



'Manufacturing Technologies'
Section Microtechnique, Bachelor (BA6)
Printemps 2021

Machine à croque-monsieur

Lara LAAMARI Xavier NAL Antoine PERRIN
Groupe Nr. 29



Contents

Introduction	1
1 Analyse du produit	2
1.1 Exigences relatives à l'analyse fonctionnelle et aux spécifications du produit	2
1.1.1 Description du produit ('What')	2
1.1.2 Utilisateurs cibles ('Who')	2
1.1.3 Dans quel environnement l'utiliser ('Where')	2
1.1.4 Principe de fonctionnement ('How')	3
1.2 Liste des pièces utilisées dans la fabrication du produit	4
1.2.1 Diagramme hiérarchique sur la façon dont les parties sont interconnectées	4
1.2.2 Liste des pièces	5
1.3 Analyse électrique du système	11
1.3.1 Analyse électrique du système	11
1.4 Modèle de la fonction principale du produit	14
1.5 Analyse détaillée des éléments clés du produit ("cahier des charges spécifique")	18
1.5.1 Identification des composants clés pour le fonctionnement du système	18
1.5.2 Analyse des besoins en éléments clés	18
2 Implémentation	20
2.1 Processus utilisé pour les principaux éléments identifiés dans la partie I . . .	20
2.2 Séquence d'assemblage	22
2.3 Analyse des coûts	24
3 Analyse critique / Variante(s) (2 pts)	26
3.1 Points faibles de la fabrication, source possible de défaillance	26
3.2 Suggestion(s) d'améliorations et de mesures correctives possibles	26
3.3 Comparaison avec d'autres modèles de conception répondant complètement ou partiellement au même ensemble de spécifications	27
4 Conclusion	29
5 Références	30
6 Annexe	32

Introduction

A l'aube de l'année 2021, la machine à croque-monsieur s'impose comme celle qui permettra un renouveau des ustensiles de cuisine et faire de cette endroit la place incontournable de la maison. La machine à croque-monsieur, objet (presque) de luxe, permet de redécouvrir la gastronomie contemporaine dans un délicieux mélange de jambon, fromage. Le tout posé sur de fines tranches de pain qui apportent un peu de fermeté dans la douceur du fromage entremêlé au bon goût du jambon.

Dans le cadre de notre cours de Manufacturing Technologies nous avons étudié le fonctionnement d'une machine à croque-monsieur dans notre projet de reverse engineering. Nous avons choisi de nous intéresser à ce produit car il nous intrigue et est composé d'un assemblage de plusieurs matériaux ainsi que d'un peu d'électronique. De plus ce fut une parfaite excuse pour se retrouver lors de soirées croque-monsieur. Nous allons d'abord analyser le produit en prêtant une attention particulière à l'étude thermique. Puis nous verrons dans un second temps comment implementer les différentes fonctions voulues tout en respectant le cahier des charges donné. Enfin nous étudierons les points faibles du produit et apporterons des suggestions.

1 Analyse du produit

1.1 Exigences relatives à l'analyse fonctionnelle et aux spécifications du produit

Notre produit doit pouvoir être utilisé en toute sécurité et garantir que les aliments ne soient pas contaminés par l'objet.

1.1.1 Description du produit ('What')

Notre produit a pour but de gérer la cuisson de croque-monsieurs. Un croque-monsieur peut être fait à la poêle ou au four, mais l'appareil à croque-monsieur permet de rendre le processus plus rapide, plus efficace et de meilleure qualité. La machine à croque-monsieur est un petit appareil, portable grâce à ses poignées, qui permettent de le ranger facilement dans une cuisine. Lorsqu'on souhaite l'utiliser, il est aisément installable (il suffit de le poser sur une surface plane et le brancher). Le temps de préchauffe est rapide (environ 2 minutes) et son utilisation simple (poser le croque-monsieur dedans, attendre 2-3 min et le ressortir). Une fois le croque-monsieur prêt, il est facile de nettoyer les plaques avec une éponge.

L'appareil répond également aux normes d'hygiène qui sont inévitable dans le domaine de l'alimentaire, pour garantir la qualité du produit final. Il doit de plus assurer la sécurité de l'utilisateur, en évitant que l'extérieur de l'appareil ne chauffe trop. Ceci permet à l'utilisateur de manier facilement l'appareil sans que celui-ci ne se blesse, ou que l'environnement (surface sur laquelle il estposé) ne soit abîmé.

Toutes ces caractéristiques rendent cet appareil facile et efficace pour la préparation de croque-monsieurs à domicile.

1.1.2 Utilisateurs cibles ('Who')

La machine à croque-monsieur est un object qui peut s'insérer dans la cuisine de monsieur et madame tout le monde, il s'adresse donc à un large public. L'utilisation allant d'une personne seule à une famille avec plusieurs enfants, on peut également envisager l'utilisation de cet appareil par professionnel. L'utilisation n'est cependant pas adapté à la production en masse (plusieurs 100 par heure).

Il faut également préciser que l'utilisation n'est pas adapté à des enfants trop jeunes car la température des plaques monte à plus de 200°C.

1.1.3 Dans quel environnement l'utiliser ('Where')

L'environnement dans lequel l'appareil sera le plus utilisé est sans aucun doute la cuisine. Toutefois, comme indiqué plus haut, on pourrait utiliser l'appareil dans d'autres environnements. Les seules contraintes qu'il nécessite, sont un support stable et une alimentation au secteur. La machine à croque-monsieur peut donc être emmenée, déplacée et installée facilement dans des milieux de tous types pour différentes occasions.

