu'elle reçoit et le flux qu'elle cède.

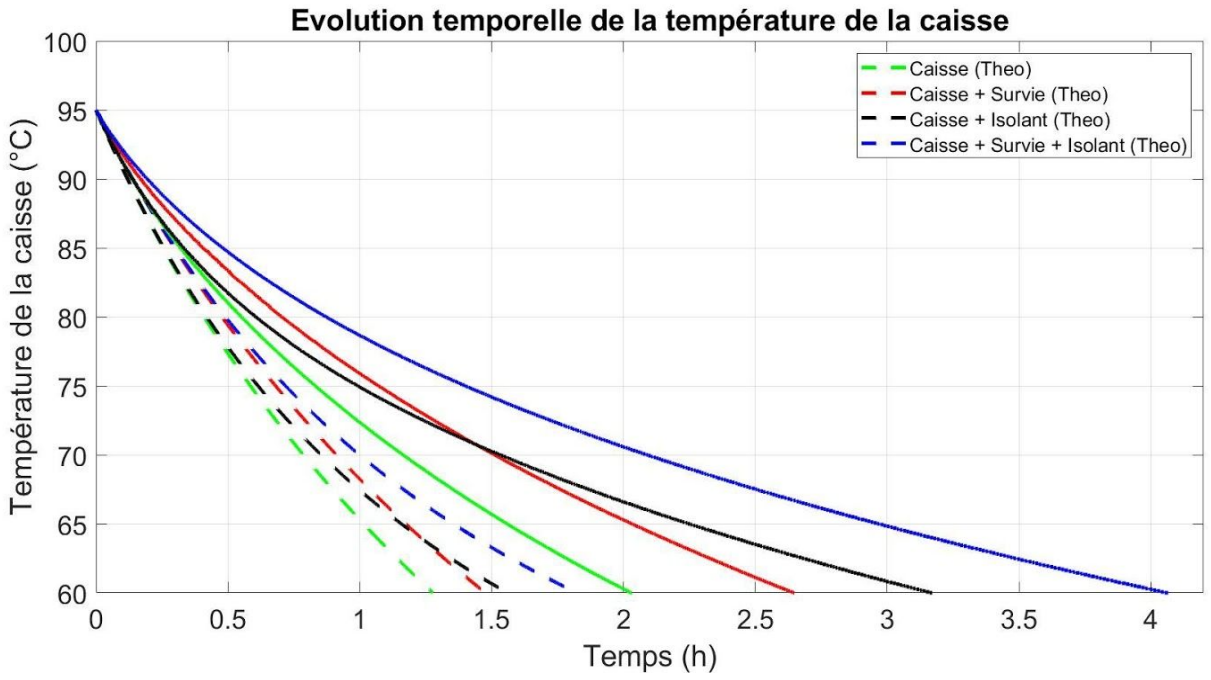
Maintenant, comparons ces données théoriques avec des données expérimentales. Les données expérimentales présentées ci-dessous ont été obtenues en essayant de rester dans les mêmes conditions que les 4 cas décrits précédemment. Traçons le flux sortant de la casserole en fonction de la température de celle-ci pour les 4 cas en théorie et en pratique.



Nous observons un grand écart global sur les valeurs de flux sortant. Néanmoins l'ordre de grandeur des flux reste le bon (quelques dizaines de Watts à une centaine de Watts).

Notons en revanche que le schéma des courbes est le même entre les données théoriques et expérimentales, un croisement entre le cas 2 et le cas 3 entre 70°C et 80°C.

Les écarts de valeurs ne permettent donc pas d'utiliser ce modèle pour estimer finement les temps caractéristiques de chaque cas :



Nous voyons sur cette courbe qui compare les évolutions temporelles en théorique et en pratique que si nous regardons le temps que met la casserole pour refroidir jusqu'à 60°C il y a un écart de l'ordre d'un facteur 2.

En revanche l'approche théorique nous permet bien de comprendre l'influence de chaque paramètre de la MN sur le refroidissement de la casserole.

VI. Conclusion

L'approche théorique du comportement de la MN que nous avons réalisée ne nous permet pas d'estimer convenablement l'évolution temporelle de la température de la casserole. Nous l'avons vu, les écarts avec les mesures expérimentales sont très importants.

En revanche, nous avons vu que les comparaisons entre les courbes théoriques des 4 cas étaient justes. En effet nous avons retrouvé le même schéma entre la théorie et la pratique. C'est-à-dire que les éléments de la MN permettant d'isoler la casserole ont été intégrées dans le modèle de manière correcte.

De plus, cette approche nous a permis de comprendre les mécanismes en jeu dans la MN (conduction, convection, radiation, inertie) et voir quels sont les moyens de les limiter pour augmenter les performances.

[Retour Lecture]

Rapport des mesures expérimentales

Table des matières

Rapport des mesures expérimentales **45**

I. Introduction 46

II. Description de la marmite norvégienne 46
1. Description de la casserole utilisée 46
2. Construction d'une marmite norvégienne 47
3. Utilisation d'une glacière 49

III. Protocole de mesure 49

IV. Les différents cas de mesures 50

V. Présentation des résultats et interprétations 51

VI. Mesure de référence à l'air libre (casserole posée sur un table en bois) 51
Bouchon 52
MN 53
MN + bouchon 54
MN + bouchon + survie 55
MN + bouchon + isolant 56
MN + bouchon + survie + isolant 58
Glacière + bouchon 59

VII. Simulation pour différents volumes d'eau 60

VIII. Conclusion 60

I. Introduction

Ce rapport présente la démarche scientifique des mesures de performances d'une marmite norvégienne (MN). Il entre dans le cadre du projet d'ingénierie de deuxième année de l'école d'ingénieurs ENSE3 - Grenoble INP, et est porté par le Low-Tech Lab Grenoble. Ce rapport a pour but de répondre à un des objectifs du projet qui est de déterminer de manière scientifique la meilleure conception de la MN. Par meilleure géométrie il faut entendre la plus performante, c'est-à-dire la MN qui isole le mieux thermiquement la casserole. Pour être en accord avec la philosophie des Low Techs, les géométries choisies doivent être réalisées avec des matériaux de coût abordable, décarbonés, accessibles à tous et toutes. Ainsi, les résultats seront nuancés par la question suivante : le gain en performance par l'ajout du matériau justifie-t-il la consommation énergétique nécessaire à la production de ce dernier ?

Contexte de l'étude :

Nous avons réalisé ces mesures pendant la période de confinement (mars-mai 2020). Nous avons donc construit une marmite norvégienne avec les matériaux que nous avions à disposition. Nous n'avons donc pas pu utiliser la casserole initialement prévue (casserole standard vendue en magasins d'ameublement ou chez les cuisinistes. De plus nous n'avons pas pu tester différents types d'isolant pour l'isolation de la caisse extérieure, seul du polystyrène a pu être utilisé. Malgré son mauvais impact environnemental (coût de fabrication énergétique et bilan CO_2 élevés, non recyclable), ses performances thermiques proches de la ouate de cellulose nous ont permis de l'utiliser comme substitut des isolants initiaux, afin de réaliser nos mesures.

