



HAL
open science

Modélisation des flux dans un poêle à bois

Paul Aubin, Robin Bouy

► **To cite this version:**

Paul Aubin, Robin Bouy. Modélisation des flux dans un poêle à bois. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2017. hal-01823769

HAL Id: hal-01823769

<https://hal.univ-lorraine.fr/hal-01823769>

Submitted on 27 Jun 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

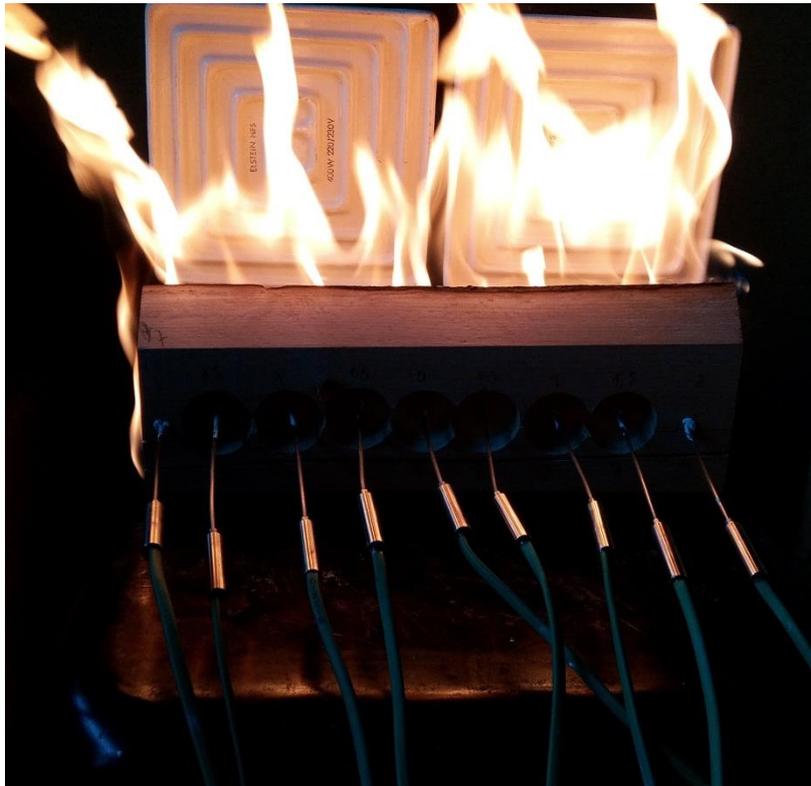
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Rapport de Projet de Fin d'Etudes

- Promo 2017 -

Modélisation des flux dans un poêle à bois



AUBIN Paul / BOUY Robin

3 Février 2017

Enseignants responsables : KHELIFA Mourad / ROGAUME Yann

Enseignant lecteur : OUDJENE Marc

SOMMAIRE

Table des matières

Remerciements	8
Principales notations	9
I. Introduction.....	10
II. Étude bibliographique.....	11
III. Modélisation théorique sur le logiciel « Abaqus ».....	13
1. Bûche ronde soumise à un flux constant	14
2. Bûche ronde soumise à un flux différencié.....	14
3. Quartier de bûche soumis à un flux différencié	16
4. Quartier de bûche et prise des facteurs thermiques.....	18
i. Prise en compte de l'émissivité ϵ	18
ii. Prise en compte de la convection naturelle h	20
iii. Prise en compte du rayonnement du charbon, de l'émissivité, de la convection et de la perte de masse de la bûche.....	21
5. Bûche à géométrie réelle.....	24
i. Prise en compte des coefficients extérieurs	24
ii. Mise en place de la subroutine	24
IV. Essais	27
1. Objectifs.....	27
2. Géométrie des éprouvettes.....	27
3. Dispositif expérimental.....	28
4. Mesures préalables	30
5. Analyse des essais	31
i. Essai n°1	31
ii. Essai n°2	31
iii. Essai n°3	32
iv. Essai n°4	32

SOMMAIRE

v.	Essai n°5	33
vi.	Essai n°6	33
vii.	Essai n°7	33
viii.	Essai n°8.....	34
ix.	Essai n°10 et n°11.....	34
x.	Essai bûche humide n°2 et n°3.....	35
6.	Couche de charbon des éprouvettes testées	36
7.	Comparaison des températures des différents essais	39
8.	Comparaison des pertes de masse des différents essais	45
V.	Conclusion	47
VI.	Bibliographie.....	48
	Travaux cités.....	48
VII.	ANNEXES	49
1.	Essai n°1	49
2.	Essai n°2	50
3.	Essai n°3	51
4.	Essai n°4	52
5.	Essai n°5	53
6.	Essai n°6	54
7.	Essai n°7	55
8.	Essai n°8	56
9.	Essai n°10	57
10.	Essai n°11	58
11.	Essai humide n°1	59
12.	Essai humide n°2.....	60
13.	Création du modèle « Abaqus ».....	61

SOMMAIRE

i.	Créer la géométrie.....	61
ii.	Renseigner les propriétés du bois	63
iii.	Créer l'assemblage.....	63
iv.	Créer les étapes de chargement.....	63
v.	Renseigner les attributs du modèle.....	64
vi.	Renseigner les interactions	64
vii.	Renseigner le flux.....	64
viii.	Créer le maillage	65
ix.	Placer les thermocouples	65
x.	Démarrer le calcul.....	65
xi.	Extraire les résultats des thermocouples	65
	Figure 1 : Rendements énergétiques moyens réels pour les différents segments du parc français	10
	Figure 2 : Densité de rayonnement en fonction de la distance (<i>Manuel Technova 1993</i>)	15
	Figure 3 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de ϵ	19
	Figure 4 : Comparaison des résultats obtenus en fonction de la convection	21
	Figure 5 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de tous les paramètres.....	22
	Figure 6 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de la géométrie	24
	Figure 7 : Subroutine utilisée pour cette modélisation.....	25
	Figure 8 : Comparaison des résultats obtenus après simulation et essai	27
	Figure 9 : Géométrie des éprouvettes	28
	Figure 10 : Plan des thermocouples	29
	Figure 11 : Positions des mesures d'épaisseur de la couche de charbon sur la bûche.....	36
	Figure 12: Représentation des épaisseurs de charbon pour les différentes éprouvettes	37
	Figure 13 : Créer une géométrie.....	61
	Figure 14 : Créer les différentes parties de la bûche.....	62

SOMMAIRE

Figure 15 : Créer la ligne de positionnement des thermocouples	62
Tableau 1 : Données et calculs permettant de déterminer la puissance émise par l'oxydation du charbon.....	22
Tableau 2 : Humidité, masse volumique, longueur et températures extérieure.....	30
Tableau 3 : Epaisseur de la couche de charbon des différentes éprouvettes	37
Tableau 4 : Calcul de la masse volumique du charbon	38
Tableau 5 : Pentas de pertes de masse des différents essais.....	46
Photographie 2 : Bûche n°4 à t = 0 s.....	19
Photographie 1 : Bûche n°4 à t = 1 000 s	19
Photographie 3 : Dispositif d'essai	28
Photographie 4 : Dispositif et plaque métallique.....	30
Photographie 5 : Résultat du premier essai	31
Photographie 6 : Résultat du deuxième essai	31
Photographie 7 : Résultat du troisième essai.....	32
Photographie 8 : Résultat du quatrième essai.....	32
Photographie 9 : Résultat du cinquième essai	33
Photographie 10 : Résultat du sixième essai.....	33
Photographie 11 : Résultat du septième essai	33
Photographie 12 : Résultat du huitième essai.....	34
Photographie 13 : Résultat du dixième essai	34
Photographie 14 : Résultat du onzième essai.....	34
Photographie 15 : Résultat du douzième essai (<i>bûche humide 2</i>).....	35
Photographie 16 : Résultat du treizième essai (<i>bûche humide 3</i>).....	35
Photographie 17 : Comparaison des bûches à 27% d'humidité avec une bûche à 10% au centre	36
Schéma 1 : Schéma de répartition des flux sur la bûche.....	14
Schéma 2 : Schéma de répartition des flux sur la bûche.....	15
Schéma 3 : Schéma de répartition des flux sur la bûche.....	16

SOMMAIRE

Schéma 4 : Mouvement de l'air provoqué par la convection.....	20
Schéma 5 : Montage expérimental.....	29
Graphique 1 : Évolution de la conductivité thermique de la buche en fonction de la température.....	11
Graphique 2 : Évolution de la capacité thermique de la bûche en fonction de sa température.....	12
Graphique 3 : Évolution de la densité d'une bûche de hêtre en fonction de la température.....	12
Graphique 4 : Evolution de la température pour différentes profondeurs dans la bûche.	17
Graphique 5 : Comparaison des températures théoriques et expérimentales à 2 cm de la surface du quartier de bûche.	18
Graphique 6 : Comparaison des profils de température entre « Abaqus » et les essais.....	23
Graphique 7 : Comparaison des profils de température entre « Abaqus » et les essais.....	26
Graphique 8 : Profils des températures au sein de la bûche humide n°2.....	35
Graphique 9 : Comparaison des températures des différents essais en surface	39
Graphique 10 : Comparaison des températures des différents essais à 0.5cm	41
Graphique 11 : Comparaison des températures des différents essais à 1cm	42
Graphique 12 : Comparaison des températures des différents essais à 1.5cm	43
Graphique 13 : Comparaison des températures des différents essais à 2cm	44
Graphique 14 : Comparaison des pertes des masses des différents essais	45
Graphique 15: Perte de masse essai 1	49
Graphique 16: Perte de masse essai 2	50
Graphique 17: Températures essai 2	50
Graphique 18: Perte de masse essai 3	51
Graphique 19: Températures essai 3	51
Graphique 20: Perte de masse essai 4	52
Graphique 21: Températures essai 4	52
Graphique 22 : Perte de masse essai 5	53
Graphique 23 : Températures essai 5	53
Graphique 24 : Perte de masse essai 6	54
Graphique 25 : Températures essai 6	54

SOMMAIRE

Graphique 26 : Perte de masse essai 7	55
Graphique 27 : Températures essai 7	55
Graphique 28: Perte de masse essai 8	56
Graphique 29 : Températures essai 8	56
Graphique 30 : Perte de masse essai 10	57
Graphique 31 : Températures essai 10	57
Graphique 32 : Perte de masse essai 11	58
Graphique 33 : Températures essai 11	58
Graphique 34 : Perte de masse essai humide 1	59
Graphique 35 : Températures essai humide 1	59
Graphique 36 : Perte de mass essai humide 2.....	60
Graphique 37 : Températures essai humide 2.....	60

Remerciements

Nous remercions en premier lieu nos encadrants Messieurs Yann ROGAUME et Mourad KHELIFA pour le temps précieux qu'ils nous ont accordé. Sans oublier M. Stéphane AUBERT sans qui nous n'aurions pu réaliser nos manipulations dans de si bonnes conditions. Enfin, un grand merci à M. Van Diem THI qui a fait preuve de beaucoup de patience pour nous apprendre à utiliser le logiciel « Abaqus » et qui nous a aidé à de nombreuses reprises pour résoudre des problèmes sur celui-ci.

Principales notations

Caractéristiques thermo-physiques du bois :

C_p Capacité thermique ($J/K.kg$)

λ Conductivité thermique ($W/m.K$)

ρ Masse volumique (kg/m^3)

Transfert thermique :

h Coefficient de convection ($W/m^2.K$)

ε Emissivité d'une surface (*Adimensionné*)

Φ Flux surfacique (kW/m^2)

I. Introduction

De nos jours force est de constater que comme le dit si bien le slogan publicitaire : « l'énergie est notre avenir, économisons-la », loin d'être un conseil, c'est une obligation vitale. Pour le commun des mortels, elle est à économiser, pour une infime partie de la communauté scientifique elle est à découvrir ; enfin pour d'autres, tout aussi soucieux de l'avenir mais peut être plus pragmatique, elle doit être surtout rationalisée, optimisée. Parmi toutes ces sources, pour la production de chaleur, la première en Europe, mais également en France, c'est la biomasse et qui plus est : renouvelable. L'homme n'a pu en arriver là où il en est à ce jour sans ce feu, cette énergie. D'un simple feu de camp on est arrivé aux chaudières de plus en plus sophistiquées en passant par les gazéificateurs. Comme le montre la *figure 1*, le rendement énergétique des appareils de chauffage au bois augmente nettement depuis 1996, en particulier celui du poêle à bois. La mise en place du « *label flamme verte* » incite chercheurs, ingénieurs, techniciens, aux progrès scientifiques et techniques majeurs et qui sont réalisés depuis quelques décennies. Ces études portent sur la compréhension du phénomène de combustion ; ainsi il devient possible d'optimiser cette dernière, sa modélisation.

	Avant 1996	Entre 1997-2004	De 2005-2011	Après 2012
Foyers ouverts	10%	10%	10%	10%
Poêle à bois	45%	65%	70%	75%
Foyers fermés/inserts	45%	60%	65%	70%
Poêle à granulés	/	80%	85%	85%
Chaudières à bois	65%	70%	75%	80%
Chaudière à granulés	/	85%	90%	90%

Figure 1 : Rendements énergétiques moyens réels pour les différents segments du parc français

La modélisation des différents flux qui entrent dans la combustion peut-elle concourir à l'optimisation des rendements énergétiques de systèmes de chauffage au bois ?

L'objectif de ce document est de participer, à sa mesure, à l'élaboration d'un modèle mathématique des différents flux thermiques à l'intérieur d'un poêle à bois. Ce modèle doit contribuer à une compréhension plus fine de ces mouvements et doit donc permettre d'améliorer l'efficacité énergétique des appareils domestiques de chauffages au bois.

Dans un premier temps, nous allons modéliser, grâce au logiciel « Abaqus », la dégradation d'une bûche sous l'effet d'un flux thermique, pour connaître le comportement des flux gazeux issus de la combustion. Parallèlement nous réaliserons des essais de dégradation thermique d'une bûche. Ces essais ont pour objectifs de comparer modélisation et expérience.

Enfin, une conclusion portera sur les perspectives à venir, résultants de ce travail.

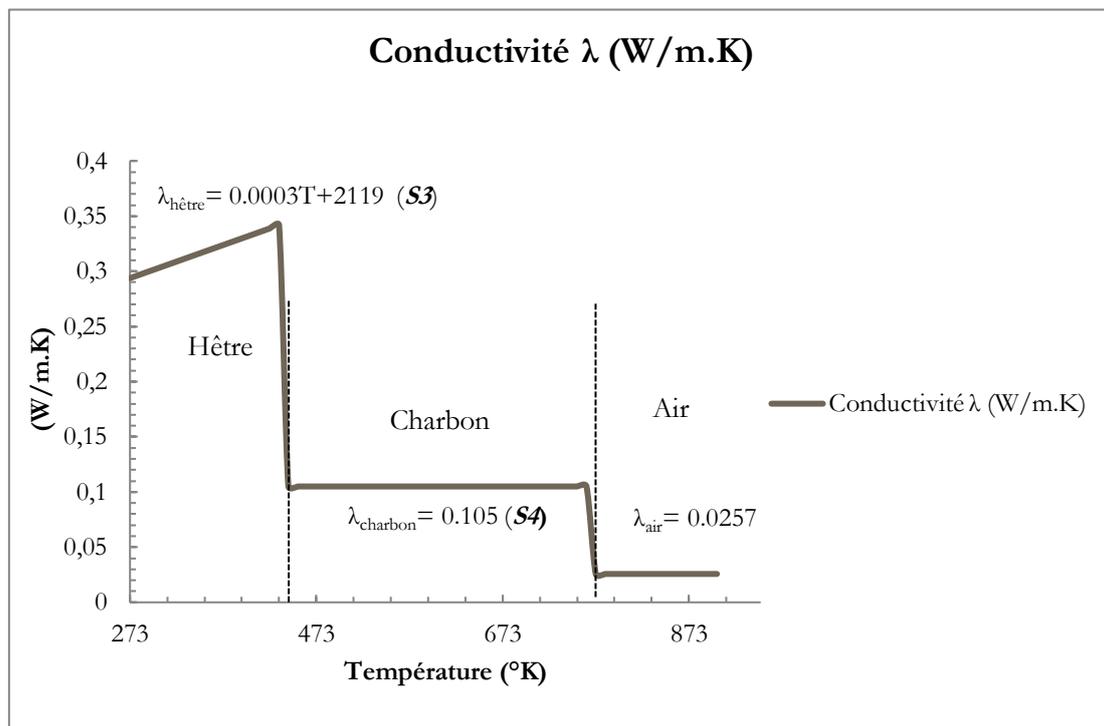
II. Étude bibliographique

Avant de débiter la simulation à l'aide du logiciel « Abaqus », il nous faut dans un premier temps trouver les caractéristiques de notre matériau qui est le hêtre. Ces caractéristiques sont :

- La Capacité thermique (C_p)
- La conductivité thermique (λ)
- La masse volumique (ρ)

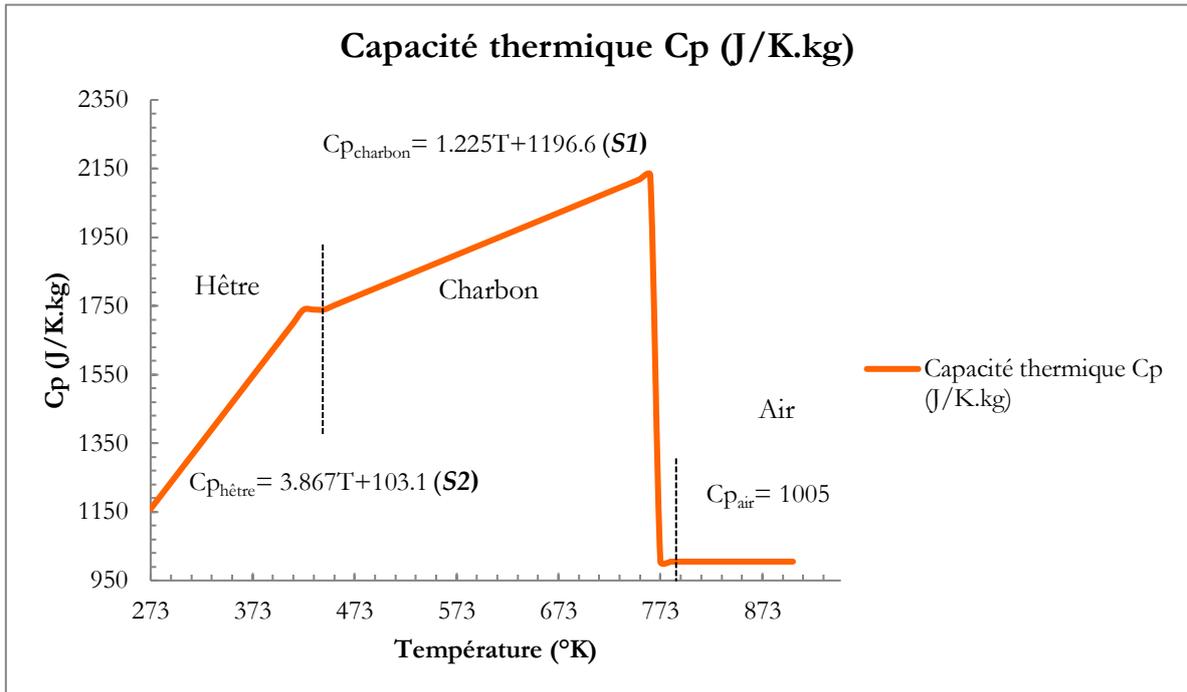
Comme la modélisation porte sur la combustion d'une bûche, il est d'ores et déjà utile de rechercher ces trois coefficients pour le charbon et l'air. En effet, la simulation permettra de modéliser la combustion du bois et l'oxydation du charbon en modifiant les caractéristiques de notre matériau en fonction de la température.

Les graphiques 1, 2 et 3 ci-dessous représentent les évolutions des caractéristiques choisies pour la modélisation. Les courbes représentent **une moyenne des différentes valeurs trouvées dans les sources bibliographiques**¹ :

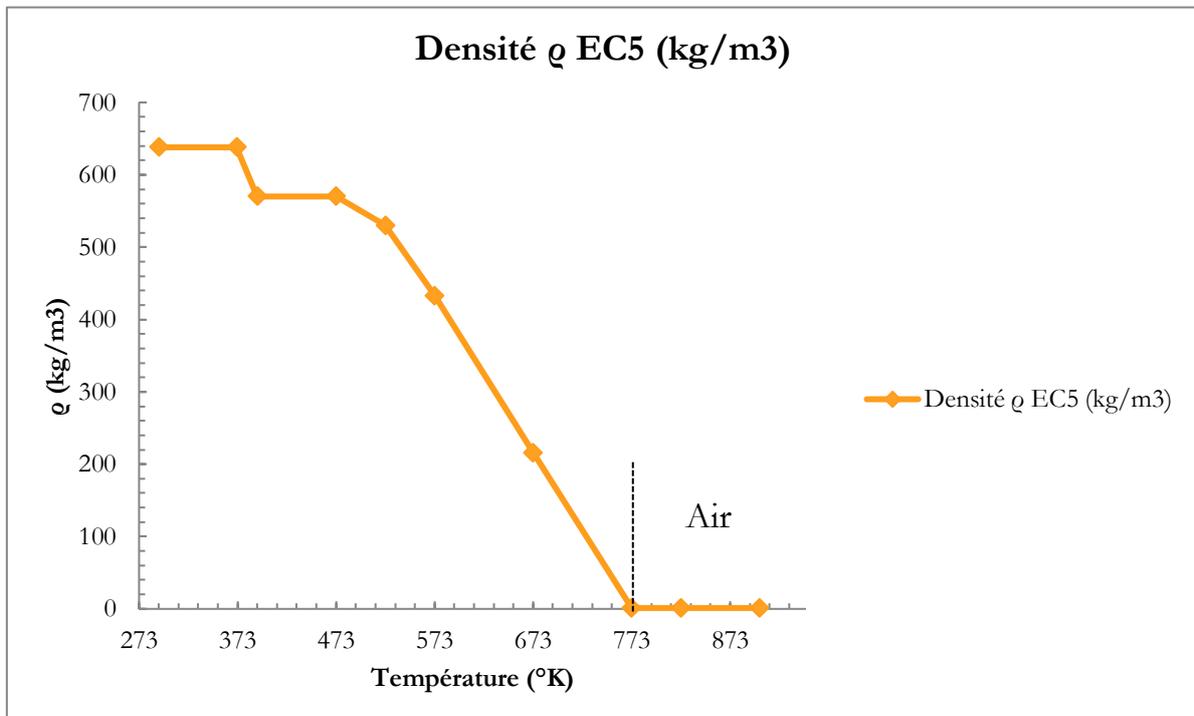


Graphique 1 : Évolution de la conductivité thermique de la bûche en fonction de la température.

¹ Cf. Sources [1], [2], [3] et [4]



Graphique 2 : Évolution de la capacité thermique de la bûche en fonction de sa température.



Graphique 3 : Évolution de la densité d'une bûche de hêtre en fonction de la température.

L'évolution de la densité du hêtre est issue des « Euro codes 5 » (*EC5*), la densité diminue quand la température augmente car le bois se transforme en charbon puis en cendre. Lorsque notre bûche a atteint l'état de cendre, à partir de 773 °K (*soit 500 °C*), celle-ci est considérée comme de l'air. Il en va de même pour la conductivité de la bûche, elle diminue quand la température augmente car l'air est plus isolant que le charbon lui-même plus isolant que le bois. Enfin la capacité calorifique du charbon est plus importante que celle du hêtre c'est pourquoi la courbe augmente dans un premier temps puis dès lors que le charbon a pyrolysé, la capacité thermique chute pour atteindre la valeur de celle de l'air.

III. Modélisation théorique sur le logiciel « Abaqus »

Pour cela nous avons modélisé dans un premier temps sous « Abaqus » la dégradation d'une bûche sous l'effet d'un flux de chaleur. Celui-ci était constant et appliqué sur la moitié du disque ou du cylindre (*une modélisation 2D et 3D a été réalisée*). Ces deux premières simulations avaient pour but de se familiariser avec le logiciel.

Dans un second temps, nous avons effectué la même simulation avec un flux non uniforme (*prenant en compte la distance entre la surface émettrice et la surface réceptrice*).

Puis, une simulation a été faite avec comme modèle un quartier de bûche pour être le plus cohérent possible avec les bûches qui sont à disposition pour réaliser les essais de dégradations thermiques.

Enfin, une simulation a été réalisée avec comme modèle une bûche ayant les mêmes dimensions qu'une bûche réelle.

Les bûches utilisées pour les essais pratiques sont en hêtre sans écorce (*les humidités et masses volumiques de chaque éprouvette sont relevées et sont renseignées²*). L'écorce est volontairement enlevée pour les expériences car les phénomènes de combustion sont peu connus et peuvent perturber ceux du bois.