1.1.4 Principe de fonctionnement ('How')

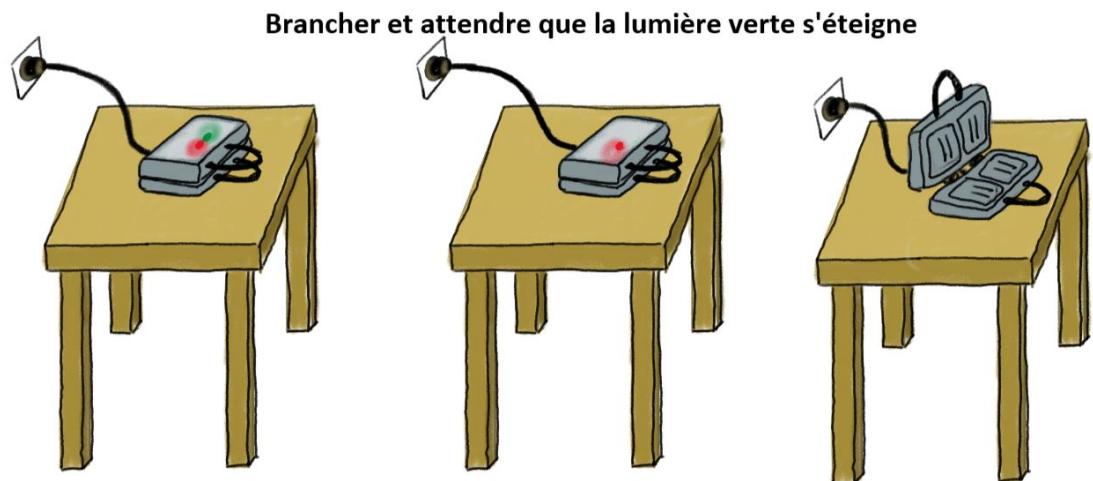


Figure 1: Préchauffe

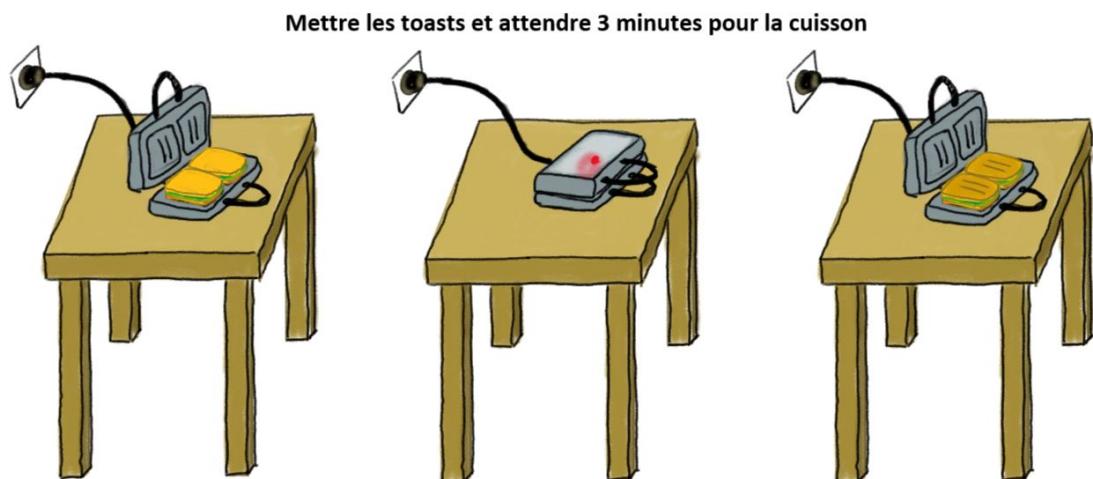


Figure 2: Cuisson

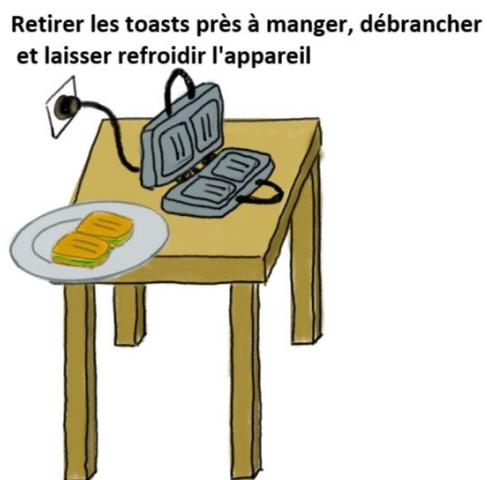


Figure 3: Refroidissement

1.2 Liste des pièces utilisées dans la fabrication du produit

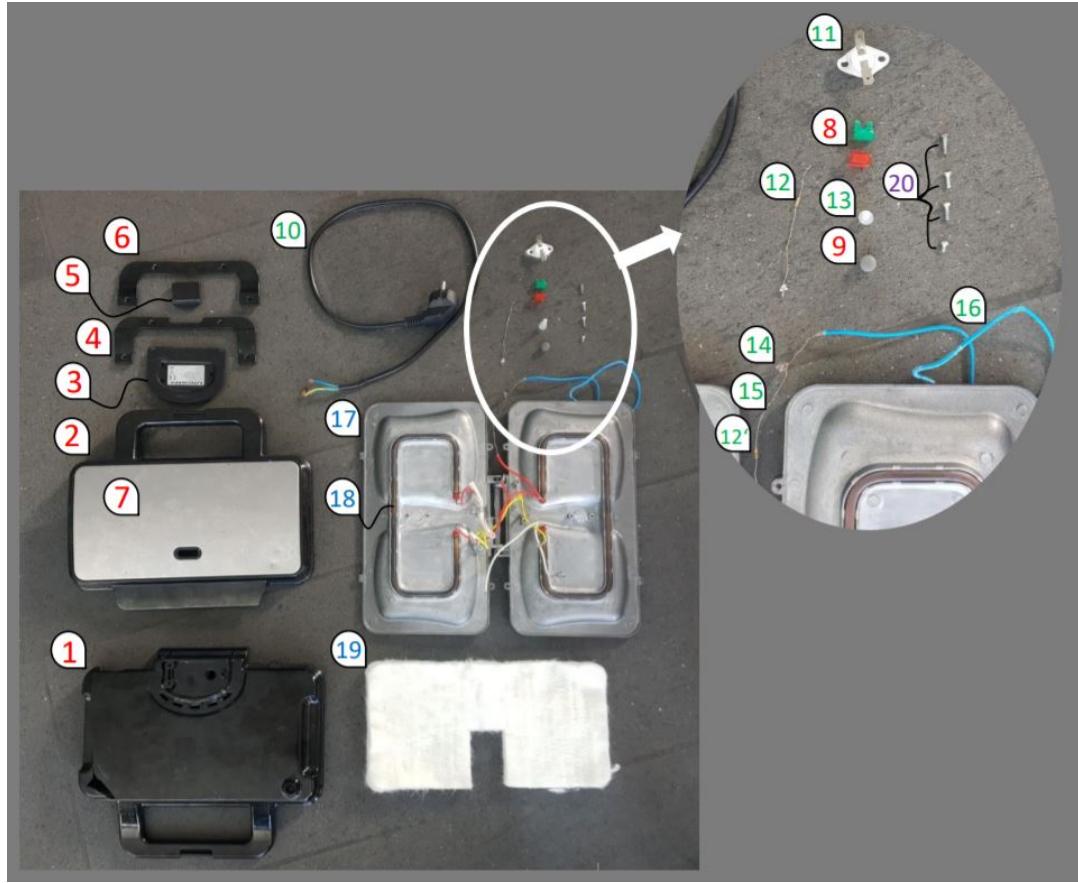


Figure 4: Vue d'ensemble des pièces

1.2.1 Diagramme hiérarchique sur la façon dont les parties sont interconnectées

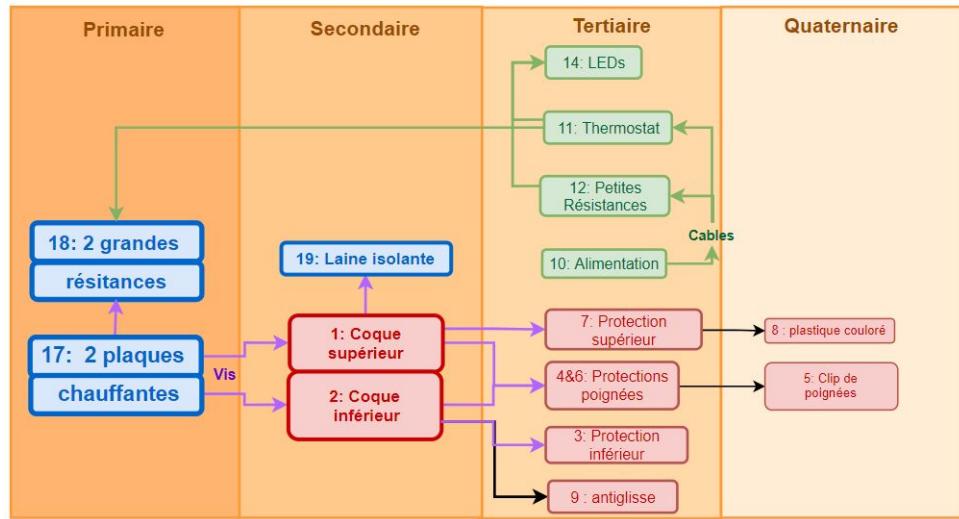


Figure 5: Diagramme de l'arborescence des éléments, par rapport à leur importance

1.2.2 Liste des pièces

Paquetage

Nom de la pièce	1 : Coque inférieur
Description	Partie inférieur de l'amballage des plaques hauteur: 10 cm, largeur: 26cm, longueur: 29cm
Fonction(s) spécifique(s)	Monture de la moitié supérieur du système, qui portège l'entourage des résistances chauffantes et simplifie la maniabilité
Matériau(x)	PF phénoplastes ou « résines phénol-formaldéhyde »
Assemblage	Visage à la coque supérieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 6: Coque inférieur

Nom de la pièce	2 : Coque supérieur
Description	Partie supérieure de l'amballage des plaques hauteur: 10 cm, largeur: 26cm, longueur: 29cm
Fonction(s) spécifique(s)	Monture de la moitié supérieur du système, qui portège l'entourage des résistances chauffantes et simplifie la maniabilité
Matériau(x)	PF phénoplastes ou « résines phénol-formaldéhyde »
Assemblage	Visé à la coque inférieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 7: Coque inférieur

Nom de la pièce	3 : Protection inférieur
Description	Pièce plate arondie de $10\text{cm} \times 7\text{cm}$
Fonction(s) spécifique(s)	Pièce de protection de la coque inférieur. Parti d'appui contre le sol pour une bonne stabilité, anti-rayure et permet d'enrouler le câble d'alimentation. Fixé au bas de la coque inférieur
Matériau(x)	PP Polypropylène ou polypropène
Assemblage	Visé à la coque inférieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 8: Protection inférieur

Nom de la pièce	4 & 6 : Cache de poigné x 2
Description	Pièce de 2 mm d'épaisseur recouvrant l'interieur des poignées
Fonction(s) spécifique(s)	Rend le poigné plus maniable
Matériau(x)	PF phénoplastes ou « résines phénol-formaldéhyde
Assemblage	Visage aux coques inférieur et supérieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 9: Protections de poignée

Nom de la pièce	5 : Clip de poigné
Description	Clip de 3,5cm×3,5cm
Fonction(s) spécifique(s)	Permet de fixer la coque supérieur à la coque inférieur lors de la cuisson, clipé à la partie supérieur de la poignée
Matériau(x)	PF phénoplastes ou « résines phénol-formaldéhyde »
Assemblage	Clipsage à la coque supérieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 10: Clip de poignée

Nom de la pièce	7 : Protection supérieur
Description	Pièce de 2mm d'épaisseur rectangulaire
Fonction(s) spécifique(s)	Protection du haut de la machine et permet empêche le haut de ne pas trop chauffer, pour éviter que l'utilisateur puisse se brûler
Matériau(x)	Acier inoxydable
Assemblage	Visage à la coque inférieur
Usinage	Moulage par injection et polissage



Figure 11: Protection inférieur

Nom de la pièce	8 : Plastique coloré
Description	Petite pièce cubique creuse
Fonction(s) spécifique(s)	Colorer la lumière des LEDs: communication avec l'utilisateur
Matériau(x)	PMMA (Polymethylmethacrylat)
Assemblage	Clipsage dans la coque supérieur
Usinage	Coulage puis collage



Figure 12: Plastique coloré

Nom de la pièce	9 : Caoutchouc antiglisse x 2
Description	Cylindre de 1,5cm de hauteur et 1cm de diamètre
Fonction(s) spécifique(s)	Antiglisse fixé en bas à droite et à gauche de la coque inférieur
Matériau(x)	Caoutchouc
Assemblage	Emboitage
Usinage	Moulage par injection



Figure 13: Caoutchouc antiglisse

Electronique

Nom de la pièce	10 : Cable d'alimentation
Description	Cordon d'alimentation secteur dégainé
Fonction(s) spécifique(s)	Alimenter en électricité le reste du système
Assemblage	Raccordage par des connecteurs de terminaux
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 14: Alimentation

Nom de la pièce	11 : Thermostat
Description	Capteur de température
Fonction(s) spécifique(s)	Indiquer la température des plaques
Assemblage	Visage à une des plaques chauffantes et raccordement au reste du circuit électrique. Contact thermique amélioré en ajoutant une pate thermique entre la plaque et le capteur.
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 15: Thermostat

