

TABLE DES MATIRES

	Page
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LITTÉRATURE	5
1.1 Matériaux composites.....	5
1.2 Technique de fabrication du composite.....	6
1.3 Procédé de moulage par compression	7
1.4 Méthode de la fabrication expérimentale des pièces étudié	7
1.4.1 Méthode de fabrication de la pièce en forme T	7
1.4.2 Méthode de fabrication de la plaque.....	10
1.4.3 Méthode de fabrication de la pièce en forme concave	11
1.5 Modes de transfert thermique	13
1.5.1 Conduction thermique	13
1.5.2 Convection thermique.....	14
1.5.3 Rayonnement thermique.....	15
1.6 Étude de l'effet de la réaction chimique exothermique sur la température de chauffage.....	16
1.7 Méthode d'estimation de la puissance de chauffage du procédé de moulage par compression	24
1.7.1 Méthode d'estimation d'Akermo.....	24
1.7.2 Simulations numériques du temps de cycle par COMSOL.....	24
1.7.3 Limites des modèles existants	27
CHAPITRE 2. MÉTHODOLOGIE.....	29
2.1 Mécanisme de transfert de chaleur :.....	30
2.2.1 Les pièces ROS:.....	30
2.2.2 La pièce concave UD.....	33
2.2 Processus de simulation numérique par le logiciel COMSOL.....	35
2.2.1 Simulation des pièces ROS (la pièce en forme T, la pièce en forme L et la plaque).....	35

	Page
2.2.2 Simulation de la pièce concave UD.....	38
2.3 Points de mesure de température.....	42
2.4 Matériaux.....	44
2.5 Modèles numérique étudié	45
2.2.1 Modèle de la plaque.....	46
2.2.2 Modèle de la pièce en forme T	47
2.2.3 Modèle de la pièce en forme L	48
2.2.4 Modèle de la pièce en forme concave	50
2.6 Maillage.....	53
2.6.1 Étude de l'effet de l'épaisseur des pièces sur la puissance de chauffage	56
2.6.2 Étude de l'effet du volume des pièces sur la puissance de chauffage	62
2.6.3 Étude de l'effet de la largeur des pièces sur la puissance de chauffage	65
2.7 Plan d'expérience (DOE)	70
2.7.1 L'effet de l'épaisseur et de la largeur sur le cycle de fabrication des pièces	70
2.7.2 L'effet de l'épaisseur, la largeur et le volume sur la puissance de chauffage.....	72
2.8 Conclusion.....	76
 CHAPITRE 3. L'EFFET DE L'ÉPAISSEUR ET LA LARGEUR DES PIÈCES SUR LE CYCLE DE FABRICATION	 79
3.1 Simulation de cycle thermique de la plaque.....	79
3.1.1 Simulation de l'étape de chauffage de la plaque	79
3.1.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la plaque.....	79
3.1.3 Résultats numériques et expérimentaux	81
3.1.4 L'effet de la largeur et l'épaisseur de la plaque sur le cycle de fabrication.....	 82
3.1.5 Discussion.....	85
3.2 Simulation de cycle thermique de la pièce en forme T	85
3.2.1 Simulation de l'étape de chauffage de la pièce en T	85
3.2.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce en forme T	87

	Page
3.2.3	Résultat numériques et expérimentaux 88
3.2.4	L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce en forme T sur le cycle de fabrication 89
3.2.5	Discussion..... 91
3.3	Simulation de cycle thermique de la pièce en forme L..... 92
3.3.1	Simulation de l'étape de chauffage de la pièce en forme L..... 92
3.3.2	Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce en forme L..... 92
3.3.3	Résultat numériques et expérimentaux 92
3.3.4	L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce en forme L sur le cycle de fabrication 93
3.3.5	Discussion..... 95
3.4	Simulation de cycle thermique de la pièce concave..... 96
3.4.1	Simulation de l'étape de chauffage de la pièce concave 96
3.4.2	Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce concave 97
3.4.3	Résultats numériques et expérimentaux 100
3.4.4	L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce concave sur le cycle de chauffage..... 101
3.4.5	Discussion..... 103
3.5	Conclusion..... 104
CHAPITRE 4. L'EFFET DE L'ÉPAISSEUR, LA LARGEUR ET LE VOLUME DES PIÈCES SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE 105	
4.1	Le modèle de la plaque 105
4.1.1	Étude de l'influence de l'épaisseur de la plaque sur la puissance de chauffage 105
4.1.2	Étude de l'influence du volume de la plaque sur l'énergie de chauffage..... 108
4.1.3	Étude de l'influence de la largeur de la plaque sur l'énergie de chauffage..... 111
4.1.4	Discussion..... 113
4.2	La pièce en forme T 114

	Page
4.2.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage	114
4.2.2 Étude de l'influence du volume de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage.....	117
4.2.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage.	119
4.2.4 Discussion.....	122
4.3 La pièce en forme L.....	123
4.3.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage	123
4.3.2 Étude de l'influence du volume de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage.....	125
4.3.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage.	128
4.3.4 Discussion.....	130
4.4 La pièce en forme concave	131
4.4.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce concave sur l'énergie de chauffage	131
4.4.2 Étude de l'influence du volume de la pièce concave sur l'énergie de chauffage	133
4.4.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce concave sur l'énergie de chauffage.....	136
4.4.4 Discussion.....	139
4.5 Conclusion.....	139
CONCLUSION	141
RECOMMANDATIONS.....	143
ANNEXE I. ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PLAQUE SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE.....	145
ANNEXE II. ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE EN FORME T SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE	147

	Page
ANNEXE III. ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE EN FORME L SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE	149
ANNEXE IV. ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE CONCAVE SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAG.....	151
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	153

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Propriétés mécaniques de certain fibres5
Tableau 1.2	Propriétés mécaniques de certain matrices6
Tableau 1.3	Les cinq modèles de réaction 18
Tableau 1.4	Les caractéristiques thermiques de composite thermoplastique CF/PEEK22
Tableau 2.1	Matériaux utilisées45
Tableau 2.2	Propriétés thermiques de l'isolant48
Tableau 2.3	Les 6 épaisseurs étudiées de la plaque57
Tableau 2.4	Les 6 épaisseurs étudiées de la pièce en forme T59
Tableau 2.5	Les 4 épaisseurs étudiées de la pièce en forme L60
Tableau 2.6	Les 5 épaisseurs étudiées de la pièce concave61
Tableau 2.7	Les 5 volumes étudiés de la plaque62
Tableau 2.8	Les 5 volumes étudiés de la pièce en forme T63
Tableau 2.9	Les 5 volumes étudiés de la pièce en forme L64
Tableau 2.10	Les 3 volumes étudiés de la pièce concave64
Tableau 2.11	Les 3 largeurs étudiées de la plaque65
Tableau 2.12	Les 3 largeurs étudiées de la pièce en forme T67
Tableau 2.13	Les 3 largeurs étudiées pour la pièce en forme L68
Tableau 2.14	Les 3 largeurs étudiées de la pièce concave70
Tableau 2.15	Plan d'expérience pour l'effet de la largeur et l'épaisseur sur le cycle de fabrication des pièces72

Tableau 2.16	Plan d'expérience pour l'effet de la largeur, l'épaisseur et le volume des pièces sur la puissance de chauffage.....	75
Tableau 2.17	Tableau récapitulatif des paramètres étudiés de l'effet de l'épaisseur, la largeur et le volume des pièces sur la puissance de chauffage.....	77
Tableau 4.1	La variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la plaque	107
Tableau 4.2	La variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la plaque et les surfaces des cylindres de chauffages	110
Tableau 4.3	La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la plaque.....	112
Tableau 4.4	La variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme T.....	116
Tableau 4.5	La variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme T	118
Tableau 4.6	La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce en forme T.....	121
Tableau 4.7	La variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme L.....	124
Tableau 4.8	La variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme L	127
Tableau 4.9	La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce en forme L.....	129
Tableau 4.10	La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction de l'épaisseur de la pièce concave	132
Tableau 4.11	La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction du volume de la pièce concave.....	135
Tableau 4.12	La variation de la puissance de chauffage du moule à vide en fonction du volume de la pièce concave.....	135
Tableau 4.13	La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction de la largeur de la pièce concave.....	137

Tableau 4.14	La variation la puissance de chauffage du moule à vide en fonction de la largeur de la pièce concave	138
--------------	--	-----

LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Appareil de moulage de la pièce en forme T	8
Figure 1.2	La cavité de la pièce en forme T remplie de brins	8
Figure 1.3	Cycle de traitement thermique de la pièce en forme T	9
Figure 1.4	Processus de fabrication de la plaque.....	10
Figure 1.5	Les étapes de fabrication de la pièce concave : (1) chauffage de la plaque dans le four (2) transfert de la plaque chaude à la presse (3) compression de la pièce (4) démoulage.....	11
Figure 1.6	Évolutions de la température des thermocouples lors d'un cycle de moulage de la pièce concave.....	13
Figure 1.7	L'évolution de la vitesse de réaction $\ln(k)$ en fonction de $1/T$ pour CF/PEEK.....	19
Figure 1.8	Thermogramme, obtenu par DSC pour PEEK renforcé par les fibres de carbone.....	21
Figure 1.9	L'effet de l'énergie d'activation sur la température.....	23
Figure 1.10	Le modèle de chauffage pour la pièce en forme T.....	25
Figure 1.11	Comparaison entre les températures numériques et expérimentales à l'intérieur de la pièce en forme T (ROS)	26
Figure 2.1	Méthodologie de travail	29
Figure 2.2	Mécanisme de transfert de chaleur pour les pièces ROS	31
Figure 2.3	La conduction dans les tubes de chauffage	32
Figure 2.4	La convection des surfaces extérieures du moule	33
Figure 2.5	Mécanisme de transfert de chaleur pour la pièce UD	34
Figure 2.6	Domaine d'étude sélectionné dans le logiciel COMSOL	36
Figure 2.7	L'interface de chauffage et de consolidation de la pièce en forme T par le logiciel COMSOL	38

Figure 2.8	L'interface de chauffage du moule à vide par le logiciel COMSOL.....	39
Figure 2.9	La réflexion des radiations sur les surfaces du four	40
Figure 2.10	Les directions des radiations dans les éléments infrarouges	40
Figure 2.11	La réflexion des radiations sur les surface de la pièce	41
Figure 2.12	L'interface de chauffage de la pièce concave par le logiciel COMSOL.....	42
Figure 2.13	Comparaison entre les températures numériques et expérimentales pour trois emplacements sur le plan milieu de la plaque ROS.....	43
Figure 2.14	(a) Point de mesure de la pièce en forme T ; (b) point de mesure de la pièce en forme L ; (c) point de mesure de la plaque.....	43
Figure 2.15 :	(a) Point de mesure de chauffage de la pièce concave ; (b) point de mesure de refroidissement de la pièce concave.....	44
Figure 2.14	Modèle de chauffage de la plaque	46
Figure 2.17	Le modèle de refroidissement de la plaque	47
Figure 2.18	Le modèle de chauffage de la pièce en forme T.....	48
Figure 2.19	Les propriétés géométriques de la pièce en forme L.....	49
Figure 2.20	Les propriétés géométriques du poinçon en mm.....	49
Figure 2.21	La position de la pièce en forme L par rapport aux plateaux chauffants (poinçon et cavité non représentée dans cette figure).....	50
Figure 2.22	Les dimensions de la pièce concave.....	51
Figure 2.23	Le modèle de chauffage de la pièce dans le four.....	52
Figure 2.24	La moule de la pièce concave.....	52
Figure 2.25	Élément de maillage tétraédrique	53
Figure 2.26	Le maillage de la plaque.....	54

	Page
Figure 2.27	Le maillage du moule de la pièce en forme T54
Figure 2.28	Le maillage la pièce concave dans le four.....55
Figure 2.29	Le maillage la pièce concave dans le moule56
Figure 2.30	Le modèle de chauffage de la plaque 5 fois plus épaisse.....57
Figure 2.31	Le modèle de chauffage de la pièce en forme T 10 fois plus épaisse58
Figure 2.32	Le modèle de chauffage de la pièce en forme L 6 fois plus épaisse59
Figure 2.33	Le modèle de chauffage de la pièce concave 10 fois plus épaisse61
Figure 2.34	Le modèle de chauffage de la plaque 27 fois plus le volume de la pièce par la multiplication de toutes les dimensions du moule et la pièce par un facteur de 3.....62
Figure 2.35	Le modèle de chauffage de la plaque 5 fois plus large65
Figure 2.36	Le modèle de chauffage de la pièce en forme T 2 fois plus large.....66
Figure 2.37	Le modèle de chauffage de la pièce en forme L 2 fois plus large.....68
Figure 2.38	Le modèle de chauffage de la pièce concave 2 fois plus large69
Figure 3.1	La répartition de la température dans le moule et la plaque après 15s de refroidissement80
Figure 3.2	La répartition de la température dans le moule et la plaque après 3700s de refroidissement81
Figure 3.3	La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la plaque a une épaisseur de 6mm82
Figure 3.4	Comparaisons de la réponse thermique de la plaque de dimension (711.2x609.6x6mm) avec la pièce initiale de dimension (355.6x304.8x6mm)83
Figure 3.5	Comparaisons de la réponse thermique de la plaque d'épaisseur 30mm avec l'épaisseur initiale de 6 mm.....83

Figure 3.6	L'effet de deux fois l'épaisseur et deux fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement	84
Figure 3.7	L'effet de cinq fois l'épaisseur et cinq fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement.....	84
Figure 3.8	La répartition de la température dans le moule après 15s de chauffage de la pièce en T	86
Figure 3.9	La répartition de la température dans le moule après 2500s de chauffage de la pièce en T	86
Figure 3.10	La répartition de la température dans le moule après 15s de refroidissement de la pièce en T	87
Figure 3.11	La répartition de la température dans le moule après 2000s de refroidissement de la pièce en T	88
Figure 3.12	La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la pièce en T a une épaisseur de 3.17mm	89
Figure 3.13	L'effet de cinq fois l'épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement	90
Figure 3.14	L'effet de deux fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement.....	90
Figure 3.15	L'effet de deux fois l'épaisseur et deux fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement.....	91
Figure 3.16	La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la pièce en L a une épaisseur de 3.17mm	93
Figure 3.17	L'effet de la double largeur sur le cycle de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L	94
Figure 3.18	L'effet de 5 fois plus l'épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L	94
Figure 3.19	L'effet de la double largeur et la double épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L	95
Figure 3.20	La répartition de la température dans le moule concave après 15s de chauffage	97

	Page
Figure 3.21	La répartition de la température dans le moule concave après 1000s de chauffage.....97
Figure3.22	La répartition de la température dans le moule après 0s du contacte de la pièce avec le moule98
Figure 3.23	La répartition de la température dans le moule après 5s du contacte de la pièce avec la moule99
Figure 3.24	La répartition de la température dans le moule après 20s de refroidissement.....100
Figure 3.25	La répartition de la température dans le moule après 1000s de refroidissement100
Figure 3.26	la courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la pièce concave a une épaisseur de 3.35mm.....101
Figure 3.27	L'effet de l'augmentation de l'épaisseur de la pièce sur la température de chauffage de la pièce concave102
Figure 3.28	L'effet de l'augmentation de la largeur de la pièce sur la température de chauffage de la pièce concave102
Figure 3.29	L'effet de l'augmentation de la largeur et l'épaisseur de la pièce sur la température de la pièce concave103
Figure 4.1	Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour 5 épaisseurs de la pièce106
Figure 4.2	La répartition des températures dans la plaque 5 fois plus épaisse après 120 minutes de chauffage.....106
Figure 4.3	L'effet de l'épaisseur de la plaque sur la puissance de chauffage108
Figure 4.4	Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour 5 volumes différents de la pièce.....109
Figure 4.5	La répartition des températures pour 4.9 fois le volume de la plaque après 120 minutes de chauffage.....109
Figure 4.6	L'effet du volume de la plaque sur la puissance de chauffage.....110

	Page
Figure 4.7	Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour 3 largeurs différentes de la pièce 111
Figure 4.8	La répartition des températures pour 5 fois la largeur de la plaque après 120 minutes de chauffage..... 112
Figure 4.9	L'effet de la largeur de la plaque sur la puissance de chauffage..... 113
Figure 4.10	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour 5 épaisseurs de la pièce 115
Figure 4.11	La répartition des températures pour 5 fois l'épaisseur de la plaque après 25 minutes de chauffage..... 115
Figure 4.12	L'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage de la pièce en forme T..... 116
Figure 4.13	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour 5 volumes de la pièce 117
Figure 4.14	La répartition des températures pour 4.9 fois le volume de la pièce en forme T après 25 minutes de chauffage 118
Figure 4.15	L'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce en forme T..... 119
Figure 4.16	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour 3 largeurs de la pièce..... 120
Figure 4.17	La répartition de la température dans la pièce en forme T après 25 minutes de chauffage pour 5 fois la largeur de la pièce 120
Figure 4.18	L'effet de la largeur de la pièce en forme T sur la puissance de chauffage..... 121
Figure 4.19	Comparaison des cycles de chauffage des 4 épaisseurs étudiées de la pièce en forme L 123
Figure 4.20	La répartition de la température dans la pièce en forme L après 30 minutes de chauffage pour 6 fois l'épaisseur de la pièce 124

	Page
Figure 4.21	L'effet de l'épaisseur de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage125
Figure 4.22	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme L pour les 5 volumes étudiés126
Figure 4.23	La répartition de la température dans la pièce en forme L après 30 minutes de chauffage pour 8fois le volume de la pièce126
Figure4.24	L'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce en forme L127
Figure 4.25	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme L pour les 3 largeurs de la pièce128
Figure 4.26	La répartition de la température dans la pièce en forme L pour 2 fois de plus la largeur de la pièce.....129
Figure 4.27	L'effet de la largeur de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage130
Figure 4.28	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 5 épaisseurs de la pièce.....131
Figure 4.29	La répartition de la température dans la pièce concave pour 5 fois de plus l'épaisseur de la pièce132
Figure 4.30	L'effet de l'épaisseur de la pièce sur la puissance de chauffage de la pièce concave dans le four133
Figure4.31	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 3 volumes de la pièce.....134
Figure 4.32	La répartition de la température dans la pièce concave pour 8 fois de plus le volume de la pièce134
Figure 4.33	L'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce concave.....136
Figure 4.34	Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 3 largeurs de la pièce137
Figure 4.35	L'effet de la largeur sur la puissance de chauffage de la pièce concave.....138

LISTE DES ABRÉVIATIONS

h: Heurs

s: Secondes

PDE: Équation différentielle partielle

DSC: Calorimétrie à balayage différentiel

T: Température de la pièce

L : Largeur

Li : Largeur initiale

e: Épaisseur

ei : Épaisseur initiale

V: Volume

Vi : Volume initial

t: Temps

P: Puissance

Text: Température extérieure

CF/PEEK: Composite thermoplastique polyétheréthercétone (PEEK) renforcé par les fibres de carbone(CF)

PAEK: Polyaryléthercétone

PID: Proportionnel, intégrateur, dérivateur

DFMA: Design for Manufacturing and Assembly

ROS : Brins orientés au hasard (random oriented strands)

LISTE DES SIGNES

K : Connectivité thermique
 C_p : Capacité thermique
 ρ : Masse volumique
 H_{tr} : L'enthalpie de cristallisation
 E : L'énergie d'activation
 A_0 : Constante préexponentielle
 R : Constante de gaz parfait
 V_f : Volume de fraction de fibre
 α : Degré de guérison
 n : Ordre de réaction
 ρ_r : Masse volumique de la résine
 k : vitesse de réaction
 Q_s : Source de chaleur extérieure
 q_{gen} : Source de chaleur générée
 q_0 : densité surfacique de puissance
 R_r : Degré cristallisation
 $H(t)$: Flux de chaleur généré
 v : La vitesse de fabrication
 a : L'accélération de fabrication
 v_0 : La constante de vitesse
 τ_0 : La constante de temps

L : La taille de la pièce pour un processus donné

q_r : Le flux de chaleur radiative absorbé par la pièce

G : Le flux de chaleur radiative entrant, (W / m^2).

J : Le flux de chaleur radiative sortant, (W / m^2).

ε : L'émissivité de surface, un nombre sans dimension dans l'intervalle $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

σ : La constante de Stefan-Boltzmann (constante physique prédéfinie égale à $5,670400 \cdot 10^{-8}$
 $W / (m^2 \cdot T^4)$).

n : L'indice de réfraction du milieu transparent.

INTRODUCTION

L'utilisation de matériaux composites à matrice polymérique a considérablement augmenté au cours des dernières années dans divers secteurs industriels, en particulier celui de l'aéronautique. En effet, ces matériaux en question présentent plusieurs avantages tels que leurs meilleures propriétés mécaniques en termes de rigidité tout en réalisant des gains importants en termes de masse par rapport aux matériaux conventionnels métalliques. Toutefois, les applications extensives des matériaux composites sont restreintes et limitées en raison du coût élevé de leur fabrication. En particulier, pour les structures géométriquement complexes fabriquées par des procédés dispendieux tels que l'autoclave qui nécessite un long cycle de cuisson et une grande puissance de chauffage, ceci constitue un obstacle économique vis à vis leurs usages constamment croissants. Il est donc important de développer une technique de fabrication rapide pour de larges séries de production qui puisse répondre au besoin du marché. Le procédé de moulage par compression est une méthode largement utilisée pour la mise en forme des matériaux composites à résine thermoplastiques, car l'équipement est disponible, économique, facile à installer et à s'adapter puisque les presses pour la transformation du métal peuvent s'adapter au moulage des composites thermoplastiques. En plus, le cycle de production est relativement court, assure une meilleure tolérance de l'épaisseur et on peut fabriquer des pièces très complexes tridimensionnelle. Ce procédé comprend 2 étapes importantes : le chauffage et le refroidissement. Pour réduire le coût énergétique de fabrication, il faut bien contrôler l'étape de chauffage des pièces à fabriquer dépendant de leurs géométries. Autrement dit, la puissance de chauffage doit être étudiée de manière paramétrique en identifiant les paramètres influents utilisant des outils de simulation numérique sachant que la puissance de chauffage multipliée par le temps de chauffage et le tarif de consommation d'électricité donne le coût de l'énergie.

Les travaux antérieurs ont démontré que l'estimation de la puissance de chauffage des pièces en matériaux composites est basée sur des approximations rudimentaires ce qui donnent des résultats inexacts et imprécis (Akermo et Astrom, 2000). Pour Haffner (2002), le coût de chauffage est déterminé avec un taux massique qui dépend du type de matériau et le type de

l'équipement utilisé sans prendre en considération la puissance de chauffage puisqu'il présume que celle-ci est très faible par rapport aux autres éléments du coût de fabrication.

En 2016, M. El Wazziki a développé un modèle numérique tridimensionnel pour l'estimation de la puissance de chauffage des pièces en composite thermoplastique fabriquées au moyen du procédé de moulage par compression. La détermination de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce se fait par la simulation numérique du cycle thermique du procédé en utilisant le logiciel d'éléments finis COMSOL en changeant le volume du moule et de la pièce tout en considérant le même cycle du procédé. Les résultats ont démontré que le profil de la puissance thermique est linéaire. Mais cette méthodologie est limitée pour la dimension du moule à deux fois plus grande. Pour des pièces ayant des géométries supérieures à deux fois plus grand, le profil de la puissance thermique est ignoré.

Ce mémoire consiste à réaliser une étude paramétrique de la puissance de chauffage des pièces structurales aéronautiques en composites thermoplastique fabriquées au moyen de deux procédés de moulage par compression. Premièrement, trois types de pièces sont produites avec des imprégnés de fibres courtes d'orientation aléatoires (ROS), et deuxièmement, une pièce concave est fabriquée à partir de feuilles imprégnées de fibres continus unidirectionnels UD.

L'objectif de cette étude est de déterminer l'effet de l'épaisseur et de la largeur sur la puissance de chauffage des quatre formes de pièces en composites thermoplastiques en faisant des simulations numériques du procédé de chauffage des pièces au moyen du logiciel COMSOL basé sur la méthode des éléments finis. Nous explorerons également la limite de la méthode de Mohamed El Wazziki en allant plus loin avec les dimensions des pièces par l'utilisation de la fonction échelle du logiciel COMSOL pour étudier l'effet du volume de la pièce sur la puissance de chauffage. Pour ce faire, nous avons considéré le centre de la pièce comme la seule référence pour déterminer la puissance de chauffage sans tenir compte de l'effet de la tolérance de la température sur la qualité de la pièce. Nous avons également supposé que le temps du procédé soit constant par rapport à la taille de la pièce.

Structure de mémoire :

Le premier chapitre consistera à une revue de la littérature pertinente aux: matériaux composites, la technique de fabrication du composite, le procédé de moulage par compression, la méthode de fabrication expérimentale des pièces étudié, le mode de transfert thermique, l'étude de l'effet de la réaction chimique exothermique sur la température de chauffage et la méthode d'estimation de la puissance de chauffage du procédé de moulage par compression.

Le deuxième chapitre sera concentré sur la méthodologie de travail pour étudier l'effet de la largeur, de l'épaisseur et du volume des pièces sur la puissance de chauffage. Nous démontrerons également les modèles de transfert de chaleur pour les pièces étudiées.

Dans le troisième chapitre, nous démontrerons l'effet de l'épaisseur et de la largeur des pièces sur le cycle de fabrication préservant toujours la même puissance de chauffage et les mêmes conditions aux limites.

Dans le quatrième chapitre, nous étudierons l'effet de l'épaisseur, du volume et de la largeur des pièces sur la puissance nécessaire pour la fabrication des pièces virtuelles, en assumant que les temps de chauffage et de refroidissement pour les pièces en question demeurent constants.

CHAPITRE 1

REVUE DE LITTÉRATURE

1.1 Matériaux composites

Les matériaux composites sont définis comme une combinaison d'au moins deux composants ayant des phases chimiques différentes pour produire un matériau ayant des propriétés mécaniques différentes de celles des composantes individuelles initiales.

Un matériau composite est généralement constitué de renforts et de matrices.

1. Renfort : assure la résistance et la rigidité du matériau. Les renforts les plus utilisés pour le renforcement des composites sont les fibres, tel que : les fibres de verre (utilisée dans 95% des composite), les fibres de carbone, les fibres naturelles et les fibres d'aramides.

Tableau 1.1 Propriétés mécaniques de certain fibres tirées de Haffner (2002, p.35)

Résine	Densité	Résistance à la traction	Module de Young	Déformation	Coût
Unité	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[%]	[\$/kg]
Verre					
E-verre	2601.91	2999.21	68.94	5	1.76-2.2
C-verre	2491.19	3302.58	68.94	5	1.76-2.2
S2-verre	2491.19	998.96	82.74	5.3	13.22-17.63
Carbone					
Carbone HS	1799.19	3599.06	220.63	1.6	44.09-66.14
Carbone IM	1799.19	5302.06	303.37	1.8	66.14-88.18
Carbone HM	1799.19	3502.53	379.21	0.4	99.21-198.41
Carbone UHM	1992.95	1999.48	441.26	0.8	242.51-352.74
Aramide					
Aramide LM	1494.71	3599.06	62.05	3.6	44.09
Aramide HM	1494.71	3102.64	117.21	2.4	55.11
Aramide UHM	1494.71	3399.11	179.26	1.3	66.14

2. Matrice : assure la répartition et la cohésion des contraintes dans tout le matériau composite et protège les fibres contre les dommages extérieurs.

Tableau 1.2 Propriétés mécaniques de certain matrices tirées de Haffner (2002, p.40)

Résine	Densité	Résistance à la traction	Module de Young	Déformation	Coût
Unité	[kg/m ³]	[MPa]	[MPa]	[%]	[\$/kg]
Thermodurcissable					
Époxy	1190.23	6.896	3.448	7	3.74-4.41
Polyester	1107.19	6.207	2.758	4.5	3.52-4.63
Vinylester	1107.19	5.517	2.069	3	3.74-4.85
Thermoplastique					
PA	149471	102.069	13.793	2.1	66.14-88.18
PEEK	1300.95	102.758	5.517	1.6	88.18-110.23
PE	941.11	24.827	13.793	2.1	1.32-1.76

Le renforcement de la matrice par des fibres améliore les propriétés mécaniques du composite. Les fibres continues apportent généralement la plus grande amélioration des propriétés telles que la rigidité et la force et peuvent prendre des diverse formes (unidirectionnel, bidirectionnel, etc.). (Advani, S. G. et Hsiao, K. T., 2012). Dans ce travail de recherche, on s'intéresse uniquement au composite à matrice polymère renforcé par les fibres de carbone (CF/PEEK).

1.2 Technique de fabrication du composite

Les caractéristiques mécaniques et thermiques des pièces fabriquées en matériaux composite ne dépendent pas uniquement des constituants du composite mais également du procédé de fabrication, des conditions d'utilisation, du volume de production et de la géométrie de la pièce (El Wazziki, 2016).

Dans la littérature, il existe plusieurs méthodes de fabrication des matériaux composites tels que le moulage par injection, le moulage par compression, le moulage au contact, l'enroulement filamentaire, l'enroulement par drapages, l'infusion et RTM (Resin transfer

molding). Le processus de fabrication étudié dans ce travail de recherche est le moulage par compression.

1.3 Procédé de moulage par compression

Le moulage par compression est un procédé de mise en forme très utilisé par les industries aéronautiques pour former des pièces composites thermoplastiques de formes géométriques complexes. En effet, le matériau placé entre les deux moitiés du moule prend la forme de la cavité du moule sous l'effet de la pression et de la chaleur. La pièce se solidifie par refroidissement et sera retirée après l'ouverture du moule.

1.4 Méthode de la fabrication expérimentale des pièces étudié

1.4.1 Méthode de fabrication de la pièce en forme T

La pièce en forme T est moulée à l'aide d'un moule fabriqué avec deux plateaux composés de 4 canaux de chauffage et de 3 canaux de refroidissement, deux inserts, un cadre, deux isolants et une presse hydraulique tel qu'indiqué dans la figure 1.1 (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015). Les plateaux ont été chauffés avec des cartouches de 500W et surveillés à l'aide de deux contrôleurs d'autorégulation PID (proportionnel, intégrateur, dérivateur).

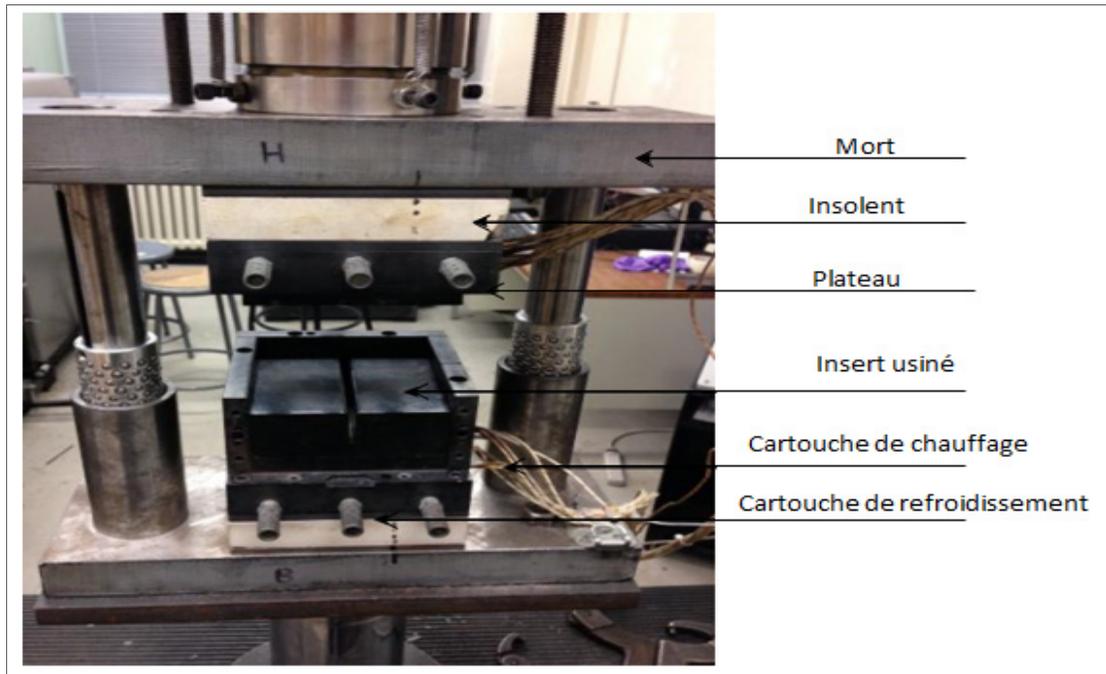


Figure 1.1 Appareil de moulage de la pièce en forme T tiré de Wazziki et al. (2015, p.2)

Les brins sont placés manuellement dans la cavité en petits lots successifs afin d'assurer une répartition aléatoire dans le plan et de minimiser l'orientation hors plan du cadre (figure 1.2) (Leblanc et al., 2014).

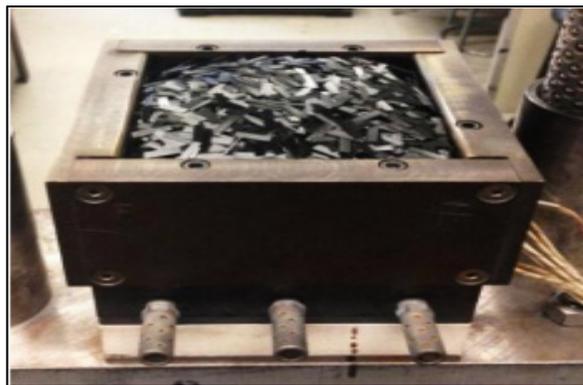


Figure 1.2 La cavité de la pièce en forme T remplie de brins tirés de Wazziki (2015, p.2)

Les plateaux inférieurs et supérieurs sont surchauffés à 425 °C et 400 °C respectivement. Le plateau inférieur est réglé à une température plus élevée afin de compenser la masse thermique des inserts et la perte de chaleur autour du cadre. Le profil de température, le temps de chauffage et la pression appliquée sont indiqués dans la figure 1.3.