² Cf. IV. Essais 4. Mesures préalables

1. Bûche ronde soumise à un flux constant

La première modélisation est effectuée sur une bûche ronde entière ($D=20cm$) à laquelle on impose un flux constant de 6 kW à la moitié de sa surface. Les simulations ont été faites en 2D et en 3D. Voir *schéma 1* ci-dessous.

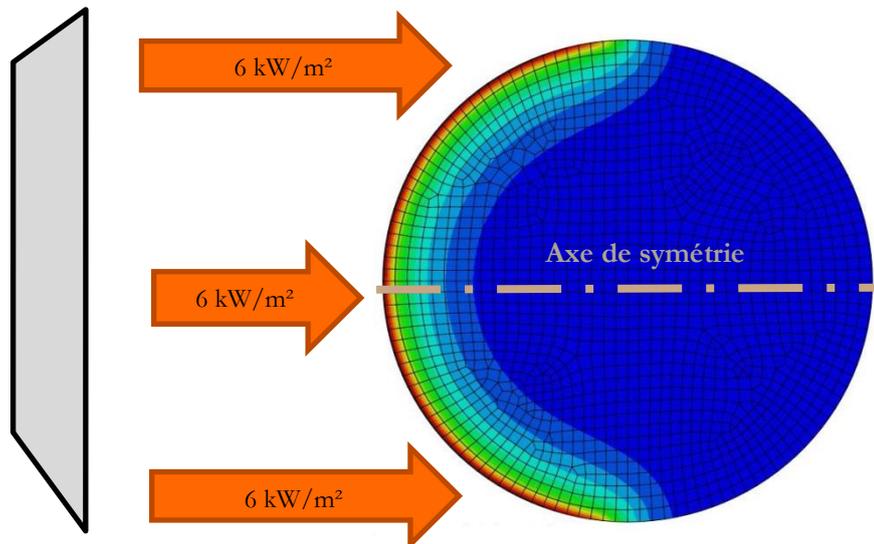


Schéma 1 : Schéma de répartition des flux sur la bûche

Cette simulation avait pour but de se familiariser avec le logiciel « Abaqus », c'est pourquoi l'émissivité, la convection et rayonnement du charbon n'ont pas été pris en compte. Des améliorations doivent être apportées au modèle pour affiner les résultats obtenus.

2. Bûche ronde soumise à un flux différencié

En réalité, le flux n'est pas constant sur toute la surface exposée au rayonnement et pour respecter davantage la réalité un flux dépendant de la distance entre le panneau rayonnant et la bûche a été imposé, le choix de l'intensité des flux a été fait à partir de la *figure 2*³ ci-dessous, le dispositif étant composé de 4 panneaux de 400 W , la densité de rayonnement maximale est obtenue à 5 cm de la surface du panneau.

³ Cf. Source [5]

Modélisation théorique sur le logiciel « Abaqus »

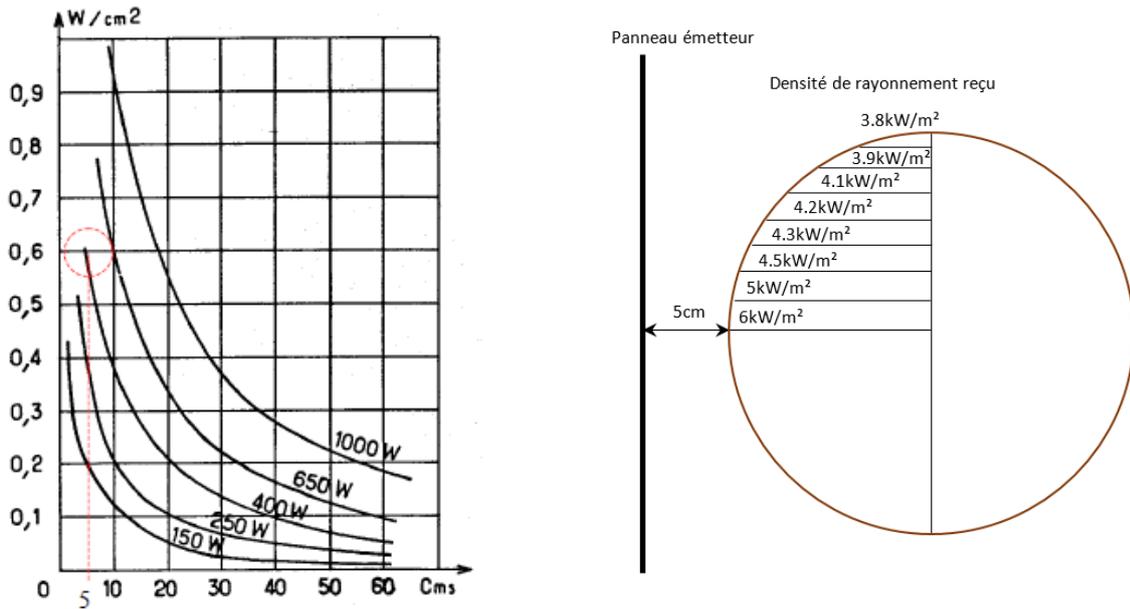


Figure 2 : Densité de rayonnement en fonction de la distance (*Manuel Technova 1993*)

Le flux ainsi calculé peut-être appliqué dans le logiciel « Abaqus » de cette manière (*schéma 2*):

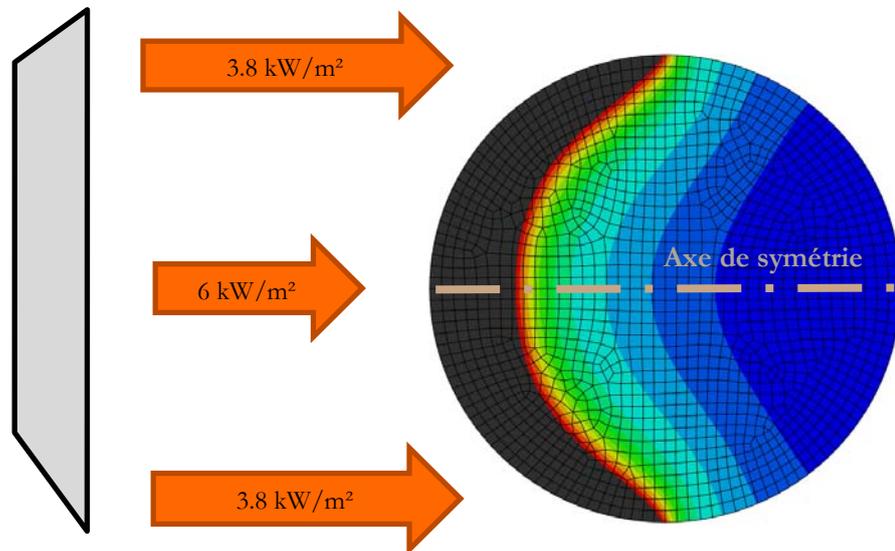


Schéma 2 : Schéma de répartition des flux sur la bûche

Pour appliquer plusieurs valeurs différentes de flux sur une même géométrie, des surfaces correspondantes ont dû être créées⁴ (*comme l'indique la figure n°2*). D'ores et déjà une observation peut être faite, les surfaces qui reçoivent un flux d'une intensité moins importante (*3.9 kW/m² et 3.8 kW/m²*) possèdent une couche de charbon moins importante.

⁴ Cf. VII. ANNEXES 13. Création du modèle «Abaqus»

Cette prise en compte du flux permet d'affiner la modélisation même si beaucoup de paramètres thermiques n'ont pas encore été pris en compte.

3. Quartier de bûche soumis à un flux différencié

Les bûches disponibles pour les tests sont des quartiers de bûches, un modèle « Abaqus » a donc été réalisé avec cette nouvelle géométrie comme présenté dans le *schéma 3* :

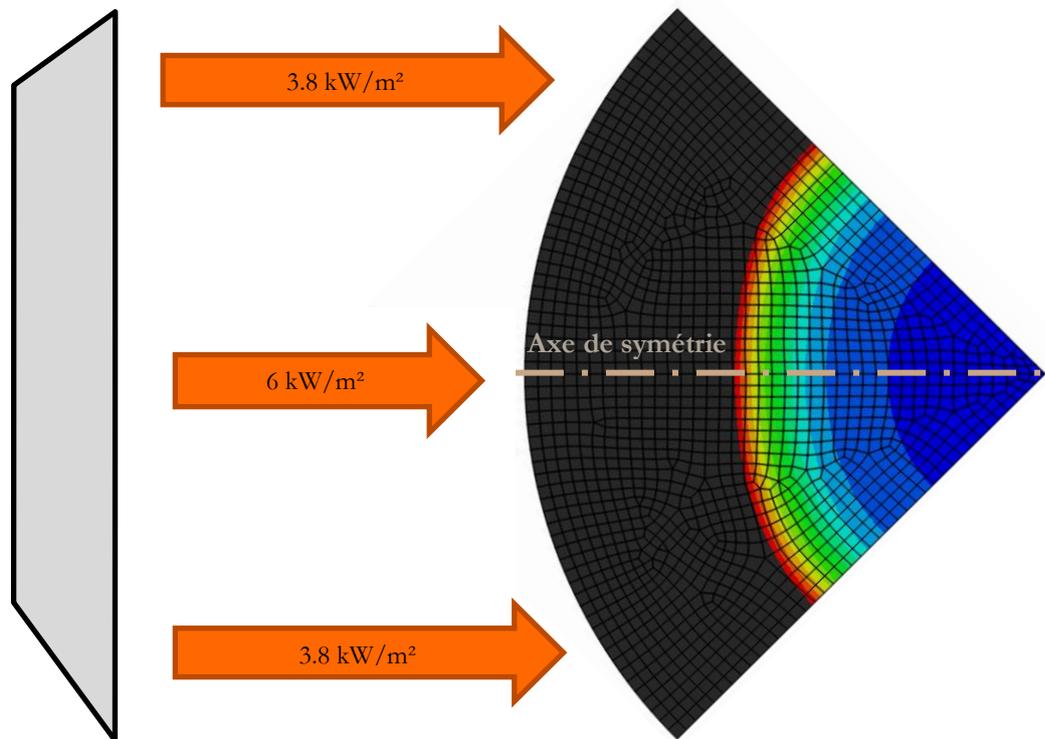
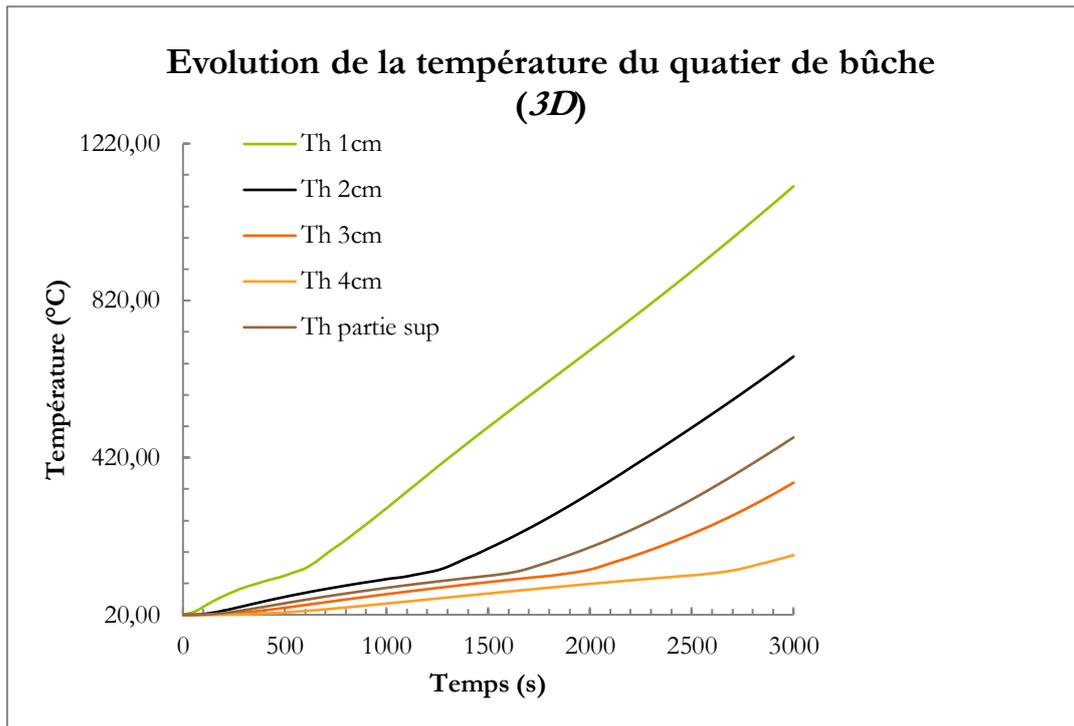


Schéma 3 : Schéma de répartition des flux sur la bûche

Ce modèle correspond de plus en plus aux bûches utilisées pour les essais. Pour étudier l'évolution de la température aux différentes épaisseurs de la bûche, des thermocouples ont été placés sur le modèle. Le *graphique 4* ci-dessous renseigne ces différentes températures en fonction du temps :



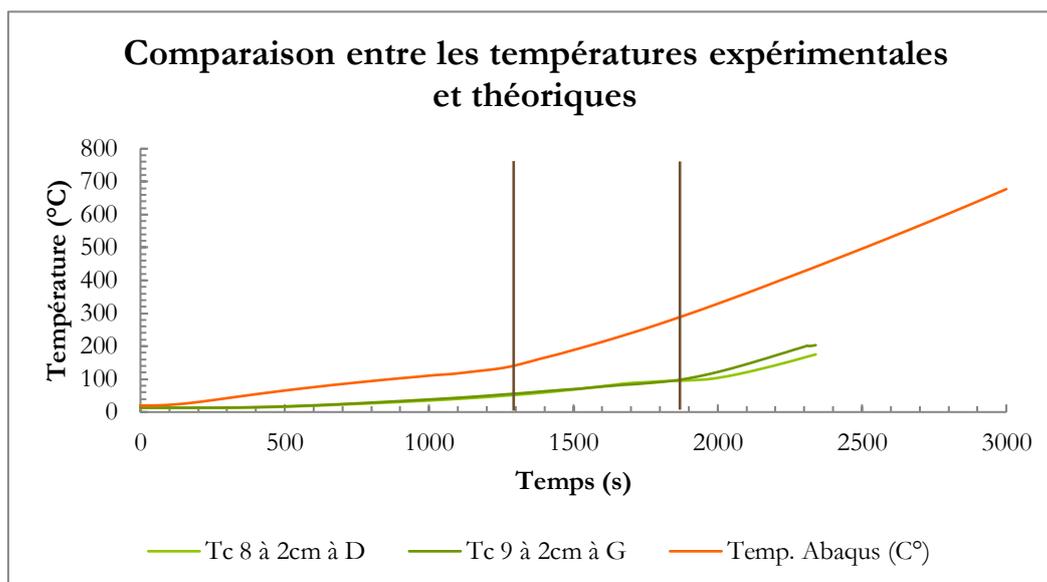
Graphique 4 : Evolution de la température pour différentes profondeurs dans la bûche

La température à 1 et 2 centimètres de la surface semble très élevée aux vues des résultats des premiers essais. Les allures des courbes de températures correspondent cependant à celles obtenues lors des essais de dégradation. Plusieurs raisons peuvent expliquer ces différences :

- Le modèle « Abaqus » ne prend pas en compte l'émissivité du bois et considère que la bûche comme un corps noir ($\varepsilon = 1$), le modèle est donc soumis à un flux de plus forte intensité que lors des essais.
- Les essais sont réalisés en extérieur, le coefficient de convection (h en $W/m^2.K$) joue donc un rôle important dans l'évolution de la température de la bûche. Mais celui-ci n'est pas naturellement pris en compte dans « Abaqus », l'utilisateur doit le renseigner.
- La température ambiante durant les essais dépend de la température extérieure, or dans « Abaqus » elle est considérée égale à 20 °C alors que durant les essais celle-ci est plutôt comprise entre 0 °C et 10 °C. Ce facteur joue un rôle important dans la montée en température de la bûche.
- Durant les essais, la bûche est placée devant le panneau rayonnant qui est ensuite allumé. Cependant celui-ci n'est pas en régime permanent ($6 \text{ kW}/m^2$ à 5 centimètres) immédiatement, il a besoin d'environ 10 minutes pour atteindre ce régime. Quant à lui, le modèle « Abaqus » est soumis, sans délai, à un flux de $6 \text{ kW}/m^2$. Ce dernier paramètre influe directement sur le profil de température de la bûche.

Le graphique ci-dessous illustre les écarts énoncés précédemment et leurs raisons possibles. Il n'y a quasiment pas de différences entre les deux valeurs de températures issues de l'essai (*les écarts possibles peuvent être dus à la précision des perçages sur un matériau non homogène avec des géométries jamais identiques et aux fissures qui apparaissent de manière aléatoire lors des essais de combustion*).

Le changement de pente de la courbe ne s'effectue donc pas au même moment car les bûches expérimentales ont besoin de plus de temps pour atteindre une température donnée. Le *graphique 5* permet d'aboutir aux mêmes observations.



Graphique 5 : Comparaison des températures théoriques et expérimentales à 2 cm de la surface du quartier de bûche.

Tous ces facteurs doivent être pris en compte pour obtenir un modèle plus précis et plus proche de réalité.

4. Quartier de bûche et prise des facteurs thermiques

i. Prise en compte de l'émissivité ϵ

L'émissivité est un coefficient qui décrit la capacité d'un matériau à absorber et à émettre l'énergie radiative. Un « corps noir » est un objet idéal car il renvoie la totalité de son énergie. Les objets réels, comme une bûche, absorbent un flux toujours inférieur à celui envoyé par la source. Le facteur d'émissivité ϵ est donc le rapport entre le flux émis par l'objet et le flux émis par le corps noir à la même température.

Comme la surface des bûches n'est pas noire, cette étape consiste à regarder, à l'aide des essais précédemment réalisés, à quel moment la surface de la bûche passe d'une couleur brune à une couleur noire. (*Photographie 2*)



Photographie 2 : Bûche n°4 à t = 0 s Photographie 2 : Bûche n°4 à t = 1 000 s

Au départ de la modélisation, l'émissivité est prise égale à 0.75 (*ce qui revient à dire que la bûche reçoit $0.75 * \Phi$ émis par le panneau rayonnant*). La couleur de la bûche devient noire après 1 000 secondes d'expérience (*valeur empirique déterminée sans calcul mais par observation sur plusieurs essais*). Au bout de cette première phase la température en surface mesurée par le thermocouple est d'environ 250 °C. Comme il est impossible de faire varier l'émissivité en fonction de la température dans cette version étudiante d'« Abaqus », il nous faut créer une première étape avec une émissivité égale à 0.75 puis une deuxième étape avec une émissivité égale à 1.

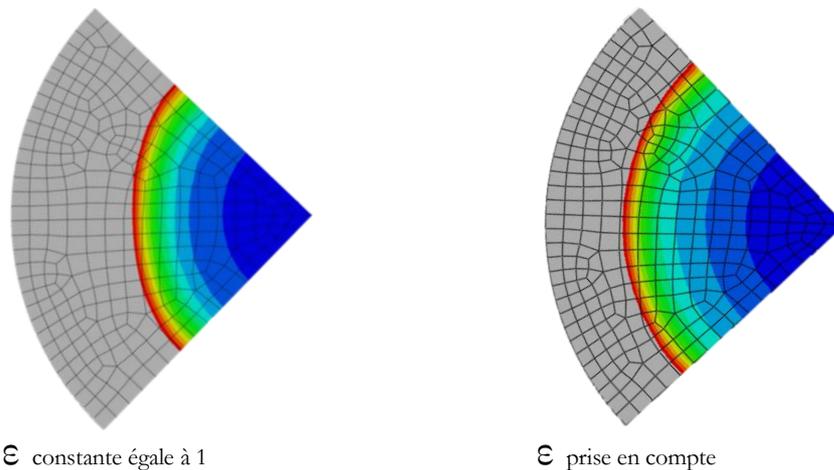


Figure 3 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de ϵ

La prise en compte de l'émissivité (*figure 3*) permet de réduire la couche de charbon obtenue à l'issue de la modélisation, ce qui est logique car la bûche, dans la première modélisation reçoit l'intégralité du flux alors que dans la seconde, elle ne reçoit qu'une partie

du flux le temps que la surface devienne un corps noir. Ce qui permet donc d'affiner le modèle. Cependant l'épaisseur de la couche de charbon reste plus importante que lors des expériences. Un coefficient de convection doit donc être pris en compte.

ii. Prise en compte de la convection naturelle h

La convection naturelle met en mouvement un fluide (*schéma 4*) car il subit des différences de températures qui elles-mêmes engendrent des différences de masses volumiques. L'air chaud se déplace donc vers le haut et l'air froid vers le bas.

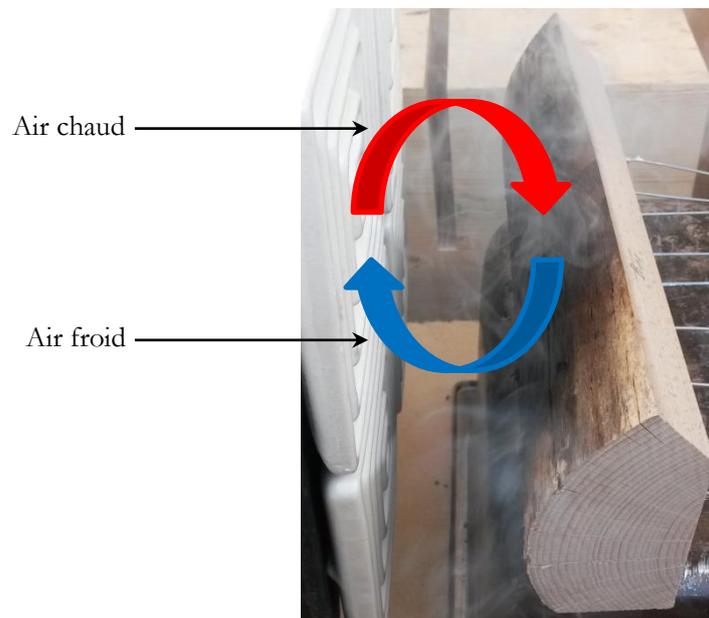


Schéma 4 : Mouvement de l'air provoqué par la convection

La couche de charbon obtenue avec la modélisation recouvre entièrement la surface de la bûche, or dans les essais, cette couche se situe principalement au cœur de la surface. Les bords supérieurs et extérieurs sont peu dégradés par le flux. Cela est dû à la convection naturelle. Dans un premier temps, la convection a été appliquée uniquement sur la surface réceptrice d'une valeur égale à $15 \text{ W/m}^2.\text{K}$. Le résultat de cette première simulation n'est pas satisfaisant, la convection est trop forte, la couche de charbon ne correspond plus à celle obtenue durant les essais. La convection a donc été réduite à $10 \text{ W/m}^2.\text{K}$, puis à $5 \text{ W/m}^2.\text{K}$ pour être le plus conforme possible à la réalité.