II. Description de la marmite norvégienne

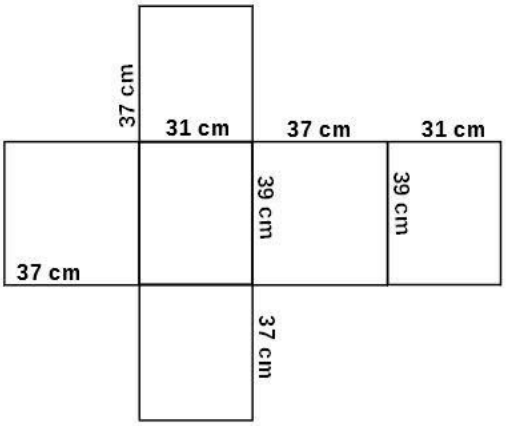
1. Description de la casserole utilisée

Pour réaliser nos mesures nous utiliserons une casserole en **Aluminium pur** dont les dimensions présentées sur les photos ci-après. Cette casserole sera utilisée pour tous les tests afin d'assurer la répétabilité de nos expériences dans le but de les comparer entre elles.

Photos de la casserole utilisée pour réaliser nos mesures (respectivement vue de dessus et de profil).

2. Construction d'une marmite norvégienne

Pour construire la MN nous disposions d'une plaque de contreplaqué d'une **épaisseur de 1cm**, que nous avons découpée en plusieurs planches, réalisant un parallélépipède rectangle selon le patron ci-après. Nous choisissons de faire une boîte suffisamment large pour que la casserole ne touche pas les bords tout en ayant le moins d'air possible à l'intérieur.



Patron de la caisse en bois que nous avons réalisée.

Pour l'assemblage nous avons utilisé des clous, et de la colle à bois que nous avons ajoutée au niveau des joints à l'intérieur de la caisse pour augmenter l'étanchéité.

Photos de la caisse terminée.

Dans le couvercle nous avons ajouté des morceaux de bois rectangulaires permettant d'encastrer le couvercle de manière hermétique, évitant au maximum les fuites d'air vers l'extérieur. (voir image ci-dessous)

Photo du couvercle de la caisse.

Enfin, pour réaliser les mesures, nous avons perforé une face de notre caisse afin de laisser pénétrer la sonde de température à l'intérieur. Pour assurer l'étanchéité et limiter les fuites d'air, nous avons ajouté un ballon de baudruche autour de notre câble de sonde au niveau de la perforation de la caisse.

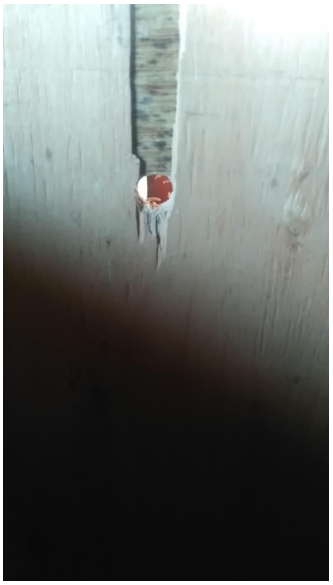


Photo de la face perforée de la caisse.

3. Utilisation d'une glacière

D'autre part, nous avons décidé d'utiliser une glacière en tant que MN et de comparer ses performances à celles de notre caisse. En effet, il s'agit également d'une boite isolante que quiconque peut posséder chez soi, et qui paraît facile à adapter en marmite norvégienne.

III. Protocole de mesure

Le but est désormais d'établir un protocole expérimental, permettant de comparer les mesures entre elles et d'analyser l'influence de différents paramètres sur les pertes de chaleur à l'intérieur de la MN. Nous avons élaboré la manipulation suivante :

Porter **2,5 L d'eau à ébullition (100 °C)**, (volume choisit en fonction de la casserole décrite précédemment, cela correspond à environ la moitié du volume de celle-ci). La casserole est ensuite placée dans l'environnement de test. Une sonde de température est plongée dans l'eau à l'intérieur de la casserole, deux autres sondes de température sont à l'extérieur de la marmite et mesurent la température du milieu extérieur. La mesure est stoppée quand la température de l'eau atteint **60 °C**. Nous choisissons cette température par gain de temps (plus de 3h pour une mesure sinon) et par cohérence: une température plus faible ne permet pas de cuire des aliments.

Les deux sondes extérieures ont des surfaces différentes. L'une est nue et a une surface noire qui absorbe beaucoup les radiations, l'autre est entourée d'une couverture de survie qui par définition réfléchit les radiations. Cette différence permet de vérifier que l'environnement de mesure n'est pas inondé de radiation (ce qui serait le cas par exemple en plein soleil) et donc que l'on peut négliger ce potentiel apport d'énergie. Ainsi lorsque les températures affichées par ces deux capteurs sont sensiblement les mêmes, on considère que l'environnement extérieur n'apporte pas d'énergie par radiation (ce qui est le cas dans toutes les expériences réalisées, car elles ont été réalisées de manière à répondre à cet objectif).

Les expériences sont réalisées en intérieur, sans courant d'air, l'objectif étant de ne pas avoir de convection forcée (par le vent extérieur par exemple) autour de la MN.

Protocole de mesure :

- Verser 2,5 L d'eau dans une casserole à l'aide d'un verre doseur.
- Mettre la casserole sur le feu, porter l'eau à ébullition.
- Placer la casserole à l'intérieur de la marmite norvégienne (ou équivalent).
- Faire tremper la sonde de température dans l'eau à l'intérieur de la casserole.
- Refermer le couvercle de la casserole et de la MN.
- Lancer l'acquisition des données de température. (L'expérience est arrêtée quand l'eau atteint 60°C)

V. Les différents cas de mesures

Ces mesures expérimentales ont pour objectif d'identifier les parties de la marmite qui permettent des gains de performance, de les quantifier, pour classer par ordre d'importance les différents moyens d'isolation thermique.

Voici la liste des moyens d'isolation qui ont été testés :

- Un surélèvement de la casserole grâce à des bouchons de liège coupés en deux dans le sens de la longueur (au nombre de 3), permettant de limiter la conduction par le fond de la casserole en plaçant une lame d'aire en dessous de celle-ci. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***bouchon.***
- Placer la casserole dans une caisse en bois, permettant d'emprisonner l'air autour de la casserole et donc de réduire les pertes thermiques par convection. L'épaisseur des planches de bois (environ 1 cm) permet de négliger leur résistance thermique et donc l'isolation supplémentaire qu'elles apportent. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***caisse.***
- Coller une couverture de survie sur la surface interne de la caisse en bois (partie réfléchissante face à la casserole), cela a pour but de réduire les pertes de chaleur induites par la radiation thermique de la casserole. Sans la couverture de survie le rayonnement thermique de la casserole est presque totalement absorbé par les surfaces en bois, la couverture permet de réfléchir ce rayonnement vers la casserole. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***survie.***
- Entourer la caisse en bois d'une couche d'isolant (matériau ayant une conductivité thermique faible, les matériaux à disposition sont de la paille et des vieux vêtements). Cette couche permet de réduire la conduction de la chaleur en ajoutant une épaisseur de matériau peu conducteur thermiquement. Nous utiliserons comme isolant du polystyrène (nous le déconseillons pour une construction de MN en raison de son impact environnemental) d'une épaisseur de 5cm que nous placerons autour de toute la caisse en bois. Nous appellerons ce mode d'isolation : **isolant**.
- Nous avons fait des tests sur une glacière, qui correspond à une isolation grâce à une couche d'isolant. Ce mode d'isolation sera par la suite nommé ***glacière.***