Nom de la pièce	12 & 12' : Résistances ×2
Description	- 83 kOhm - 150 kOhm
Fonction(s) spécifique(s)	Protection des Ampoules
Matériau(x)	Nichrome
Assemblage	Raccordage au reste du circuit grâce aux connecteurs
Usinage	Achat préfabriqué

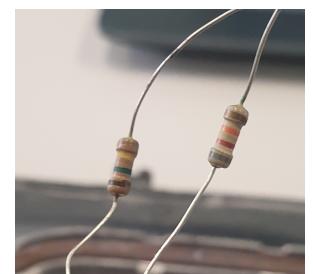


Figure 16: Petites résistances

Nom de la pièce	13 : Bouchons à sertir
Description	Connecteur à fil torsadé en Nylon
Fonction(s) spécifique(s)	Raccordement de fil twisté
Matériau(x)	Nylon
Assemblage	Insertion des fils et torsion
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 17: Bouchon de protection

Nom de la pièce	14 : Ampoule x2
Description	Halogène 10 mm
Fonction(s) spécifique(s)	Indique le mode actuel de la machine
Matériau(x)	Ampoule halogène à filament de 10mm
Assemblage	Raccordage à l'aide des connecteurs au reste du circuit
Usinage	Achat préfabriqué

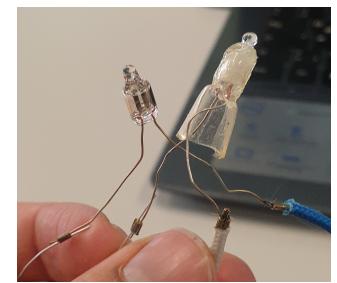


Figure 18: Ampoules

Nom de la pièce	15 : Connecteurs ×3
Description	Connecteurs de terminaux de câbles électriques
Fonction(s) spécifique(s)	Raccorder les différentes parties du circuit électrique entre elles
Matériau(x)	Cuivre
Assemblage	Serrage
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 19: Connecteurs

Nom de la pièce	16 : Cables et protection de cables
Description	Pour le courant moins (cable bleu), le plus (cable rouge), la terre (cable jaune) et le capteur de température (cable blanc)
Fonction(s) spécifique(s)	Apporte l'énergie électrique au système
Matériau(x)	Protection : plastique et tissu Cables : cuivre
Assemblage	Connecteur et soudage
Usinage	Achat préfabriqué

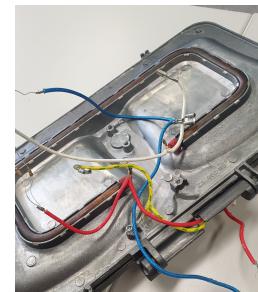


Figure 20: Cables et protection

Thermique

Nom de la pièce	17 : Plaques chauffantes x2
Description	Plaques rectangulaire ayant l'empreinte de deux toasts
Fonction(s) spécifique(s)	Transférer la chaleur depuis les résistances thermiques aux croque-monsieurs
Matériaux(x)	Fonte d'aluminium recouverte d'une fine couche de teflon (polytétrafluoroéthylène)
Assemblage	Emboité entre les plaques et visé à la machine
Usinage	Moulage



Figure 21: Plaques chauffantes

Nom de la pièce	18 : Résistances thermiques x2
Description	Résistance thermique de 26,5 ohm de longueur 45 cm
Fonction(s) spécifique(s)	Permet de chauffer les plaques
Matériaux(x)	Alliage 70-30 de cupro-nickel
Assemblage	Serrage
Usinage	Achat préfabriqué puis pliage



Figure 22: Résistances thermique

Nom de la pièce	19 : Laine isolante
Description	Plaque de fibre de dimension rectangulaire
Fonction(s) spécifique(s)	Isolation thermique, empêche la chaleur de s'échapper de l'intérieur de l'appareil
Matériaux(x)	Fibre de verre
Assemblage	Collage à la plaque supérieure
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 23: Fibre isolante

Assemblage

Nom de la pièce	20 : Vis
Description	<ul style="list-style-type: none"> - 5mm M2 tête ronde en croix ×2 - 8mm M2 tête croisillon en croix ×6 - 7mm M2 moyenne tête fraissée en croix ×8 - 10mm M2 grande tête fraissée en croix ×4
Fonction(s) spécifique(s)	Visser les différentes parties du système entre elles.
Matériau(x)	Acier inoxydable
Assemblage	Collage à la plaque supérieur
Usinage	Achat préfabriqué



Figure 24: Vis

1.3 Analyse électrique du système

1.3.1 Analyse électrique du système

Afin de faire fonctionner le mécanisme thermique pour la cuisson du croque-monsieur, le système est alimenté par une prise secteur (220V et 50Hz en Suisse).

La fiche technique nous donne une puissance consommée de 900 W Ce qui donne une résistance interne du système de $R = U^2 / 900 = 53 \text{ Ohms}$.

Schéma électrique du système :

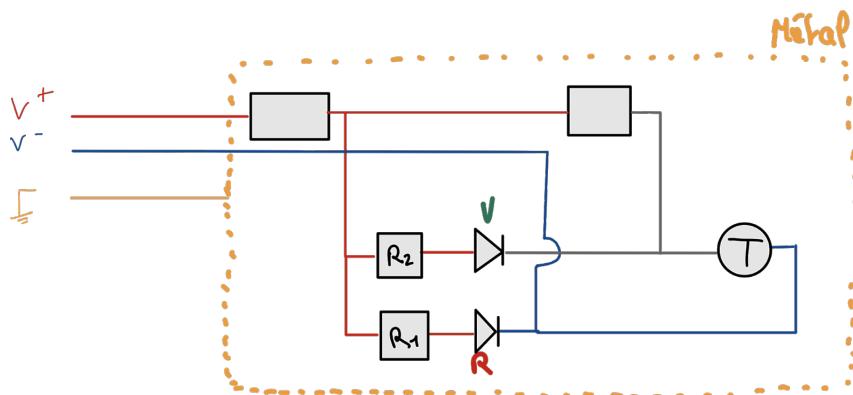


Figure 25: Schéma équivalent du circuit

En observant les couleurs des résistances et en confirmant nos calculs par une mesure à l'aide d'un ohmmètre, nous trouvons les valeurs ci-dessous pour les résistances des "ampoules". Ces valeurs nous permettent de déterminer les courants dans les branches correspondantes :

$$R_1 = 82k\text{Ohms} \quad I_{R1} = 28mA$$

$$R_2 = 150k\text{Ohms} \quad I_{R2} = 15mA$$



$R_1:$ $\rightarrow 82 \text{ k}\Omega \Rightarrow (28 \text{ mA})$
 $R_2:$ $\rightarrow 150 \text{ k}\Omega \Rightarrow 15 \text{ mA}$

Figure 26: Code couleur

Schéma électrique simplifié :

Comme les courants passants dans les résistances R1 et R2 sont beaucoup plus faibles que ceux passant dans les deux Rc, nous pouvons simplifier le schéma comme vu ci-dessous (cette simplification peut aussi être vérifiée par le calcul des résistances à partir du premier schéma) :

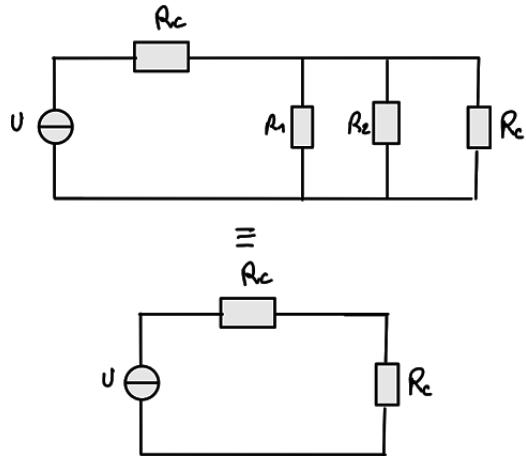


Figure 27: Schéma électrique équivalent

Nous pouvons donc déterminer la valeur des résistances chauffantes à partir du premier calcul de résistance totale interne.

$$R_{interne} = 53 \text{ Ohms} = R_C + R_C$$

Or, les 2 R_C sont les mêmes résistances donc,

$$R_C = 53/2 = 26,5 \text{ Ohms}.$$

En mesurant la valeur de résistance réelle à partir d'un ohmmètre nous trouvons 29 Ohms pour chaque résistance ce qui correspond à peu près aux calculs théoriques (les différences peuvent provenir des erreurs de mesures).

→ Courant qui passe dans le système : $U=R*I$

$$I = 220/53 = 4A.$$

Il y a une couche d'oxyde au-dessus de la résistance pour isoler électriquement celle-ci.

Caractéristiques de la résistance :

→ Matériaux de la résistance :

Ces calculs nous permettent de déterminer le matériau de la résistance.

Il existe 2 types de matériaux très utilisés pour ce genre de résistance : le nichrome et le cupro-nickel. Après quelques recherches (calcul de la résistivité et de la masse volumique) nous trouvons que notre résistance correspond à du cupro-nickel 70-30 qui est le matériau le plus utilisé pour des utilisations d'appareils alimentaires chauffants.

→ Dimensions :

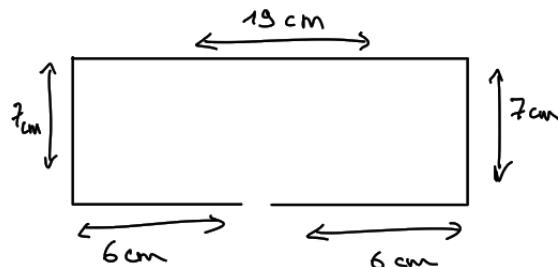


Figure 28: dimension des résistances R_C

- 45 cm de long.
- 0,5 cm de diamètre.