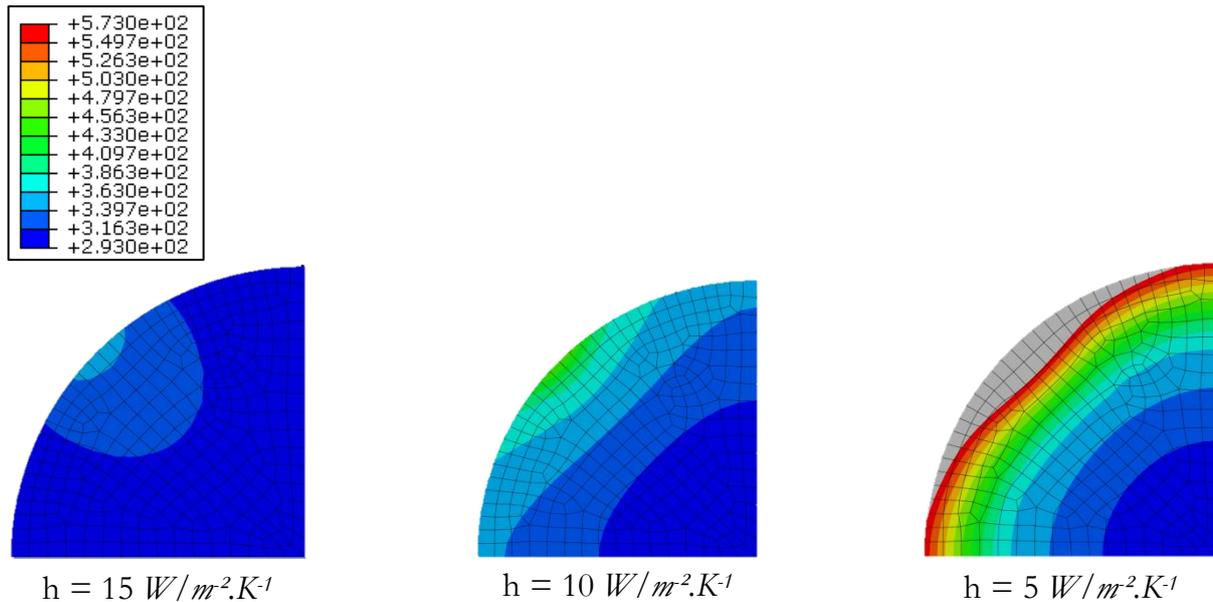


Figure 4 : Comparaison des résultats obtenus en fonction de la convection

Cependant pour être parfaitement en accord avec les phénomènes réels, la convection devrait varier en fonction de la température de la bûche. En effet, au début de l'essai la convection est assez faible (*aux alentours de $5 \text{ W/m}^2.\text{K}$*) puis lorsque la bûche monte en température des gaz s'en échappent et augmentent la convection (*aux alentours de $10 \text{ W/m}^2.\text{K}$*). (Figure 4)

Néanmoins, un paramètre primordial doit être pris en compte : le rayonnement dû à l'oxydation du charbon.

iii. Prise en compte du rayonnement du charbon, de l'émissivité, de la convection et de la perte de masse de la bûche

Le but de cette simulation est de reprendre les deux paramètres précédents ainsi que deux nouveaux jamais pris en compte jusqu'ici. Pour ce faire, il faut calculer la quantité d'énergie que libère l'oxydation du charbon. Connaissant le pouvoir calorifique inférieur (*c'est la quantité de chaleur libérée par la bûche sans prendre en compte la chaleur issue de la vaporisation de l'eau*) du hêtre ainsi que la vitesse de perte de masse liée à la pyrolyse, un flux surfacique a pu être ajouté à la simulation. Le *tableau 1* ci-dessous montre le calcul qui a été réalisé :

Calcul Puissance rayonnée par l'oxydation du charbon (kW/m ²)	
PCI _s hêtre (kJ/kg)	15 500
Vitesse moyenne perte de masse ⁵ (g/s)	0,194
P _{rayonnée} (kW)	3,00
Rayon (m)	0,08
Hauteur (m)	0,25
Surface réceptrice (m ²)	0,03
P _{rayonnée} (kW/m ²)	95,61

Tableau 1 : Données et calculs permettant de déterminer la puissance émise par l'oxydation du charbon

L'oxydation du charbon se faisant à partir de 300 °C, une nouvelle étape a été créée dans le logiciel pour envoyer ce flux au niveau de la bûche. La surface de la bûche atteint cette température environ à t = 1 500 secondes (*cette valeur provient des tests empiriques et résulte des observations faites pour chaque essai, cette valeur a été fixée et n'a pas été modifiée car le temps de calcul du logiciel pour ce modèle est d'environ vingt-quatre heures*).

La simulation de la perte de masse de la bûche nécessite la mise en place d'une subroutine. Celle-ci dépasse nos compétences car elle nécessite des connaissances en « codage Fortran ». Ainsi pour simuler la perte de masse, nous avons décidé de modifier les caractéristiques de la bûche. En effet à partir de 500 °C le matériau est considéré comme de l'air⁶.

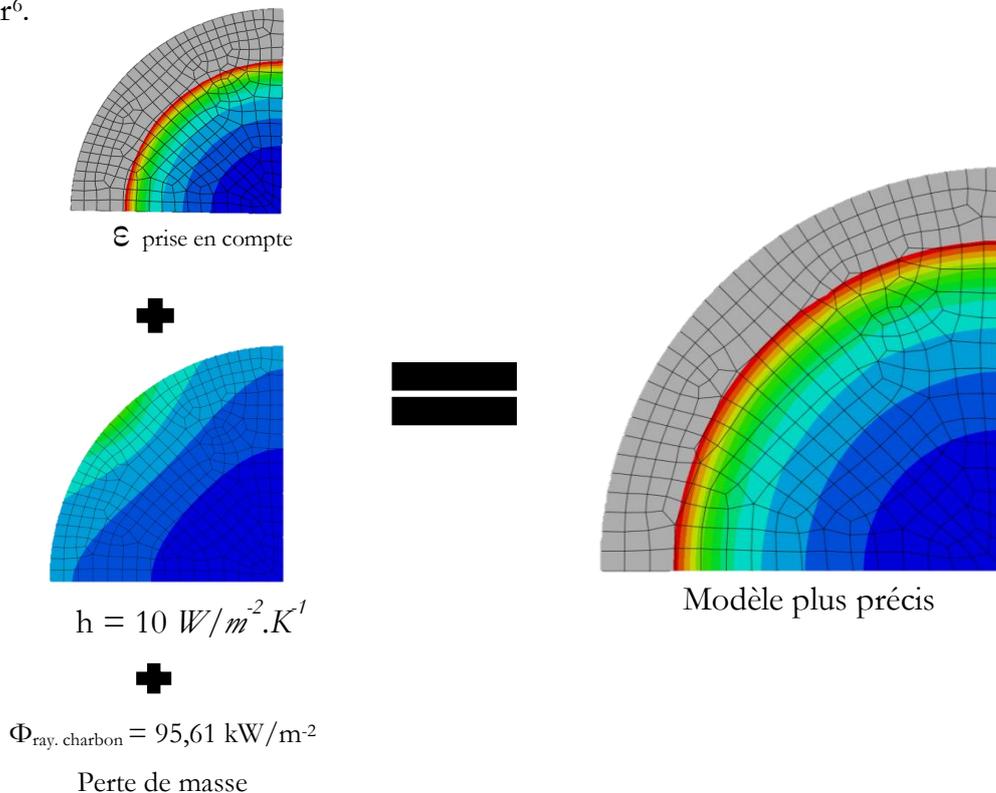
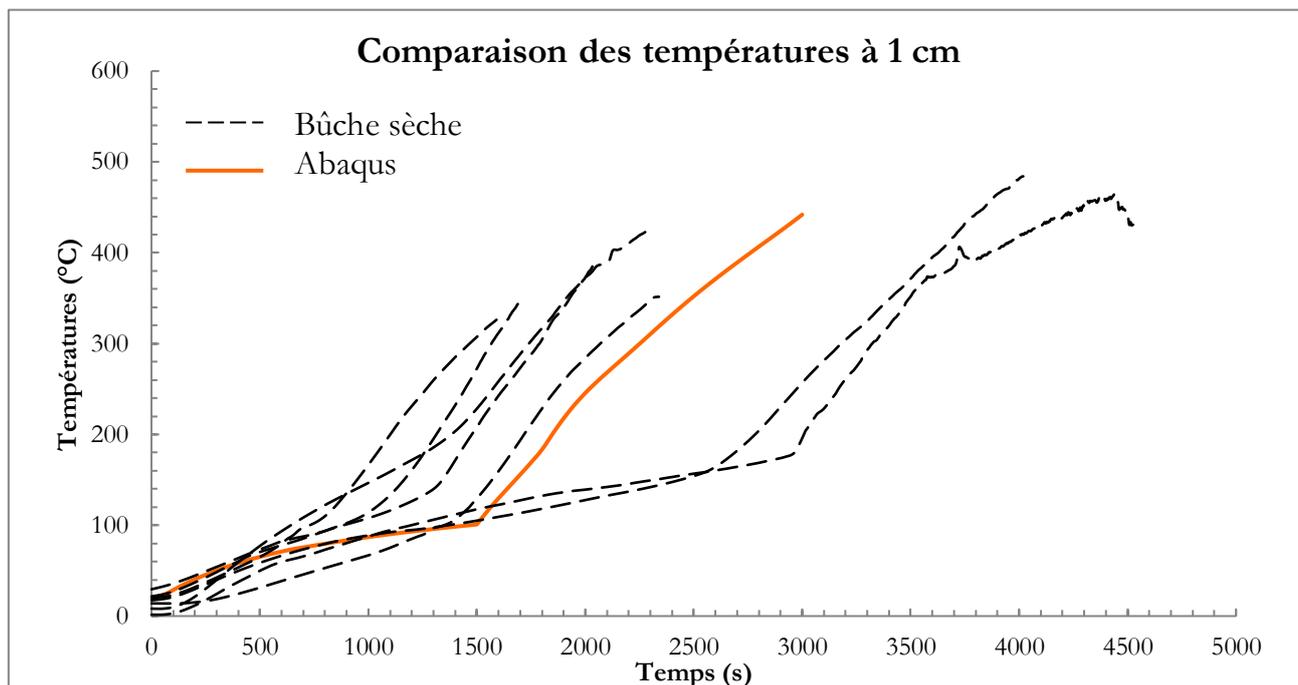


Figure 5 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de tous les paramètres

⁵ Cf. IV. Essais_8. Comparaison des pertes de masse des différents essais

⁶ Cf. II. Étude bibliographique

Le *graphique 6* ci-dessous montre les profils de températures pour un thermocouple placé à 1 centimètre de la surface réceptrice de la bûche :



Graphique 6 : Comparaison des profils de température entre « Abaqus » et les essais

La courbe de température du modèle suit la même allure que celle des thermocouples. La montée en température dépend du coefficient de convection (*durant les essais, celui-ci varie, en revanche dans la modélisation il est constant*). Le calcul du flux émis par rayonnement est validé car les courbes ont globalement la même pente que celle du modèle.

Le modèle ainsi obtenu est en accord avec la réalité, la couche de charbon est d'environ 1.5 cm (*les mailles mesurent 5 mm de côtés*), ce qui correspond globalement à l'épaisseur moyenne mesurée après chaque essais. Il reste cependant un point important à modifier pour affiner encore un peu plus le modèle. Le flux est dépendant du temps, or ce n'est pas le cas car le rayonnement du charbon ne se fait pas pour un temps donné mais pour une température ! En fonction des caractéristiques de la bûche et des paramètres extérieurs, la pyrolyse à lieu plus ou moins tôt durant l'essai.

Ce modèle correspond à la réalité mais il pourrait être amélioré en utilisant une subroutine pour déterminer la valeur de flux que reçoit la surface.

5. Bûche à géométrie réelle

i. Prise en compte des coefficients extérieurs

Pour cette simulation, les paramètres sont identiques à ceux mentionnés dans la partie III.4.iii. La couche de charbon résiduelle est identique à celle obtenue avec une géométrie en quartier de bûche. La géométrie n'a donc pas d'incidence sur le résultat de la modélisation car la surface réceptrice reste la même dans les deux modèles (*figure 6*).

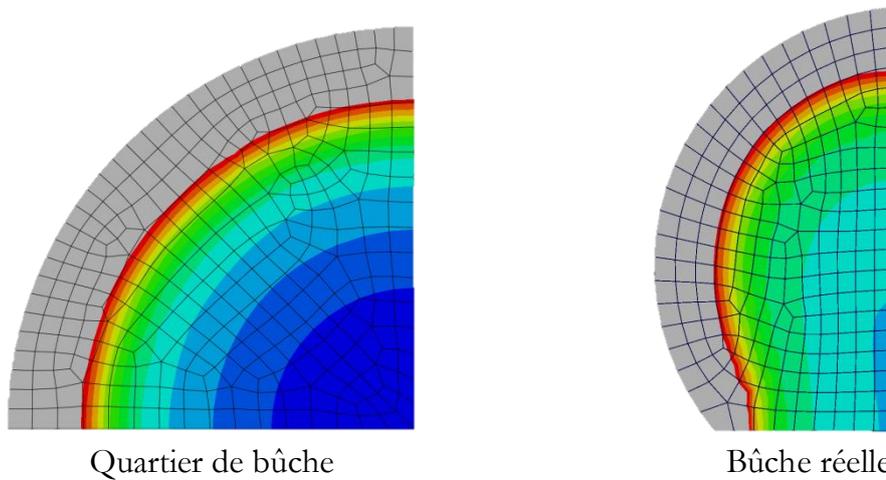


Figure 6 : Comparaison des épaisseurs de couches de charbon en fonction de la géométrie

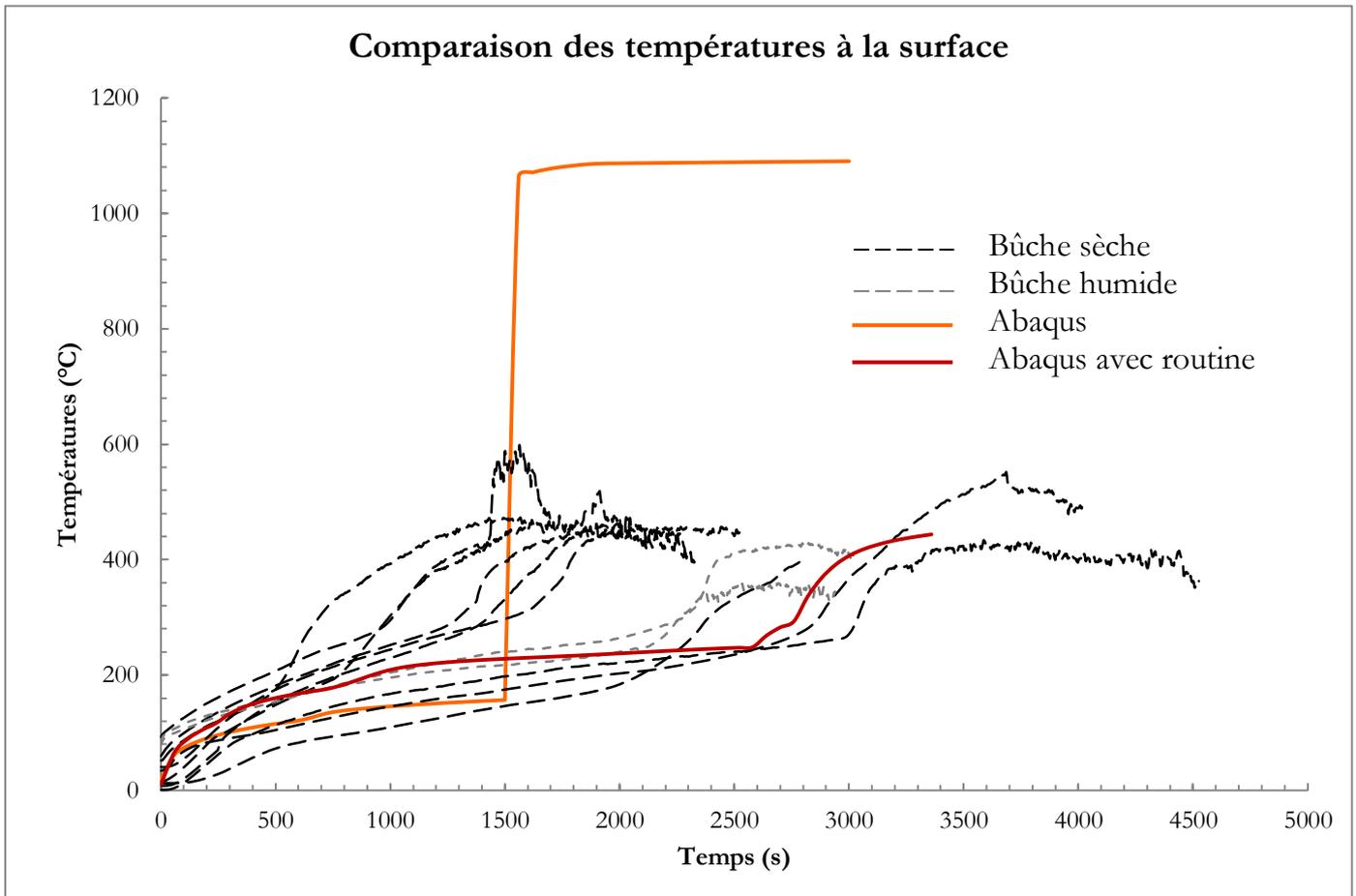
L'étude des profils de températures des thermocouples des deux géométries montre que les températures sont identiques au cours de la modélisation quel que soit le modèle. Pour affiner le modèle, l'utilisation d'une subroutine semble indispensable.

ii. Mise en place de la subroutine

Pour ce faire, nous avons sollicité M. VAN Diem, doctorant à l'ENSTIB, pour sa rédaction, ayant précédemment rédigé un exemplaire pour sa thèse. La première version fonctionnait mais la différence de flux était trop importante et « Abaqus » ne pouvait pas calculer les évolutions de température de la bûche. De plus, la température pour laquelle le matériau devient de l'air a été modifiée, la bûche est considérée comme de l'air quand la température est supérieure à 1 000 °C.

La *figure 7* ci-dessous représente le code de la subroutine qui permet de faire varier la valeur du flux en fonction de la température de la surface de la bûche. Les caractères écrits en vert ne sont pas pris en compte lors de la modélisation (*ce sont des commentaires pour comprendre la routine*). Le code se décompose en 3 parties :

Pour vérifier la véracité de la modélisation, les profils de température en surface des bûches ont été comparés pour les deux simulations (*avec et sans subroutine*) et pour les essais réalisés (*graphique 7*)



Graphique 7 : Comparaison des profils de température entre « Abaqus » et les essais

La courbe de température du modèle suit la même allure que celle des thermocouples placés en surface. La montée en température dépend du coefficient de convection (*durant les essais, celui-ci varie, en revanche dans la modélisation il est constant*). Le décalage de la courbe issue de la modélisation « Abaqus » avec une subroutine est dû au fait que le coefficient de convection est passé de 5 à 10 $W/m^2.K^{-1}$. Cette augmentation est indispensable sinon le logiciel ne peut pas calculer les variations de températures des mailles car celles-ci sont importantes (*le flux a quasiment triplé pour une variation de 300 °C*). Cependant, le choix de la répartition du flux émis par rayonnement est validé car les courbes ont la même allure que celle du modèle.

Le modèle ainsi obtenu est en accord avec la réalité, la couche de charbon mesure environ 1 cm (*les mailles mesurent 5 mm de côtés pour la simulation de gauche et 2.5 mm pour la simulation de droite*), ce qui correspond globalement à l'épaisseur moyenne mesurée après chaque essai. Il reste cependant un point important à modifier pour affiner durant la

modélisation. Mais ce paramètre ne peut être renseigné en tant que tel. Une seconde subroutine doit être établie, or « Abaqus » ne peut en utiliser qu'une pour chaque modélisation. (Figure 8)



Figure 8 : Comparaison des résultats obtenus après simulation et essai

IV. Essais

1. Objectifs

Les objectifs sont de vérifier les paramètres utilisés dans « Abaqus » (C_p , λ , ρ , h et ε) et de les affiner si besoin pour avoir un modèle élément fini juste.

2. Géométrie des éprouvettes

Les bûches de hêtre à disposition mesurent 33cm, le diamètre choisi pour les éprouvettes est de 16cm environ. La préparation des éprouvettes consiste à écorcer les bûches (*de manière à avoir des caractéristiques homogènes*), à raboter la face 1 pour pouvoir placer l'éprouvette sur son support d'essai et la face 2 pour avoir une profondeur de perçage ne mesurant pas plus de 6cm (*la mèche de diamètre 2mm ne mesure que 4cm de long*), des chapelles sont percées avec une fraise à lamer pour atteindre, avec la visseuse, des profondeurs plus importantes et enfin mettre à la bonne longueur l'éprouvette (22cm environ) pour qu'elle soit complètement exposée au flux. (Figure 9)

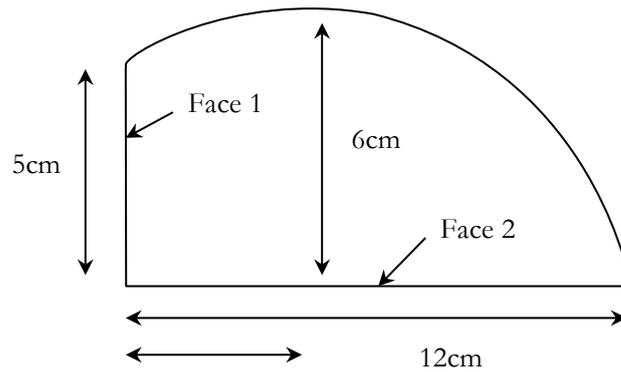


Figure 9 : Géométrie des éprouvettes

3. Dispositif expérimental

9 thermocouples sont placés dans la bûche à des profondeurs différentes (*0 cm, 0.5 cm, 1 cm, 1.5 cm et 2 cm par rapport à la surface exposée au rayonnement*) sur son axe, cette bûche est placée sur une balance et est chauffée par un panneau rayonnant en céramique composé de 4 émetteurs plats de 12×12 cm. Sa puissance totale est de 1 600 W (4×400 W). A 5cm des émetteurs, le flux maximum est de 6kW/m^2 . La plaque d'isolant permet de protéger la balance de la chaleur dégagée par les plaques en céramique. Le contour en panneau de particules protège le montage des courants d'air qui pourraient perturber la montée en température de la bûche (*à partir de 300 °C un apport suffisant d'air peut enflammer la bûche*). (Photographie 3 et schéma 5)



Photographie 3 : Dispositif d'essai

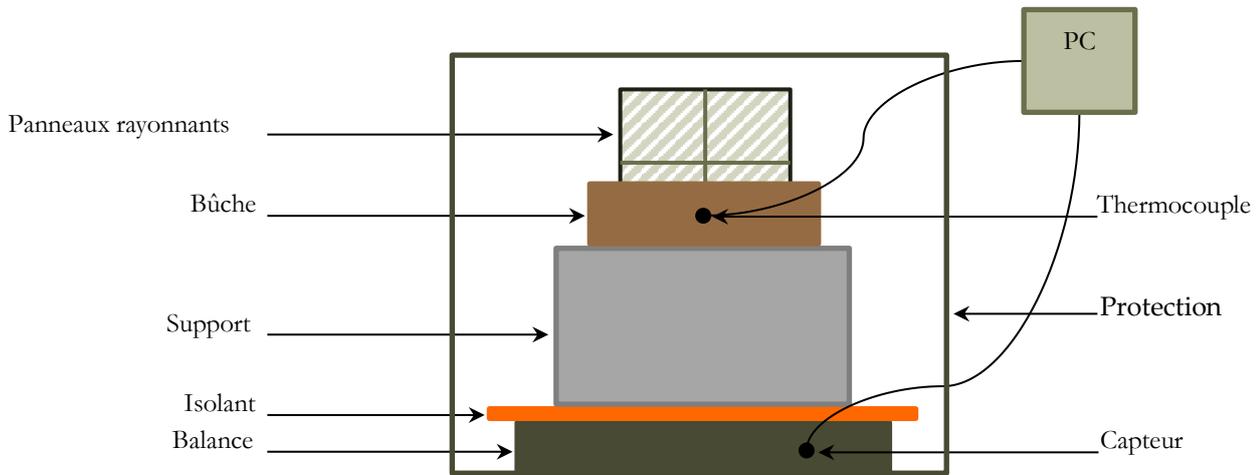


Schéma 5 : Montage expérimental

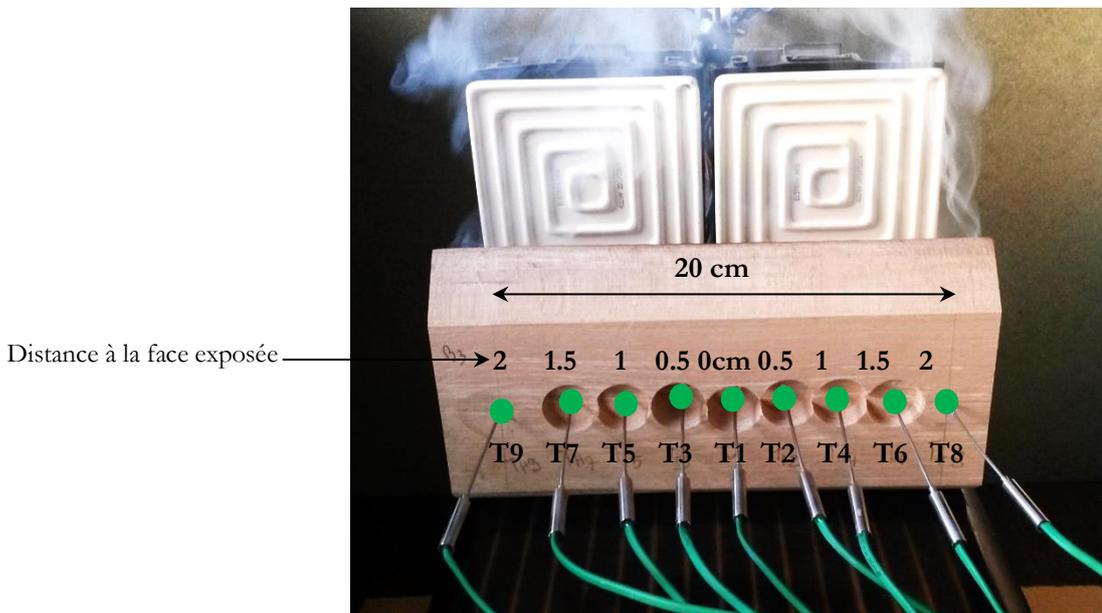


Figure 10 : Plan des thermocouples

Pour limiter les incertitudes de mesures, une pate thermique est placée dans le fond de chaque perçage. Elle permet de maintenir le thermocouple en contact avec le bois. Celle-ci n'a pas d'effets notoires sur les mesures de températures obtenues. (Figure 10)

Les thermocouples sont placés en double pour chaque profondeur pour vérifier si la dégradation du bois s'effectue de la même façon sur toute la surface réceptrice. La réalisation des doublons permet de vérifier également la profondeur réelle où se situe le capteur. En effet, les trous pour placer les thermocouples sont réalisés à la perceuse portable et la profondeur peut varier de quelques millimètres pour une profondeur donnée.