Nous pouvons ainsi faire une liste des tests réalisés pour l'identification de ces différents modes d'isolation :

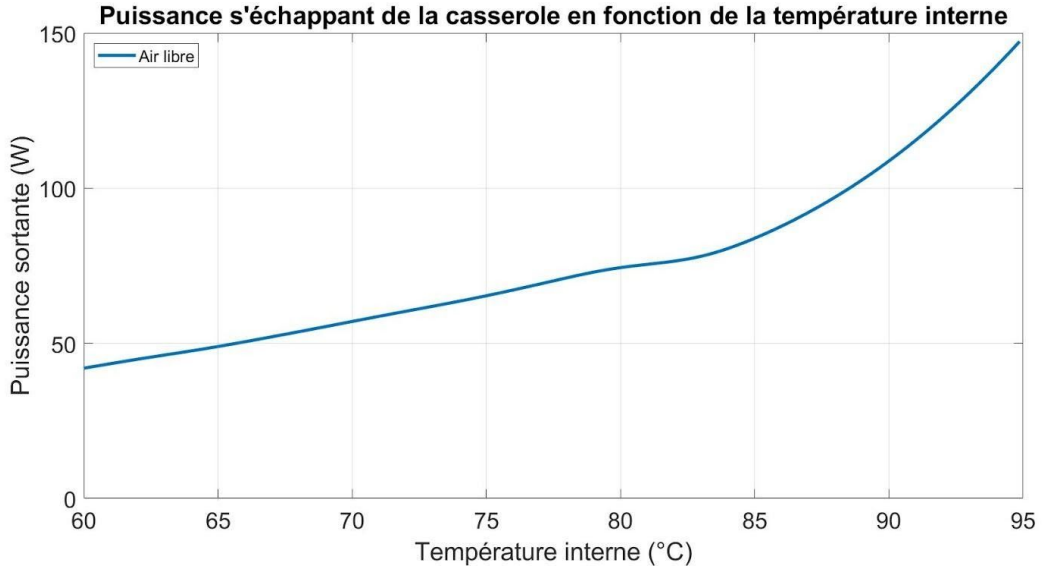
- Mesure de référence en posant la marmite sur une table en bois (Air libre)
- Bouchon
- Caisse
- Caisse + bouchon
- Caisse + bouchon + survie
- Caisse + bouchon + isolant
- Caisse + bouchon + survie + isolant
- Glacière + bouchon

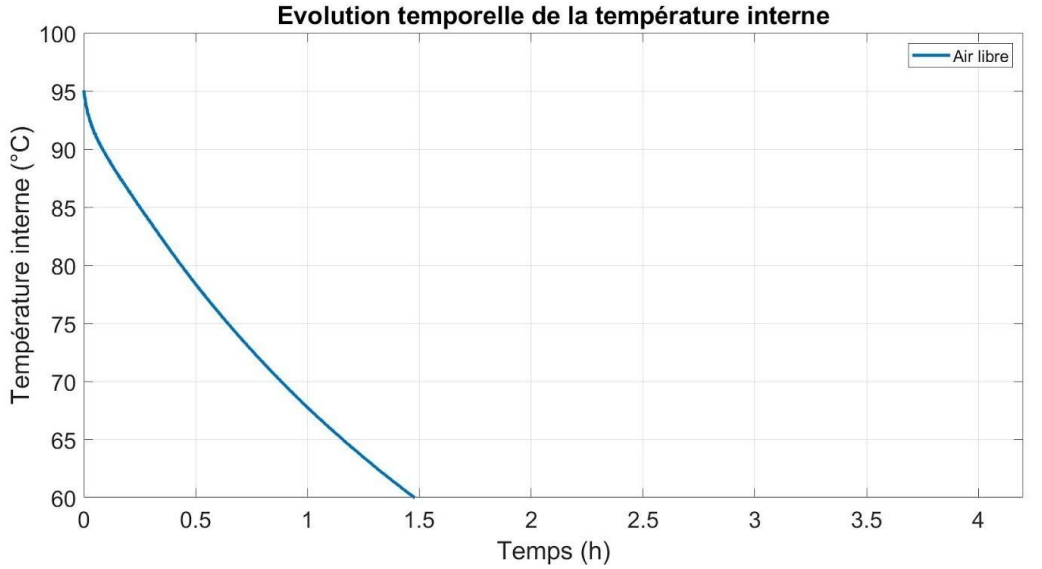
VI. Présentation des résultats et interprétations

Dans cette partie, les résultats des tests seront présentés progressivement de manière à expliciter leurs conclusions.

Pour chaque test, 2 courbes sont utilisées pour l'interprétation. La courbe de mesure brute, qui représente l'évolution temporelle de la température de l'eau dans la casserole, et la courbe représentant la puissance s'échappant de la casserole en fonction de la température de l'eau. Pour obtenir la courbe de puissance, un lissage des données a été réalisé pour supprimer l'évolution en escalier dû à la mesure numérique, après calcul, seule la courbe de tendance est affichée pour une meilleure visibilité. Ces deux courbes sont corrigées pour se placer dans des conditions normales de température extérieure (20 °C).

Mesure de référence à l'air libre (casserole posée sur un table en bois)