1.4 Modèle de la fonction principale du produit

Dans une machine à croque-monsieur, la partie qui est techniquement intéressante d'étudier est la création et transmission de chaleur dans tout le système afin d'assurer la bonne cuisson du croque-monsieur.

Afin de réaliser cette étude, nous avons tout d'abord émis certaines suppositions et défini la condition de bonne cuisson.

SUPPOSITIONS :

- La chaleur spécifique du pain étant supérieure à celle du jambon, de la crème, et du fromage (voir les valeurs si dessous), fait que celui-ci va chauffer/cuire un peu moins vite pour les autres. Étant plus intéressant d'étudier le transfert thermique dans le pain, nous utiliserons un rectangle de pain (de 10×10cm par 5cm de hauteur) pour représenter le croque-monsieur dans nos simulations.
- Nous supposons que la température est plus ou moins uniforme sur la surface du croque-monsieur dû à la faible épaisseur des plaques chauffantes et de la disposition des résistances chauffantes. C'est pourquoi, nous étudierons le système en "coupe" 2D.
- Nous supposons qu'à 50 cm de la machine la température ambiante correspond à la température de la pièce (soit 25 °C) dû à la convection de l'air.

CONDITION DE BONNE CUISSON :

D'après des recettes de croque-monsieurs, les cuisiniers préconisent de chauffer les croque-monsieurs à 180-200 degrés au four pendant 10 à 20 minutes pour cuire la viande et pour faire fondre le fromage (qui fond aux alentours de 60-70 °C). Ceci signifie (vue le temps de cuisson) que le centre du croque-monsieur atteint environ 180°C. Nous estimons donc que le croque-monsieur est prêt à partir du moment où la température du centre a atteint une température de 180°C.

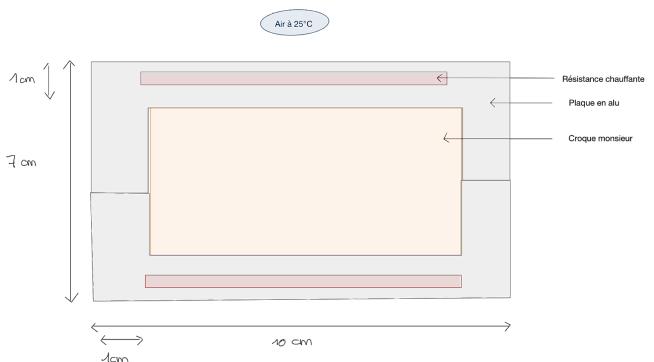


Figure 29: Schéma de la simulation

ANALYSE THERMIQUE :

Pour notre étude nous utilisons l'équation générale de diffusion thermique dans un matériau.

Ici le pain ne produit pas d'énergie. Nous pouvons donc poser $P = 0$. Nous supposons également que la conductivité thermique du pain est constante tout au long du processus donc nous avons λ au lieu de $\lambda(t)$.

Ceci donne donc l'équation finale :

$$\lambda \Delta^2 T = \rho C_P \frac{\partial T}{\partial t}$$

Avec : (*voir référence en annexe*)

- $\lambda_{pain} = 0.072 \left[\frac{W}{m \times C} \right]$
- $Cp_{pain} = 270 \left[\frac{J}{Kg \times C} \right]$
- $\rho_{pain} = 200 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
- $\lambda_{air} = 0.03 \left[\frac{W}{m \times C} \right]$
- $Cp_{air} = 1000 \left[\frac{J}{Kg \times C} \right]$
- $\rho_{air} = 1.225 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
- $\lambda_{alu} = 140 \left[\frac{W}{m \times C} \right]$
- $Cp_{alu} = 910 \left[\frac{J}{Kg \times C} \right]$
- $\rho_{alu} = 2700 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$
- $\lambda_{res} = 29 \left[\frac{W}{m \times C} \right]$
- $Cp_{res} = 370 \left[\frac{J}{Kg \times C} \right]$
- $\rho_{res} = 8.940 \left[\frac{Kg}{m^3} \right]$

RÉSOLUTION :

Afin de résoudre cette équation différentielle nous avons utilisé l'outil “thremalModel” de matlab. Cet outil nous a permis de représenter notre rectangle de pain et de modéliser le transfert thermique interne de celui-ci.

Pour ce faire, il nous a permis de créer un modèle thermique, de définir les conditions aux bords et initiales (comme la température ambiante de l'air à 25°C) et de définir l'apport de chaleur par la résistance en W. Comme calculé et cité dans la partie précédente, chaque résistance fournit 450 W. Après quelques tests avec notre simulation nous avons constaté des pertes d'énergie thermique dans l'air d'environ 30 %. Une fois le modèle créé par éléments finis, les conditions et la dynamique thermique déterminées, matlab nous fournit la solution de l'équation de chaleur par rapport au temps, que nous avons tracé et représenté dans les simulations suivantes.

SIMULATIONS :

Nous avons fait 3 simulations différentes :

- Préchauffe de la machine sans croque-monsieur
- Refroidissement de la machine pendant l'ouverture (de 30 cm)
- La cuisson du croque-monsieur une fois la machine chaude (cas réel)

Les images de la diffusion dans les systèmes sont en annexe.

1- Préchauffe de la machine

Pour cette simulation nous avons modélisé uniquement la machine à croque-monsieur dans l'air.

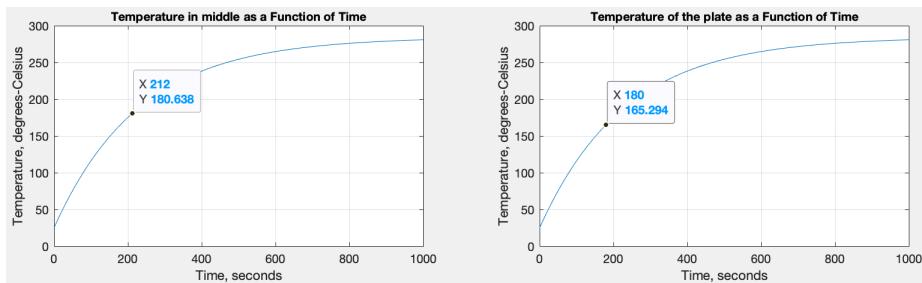


Figure 30: Machine à croque-monsieur “vide” en chauffe

(*voir annexe 1 et 2*)

Nous voyons sur le graphique que pour arriver à la température maximale la machine prend environ 700 secondes soit 11 minutes.

La machine devrait éteindre sa lumière rouge pour indiquer que ces plaques sont chaudes aux alentours de 180°C (température de préchauffage usuelle pour ce type d'utilisation). Le temps pris pour atteindre cette température est de 212 secondes. Ce temps n'est pas très éloigné du temps calculé (195 secondes) en réalité avec la machine (différence dû à la sensibilité du capteur de température).

Il est difficile de visualiser le transfert thermique interne à la machine dû au faible delta de température de l'échelle thermique. Afin de mieux pouvoir observer cette diffusion, nous avons fait une deuxième simulation (annexe 2) représentant simplement les plaques en aluminium lorsqu'elles chauffent.

2- Ouverture de la machine

Pour cette simulation nous avons écarté les 2 plaques chauffantes de 40 cm et nous avons imposer une température de départ des plaques à 280 degrés afin d'observer le "refroidissement" des plaques entre le retrait et la mise en place de 2 croque-monsieurs.

Nous pouvons considérer que le temps pour retirer un croque-monsieur et d'en mettre un autre ne dépasse pas les 30 secondes. Au bout de ce temps, nous atteignons 253°C. Nous pouvons donc considérer qu'une fois préchauffé, les plaques restent aux alentours de 250-280°C .(voir annexe 3)

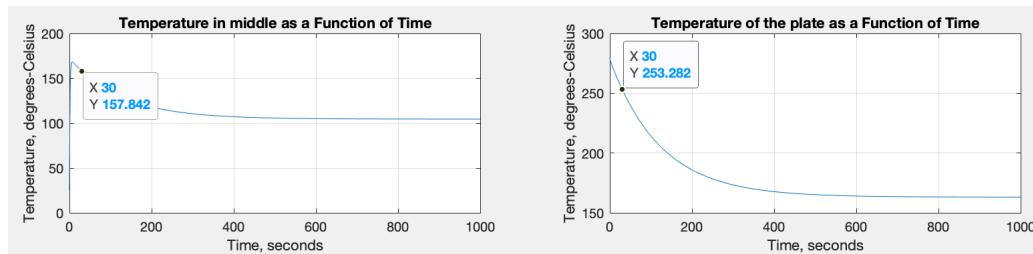


Figure 31: Refroidissement des plaques

3-Cuisson

Pour simplifier la simulation et à partir des simulations précédentes, nous remplaçons les résistances chauffantes par des conditions initiales de températures appliquées aux côtés supérieurs du rectangle à 280°C.