Les 8 premiers essais ont été réalisés avec ce dispositif, pour les 5 derniers, celui-ci a été légèrement modifié : un chapeau a été ajouté et une quatrième paroi a été placée à l'ensemble pour protéger le dispositif de manière à l'isoler du vent et ainsi à améliorer la répétabilité des résultats.

De plus, le panneau rayonnant en céramique met environ 10 minutes à atteindre le flux maximal. Or notre modèle élément finis est soumis dès le départ à 6kW (*flux maximal*), pour s'affranchir de ce problème et réaliser les essais dans les mêmes conditions. Une plaque métallique a été mise en place, entre le panneau et la bûche, de sorte que le panneau atteigne 6kW. (*Photographie 4*)

Plaque
métallique pour
le préchauffage
du panneau
rayonnant



Photographie 4 : Dispositif et plaque métallique

4. Mesures préalables

	Humidité	ρ (kg/m ³)	Longueur (cm)	Température extérieure (°C)
Bûche n°1	9,80%	663,29	24	13.42
Bûche n°2	10,29%	665,78	23	12.21
Bûche n°3	9,52%	637,96	21	9.87
Bûche n°4	8,73%	691,81	24	2.16
Bûche n°5	9,53%	641,87	22	4.36
Bûche n°6	8,34%	693,12	22	4.51
Bûche n°7	7,98%	719,09	23	3.93
Bûche n°8	10,29%	645,56	18	2.27
Bûche n°10	11,12%	659,61	24	1.88
Bûche n°11	9,92%	792,71	25	1.63
Moyenne	9,55%	681,08		
Bûche humide n°2	27,01%	689,30	23.5	1.78
Bûche humide n°3	27,50%	681,37	23	1.55
Moyenne	27,26%	685,34		

Tableau 2 : Humidité, masse volumique, longueur et températures extérieure

Les humidités ont toutes été mesurées à l'aide d'une étuve. Les morceaux de bûches ont été placés dans une étuve à 103 °C durant 24 heures. En ce qui concerne les masses

volumiques des bûches, des cubes ont été usinés, mesurés puis pesés afin de déterminer le volume et la masse de chaque échantillon. Les valeurs moyennes obtenues correspondent à la littérature pour du hêtre à 9.55 % d'humidité. (Tableau 2)

5. Analyse des essais

i. Essai n°1



Photographie 5 : Résultat du premier essai

Le premier essai (*photographie 5*) a été réalisé sans les protections en panneaux ce qui peut expliquer que la bûche n'a pas été beaucoup dégradée en profondeur (*en comparaison avec l'essai numéro 2*). Les mesures de température ne sont pas exploitables pour ce premier essai car la méthode de perçage n'était pas au point. Cet essai a permis de déterminer une technique de mise en œuvre pour les suivants (*méthode de perçage, pose de la bûche sur le support et usinage de la bûche*).

Seule l'évolution de la masse de la bûche⁷ a été conservée. Il en ressort trois phases de perte de masse qui correspondent à 3 phénomènes particuliers. Pour obtenir ces 3 phases, la bûche a été enflammée. Cela permet d'étudier les vitesses de perte de masse du bois. Les 3 phénomènes sont donc :

- **Première phase** : l'évaporation de l'eau liée présente dans le bois.
- **Seconde phase** : les gaz de combustion sont libérés
- **Troisième phase** : le charbon est oxydé et des cendres apparaissent

ii. Essai n°2



Photographie 6 : Résultat du deuxième essai

⁷ Cf. VII. ANNEXES_1. Essai n°1

L'essai n°2 (*photographie 6*) a été réalisé avec les protections latérales ; un premier effet qui peut être remarqué, est la profondeur de dégradation de la bûche (*d'autant plus que cette bûche n'a pas été enflammée au cours de l'essai*). Les perçages pour les thermocouples ont été réalisés avec plus de précision ce qui a permis de réaliser un suivi exploitable des températures. La mise et le maintien en position de la bûche ont été optimisés.

L'expérience a duré 39 minutes, Le contour en panneau permet effectivement de diminuer les pertes. D'après la courbe « Evolution de la masse »⁸, seules les deux premières phases de perte de masse ont eu lieu, cela s'explique par le fait que la bûche n'a pas été enflammée.

iii. Essai n°3



Photographie 7 : Résultat du troisième essai

L'expérience (*photographie 7*) à durée 39 min, les conditions expérimentales étaient identiques à celles de l'essai n°2, les résultats de cet essai sont concluants, les perçages ont été réalisés avec précision. Les courbes de température⁹ montrent un palier à 100 °C environ ce qui correspond à l'évaporation de l'eau.

iv. Essai n°4



Photographie 8 : Résultat du quatrième essai

Le vent lors de l'expérience (*photographie 8*) a perturbé les résultats¹⁰ ; en effet la bûche a mis deux fois plus de temps pour atteindre 200 °C à 1cm de la face exposée que pendant les autres essais. Le vent vient refroidir la bûche et le panneau. De plus, lors de cet essai, une fissure est apparue du côté droit de la bûche ce qui a refroidi d'avantage tous les thermocouples situés de ce côté.

⁸ Cf. VII. ANNEXES_2. Essai n°2

⁹ Cf. VII. ANNEXES_3. Essai n°3

¹⁰ Cf. VII. ANNEXES_4. Essai n°4

v. Essai n°5



Photographie 9 : Résultat du cinquième essai

Le cinquième (*photographie 9*) essai a été réalisé sans vent, de plus tous les thermocouples situés à la même profondeur se suivent parfaitement¹¹.

vi. Essai n°6



Photographie 10 : Résultat du sixième essai

L'essai n°6 (*photographie 10*) était soumis au vent, la bûche a donc mis plus de temps à chauffer qu'en temps normal¹², mais les pentes de montée en température restent les mêmes que pour les autres essais.

vii. Essai n°7



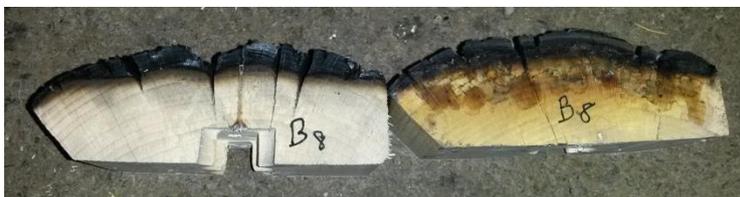
Photographie 11 : Résultat du septième essai

¹¹ Cf. VII. ANNEXES_5. Essai n°5

¹² Cf. VII. ANNEXES_6. Essai n°6

Cet essai (*photographie 11*) était aussi soumis au vent, la bûche a donc mis plus de temps à chauffer¹³ qu'en temps normal, nous avons donc décidé pour les essais suivants de le protéger du vent en mettant un chapeau au-dessus et des panneaux de chaque côté.

viii. Essai n°8



Photographie 12 : Résultat du huitième essai

Les protections ajoutées ont effectivement permis d'avoir des conditions expérimentales plus stables, surtout que les deux essais suivants ont été réalisés le même jour. Par ailleurs, la plaque métallique ajoutée pour permettre le préchauffage du panneau rayonnant a bien joué son rôle puisque l'allure des courbes¹⁴ entre $T = 0^{\circ}\text{C}$ et $T = 250^{\circ}\text{C}$, se rapprochent de celles données par « Abaqus ». (*Photographie 12*)

ix. Essai n°10 et n°11



Photographie 13 : Résultat du dixième essai



Photographie 14 : Résultat du onzième essai

Les essais 10 et 11 (*photographie 13 et 14*) ont été réalisés dans les mêmes conditions et l'un après l'autre, les résultats sont presque identiques¹⁵.

¹³ Cf. VII. ANNEXES_7. Essai n°7

¹⁴ Cf. VII. ANNEXES_8. Essai n°8

¹⁵ Cf. VII. ANNEXES_9. Essai n°10 et 10. Essai n°11

x. Essai bûche humide n°2 et n°3

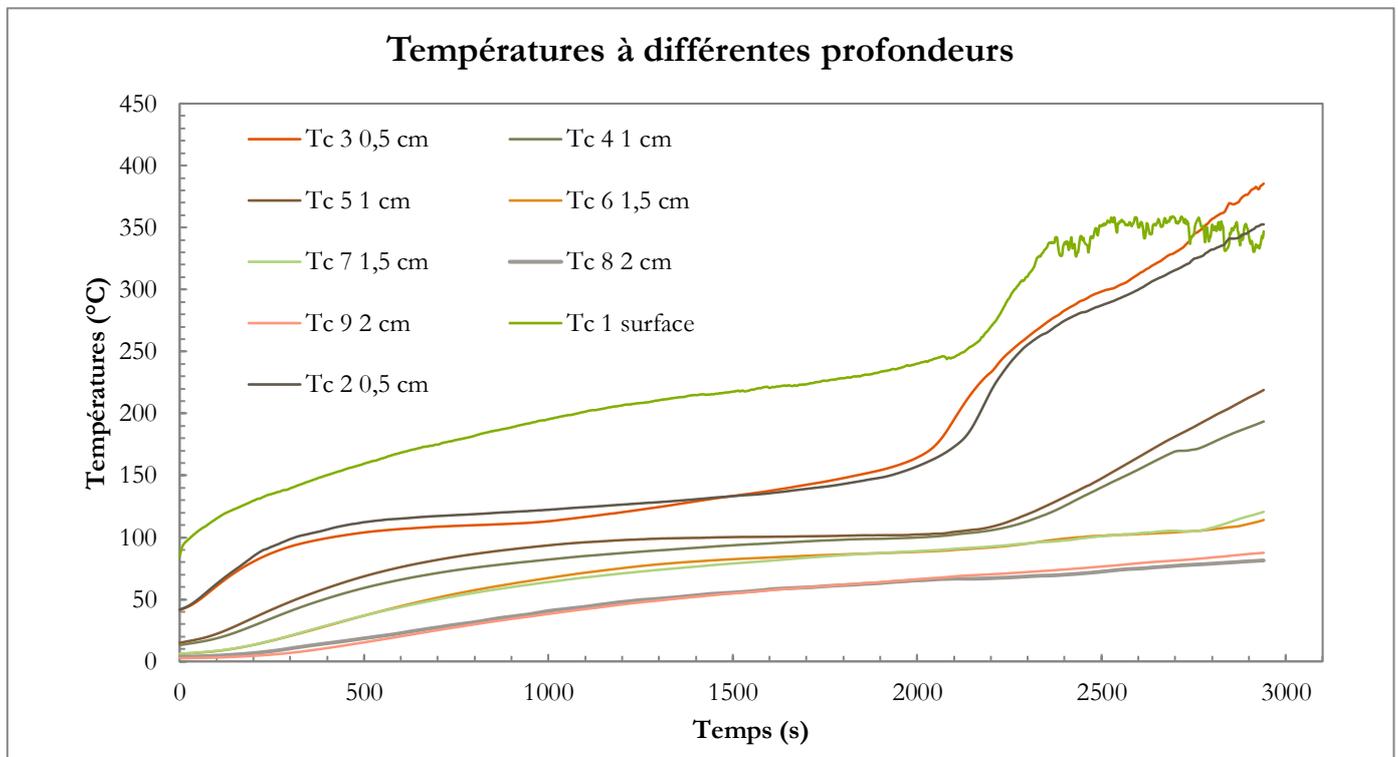


Photographie 15 : Résultat du douzième essai (bûche humide 2)



Photographie 16 : Résultat du treizième essai (bûche humide 3)

Les deux dernières bûches testées (*photographies 15 et 16*) avaient une humidité de 27% environ (*détail dans le tableau 2*). La montée à 200 °C est deux fois plus longue que pour les autres essais (*à 10% d'humidité*). De plus, un pallier est visible¹⁶ dans les courbes de températures aux alentours de 100°C, ce qui correspond à l'évaporation de l'eau. A 0.5 cm de la face exposée, celui-ci est visible entre 500 et 1200 s. A 1 cm entre 800 et 2 000 s. La deuxième pente présente pour toute les courbes correspond à la pyrolyse.



¹⁶ Cf. VII. ANNEXES_11. Essai humide n°1 et 12. Essai humide n°2



Photographie 17 : Comparaison des bûches à 27% d'humidité avec une bûche à 10% au centre

Par ailleurs, les bûches humides ont un aspect totalement différent (*photographie 17*) des autres à la fin des essais. La face exposée n'est pas totalement carbonisée, seuls les endroits les plus proches du panneau rayonnant l'ont été. De plus l'eau s'évacue plus facilement dans le sens des fibres, ce qui peut aussi expliquer pourquoi les extrémités des bûches humides ne sont pas carbonisées.

6. Couche de charbon des éprouvettes testées

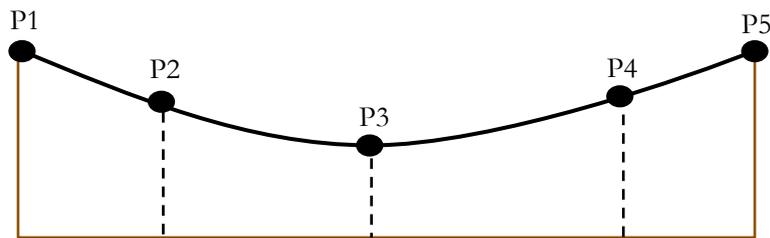


Figure 11 : Positions des mesures d'épaisseur de la couche de charbon sur la bûche

Pour la majorité des éprouvettes, la couche de charbon aux extrémités est plus fine de 0.5 cm en moyenne, ce qui s'explique par les dimensions du panneau rayonnant (*24 cm de large*). Le flux est sans doute supérieur au centre et, par le fait, que l'eau migre dans le sens du fil vers les extrémités en les refroidissant. D'autres effets de bords peuvent aussi expliquer ce phénomène comme par exemple le fait que de la convection vienne refroidir des deux extrémités de la bûche. (*Figure 11*)

	Longueur bûche	Épaisseur charbon en P1	Épaisseur charbon en P2	Épaisseur charbon en P3	Épaisseur charbon en P4	Épaisseur charbon en P5	Enflammée
Bûche 1	24 cm	0,4 cm	1 cm	1 cm	0,9 cm	0,3 cm	Oui
Bûche 2	23 cm	1,5 cm	1,5 cm	1,7 cm	1,6 cm	1,5 cm	Non
Bûche 3	21 cm	1 cm	1,2 cm	1,3 cm	1 cm	0,5 cm	Non
Bûche 4	24 cm	1 cm	1 cm	1,8 cm	1,3 cm	1 cm	Non
Bûche 5	22 cm	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm	1 cm	Non
Bûche 6	22 cm	0,7 cm	1 cm	0,9 cm	0,8 cm	0,7 cm	Non
Bûche 7	23 cm	0,5 cm	0,9 cm	1,1 cm	0,9 cm	0,5 cm	Oui
Bûche 8	18 cm	0,5 cm	0,9 cm	0,9 cm	0,9 cm	0,6 cm	Oui
Bûche 10	24 cm	0,6 cm	0,9 cm	0,9 cm	0,8 cm	0,5 cm	Oui
Bûche 11	25 cm	0,4 cm	0,8 cm	0,9 cm	0,9 cm	0,5 cm	Oui
Bh2	23,5 cm	0 cm	0,5 cm	0,6 cm	0,5 cm	0 cm	Non
Bh3	23 cm	0 cm	0,4 cm	0,5 cm	0,4 cm	0 cm	Non

Tableau 3 : Épaisseur de la couche de charbon des différentes éprouvettes

D'autre part, les bûches à 27% d'humidité ont une couche de charbon beaucoup moins importante que les autres. Le phénomène de pyrolyse commence seulement une fois que la zone est parfaitement sèche, ce qui prend du temps et retarde l'apparition du charbon. (Tableau 3).

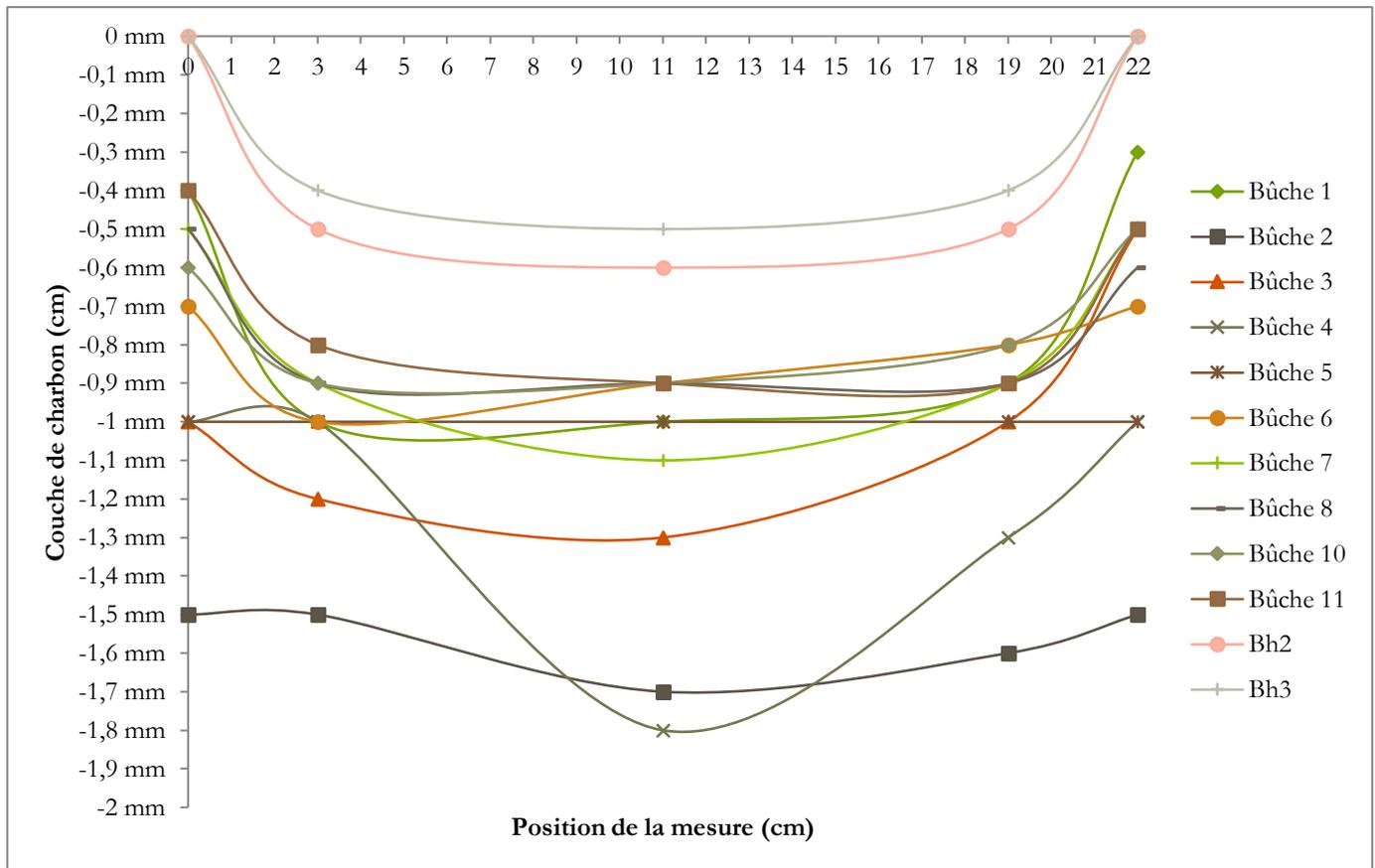


Figure 12: Représentation des épaisseurs de charbon pour les différentes éprouvettes

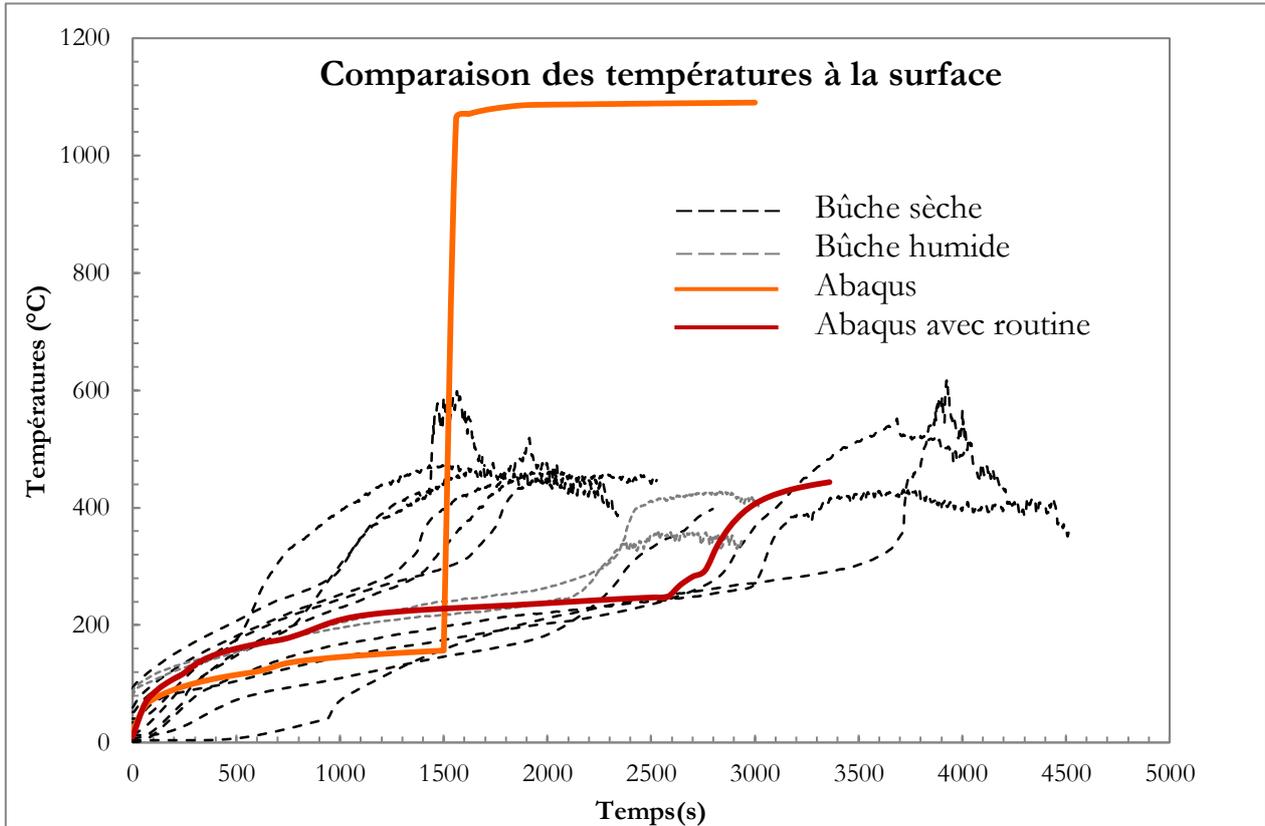
Afin de vérifier les caractéristiques de densité du charbon, des mesures de masse volumique ont été réalisées sur la couche de charbon de la bûche n°10 et n°11 (*c'est un choix arbitraire car le charbon obtenu est quasiment le même pour toutes les bûches*). Le tableau n°4 ci-dessous résume ces mesures :

Masse volumique charbon						
Désignation	Dimensions (cm)			Volume (m³)	Masse(g)	ρ (kg/m³)
	a	b	c			
B10n1	1,32	1,86	0,82	2,01E-06	0,691	343,22
B10n2	2	2,16	0,75	3,24E-06	0,89	274,69
B10n3	1,85	2,14	0,75	2,97E-06	0,982	330,72
B11n1	0,9	1,44	0,82	1,06E-06	0,333	313,35
B11n2	1,52	1,79	0,83	2,26E-06	0,517	228,94
B11n3	1,28	1,69	0,77	1,67E-06	0,461	276,77
Masse volumique moyenne (kg/m³)						294,61

Tableau 4 : Calcul de la masse volumique du charbon

Cette masse volumique moyenne du charbon est obtenue entre 300 et 400 °C, elle correspond assez bien à celle renseignée dans les euro codes 5. (*Tableau 4*)

7. Comparaison des températures des différents essais



Graphique 9 : Comparaison des températures des différents essais en surface

A la surface (*graphique 9*), les courbes de températures des différents essais ont 3 phases ; une première phase plus ou moins longue (*qui dépend des conditions expérimentales*), de la température initiale (*jusqu'à 250 °C environ*), où se produisent les phénomènes d'évaporation de l'eau et de pyrolyse. A 250 °C environ, des braises apparaissent en surface et leurs combustions dégagent de l'énergie. La montée en température est donc plus rapide pour atteindre un palier qui constitue la troisième phase : la couche en surface a disparue et le thermocouple se retrouve à l'air libre et se stabilise à une certaine température (*environ 450 °C*).