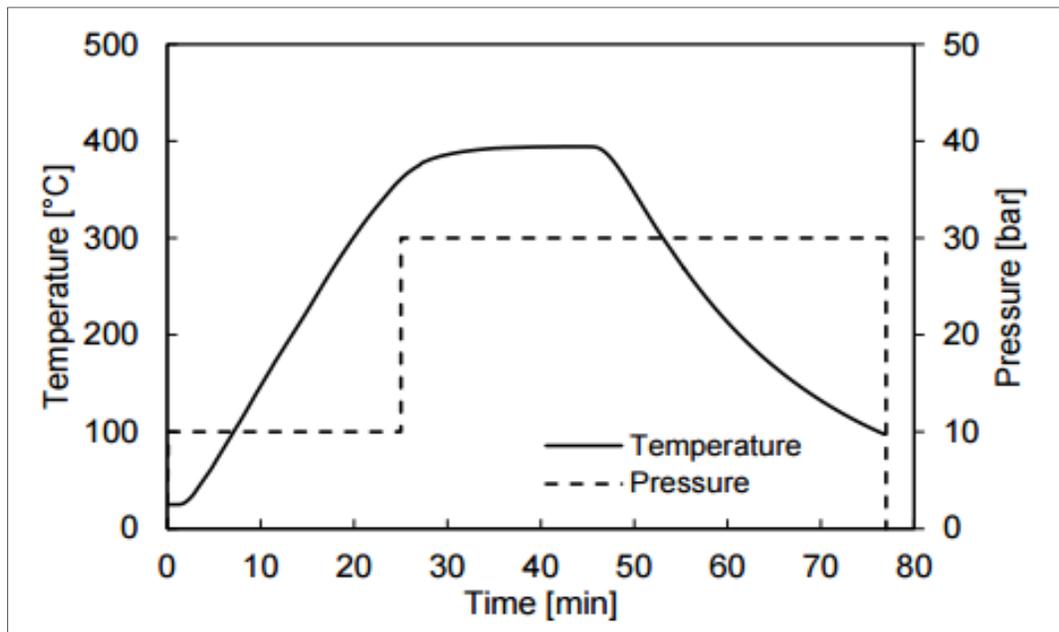


Figure 1.3 Cycle de traitement thermique de la pièce en forme T triée de Leblanc (2014, p.8)

La pression appliquée permet d'obtenir une bonne qualité de consolidation avec un minimum de défauts et un faible contenu vide. La tomographie par rayons X est utilisée comme inspection finale pour l'étude de la microstructure du matériau.

1.4.2 Méthode de fabrication de la plaque

Les plateaux de chauffage de la plaque sont presque trois fois plus grands que celles de la pièce en forme T, soi-disant les dimensions des plateaux de chauffage de la plaque sont : 900mm x 900mm x 85.7mm et les dimensions de la pièce sont 304.8mm x 355mm x 6mm fabriqués par des fibres discontinuées ROS, d'une longueur de 25,4mm x 12,7mm x 6mm, fendus manuellement ou automatiquement à partir d'une bande pré-imprégné et unidirectionnel de 304,8mm de largeur avec une fraction volumique de 60%. Ces brins ont été répartis de manière à assurer leur orientation aléatoire dans le moule (Wazziki et Ngo, 2015). La figure 1.4 représente les six étapes de fabrication de la plaque comprenant la phase de préparation.

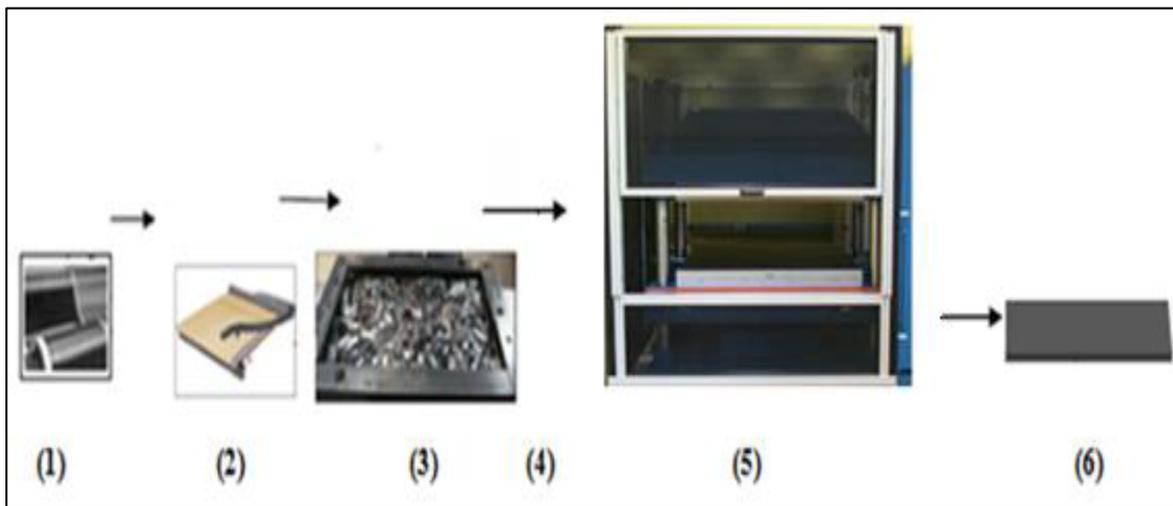


Figure 1.4 Processus de fabrication de la plaque tirée de Wazziki (2014, p.223)

(1) la mise en place du matériau dans le coupeur (2) le coupage du matériau dans des brins (coupe manuelle), (3) la répartition au hasard des brins dans le moule, (4) la fermeture et le transfert du moule à la presse, (5) le chauffage des plateaux et le moulage par compression de la plaque, puis (6) le refroidissement et le démoulage.

1.4.3 Méthode de fabrication de la pièce en forme concave

Les procédures de fabrication de cette pièce sont différentes de celles antérieures en raison de l'utilisation de fibres unidirectionnelles continues (UD) au lieu des fibres coupées aléatoire (ROS). Cette pièce est fabriquée à l'université de Québec à Trois-Rivières (UQATR) à partir de la résine PEEK TC1200 (Lessard, 2014). La première étape de fabrication consiste à mouler une plaque avec une presse hydraulique et un moule plat de 24 couches avec un empilage $[0/90]_{12}$. Par la suite, la plaque est chauffée dans un four infrarouge jusqu'à 420°C et placée manuellement dans le moule pour l'étape d'estampage. La figure 1.5 démontre les étapes de fabrication de la pièce concave :

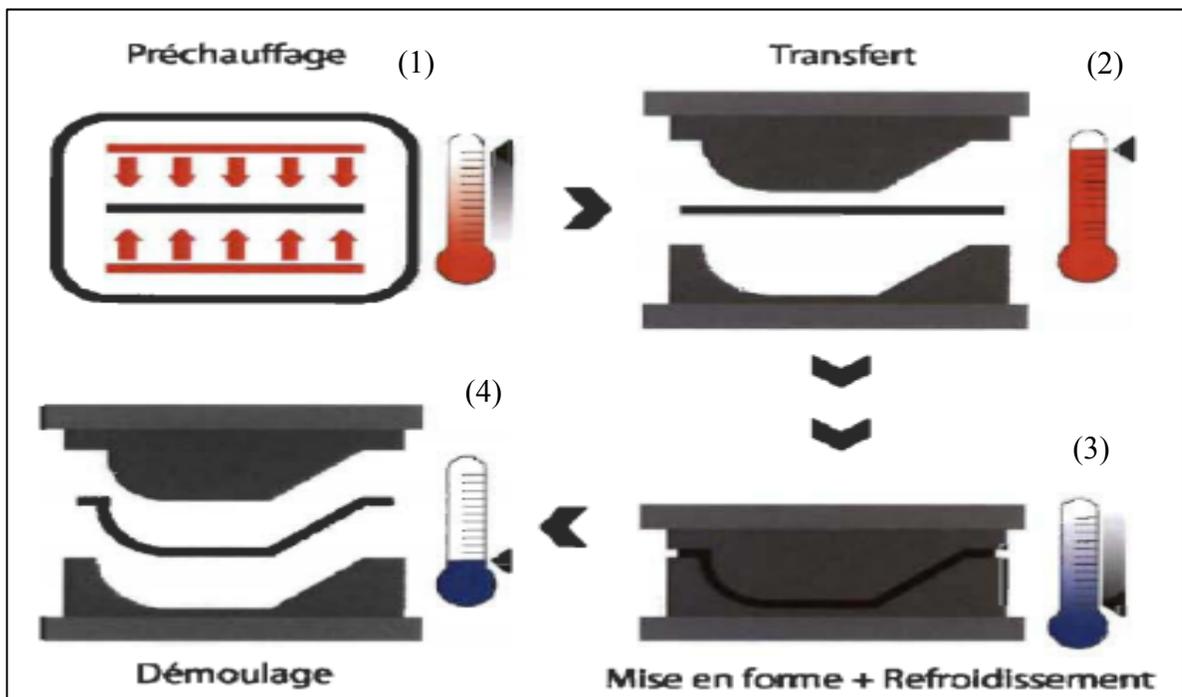


Figure 1.5 Les étapes de fabrication de la pièce concave : (1) chauffage de la plaque dans le four (2) transfert de la plaque chaude à la presse (3) compression de la pièce (4) démoulage.

Tirée de Lessard (2014, p.10)

L'unité de thermo-estampage est principalement composée d'un moule en acier monté sur une presse hydraulique 50T. Le moule est composé de deux moitiés soit le poinçon et la cavité.

Ces deux moitiés sont faites d'acier trempé P20 et chauffées par des cartouches cylindriques. Le moule est composé de formes géométriques simples telles qu'un quart de sphère à une extrémité, une partie cylindrique au milieu et deux faces plates à l'autre extrémité (Lessard, 2014).

En ce qui concerne le temps et les températures de chauffage, Hugues Lessard (Lessard, 2014) a mesuré en temps réel les températures de la cavité, la pièce et le poinçon par trois thermocouples installés dans le moule afin d'étudier l'effet des paramètres de température, pression et temps sur la qualité de consolidation des pièces.

La figure 1.6 démontre l'évolution des températures de la pièce, le poinçon et la cavité en fonction du temps durant les opérations de chauffage, de formage et de refroidissement. Les six moments clés de mise en forme sont notés du point (A) à (F) dans la figure. Sachant que (A) représente la déconsolidation partielle de la pièce lors du préchauffage. (B) représente la pièce sortie du four et déposée au-dessus du moule au point (C) pour donner le premier contact de la pièce dans le moule au point (D). Au point (E) nous obtenons la fermeture du moule qui a atteint la position d'équilibre et le point (F) représente le début de la phase de refroidissement du moule.

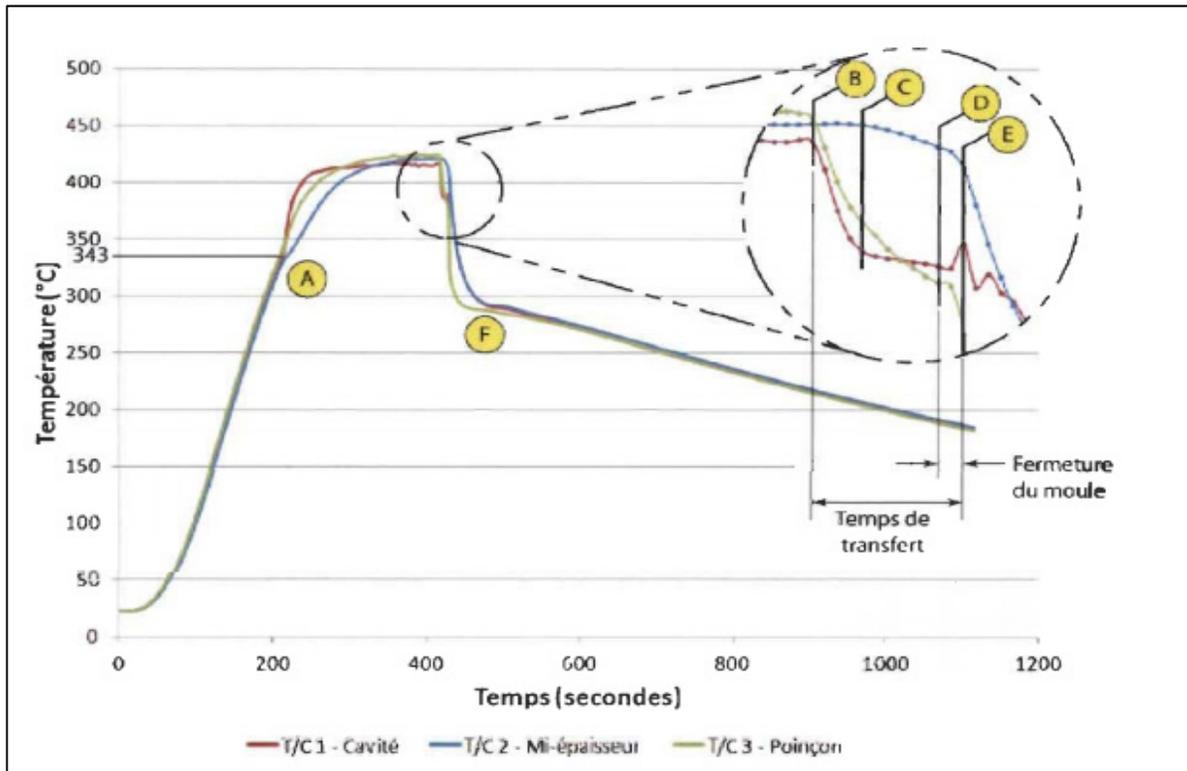


Figure 1.6 Évolutions de la température des thermocouples lors d'un cycle de moulage de la pièce concave tirée de Lessard (2014, p.61)

D'une manière expérimentale, selon cette figure, le refroidissement a été effectué sur trois étapes :

- La première étape étant par convection avec l'air au point B;
- La deuxième étape étant par conduction au moment du contact de la pièce avec le moule au point D;
- La troisième étape étant par convection forcée par le liquide de refroidissement au point F.

1.5 Modes de transfert thermique

1.5.1 Conduction thermique

La propagation de chaleur à l'intérieure d'un solide est la conséquence d'une répartition non uniforme de la température sachant que la vitesse de cette propagation dépend de la nature du

matériau. Le transfert thermique tridimensionnel entre deux points dans un corps isotrope s'exprime par la relation de Fourier suivante (Joseph Fourier, 1822 p. 379-465):

$$\vec{q} = -k \overrightarrow{\text{grad } T} \quad (1.1)$$

Avec

$$\overrightarrow{\text{grad } T} = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{k} \quad (1.2)$$

Où q est la densité du flux de chaleur ou la vitesse d'écoulement de la chaleur et k est le coefficient de conduction thermique du matériau.

La loi de Fourier conduit à l'équation transitoire de transfert de chaleur par conduction dans un corps homogène comme suit:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K\nabla T) + Q \quad (1.3)$$

Où Q est l'énergie produite dans le matériau, exprimé en ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) mais est souvent négligeable et c_p est la capacité thermique.

1.5.2 Convection thermique

Le transfert de chaleur par convection se produit lorsqu'un fluide en écoulement maintenu à la température T_f en contact avec une surface a une température T_s . Le transfert de chaleur entre le fluide et la surface est contrôlé par la loi de Newton selon l'équation suivante (Saeed Moaveni, 2007, p.22):

$$q = h A(T_s - T_f) \quad (1.4)$$

Où h est le coefficient de transfert de chaleur par convection et A est la surface normale au flux de chaleur q .

L'application de l'équilibre énergétique à une surface en convection nécessite que le flux de chaleur transféré à cette surface par conduction doit être égale au flux de chaleur par convection exprimé par l'équation suivante (Saeed Moaveni, 2007, p.22) :

$$-kA \frac{\partial T}{\partial x} = h A(T_s - T_f) \quad (1.5)$$

1.5.3 Rayonnement thermique

Lorsque le rayonnement frappe un corps, il est partiellement absorbé, partiellement réfléchi et partiellement transmis. La relation entre l'énergie absorbée, réfléchie et transmise est donnée par l'équation suivante (Frank Kreith, 1968, p.200) :

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (1.6)$$

Où :

α : L'absorptivité, la fraction du rayonnement incident absorbé par le corps.

ρ : La réflectivité, la fraction du rayonnement incident réfléchi par la surface du corps.

τ : La transmissivité, la fraction du rayonnement incident transmise à travers le corps.

La réflexion du rayonnement peut être régulière ou diffuse. Si une surface est fortement polie et lisse, la réflexion du rayonnement sera similaire à la réflexion d'un faisceau lumineux, c'est-à-dire que l'angle d'incidence sera égal à l'angle de réflexion. La plupart des matériaux utilisés dans les industries sont rugueux parce que leurs surfaces ont des aspérités qui sont grandes par rapport à une longueur d'onde. La réflexion du rayonnement d'une surface rugueuse qui se produit pratiquement indistinctement dans toutes les directions est dite diffuse.

D'après la loi de Lambert, l'analyse du rayonnement des surfaces grises et qui se reflètent diffuse peut être traitée en termes de radiosité J , qui est définie comme la vitesse à laquelle le rayonnement quitte une surface donnée ou une surface unitaire. La radiosité est la somme des radiations émises, réfléchies et transmises, mais pour les corps opaques qui ne transmettent aucun rayonnement, la radiosité peut être exprimée par l'équation suivante (Frank Kreith, 1968, p.225) :

$$J = \rho G + \varepsilon E_b \quad (1.7)$$

Où J : La radiosité, exprimée en Btu/hr sq ft ;

G : rayonnement par unité de temps incident sur l'unité de la surface exprimée en Btu/hr sq ft ;

E_b : Puissance émissive du corps noir, exprimée en Btu/hr sq ft;

ε : L'émissivité;

ρ : La réflectivité.

La puissance rayonnée par un corps d'après la loi de Stefan-Boltzmann est donnée par la relation suivante :

$$P = \varepsilon S \sigma T^4 \quad (1.8)$$

Où S est la superficie du corps.

1.6 Étude de l'effet de la réaction chimique exothermique sur la température de chauffage

Le transfert de chaleur transitoire dans la pièce provoque des gradients thermiques qui peuvent entraîner une vitrification ou une solidification différentielle qui causent des rétrécissements de résine dans la direction de l'épaisseur ce qui génère une réaction chimique exothermique du composite. Les gradients de température sont très faibles pour les pièces minces et peuvent être négligés. Par contre, ce n'est pas le cas pour les pièces épaisses alors qu'une génération de chaleur rapide avec une conductivité thermique faible peut entraîner des contraintes résiduelles importantes.

Les contraintes résiduelles dépendent aussi des paramètres géométriques de la pièce et les caractéristiques thermiques du matériau. Donc, l'équation de transfert de chaleur (1.3) devrait inclure un terme qui représente la génération de la température par la réaction chimique du composite comme suivant (Baran et Akkerman, 2017):

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K \nabla T) + q_{gen} \quad (1.9)$$

Avec q_{gen} étant le terme qui représente la source de chaleur interne due à la réaction exothermique de la matrice durant le procédé de moulage, qui peut être exprimé par l'équation suivante :

$$q_{gen} = (1 - V_f) \rho_r H_{tr} R_r(\alpha, T) \quad (1.10)$$

Sachant que :

H_{tr} est l'enthalpie de cristallisation (J/g)

ρ_r est la densité de résine

V_f est le volume de fraction de fibre

$R_r(\alpha, T)$ est le degré de cristallisation

α représente le niveau de durcissement dans la pièce, qui peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\alpha = \frac{H(t)}{H_{tr}} \quad (1.11)$$

Où $H(t)$ étant le flux de chaleur généré

Le degré de cristallisation peut être exprimé par l'équation suivante (Kessler, 2002):

$$R_r(\alpha, T) = A_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) f(\alpha) \quad (1.12)$$

Où :

A_0 étant la constante pré-exponentielle (s^{-1})

E étant l'énergie d'activation ou l'énergie molaire (kJ/mol)

R étant la constante de gaz parfait ($R = 8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$)

$f(\alpha)$ étant le modèle de réaction

Dans la littérature, plusieurs modèles cinétiques sont proposés pour décrire le durcissement de la résine (Kessler, 2002). Le tableau ci-dessous représente cinq différents modèles de réaction et leurs paramètres dépendants :

Tableau 1.3 Les cinq modèles de réaction tirée de Kessler (2002, p.2376)

Reaction Model	Model Designation	$f(\alpha)$	Parameters
First order	F1	$(1 - \alpha)$	A, E
Second order	F2	$(1 - \alpha)^2$	A, E
n th order	F n	$(1 - \alpha)^n$	A, E, n
n th order with autocatalysis	C n	$(1 - \alpha)^n(1 + K_{cat}\alpha)$	A, E, n, K_{cat}
Prout-Tompkins equation (autocatalytic)	PT	$(1 - \alpha)^n\alpha^m$	A, E, n, m

Le modèle PT décrit par Prout et Tompkins en 1944 a été très utilisés jusqu'à 1997. Le modèle de réaction d'ordre n (F n) est particulièrement utilisé récemment pour les systèmes de composite CF/PEEK (Hache, 2015) car ils n'ont pas d'autocatalyse.

Donc pour :

$$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n \quad (1.13)$$

L'équation (1.8) devient alors :

$$R_r(\alpha, T) = \frac{\partial \alpha}{\partial t} = A_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) (1 - \alpha)^n \quad (1.14)$$

Pour calculer la valeur de l'énergie d'activation (E). La loi d'Arrhenius nous permet de décrire la variation de la vitesse de réaction en fonction de la température :

$$\frac{d \ln k}{dT} = \frac{E}{RT^2} \quad (1.15)$$

Avec k étant le coefficient de vitesse ou constante de vitesse.

En supposant que E ne dépend pas de la température, ce qui est une hypothèse raisonnable uniquement sur un intervalle de température limité d'après la loi d'Arrhenius, l'équation (1.15) peut se définir alors comme suit:

$$k = A_0 \exp\left(\frac{-E}{RT}\right) \quad (1.16)$$

Pour identifier l'énergie d'activation (E) et la constante pré-exponentielle (A_0) de CF/PEEK par la loi d'Arrhenius, nous avons utilisé la courbe expérimentale de Phillips (Phillips, 1997) qui est la variation du coefficient de vitesse (k) de CF/PEEK en fonction de l'inverse de températures (figure 1.7).

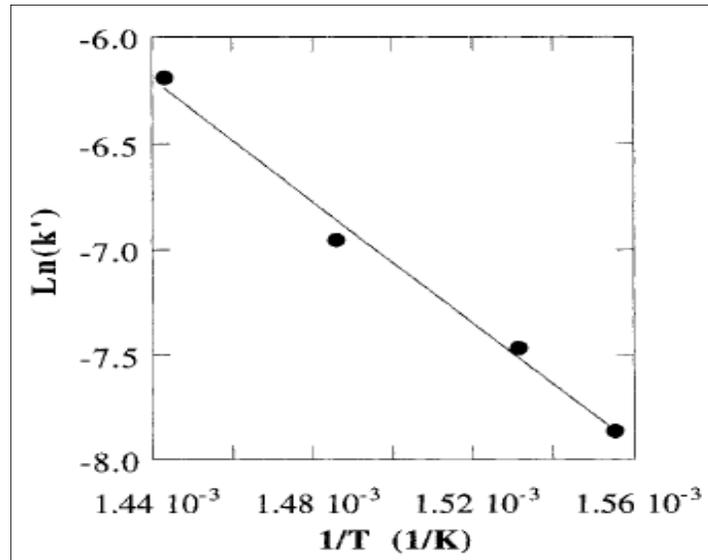


Figure 1.7 L'évolution de la vitesse de réaction $\text{Ln}(k)$ en fonction de $1/T$ pour CF/PEEK tiré de Kessler (1997, p.504)

Pour identifier les paramètres E et A_0 , on a appliqué la fonction logarithmique à l'équation (1.16) dans le but de l'écrire sous la forme de l'équation d'une droite ($y = ax + b$).

On obtient donc :

$$\text{Ln}(k) = \text{Ln}(A_0) - \frac{E}{RT} \quad (1.17)$$

Avec :

$$y = \text{Ln}(k) \quad (1.18)$$

$$a = -\frac{E}{R} \quad (1.19)$$

$$x = \frac{1}{T} \quad (1.20)$$

$$b = \ln(A_0) \quad (1.21)$$

L'équation de la droite de $\ln(k) = f(1/T)$ présenté dans la figure 1.7 est la suivante :

$$y = -8.8235 \cdot 10^3 x + 6 \quad (1.22)$$

Donc l'équation (1.19) donne :

$$E = -aR \quad (1.23)$$

Application numérique : $E = 73.358 \text{ kJ/mol}$

Et l'équation (1.21) devient :

$$A_0 = 10^b \quad (1.20)$$

Application numérique : $A_0 = 10^6 \text{ s}^{-1}$

L'énergie d'activation (E) est considérée comme une valeur moyenne pour l'activation de la réaction chimique. Certaines réactions ont une énergie d'activation plus élevée comme la réaction de décomposition en phase gazeuse de $\text{HI} = \text{I}_2 + \text{H}_2$ avec $E=263\text{kJ/mol}$. D'autres réactions chimiques ont une énergie d'activation considérablement plus faible comme exemple $E=20 \text{ kJ/mol}$.

Le degré de guérison (degree of cure) (α) et l'enthalpie de cristallisation (H_{tr}) sont déterminés expérimentalement par la calorimétrie à balayage différentiel (DSC). Cet instrument, DSC, mesure la différence dans les échanges de flux de chaleur à l'intérieur d'un petit échantillon de 10mg à 50mg en fonction de la température. Leurs valeurs dépendent de plusieurs paramètres tels que : la vitesse d'augmentation de la température, le pourcentage des fibres et de résine et l'état chimique du milieu de mesure par exemple si c'est de l'azote ou l'argon. D'autres méthodes de calculs des propriétés chimiques de composite thermoplastique nous démontrant les effets de ces paramètres sur la propriété du matériau sont fournis par Ramani (Ramani, 2010).

Leonardi (Leonardi, 2013) a obtenu le degré de guérison (α) par la technique DSC à partir d'un échantillon de PEEK renforcé par un pli de carbone unidirectionnel dans un milieu d'azote pour éviter le contact avec l'oxygène de l'atmosphère.

La figure 1.8 démontre le thermogramme du flux de chaleur en fonction de la température, sous un flux d'azote étant donné que la vitesse d'élévation de la température est de 20°C/min.

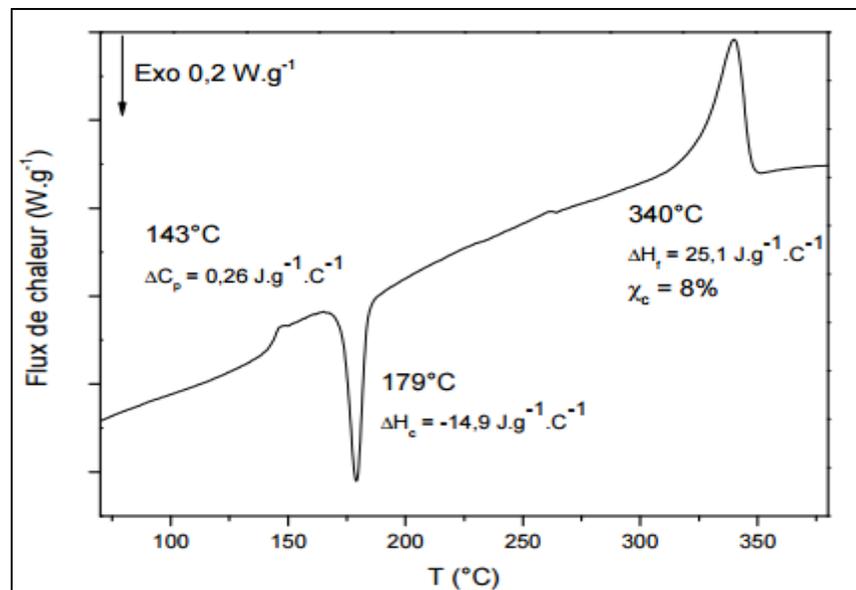


Figure 1.8 Thermogramme, obtenu par DSC pour PEEK renforcé par les fibres de carbone tiré de Leonardi (2013, p.62)

D'après cette figure l'évolution du flux de chaleur en fonction de la température est une courbe croissante avec deux pics à deux températures différentes. Le premier pic exothermique à 179°C caractérise la cristallisation froide du matériau et un deuxième pic endothermique plus large apparaît à 340°C qui caractérise la fusion du matériau. Le degré de guérison est de 8% et l'enthalpie de fusion est de 25,1 J/g.

Pour déterminer l'ordre de réaction (n) il existe deux méthodes selon Margaret (Margaret, John & Sons, 2004) :

La première méthode est expérimentale. En doublant la concentration du réactif, la vitesse de la réaction double et la réaction est alors de premier ordre. Mais, si la vitesse reste constante alors la réaction est d'ordre zéro. Mais si la vitesse quadruple, la réaction est d'ordre deux et si la vitesse de réaction augmente huit fois plus alors la réaction est d'ordre trois.

La deuxième méthode d'identification de l'ordre de réaction est théorique par le traçage graphique de la vitesse de réaction en fonction du temps. S'il en résulte une droite alors la réaction est d'ordre zéro. Si l'on construit un graphique du logarithme naturel de la vitesse de réaction en fonction du temps et l'on résulte une droite alors la réaction est d'ordre un. La figure 1.7 du logarithme de la vitesse de réaction ($\ln(k)$) en fonction de l'inverse de temps ($1/T$) pour CF/PEEK démontre une courbe droite, alors l'ordre de réaction (n) est égal à 1.

La connectivité thermique (K), la capacité thermique (C_p) et la densité (ρ) de CF/PEEK à 60% de volume de fibre sont mesurés par A. Levy (A. Levy, 2014). La densité de la matrice PEEK est calculée par Ye (Ye, Friedrich, Kastel, & Mai, 1995). Les caractéristiques thermiques de composite thermoplastique CF/PEEK sont présentées dans le tableau 1.4.

Tableau 1.4 Les caractéristiques thermiques de composite thermoplastique CF/PEEK

Paramètres	Expression
K	$0.75 W/(m.K)$
C_p	$1320 j/(kg.K)$
ρ	$1540 kg/m^3$
H_{tr}	$25100 j/kg$
E	$73358 j/mol$
A_0	$10^6 s^{-1}$
R	$8.314 j/(mol.K)$
V_f	0.6
α	0.08
ρ_r	$1300 kg/m^3$
n	1

Pour déterminer l'influence de l'énergie d'activation sur la température (K), la figure 1.9 représente la variation du coefficient de vitesse k (s^{-1}) en fonction de la température pour différentes valeurs d'énergie d'activation.

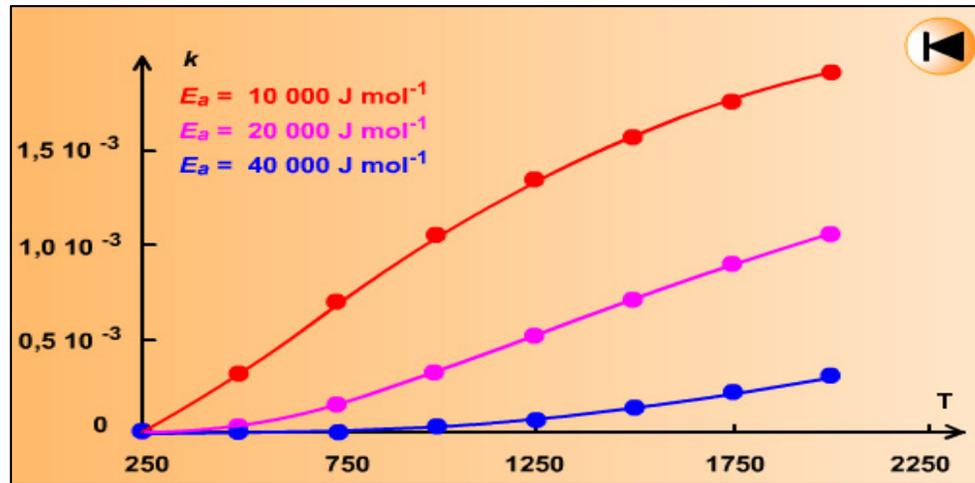


Figure 1.9 L'effet de l'énergie d'activation sur la température
http://uel.unisciel.fr/chimie/cinet/cinet_ch04/co/apprendre_ch4_05.html

On remarque dans la figure 1.9, que plus l'énergie d'activation est élevée plus la température nécessaire pour l'activation de la réaction chimique est élevée. Pour une valeur de l'énergie d'activation de $40\,000 \text{ J/mol}$ la réaction chimique s'active à une température de 726°C .

Dans notre cas d'étude, nous supposons que les gradients thermiques générés par q_{gen} de la pièce sont négligeable pour les trois raisons suivantes :

1. Le volume du moule est beaucoup plus grand que le volume de la pièce.
2. Pour chauffer la pièce à une température de 380°C , la température de chauffage des plateaux de chauffage et de l'ensemble du moule doit être beaucoup plus que 380°C .
3. Le temps de chauffage du moule est toujours supérieur au temps de chauffage de la pièce puisque la pièce est la dernière partie qui sera chauffé dans l'ensemble du moule.

Alors la puissance de chauffage nécessaire pour la fabrication d'une pièce dépend principalement de la taille du moule.

1.7 Méthode d'estimation de la puissance de chauffage du procédé de moulage par compression

1.7.1 Méthode d'estimation d'Akermo

Akermo et Astrom ont développé en 2000 un modèle d'estimation du coût énergétique basé sur l'intensité du courant de l'équipement. Ce modèle permet d'estimer le coût d'énergie annuellement de chaque équipement tel que: (Akermo et Astrom, 2000)

$$\text{Coût de l'énergie} = \frac{\text{Intensité de courant (équipement)}}{1200} * 52000 \text{ Euro/an} \quad (1.21)$$

Sachant que, le coût énergétique d'un équipement électrique d'une intensité de courant de 1200A est fixé à 52000 euros par an.

1.7.2 Simulations numériques du temps de cycle par COMSOL

COMSOL est un logiciel de modélisation et de simulation numérique par la méthode des éléments finis. L'interface de transfert de chaleur des solides de ce logiciel nous permet de simuler la répartition tridimensionnelle des températures en fonction du temps.

Le modèle développé par Mohamed El Wazziki (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015) est composé de deux plateaux, quatre plaques de moule, la pièce en forme T, deux isolateurs, le poinçon et la cavité. Ces composants ont été considérés comme des blocs solides en contact. Le modèle inclut également 8 cartouches cylindriques de chauffage avec un diamètre de 7.66mm et une longueur de 101,6mm. La figure 1.10 démontre la géométrie du modèle de chauffage pour la pièce T.