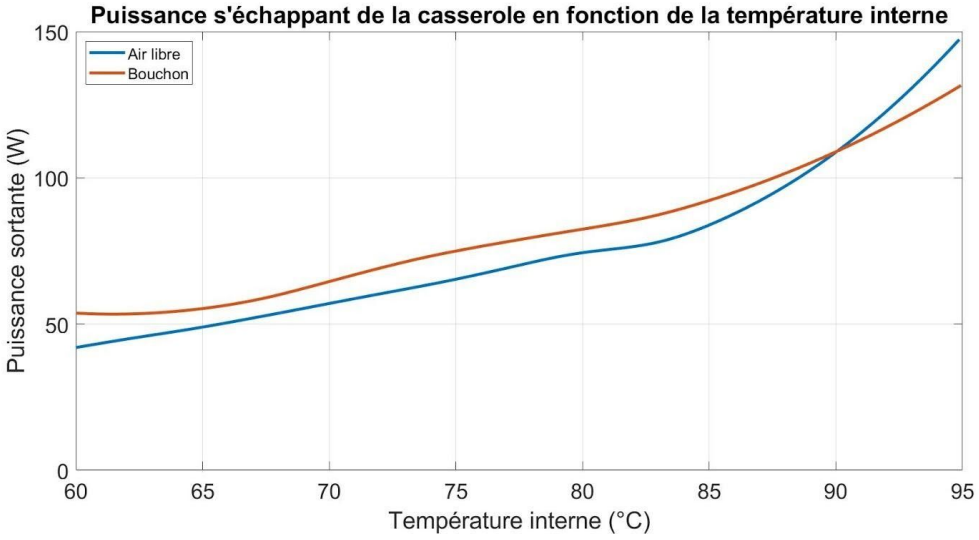


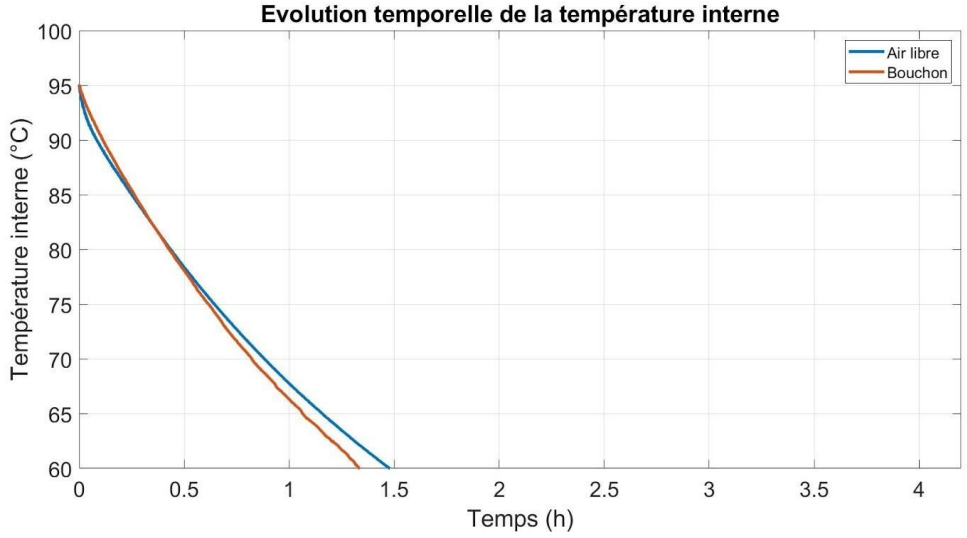


Nous pouvons ici faire une première analyse de la forme des courbes car les courbes suivantes auront la même allure. L'évolution temporelle suit une forme d'exponentielle décroissante, en effet plus la température baisse moins l'écart de température avec l'extérieur est important, et donc la puissance

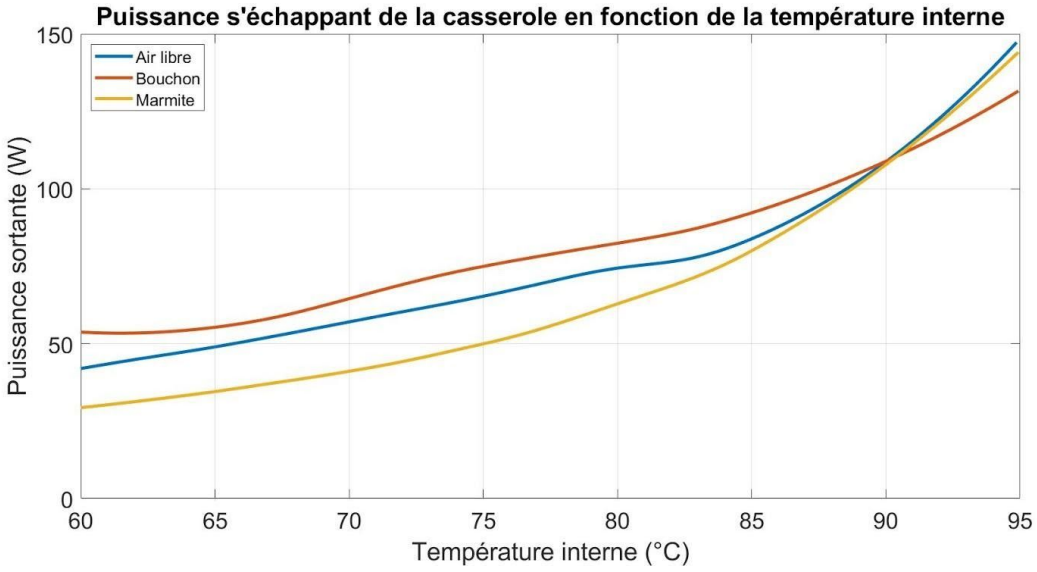
échangée est plus faible. La casserole se refroidit donc de moins en moins vite. Nous pouvons l'observer sur la courbe de puissance: la puissance échangée diminue lorsque la température de la casserole diminue. Néanmoins, nous remarquons que la courbe de puissance n'est pas linéaire, car les échanges par radiation ne sont pas négligeables. En effet, si il n'y avait eu que des échanges par convection suivant la loi de Newton (ϕ =h*s* ΔT) la courbe aurait été linéaire, mais la radiation suit une loi en T4($\phi = \alpha$ *(T4-Text4))ce qui explique que cette courbe a une forme polynomiale. Cette interprétation est valable pour toutes les courbes qui suivront.