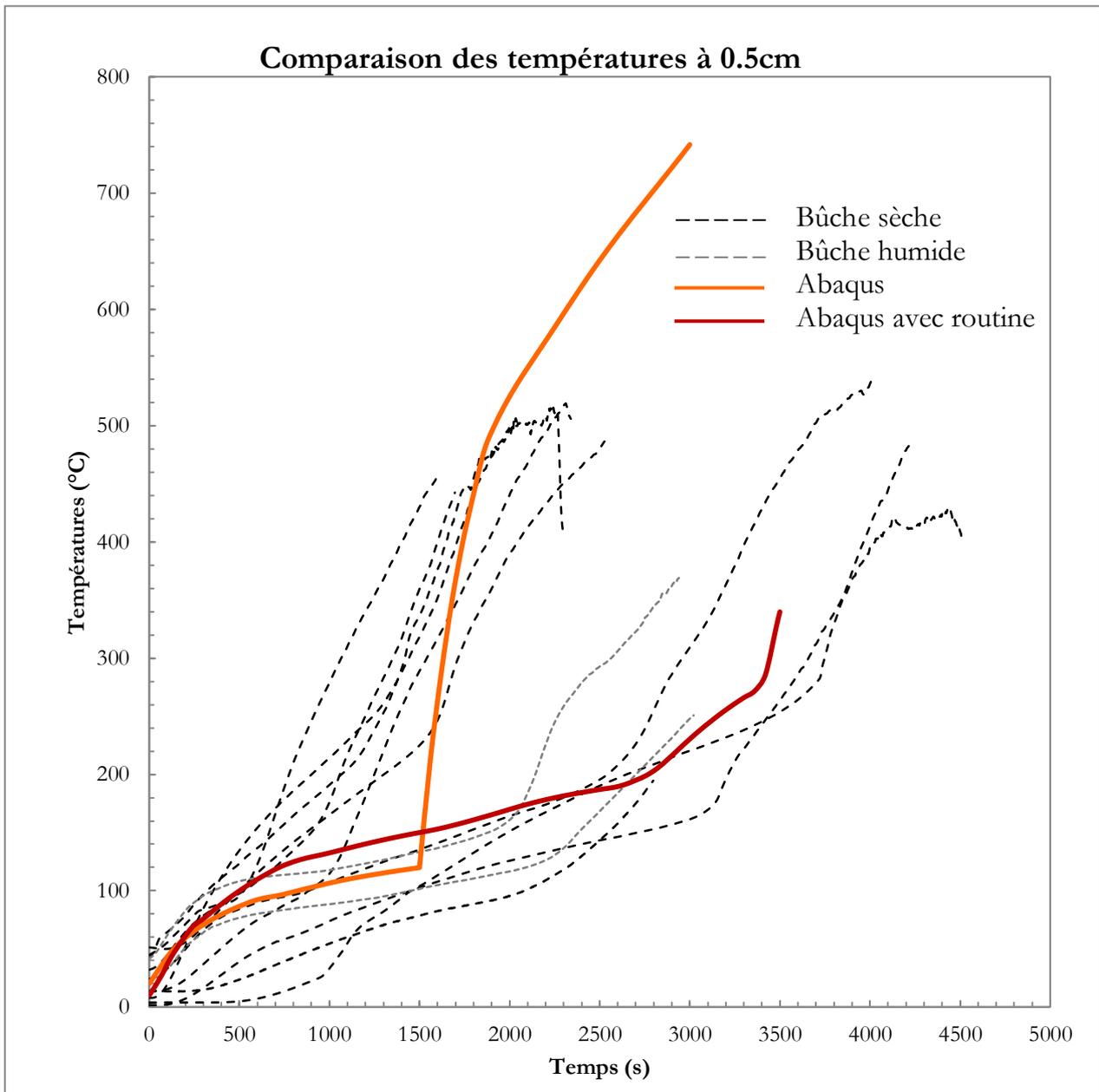
La première simulation sous « Abaqus » (*sans la routine, avec l'émissivité à 0.75 les 1 000 premières secondes et à 1 jusqu'à 3 000s, et avec un flux de 6 000 kW/m² les 1 500 premières secondes et à 101 610 kW/m² jusqu'à la fin*) donne la courbe de température en orange. L'allure de la première phase est la même que celle des courbes expérimentales, la deuxième phase (*la combustion du charbon qui dégage de l'énergie*) a une pente très importante et atteint 1 100 °C environ. La raison en est que la simulation a été paramétrée pour qu'à 1 500 s (*valeur choisie au vu de nos résultats expérimentaux*) un nouveau flux de 95.61 kW apparaisse correspondant à l'énergie dégagée par la combustion du charbon¹⁷.

¹⁷ Cf. Tableau 1

Essais

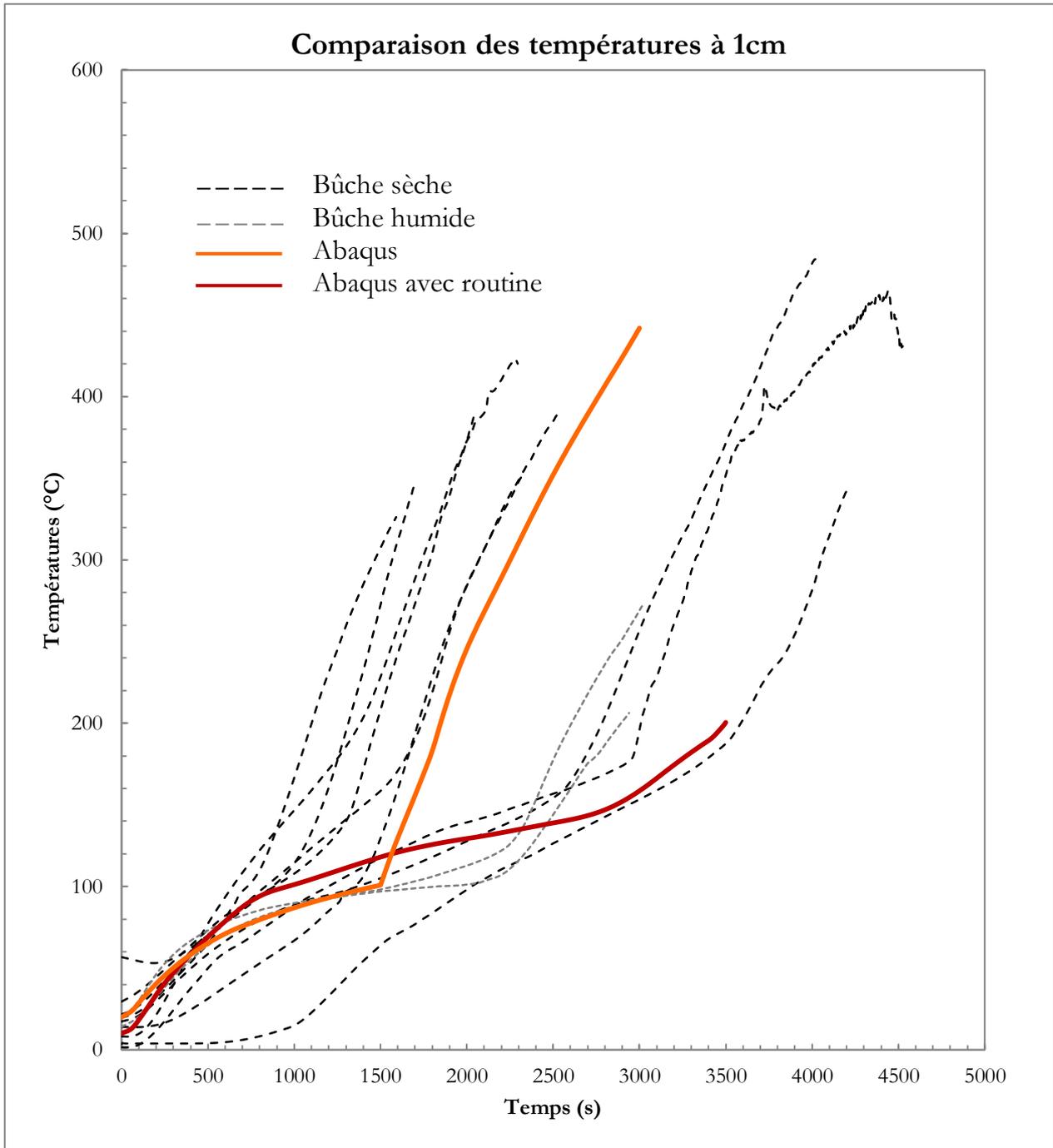
La troisième phase de la première simulation « Abaqus » se stabilise à 1 100 °C car les conditions données sont plus favorables que les conditions expérimentales. La deuxième simulation sous « Abaqus » (*avec la routine*) donne la courbe en rouge, la deuxième pente est décalée vers la droite car la convection a été prise à 15 au lieu de 10 par rapport à la première simulation.

A 0.5 cm de la face exposée au flux (*graphique 10*), l'évolution des températures des différents essais comportent deux phases, la première phase correspond à la montée en température de la bûche entre 0 et 90 °C. Aux alentours de 90 °C, on peut voir sur les courbes de certaines bûches, à 10 % d'humidité, un petit pallier correspondant à l'évaporation de l'eau. Ce pallier est plus visible pour les bûches à 27 % car il dure environ 1000 s.

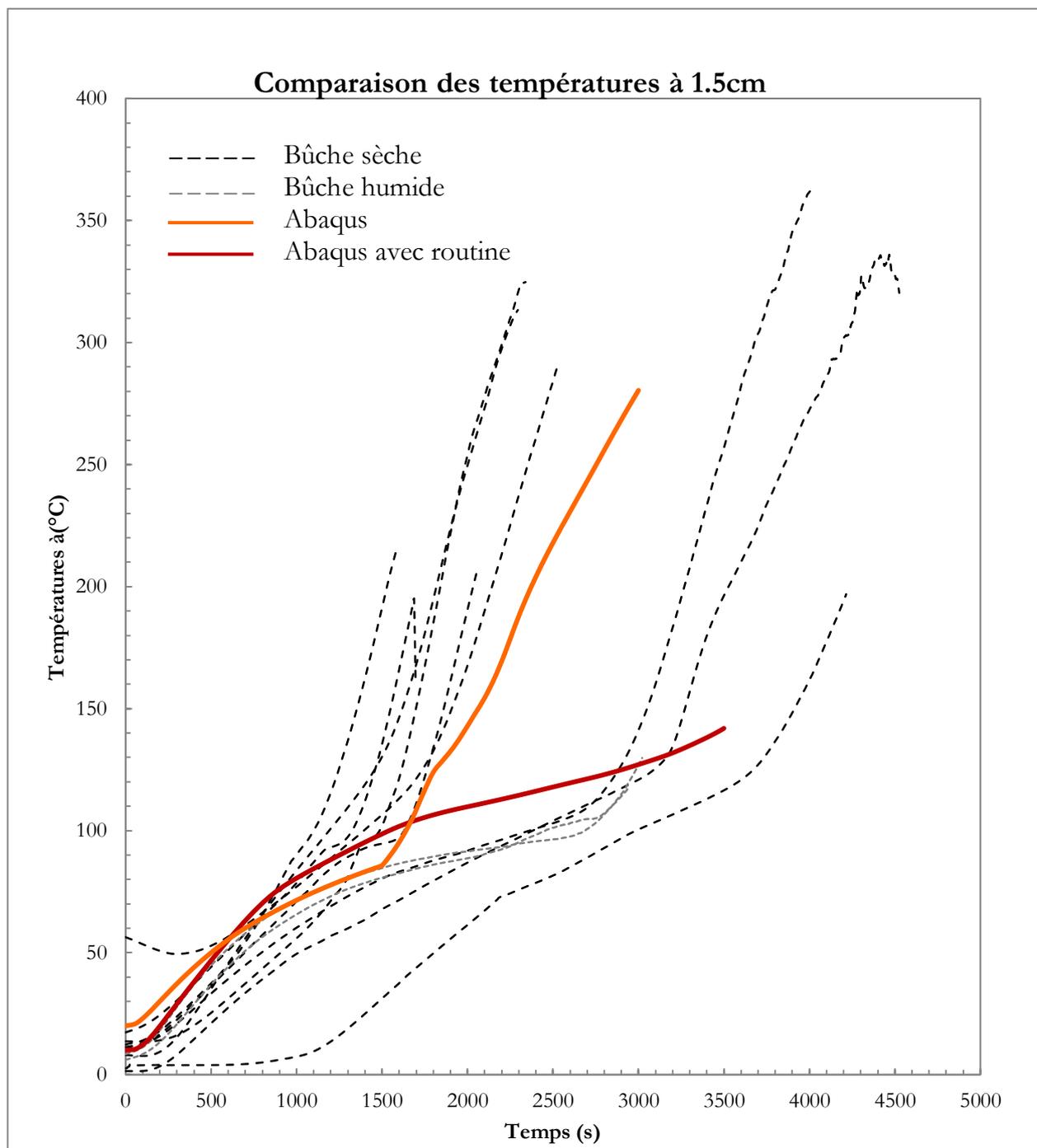


Graphique 10 : Comparaison des températures des différents essais à 0.5cm

A 1 cm de la face exposée (*graphique 11*), l'allure des courbes est la même que celle à 0.5 cm décalés de 400 s environ. Pour les bûches, l'allure des courbes entre 0 et 500 s se rapproche de celle donnée par la première simulation sous « Abaqus ». La deuxième est beaucoup plus défavorable au niveau de la convection pour ces essais, le panneau a été préchauffé pendant 10 minutes avant de démarrer l'essai ce qui correspond mieux à la simulation qui soumet la bûche au flux maximal dès $t = 0$ s.

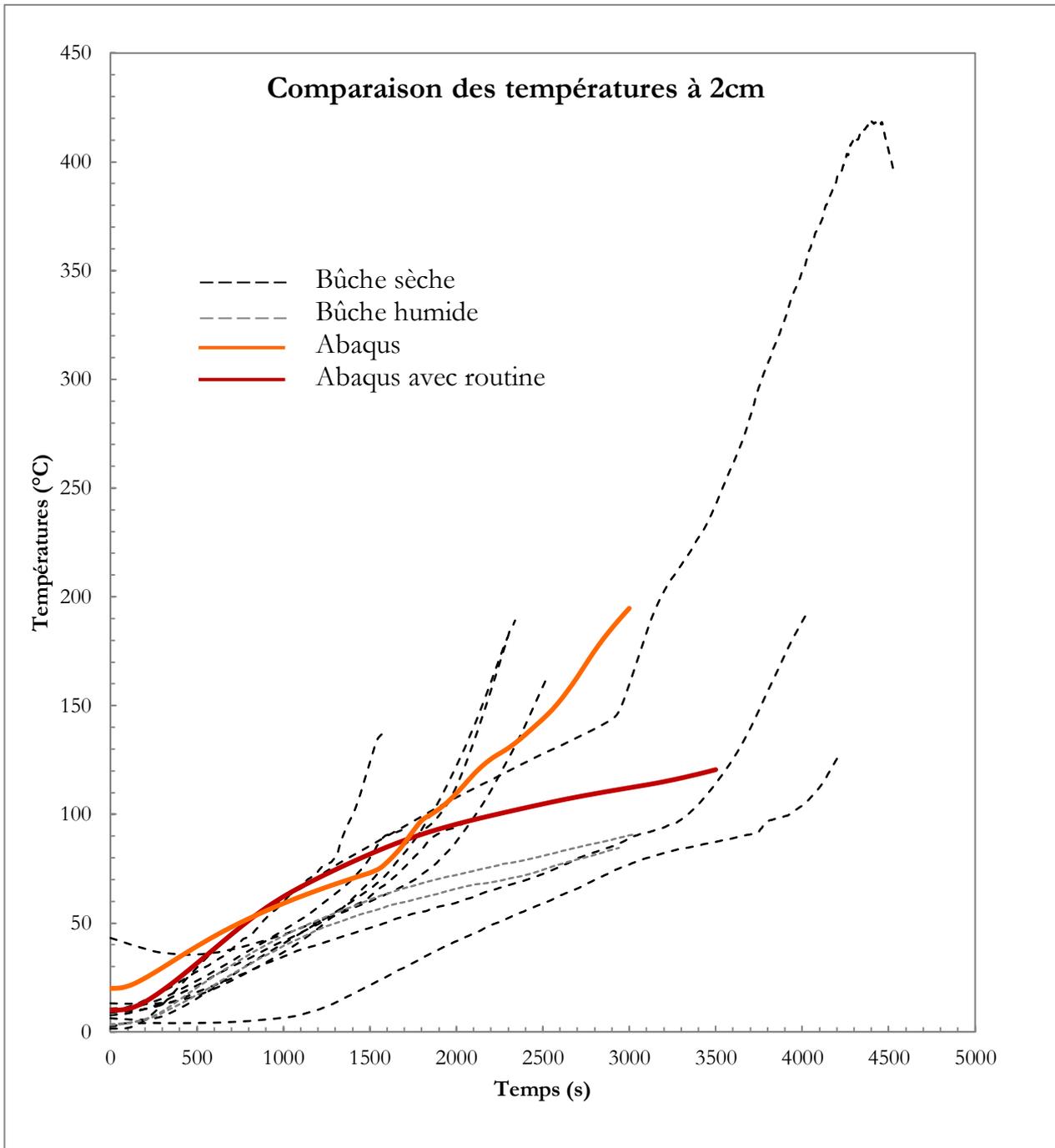


Les mêmes phases que pour les thermocouples à 0,5 et 1cm sont observables à 1.5cm (*graphique 12*), simplement, la deuxième pente, donnée par la simulation, est légèrement inférieure à celles des expériences.



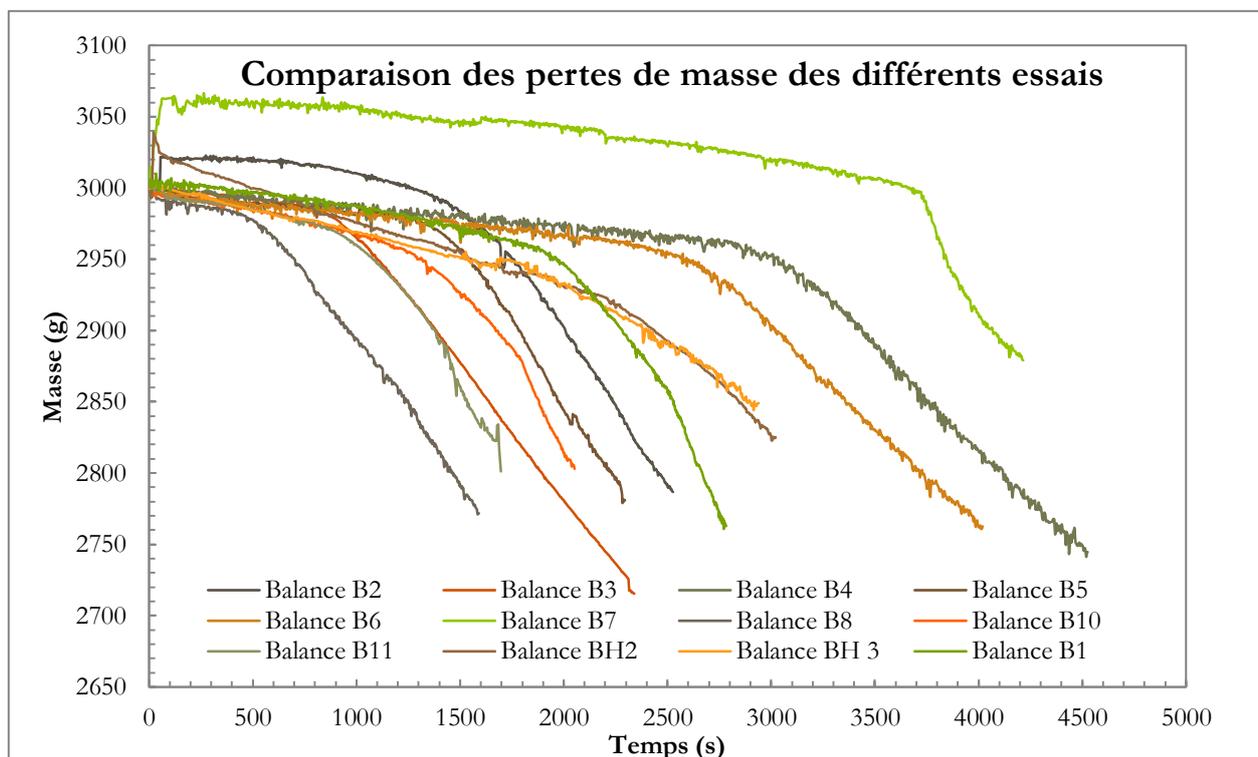
Graphique 12 : Comparaison des températures des différents essais à 1.5cm

Les observations à cette profondeur (*graphique 13*) sont les mêmes qu'à 1.5cm de la face exposée.



Graphique 13 : Comparaison des températures des différents essais à 2cm

8. Comparaison des pertes de masse des différents essais



Graphique 14 : Comparaison des pertes des masses des différents essais

Pour chaque essai, les courbes de perte de masse (*graphique 14*) comportent deux ou trois pentes différentes, la première correspond à l'évaporation de l'eau, la deuxième est la phase de pyrolyse du bois et la troisième n'est présente que pour les bûches 1, 8, 10 et 11 et correspond à la combustion. Le *tableau 5* ci-dessous résume ces différentes vitesses de perte de masse.

Essais

	Coefficient directeur séchage	Coefficient directeur séchage + pyrolyse	Coefficient directeur séchage + pyrolyse + combustion	Coefficient directeur pyrolyse	Coefficient directeur combustion
Bûche 1	0,026	0,174	0,349	0,148	0,149
Bûche 2	0,009	0,215	Pas de combustion	0,206	Pas de combustion
Bûche 3	0,044	0,455	Pas de combustion	0,411	Pas de combustion
Bûche 4	0,015	0,144	Pas de combustion	0,130	Pas de combustion
Bûche 5	0,017	0,249	Pas de combustion	0,232	Pas de combustion
Bûche 6	0,015	0,145	Pas de combustion	0,130	Pas de combustion
Bûche 7	0,014	0,304	Pas de combustion	0,290	Pas de combustion
Bûche 8	0,023	0,184	Pas de combustion	0,161	Pas de combustion
Bûche 10	0,027	0,148	0,306	0,121	0,131
Bûche 11	0,020	0,130	0,284	0,109	0,134
Moyenne bûche sèche	0,021	0,215	0,313	0,194	0,138
Bh2	0,113	0,108	Pas de combustion	-0,005	Pas de combustion
Bh3	0,034	0,087	Pas de combustion	0,053	Pas de combustion

Tableau 5 : Pentes de pertes de masse des différents essais

V. Conclusion

Ce projet de fin d'étude nous a permis d'acquérir des connaissances approfondies dans le domaine du Bois-Énergie et de la modélisation avec le logiciel « Abaqus ». A l'issue de ce projet, nous pouvons dire qu'un modèle élément fini correspondant à la dégradation thermique de bûches a été élaboré. Pour rendre fidèle le modèle aux essais nous avons avancé pas à pas. Le but était de prendre en compte un nouveau paramètre une fois le précédent bien intégré au modèle. Cette modélisation pas à pas a permis de comprendre comment chaque paramètre influe sur les résultats de la modélisation. Les ajustements et la prise en comptes des paramètres choisis proviennent des observations lors des essais. Le couplage de valeurs issues de la littérature avec celle des expériences permet d'obtenir un modèle se rapprochant de la réalité.

Cependant le modèle n'est pas encore totalement exploitable pour simuler le comportement d'une bûche dans un poêle. En effet, la convection n'a pas pu être intégrée dans la subroutine. Or on sait que cette convection évolue au cours de la combustion du bois. Une nouvelle subroutine plus complète doit donc être écrite permettant de faire varier les paramètres les plus influents en fonction de la température et non plus en fonction du temps. De plus la transformation du charbon en cendre doit être privilégiée plutôt que le matériau, passé une certaine température, ne devienne de l'air. Enfin le maillage doit être encore plus fin (*maille de dimension 0,5 mm * 0,5 mm * 0,5 mm*) pour intégrer la vitesse de perte de masse de la bûche. Cette étape permettra de réduire la vitesse de propagation de la chaleur dans la bûche et donc d'être plus précis.