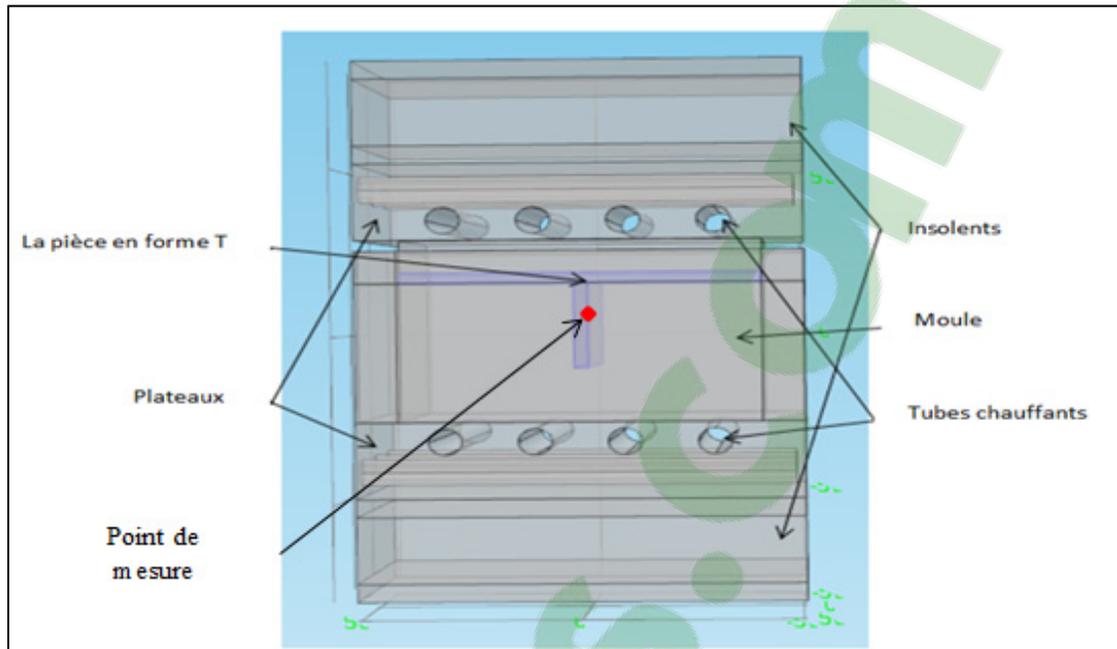


Figure 1.10 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme T tirée de Wazziki (2015, p.4)

Ce modèle est construit par le logiciel COMSOL dans la section géométrique par 12 cubes en contact surfacique. Les tubes de chauffage sont fabriqués par la soustraction des volumes cylindriques de deux cubes qui représentent les plateaux chauffants (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015).

L'étape de chauffage comprend deux périodes soi-disant le chauffage et la consolidation. La quantité de chaleur nécessaire aux surfaces des tubes de chauffage est fixée par la formule suivante (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015).

$$56000 \text{ [W/m}^2\text{]} * (T < 380 \text{ [degC]}) + 16000 \text{ [W/m}^2\text{]} * (T > 380 \text{ [degC]}) \quad (1.21)$$

D'après l'équation 1.21, la densité de puissance nécessaire appliquée aux cartouches de chauffage pour atteindre la température de chauffage (380°C) était de 56000 kW/m² et pour atteindre l'uniformité de température dans toute la pièce, la densité de puissance nécessaire était de 16000kW/m².

La résolution de l'équation du transfert de chaleur (1.22) dans l'ensemble du moule et la pièce est basé sur la méthode des éléments finis générée automatiquement par le logiciel COMSOL.

$$\rho_i c_{p_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_i \nabla T) \quad (1.22)$$

Où ρ_i , c_{p_i} , K_i et T sont respectivement la densité des matériaux considérés ($i = 1,2$), la capacité thermique, la conductivité thermique et la température en kelvin.

Les conditions de chauffage sont : La valeur initiale de la température dans l'ensemble du modèle était 25°C et la valeur de la température de l'air était fixée à 20°C . La convection naturelle entre les surfaces extérieures du moule avec l'air est déterminée par le coefficient de transfert de chaleur $h=10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$. La période de chauffage est de 1550s et la période de consolidation est de 1180s. Sachant que le point de mesure de température est placé sur la pièce à une distance de 30mm entre les deux plateaux de chauffage (figure 1.10). La figure 1.11 démontre l'évolution des températures de chauffage et de refroidissement des résultats expérimentaux et numériques au centre de la pièce en forme de T.

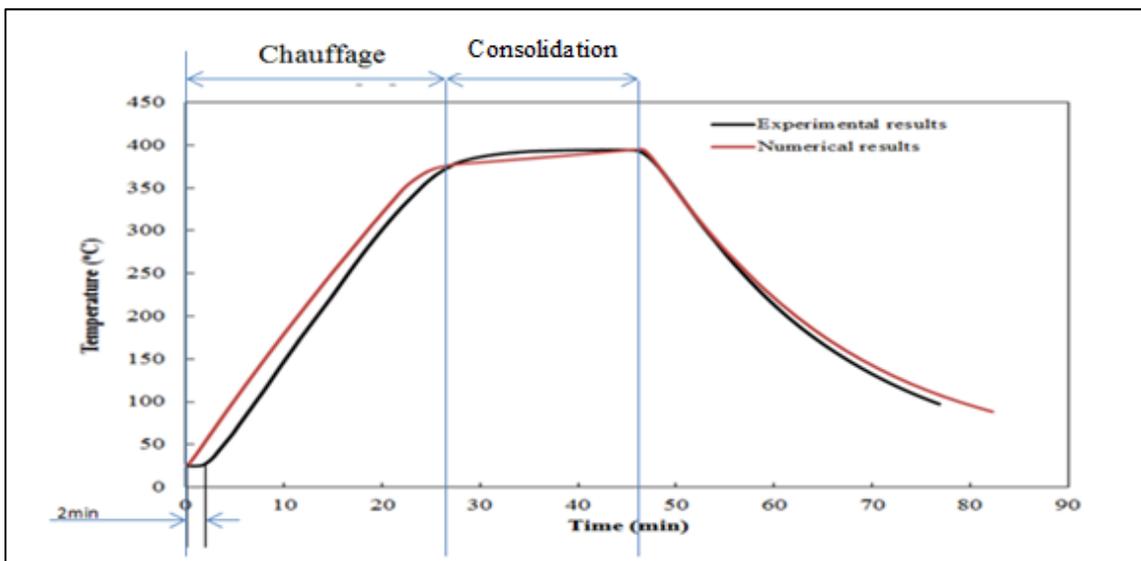


Figure 1.11 Comparaison entre les températures numériques et expérimentales à l'intérieur de la pièce en forme T (ROS) tirée de Wazziki (2015, p.7)

D'après la figure 1.11, on remarque que le modèle numérique a prédit presque la même température de chauffage, de consolidation et de refroidissement que le modèle expérimental avec une faible différence. Donc, les densités de puissance nécessaires appliquées aux cartouches de chauffage par l'équation 1.21 sont validées.

1.7.3 Limites des modèles existants

Dans la littérature, il n'y a pas beaucoup de modèle d'estimation du coût de l'énergie de chauffage du moulage par compression d'un composite thermoplastique puisqu'il s'agit d'une technique de fabrication récente.

Le modèle d'estimation d'Akermo et Astrom présenté précédemment est un modèle mathématique capable d'estimer le coût énergétique basé seulement sur l'intensité du courant de l'équipement. Cependant, ce modèle n'est pas capable de donner la puissance nécessaire pour chaque catégorie d'équipement.

La méthode de simulation numérique par COMSOL développé par Wazziki présenté précédemment est basée sur un modèle numérique 3D pour estimer la puissance de chauffage. Contrairement à la méthode de Akermo, cette méthode prend en considération la forme et les détails de conception de la pièce et du moule pour prédire le comportement thermique de la pièce. Mohamed El Wazziki a été limité dans son travail sur la prédiction de la puissance de chauffage des modèles virtuels par l'augmentation jusqu'à un facteur de deux du volume de la pièce (se servant de la fonction échelle du logiciel COMSOL).

Dans notre travail de recherche, nous explorerons la limite de la méthode de Mohamed El Wazziki en étudiant la puissance de chauffage pour des volumes de pièces avec leur moule correspondant augmenter par un facteur de plus que deux par la fonction échelle. En plus on étudiera l'effet d'augmentation de l'épaisseur de la pièce sans augmenter les dimensions des plateaux de chauffage sur la puissance de chauffage et finalement l'effet de la largeur de la pièce en augmentant la largeur des plateaux de chauffage en conséquence sur la puissance de chauffage.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

À partir d'un modèle expérimental existant dont les conditions de chauffage et de refroidissement sont connues et la qualité de la pièce est acceptable, nous avons développé, dans un premier temps un modèle numérique pour estimer la puissance de chauffage par le logiciel COMSOL. Dans un second temps, nous avons créé des modèles virtuels en augmentant soit l'épaisseur (unidirectionnelle), soit la largeur (bidirectionnelle) ou soit le volume (tri-directionnelle) du modèle numérique afin de prédire la puissance de chauffage des pièces non existantes (Figure 2.1).

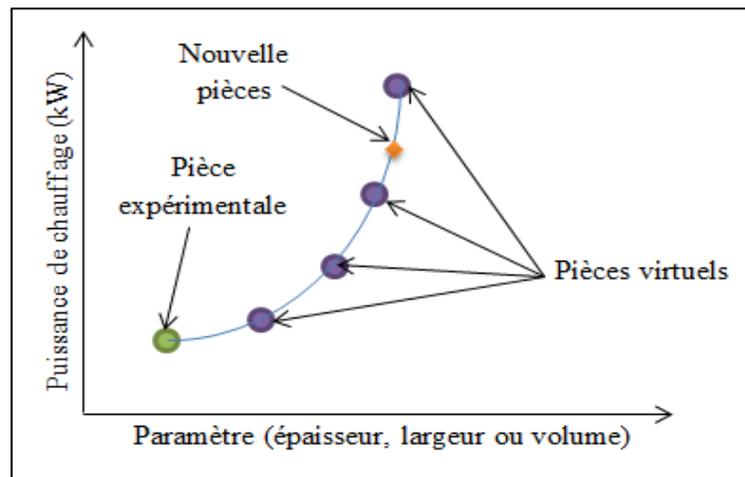


Figure 2.1 Méthodologie de travail

Dans ce chapitre, nous présenterons les modèles théoriques décrivant les pièces expérimentales, telles que la pièce en forme T, la pièce en forme L, la pièce concave et la plaque. Ces modèles, développés par les logiciels COMSOL ou CATIA, comportent les plateaux chauffants, le poinçon, la cavité et la pièce. Nous montrerons également les modèles de transfert de chaleur, dans l'ensemble du moule, décrivant le chauffage, la

consolidation et le refroidissement. Finalement nous présentons le processus d'augmentation de l'épaisseur, la largeur et le volume des pièces pour créer les pièces virtuelles.

2.1 Mécanisme de transfert de chaleur :

Les étapes de chauffage, de consolidation et de refroidissement des pièces ont été simulées dans la rubrique de transfert de chaleur transitoire du logiciel multi-physique COMSOL par la résolution de l'équation de transfert de chaleur (2.1) basé sur la méthode des éléments finis.

$$\rho_i c_{p_i} \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(K_i \nabla T) + Q_s \quad (2.1)$$

Où ρ_i , c_{p_i} , K_i et Q_s sont respectivement la densité des matériaux considérés ($i = \text{CF/PEEK}$, acier, isolant), la capacité thermique, la conductivité thermique, la température en kelvin et Q_s est la source de chauffage volumique (w/m^3).

2.1.1 Les pièces ROS:

Le mécanisme de transfert de chaleur, entre la pièce et les différents composants du moule durant le processus de chauffage, de consolidation et de refroidissement des pièces, est présenté dans la figure 2.2 sachant que l'ensemble du moule et de la pièce sont considérés comme des pièces isotropes.

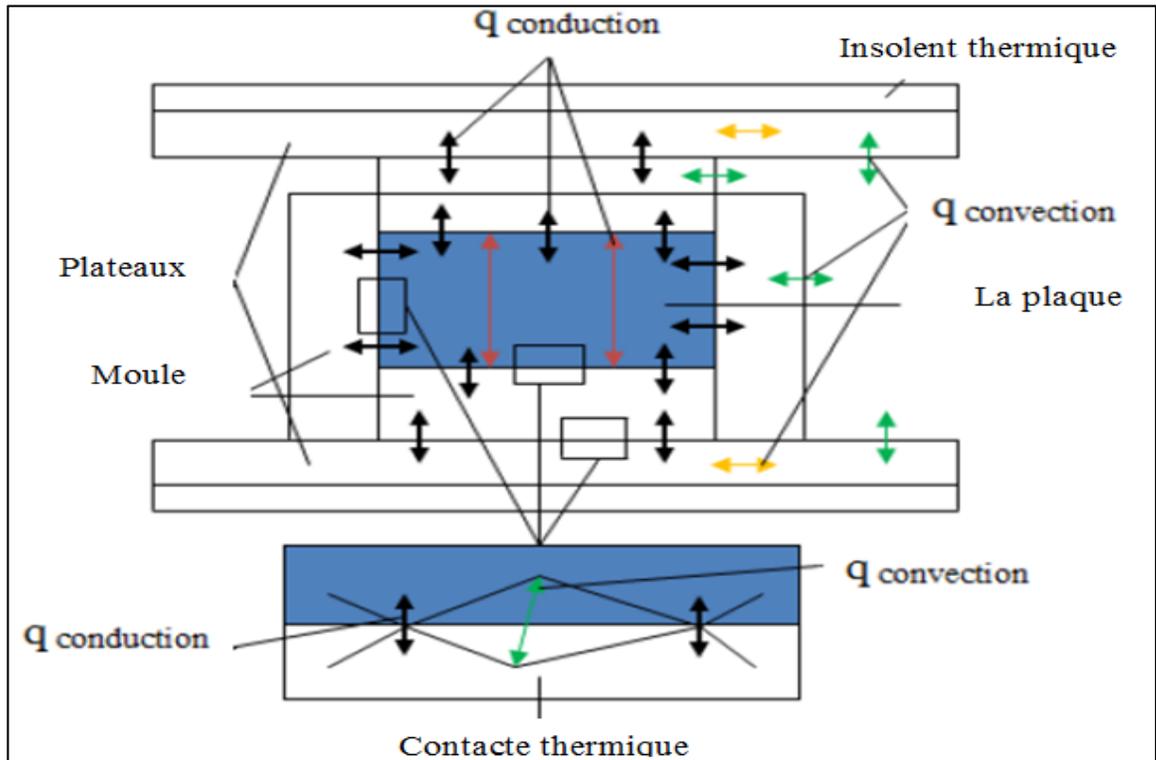


Figure 2.2 Mécanisme de transfert de chaleur pour les pièces ROS tiré de Wazziki (2016, p.30)

Les conditions aux limites sont:

1. La conduction dans les surfaces des tubes de chauffage est déterminée par la formule (2.2) sachant que le chauffage des plateaux est effectué par définition de la densité surfacique de puissance (q_0) dans les surfaces de chauffage (tubes de chauffage).

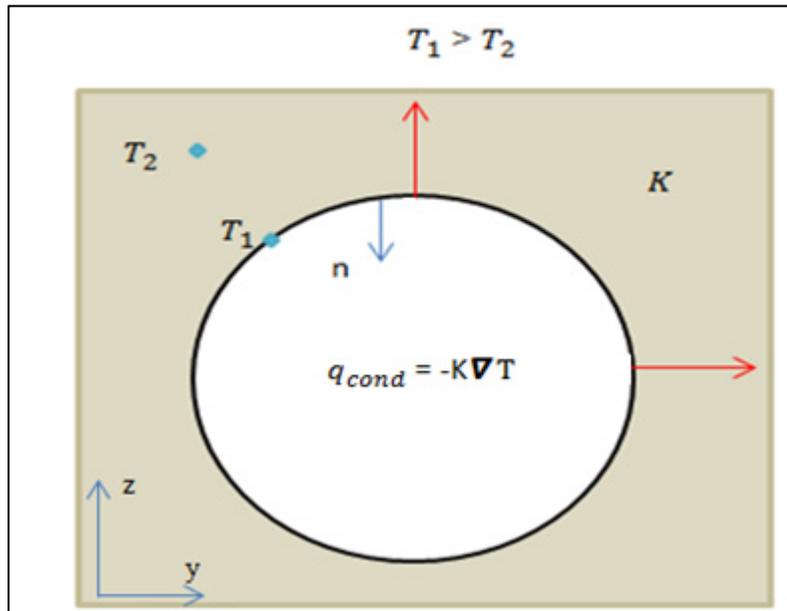


Figure 2.3 La conduction dans les tubes de chauffage

$$q_0 = -n \cdot (q_{cond}) = K \nabla T \quad (2.2)$$

q_0 est le flux de chaleur surfacique normal définie dans les tubes de chauffage.

n est le vecteur unitaire normal.

2. La convection externe de surfaces extérieures des plateaux de chauffage et du moule avec l'air ambiante est déterminée selon la formule 2.3.

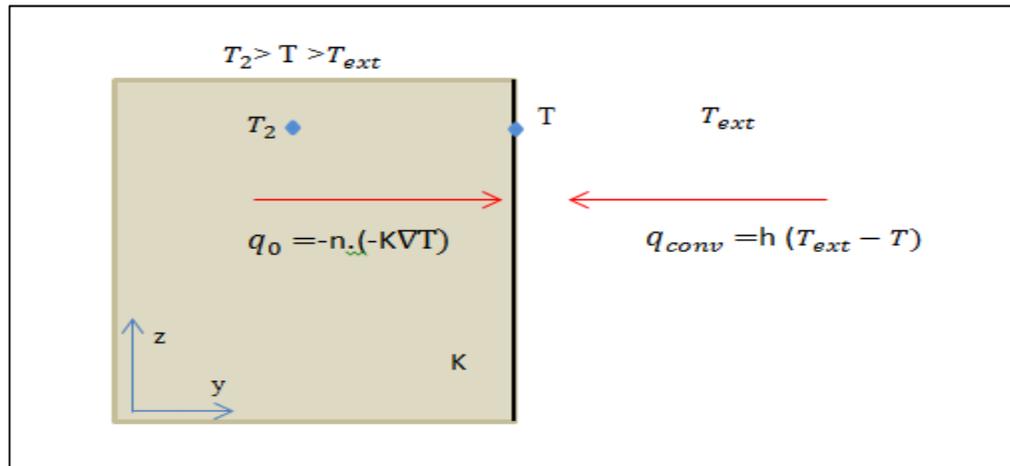


Figure 2.4 La convection des surfaces extérieures du moule

Au voisinage de la paroi : $q_0 = q_{conv}$

Donc :
$$-n \cdot (-K \nabla T) = h (T_{ext} - T) \quad (2.3)$$

Où T_{ext} est la température de l'air ambiante, h est le coefficient de convection thermique et q_{conv} étant le flux de chaleur surfacique entrant dans le domaine.

2.1.2 La pièce concave UD

Le mécanisme de transfert de chaleur entre la pièce, les radiateurs infrarouges et les surfaces intérieures du four durant le processus de chauffage de la pièce dans le four est présenté dans la figure 2.5, sachant que seulement la convection naturelle entre la pièce et l'air sera considéré.

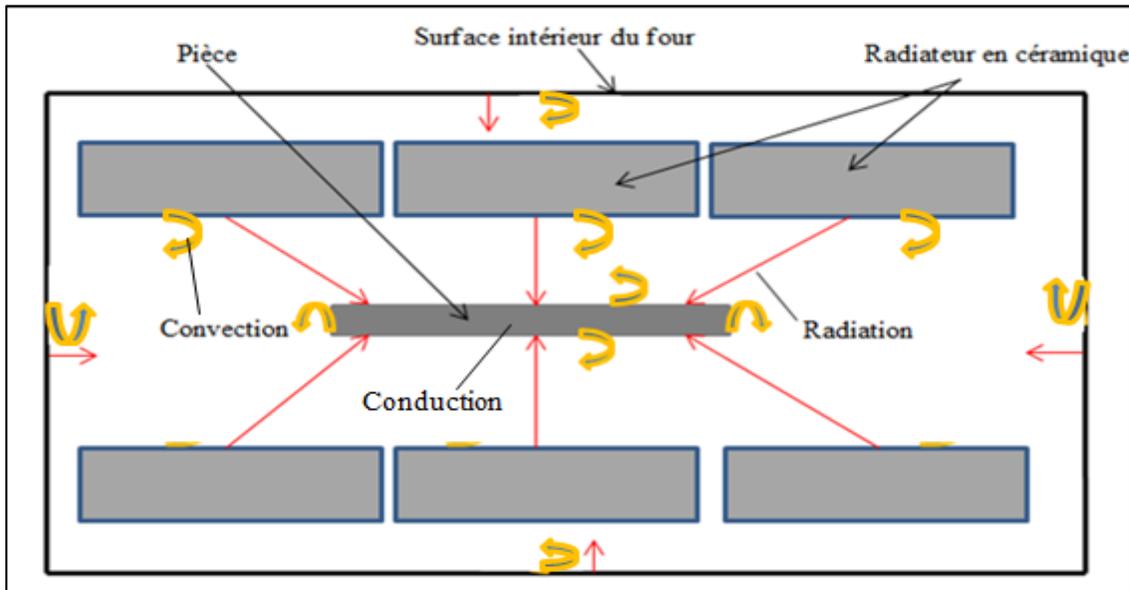


Figure 2.5 Mécanisme de transfert de chaleur pour la pièce UD

Le modèle développé (figure 2.5) considère la pièce UD soumise à un flux de chaleur incident uniforme émis par des radiateurs en céramique.

Les conditions aux limites des surfaces de la pièce sont:

1. La conduction dans les surfaces de radiateurs est déterminée par la formule (2.4) sachant que le chauffage de four est effectué par définition de la densité surfacique de puissance (q_0) dans les surfaces de chauffage (les radiateurs en céramique).

$$K\nabla T = q_0 \quad (2.4)$$

Avec q_0 le flux de chaleur surfacique normal

Afin de simplifier le problème, nous supposons que le flux de chaleur émis par les radiateurs en céramique est dans une direction unique à travers la pièce dans la direction z . La pièce est considérée isothermique, grise, diffuse et opaque avec une émissivité (ϵ) constante. Puisque les surfaces de la pièce sont opaques, la transmittivité est toujours nulle, par conséquent, seulement deux modes de propagation du rayonnement sont considérés: la réflexion et l'absorption.

2. La radiation et la convection dans les surfaces de la pièce UD peut être exprimée par les deux équations suivantes:

$$n(KVT) = \underbrace{h(T_{ext} - T)}_{\text{Convection}} + \underbrace{\varepsilon(G - \sigma T^4)}_{\text{Radiation}} \quad (2.4)$$

$$(1 - \varepsilon)G = J - \varepsilon\sigma T^4 \quad (2.5)$$

Où:

n est l'indice de réfraction du milieu transparent.

G est le flux de chaleur radiative entrant, (W / m^2).

J est le flux de chaleur radiative sortant, (W / m^2).

σ est la constante de Stefan-Boltzmann (constante physique prédéfinie égale à

ε est l'émissivité de surface, un nombre sans dimension dans l'intervalle $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

$5,670400 \cdot 10^{-8} W / (m^2 \cdot T^4)$).

2.2 Processus de simulation numérique par le logiciel COMSOL

2.2.1 Simulation des pièces ROS (la pièce en forme T, la pièce en forme L et la plaque)

Pour étudier la répartition de la température dans l'ensemble du moule et de la pièce, nous avons sélectionné l'étude dépendante du temps (figure 2.6).

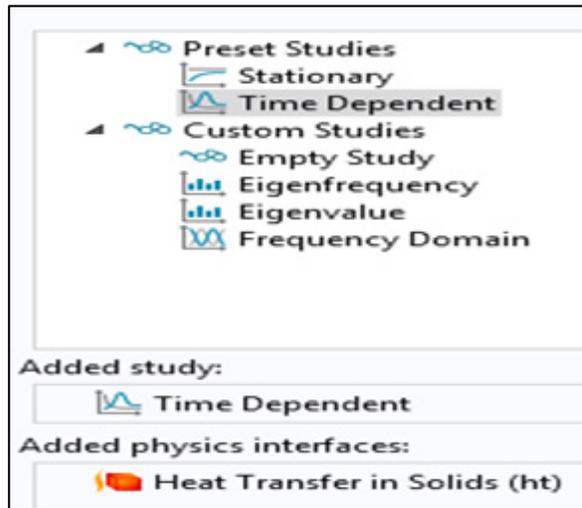


Figure 2.6 Domaine d'étude sélectionné dans le logiciel COMSOL

Les différentes étapes de simulation de chauffage et de consolidation des pièces ROS sont :

1. La définition de la géométrie du moule et de la pièce dans la rubrique géométrie du logiciel;
2. La définition des propriétés des matériaux de la pièce, du moule et de l'isolant dans la rubrique matériaux ;
3. La spécification des points de mesure de la température dans la rubrique définitions;
4. La spécification de la température initiale de l'ensemble du moule et de la pièce dans la rubrique valeurs initiales;
5. La spécification de la densité surfacique de puissance de chauffage et les surfaces de chauffage dans la rubrique flux de chaleur;
6. La spécification de la température de l'air, le coefficient de transfert de chaleur par convection et les surface en contact avec l'air dans la rubrique convection;
7. La définition de type et la taille de maillage dans la rubrique maillage;
8. La définition de temps de simulation dans la rubrique étude;
9. La résolution des équations de transfert de chaleur et l'affichage des résultats.

Sachant que :

- La valeur de la densité surfacique de puissance, le temps de simulation et la température initiale dépendent de la pièce étudiée.
- La température de chauffage maximale est de 380°C.

La densité surfacique de la puissance appliquée dans les tubes de chauffage pour l'étape de chauffage et l'étape de consolidation est fixée par l'équation (2.6) (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015):

$$\text{Densité de puissance 1} * (T < 380^\circ[\text{degC}]) + \text{densité de puissance 2} * (T > 380^\circ[\text{degC}]) \quad (2.6)$$

Cette équation de chauffage permet de stabiliser le chauffage à partir de 380 ° C pour avoir la période de consolidation.

La figure 2.7 démontre l'interface de transfert de chaleur du logiciel COMSOL pour la simulation de l'étape de chauffage et de consolidation de la pièce en forme T.

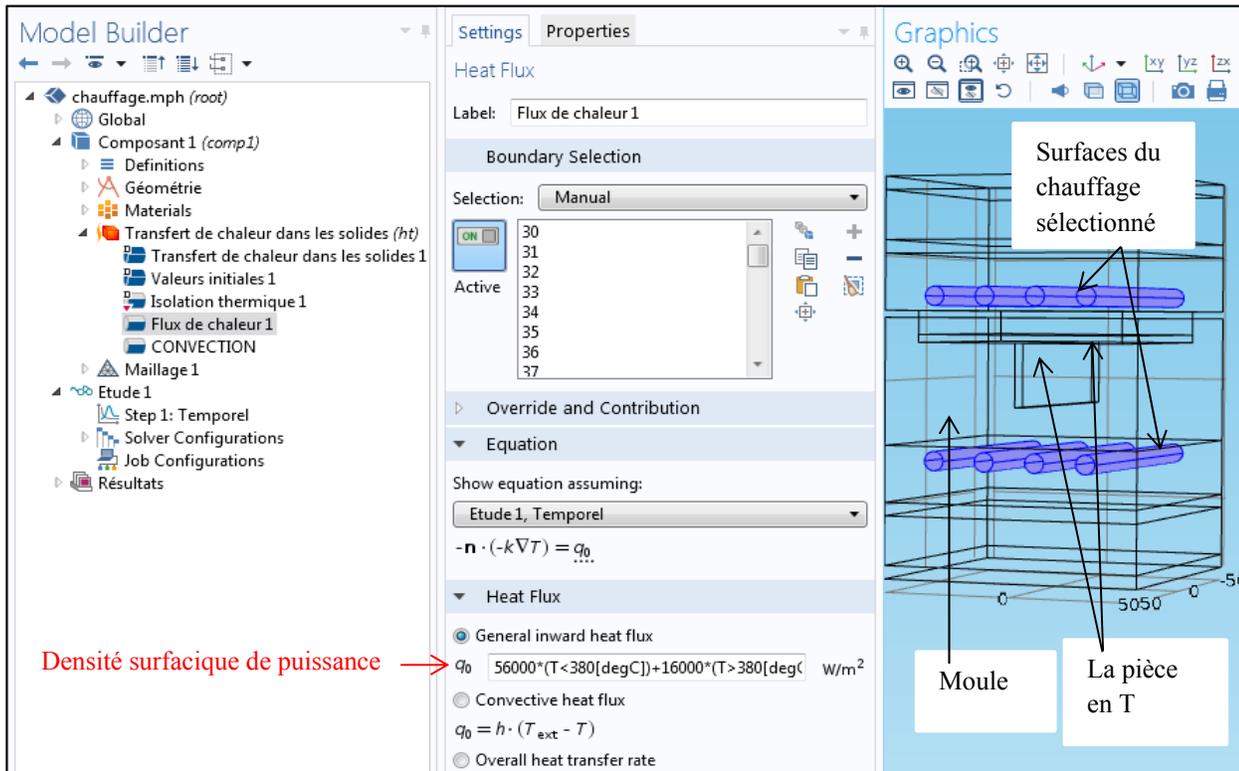


Figure 2.7 L'interface de chauffage et de consolidation de la pièce en forme T par le logiciel COMSOL

Les étapes de simulation de refroidissement sont les mêmes que les étapes de chauffage sauf que nous avons défini un fluide de refroidissement, au lieu de la densité surfacique de puissance, dans la section de convection forcée du logiciel en spécifiant également la vitesse et la température du fluide.

Sachant que :

-La température initiale de la pièce et du moule est de 380°C.

-La température et la vitesse de fluide de refroidissement sont considérées constantes.

2.2.2 Simulation de la pièce concave UD

Le processus de chauffage de la pièce concave UD est divisé en deux étapes :

La première étape consiste à chauffer le moule à vide (sans la pièce) avec la même méthode de simulation des pièces ROS jusqu'à une température de 364°C. La figure 2.8 démontre l'interface de transfert de chaleur du logiciel COMSOL pour la simulation de l'étape de chauffage du moule à vide.

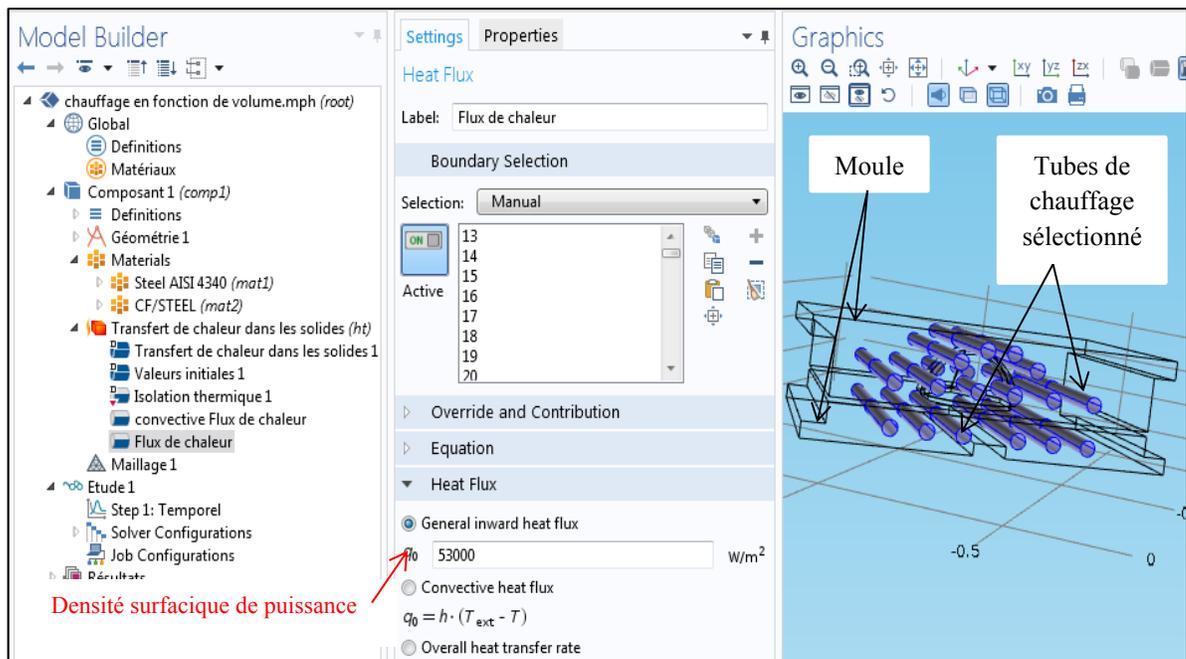


Figure 2.8 L'interface de chauffage du moule à vide par le logiciel COMSOL

La deuxième étape consiste à chauffer la pièce dans un four infrarouge. Pour simuler le transfert de chaleur par radiation entre les radiateurs du four, la pièce et les surfaces intérieures du four, nous avons sélectionné la rubrique: rayonnement de surface à surface en spécifiant le coefficient d'émissivité de chaque composant. Le flux incident émis par les éléments infrarouges ne sera pas complètement absorbé par la pièce, car il y a des flux qui réfléchiront sur les parois du four et sur la pièce qu'il faut prendre en considération dans le calcul.

Les figures 2.9, 2.10 et 2.11 démontrent les directions des flux de chaleur à l'intérieur du four.