Ici nous avons simulé la cuisson du croque-monsieur une fois la machine préchauffée

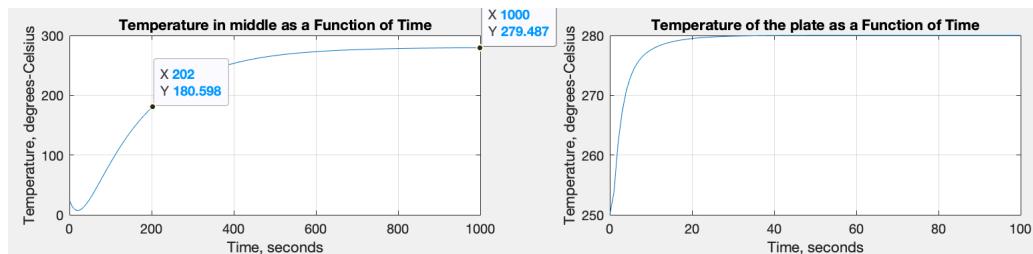


Figure 32: Cuisson du croque-monsieur

(voir annexe 4)

Nous voyons à partir de cette simulation qu'il faut environ 202 secondes au croque-monsieur pour atteindre 180°C à son centre.

Nous pouvons donc en conclure que le temps de cuisson d'un croque-monsieur est environ de 3 minutes 20 secondes ce qui correspond à peu près au temps mesuré en situation réelle (entre 3 et 5 minutes suivant les ingrédients utilisés).

1.5 Analyse détaillée des éléments clés du produit ("cahier des charges spécifique")

1.5.1 Identification des composants clés pour le fonctionnement du système

Les composants clés de notre machine à croque-monsieur sont :

- Les 2 grandes résistances (qui alimentent thermiquement notre système)
- Les 2 plaques chauffantes (qui font l'intermédiaire entre les résistances et les croque-monsieurs)
- L'ensemble du circuit électrique de notre système

Nous avons choisi les deux premiers éléments, car ils se trouvent au cœur de notre système et fond l'intermédiaire entre les éléments du circuit électrique jusqu'à notre croque-monsieur. Ces deux éléments permettent la cuisson des toasts et leur matériaux, dimensionnement et caractéristiques sont cruciaux pour le bon fonctionnement de l'appareil. Nous nous y intéressons dans la partie 1.4.2.

Le circuit électrique de notre système est également fondamental pour la bonne cuisson de nos croque-monsieurs. Le bon dimensionnement des éléments du circuit est ce qui va permettre de transformer la tension du réseau de manière optimale en courant pour notre machine. Nous nous y intéressons dans la partie 1.4.3.

Même si dans notre cas nous avons un appareil chauffant avec capteur thermique, nous avons choisi de ne pas comptabiliser le capteur thermique comme l'une des parties essentielles du système. Dans notre cas, le capteur thermique sert uniquement à informer l'utilisateur de quand l'appareil a fini de préchauffer et n'a aucune influence sur le chauffage de nos plaques.

1.5.2 Analyse des besoins en éléments clés

Plaques chauffantes

Commençons par nous intéresser aux deux grandes plaques chauffantes. Celle-ci sont en effet essentiels pour le bon fonctionnement de notre appareil.

Le premier rôle qu'elles doivent accomplir est de conduire la chaleur fournie par les deux grandes résistances aux croque-monsieurs. Le deuxième rôle est de presser les toasts à l'intérieur à la bonne forme. Finallement, il est également indispensables que le matériel utilisé pour les plaques soit compatible avec l'alimentaire, résiste à la chaleur et soit antiadhésif, pour pouvoir correctement retirer les croque-monsieurs, une fois qu'ils sont prêts. Ceci va imposer des contraintes lors de la conception et production de ces pièces, au niveau du matériel utilisé et des techniques d'usinages.

Dans notre cas, la réponse aux contraintes imposées est résolue comme suit :

- Pour permettre une bonne conductivité thermique et rester dans une gamme de prix correcte, le matériel sélectionné est la fonte d'aluminium avec une conductivité thermique de $140 \frac{W}{m \times K}$
- La compatibilité alimentaire et l'anti-adhésivité des plaques est assurée par un revêtement de fonte avec du teflon

- Pour une bonne répartition de la chaleur sur les toasts et pour bien les presser, la forme du moulage de la fonte est adapté. Celle-ci permet de recouvrir tout le toast, et est arrondie sur le bords et possède des raillures afin de mieux répartir la chaleur et mieux faire tenir les toasts entre eux.

Grandes résistances

Le deuxième élément essentiel à notre machine à croque-monsieur sont les deux grandes résistances thérmiques.

Ces résistances sont responsable de transformer l'électricité fourni pour alimenter le système en chaleur pour pouvoir chauffer nos plaques. Ces résistances doivent donc fournir une quantité suffisante de chaleur, en minimisant la consommation et en couvrant une partie assez large du haut des plaques chauffantes pour pouvoir les chauffer uniformément.

Pour répondre aux contraintes cités, les choix suivant sont faits :

- Pour fournir une quantité suffisante de chaleur, le matériaux: du cupronikel alliage 70-30 est choisi
- Pour pouvoir couvrir une surface suffisamment grande, la résistance est dimensionné comme suit : une forme cylindrique de diamètre de 1cm sur une longueur de 45cm. Le cylindre est tordu pour avoir une forme rectangulaire (voir figure 22)
- On obtient donc deux résistances de 115V et 460W consommé par résistance, ce qui correspond dans notre cas à une résistance de 26,5 Ohm.

Le bon dimentionnement de ces deux éléments et le choix de leur matériaux nous permet d'obtenir la température souhaité sur les plaques pour la cuisson de notre croque-monsieur.

2 Implémentation

2.1 Processus utilisé pour les principaux éléments identifiés dans la partie I

Die casting (coulé sous pression): Ce procédé de fabrication permet le moulage de pièce en métal. Le métal chaud entre dans une cavité sous haute pression pour prendre la forme du moule. Le die casting permet la production à grande échelle de pièce et est précis dans les dimensions de la pièce. Néanmoins le prix des moules est très cher. Sur notre machine les plaques chauffantes ont été faites par die casting. On retrouve sur la pièce des petits cercles (figure 34) qui sont les restes soit de cheminées ou de bras qui servent à sortir la pièce du moule.



Figure 33: Image plaque chauffante inférieur et supérieur



Figure 34: Image montrant des restes du moulages

Blanking: Le découpage ou poinçonnage est un procédé où l'on applique une contrainte de cisaillement très forte qui permet de couper une partie de la pièce. On utilise ce procédé pour faire les trous qui permettent de laisser passer les vis. Vous trouverez un exemple dans la figure 35.



Figure 35: Image montrant un trou

Traitement de surface: Ce procédé permet d'améliorer les qualités de surface d'un matériaux. Le revêtement en teflon permet de rendre la surface anti-adhésives et permet une meilleur isolation thermique des aliments. On retrouve ce revêtement sur les plaques chauffantes et on y voit bien la différence avec l'arrière où le métal est à nu (figure 36).



Figure 36: Image montrant l'arrière des coques de protection des aliments

Injection Molding: Le moulage par injection envoie du plastique à haute température dans un moule où en refroidissant il va prendre la forme de celui-ci. Ce procédé permet la fabrication à grande échelle. Sur notre machine à croque-monsieur, ce procédé concerne la plupart des éléments plastiques comme la coque inférieure et supérieure.



Figure 37: Image montrant les packtages de protection en plastique

Bending: Le pliage permet de déformer le matériau en lui appliquant une force de flexion. La résistance chauffante de notre machine a subi un tel procédé afin de lui donner la forme rectangulaire qu'elle a (voir figure 36).

Taraudage: Le taraudage permet de mettre un filet dans un trou lisse. On utilise un taraud qui va venir l'usiner. Celui-ci sera complémentaire avec une vis filetée. Sur notre machine la plupart de nos trous ont un filet.

2.2 Séquence d'assemblage

Procédure de montage

1. Fixation de la plaque d'acier inoxyde sur la coque supérieur



Figure 38: Image montrant l'assemblage de la plaque métal sur le packtage plastique

2. Fixation des poignées



Figure 39: Assemblage des poignées

3. Mise en place des Leds sur la coque supérieur

4. Fixation des résistances sur les plaques chauffantes



Figure 40: Fixation des résistances

5. Fixation du capteur sur la plaques chauffantes correspondante
6. Assemblage des 2 plaques chauffantes entre elles



Figure 41: Assemblage des plaques

7. Soudure des cables électriques

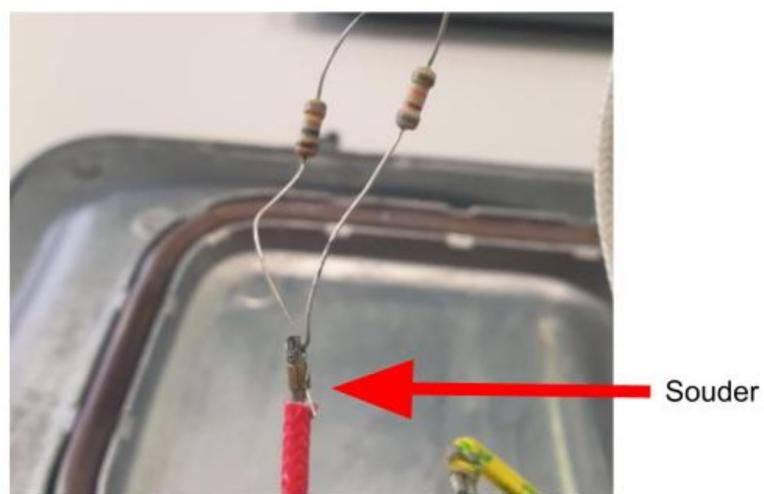


Figure 42: Soudure des fils électriques

8. Positionner le coton isolant
9. Fixation des coques sur les plaques chauffantes

Sur la base du graphisme de la figure 5, on a déterminé plusieurs méthodes d'assemblage pour les composants de ce produit.