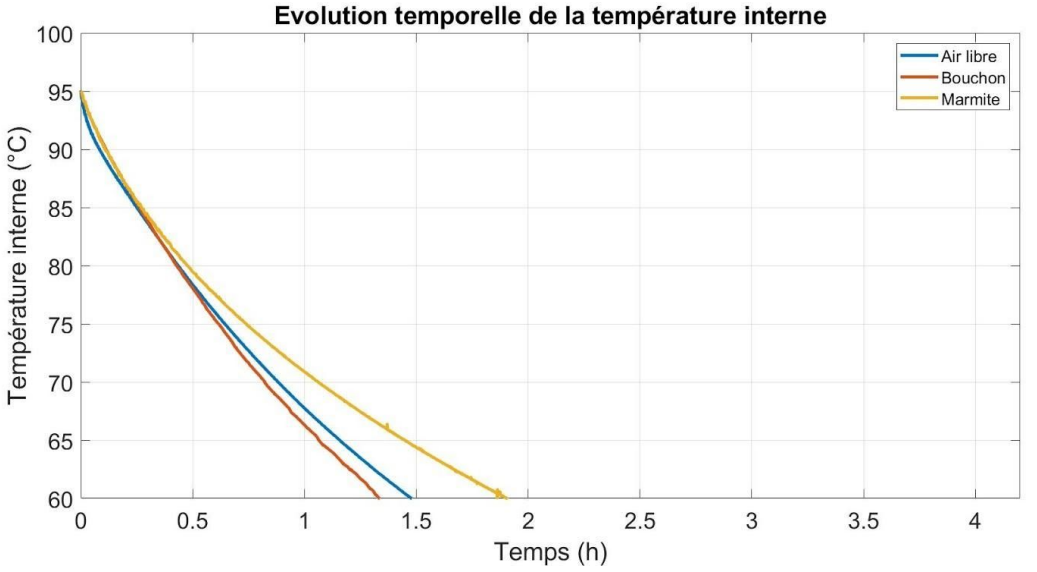
Bouchon





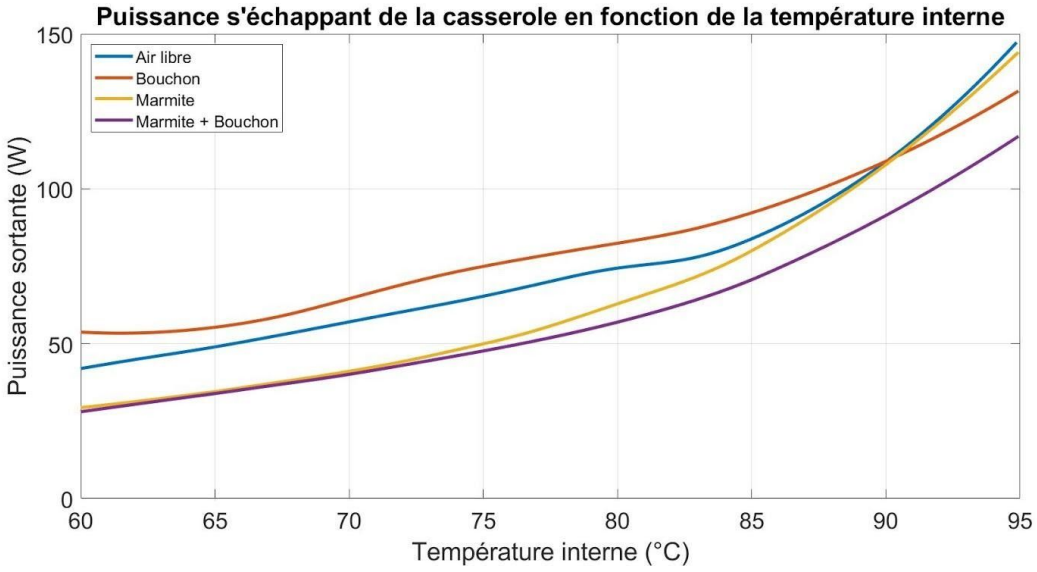
En la comparant avec la mesure de référence, nous observons une diminution des performances. Nous pouvons l'expliquer par la lame d'air qui se trouve sous la casserole à l'air libre: il y a une convection sous la casserole qui n'existait pas dans la mesure de référence. En effet, dans le cas précédent le fond de la casserole échangeait par conduction avec une surface en bois qui est un bon isolant. Nous en déduisons que l'élévation de la casserole avec des plots à l'air libre ne permet pas d'augmenter les performances.

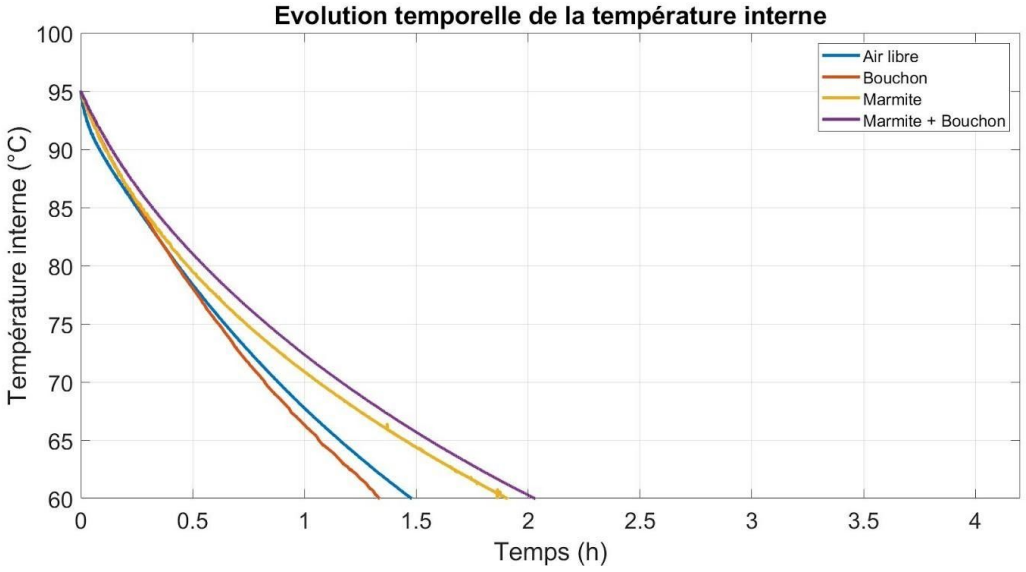




Comparons cette expérience avec la mesure de référence. On observe que le fait de placer la casserole dans une boite fermée permet d'augmenter les performances. En effet la puissance échangée est moins importante comme on peut le voir sur les graphiques. Nous pouvons l'expliquer par la suppression de la convection autour de la casserole. L'air ne circulant plus autour, la casserole se refroidit moins. On en déduit que placer la casserole à l'intérieur d'une boîte permet d'obtenir de meilleures performances.