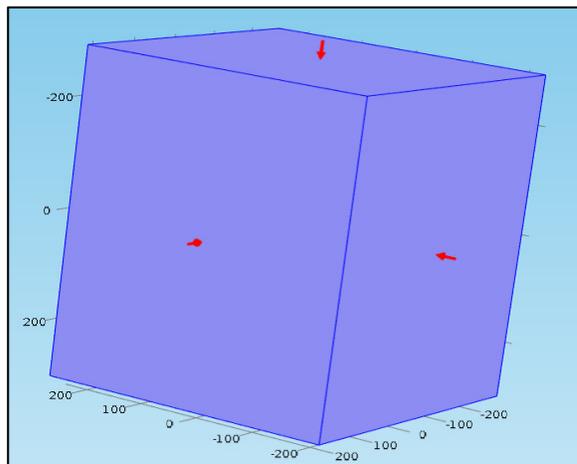


Figure 2.9 La réflexion des radiations sur les surfaces du four

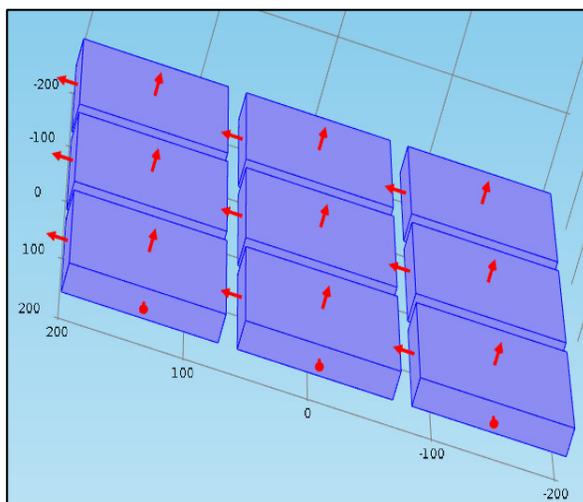


Figure 2.10 Les directions des radiations dans les éléments infrarouges

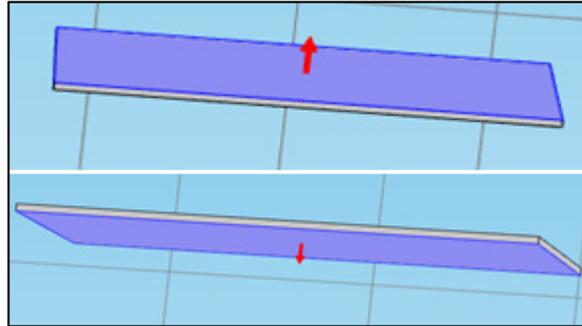


Figure 2.11 La réflexion des radiations sur les surface de la pièce

La quantité des flux de chaleur émise par les surfaces du four et la surface de la pièce dépend du coefficient d'émissivité (ϵ) qui varie entre 0 (si la totalité d'énergie est émise) et 1 (si la totalité de l'énergie est absorbée). Les valeurs de l'émissivité de l'ensemble du moule et de la pièce sont les suivantes : les radiateurs du four $\epsilon = 0.65$ (zirconium), la pièce en composite CF/PEEK $\epsilon = 0.9$ et les surfaces du four $\epsilon = 0.75$ (acier).

L'étude dépendante du temps a été sélectionnée pour étudier l'évolution de la température de la pièce en fonction de temps. La figure 2.12 démontre l'interface de transfert de chaleur par radiation du logiciel COMSOL pour la simulation de l'étape de chauffage de la pièce concave dans le four.

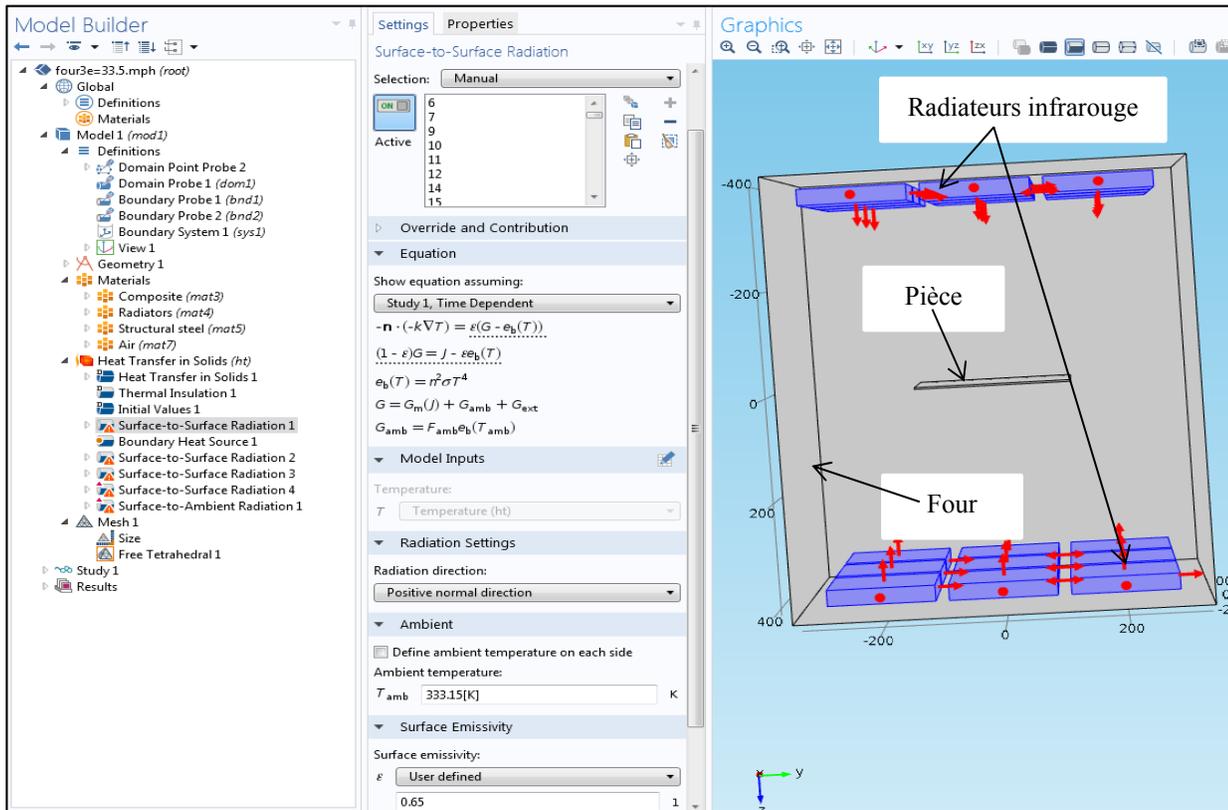


Figure 2.12 L'interface de chauffage de la pièce concave par le logiciel COMSOL

2.3 Points de mesure de température

Dans notre cas d'étude, on s'intéresse uniquement au point de mesure le plus éloigné de la source de chaleur car c'est le dernier point chauffé par le moule. Il a déjà été démontré par M. El Wazziki qu'il n'y a pas de différence de température entre les points de mesure appartenant au même plan. La figure 2.13 démontre la comparaison entre les températures expérimentales et les résultats numériques pour trois emplacements sur le plan milieu de la plaque ROS qui sont: centre (0,0,0); coin 1 (-160mm, 125mm, 0) et coin 2 (140mm, -120mm, 0).

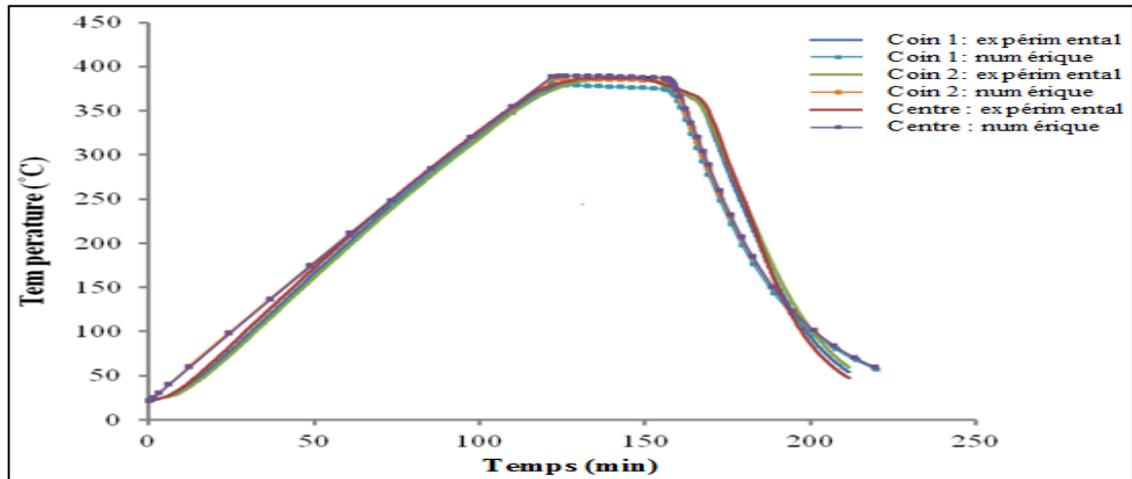


Figure 2.13 Comparaison entre les températures numériques et expérimentales pour 3 emplacements sur le plan milieu de la plaque ROS tirée de Wazziki (2014, p.228)

Pour l'étape de chauffage, l'étape de consolidation et l'étape de refroidissement, le point de mesure de la température des pièces est toujours placé au milieu de l'épaisseur de la pièce à une distance égale par rapport aux deux plateaux de chauffage. Les points de mesure de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme T, la pièce en forme L et la plaque sont présentés dans la figure 2.14.

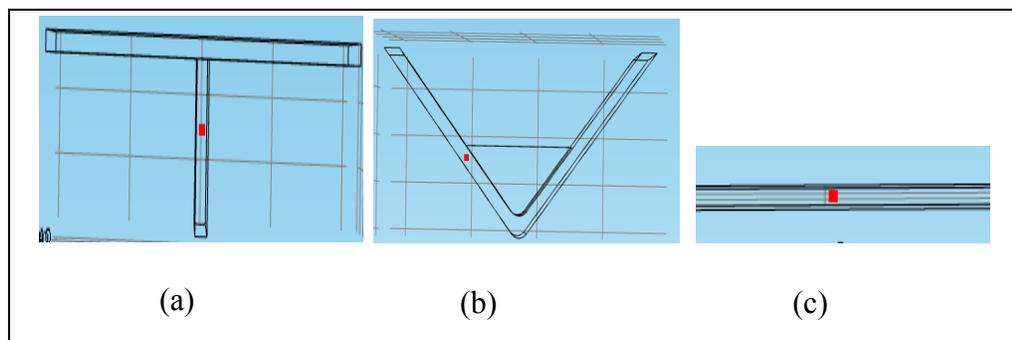


Figure 2.14: (a) point de mesure de la pièce en forme T ; (b) point de mesure de la pièce en forme L ; (c) point de mesure de la plaque

Le point de mesure de la température de chauffage pour la pièce concave est différent du point de mesure de refroidissement car cette pièce est chauffée dans le four sous la forme d'une plaque ensuite refroidie dans le moule sous la forme concave. La figure 2.15 démontre le point de mesure de chauffage et de refroidissement de la pièce concave.

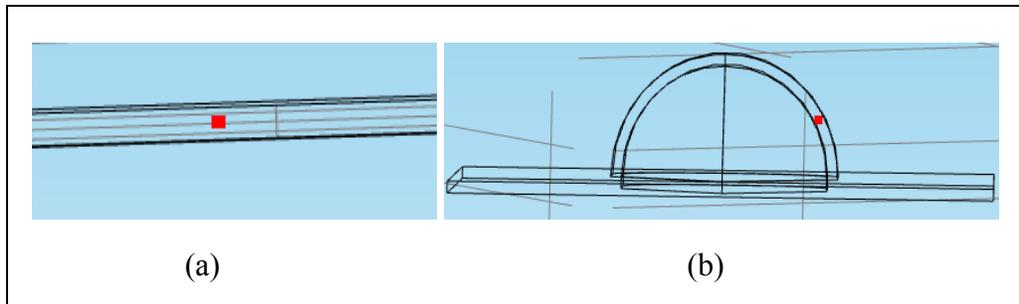


Figure 2.15 : (a) point de mesure de chauffage de la pièce concave ; (b) point de mesure de refroidissement de la pièce concave.

2.4 Matériaux

Les deux principaux matériaux utilisés dans cette étude sont : l'acier pour tout l'ensemble du moule (plateaux chauffants, poinçon, cavité) et le composite thermoplastique renforcé par des fibres de carbone CF/PEEK qui a une teneur en volume de fibres d'environ 60% pour toutes les pièces (la pièce en forme T, la pièce en forme L, la plaque et la pièce concave). Le PEEK est un polymère thermoplastique semi-cristallin qui appartient à la famille des polyaryléthercétones (PAEK). Le taux de cristallinité varie généralement entre 13% et 44%. Les propriétés mécaniques de PEEK en traction et en flexion sont très élevées avec une excellente résistance à la fatigue. Les propriétés thermiques des matériaux utilisés sont présentées dans le tableau 2.1.

Tableau 2.1 Matériaux utilisée

Pièces	Matériaux	
	Expérimentale	Simulation
Pièce en forme T	Composite thermoplastique à fibres courtes CF/PEEK découpé manuellement ou automatiquement à partir d'un bloc et placé manuellement dans le moule (ROS).	Pièce homogène avec : $\rho=1540\text{Kg}/\text{m}^3$ $C_p=1320\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ $K=0.75\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (A. Levy, 2014)
Pièce en forme L		
Plaque		
Pièce concave	Composite thermoplastique CF/PEEK renforcé par des fibres continues unidirectionnelles (UD)	
Moule	Acier trempé P20 avec : $\rho=7850\text{Kg}/\text{m}^3$, $C_p=475\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $K=44.5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	
Four		
Les radiateurs en céramique	$\rho=6000\text{Kg}/\text{m}^3$; $C_p=550\text{J}\cdot\text{Kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$; $K=2.5\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$	

2.5 Modèles numériques étudiés

Les modèles choisis pour étudier l'effet des paramètres géométriques des pièces sur la puissance de chauffage sont : une plaque, une pièce en forme T, une pièce en forme L fabriquée à l'université McGill de Montréal et une pièce concave fabriquée à université du Québec à Trois-Rivières. Le choix de ces 4 pièces est principalement dû aux 3 raisons suivantes :

1. La connaissance du cycle de fabrication expérimentale et les conditions de chauffage ce qui nous permet de valider nos résultats de simulation.

2. La différence de forme entre les pièces ROS (la plaque, la pièce en forme T et la pièce en forme L) nous permet d'étudier l'effet de la forme de la pièce sur la puissance de chauffage.
3. La différence entre le processus de chauffage des pièces ROS et la pièce UD (pièce concave) nous permet de comparer les deux processus.

2.5.1 Modèle de la plaque

Le modèle de la plaque est composé de deux plateaux métalliques de dimension 914.4mm x914.4mm x50.8mm, un cadre de 482.6mm x431.8mm x24.4mm, les deux plaques de moule de 355.6mm x304.8mm x24.4mm et la plaque de 355.6mm x304.8mm x6mm (figure 2.14). Ces composants ont été considérés comme des blocs solides en contact. Le modèle comprenait également 32 cartouches cylindriques de chauffage dans les deux plateaux d'un diamètre de 10mm et d'une longueur de 914.4mm. Ce modèle est caractérisé par la simplicité de fabrication de ces composantes et la grande taille des plateaux chauffants par rapport à la pièce.

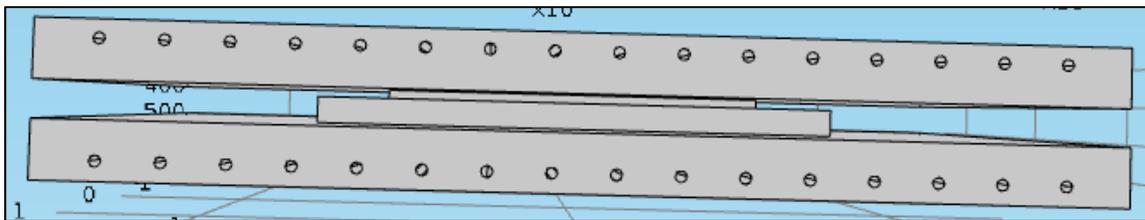


Figure 2.16 Modèle de chauffage de la plaque

Le modèle de refroidissement est presque le même que le modèle de chauffage sauf qu'on a utilisé 42 canaux de refroidissement. La figure 2.17 démontre le modèle numérique de refroidissement de la plaque :

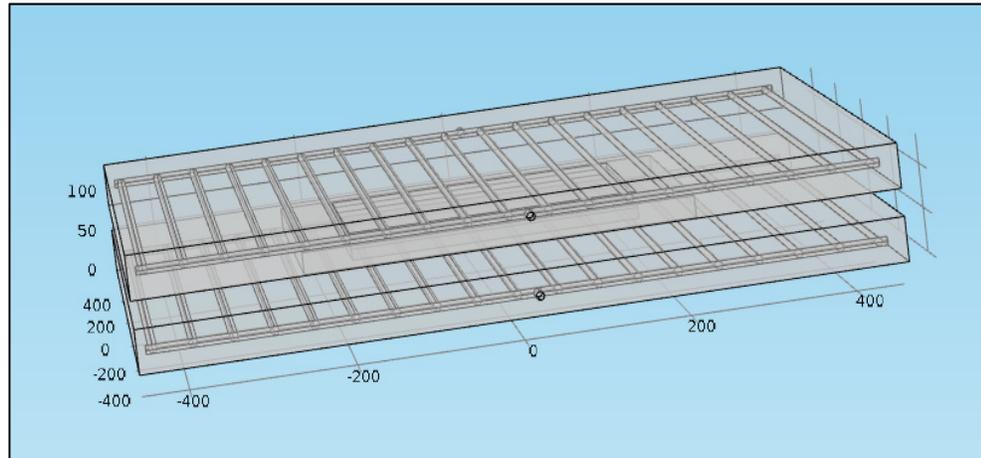


Figure 2.17 Le modèle de refroidissement de la plaque

Dans ce modèle, il n'y a qu'une seule entrée pour le fluide de refroidissement dans chaque plateau pour éviter l'entassement des cartouches de chauffage et de refroidissement.

2.5.2 Modèle de la pièce en forme T

Le moule de la pièce en forme T est composé de deux plateaux chauffants de dimension 101.6mm x101.6mm x22.62mm, un poinçon 82.44mm x82.44mm x26.5mm, une cavité 101.6mm x101.6mm x50.8mm, deux isolants 101.6mm x101.6mm x19.74mm quatre plaques métalliques 101.6mm x101.6mm x5.36mm et quatre tubes de chauffage dans chaque plateau d'un diamètre de 7.668mm et d'une longueur de 101.6mm. La pièce en forme T est constituée de deux parties, soit une bride de 82.44mm x3.17mm x25.4mm et une nervure de 82.44mm x82.44mm x3.17mm. Le point de mesure de température est placé sur le plan moyen de la pièce à une distance égale par rapport aux deux plateaux de chauffage de 33mm.

La figure 2.18 démontre le modèle de chauffage du moule et de la pièce en forme T.

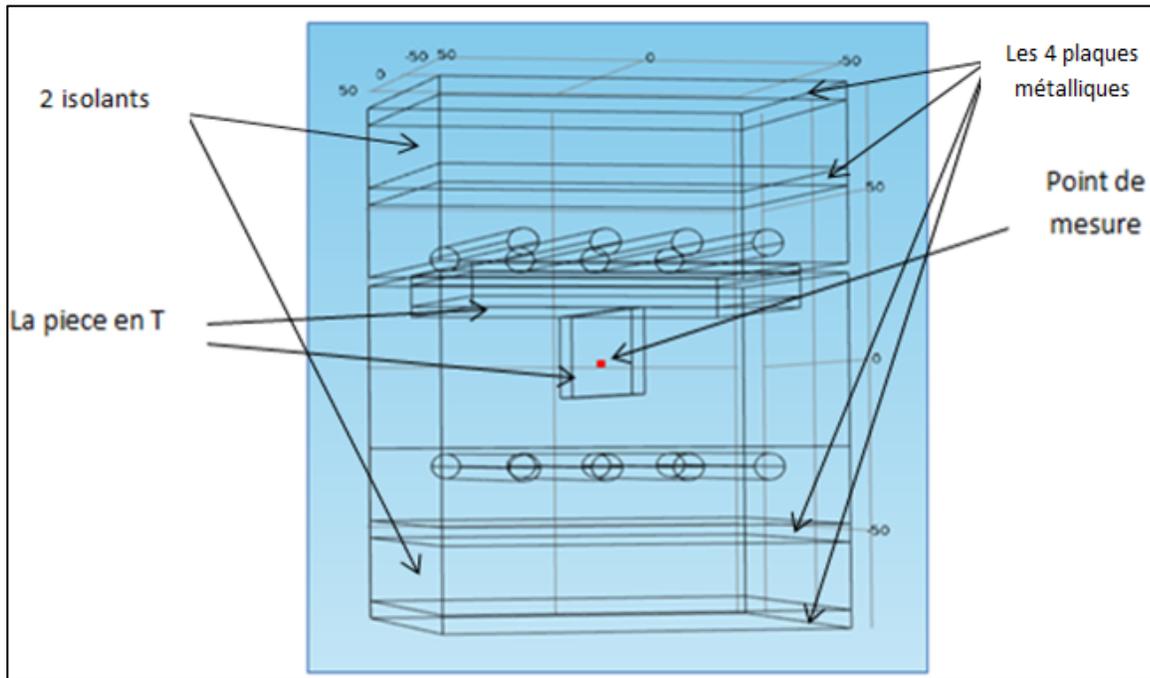


Figure 2.18 Le modèle de chauffage de la pièce en forme T

Le refroidissement se fait par le même modèle, mais avec 3 tubes de refroidissement au lieu de 4 par plateau. Le tableau 2.2 représente les propriétés thermiques de l'isolant.

Tableau 2.2 Propriétés thermiques de l'isolant

Propriétés	Valeur	Unité
Conductivité thermique	0.04	W/(m.K)
Densité	25	kg/m ³
Capacité thermique	840	J/(kg.K)

2.5.3 Modèle de la pièce en forme L

Les propriétés géométriques et la structure générale du moule sont les mêmes que pour la pièce en forme T présentée précédemment sauf le poinçon. Les propriétés géométriques de la pièce en forme L sont présentées dans la figure 2.19.

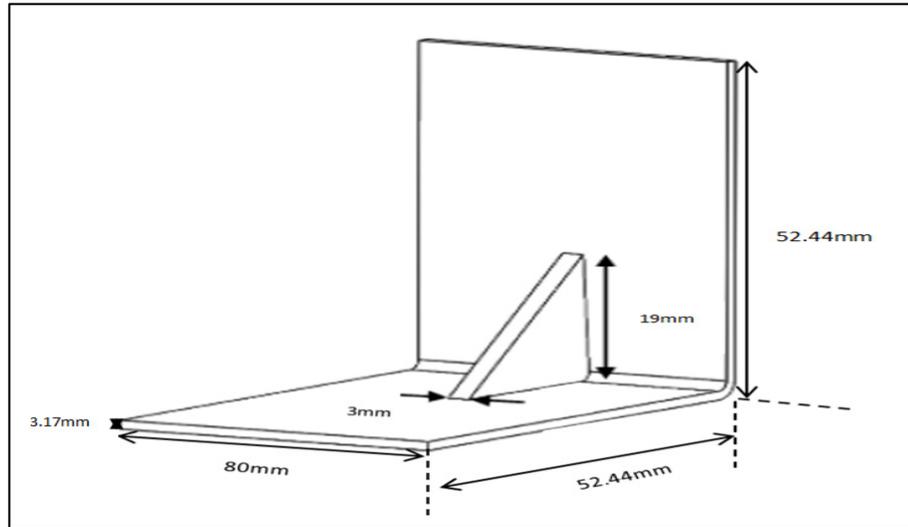


Figure 2.19 Les propriétés géométriques de la pièce en forme L

Les propriétés géométriques du poinçon du moule sont présentées dans la figure 2.20.

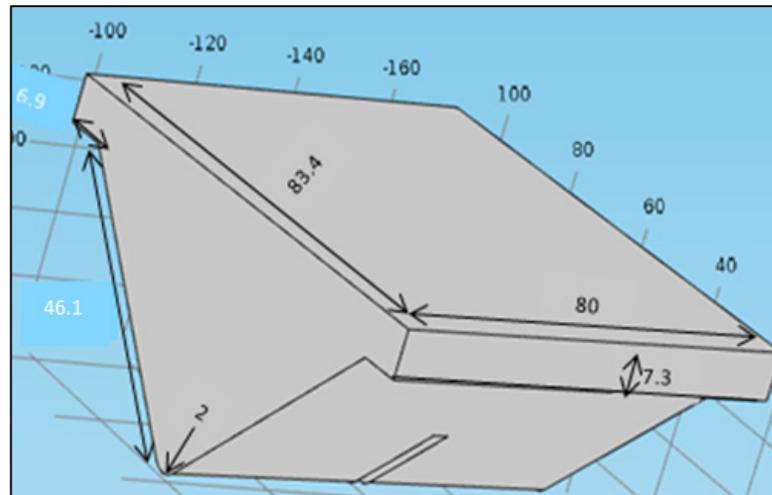


Figure 2.20 Les propriétés géométriques du poinçon en mm

La position de la pièce dans le moule est démontrée dans la figure 2.21.

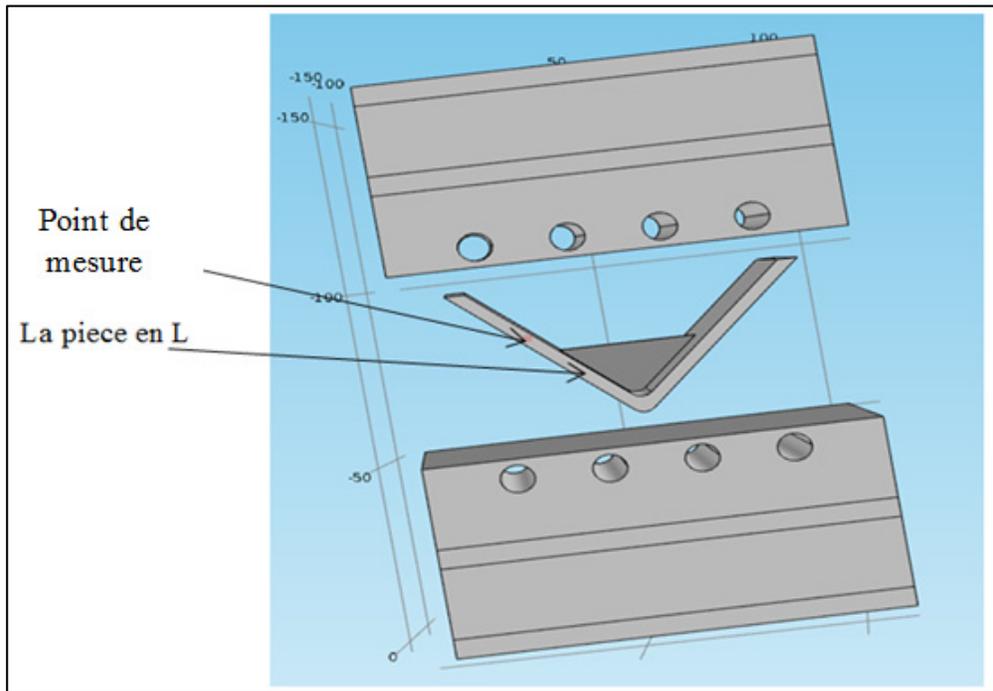


Figure 2.21 La position de la pièce en forme L par rapport aux plateaux chauffants (poinçon et cavité non représentée dans cette figure)

Pour la pièce en forme T et la pièce en forme L la même conception du moule incluant son volume, et son matériau furent utilisés. Le modèle de refroidissement est le même que le modèle de chauffage sauf qu'il y a 3 tubes de refroidissement au lieu de 4 par plateau.

2.5.4 Modèle de la pièce en forme concave

La pièce concave est la plus compliquée géométriquement par rapport aux autres pièces. Elle se compose d'un quart de sphère d'un diamètre de 84.2mm, une moitié de cylindre de même diamètre et d'une longueur de 50.8mm et deux surfaces inclinées formant une moitié de pyramide. La figure 2.22 représente la forme et les dimensions de la pièce concave.

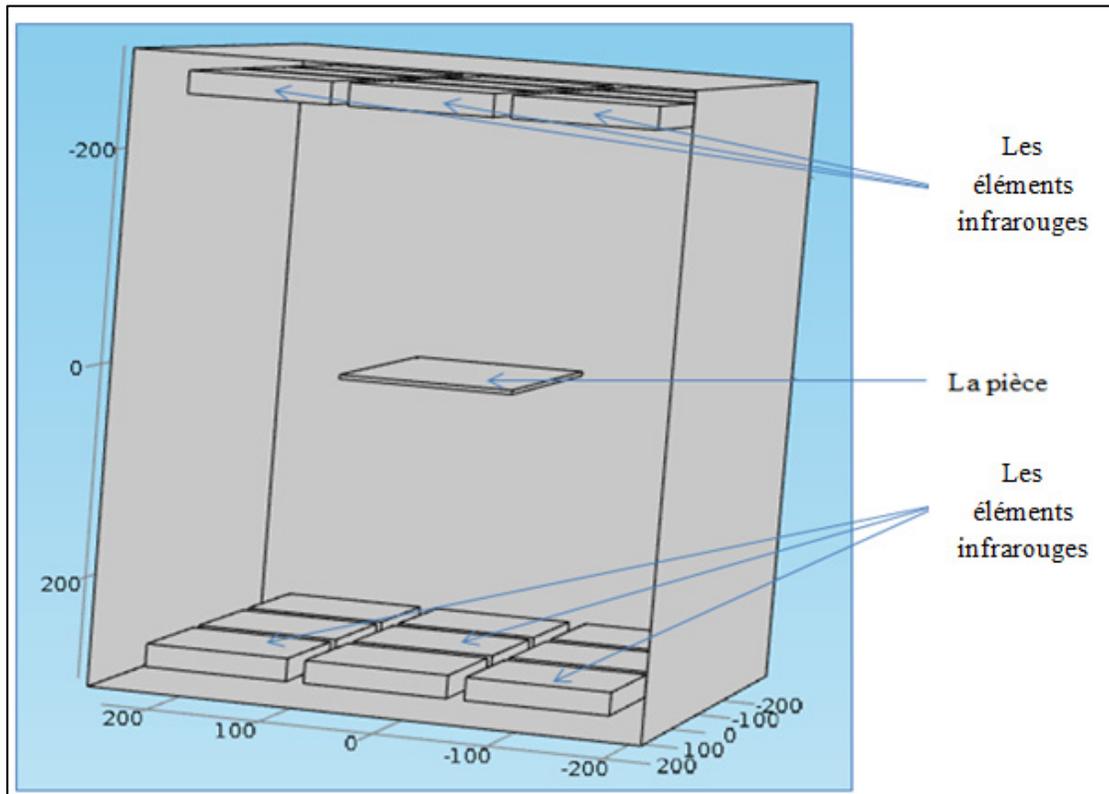


Figure 2.23 Le modèle de chauffage de la pièce dans le four

Le modèle de chauffage du moule contient 32 tubes de chauffage de 150mm de longueur et 12,7mm de diamètre. La répartition des tubes de chauffage dans le moule (figure 2.24) assure un chauffage uniforme des surfaces du moule en contact avec la pièce.

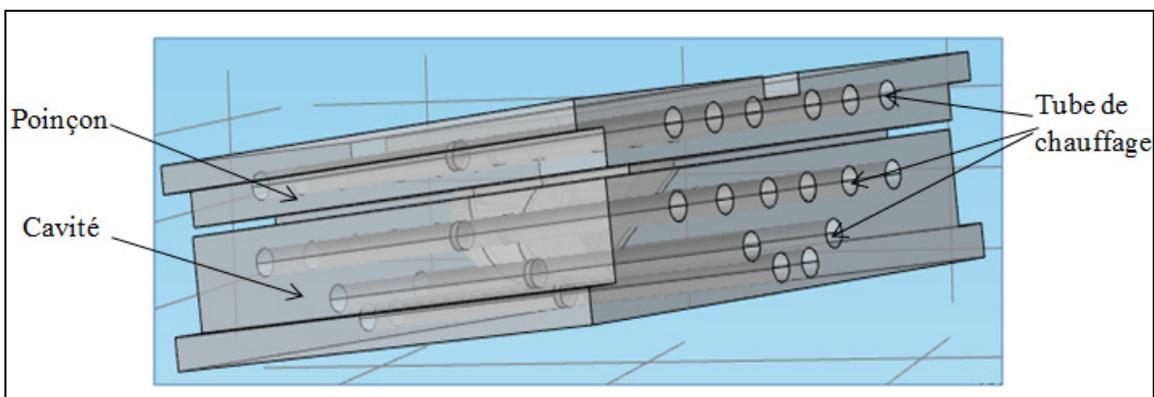


Figure 2.24 La moule de la pièce concave

2.6 Maillage

Les géométries du moule et de la pièce ont été maillées avec des éléments tétraédriques tridimensionnels de tailles fines, générées automatiquement par le logiciel COMSOL. Chaque élément contient quatre nœuds dont la taille minimale et maximale des éléments de maillage dépend de la taille du moule et de la pièce sachant que chaque nœud n'a qu'un seul degré de liberté qui est la température. La figure 2.25 représente un élément tétraédrique typique tridimensionnel avec quatre nœuds.

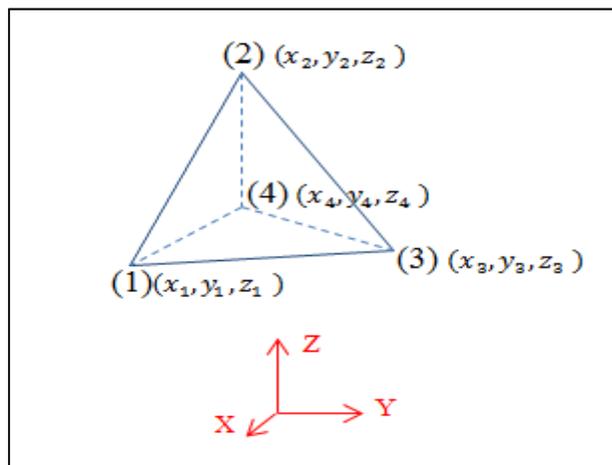


Figure 2.25 Élément de maillage tétraédrique

Le nombre d'éléments de maillage des modèles étudiés est le suivant:

1. Pour la plaque, le modèle de chauffage est maillé avec 431461 éléments tétraédriques, 87986 éléments triangulaires et 14724 éléments de bordures. Les éléments de maillage du modèle de refroidissement est de 582888 éléments tétraédriques, 78429 éléments triangulaires et 20104 éléments de bordures. La figure 2.26 démontre le maillage tétraédrique du modèle de chauffage de la plaque.