Comme le montre les différentes expériences qui ont été menées dans le cadre de ce PFE, il est possible de modéliser, en partie pour le moment, les différents flux qui interagissent dans la combustion du bois. Elles ont également permis de constater que d'autres éléments ou facteurs avaient des conséquences certaines sur les résultats et donc leurs interprétations. On peut donc conclure que l'objectif a été atteint et qu'il appartient à l'avenir de le perfectionner. Ainsi, l'optimisation des dispositifs de chauffage au bois devient possible, et bien que mis au pilori par certains, semble promis à un bel avenir.

Notre pays dispose là d'une richesse considérable qui par une haute technicité (*ingénieurs et techniciens*) et un respect raisonné de l'environnement (*citoyens*) peuvent être la genèse d'une autonomie énergétique inépuisable, concourant à une parfaite harmonie.

Cette autonomie est là autour de nous, souvent insoupçonnable, alors pourquoi chercher un ailleurs hypothétiquement meilleur, pourquoi ne pas se fier à notre instinct d'homme des cavernes et croire comme Charles de Gaulle, qu' « *On ne fait rien de sérieux si on se soumet aux chimères* » ! Mais nous en n'avons peut-être plus le temps matériel et pour finir comme nous avons commencé par un slogan publicitaire : « Économie d'énergie : faisons vite, ça chauffe »

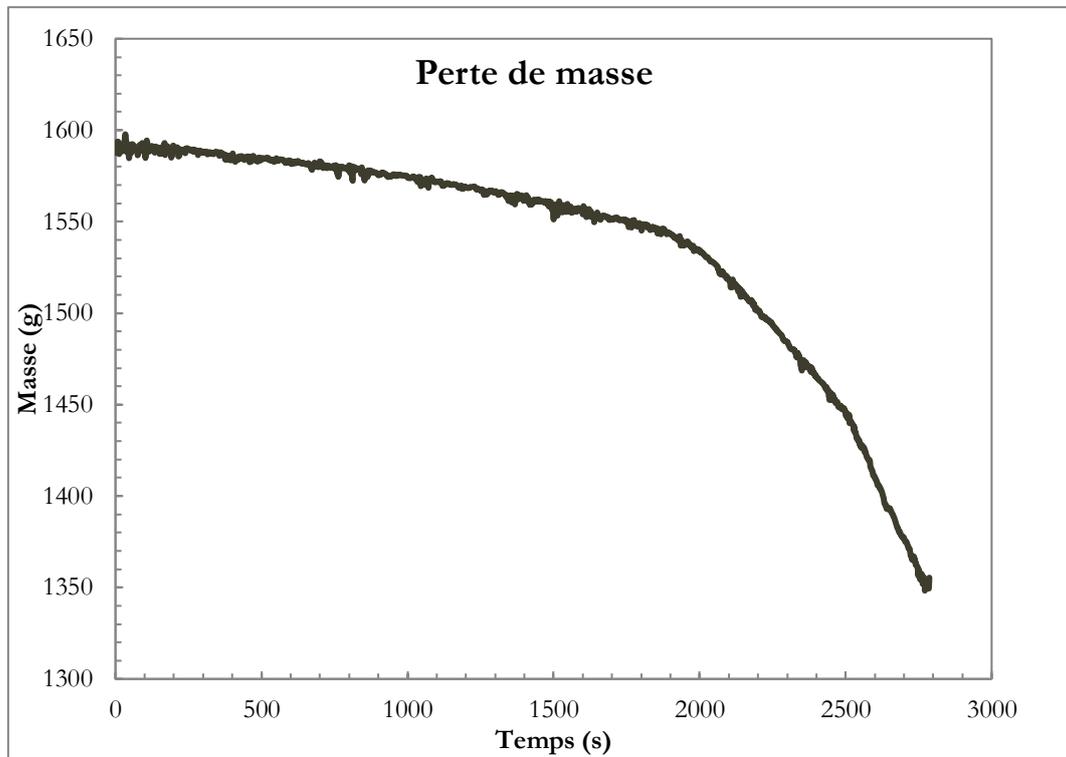
VI. Bibliographie

TRAVAUX CITÉS

- [1] **Babu, B.V. et Chaurasia, A.S.** Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle. *Chemical Engineering Science Volume 59, Issue 10*. Mai 2004, pp. 1999-2012.
- [2] **Grieco, Enrico et Giancarlo, Baldi.** Analysis and modelling of wood pyrolysis. *Chemical Engineering Science Volume 66, issue 4*. Février 2011, pp. 650-660.
- [3] **Zeng, Kuo, et al., et al.** Modeling of beech wood pellet pyrolysis under concentrated solar radiation. *Renewable Energy Volume 99*. Décembre 2016, pp. 721-729.
- [4] **Bryden, Kenneth M., Ragland, Kenneth W. et Rutland, Christopher J.** Modeling thermally thick pyrolysis of wood. *Biomass and Bioenergy, Volume 22, Issue 1*. January 2002, pp. 41-53.
- [5] **Dias de Moraes, Poliana.** *Influence de la température sur les assemblages bois*. Université Henri Poincaré, Nancy 1. 2003. p. 106, Thèse de doctorat.