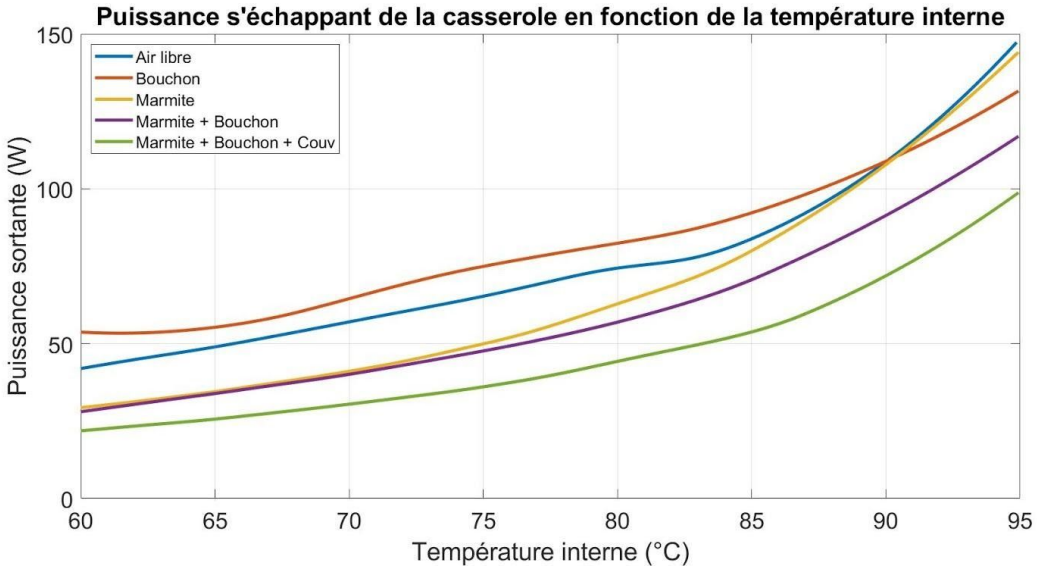
MN + bouchon

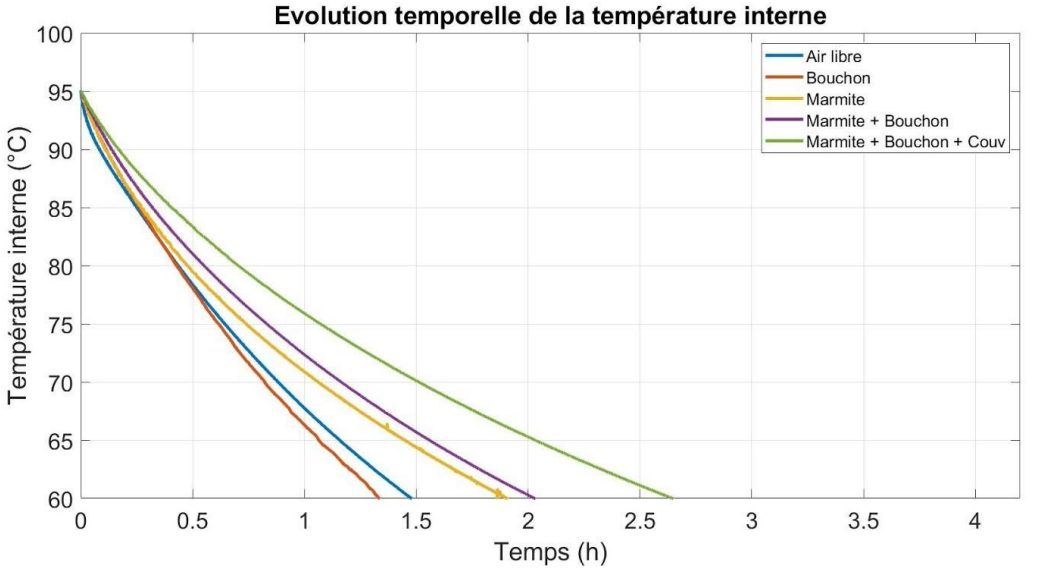




Comparons cette expérience à la précédente. Dans ce cas, nous constatons une performance encore meilleure que précédemment. Le fait d'ajouter de l'air sous la casserole permet de supprimer la conduction avec le bois au fond de la boîte. De plus l'air ne pouvant être en mouvement à l'intérieur de la caisse, il n'y a pas de convection ce qui augmente nos performances. Nous en déduisons que les plots, dans le cas d'un milieu clos, permettent d'obtenir de meilleurs résultats. Il est donc **nécessaire** pour la suite que notre **casserole ne soit pas posée directement sur le fond**.

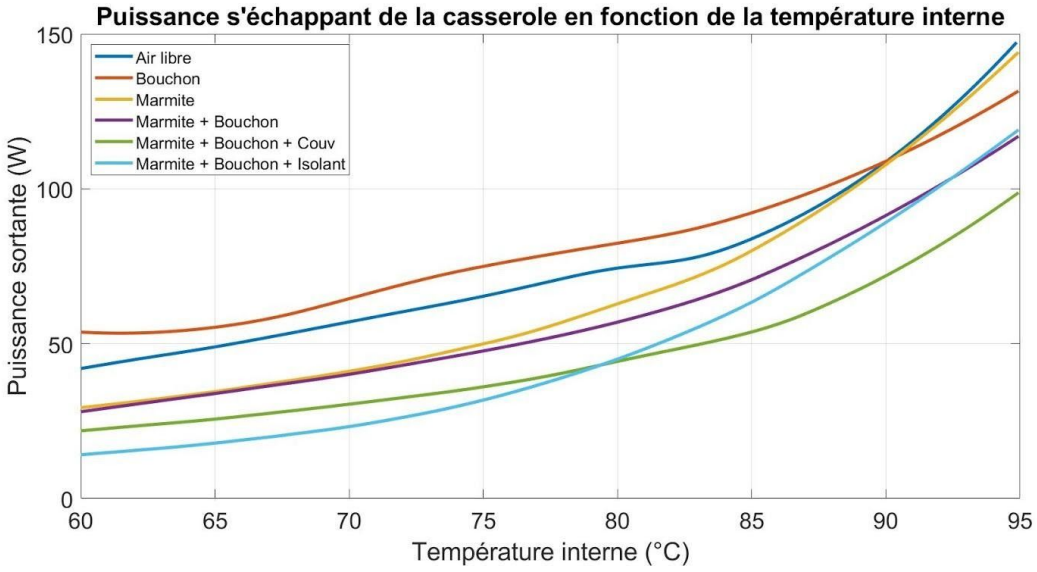
MN + bouchon + survie

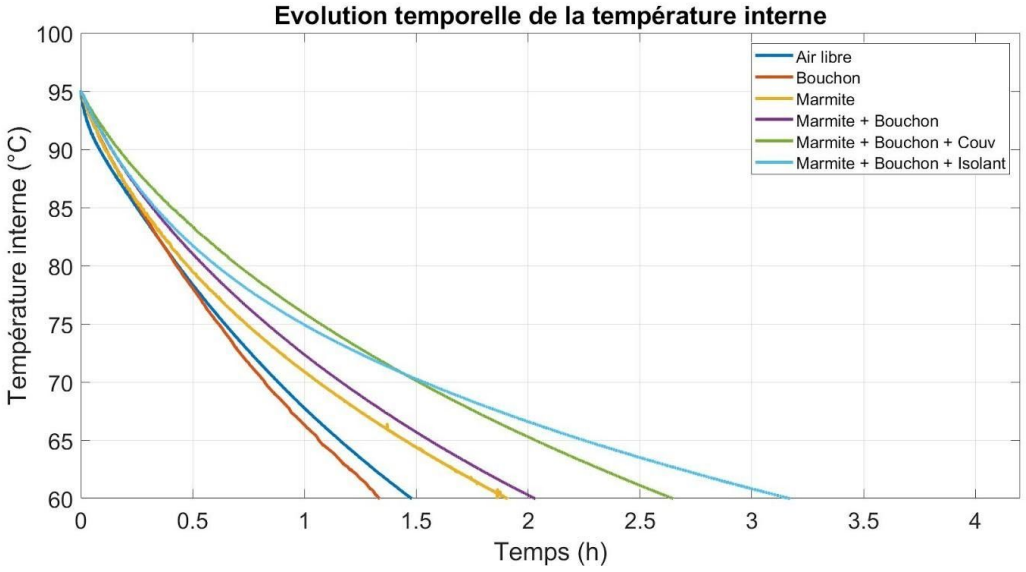




Comparons cette expérience à la précédente. Nous constatons un gain important des performances. En effet, nous pouvons l'expliquer par l'ajout de la couverture de survie qui sert d'écran radiatif, limitant ainsi les échanges de chaleur par radiation. Nous en déduisons qu'il est **nécessaire de limiter les pertes par radiation, en plaçant un écran radiatif dans notre caisse.**