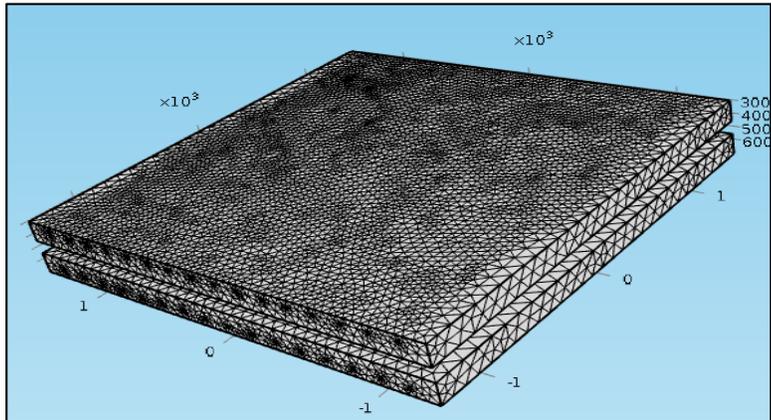


Figure 2.26 Le maillage de la plaque

2. Pour la pièce en forme T, le modèle de chauffage est maillé avec 153306 éléments tétraédriques, 26330 éléments triangulaires et 2938 éléments de bordures. Les éléments de maillage du modèle de refroidissement est de 127874 éléments tétraédriques, 21530 éléments triangulaires et 2434 éléments de bordures. La figure 2.27 démontre le maillage du modèle de chauffage de la pièce en forme T.

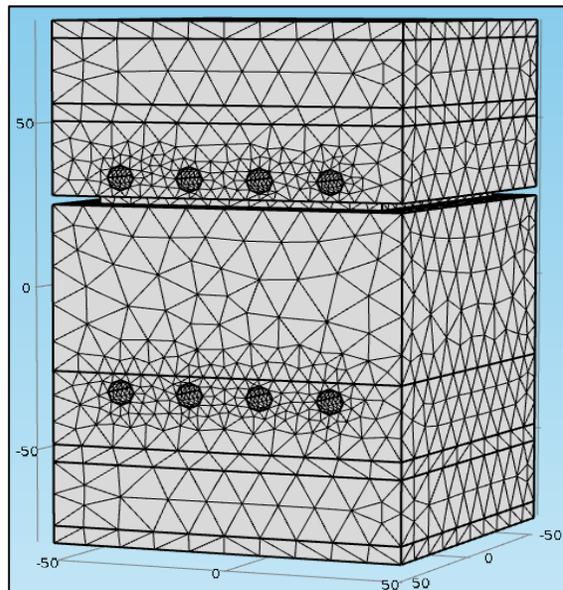


Figure 2.27 Le maillage du moule de la pièce en forme T

3. Pour la pièce en forme L, le modèle de chauffage est maillé avec 174142 éléments tétraédriques, 15252 éléments triangulaires et 2378 éléments de bordures. Les éléments de maillage du modèle de refroidissement sont de 153044 éléments tétraédriques, 14150 éléments triangulaires et 2536 éléments de bordures.
4. Pour la pièce concave, le modèle de chauffage de la pièce dans le four est maillé avec 90237 éléments tétraédriques, 14434 éléments triangulaires et 1334 éléments de bordures. La figure 2.28 démontre le maillage du modèle de chauffage de la pièce concave dans le four.

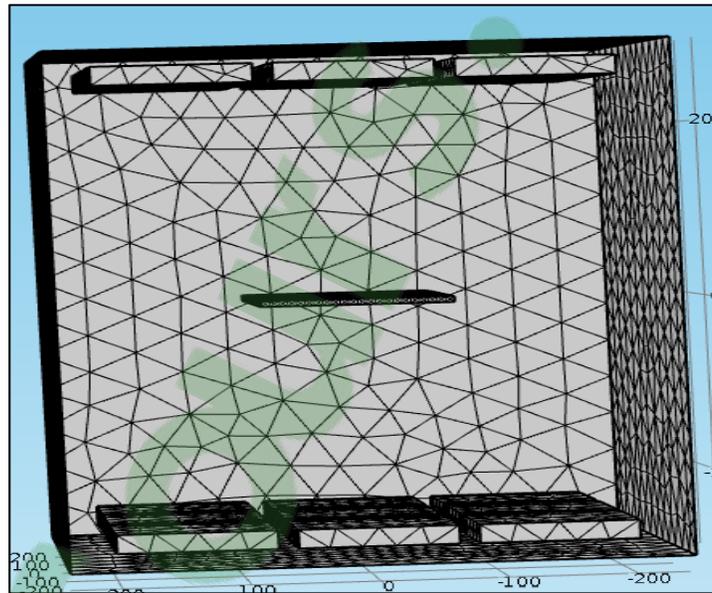


Figure 2.28 Le maillage la pièce concave dans le four

Les éléments de maillage du modèle de refroidissement de la pièce concave dans le moule sont de 248601 éléments tétraédriques, 85770 éléments triangulaires et 12290 éléments de bordures. La figure 2.29 démontre le maillage du modèle de refroidissement de la pièce concave dans le moule.

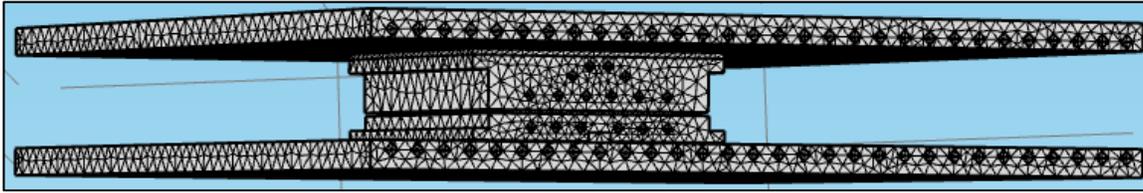


Figure 2.29 Le maillage la pièce concave dans le moule

2.7 Paramètres d'étude

Les trois paramètres étudiés dans ce travail de recherche sont :

1. **VOLUME** : Pour l'augmentation du volume des pièces nous avons utilisé la méthode de Mohamed el Wazziki en augmentant la taille de l'ensemble du moule et de la pièce par la fonction échelle du logiciel COMSOL.
2. **ÉPAISSEUR** : Pour augmenter l'épaisseur nous n'avons pas toujours besoin d'augmenter la taille du moule, nous effectuons seulement les changements nécessaires par le logiciel CATIA pour que la nouvelle pièce soit bien contenue par le moule.
3. **LARGEUR** : Pour augmenter la largeur des pièces, il faut également augmenter la largeur du moule et ajouter des tubes chauffage pour assurer une bonne répartition de température dans toute la pièce.

2.7.1 Étude de l'effet de l'épaisseur des pièces sur la puissance de chauffage

2.7.1.1 Processus de simulation de l'effet de l'épaisseur de la plaque

L'étude de l'effet de l'épaisseur sur le cycle de chauffage consiste à simuler la pièce en augmentant seulement son épaisseur et le cadre du moule pour s'adapter à la dimension de la pièce tout en gardant les mêmes conditions de chauffage et le même temps de chauffage.

La figure 2.30 représente le modèle de chauffage de la plaque pour 5 fois de plus l'épaisseur initiale.

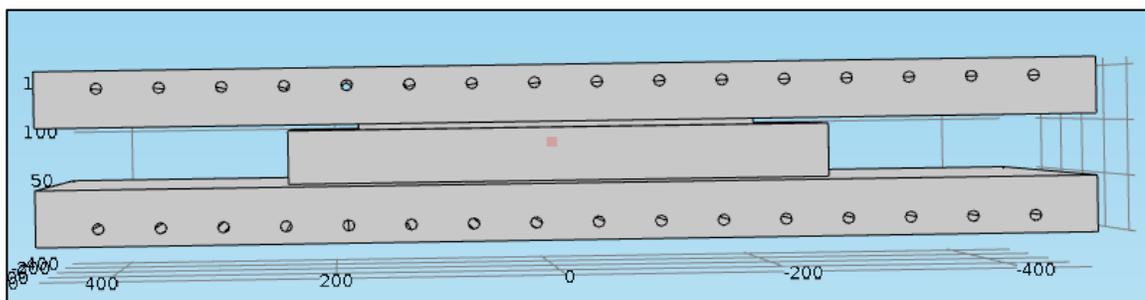


Figure 2.30 Le modèle de chauffage de la plaque 5 fois plus épaisse

Pour déterminer la puissance de chauffage nécessaire pour fabriquer une pièce plus épaisse, on compare le cycle de chauffage de la pièce à son épaisseur initiale avec le cycle de chauffage de la pièce plus épaisse. Si le profil de chauffage de la pièce épaisse est plus long, alors on augmente la puissance jusqu'à ce que la température de chauffage de la pièce plus épaisse atteigne la même température de chauffage que pour la pièce d'épaisseur initiale dans la même durée de chauffage. Le tableau 2.3 démontre les 6 épaisseurs étudiées en fonction de surface de chauffage.

Tableau 2.3 Les 6 épaisseurs étudiées de la plaque

Épaisseurs (mm)	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
6	0.895
12	0.895
30	0.895
42	0.895
60	0.895
90	0.895

2.7.1.2 Processus de simulation de l'effet de l'épaisseur de la pièce en forme T

Pour la pièce en forme T, l'étude de l'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage consiste à simuler la pièce en augmentant seulement son épaisseur jusqu'à un facteur de 10 fois plus sans modifier les géométries du moule tout en gardant les mêmes conditions initiales de chauffage et le même temps de chauffage. La figure 2.31 représente le modèle de chauffage de la pièce en forme T pour 10 fois plus l'épaisseur de la pièce initiale.

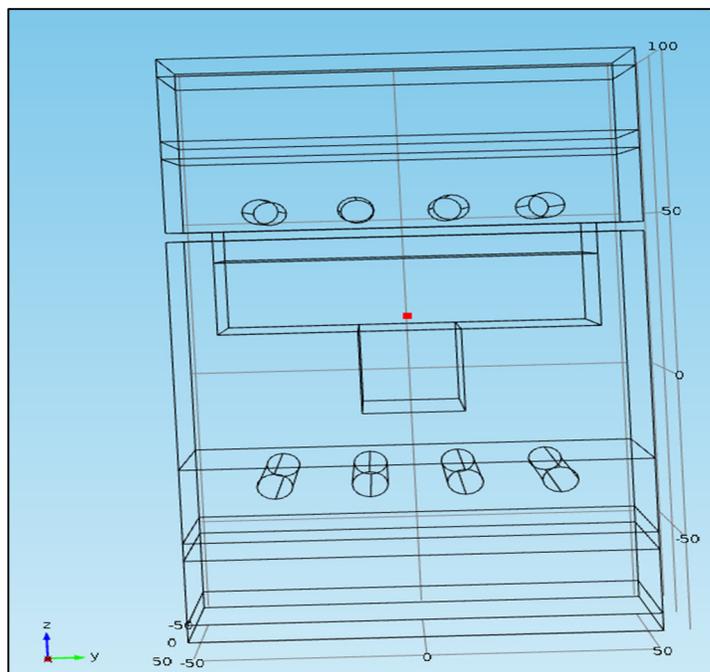


Figure 2.31 Le modèle de chauffage de la pièce en forme T 10 fois plus épaisse

Les 5 épaisseurs étudiées pour déterminer la fonction de variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce sont présentés dans le tableau 2.4

Tableau 2.4 Les 6 épaisseurs étudiées de la pièce en forme T

Épaisseurs (mm)	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
3.17	0.0195
6.34	0.0195
15.85	0.0195
22.19	0.0195
31.17	0.0195

2.7.1.3 Processus simulation de l'effet de l'épaisseur de la pièce en forme L

Pour étudier l'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage, nous avons augmenté l'épaisseur de la pièce 4 fois de plus sans changer la taille du moule, mais 6 fois de plus et 10 fois plus avec augmentation de la taille du moule et le nombre de tubes chauffants pour contenir la pièce. Le modèle de chauffage de la pièce en forme L pour 10 fois de plus l'épaisseur de la pièce est représentée dans la figure 2.32.

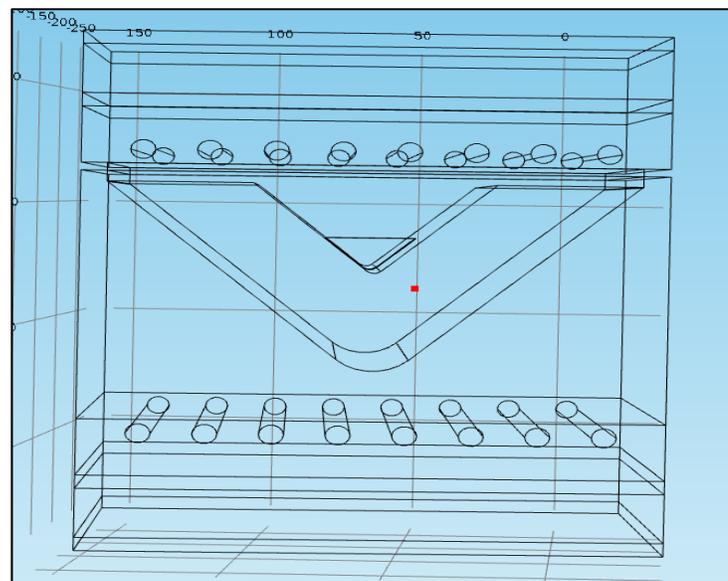


Figure 2.32 Le modèle de chauffage de la pièce en forme L 6 fois plus épaisse

Les 4 épaisseurs étudiées pour déterminer l'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage de la pièce en forme L sont présentés dans le tableau 2.5.

Tableau 2.5 Les 4 épaisseurs étudiées de la pièce en forme L

Épaisseurs (mm)	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
3.17	0.1945
12.68	0.1945
19	0.04308
31.7	0.0688

La largeur du moule est augmentée à 150mm x 150mm avec 6 tubes chauffants par plateau au lieu de 4 pour une épaisseur de la pièce de 19mm. Pour une épaisseur de la pièce 31.7mm la largeur du moule est augmentée à 180 mm x 180 mm avec 8 tubes de chauffage au lieu de 4.

2.7.1.4 Processus de simulation de l'effet de l'épaisseur de la pièce concave

Pour la pièce concave, l'étude de l'effet de l'épaisseur sur le cycle de chauffage consiste à simuler la pièce en augmentant seulement son épaisseur dans le même four en gardant toujours les mêmes conditions de chauffage, les mêmes dimensions du moule et le même temps de chauffage. La figure 2.33 représente le modèle de chauffage de la pièce concave dans le four pour une épaisseur 10 fois de plus que celle de la pièce initiale.

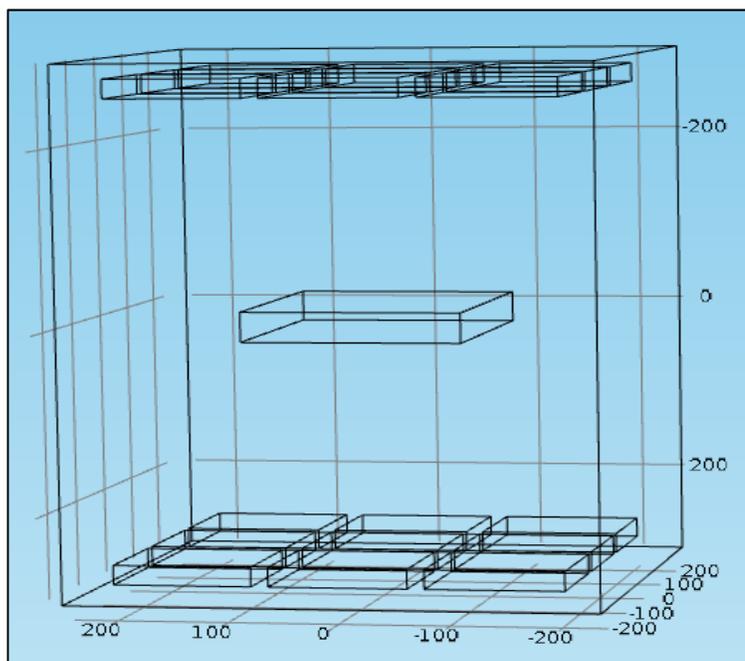


Figure 2.33 Le modèle de chauffage de la pièce concave 10 fois plus épaisse

Les 5 épaisseurs étudiées sont présentées dans le tableau 2.6.

Tableau 2.6 Les 5 épaisseurs étudiées de la pièce concave

Épaisseur (mm)	Surface des radiateurs de chauffage (m^2)
3.35	0.4748
6.7	0.4748
10.7	0.4748
16.75	0.4748
33.5	0.4748

2.7.2 Étude de l'effet du volume des pièces sur la puissance de chauffage

2.7.2.1 Processus de simulation de l'effet du volume de la plaque sur la puissance de chauffage

Pour étudier l'effet du volume de la plaque sur la puissance de chauffage, nous avons augmenté la taille de l'ensemble du moule et de la pièce en multipliant toutes les dimensions par le même facteur d'augmentation en utilisant la rubrique échelle du logiciel COMSOL.

La figure 2.34 représente le modèle de chauffage de la plaque pour 27 fois plus le volume initial de la plaque.

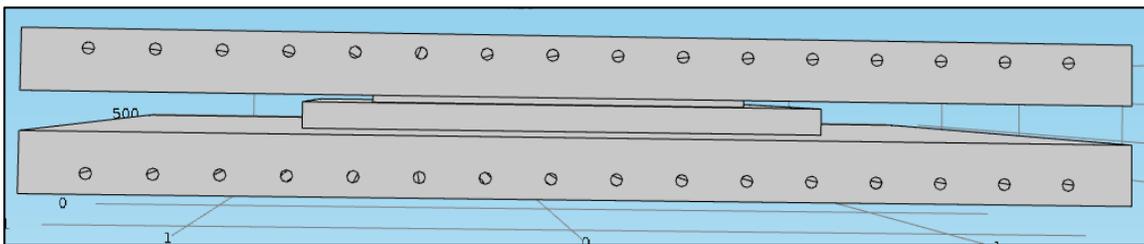


Figure 2.34 Le modèle de chauffage pour la plaque 27 fois plus le volume initial de la pièce par la multiplication de toutes les dimensions du moule et la pièce par un facteur de 3

Le tableau 2.7 représente les 5 volumes étudiés en fonction du coefficient de multiplication des dimensions du moule et les surfaces des tubes de chauffage.

Tableau 2.7 Les 5 volumes étudiés de la plaque

Volume de la pièce (cm^3)	Coefficient d'augmentation de volume de la plaque	Échelle	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
650,3	1	1	0.895
3195	4,9	1.7	2.598
6925	10,65	2.2	4.336
11430	17,57	2.6	6.056
17560	27	3	8.062

D'après ce tableau, plus on augmente la taille du moule et la plaque plus la surface des tubes de chauffage augmente.

2.7.2.2 Processus de simulation de l'effet de volume de la pièce en forme T

L'étude de l'effet du volume de la pièce en forme T sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la taille de l'ensemble du moule et de la pièce en multipliant toutes les dimensions par le même facteur d'augmentation en utilisant la rubrique échelle du logiciel COMSOL. Le tableau 2.8 représente les 5 volumes étudiés en fonction des surfaces des tubes de chauffage.

Tableau 2.8 Les 5 volumes étudiés de la pièce en forme T

Volume de la pièce (cm^3)	Coefficient d'augmentation du volume	Échelle	Surface cylindres de chauffage (m^2)
28,18	1	1	0,0195
138,5	4,914	1.5	0,0563
280,1	9,94	2.15	0,0901
440,3	15,625	2.5	0,1219
760,9	27	3	0,1755

La surface des tubes de chauffage a un effet très important sur la puissance de chauffage. D'après le tableau 2.8, on remarque que, plus le volume de la pièce augmente plus la surface des tubes de chauffage augmente aussi.

2.7.2.3 Processus de simulation de l'effet de volume de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage

Comme pour la plaque et la pièce en forme T, l'étude de l'effet du volume de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la taille de l'ensemble du moule et de la pièce en multipliant toutes les dimensions par le même facteur d'augmentation en

l'utilisant la rubrique échelle du logiciel COMSOL. Le tableau 2.9 démontre les valeurs des 5 volumes étudiés en fonction de la surface des tubes de chauffage.

Tableau 2.9 Les 5 volumes étudiés de la pièce en forme L

Volume de la pièce (cm^3)	Coefficient d'augmentation du volume	Échelle	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
27,23	1	1	0,01945
91,91	3,37	1,5	0,04387
217,9	8	2	0,078
425,5	15,6	2,5	0,1219
735,2	27	3	0,1755

2.7.2.4 Processus de simulation de l'effet de volume de la pièce concave sur la puissance de chauffage

Comme pour les autres pièces, pour étudier l'effet du volume sur la puissance de chauffage nous avons augmenté les dimensions du moule, de la pièce et du four pour pouvoir contenir la pièce tout en gardant toujours les mêmes conditions initiales de chauffage et les mêmes durées de chauffage. N'oublions pas que l'énergie de chauffage de la pièce concave dépend de l'énergie de chauffage de la pièce dans le four plus l'énergie de chauffage du moule à vide.

Le tableau 2.10 représente les 3 volumes étudiés de la pièce concave en fonction de la surface des éléments de chauffages.

Tableau 2.10 Les 3 volumes étudiés de la pièce concave

Volume de la pièce (cm^3)	Échelle	Coefficient d'augmentation du volume	Surface des éléments de chauffage (m^2)
173,68	1	1	0,4748
476,6	1,4	2,7	0,93
1389	2	8	1,899

2.7.3 Étude de l'effet de la largeur des pièces sur la puissance de chauffage

2.7.3.1 Processus de simulation de l'effet de la largeur de la plaque

L'étude de l'effet de la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage consiste à augmenter la largeur et la profondeur de la pièce par le même facteur respectant toujours la même épaisseur de la pièce. Par conséquent, on doit augmenter la largeur du moule et le nombre des tubes de chauffage pour s'adapter avec les nouvelles dimensions de la pièce tout en gardant les mêmes conditions de chauffage et le même temps de chauffage. La figure 2.35 représente le modèle de chauffage de la plaque pour 5 fois de plus la largeur initiale.

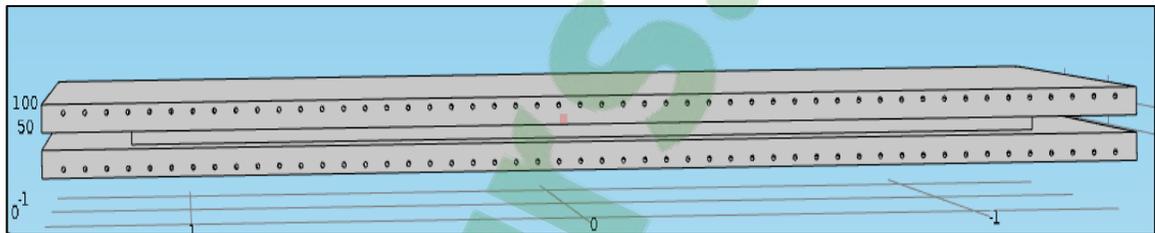


Figure 2.35 Le modèle de chauffage de la plaque 5 fois plus large

Les largeurs étudiées en fonction de la puissance de chauffage sont augmentées par un facteur de 3 et 5 fois plus. La largeur des plateaux de chauffage augmente aussi pour atteindre 1371.6mm x1371.6mm au lieu de 914.4mm x914.4 mm pour un facteur d'augmentation de 3 fois plus et de 2743.2mm x2743.2mm pour un facteur d'augmentation de 5 fois plus. Le tableau 2.11 représente les 3 largeurs étudiées en fonction des surfaces des tubes de chauffage.

Tableau 2.11 Les 3 largeurs étudiées de la plaque

Coefficient d'augmentation de la largeur de la pièce	Dimension de la pièce	Surface des tubes (m^2)
1	355.6mm x304.8mm x6mm	0,895
3	1066.8mm x914.4mm x6mm	1,9
5	1778mm x1524mm x6mm	6,531

2.7.3.2 Processus de simulation de l'effet de la largeur de la pièce en forme T

Pour étudier l'effet de la largeur de la pièce sur la puissance de chauffage nous avons augmenté la largeur de la pièce dans les deux directions d'un facteur de 2 et d'un facteur de 5 fois plus et nous avons calculés l'énergie de chauffage nécessaire pour que la température dans le centre de la pièce atteigne 380°C pour la même durée de chauffage de la pièce de dimension initiale tout en gardant toujours les mêmes conditions de chauffage. La figure 2.36 représente le modèle de chauffage de la pièce en forme T pour 2 fois plus la largeur de la pièce initiale.

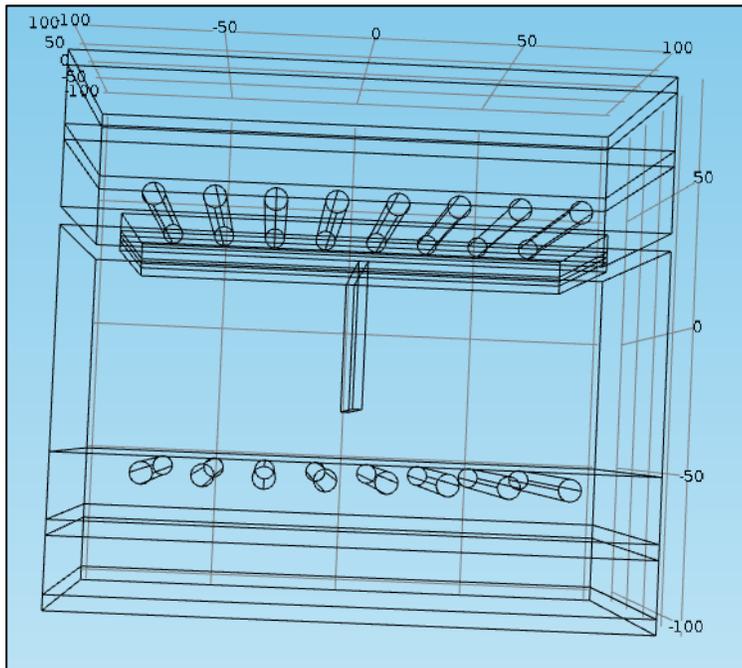


Figure 2.36 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme T pour 2 fois plus large

Les largeurs de l'ensemble du moule sont augmentées du même facteur d'augmentation de la pièce. Le tableau 2.12 représente les 3 largeurs étudiées en fonction des surfaces des tubes de chauffage.

Tableau 2.12 Les 3 largeurs étudiées de la pièce en forme T

Coefficient d'augmentation de largeur	Dimension de la pièce	Surface cylindres de chauffage (m^2)
1	Nervure : de 82.44mm x82.44mm x3.17mm Bride: 82.44mm x3.17mm x25.4mm	0,0195
2	Nervure : de 164.88mm x164.88mm x3.17mm Bride: 164.88mm x3.17mm x50.8mm	0,07782
5	Nervure : de 412.2mm x412.2mm x3.17mm Bride: 412.2mm x3.17mm x127mm	0,757

2.7.3.3 Processus de simulation de l'effet de la largeur de la pièce en forme L

Pour la pièce en forme L, les largeurs étudiées en fonction de la puissance de chauffage sont augmentées par un facteur de 2 et 5 fois plus. Par conséquence, la largeur des plateaux de chauffage augmente aussi pour atteindre 165.32mm x172mm et la hauteur de la cavité augmente à 90 mm pour un facteur d'augmentation de 2 fois plus et 430mm et 400mm avec une hauteur de la cavité augmente à 230mm pour un facteur d'augmentation de 5 fois plus. La figure 2.37 démontre le modèle de chauffage de la pièce en forme L pour 2 fois de plus la largeur initiale de la pièce.

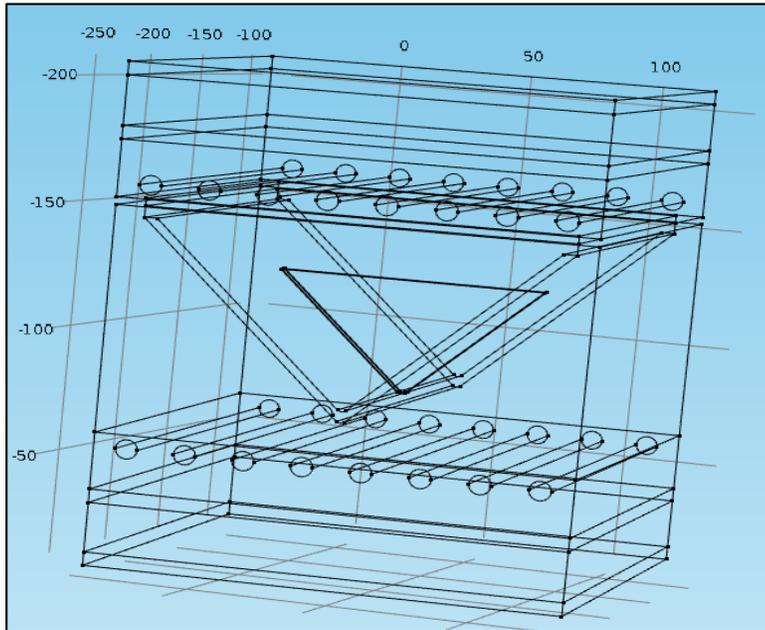


Figure 2.37 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme L pour 2 fois plus large

Les conditions initiales et la durée de chauffage pour les 3 largeurs étudiées sont exactement les mêmes pour le modèle de chauffage de largeur initiale. Les 3 largeurs étudiées pour déterminer l'évolution de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce sont démontrées au tableau 2.13.

Tableau 2.13 Les 3 Largeurs étudiées pour la pièce en forme L

Coefficient d'augmentation de la largeur	Dimension de la pièce en forme L	Surface des cylindres de chauffage (m^2)
1	Partie1: 52.44mm x80mm x3.17mm Partie2: 52.44mm x80mm x3.17mm	0,0194
2	Partie1: 104.88mm x160mm x3.17mm Partie2: 104.88mm x160mm x3.17mm	0,066
5	Partie1 : 262.2mm x400mm x3.17mm Partie2 : 262.2mm x400mm x3.17mm	0,367

2.7.3.4 Processus de simulation de l'effet de la largeur de la pièce concave

Les largeurs étudiées sont augmentées par un facteur de 2 et 3 fois plus par rapport à la largeur initiale de la pièce pour déterminer l'évolution de puissance de chauffage en fonction de la largeur. En conséquence la dimension du four est également augmenté s'adapter aux nouvelles largeurs de la pièce, mais ce n'est pas d'un même facteur d'augmentation. La figure 2.38 représente le modèle de chauffage dans le four de la pièce concave 2 fois plus large.

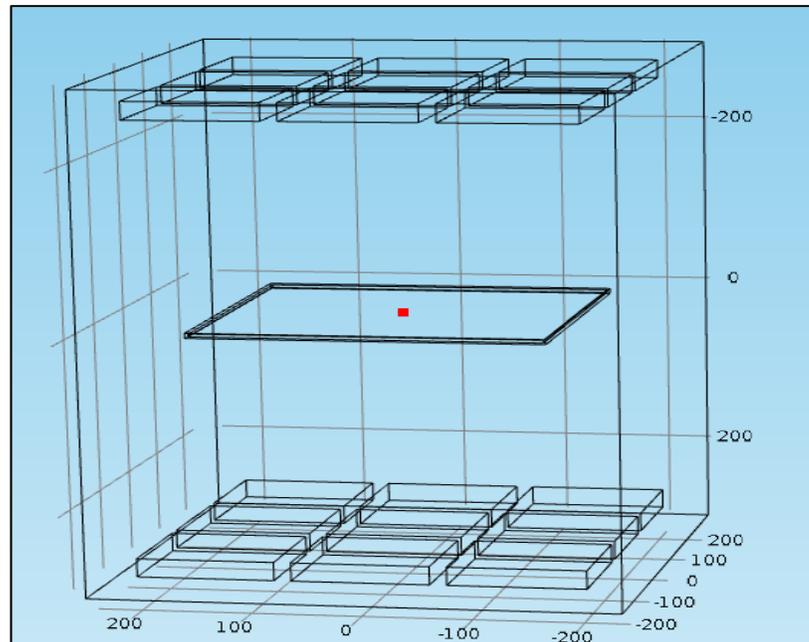


Figure 2.38 Le modèle de chauffage de pièce concave 2 fois plus large

Le tableau 2.14 représente les dimensions de la pièce concave étudiée et les facteurs d'augmentation du four et de la pièce.

Tableau 2.14 Les 3 largeurs étudiées de la pièce concave

Facteur d'augmentation de la largeur de la pièce	Facteur d'augmentation de la dimension du four	Dimension de la pièce concave	Surface des éléments de chauffage (m^2)
1	1	200mm x260mm x3.34mm	0,4748
2	1,4	400mm x520mm x3.34mm	0,93
3	2	600mm x780mm x3.34mm	1,899

Puisque la largeur de la pièce a augmenté, le moule doit également être augmenté du même facteur pour déterminer la puissance totale de chauffage afin d'étudier l'effet de la largeur de la pièce concave sur la puissance de chauffage.

2.8 Plan d'expérience (DOE)

2.8.1 L'effet de l'épaisseur et de la largeur sur le cycle de fabrication des pièces

Pour étudier l'effet de l'épaisseur et de la largeur des pièces sur le cycle de fabrication des pièces (qui comprend les périodes de chauffage, de consolidation et de refroidissement en fonction du temps) nous avons gardé la même densité surfacique de puissance et le même point de mesure de la température et les mêmes conditions aux limites.

Pour la pièce en forme T, la pièce en forme L et la plaque :

- L'effet de l'épaisseur sur le cycle de fabrication consiste à augmenter l'épaisseur de la pièce par un facteur de 2 et un facteur de 5 avec le logiciel CATIA gardant toujours les mêmes dimensions des plateaux de chauffage et le même nombre des tubes de chauffage.
- L'effet de la largeur sur le cycle de fabrication consiste à augmenter la largeur de la pièce et la largeur du moule par un facteur de 2 avec le logiciel CATIA augmentant également le nombre des tubes de chauffage.
- L'effet de la largeur et de l'épaisseur de la pièce sur le cycle de fabrication consiste à augmenter ces dernières par un facteur de 5 augmentant également la largeur des plateaux de chauffage et le nombre des tubes de chauffage avec le logiciel CATIA.