La résistance a été positionné dans l'emplacement prévu à cet effet sur les plaques chauffantes. Puis par serrage sur le moulage on la fixe pour qu'elle ne bouge plus.

La plaque métallique en acier inoxydable est fixée au boîtier en plastique par insertion puis torsion comme le montre l'image ci-dessous.

Les fils électriques ont été assemblés entre eux par différent connecteurs de cables.

La plupart des pièces sont assemblées entre elles par l'utilisation de vis. Le capteur est ainsi fixé à la plaque chauffante à l'aide de 2 vis. C'est un moyen simple, il faut juste faire des trous filetés dans les pièces.

2.3 Analyse des coûts

Le calcul des coûts de production d'une pièce dépend du coût des matériaux, du coût de l'outillage et coût de la main d'œuvre.

Le cout des matériaux C_{mat} .

$$\begin{aligned} \text{Aluminium : } C_{al} &= \frac{m}{1-f} * C_{rm} = \frac{650*10^{-3}kg}{1-0.05} * 1.5 = 1.03\text{chf} \\ \text{Plastique PF : } C_{pf} &= \frac{m}{1-f} * C_{rm} = \frac{355*2*10^{-3}kg}{1-0.05} * 1.79 = 1.34\text{chf} \\ \text{Acier inoxydable : } C_{ac} &= \frac{m}{1-f} * C_{rm} = \frac{106*10^{-3}kg}{1-0.05} * 3 = 0.20\text{chf} \\ \text{Cupronickel : } C_{ac} &= \frac{m}{1-f} * C_{rm} = \frac{2*0.316kg}{1-0.05} * 9 = 6\text{chf} \end{aligned}$$

Avec m la masse, f le facteur de déchet, C_{rm} le coût de la matière première.

On peut rajouter 1 chf pour le prix des fils électriques, résistances que l'on trouve dans le device.

$$C_{mat} = 1.03 + 0.20 + 1.34 + 6 + 1 = 9.53\text{chf}$$

Dans le coût de l'outillage $C_{outilage}$, on a le coût des moules pour les coques en plastique et pour les plaques chauffantes C_{moule} . On estime le cout d'un moule à injection à 20 000chf et le prix d'un moule présumé à 30 000chf. On estime que les moules ne casseront pas. Donc si on fabrique 10 000 pièce. Également, on néglige le coût des autres outillages qui sont infime par rapport aux moules par machine.

$$C_{outilage} = \frac{C_{moule_plas} + C_{moules_alu}}{\text{nombre de pièce}} = 5\text{chf}$$

Coût de l'assemblage manuelle. On estime que la machine a été assemblé en Asie où le salarié est payé 5chf/h. On estime qu'il lui faut 1h pour faire toute les manipulations par machine dont au moins 30 à 40 min pour assembler tout les composants entre eux.

$$C_{labor} = 5chf$$

Le coût production de la machine est donc:

$$C_{prod} = C_{mat} + C_{outillage} + C_{labor} = 9.53 + 5 + 2.5 = 19,53chf$$

Au coût de production, on peut rajouter le cout de transport par conteneur. Après quelque recherches sur des sites de déménagement international, on estime celui-ci à 200chf par m^3 . Le volume de notre machine fait $0.4 * 0.3 * 0.2 = 0.024m^3$. Donc on peut mettre 41 machines à croque-monsieur par m^3 .

$$C_{conteneur} = \frac{cout}{nbpiece} = \frac{200}{41} = 5chf \text{ environ}$$

Avec nos calculs on trouve un prix total 22,03 chf. On trouve sur internet un prix de 40chf pour notre machine. Cependant dans notre chiffre nous n'avons pas pris en compte le cout de la recherche et développement, du transport du produit par camion entre les différents site, de l'infrastructure (eau, électronique), des frais de douane, des frais administratifs et de contrôle qualité et enfin nous avons simplifié les coûts de l'outillages aux moules ce qui peut expliquer la différence. Finalement c'est calculs nous semblent bien correspondre à la réalité. Ils insinuent que cette machine est vendue à 2 fois son prix de production.

3 Analyse critique / Variante(s) (2 pts)

3.1 Points faibles de la fabrication, source possible de défaillance

Dans un premier temps nous identifierons les éventuels défauts puis nous donnerons des pistes de réflexion pour les améliorer dans la partie suivante.

Cette machine est destinée à une catégorie “bon marché” des machines à croque-monsieurs. Le prix de sa production est donc un élément important dans la conception de celui-ci. Tous les choix faits pour son dimensionnement, que l’on pourrait remettre en question afin d’améliorer les performances, sont justifiés par équilibre entre le prix et la fonctionnalité.

Si nous passons outre ces justifications financières, nous pouvons relever quelques défauts et améliorations:

Amélioration du rendement de la transmission de chaleur

Dans l’analyse thermique de notre système nous avons constaté que seulement 70% de l’énergie consommée par le système était redistribuée en chaleur pour la cuisson du croque-monsieur. En augmentant le rendement nous pourrions réduire la consommation électrique de la machine.

Amélioration de la sécurité du système au cas où la coque en plastique (donc pas plus solide) viendrait à se casser.

Sous la coque en plastique nous pouvons accéder directement à la résistance chauffante ainsi qu’à l’électronique. En faisant tomber la machine, ce qui risquerait de casser la coque externe (raison pour laquelle cette machine qui fonctionnait toujours avait d’ailleurs été jetée) nous pouvons toucher les connexions électriques branchées sur le secteur (220-240V), ce qui peut provoquer des dommages. De plus, si la machine est toujours branchée, nous pouvons directement toucher plus de 25% de la résistance chauffante. À pleine température (280°C), ce défaut peut avoir de lourdes conséquences.

Très peu de contrôle sur la température de la machine et le temps de cuisson.

La machine offre très peu si ce n’est aucun feedback à l’utilisateur. Il pourrait être intéressant de pouvoir y régler la température afin de contrôler au mieux la cuisson de nos croque-monsieurs et potentiellement moins consommer lorsque ce n’est pas nécessaire ou encore avoir une indication sur le temps de cuisson.

La fabrication des différents éléments de cette machine reste assez simple et efficace donc nous n’avons pas identifié d’amélioration importante à leur apporter.

3.2 Suggestion(s) d’améliorations et de mesures correctives possibles

Nous avons identifié quelques améliorations possibles aux défauts énumérés dans la partie ci-dessus.

Pour le rendement thermique :

La fonte d’aluminium étant un bien meilleur conducteur thermique que l’air, il pourrait

être intéressant de recouvrir totalement la résistance de fonte d'aluminium afin d'avoir un maximum d'énergie thermique diffusé dans le croque-monsieur. Pour ce faire nous pourrions par exemple venir fixer une fine plaque de fonte par dessus le dispositif actuel (résistance + plaque en fonte d'aluminium) pour diminuer au maximum la surface air-résistance.

Pour la sécurité du système

Premièrement nous pourrions renforcer certaines parties de la coque pour éviter qu'elle ne se casse trop facilement et rajouter une fine couche d'un matériau qui absorbe les coups sur les angles de celle-ci. Deuxièmement, pour la partie électrique, il serait préférable de regrouper et fixer les câbles et composants (plutôt que les laisser "flottants") après les avoir recouvert d'une gaine ou d'une résine de protection. Enfin l'idée de recouvrir la résistance avec un fine plaque de fonte d'aluminium permettrait peut être d'appliquer également une fine couche d'un matériaux isolant thermiquement et à très faible capacité thermique (pour ne pas emmagasiner trop d'énergie thermique).

Pour l'interface utilisateur

Il pourrait être intéressant de rajouter une petite carte électronique avec un microcontrôleur qui permettrait de faire un timer basique à un affichage lcd ou 7-segments. Nous pouvons profiter de ce microcontrôleur pour le connecter à un capteur de température plus poussé permettant d'avoir un suivi plus précis de l'état du système et pouvoir régler la température grâce à un potentiomètre.

3.3 Comparaison avec d'autres modèles de conception répondant complètement ou partiellement au même ensemble de spécifications

COMPARAISONS:

Il peut être intéressant de comparer notre machine avec une autre machine de plus haut standing (par exemple la "Tefal SW853D12 Snack Collection" vendu à environ 150 CHF contre environ 40 CHF pour notre appareil).



Figure 43: Tefal SW853D12 Snack Collection

En étudiant les différences entre ces 2 machines nous retrouvons dans la machine de haut standing des améliorations que nous avons proposées pour notre machine (Interface utilisateur, meilleur rendement, etc...). Nous voyons donc que ces petits "plus" participent bien à l'amélioration du système mais au détriment du prix.

	Modulable	Puissance	Entretien	Température réglable
Machine Tefal	Oui	1200 W	Facile au lave vaisselle ou à la main	Oui
Machine étudiée	Non	900	plaqué non modulable, à ne pas laver directement avec un jet d'eau	Non

Sur le marché de ces appareils nous pouvons voir que d'autres caractéristiques entrent en jeu dans l'amélioration de ce genre de système comme par exemple la facilité d'entretien, le temps de cuisson, le rendement thermique, la consommation et la puissance électrique, la durée de vie et pourquoi pas la modularité (multi usage). En bref, il est possible de faire une machine à la pointe de la technologie et très efficace mais pour ceci il faut être prêt à y mettre le prix.

Durabilité :

Bien qu'étant assez simple, notre machine possède quand même une empreinte écologique.

En effet, les matériaux utilisés comme le PF (thermodurcissable donc qui a une transformation irréversible) ou le téflon (en traitement de surface) par exemple ne sont pas bien recyclables.