MN + bouchon + isolant

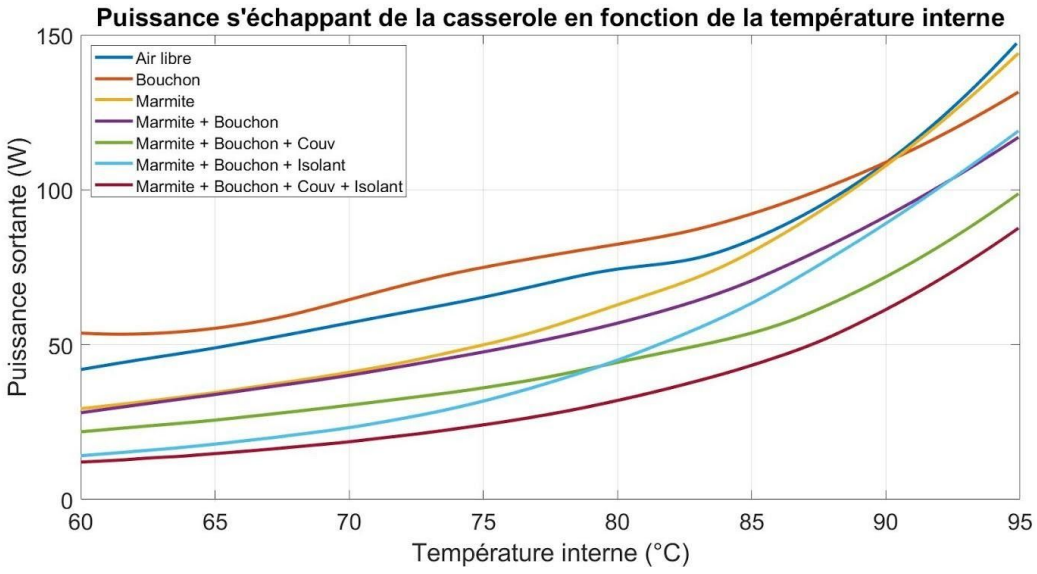


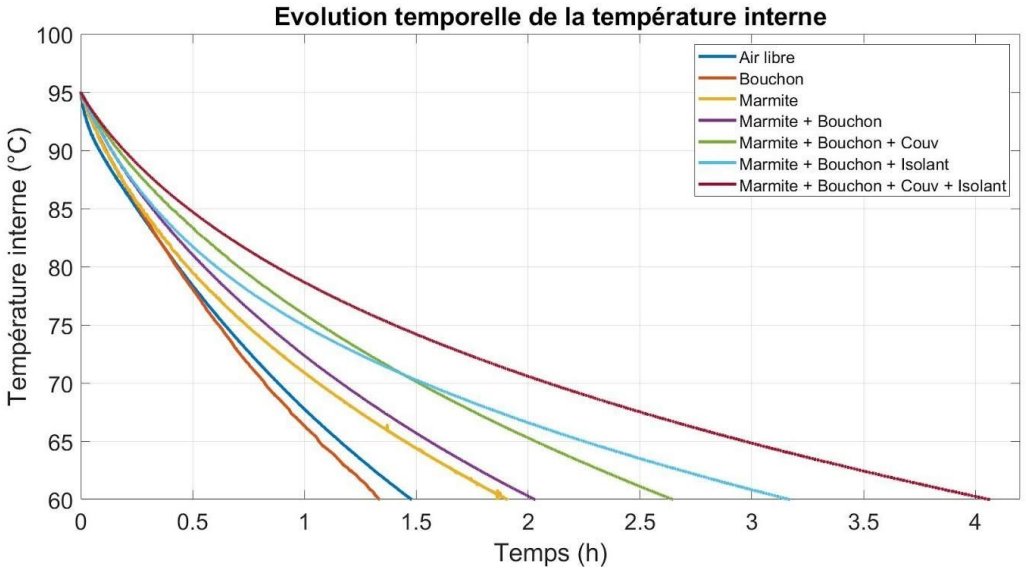


Comparons cette expérience avec les deux précédentes. Nous observons que l'isolant permet bien d'augmenter les performances par rapport au cas sans isolant et sans couverture. Cependant lorsque nous comparons avec le cas *couverture de survie* nous pouvons évaluer l'influence de l'écran radiatif par rapport à une isolation extérieur.

D'abord, nous remarquons que lorsque l'eau de la casserole est très chaude, l'expérience avec couverture de survie a de meilleurs résultats. Cependant le cas avec isolant est plus intéressant pour des durées plus longues (au delà de 1h30min). Ainsi pour des cuissons d'une durée de moins de **1h30min** il est **plus intéressant de choisir une couverture de survie plutôt qu'un isolant extérieur** pour sa marmite norvégienne.

MN + bouchon + survie + isolant

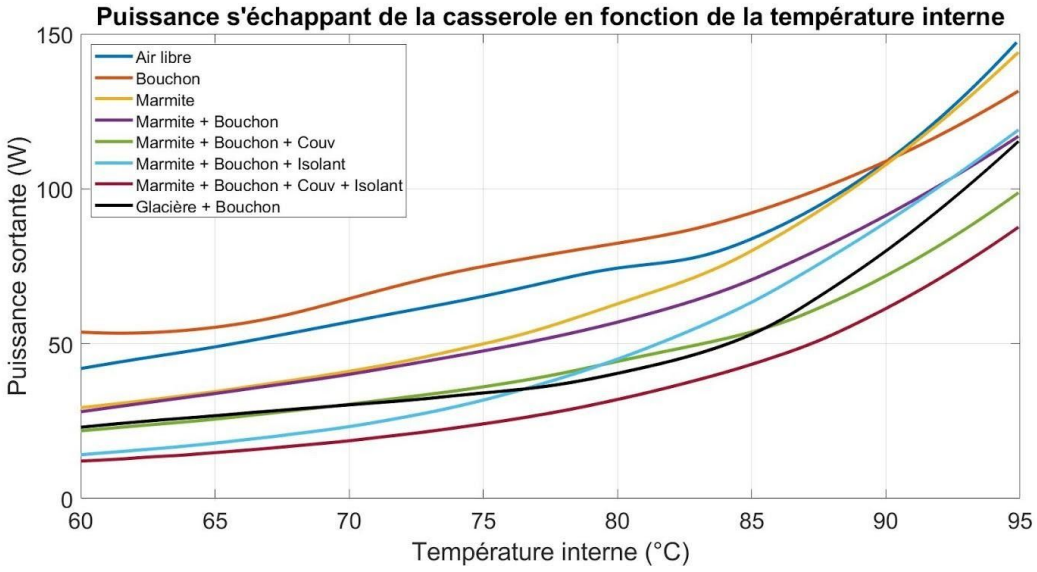


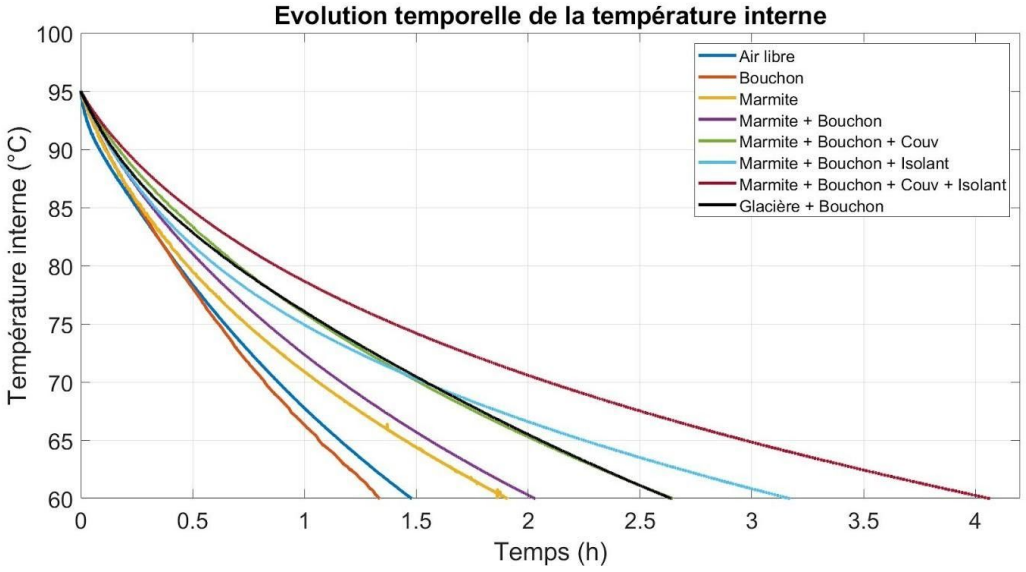


Comparer cette expérience au cas caisse intérieur + bouchons + survie nous permet d'évaluer quantitativement l'influence de l'isolation extérieure.