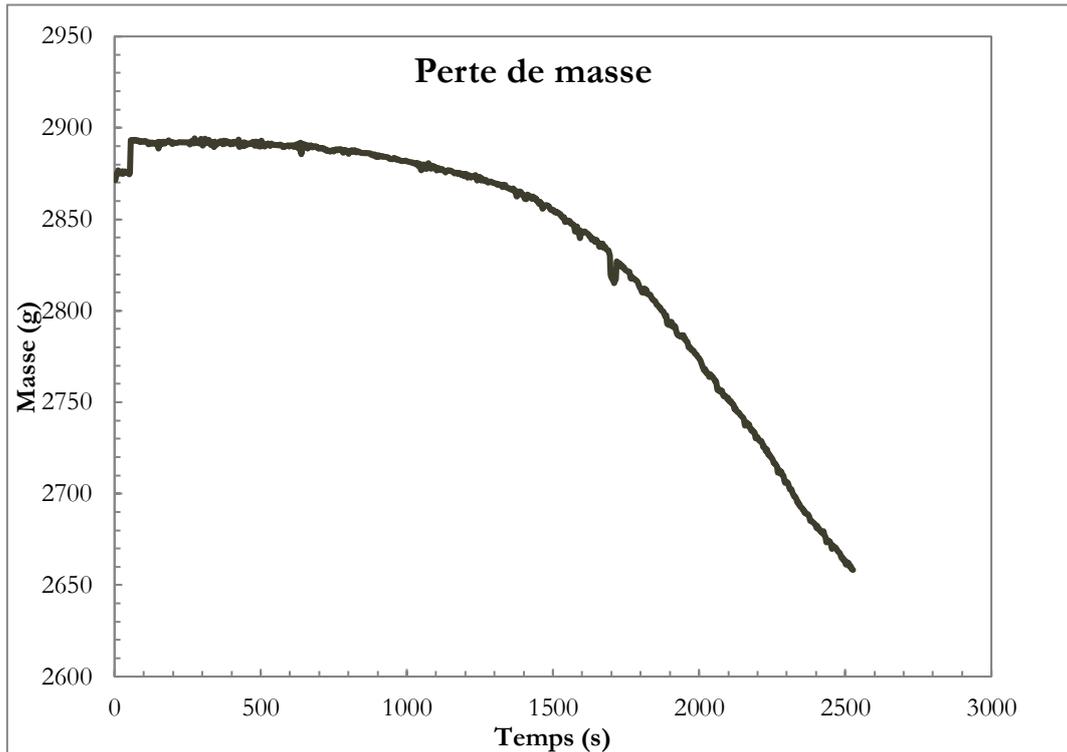
VII. ANNEXES

1. Essai n°1

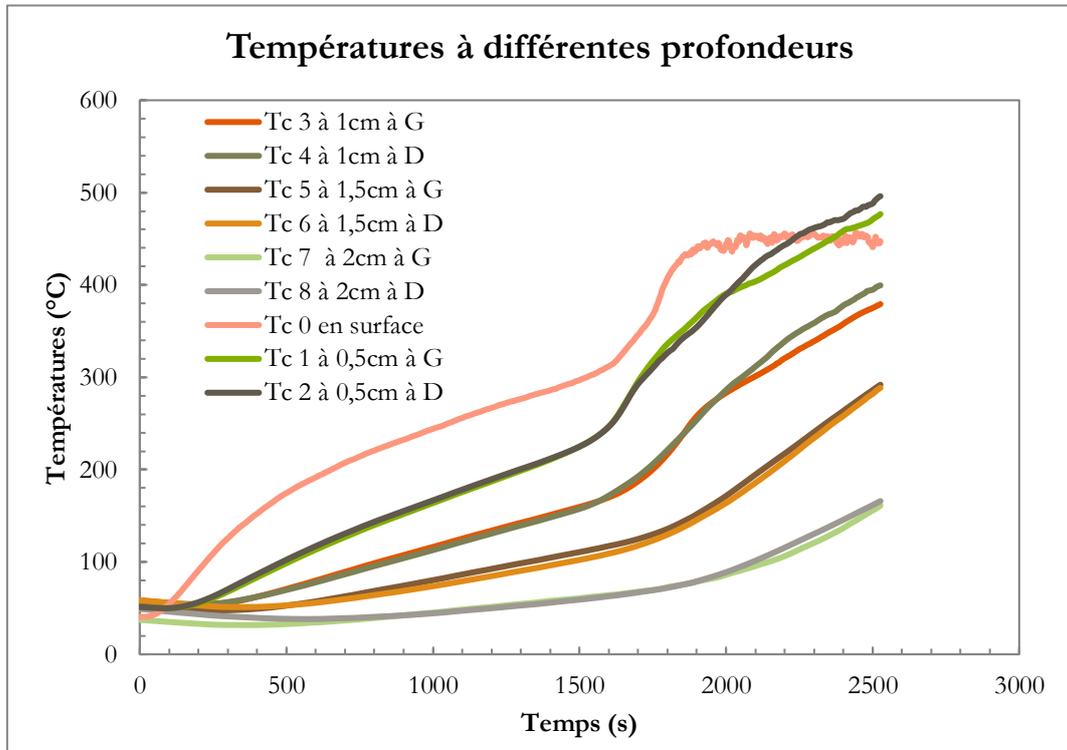


Graphique 15: Perte de masse essai 1

2. Essai n°2

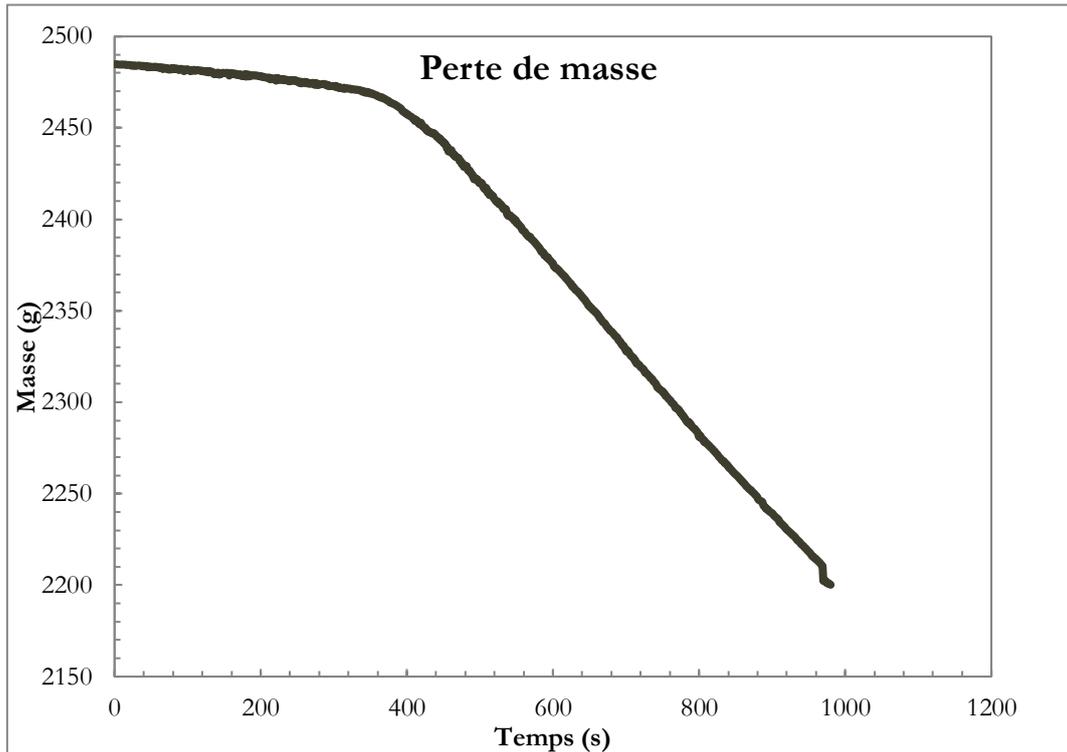


Graphique 16: Perte de masse essai 2

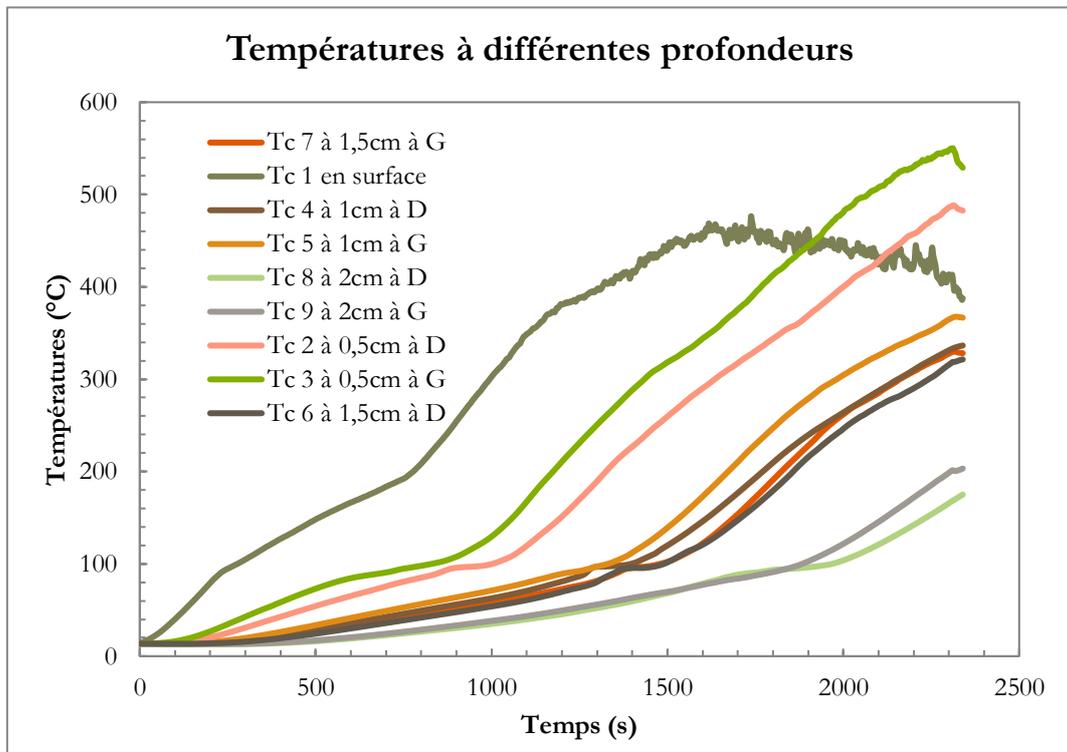


Graphique 17: Températures essai 2

3. Essai n°3

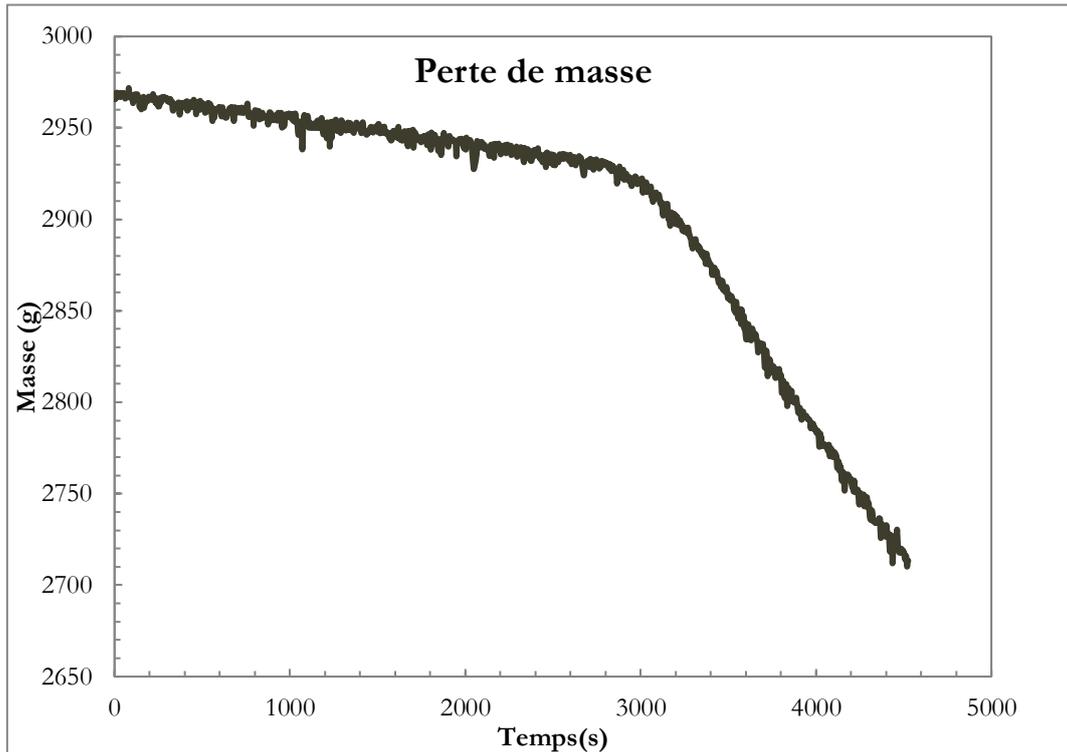


Graphique 18: Perte de masse essai 3

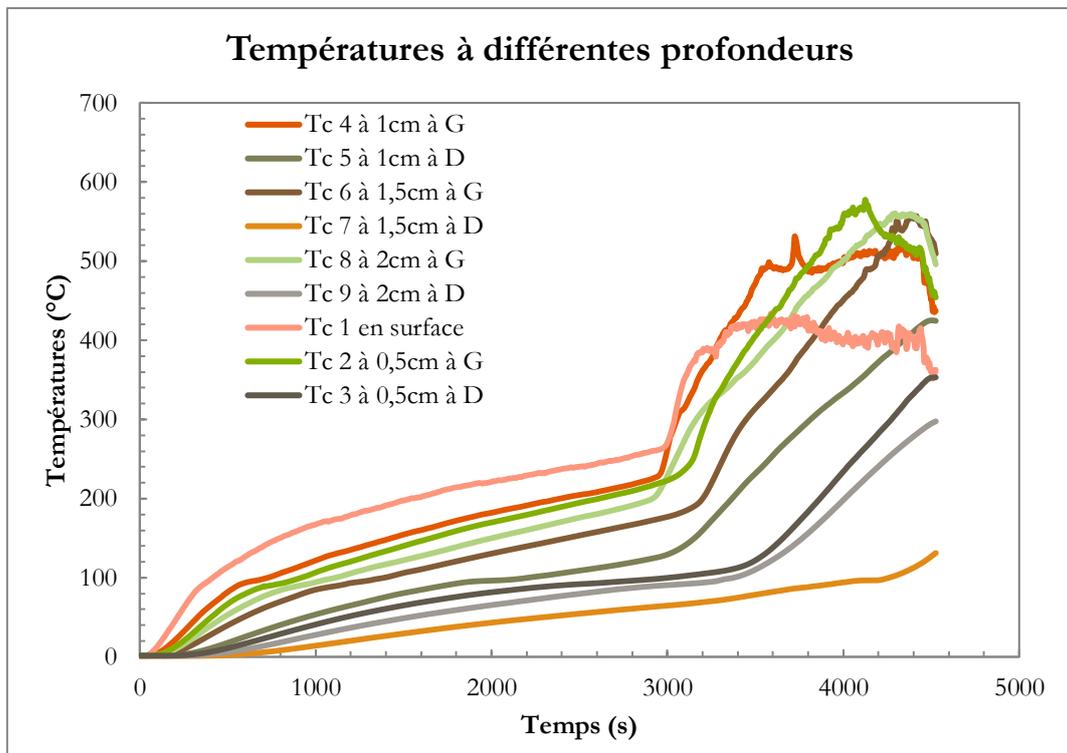


Graphique 19: Températures essai 3

4. Essai n°4

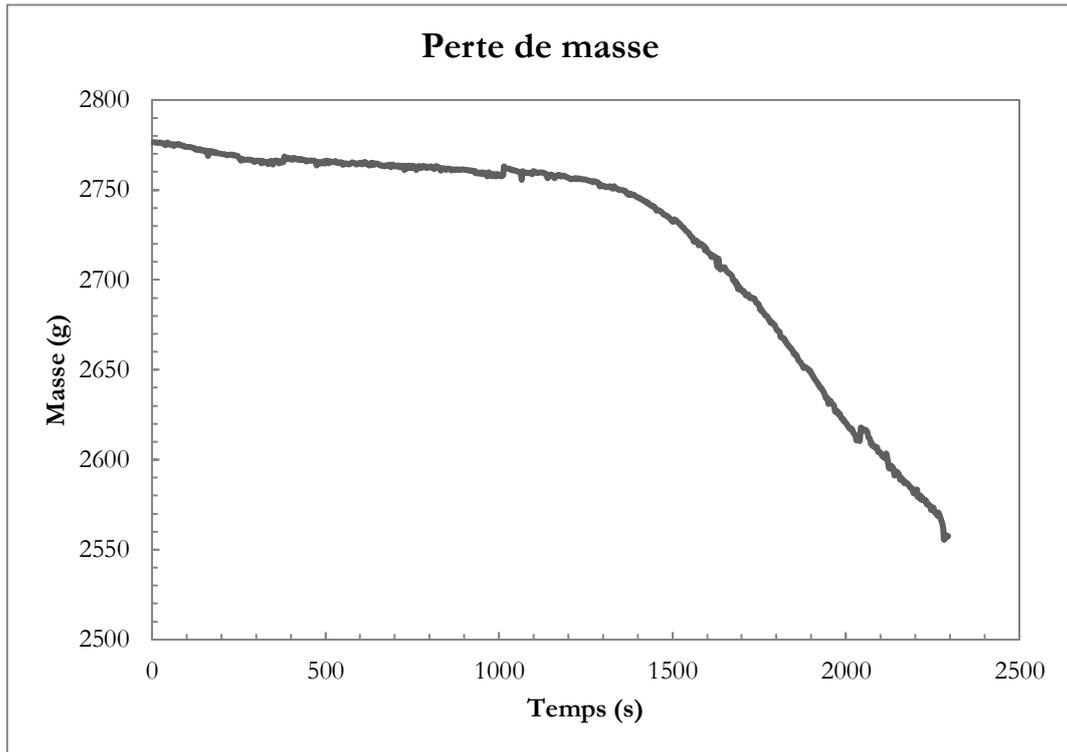


Graphique 20: Perte de masse essai 4

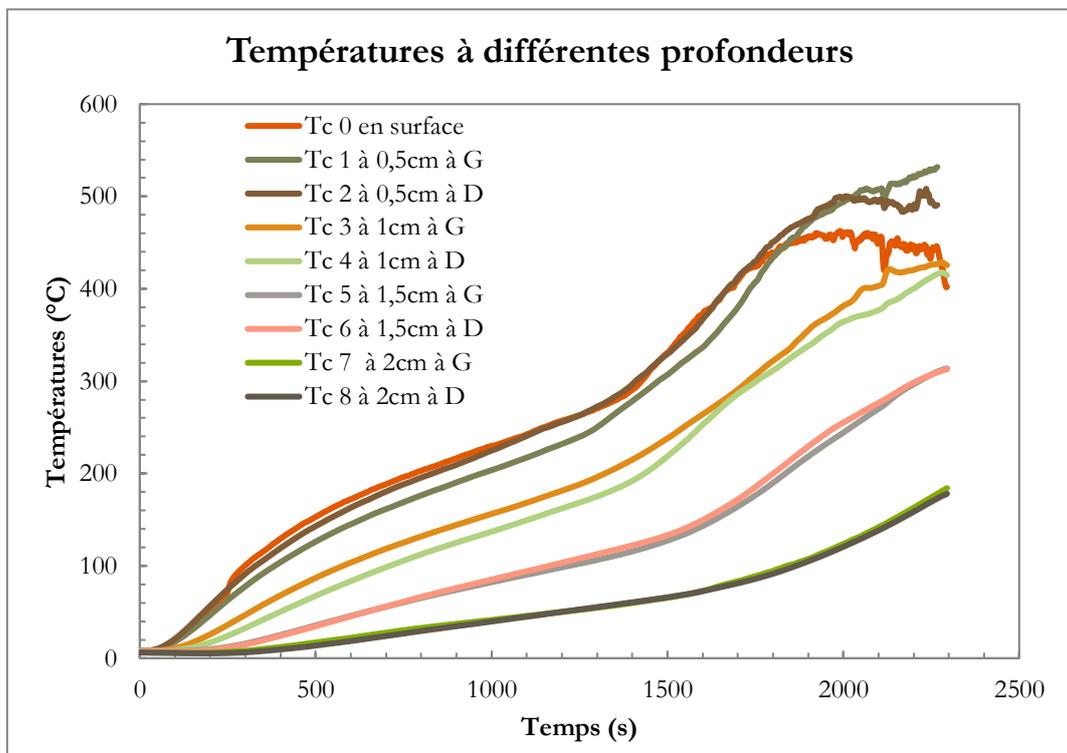


Graphique 21: Températures essai 4

5. Essai n°5

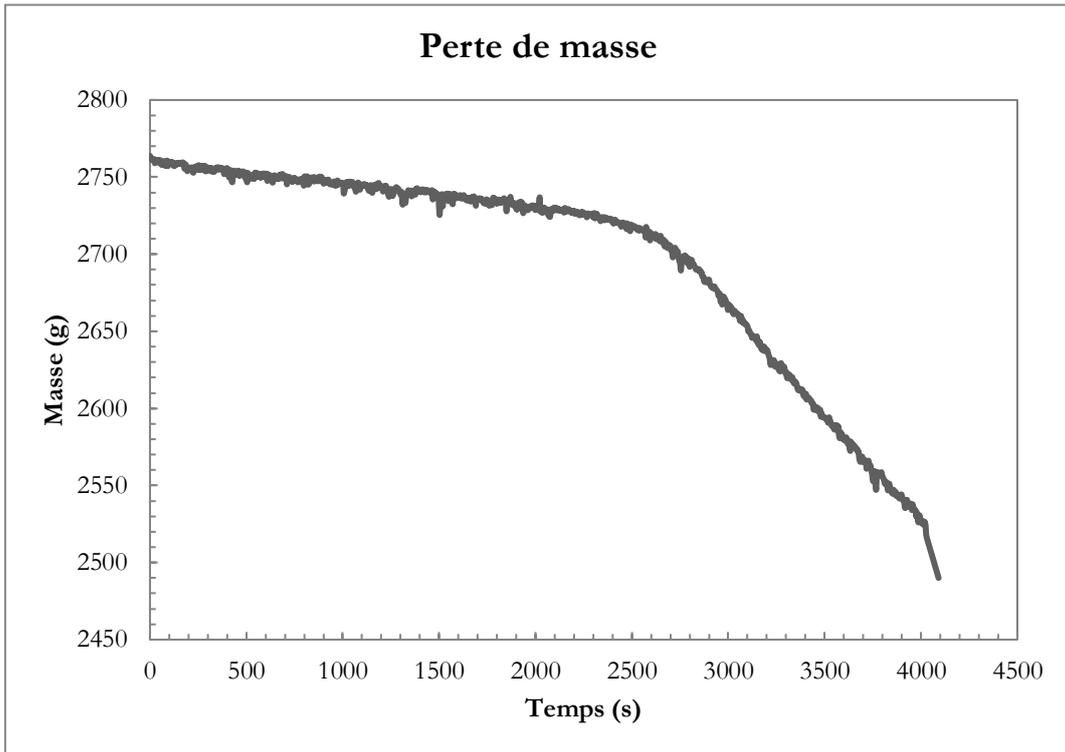


Graphique 22 : Perte de masse essai 5

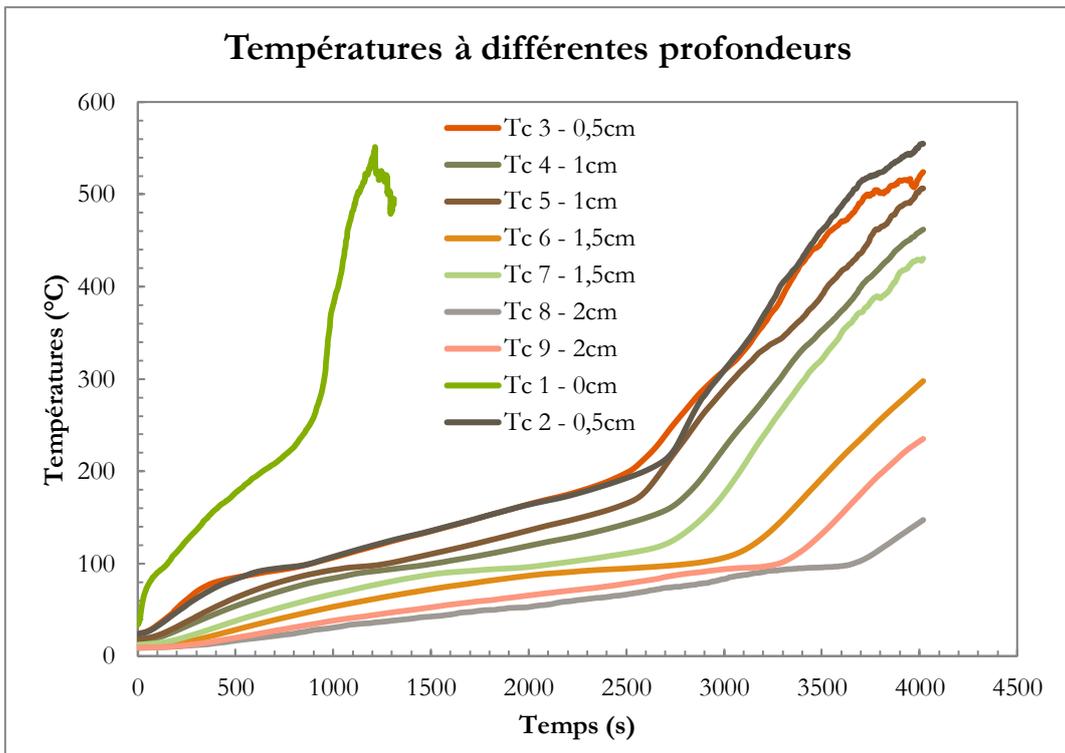


Graphique 23 : Températures essai 5

6. Essai n°6

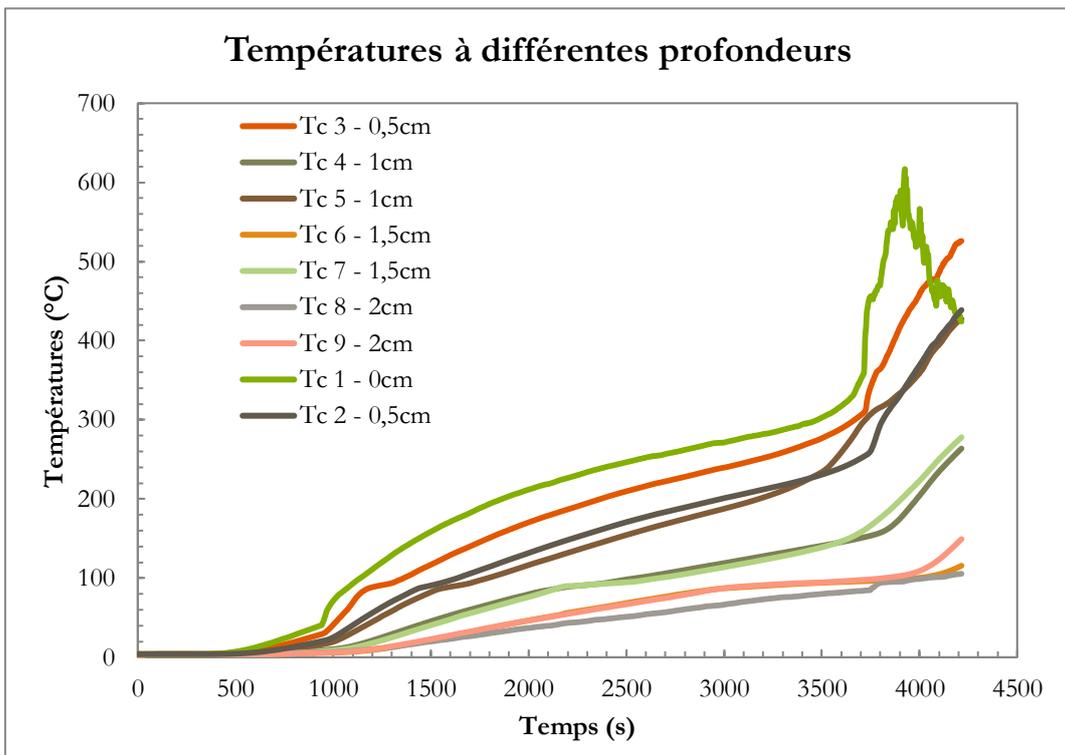
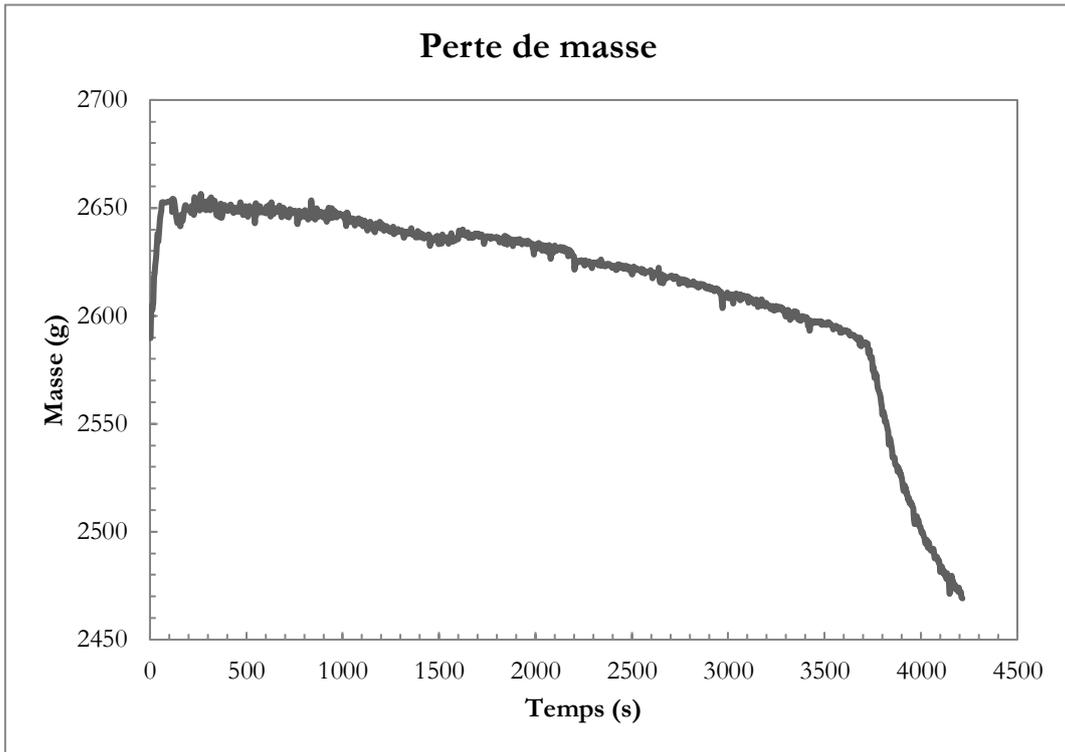