De plus, le rendement de notre machine n'étant pas parfait, une partie de la consommation électrique est perdue. Nous pouvons également prendre en considération l'empreinte écologique due aux outils et process de fabrication qui restent tout de même faibles pour 1 machine. En bref, bien que notre machine ne soit pas la source première de pollution dans le monde, elle possède une petite empreinte carbone que l'on peut réduire avec les idées d'améliorations que nous avons donnés dans les parties ci-dessus.

4 Conclusion

En conclusion, après l'étude du produit, des processus de fabrication et de l'analyse des coûts, nous pouvons dire que cette machine à croque-monsieur est un objet bien pensé et nécessitant l'utilisation de processus de fabrication différents. Ceci permet d'avoir un bon équilibre entre coût et qualité de la machine.

Ce projet de "reverse engineering" a été prenant et nous a permis de mieux nous rendre compte des contraintes pratiques auxquelles il faut faire face lors de la fabrication d'objets. La donnée étant libre sur le choix de celui-ci, nous avons pu choisir un objet qui nous intéressait particulièrement. Nous profitons pour remercier les assistants, ainsi que les professeurs, qui lors des séances d'exercices, nous ont été très utiles dans nos recherches et permis d'avancer dans la bonne direction.

5 Références

Inspirations et références aux cours

Moddle EPFL cours MICRO-301 : <https://moodle.epfl.ch/course/view.php?id=15241>

<https://www.journaldunet.fr/patrimoine/guide-des-finances-personnelles/1146972-prix-s-metaux-les-tarifs-des-metaux-en-avril-2021/>

https://www.lipo.ch/fr/Catalogue/Cuisines/Appareils-electriques—Cuisine/Toaster-de-sandwich-XXL/p/0011740044?gclid=EAIAiIQobChMI_sqd95rq8AIVD-J3Ch16lwc9EAQYEiABEgIni_D

Valeurs Caractéristiques des matériaux

Conductivité thermique:

Pain: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2621.1982.tb11071.x> 0,072
à 0,064 en watts/cm⁻²C

Alu: https://fr.wikibooks.org/wiki/Caract%C3%A9ristiques_physiques_des_alliages_d'aluminium

Air: <https://itis.swiss/virtual-population/tissue-properties/database/thermal-conductivity/>

Résistance: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cupronickel>

Specific heat:

Pain: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0733521010001992>

Aluminium : https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-metals-d_152.html

Air : https://www.engineeringtoolbox.com/air-specific-heat-capacity-d_705.html

Résistance: <https://www.copper.org/applications/marine/cuni/properties/physical/>

Density :

Pain: <https://socratic.org/questions/a-loaf-of-bread-has-a-mass-of-500-g-and-volume-of-2500-cm-3-what-is-the-density-> :text=1%20Answertext= The%20density%20of%20the%20bread%20

Aluminium : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aluminium>

Air: https://en.wikipedia.org/wiki/Density_of_air :: *text = At%20101.325%20kPa%20(abs)%20and,*

Resistance : https://www_azom_com/article.aspx?ArticleID=6297

Données des machines étudiées et comparées

Machine Tefal : Tefal <https://www.amazon.fr/dp/B016EALEKE?tag=wwwlesdelices-21&linkCode=ogih&psc=1>

Machine Lipo : <https://www.lipo.ch/fr/Catalogue/Cuisines/Appareils-electriques—Cuisine/Toaster-de-sandwich-XXL/p/0011740044>