Nous observons que le gain de performance est très important, et atteint les 60°C en un peu plus de 4h avec l'isolant contre un peu plus de 2h30min sans.
Nous pouvons déduire que **l'isolant est nécessaire pour réaliser des cuissons longues de plus de 3h.**

Glacière + bouchon



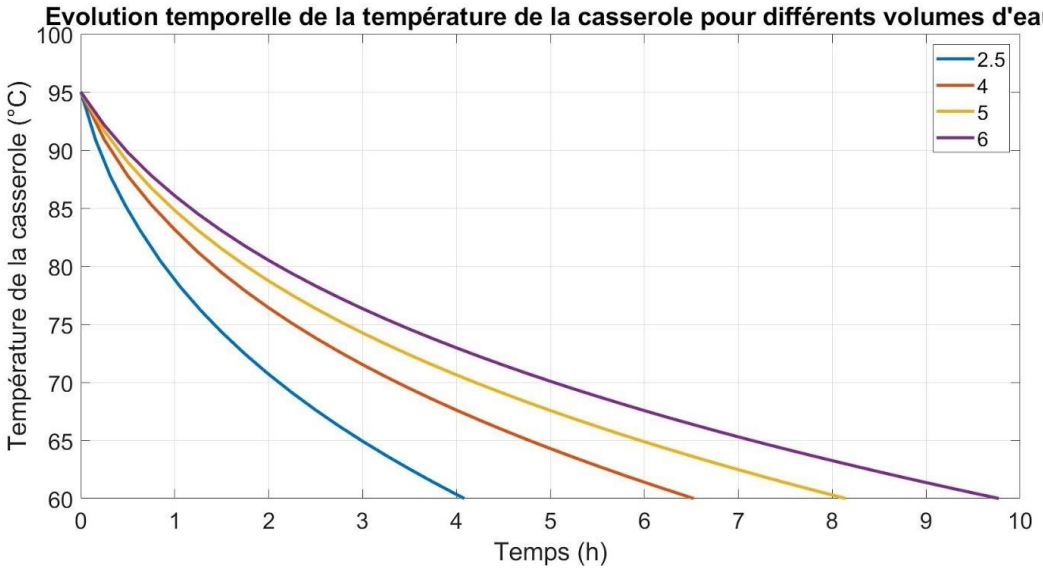


Les performances de la glacière avec des bouchons sont très proches de celle de notre caisse avec écran radiatif. En effet nous remarquons que les deux courbes sont presques confondues dans les deux graphes. Ainsi nous en déduisons que pour une personne qui possède déjà une glacière il est simple de l'utiliser en tant que MN, ses propriétés restant très avantageuses pour des cuissons de durée inférieures à 1h30min.

Néanmoins, elle reste bien moins intéressante qu'une MN avec couverture de survie et isolant. Il est donc préférable de construire une marmite norvégienne et de l'isoler plutôt que d'utiliser une glacière simplement.

VII. Simulation pour différents volumes d'eau

Le but de cette partie est d'estimer le comportement de la marmite norvégienne avec des volumes d'eau différents. Nous utilisons la courbe expérimentale réalisée avec 2,5 L d'eau dans la marmite norvégienne avec couverture de survie+bouchons+isolant. Nous simulons cette même expérience mais avec des volumes d'eau plus importants (4L, 5L, 6L). Nous supposons toujours que la température autour de la casserole à l'intérieure de la marmite est uniforme. Nous construisons ces simulations grâce au graphe de puissance du cas marmite+bouchon+survie+isolant.



Nous observons que les temps pour atteindre les 60°C dans la casserole sont pratiquement proportionnels au volume et donc à la masse d'eau. Ainsi on peut appliquer un coefficient de proportionnalité entre les temps donnés dans cette annexe et les volumes d'eau que l'on souhaite utiliser pour une cuisson. Finalement, le volume d'eau agissant comme une masse thermique supplémentaire, il influe sur le temps de baisse de la température de manière proportionnelle.

VIII. Conclusion

En définitive, nos mesures nous ont permis de distinguer les éléments nécessaires à la réalisation d'une marmite norvégienne efficace. Il paraît désormais indispensable d'utiliser une boite avec un écran radiatif, dans laquelle nous posons la casserole sur des plots. Ainsi, nous avons déterminé les meilleures performances d'une MN permettant de garder une température élevée dans une casserole afin de terminer la cuisson d'un repas.

La MN la plus performante, peu importe le temps de cuisson est obtenue en équipant sa MN d'une couverture de survie, de plots pour surélever la casserole (=bouchons), et d'un isolant extérieur. Dans ces conditions il est alors possible de réaliser des cuissons de durées proches de 4h. En effet, la température au bout de 4h est toujours de 60°C. Les pertes thermiques vers l'extérieur sont les moins importantes, c'est également dans ce cas que les cuissons rapides sont les plus efficaces.

Pour des cuissons comprises entre 1h30min et 3h nous pouvons nous contenter d'une MN avec un isolant extérieur, et sans couverture de survie. En effet à partir d'1h30min, la caisse avec isolant devient plus efficace que la caisse avec couverture de survie.

Pour des cuissons inférieures à 1h30min, nos expériences nous ont permis de conclure que nous pouvons faire le choix de garder uniquement une couverture de survie dans la MN, sans isolation extérieure. Ce qui est à peu près équivalent à utiliser une glacière avec des plots à l'intérieur pour surélever la casserole quand on la pose. Ainsi si l'on possède déjà une glacière et qu'on ne souhaite pas se lancer dans la construction d'une MN, il suffit de l'utiliser comme telle pour réaliser des gains d'énergie. Cependant, nous n'invitons pas à acheter une glacière uniquement pour en faire une MN, il reste préférable de fabriquer soi-même sa caisse en bois et d'y placer une couverture de survie. En effet la fabrication industrielle de glacière en plastique engendre des émissions carbones et l'utilisation de pétrole dont on peut se passer en construisant soi-même sa MN avec des matériaux de récupération.

Bibliographie

[1] Yann Bultel, *Hydraulique et transferts*, Chapitre 4 - Rayonnement, page 12; ENSE3
[Retour Lecture]

[2] Yann Bultel, *Hydraulique et transferts*, Chapitre 1 - Introduction, page 9; ENSE3
[Retour Lecture]

[3] Site présentant les chiffres pour différents matériaux, Parc Ecohabitat,
http://www.parc-ecohabitat.com/files/30845/11264173312559.pdf
[Retour Lecture]

[4] Risques sanitaires des isolants, Bruxelles Environnement,
https://www.guidebatimentdurable.brussels/fr/tenir-compte-des-risques-sanitaires.html?IDC=7286
[Retour Lecture]

[5] Impact environnemental des différents isolants, Parc Ecohabitat,
http://www.parc-ecohabitat.com/Files/30845/11264173150663.pdf
[Retour Lecture]