Pour la pièce concave :

- L'effet de l'épaisseur sur le cycle de fabrication consiste à augmenter l'épaisseur de la pièce par un facteur de 1.4 avec le logiciel COMSOL gardant toujours les mêmes dimensions du four et la même surface des radiateurs infrarouges.
- L'effet de la largeur sur le cycle de fabrication consiste à augmenter la largeur de la pièce par facteur de 1.4 avec le logiciel COMSOL gardant toujours les mêmes dimensions du four et la même surface des radiateurs infrarouges.
- L'effet de la largeur et de l'épaisseur sur le cycle de fabrication consiste à augmenter la largeur de la pièce par un facteur de 1.5 et l'épaisseur par facteur de 2 avec le logiciel COMSOL gardant toujours les mêmes dimensions du four et la même surface des radiateurs infrarouges.

Le tableau 2.15 démontre le plan d'expérience développé pour étudier l'effet de la largeur et l'épaisseur sur le cycle de fabrication des pièces.

Tableau 2.15 Plan d'expérience pour l'effet de la largeur et l'épaisseur sur le cycle de fabrication des pièces

Pièces	L'effet de l'épaisseur	L'effet de la largeur	L'effet de l'épaisseur et de la largeur
Pièce en forme T	Largeur constante Épaisseur variable	Largeur variable Épaisseur constante	Largeur variable Épaisseur variable
Pièce en forme L	Nombre des tubes de chauffage constant	Nombre des tubes de chauffage variable	Nombre des tubes de chauffage variable
La plaque	Dimension des plateaux de chauffage constante	Dimension des plateaux de chauffage variable	Dimension des plateaux de chauffage constante
Pièce concave	Largeur constante Épaisseur variable Surface de chauffage constante Dimension du four constante	Largeur variable Épaisseur constante Surface de chauffage constante Dimension du four constante	Largeur variable Épaisseur variable Surface de chauffage constante Dimension du four constante

2.8.2 L'effet de l'épaisseur, la largeur et le volume sur la puissance de chauffage

Pour étudier l'effet de l'épaisseur, la largeur et le volume des pièces sur le cycle de la puissance de chauffage, nous avons gardé le même temps de chauffage, le même point de mesure de la température et les mêmes conditions aux limites.

Pour la pièce en forme T et la plaque :

- L'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter l'épaisseur de la pièce jusqu'à un facteur de 10 avec le logiciel CATIA gardant toujours la même dimension des plateaux de chauffage et le même nombre des tubes de chauffage.
- L'effet de la largeur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la largeur de la pièce et la largeur du moule jusqu'à un facteur de 5 avec le logiciel CATIA augmentant également le nombre des tubes de chauffage.
- L'effet du volume de la pièce sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la taille du moule et de la pièce et le nombre des tubes de chauffage par la fonction échelle jusqu'à un volume pour la pièce de 27 fois plus grand.

Pour la pièce en forme L :

- L'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter l'épaisseur de la pièce jusqu'à un facteur de 10 avec le logiciel CATIA. A partir d'une épaisseur de la pièce 6 fois plus grande, la dimension des plateaux chauffants et le nombre des tubes chauffants doivent être augmentés.
- L'effet de la largeur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la largeur de la pièce jusqu'à un facteur de 5 avec le logiciel CATIA. À partir d'une largeur de la pièce 5 fois plus grande, la dimension des plateaux chauffants et le nombre de tubes chauffants doivent être augmentés
- L'effet du volume de la pièce sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la taille du moule et de la pièce et le nombre tubes de chauffage par la fonction échelle jusqu'à un volume pour la pièce de 27 fois plus grand.

Pour la pièce concave :

- L'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter l'épaisseur de la pièce jusqu'à un facteur de 10 avec le logiciel COMSOL gardant toujours les mêmes dimensions du four et la même surface des radiateurs infrarouges.

- L'effet de la largeur sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la largeur de la pièce jusqu'à un facteur de 3 avec le logiciel COMSOL augmentant également les dimensions du four et de la surface des radiateurs infrarouges.
- L'effet du volume de la pièce sur la puissance de chauffage consiste à augmenter la taille du moule et de la pièce et des tubes de chauffage par la fonction échelle jusqu'à un volume pour la pièce de 6.5 fois plus grand.

Le tableau 2.16 démontre le plan d'expérience développé pour étudier l'effet de la largeur, l'épaisseur et du volume des pièces sur la puissance de chauffage.

Tableau 2.16 Plan d'expérience pour l'effet de la largeur, l'épaisseur et le volume des pièces sur la puissance de chauffage

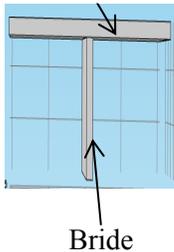
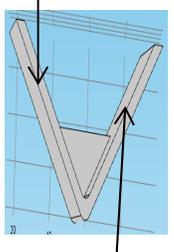
Pièces	L'effet de l'épaisseur	L'effet de la largeur	L'effet du volume
Pièce en forme T	Largeur constante Épaisseur variable	Largeur variable Épaisseur constante	Largeur variable Épaisseur variable
La plaque	Nombre des tubes de chauffage constant Dimension des plateaux de chauffage constante	Nombre des tubes de chauffage variable Dimension des plateaux de chauffage variable	Taille des tubes de chauffage variable Dimension des plateaux de chauffage variable
La pièce en forme L	Largeur constante Épaisseur variable Nombre des tubes de chauffage constant jusqu'à 6 fois l'épaisseur de la pièce	Largeur variable Épaisseur constante Nombre des tubes de chauffage variable Dimension des plateaux de chauffage variable	Largeur variable Épaisseur variable Taille des tubes de chauffage variable Dimension des plateaux de chauffage variable
La pièce concave	Largeur constante Épaisseur variable Surface de chauffage constante Dimension du four constante	Largeur variable Épaisseur constante Surface de chauffage variable Dimension du four variable	Largeur variable Épaisseur variable Surface de chauffage variable Dimension du four variable

2.9 Conclusion

Ce chapitre a eu pour but la modélisation de l'étape de chauffage et l'étape de refroidissement de 4 moules différents afin d'étudier l'effet de trois paramètres géométriques, soit l'épaisseur, le volume et la largeur, sur le cycle de chauffage et sur la puissance de chauffage.

Le tableau 2.17 démontre une récapitulation des paramètres d'étude.

Tableau 2.17 Tableau récapitulatif des paramètres étudiés de l'effet de l'épaisseur, la largeur et le volume des pièces sur la puissance de chauffage

Paramètres Pièces	Unidimensionnelles :		Bidimensionnelles :		Tridimensionnelles :		
	Épaisseur		Largeur		Volume		
La pièce en forme T 	e (mm)	Surface de chauffage (m^2)	Dimension (mm)	Surface de chauffage (m^2)	V (cm^3)	Échelle	Source (m^2)
	3.17	0.0195			28.18	1	0.0195
	6.34	0.0195	Nervure: 82.44x82.44 Bride : 82.44x25.4	0.0195	138.5	1.5	0.0563
	15.85	0.0195			280.1	2.15	0.0901
	22.19	0.0195			440.3	2.5	0.1219
	31.7	0.0195	Nervure: 164.88x184.88 Bride : 184.88x50.8	0.07782	760.9	3	0.1755
			Nervure: 412.2x412.2 Bride : 412.2x127	0.757			
La pièce en forme L 	e(mm)	Surface de chauffage (m^2)	Dimension (mm)	Surface de chauffage (m^2)	V (cm^3)	Échelle	Surface de chauffage (m^2)
	3.17	0.1945	Partie 1 : 52.44x80 Partie 2 : 52.44x80	0.0194	27.23	1	0.01945
	12.68	0.1945			91.91	1.5	0.04387
	19	0.04308			217.9	2	0.078
	31.7	0.0688	Partie 1 : 104.88x160 Partie 2 : 104.88x160	0.066	425.5	2.5	0.1219
				Partie 1 : 262.2x400 Partie 2 : 262.2x400	0.367	735.2	3

CHAPITRE 3

L'EFFET DE L'ÉPAISSEUR ET LA LARGEUR DES PIÈCES SUR LE CYCLE DE FABRICATION

La période de chauffage et de refroidissement sera simulée à l'aide du module d'analyse thermique transitoire de l'interface de transfert de chaleur dans les solides du logiciel COMSOL. Pour étudier l'effet des paramètres géométriques sur le cycle de chauffage et de refroidissement, nous augmentons l'épaisseur et la largeur des pièces, tout en gardant toujours le même cycle de temps, la même puissance de chauffage et les mêmes conditions initiales de chaque pièce.

3.1 Simulation du cycle thermique de la plaque

3.1.1 Simulation de l'étape de chauffage de la plaque

La période de chauffage et de consolidation de la plaque est définie dans un intervalle de temps entre 0 et 9900s avec une étape de 5s. Les densités surfaciques de puissance nécessaire pour atteindre la température de 380°C sont 25kW/m² et 3.16kW/m² respectivement en utilisant la formule suivante : (Wazziki et Ngo, 2015).

$$\text{densité surfacique}*(T<380[\text{degC}])+\text{densité surfacique}*(T>380[\text{degC}]) \quad (3.1)$$

Les conditions thermiques de chauffage étaient les suivantes. La valeur initiale de la température dans le modèle et la pièce est fixée à 25°C. La température de l'air en contact avec les surfaces extérieures du moule est fixée à 20°C avec un coefficient de transfert de chaleur $h=10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

3.1.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la plaque

Le refroidissement du moule de la plaque qui a une température initiale de 380°C consiste à injecter de l'air à une température de 25°C dans les canaux de refroidissement à une vitesse d'écoulement de 60m/s. La durée de refroidissement de la pièce pour atteindre la température de 34°C est de 3700s avec une étape de 5s. Toutes les surfaces extérieures du

moule sont en convection naturelle avec l'air ambiante durant le refroidissement, sachant que la température de l'air est de 22°C avec un coefficient de transfert de chaleur $h=10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ (Wazziki et Ngo, 2015).

La répartition de la température dans l'ensemble du moule calculé numériquement est présentée dans les figures 3.1 et 3.2 respectivement après 15s et 3700s.

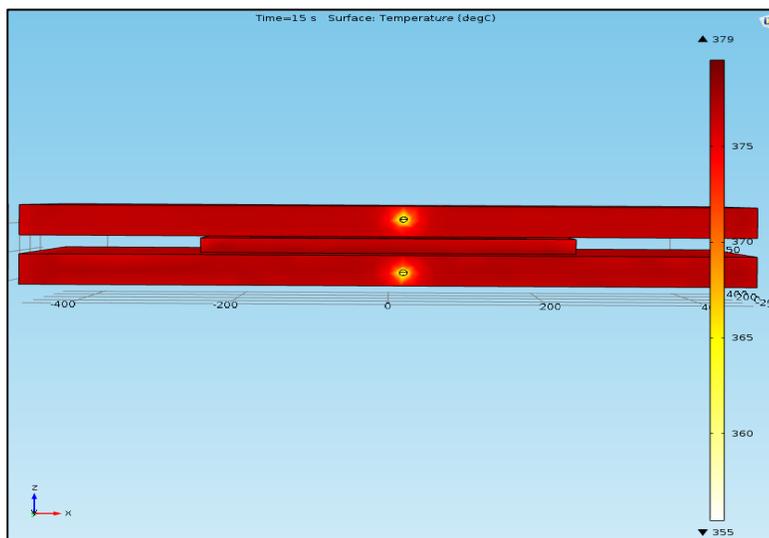


Figure 3.1 La répartition de la température dans le moule et la plaque après 15s de refroidissement

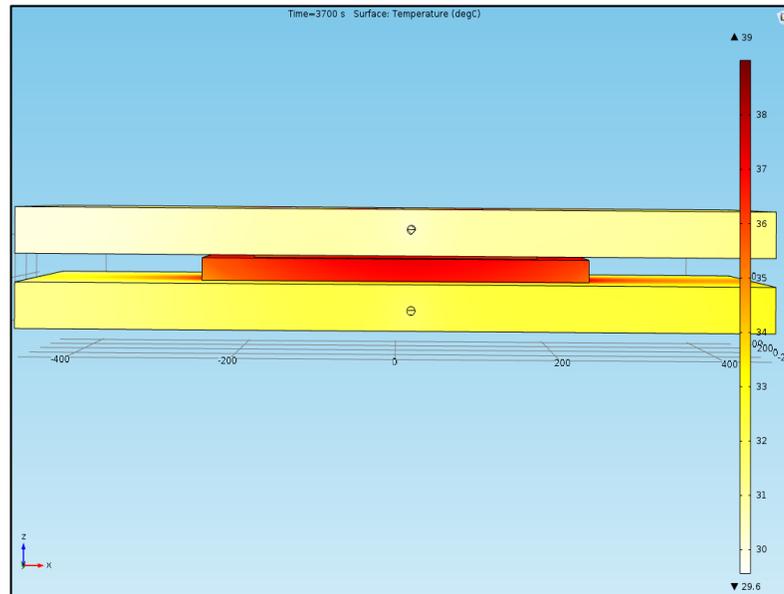


Figure 3.2 La répartition de la température dans le moule et la plaque après 3700s de refroidissement

3.1.3 Résultats numériques et expérimentaux

Les résultats de simulation de la plaque ont été comparés avec des résultats expérimentaux pour valider le modèle théorique de la plaque (M. Selezneva, 2013)

La figure 3.3 représente une comparaison des résultats de chauffage et de refroidissement du modèle théorique avec les résultats de chauffage et de refroidissement du modèle expérimental de la plaque.

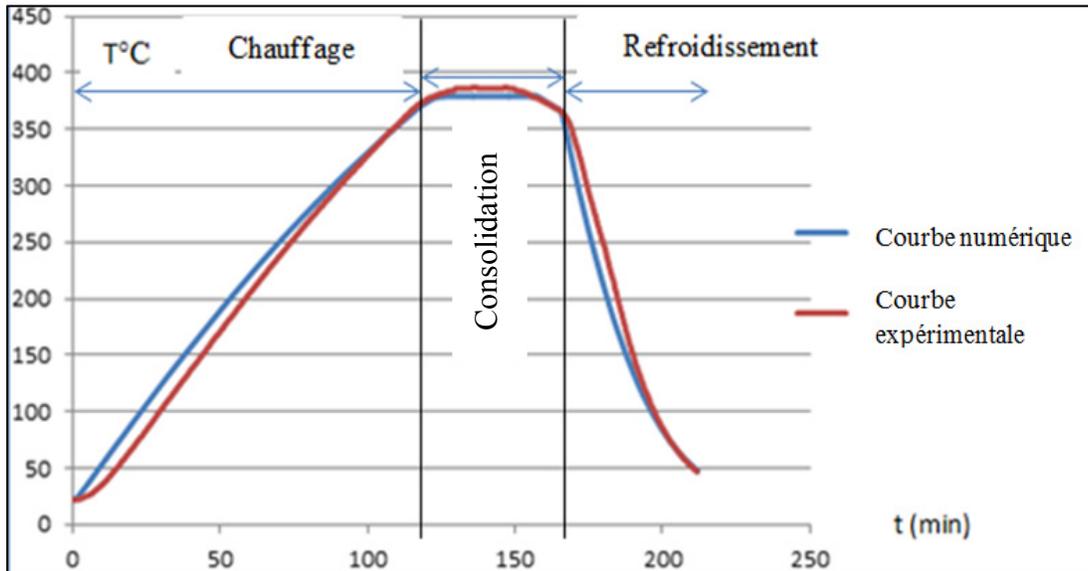


Figure 3.3 La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la plaque à une épaisseur de 6mm (M. Selezneva, 2013)

3.1.4 L'effet de la largeur et l'épaisseur de la plaque sur le cycle de fabrication

Pour étudier l'effet des paramètres géométriques, nous avons augmenté l'épaisseur et la largeur de la pièce pour voir l'effet de chaque paramètre indépendamment sur le cycle de chauffage sachant que les paramètres géométriques des plateaux et des tubes chauffants ne changeront pas. Les figures 3.4 et 3.5 démontrent la variation de la température en fonction du temps pour la plaque respectivement pour une largeur de 2 fois plus et une épaisseur de 5 fois plus.

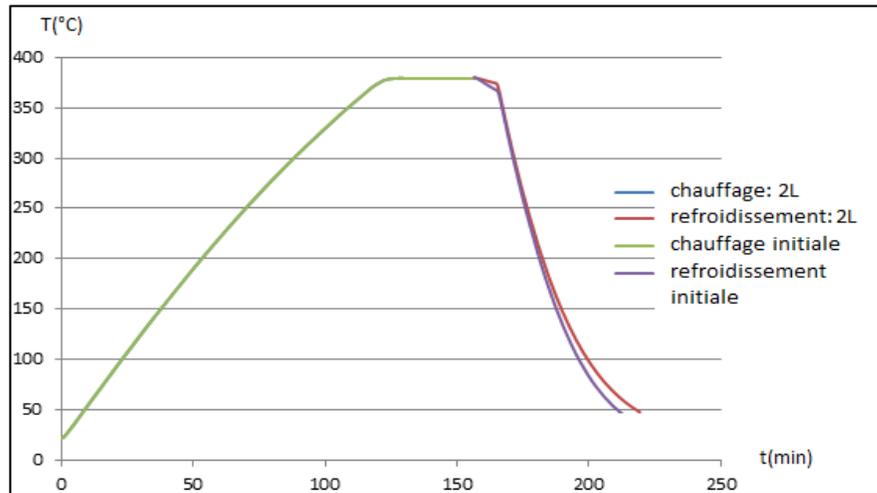


Figure 3.4 Comparaisons de la réponse thermique de la plaque de dimension (711.2x609.6x6mm) avec la pièce initiale de dimension (355.6x304.8x6mm)

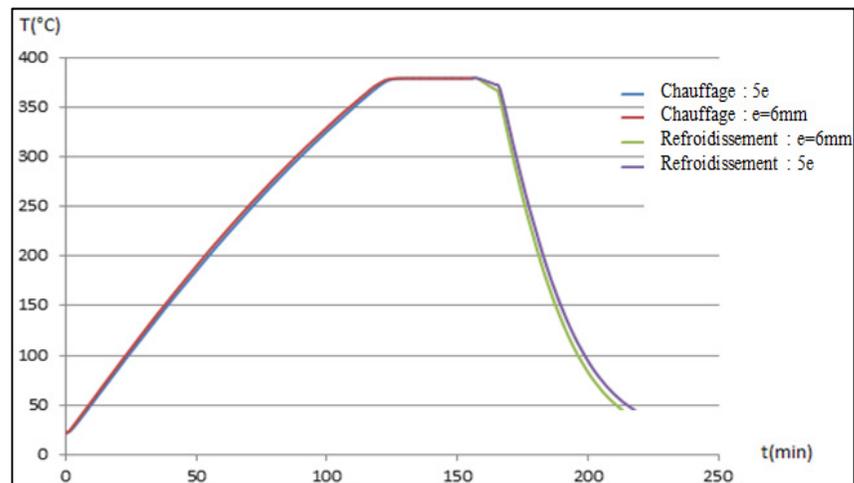


Figure 3.5 Comparaisons de la réponse thermique de la plaque d'épaisseur 30mm avec l'épaisseur initiale de 6 mm

L'effet de l'épaisseur et de la largeur de la plaque simultanément sur le cycle de chauffage et de refroidissement peut être plus évident à l'issue de l'effet de chaque paramètre considéré individuellement. La figure 3.6 démontre l'effet de 2 fois l'épaisseur et 2 fois la largeur de la plaque sur le cycle de chauffage et de refroidissement alors que la figure 3.7 démontre l'effet de 5 fois l'épaisseur et de 5 fois la largeur sur le cycle de chauffage et de refroidissement.

Sachant que, pour augmenter la largeur de la pièce d'un facteur de 5 fois plus, il faut aussi augmenter la largeur des plateaux chauffants d'un facteur de 3 fois plus. Les nouvelles dimensions des plateaux de chauffage sont 2743.2mm x2743.2mm au lieu de 914.4mm x914.4mm.

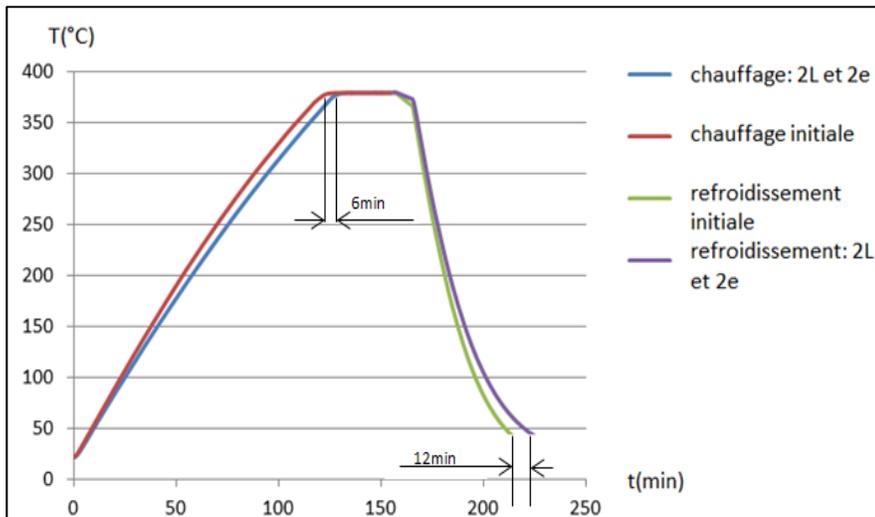


Figure 3.6 L'effet de 2 fois l'épaisseur et 2 fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement

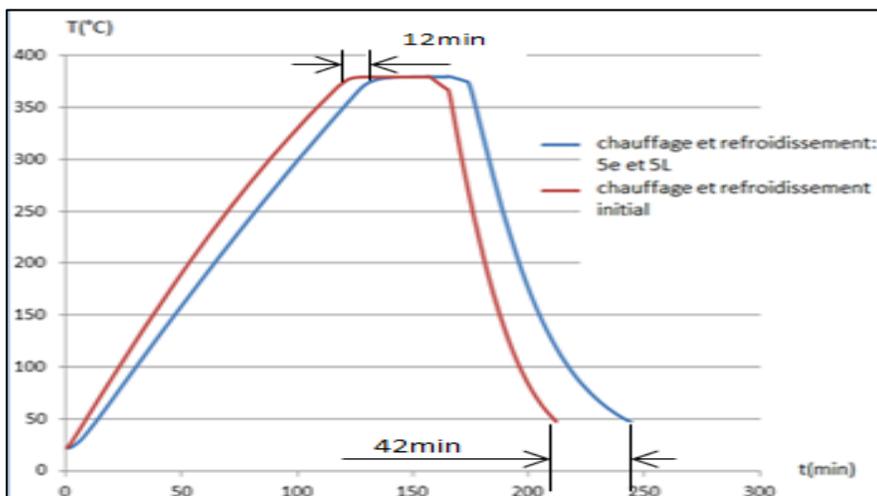


Figure 3.7 L'effet de 5 fois l'épaisseur et 5 fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement

3.1.5 Discussion

D'après la figure 3.3, le modèle théorique a prédit presque la même température de chauffage et de refroidissement que celle pour le modèle expérimental. Cependant, il y avait une différence moyenne de 9.82°C pour la période de chauffage et de 13.49°C pour la période de consolidation et de 7.5°C pour la période de refroidissement.

Le doublement de la largeur de la pièce ou l'augmentation de l'épaisseur de la pièce d'un facteur de 5 n'a aucun effet sur la température de chauffage de la plaque due à la grande taille des plateaux de chauffage pour cette pièce (figures 3.4 et 3.5). Lorsque nous avons doublé l'épaisseur et la largeur de la plaque, on note un retard de chauffage de 6min pour atteindre la température de 380°C et un retard de 12min pour refroidir la pièce jusqu'à 47°C tel qu'observé dans la figure 3.6. Ces délais sont beaucoup plus significatifs lorsque nous augmentons l'épaisseur et la largeur de la pièce 5 fois plus tel que démontré dans la figure 3.7.

3.2 Simulation du cycle thermique de la pièce en forme T

3.2.1 Simulation de l'étape de chauffage de la pièce en T

La période de chauffage est définie dans l'intervalle de temps entre 0 à 1550s avec une étape de 5s dans laquelle la température atteint une valeur de 380°C, ensuite la période de consolidation de 1550 à 2730s dans laquelle la température augmente jusqu'à 395°C. Les densités surfaciques de puissance nécessaire pour la simulation de la période de chauffage et la période de consolidation sont 56kW/m² et 16kW/m² respectivement en utilisant la formule suivante : (Wazziki, Ngo & Leblanc, 2015).

$$\text{densité surfacique}*(T<380[\text{degC}]) + \text{densité surfacique}*(T>380[\text{degC}]) \quad (3.2)$$

Les conditions thermiques de chauffage étaient les suivantes. La valeur initiale de la température dans l'ensemble du modèle était 25°C et la valeur de la température de l'air était fixée à 20°C. Le coefficient de transfert de chaleur par convection des surfaces extérieures du moule est : $h=10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$.

Après avoir effectué le calcul, la répartition des températures dans l'ensemble du moule après 15 et 2500s de chauffage sont respectivement représentées dans les figures 3.8 et 3.9.

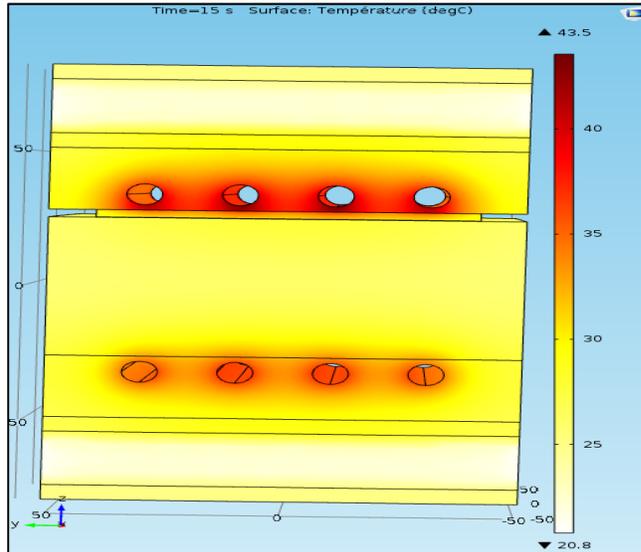


Figure 3.8 La répartition de la température dans le moule après 15s de chauffage de la pièce en T

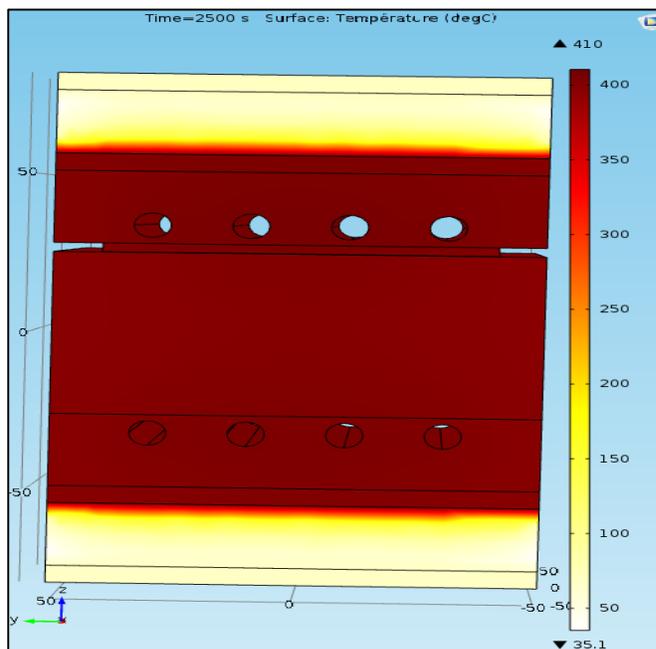


Figure 3.9 La répartition de la température dans le moule après 2500s de chauffage de la pièce en T

3.2.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce en forme T

La température initiale de refroidissement de la pièce en forme T est de 395°C. La vitesse de l'air (le fluide de refroidissement) est de 50m/s à une température de 25°C. La température de l'air en contact avec les surfaces extérieures du moule est de 22°C. La température de la pièce diminue jusqu'à 80°C dans un temps de 2000s. Les répartitions de température dans l'ensemble du moule après 15 et 2000s de refroidissement sont représentées respectivement dans les figures 3.10 et 3.11.

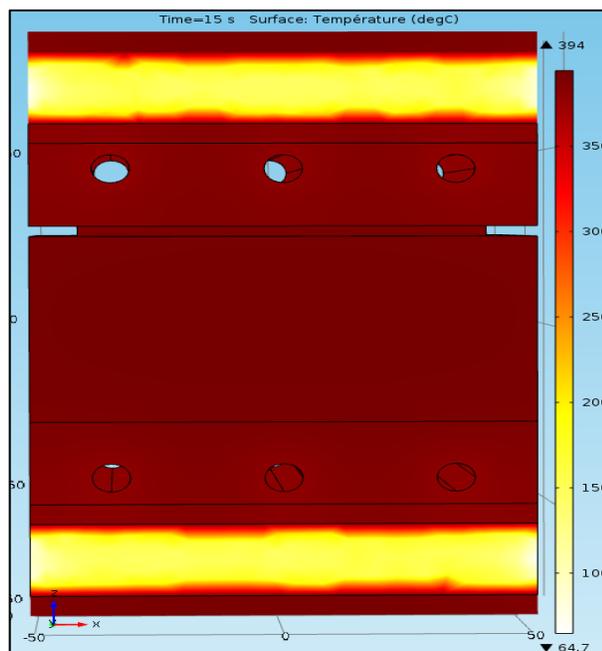


Figure 3.10 La répartition de la température dans le moule après 15s de refroidissement de la pièce en T

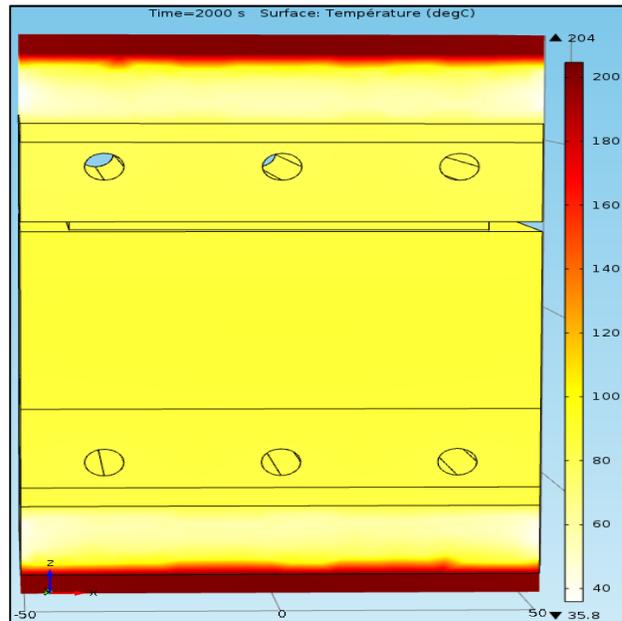


Figure 3.11 La répartition de la température dans le moule après 2000s de refroidissement de la pièce en T

3.2.3 Résultat numérique et expérimentale

Le résultat de simulation numérique obtenus par COMSOL de la pièce en forme T ont été comparés au résultat expérimentale de Leblanc (D. Leblanc, 2014) sous les mêmes conditions de chauffage et de refroidissement.

La figure 3.12 démontre une comparaison de la température de chauffage et de refroidissement en fonction du temps pour le modèle théorique avec les résultats expérimentaux de la pièce en forme T.

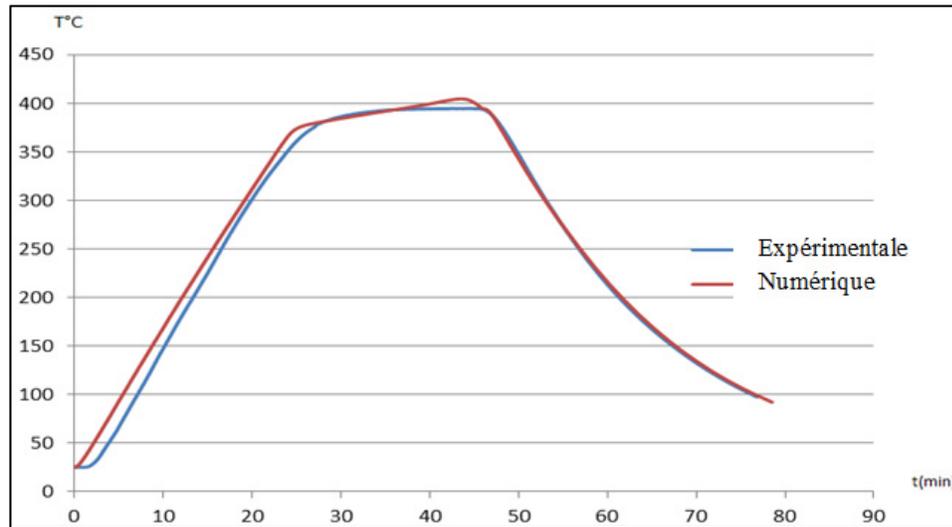


Figure 3.12 La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la pièce en T a une épaisseur de 3.17mm (D. Leblanc, 2014)

3.2.4 L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce en forme T sur le cycle de fabrication

Pour étudier l'effet de la largeur de la pièce sur la température de chauffage, nous avons augmenté la taille du moule et le nombre de cylindres de chauffage de 4 à 8 cylindres pour qu'elle soit convenable avec la taille de la pièce 2 fois plus large. Les nouvelles dimensions du moule sont les suivantes : les plateaux de chauffage 203.2mm x203.2mm x22.62mm, le poinçon de 187.5mm x187.5mm x32.2mm, la cavité de 203.2mm x203.2mm x76.2mm, les deux isolants 203.2mm x203.2mm x19.74mm, les 4 plaques métalliques de 203.2mm x203.2mm x5.36mm, les tubes de chauffage d'un diamètre de 7.668mm et d'une longueur de 203.2mm et les deux parties de la pièce en forme T soit la bride de 164.88mm x164.88mm x6.34mm et la nervure de 164.88mm x6.34mm x50.8mm. Pour étudier l'effet de l'épaisseur, on n'a pas modifié la taille du moule.