6 Annexe

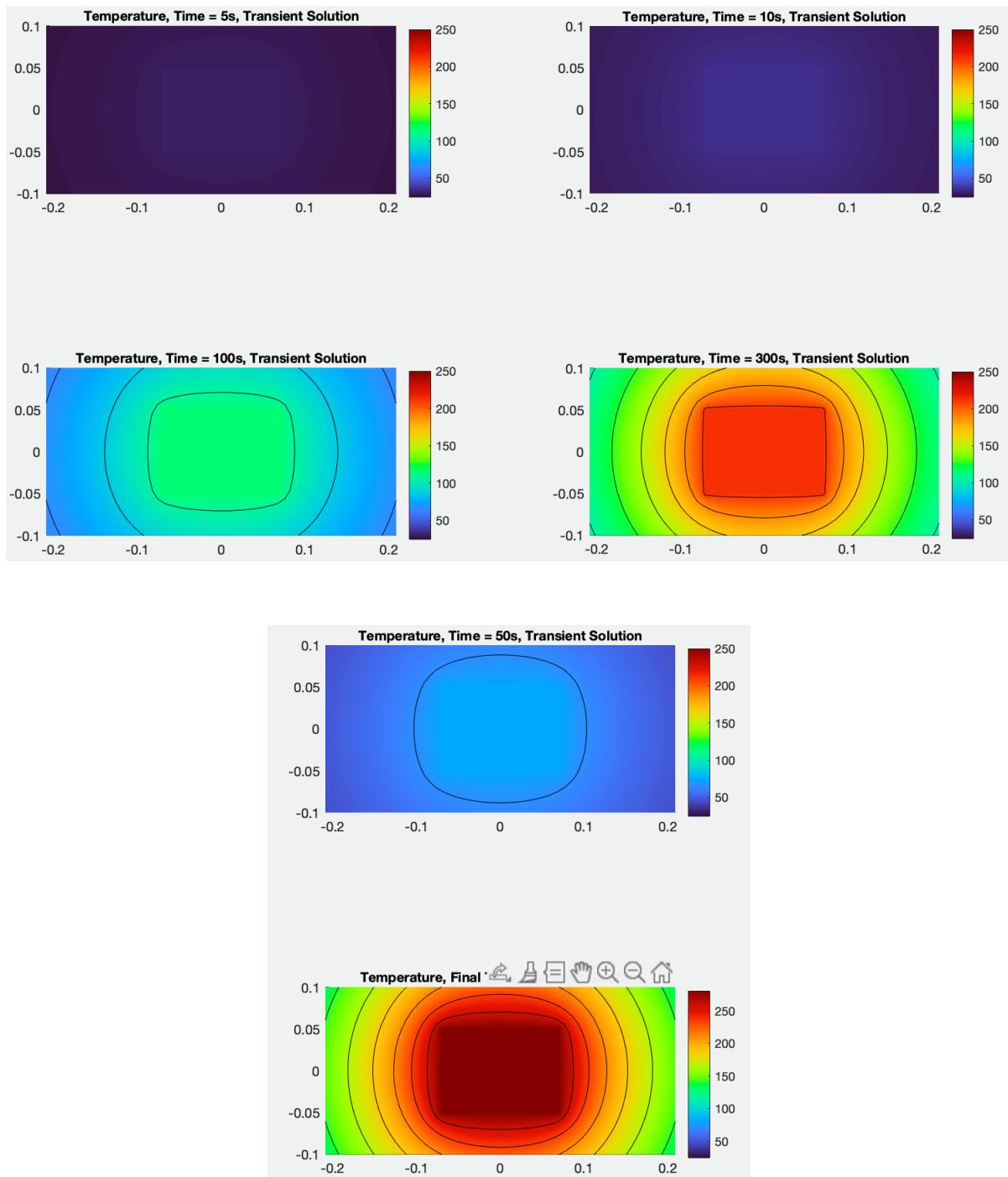


Figure 44: Annexe 1 : Machine à croque monsieur “vide” en chauffe

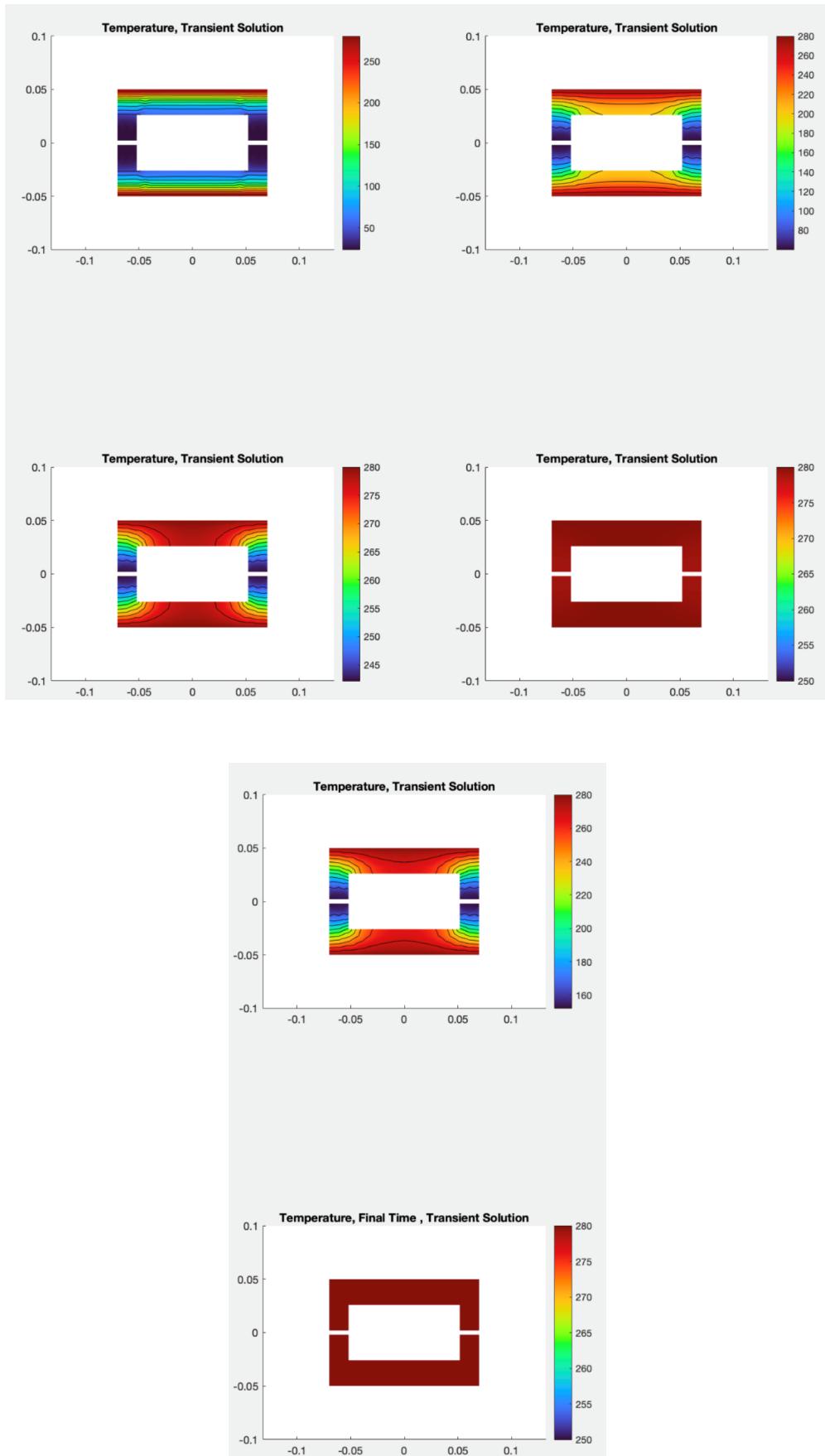


Figure 45: Annexe 2 : Plaques en fonte d'aluminium lors de la chauffe

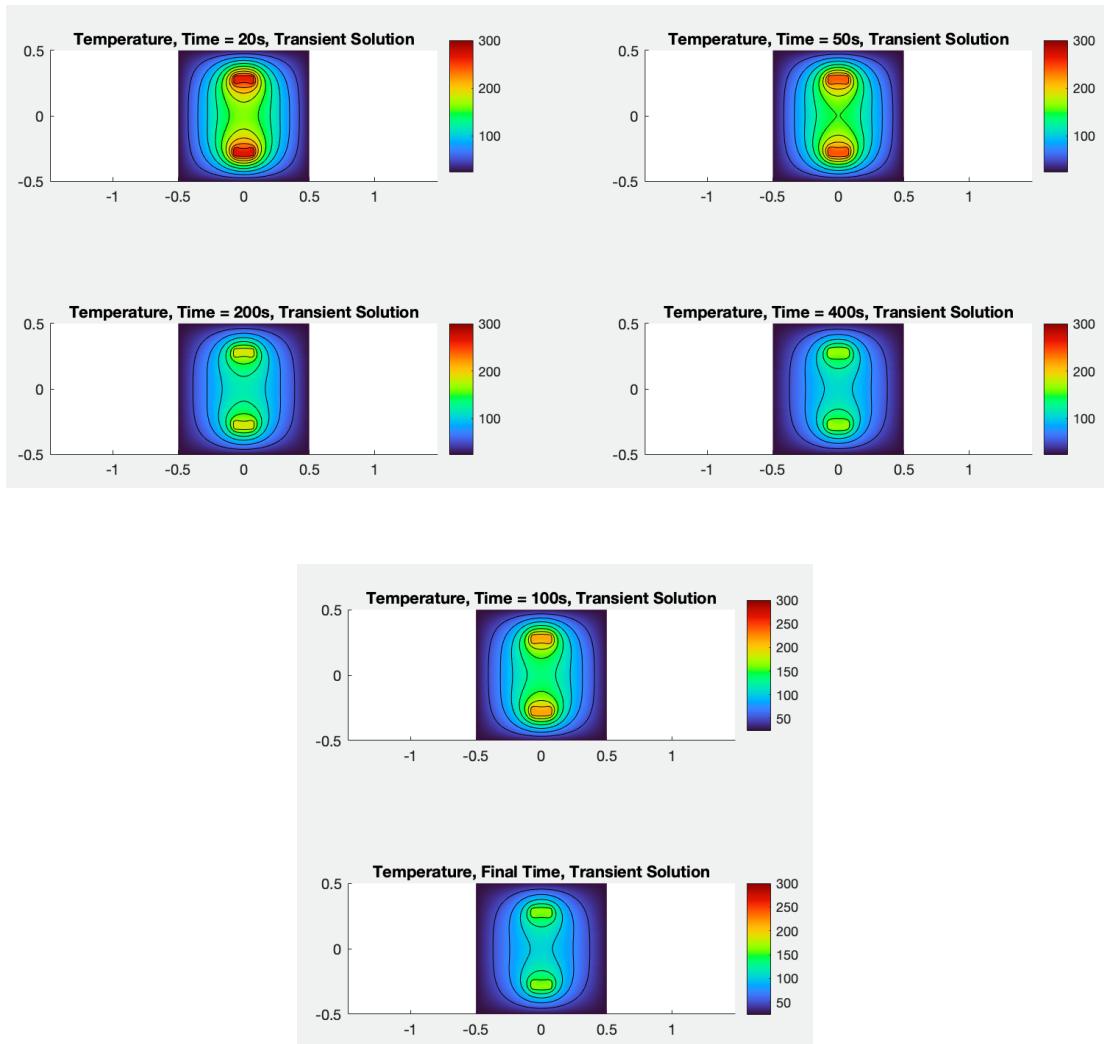


Figure 46: Annexe 3 : Refroidissement des plaques

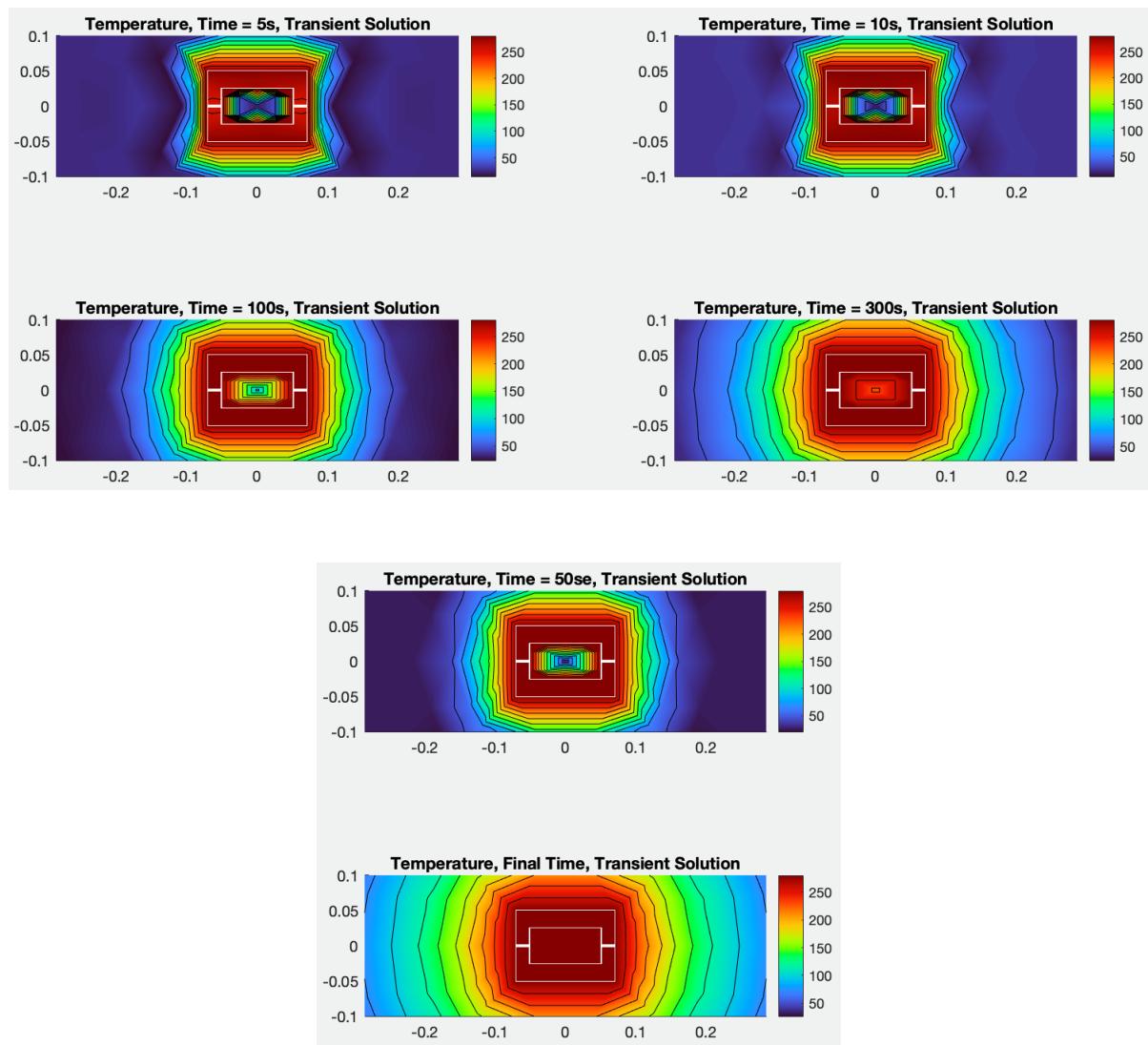


Figure 47: Annexe 4 : Cuisson du croque monsieur