Graphique 24 : Perte de masse essai 6

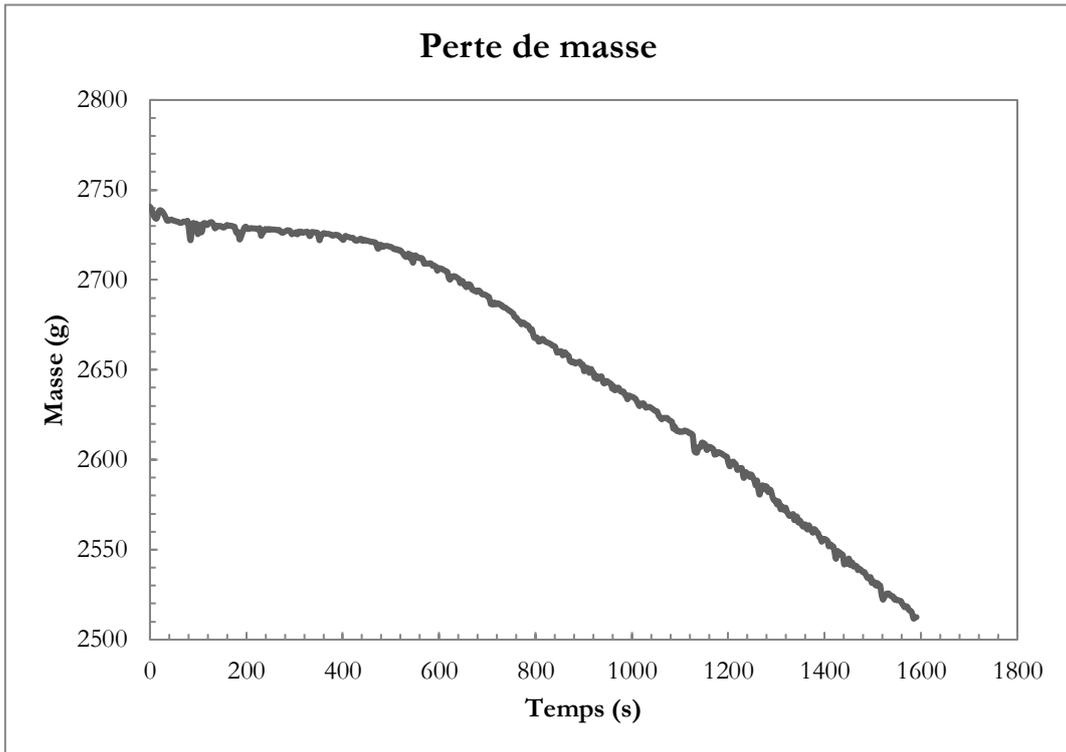


Graphique 25 : Températures essai 6

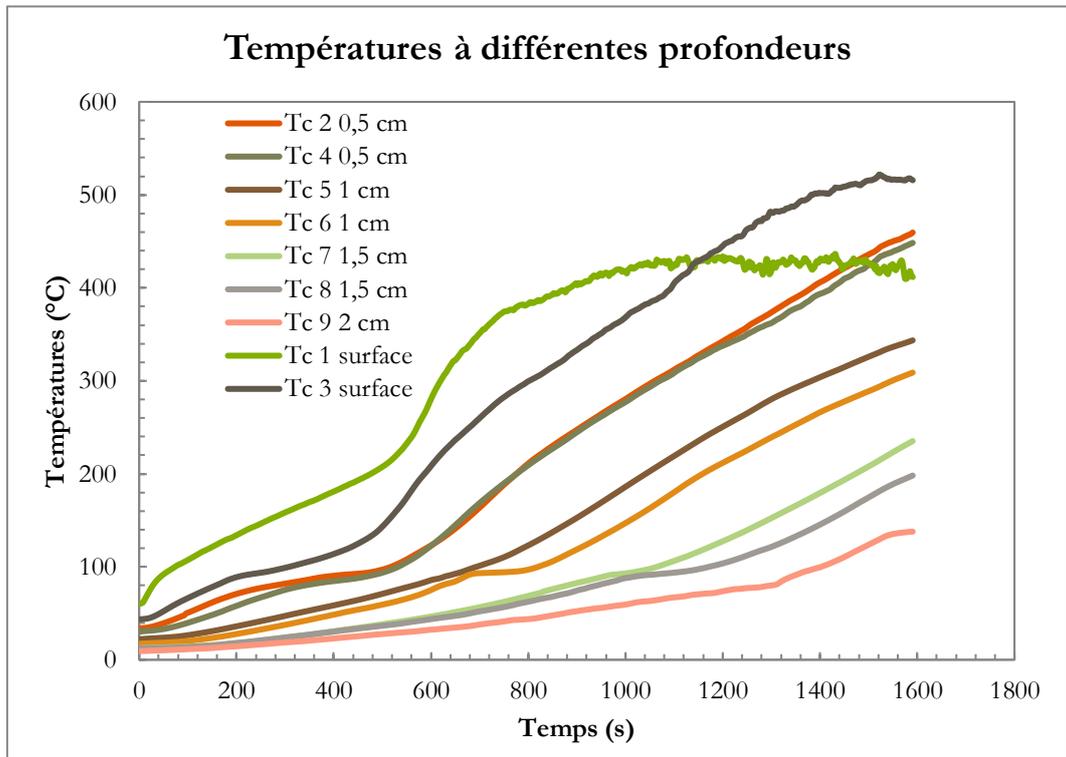
7. Essai n°7



8. Essai n°8

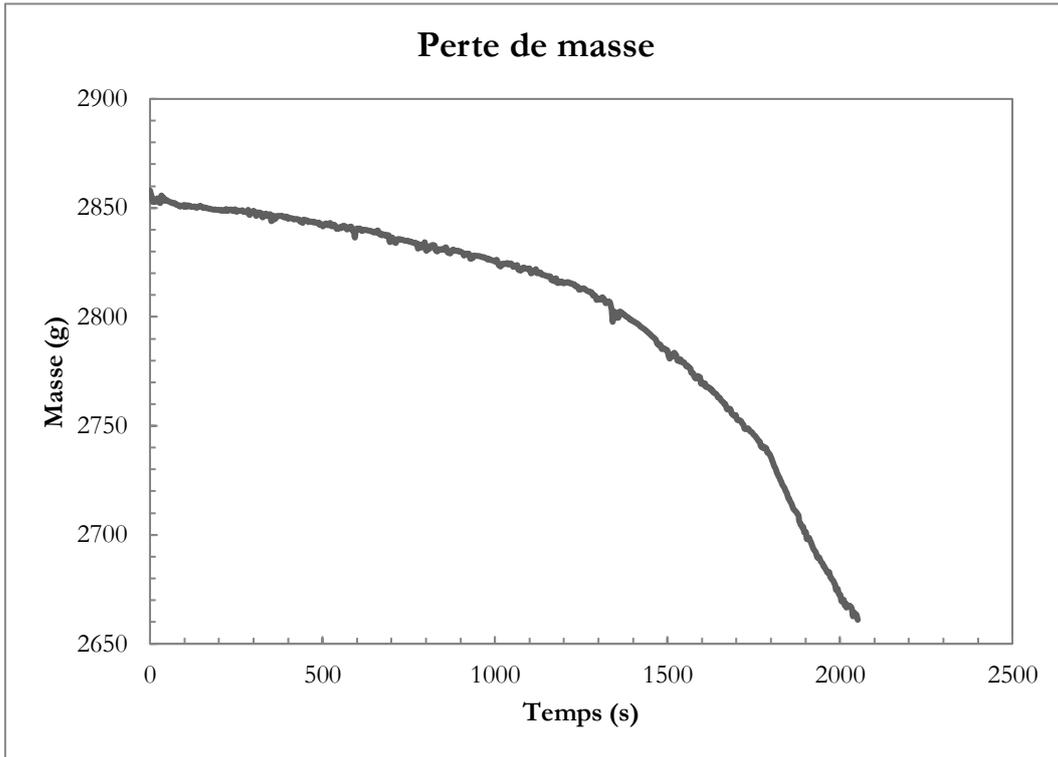


Graphique 28: Perte de masse essai 8

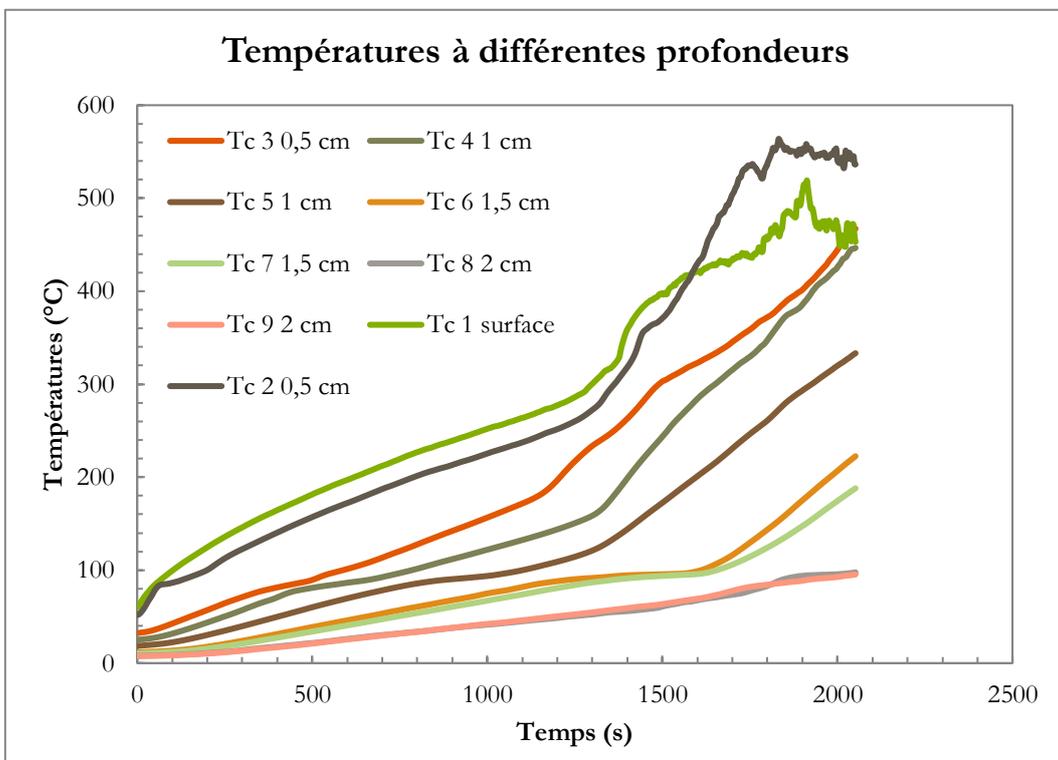


Graphique 29 : Températures essai 8

9. Essai n°10

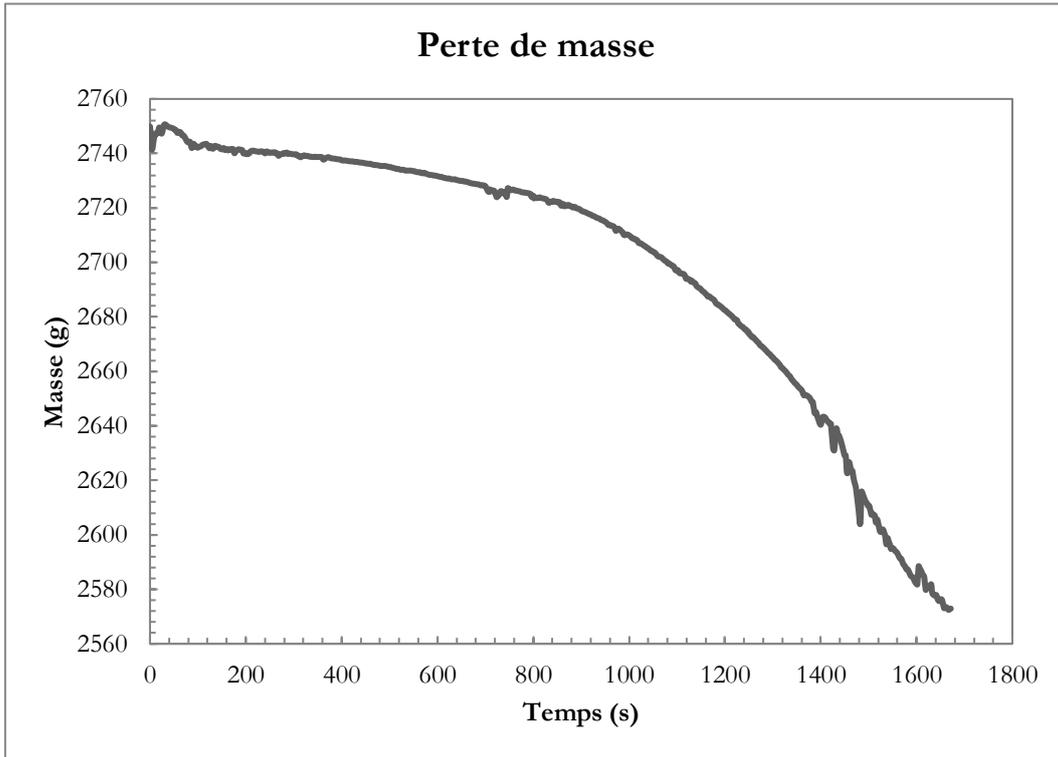


Graphique 30 : Perte de masse essai 10

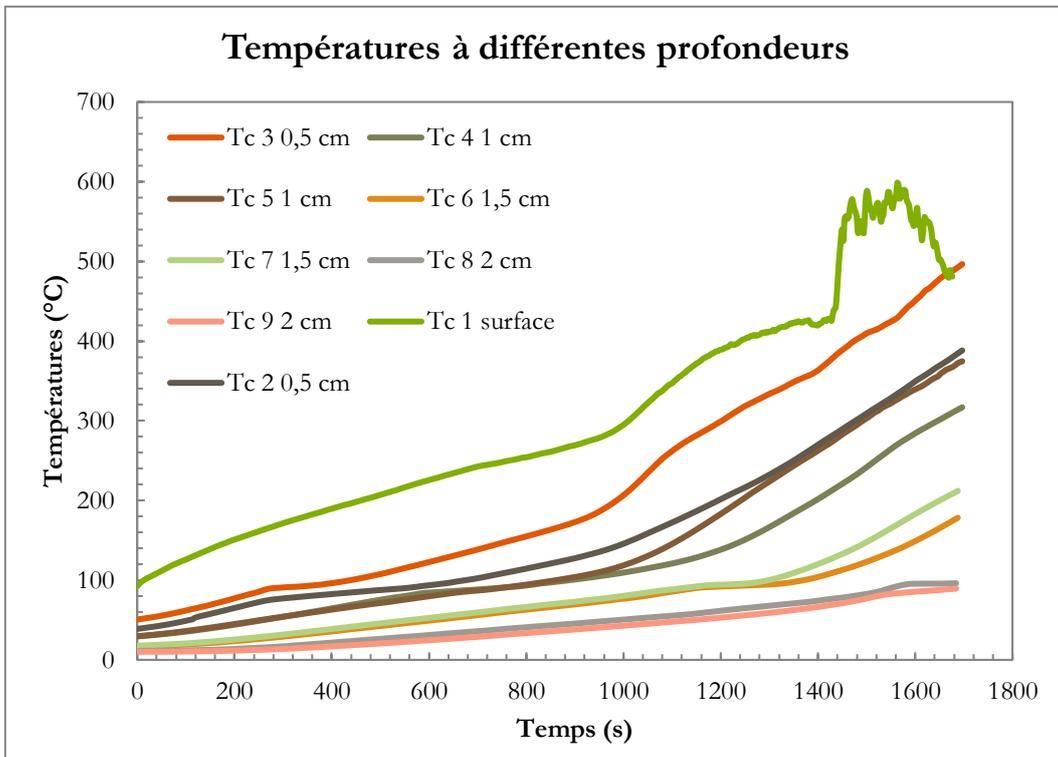


Graphique 31 : Températures essai 10

10. Essai n°11

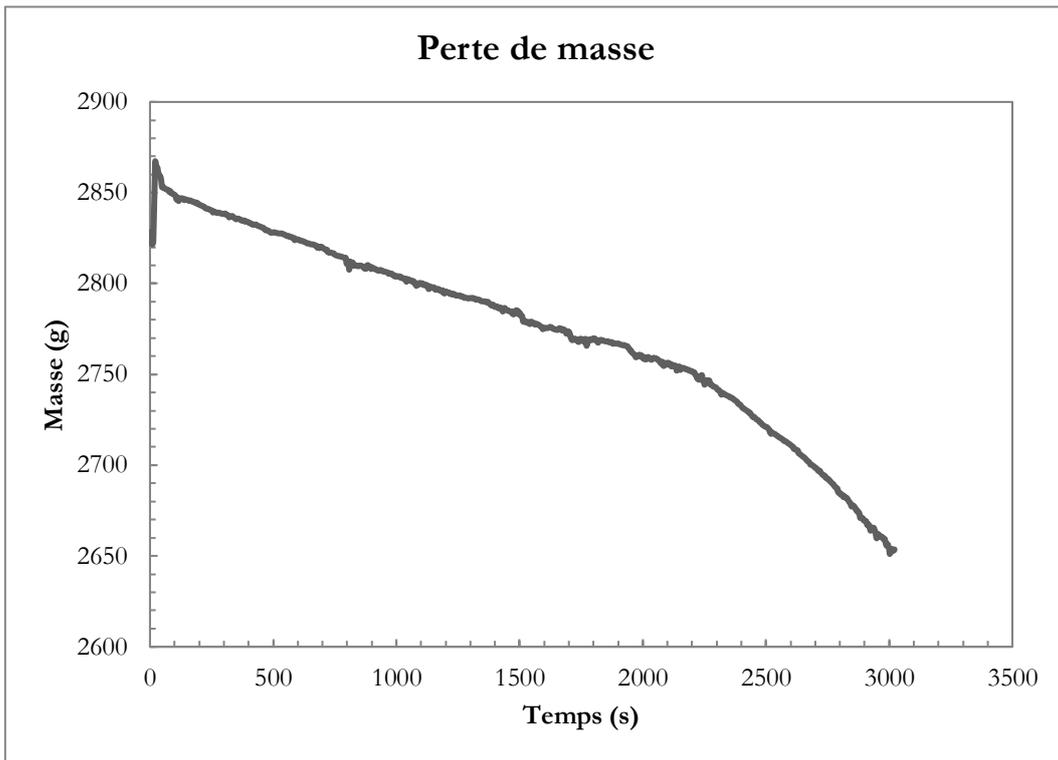


Graphique 32 : Perte de masse essai 11

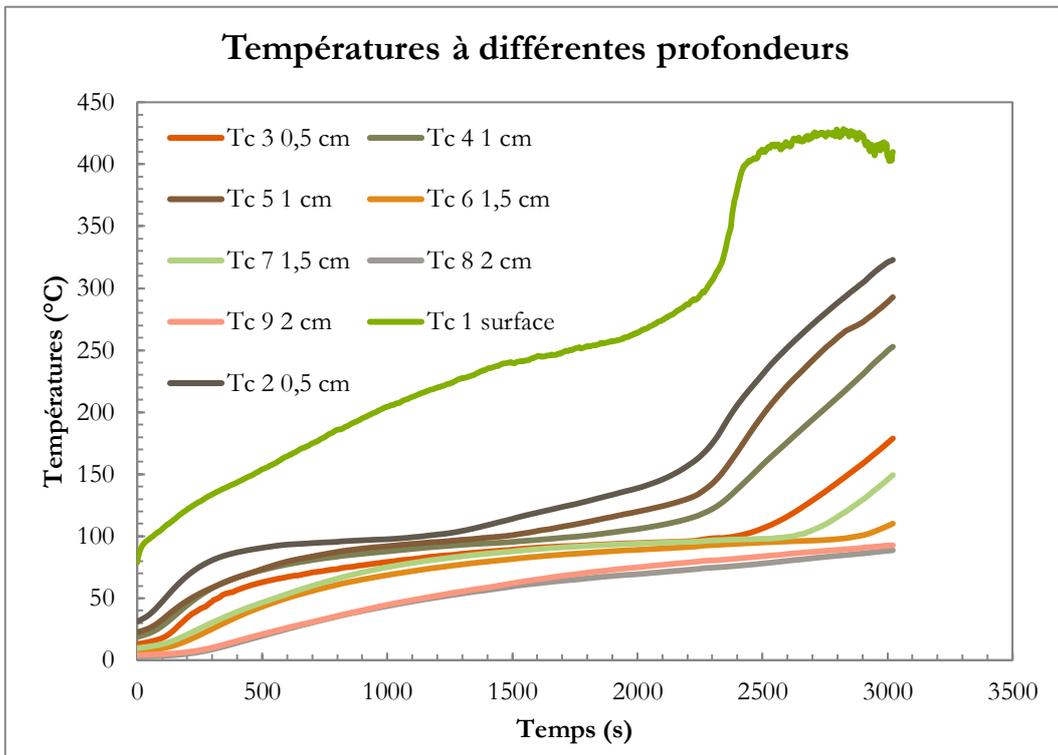


Graphique 33 : Températures essai 11

11. Essai humide n°1

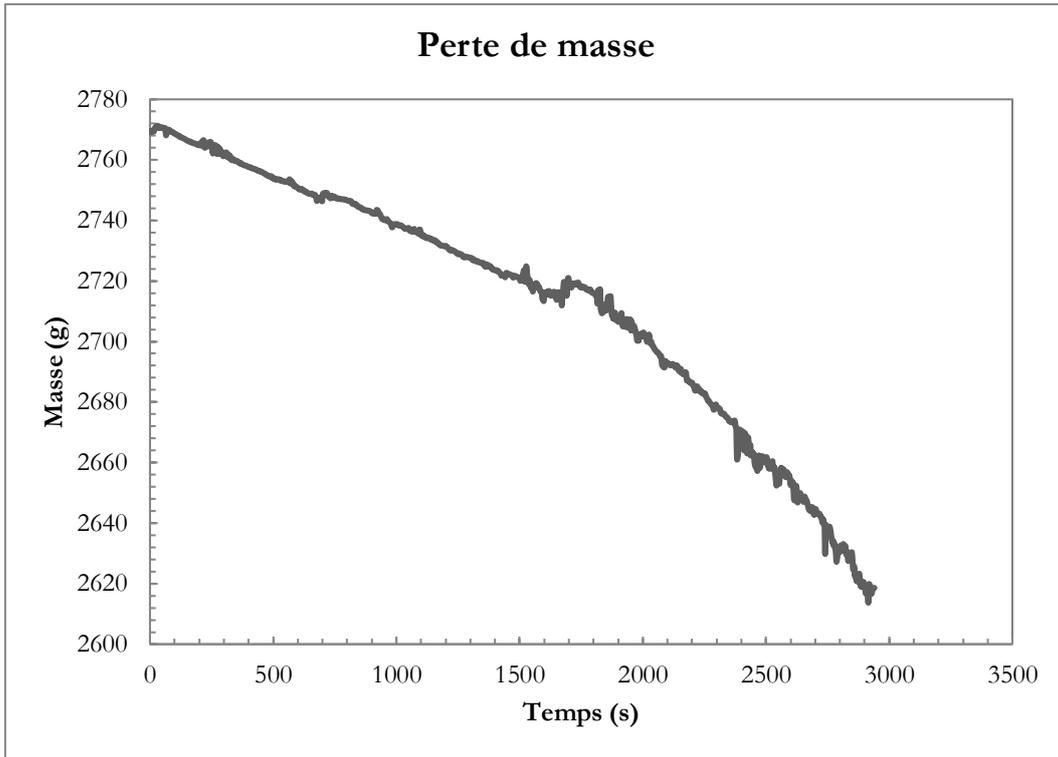


Graphique 34 : Perte de masse essai humide 1

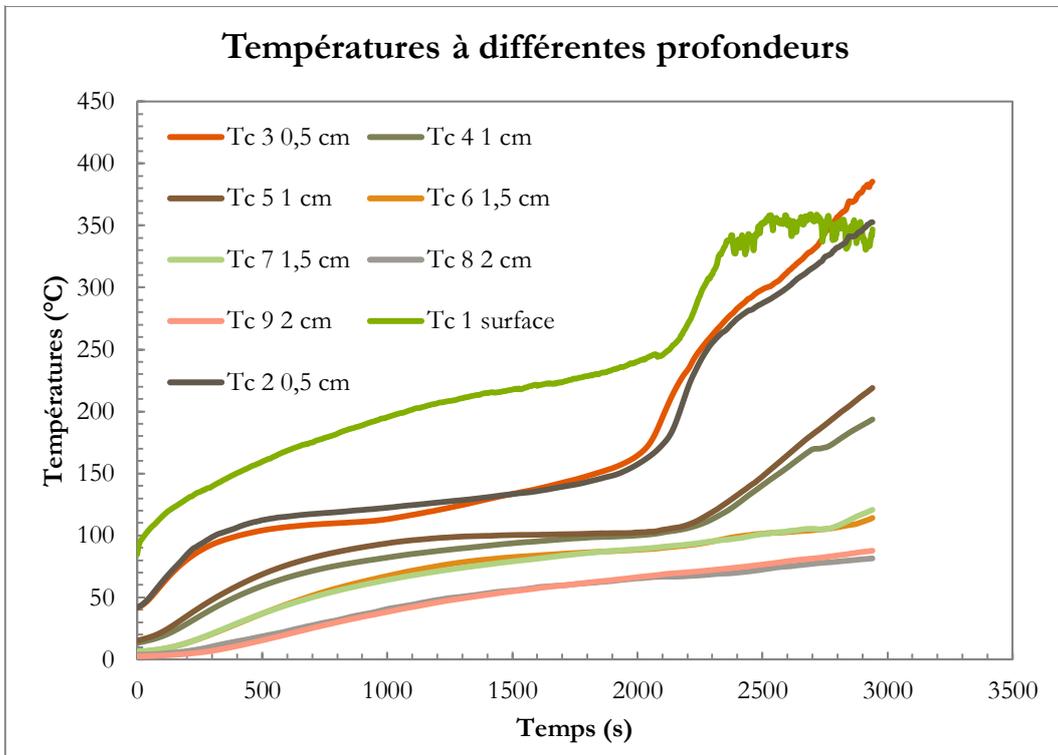


Graphique 35 : Températures essai humide 1

12. Essai humide n°2



Graphique 36 : Perte de mass essai humide 2



Graphique 37 : Températures essai humide 2

13. Création du modèle « Abaqus »

i. Créer la géométrie

Module Part: Create part → Modeling space : 3D, Type : Deformable, Base feature shape: Solid, Base feature type: Extrusion, Approximate size 200. Il faut ensuite créer la géométrie de la bûche avec les outils à disposition (*remplir les distances en mètres*)

Une fois la géométrie créée, cliquer sur Done et renseigner la profondeur en mètres

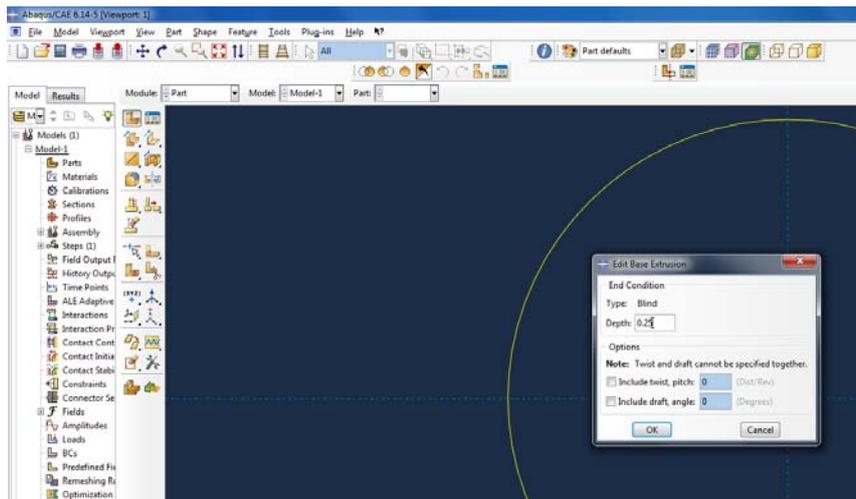


Figure 13 : Créer une géométrie

Pour récupérer la température à des points précis (au centre de la bûche et sur l'axe dans le cas du PFE) il faut séparer la bûche en deux de manière à pouvoir placer des « sets » au centre de la bûche. Pour ce faire, utiliser l'outil partition face et sélectionner deux points l'un en face de l'autre :

ANNEXES

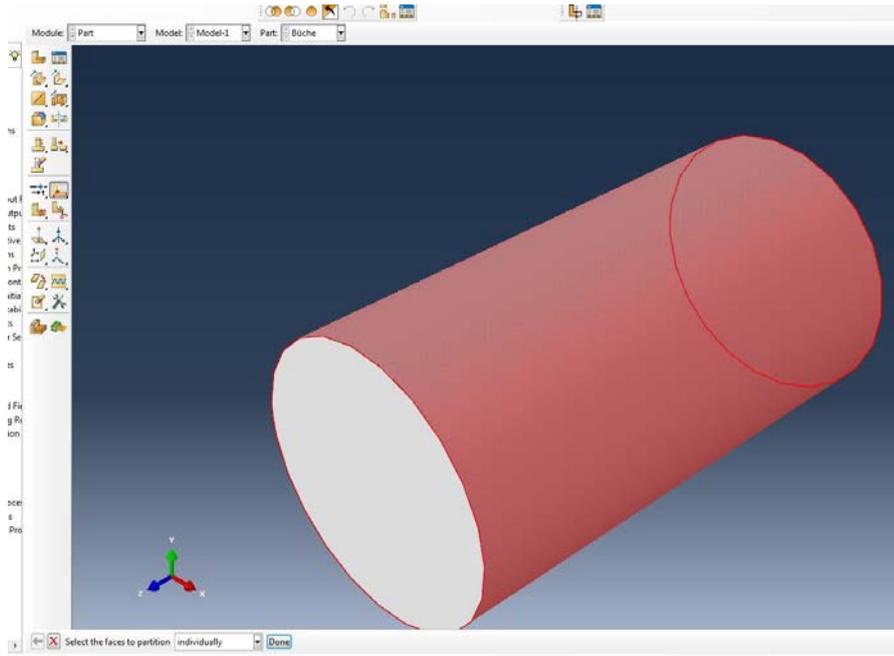


Figure 14 : Créer les différentes parties de la bûche

Utiliser ensuite l'outil create partition, définie cutting plane suivant un point (*le milieu de la ligne créée*) et une normale (*la ligne créée*).

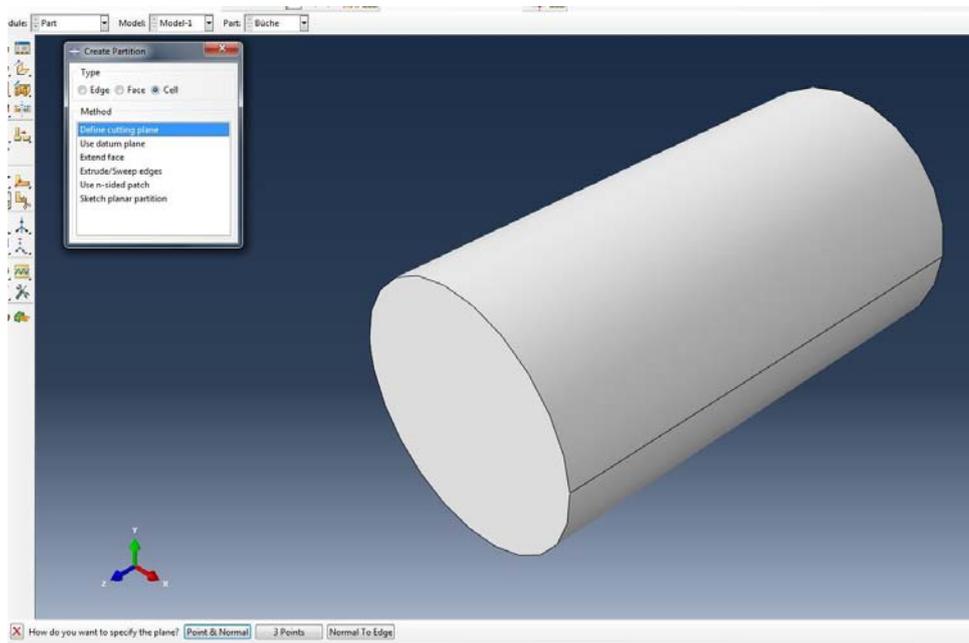


Figure 15 : Créer la ligne de positionnement des thermocouples

ii. Renseigner les propriétés du bois

Module Property :

- Create Material → Renseigner les champs Conductivity, Specific heat dans l'onglet Thermal et Density dans l'onglet General. Cocher pour ces 3 propriétés la case "Use temperature dependent data".
- Create Section → Category: Solid, Type: Homogeneous, cliquer sur continue, la fenêtre Edit section apparait, renseigner Material: Hêtre (*le matériau créé*).
- Assign Section → Sélectionner la bûche en entier et cliquer sur Done, la fenêtre Edit section Assignement s'ouvre, vérifier les données et cliquer sur OK. Le solide devient vert.

iii. Créer l'assemblage

Module Assembly :

- Create Instance → From parts, Parts: Bûche, instance Type: Dependent

iv. Créer les étapes de chargement

Module Step : Il faut créer 3 steps différents pour la prise en compte de la variation d'émissivité et du rayonnement du charbon.

- Create Step → After Initial, Procedure type: General, Heat Transfer, la fenêtre Edit step s'affiche; Dans l'onglet Basic, Response: Transient, Time period: 1000s pour le step1, 500s pour le step2 et 1500s pour le step3. Dans l'onglet Incrementation, Maximum number of increments: 1000, Increment size Initial 1, Minimum: 1.10^{-7} , Maximum: 60, Max allowable temperature change per increment: 50, Max allowable emissivity change per increment: 0.5.
- Create Field output → Domain: Whole model, Frequency: Every x unit of time, x=60, Output variables: Thermal (NT, TEMP, HFL).

v. Renseigner les attributs du modèle

Dans l'onglet model, model manager, edit attributes, renseigner Absolute zero temperature ($273^{\circ}K$) et Stefan-Boltzmann constant ($5,67.10^{-8}$).

vi. Renseigner les interactions

Module Interaction : on renseigne ici la convection qui va être constante sur tout l'essai et l'émissivité de la surface de la bûche prise à 0.75 sur le premier step et à 1 sur les deux derniers

- Create Interaction → Surface film condition (*convection*), Sélectionner la surface chargée, renseigner le champ film coefficient (*entre 10 et 20 généralement*) et sink temperature (*la température ambiante*) cette convection s'applique dès le step 1 et est propagé sur les step 2 et 3.
- Create Interaction → Surface radiation (*émissivité*), sélectionner la surface chargée, et renseigner les champs Emissivity (*0.75*) et Ambient temperature (*283*) et vérifier que la propriété est bien appliquée au step 1.
- Create Interaction → Surface radiation (*émissivité*), sélectionner la surface chargée, et renseigner les champs Emissivity (*1*) et Ambient temperature (*283*) et vérifier que la propriété est bien appliquée aux steps 2 et 3.

vii. Renseigner le flux

Module Load :

- Create Load → Surface heat flux, puis sélectionner la face chargée et renseigner le flux en W/m^2
- Create Predefined field → Step Initial, Category: Other, Types for selected step: Temperature. Sélectionner la géométrie en entier et renseigner le champ magnitude (*Température initiale de la bûche*)

viii. Créer le maillage

Module Mesh :

- Seed part → Renseigner le champ Approximate global size (0.005) et cliquer sur OK
- Mesh part → yes
- Assign element type → sélectionner la géométrie en entier et cliquer sur done, choisir Heat transfer dans Family et cliquer sur OK

ix. Placer les thermocouples

Dans l'onglet tools, set, manager, create, renommer le "set" et choisir node. Cliquer sur le point du maillage voulu et cliquer sur Done, reproduire cette procédure pour tous les thermocouples à placer.

x. Démarrer le calcul

Module Job :

- Create job → cliquer sur le model à calculer et cliquer sur Continue, la page Edit job apparait, cliquer sur OK.
- Job manager → Choisir le job créé et cliquer sur Submit, l'avancement du calcul peut être suivi dans Monitor, la visualisation est accessible depuis Results

xi. Extraire les résultats des thermocouples

Module Visualization :

- Create job → XY data → manager → choisir current session → create → ODB field output, continue → dans l'onglet Variables et dans la section output variables choisir position : unique nodal → dans l'onglet Elements/Nodes → Récupérer les températures des nœuds 1 par 1 → cliquer sur Save puis Edit.

Résumé

Les travaux d'optimisation de l'efficacité énergétique des appareils de chauffage au bois, en particulier des poêles à bois passent par l'analyse des flux d'énergie dans la chambre de combustion et dans le combustible, l'analyse cinétique des températures au sein d'une bûche et de sa perte de masse permet de mieux caractériser les mécanismes de dégradation du combustible. L'objectif étant de construire un modèle élément finis de la dégradation et des flux thermiques au sein de cette bûche.

Mots clés : Modélisation, dégradation thermique, poêle à bois, bûche, chauffage au bois.

Abstract

To optimize the energy efficiency of wood-burning appliances, especially wood-burning stoves, it is necessary to analyze the energy flows in the combustion chamber and in the fuel. The kinetic analysis of the temperatures within a log and its loss of mass make it possible to characterize the mechanisms of degradation of the fuel, the objective is to construct a finite element model of thermal fluxes within this log.

Keywords: Modeling, thermal degradation, wood stove, log, wood heating.