Les figures 3.13 et 3.14 représentent respectivement la température en fonction du temps de 5 fois l'épaisseur et 2 fois la largeur de la pièce en forme T.

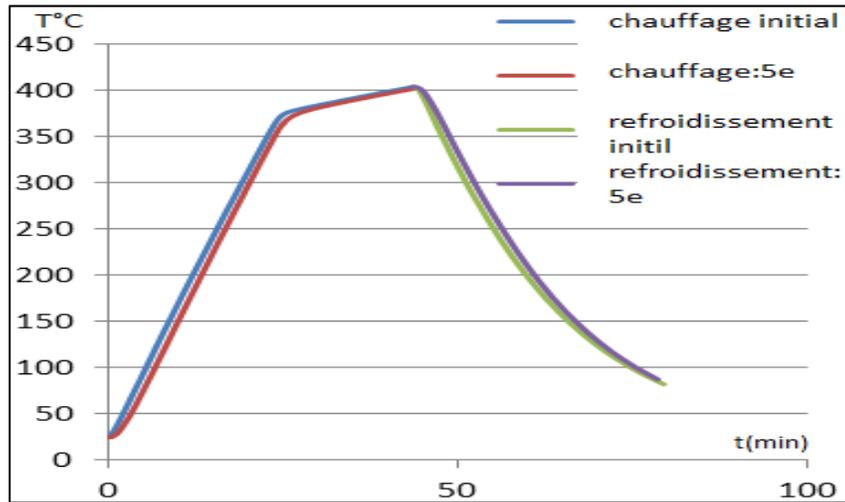


Figure 3.13 L'effet de 5 fois l'épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement

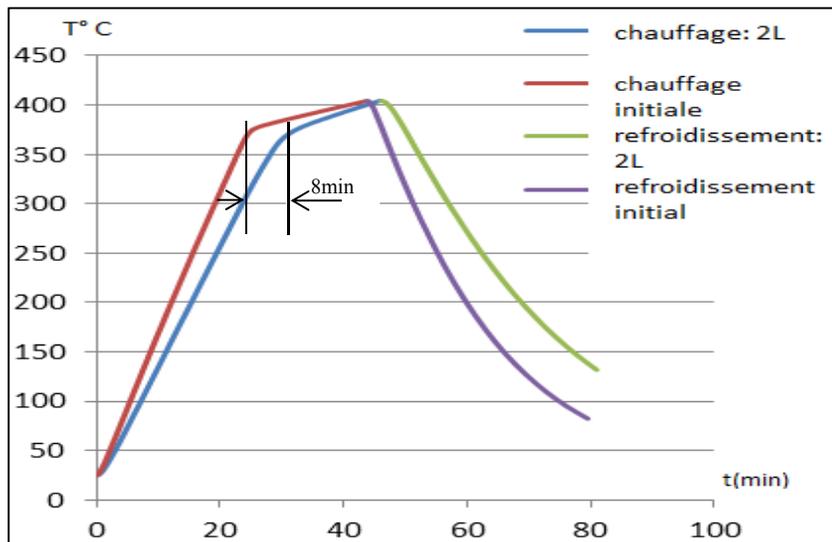


Figure 3.14 L'effet de 2 fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement

Étant donné que l'épaisseur n'a presque aucun effet jusqu'à un facteur de 5 fois plus (figure 3.13), nous vérifierons l'effet de l'épaisseur avec la largeur. La figure 3.15 démontre l'effet de 2 fois la largeur et 2 fois l'épaisseur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement.

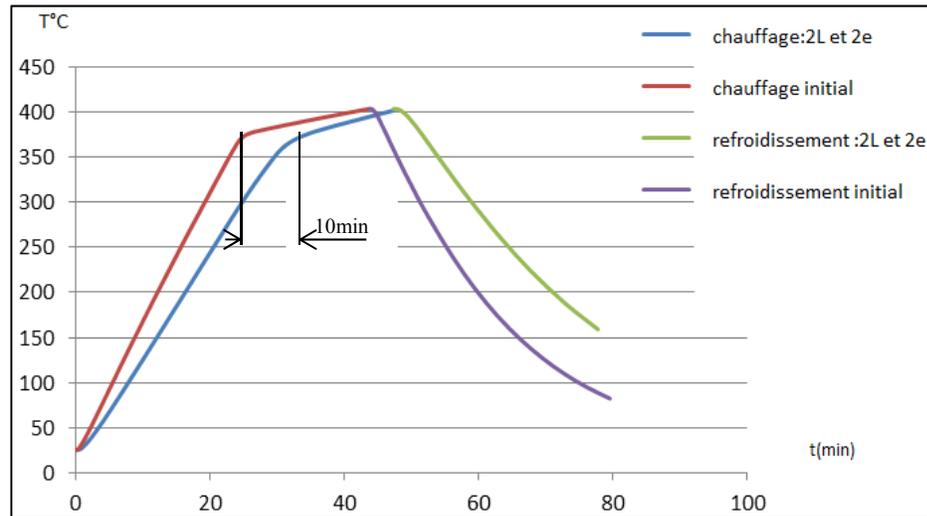


Figure 3.15 L'effet de 2 fois l'épaisseur et 2 fois la largeur de la pièce sur le cycle de chauffage et de refroidissement

3.2.5 Discussion

D'après la figure 3.12, on remarque que le modèle théorique a prédit presque la même température de chauffage et de refroidissement que le modèle expérimental. Cependant, il y avait une différence moyenne de 18°C pour la période de chauffage, de 6.55°C pour la période de consolidation et de 1.01°C pour la période de refroidissement. Il existe une différence de 2min entre le temps simulé et le temps de cycle expérimental pour atteindre la température de chauffage de 380°C . Le temps de simulation pour atteindre la température de refroidissement de 97°C est de 78,5min et le temps du cycle expérimental est de 76,8min.

Selon les figures 3.13, on constate que jusqu'à une épaisseur de 5 fois plus pour la pièce en forme T, le cycle de chauffage et de refroidissement n'a presque pas changé. Par contre, d'après la figure 3.14, le chauffage de la pièce 2 fois plus large subit un retard de chauffage de 8min pour atteindre la température de 380°C .

D'après la figure 3.15, après une période de refroidissement de 34min, la pièce 2 fois plus large atteint la température de 131°C , alors que la pièce initiale atteint la température de 82°C pour le même temps de refroidissement.

En comparant la figure 3.14 avec la figure 3.15 on observe que l'interférence de l'effet du doublement de l'épaisseur et de la largeur affecte le cycle de chauffage et de refroidissement encore plus que l'effet de doubler la largeur seulement. Le retard a augmenté de 2min pour atteindre la température de 380°C et le refroidissement est aussi plus lent puisque la pièce n'atteint qu'une température 153°C au lieu de 131°C après 34min de refroidissement.

3.3 Simulation du cycle thermique de la pièce en forme L

3.3.1 Simulation de l'étape de chauffage de la pièce en forme L

Le chauffage de la pièce à une température initiale de 80°C jusqu'à 380°C est défini dans un intervalle de temps de 0 à 1800s avec une densité surfacique de puissance de 40000kW/m². Une fois que la température de 380°C est atteinte, la température de la pièce demeure constante durant 1080s à l'aide d'une densité surfacique de puissance de 1000kW/m².

Les conditions thermiques de chauffage ainsi que le maillage, la formule de chauffage et la répartition de la température dans le moule sont les mêmes que pour la pièce en forme T.

3.3.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce en forme L

Le refroidissement de la pièce en forme L est moins rapide que pour la pièce en forme T. La durée de refroidissement est de 7380s durant laquelle la température diminue lentement jusqu'à 82°C sachant que la température initiale de l'ensemble du moule était de 380°C. La vitesse de l'air dans les tubes de refroidissement est de 25m/s à une température de 76°C. La température de l'air en convection avec les surfaces extérieures du moule est de 22°C avec $h=10W/m^2K$. (Leblanc, Levy, Hubert, Roy & Yousef, 2014)

3.3.3 Résultat numérique et expérimentale

Le résultat de simulation de chauffage et de refroidissement pour la pièce en forme L fut comparé avec le résultat expérimental dans le but de valider notre modèle de simulation

(D. Leblanc, 2014). La figure 3.16 représente une comparaison entre le résultat numérique obtenus par COMSOL et le résultat expérimental pour la pièce en forme L.

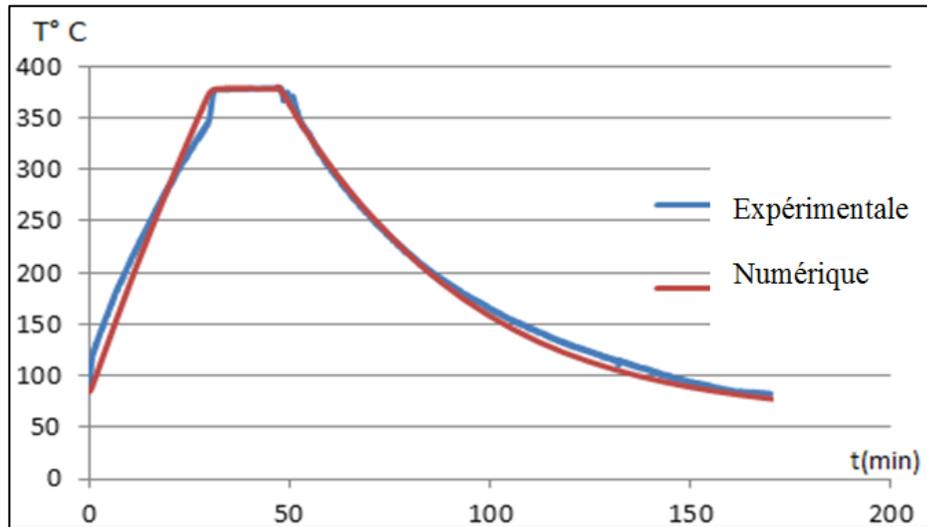


Figure 3.16 Les courbes expérimentale et numérique de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L à une épaisseur de 3.17mm (D. Leblanc, 2014)

3.3.4 L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce en forme L sur le cycle de fabrication

En doublant la largeur de la pièce, la taille du moule augmente conséquemment afin d'introduire la pièce dans ce moule. Les nouvelles dimensions du moule sont les suivantes : le plateau de chauffage de 165.323mm x172mm x22.62mm, la cavité de 165.323mm x172mm x90mm, les isolants de 165.323mm x172mm x19.74mm, les plaques de 165.323mm x172mm x5.36mm et le volume du poinçon doit aussi être augmenté par un facteur de 6 fois plus. Les figures 3.17 et 3.18 représentent respectivement la température en fonction du temps de 2 fois la largeur et 5 fois l'épaisseur de la pièce en forme L.

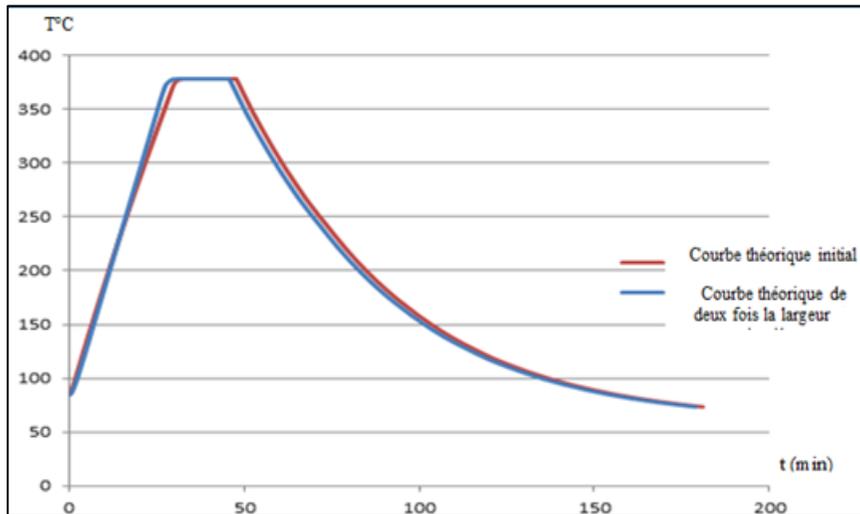


Figure 3.17 L'effet de 2 fois plus la largeur sur le cycle de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L

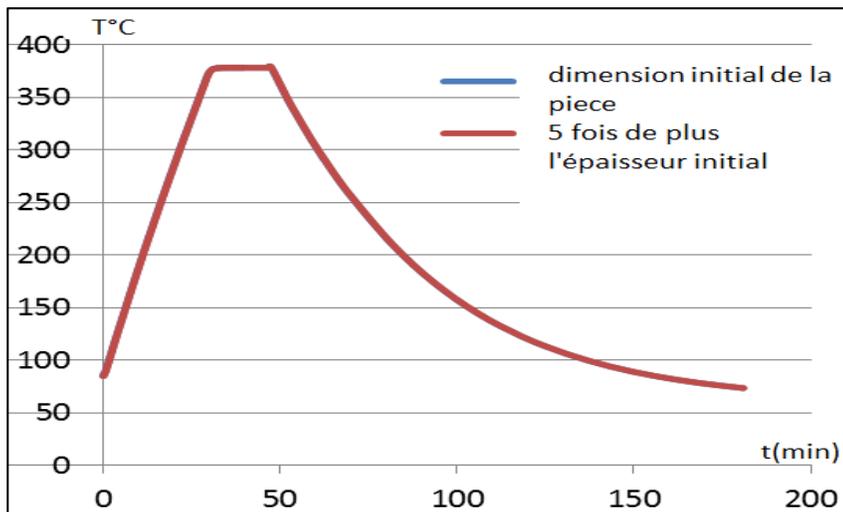


Figure 3.18 L'effet de 5 fois plus l'épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement de la pièce en forme L

La figure 3.19 démontre l'effet de l'augmentations de l'épaisseur et la largeur par un facteur de 2, de la pièce en forme L, sur le cycle de chauffage et de refroidissement.

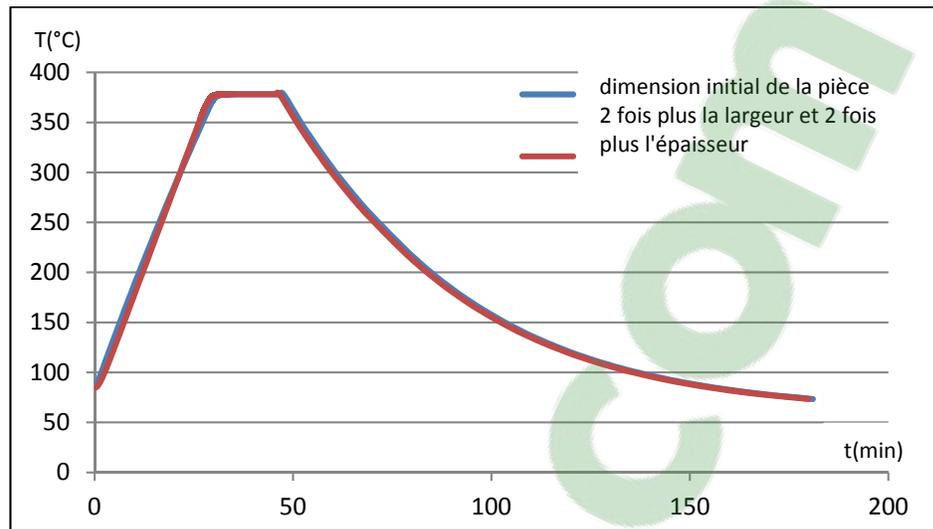


Figure 3.19 L'effet de 2 fois plus la largeur et l'épaisseur sur le cycle de chauffage et de refroidissement pour la pièce en forme L

3.3.5 Discussion

La comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux de la pièce en forme L (figure 3.16) démontre une différence moyenne de 15.3°C pour l'étape de chauffage et de 2.03°C pour l'étape de refroidissement. Il n'y a presque pas de différence entre le temps simulé et le temps expérimental pour atteindre la température de chauffage de 380°C .

D'après la figure 3.17, contrairement à la pièce en forme T, il n'y a presque aucun effet pour le doublement de la largeur de la pièce en forme L sur le cycle de chauffage ou de refroidissement. Mais pour l'effet d'augmenter l'épaisseur par un facteur de 5 fois plus (figure 3.18), la pièce en forme L a réagi comme la pièce en forme T puisqu'il n'y a pas eu d'effet sur le cycle de chauffage ni de refroidissement.

Il a été démontré que l'effet de doubler la largeur de la pièce en forme T sur la température de chauffage est supérieur à l'effet de doubler de la largeur de la pièce en forme L principalement due à la façon du placement de chaque pièce dans le moule. Le doublement de la largeur de la pièce en forme T nécessite une augmentation du volume de l'ensemble du moule jusqu'à 0.0075m^3 alors que l'augmentation du volume de l'ensemble du moule de la

pièce en forme L n'est que de $0,0055m^3$ sachant que le volume initial du moule est presque le même pour ces 2 pièces.

D'après la figure 3.19, le doublement de la largeur et de l'épaisseur de la pièce en forme L n'a presque aucun effet sur le temps de chauffage pour atteindre la température de 380°C ni sur le temps de refroidissement pour atteindre la température de 73°C .

3.4 Simulation du cycle thermique de la pièce concave

3.4.1 Simulation de l'étape de chauffage de la pièce concave

Contrairement aux autres pièces (la pièce en T, la pièce en forme L et la plaque) qui sont chauffées par contact direct dans le moule, la pièce concave est chauffée dans un four infrarouge. Le transfert de chaleur par radiation dans l'ensemble du moule et la pièce est calculé par le logiciel COMSOL dans la rubrique « radiation surface à surface ».

La période de simulation de l'étape de chauffage et de consolidation est définie dans l'intervalle de temps entre 0s à 311s avec une étape de 5s. Les densités surfaciques de puissance nécessaires pour atteindre la température de 420°C sont de $523\text{kW}/m^2$ et $2\text{kW}/m^2$ respectivement en l'utilisant de la formule suivante :

$$\text{densité surfacique1}*(T<420[\text{degC}])+\text{densité surfacique2}*(T>420[\text{degC}]) \quad (3.4)$$

Sachant que la valeur initiale de la température de l'ensemble du four et de la pièce est de 60°C , la valeur de la température de l'air est fixée à 20°C .

D'autre part, le moule de la pièce concave est chauffé, vide, à 364°C dans un intervalle de temps de 0 à 1000s avec une étape de 5s sachant que la température initiale du moule est de 22°C , la température de l'air est de 20°C et la densité surfacique de puissance est de $53\text{kW}/m^2$. Le coefficient de transfert de chaleur par convection des surfaces extérieures du moule et l'air ambiante est : $h=10\text{W}/m^2\text{K}$.

Les répartitions de température dans le moule vide après 15s et 1000s de chauffage sont respectivement représentées dans les figures 3.20 et 3.21.

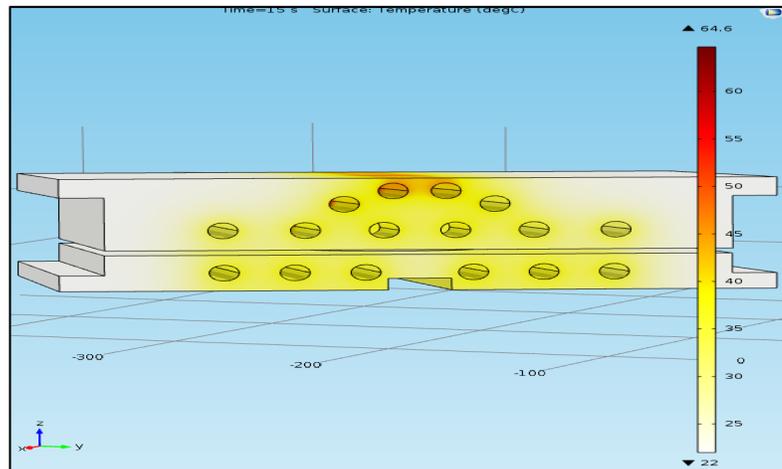


Figure 3.20 La répartition de la température dans le moule concave après 15s de chauffage

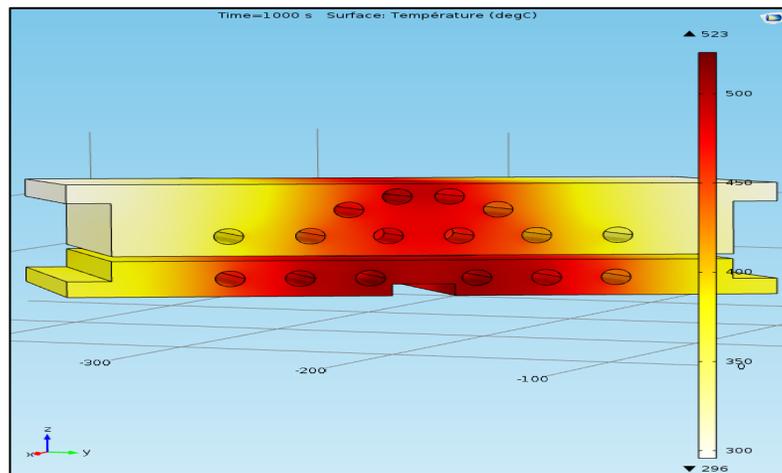


Figure 3.21 La répartition de la température dans le moule concave après 1000s de chauffage

3.4.2 Simulation de l'étape de refroidissement de la pièce concave

Après le chauffage de la pièce dans le four, la simulation de refroidissement est faite en 3 parties.

La première partie de simulation de refroidissement est au moment du transfert de la pièce chaude vers le moule pour le procédé de l'estampage. La pièce est simulée par simple convection naturelle avec l'air ambiante à une température de 20°C. La valeur initiale de la température de la pièce est de 420°C refroidie à 410°C pour une période de 10s.

La deuxième partie de simulation est au moment du contact de la pièce avec le moule durant l'estampage. La pièce est simulée par simple conduction avec les surfaces du moule sachant que la température du moule est de 364°C. La température de la pièce diminue de 410°C à 364°C en 10s de simulation.

Les figures 3.22 et 3.23 démontrent respectivement la répartition de la température après 0s et 5s de contact de la pièce avec le moule.

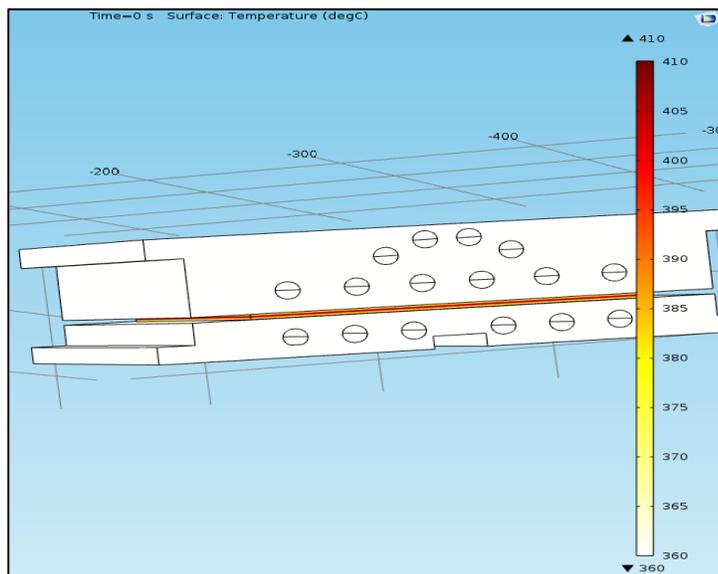


Figure3.22 La répartition de la température dans le moule après 0s du contact de la pièce avec le moule

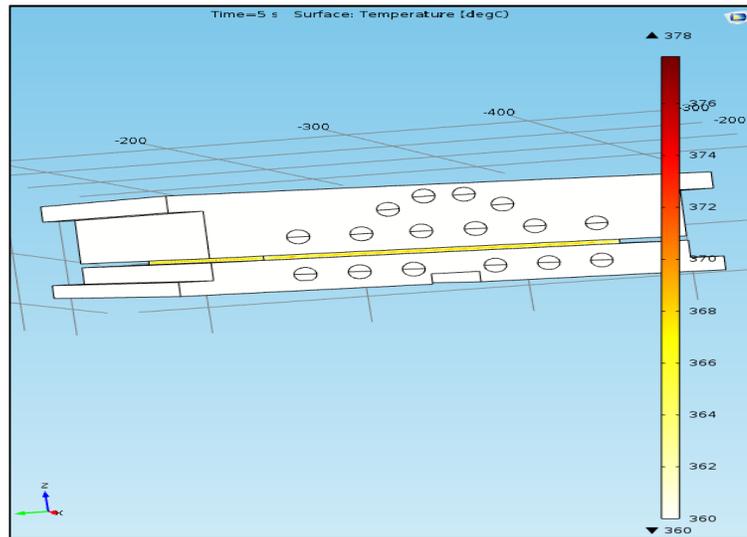


Figure 3.23 La répartition de la température dans le moule après 5s du contact de la pièce avec le moule

La troisième partie de simulation consiste au refroidissement de l'ensemble du moule et de la pièce par 2 grands plateaux de refroidissement, chacun composés de 30 tubes de refroidissement. La température initiale des plateaux de refroidissement et de l'air en contact avec le moule est de 22°C. La température initiale du moule et de la pièce est de 364°C. La vitesse de l'air de refroidissement dans les canaux de refroidissement est de 40 m/s. L'intervalle de temps de simulation est de 0 à 1000s avec une étape de 5s. Le coefficient de transfert de chaleur par convection des surfaces extérieures du moule et l'air ambiante est : $h=10W/m^2K$.

Les figures 3.24 et 3.25 démontrent la répartition de la température dans l'ensemble du moule, la pièce concave et les plateaux de refroidissement respectivement après 20s et 1000s de refroidissement.

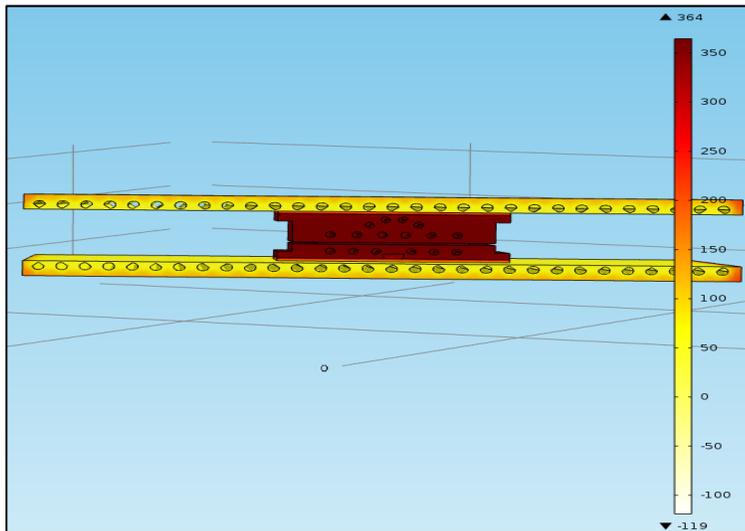


Figure 3.24 La répartition de la température dans le moule après 20s de refroidissement

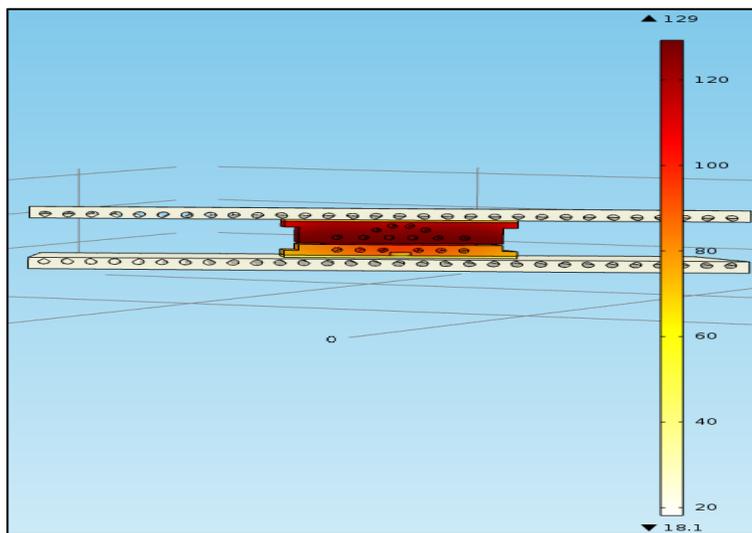


Figure 3.25 La répartition de la température dans le moule après 1000s de refroidissement

3.4.3 Résultat numérique et expérimentale

Contrairement aux autres pièces qui sont chauffées dans le moule, la pièce concave est plus rapidement chauffée dans un four infrarouge. Les résultats de la simulation numérique ont été comparés aux résultats expérimentaux pour valider notre modèle (Lessard, 2014).

La figure 3.26 démontre une comparaison des résultats de simulation de chauffage et de refroidissement avec les résultats expérimentaux.

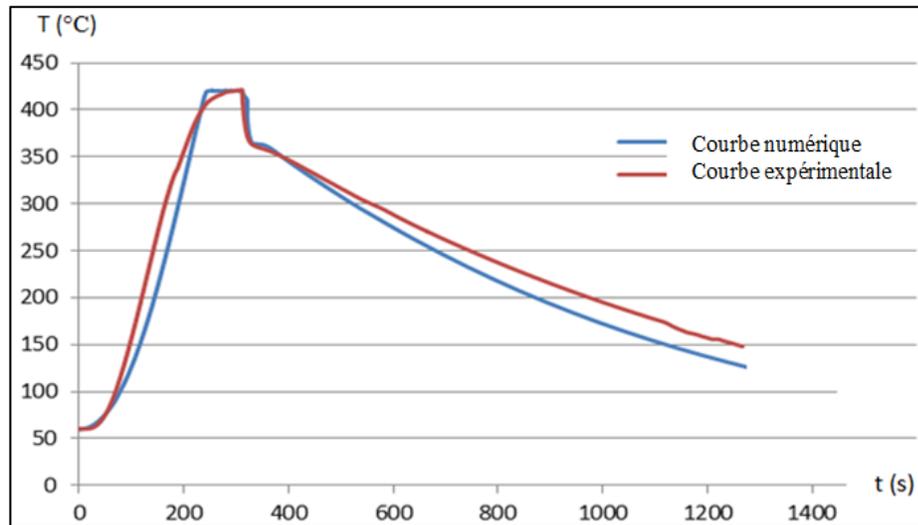


Figure 3.26 La courbe expérimentale et théorique de chauffage et de refroidissement de la pièce concave à une épaisseur de 3.35mm (Lessard, 2014)

3.4.4 L'effet de la largeur et l'épaisseur de la pièce concave sur le cycle de chauffage

Pour étudier l'effet des paramètres géométriques de la pièce concave sur le cycle de chauffage, nous avons augmenté l'épaisseur et la largeur de la pièce sans modifier les paramètres géométriques du four.

Les figures 3.27 et 3.28 représentent respectivement la température en fonction du temps de 1.4 fois de plus l'épaisseur et 1.4 fois de plus la largeur de la pièce concave.

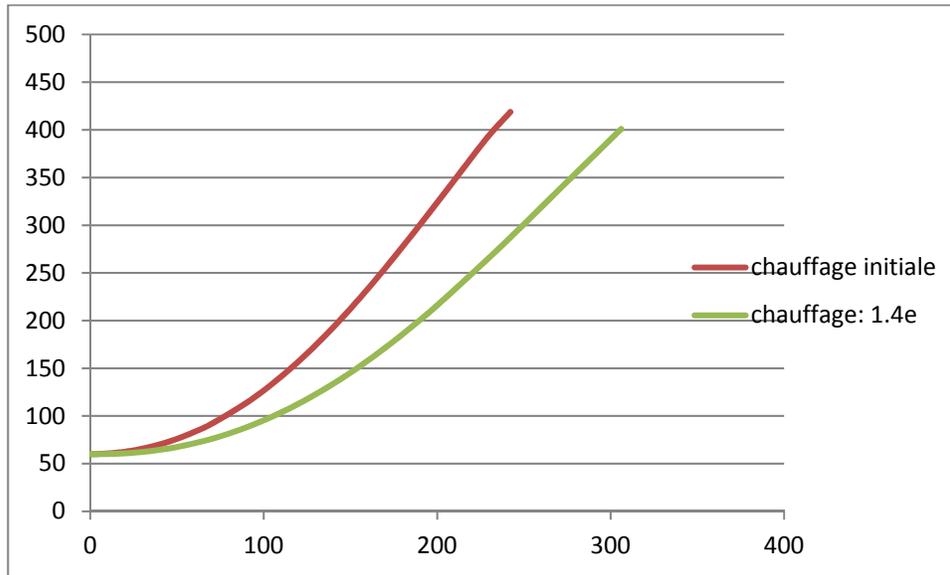


Figure 3.27 L'effet de l'augmentation de l'épaisseur de la pièce sur la température de chauffage de la pièce concave

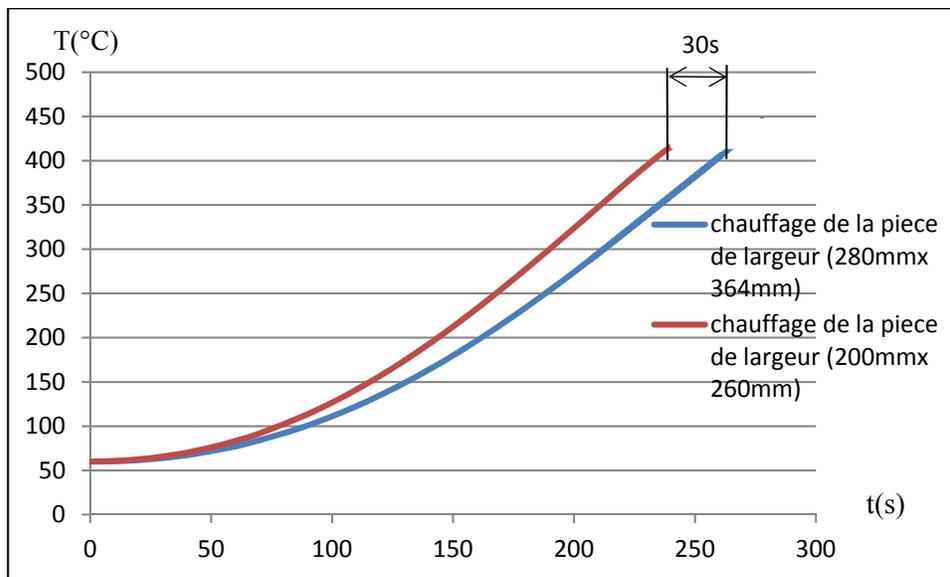


Figure 3.28 L'effet de l'augmentation de la largeur de la pièce sur la température de chauffage de la pièce concave

Pour étudier l'effet de l'épaisseur et de la largeur de la pièce concave sur le cycle de chauffage, nous avons modélisé une pièce plus large et plus épaisse sans modifier les paramètres géométriques du four.

La figure 3.29 représente une comparaison entre le cycle de chauffage en fonction du temps de la pièce initiale de dimension 200mm x260mm x3.34mm avec le cycle de chauffage de la pièce de dimension 280mm x364mm x4.7mm.

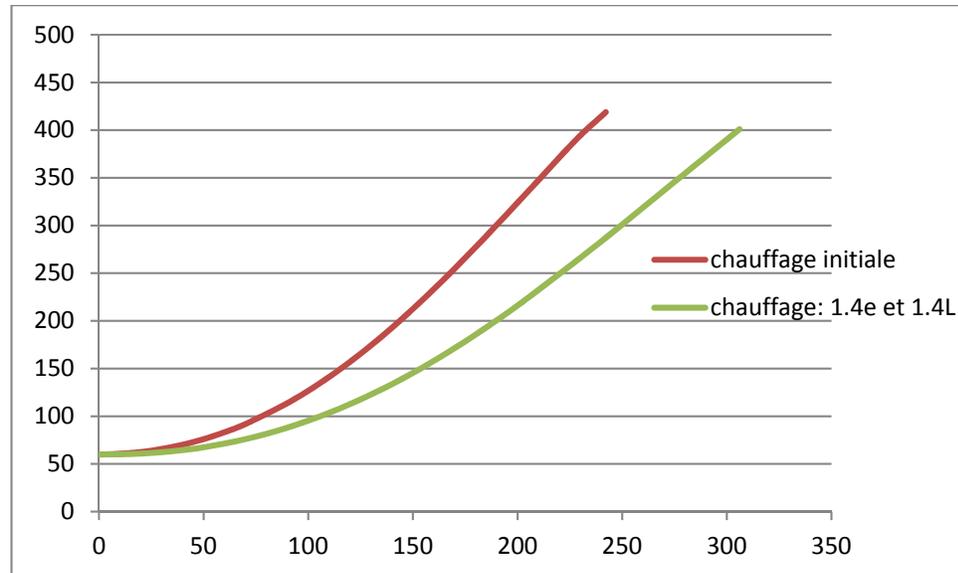


Figure 3.29 L'effet de l'augmentation de la largeur et l'épaisseur de la pièce sur la température de la pièce concave

3.4.5 Discussion

D'après la figure 3.26, La différence moyenne entre les températures de chauffage théoriques et expérimentales est de 18°C. Pour la période de consolidation, la différence moyenne des températures est d'environ 5.65°C. Pour la période de refroidissement, la différence moyenne est de 17.2°C.

D'après les figures 3.27 et 3.28, on remarque que l'augmentation de l'épaisseur de la pièce a plus d'effet sur le cycle de chauffage que l'augmentation de la largeur de la pièce.

D'après la figure 3.29 pour atteindre une température de chauffage de 420°C dans un four infrarouge, la durée de chauffage pour la pièce concave 1.4 fois plus épaisse et 1.4 plus large

est de 320s. Donc la durée de chauffage est beaucoup plus grande comparée à 250s pour la pièce de dimension initiale.

3.5 Conclusion

Les étapes de chauffage, de consolidation et de refroidissement, estimées par les modèles numériques pour les 4 pièces étudiées a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux.

Les résultats de simulation de l'effet de la largeur et de l'épaisseur sur le cycle de fabrication démontrent, en dernière analyse, qu'il n'y a pratiquement aucun effet suite à l'augmentation de l'épaisseur par un facteur de 5 sur le cycle de chauffage et le cycle de refroidissement pour les pièces chauffées dans le moule (la pièce en forme de T, la pièce en forme L et la plaque). Mais ce n'est pas le cas pour la pièce chauffée au four (la pièce concave) car plus l'épaisseur ou la largeur de cette pièce augmente plus le cycle de chauffage est long. L'augmentation de la largeur de la pièce en forme L et la plaque par un facteur de 2 n'a aucun effet sur le cycle de chauffage.

CHAPITRE 4

L'EFFET DE L'ÉPAISSEUR, LA LARGEUR ET LE VOLUME DES PIÈCES SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE

Dans ce chapitre, on se propose d'étudier l'effet de l'épaisseur, du volume et de la largeur des pièces sur la puissance de chauffage, en supposant que le temps de chauffage reste constant pour arriver à l'objectif du travail. Pour ce faire, on garde toujours les mêmes conditions de chauffage mentionnée dans le chapitre 3 et le même point de mesure mentionné dans le chapitre 2.

4.1 Le modèle de la plaque

4.1.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la plaque sur la puissance de chauffage

Pour étudier l'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage, nous avons augmenté l'épaisseur de la plaque et ajusté l'énergie de chauffage jusqu'à ce que la température au centre de la pièce atteigne 380°C dans un même temps de chauffage de 7200s. La figure 4.1 démontre les cycles de chauffage des 5 épaisseurs étudiées de la plaque pour 5 différentes densités surfaciques de puissance (q_0).

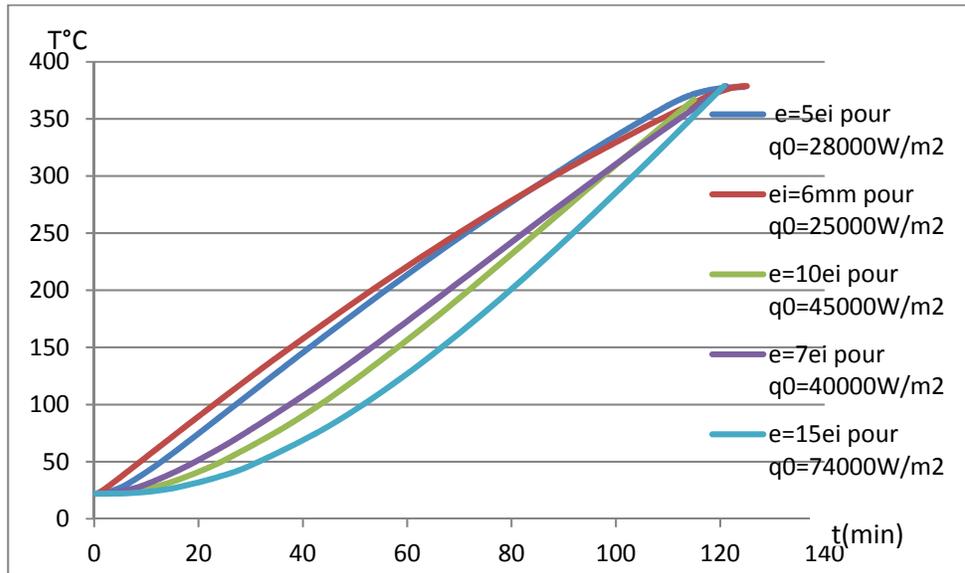


Figure 4.1 Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour 5 épaisseurs de la pièce

Selon cette figure, les 5 épaisseurs étudiées atteignent la température de chauffage de 380°C presque dans la même durée de 120min de chauffage, mais avec des trajectoires différentes. Malgré l'augmentation de la puissance de chauffage, la propagation des températures dans la pièce épaisse est plus longue aux premières minutes de chauffage que la propagation des températures dans une pièce mince. La figure 4.2 démontre la propagation des températures dans la direction de l'épaisseur pour une plaque 5 fois plus épaisse.

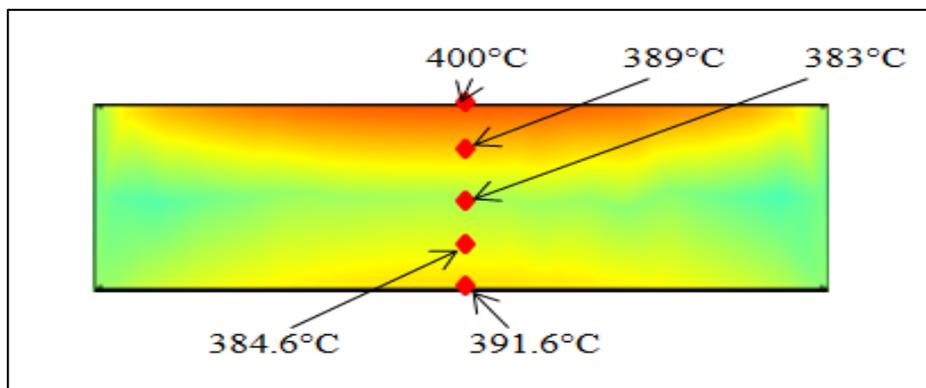


Figure 4.2 La répartition des températures dans la plaque 5 fois plus épaisse après 120min de chauffage

D'après la figure 4.2, on observe la répartition non uniforme des températures dans la pièce. Les surfaces supérieures et inférieures de la plaque sont les plus chauffées puisqu'elles sont le plus près des plateaux de chauffage.

Le tableau 4.1 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 6 épaisseurs étudiées de la plaque :

Tableau 4.1 la variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la plaque

Épaisseur (mm)	P (kW)	q_0 (W/m ²)	Surface des cylindres de chauffage (m ²)
6	22,375	25000	0.895
12	22,375	25000	0.895
30	25,06	28000	0.895
42	35,8	40000	0.895
60	40,275	45000	0.895
90	66,23	74000	0.895

La figure 4.3 démontre l'évolution de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la plaque.

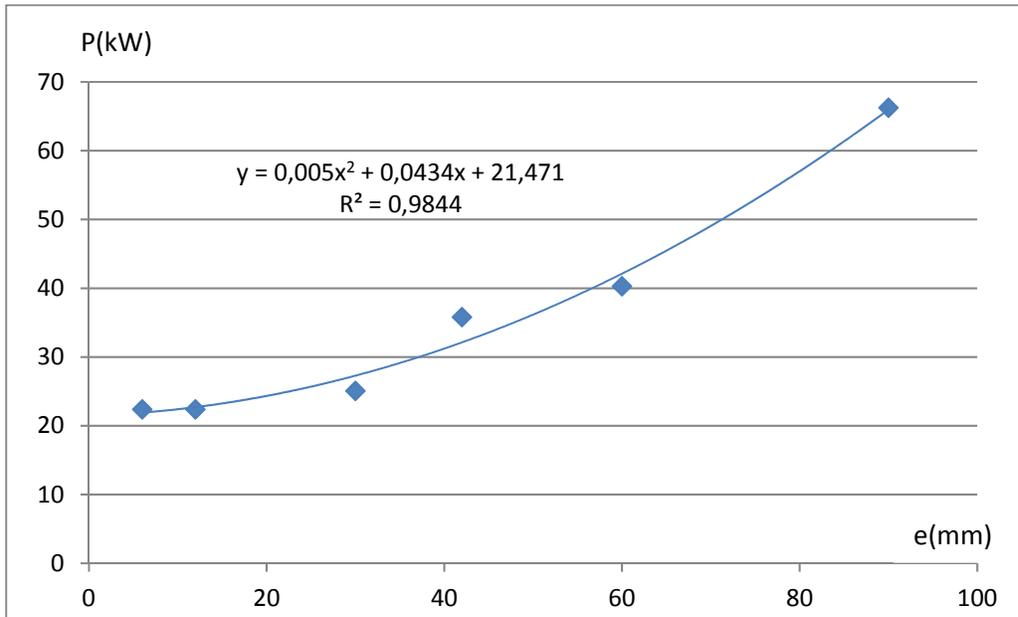


Figure 4.3 L'effet de l'épaisseur de la plaque sur la puissance de chauffage

D'après cette figure, on remarque que la puissance de chauffage augmente progressivement de 25kW pour la plaque d'une épaisseur de 30mm pour atteindre 66kW avec la plaque d'une épaisseur de 90mm.

L'évolution de la puissance de chauffage de la plaque en fonction de l'épaisseur est une fonction polynomiale d'ordre 2 exprimée par l'équation suivante :

$$y = 0,0451x^2 + 0,3912x + 193,41 \quad (4.1)$$

4.1.2 Étude de l'influence du volume de la plaque sur l'énergie de chauffage

Pour étudier l'effet du volume de la plaque sur la puissance de chauffage, nous avons augmenté le volume de l'ensemble du moule et de la pièce et ajusté l'énergie de chauffage jusqu'à ce que la température au centre de la pièce atteigne 380°C dans une période de 7200s. La figure 4.4 représente les cycles de chauffage de 5 différents volumes de la plaque.

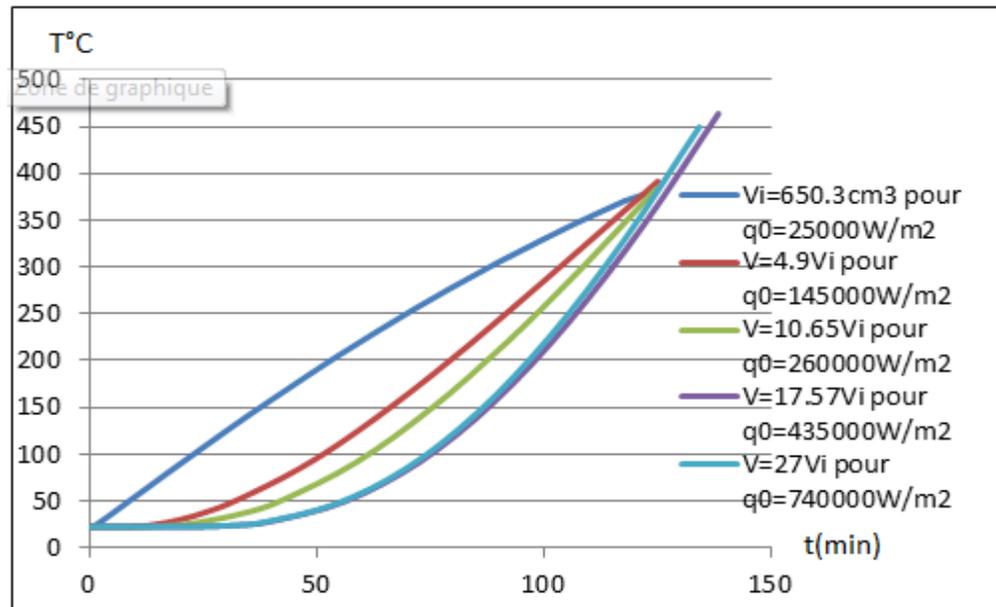


Figure 4.4 Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour 5 volumes différents de la pièce

D'après la figure 4.4, plus le volume de la plaque augmente, plus le temps nécessaire pour que la chaleur atteigne le centre de la pièce est long. La figure 4.5 représente la répartition de la température pour une plaque 4.9 fois plus volumineuse.

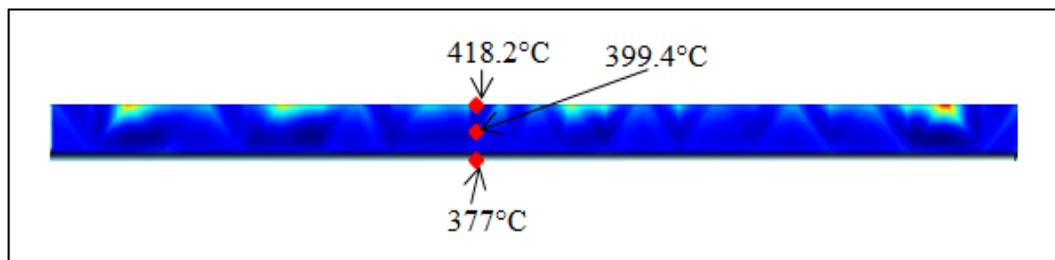


Figure 4.5 La répartition des températures pour 4.9 fois le volume de la plaque après 120min de chauffage

Selon cette figure, il existe une différence de température de chauffage entre la surface supérieure et la surface inférieure de la pièce malgré leurs distances égales par rapport aux plateaux chauffants en raison de la position du cadre du moule qui est en contact uniquement avec le plateau inférieur.

Le tableau 4.2 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 5 volumes étudiés de la plaque.

Tableau 4.2 la variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la plaque et les surfaces des cylindres de chauffage

P(KW)	q_0 (W/m ²)	Volume de la pièce (cm ³)	Coefficient d'augmentation de volume	Échelle
22,375	25000	650,3	1	1
116.91	45000	3195	4,9	1.7
260.16	60000	6925	10,65	2.2
393.64	65000	11430	17,57	2.6
564.34	70000	17560	27	3

La figure 4.6 démontre l'évolution de la puissance de chauffage en fonction du volume de la plaque.

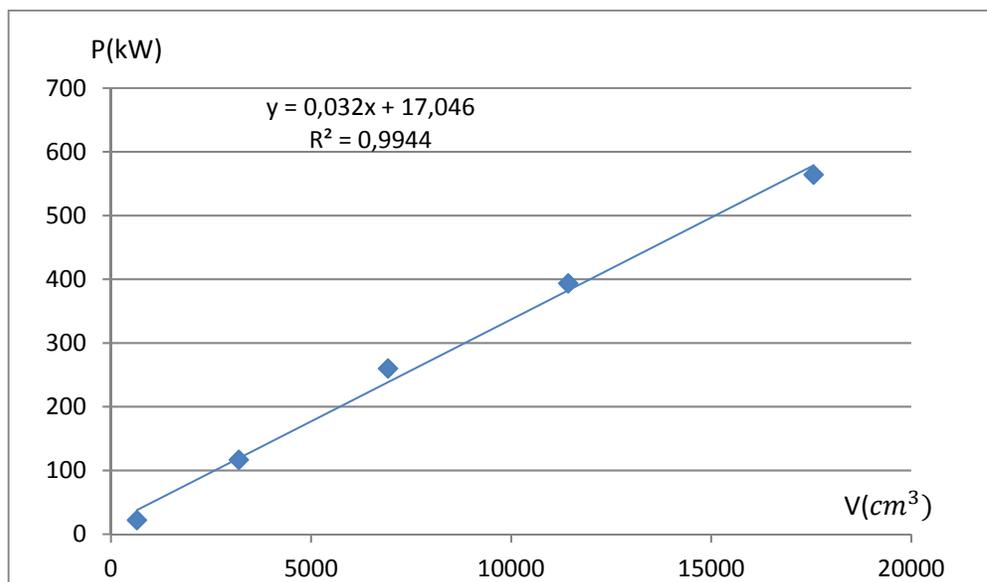


Figure 4.6 L'effet du volume de la plaque sur la puissance de chauffage

Selon cette figure, lorsque le volume de la pièce augmente la puissance de chauffage augmente aussi par une fonction linéaire exprimée avec l'équation suivante :

$$y = 0,032x + 17,046 \quad (4.2)$$

Pour un volume initial de la pièce $V_i=650.3 \text{ cm}^3$ la puissance est de 22.375kW. Lorsque le volume de la pièce augmente par un facteur de 10, la puissance de chauffage augmente par un facteur d'environ 11 fois plus pour atteindre une valeur de 260.16kW.

4.1.3 Étude de l'influence de la largeur de la plaque sur l'énergie de chauffage

Contrairement à l'étude de l'influence de l'épaisseur de la plaque sur l'énergie de chauffage, l'étude de l'effet de la largeur de la plaque nécessite des ajustements de la taille du moule. La figure 4.7 représente les 3 cycles de chauffage en fonction du temps pour les 3 largeurs étudiées de la plaque.

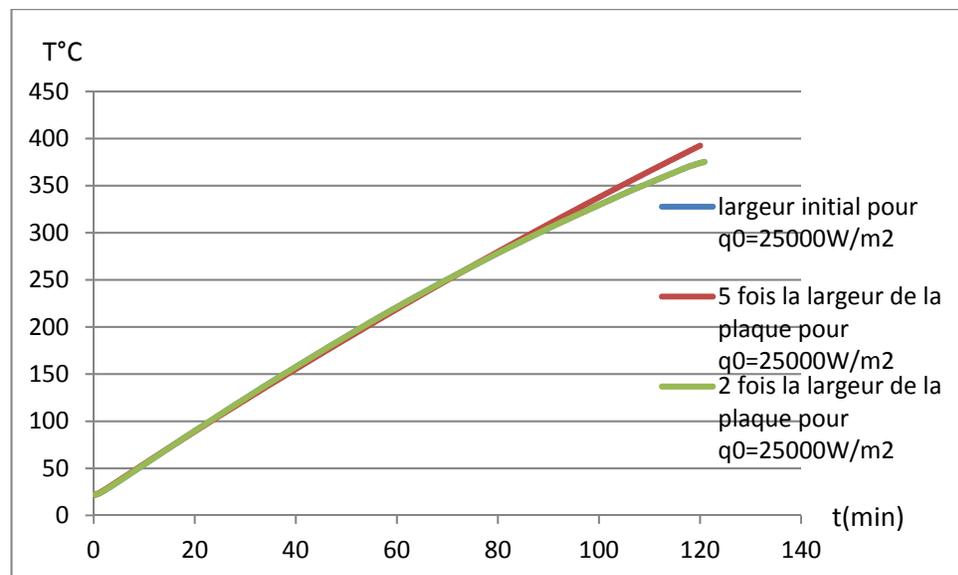


Figure 4.7 Comparaison des cycles de chauffage de la plaque pour les 3 largeurs différentes de la pièce

Selon cette figure, on note que les 3 cycles de chauffage sont confondus et que la densité surfacique de puissance q_0 est constante pour les 3 largeurs étudiées, mais cela ne signifie pas

que la puissance de chauffage est constante puisque elle dépend aussi du nombre des tubes de chauffage. La figure 4.8 démontre la répartition des températures pour une plaque 5 fois plus large.

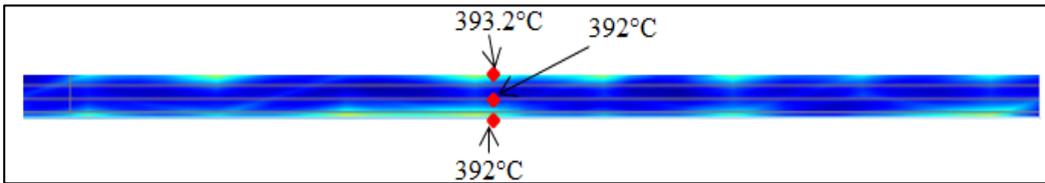


Figure 4.8 La répartition des températures pour la plaque 5 fois la largeur après 120min de chauffage

Le tableau 4.3 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 3 largeurs de la plaque étudiées.

Tableau 4.3 La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la plaque

Coefficient d'augmentation de la largeur de la pièce	q_0 (W/m ²)	P (kW)
1	25000	22,375
3	25000	47,5
5	25000	163,275

Selon le tableau 4.3, la densité surfacique de puissance (q_0) est constante pour les 3 largeurs étudiées mais la puissance de chauffage augmente due à l'augmentation de surface des tubes de chauffage. La figure 4.9 démontre l'évolution de la largeur de la plaque pour un facteur d'augmentation de 3 fois plus et 5 fois plus, en fonction de la puissance de chauffage.

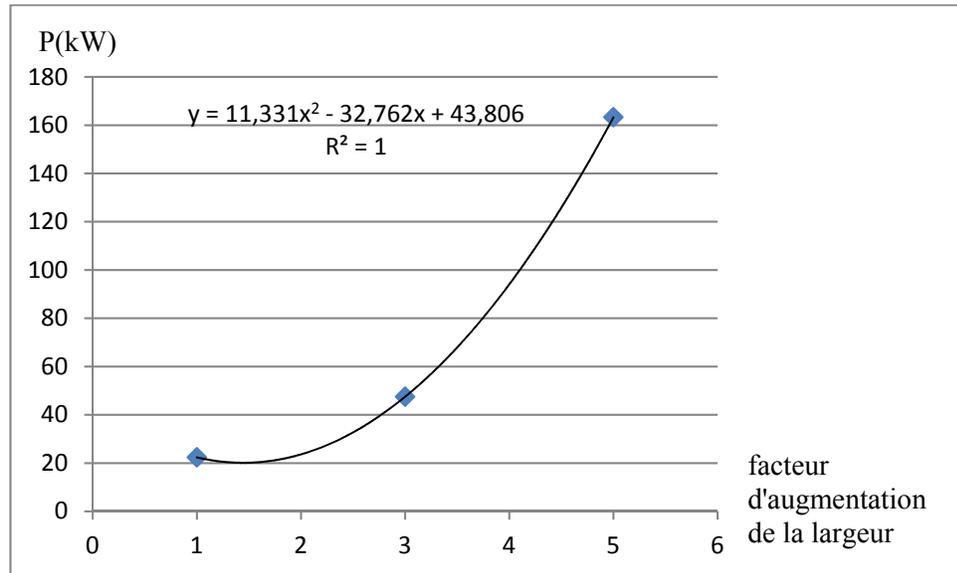


Figure 4.9 L'effet de la largeur de la plaque sur la puissance de chauffage

D'après cette figure, lorsque l'on augmente la largeur de la pièce, la puissance de chauffage augmente aussi d'une fonction polynomiale d'ordre 2 exprimée par l'équation suivante :

$$y = 11,331x^2 - 32,762x + 43,806 \quad (4.3)$$

4.1.4 Discussion

Pour une épaisseur 15 fois plus grande, de la plaque, la puissance de chauffage augmente seulement par un facteur de 3 fois plus. Par contre, pour une largeur de la plaque 5 fois plus grande, la puissance de chauffage augmente par un facteur de 7 fois plus.

L'influence de la largeur d'une plaque 5 fois plus grande sur la puissance de chauffage est beaucoup plus significative que celle de l'épaisseur due à l'augmentation de la largeur des plateaux de chauffage (par un facteur de 3 fois plus) et l'augmentation du nombre des tubes de chauffage (environ 3 fois plus également : 100 vs 32). Par contre, la taille des plateaux de chauffage et le nombre des tubes de chauffage ne changent pas pour le chauffage d'une plaque d'épaisseur 15 fois plus grande.

Pour un volume de la plaque de 3195 cm^3 , la puissance de chauffage nécessaire pour que la température au centre de la pièce atteigne 380°C dans 7200s est comme suit :

- 25.06kW pour une épaisseur de la pièce de 30mm.
- 116.92kW pour une augmentation du volume total de la pièce par la fonction échelle (échelle = 1.7)
- 255kW pour une augmentation de la largeur de la pièce par un facteur de 6.

Pour un même volume de la plaque, on remarque que la puissance de chauffage est très élevée lorsqu'on augmente le volume de la pièce par la largeur mais elle est faible en augmentant le volume de la pièce par l'épaisseur.

4.2 La pièce en forme T

4.2.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage

Pour étudier l'influence de l'épaisseur de la pièce sur l'énergie de chauffage, on a augmenté à chaque simulation l'épaisseur de la pièce et on a calculé l'énergie nécessaire pour que la courbe de chauffage de la pièce épaisse atteigne la température de chauffage de 380°C dans le même temps que la pièce à son épaisseur initiale de 3,17 mm. N'oublions pas que le temps de chauffage et les dimensions du moule sont demeurés les mêmes lors de l'étude de l'influence de l'épaisseur sur l'énergie de chauffage. La figure 4.10 représente les cycles de chauffage des 5 épaisseurs étudiées pour 5 différentes énergies de chauffage en fonction du temps.

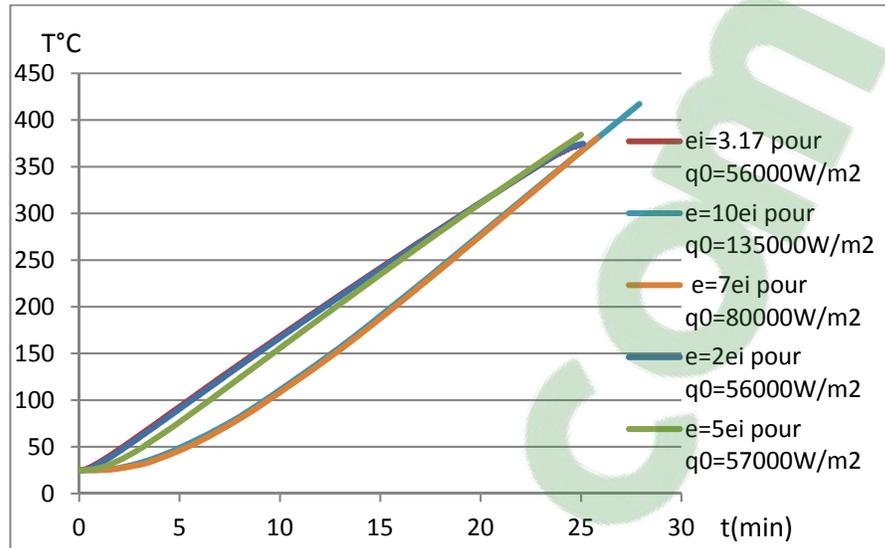


Figure 4.10 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour 5 épaisseurs de la pièce

D'après la figure 4.10, on remarque, jusqu'à un facteur d'augmentation de l'épaisseur de la pièce de 5 fois plus, le cycle de chauffage est presque confondu avec le cycle de chauffage de la pièce à une épaisseur initiale de 3.17mm et la densité surfacique de puissance (q_0) n'a presque pas changé. La figure 4.11 représente la répartition des températures dans la pièce en forme T pour 5 fois l'épaisseur de la pièce.

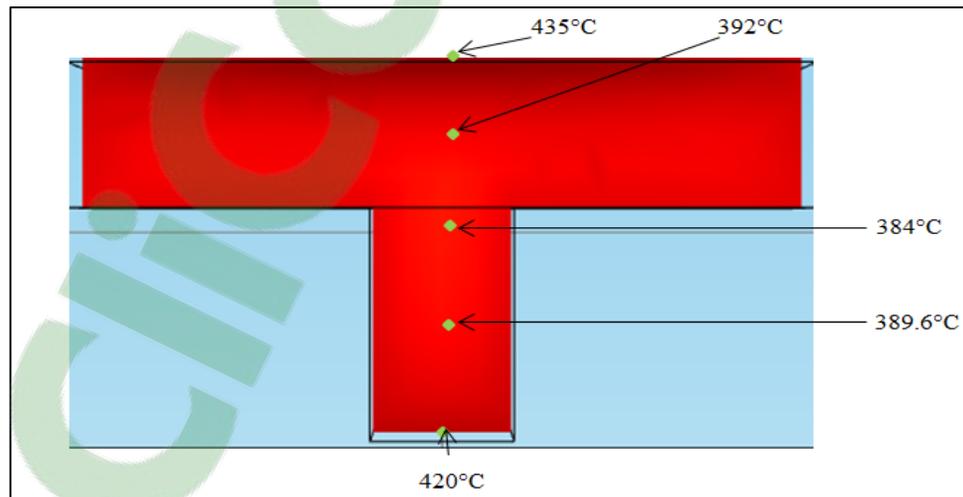


Figure 4.11 La répartition des températures pour 5 fois l'épaisseur de la plaque après 25min de chauffage

Le tableau 4.4 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 5 épaisseurs étudiées de la pièce en forme T.

Tableau 4.4 La variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme T

Épaisseurs (mm)	P (kW)	Surface cylindres de chauffage (m^2)	q_0 (W/m^2)
3,17	1,0892	0,0195	56000
6,34	1,0892	0,0195	56000
15,85	1,10865	0,0195	57000
22,19	1,556	0,0195	80000
31,7	2,62575	0,0195	135000

D'après le tableau 4.4, les surfaces des cylindres de chauffage sont constantes puisque la taille du moule n'a pas changé sachant que la puissance de chauffage (P) égale q_0 multiplié par la surface des cylindres de chauffage. La figure 4.12 démontre l'évolution de puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme T.

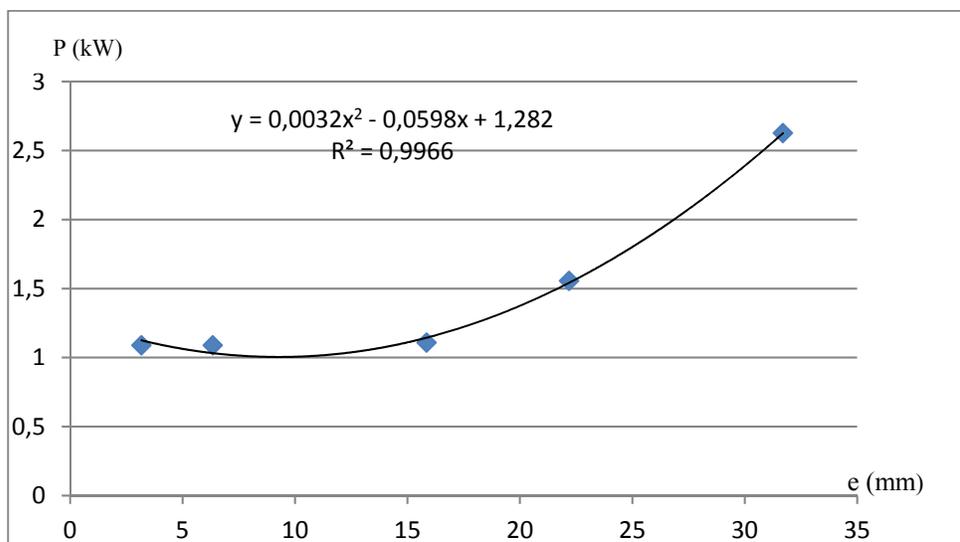


Figure 4.12 L'effet de l'épaisseur sur la puissance de chauffage de la pièce en forme T

La puissance de chauffage augmente de 1.09kW jusqu'à 2.6kW pour un agrandissement de l'épaisseur de la pièce par un facteur de 10 fois plus.

L'évolution de la puissance de chauffage de la pièce en forme T en fonction de l'épaisseur est une courbe polynomiale d'ordre 2 exprimée par l'équation suivante.

$$y = 0.0032x^2 - 0.0598x + 1.282 \quad (4.4)$$

4.2.2 Étude de l'influence du volume de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage

L'étude de l'effet du volume de la pièce en forme T sur la puissance de chauffage consiste à augmenter le volume de la pièce et du moule jusqu'à un facteur de 27 fois plus. Les cycles de chauffage des 5 volumes étudiés de la pièce en forme T en fonction de la densité surfacique de puissance sont représentés dans la figure 4.13.

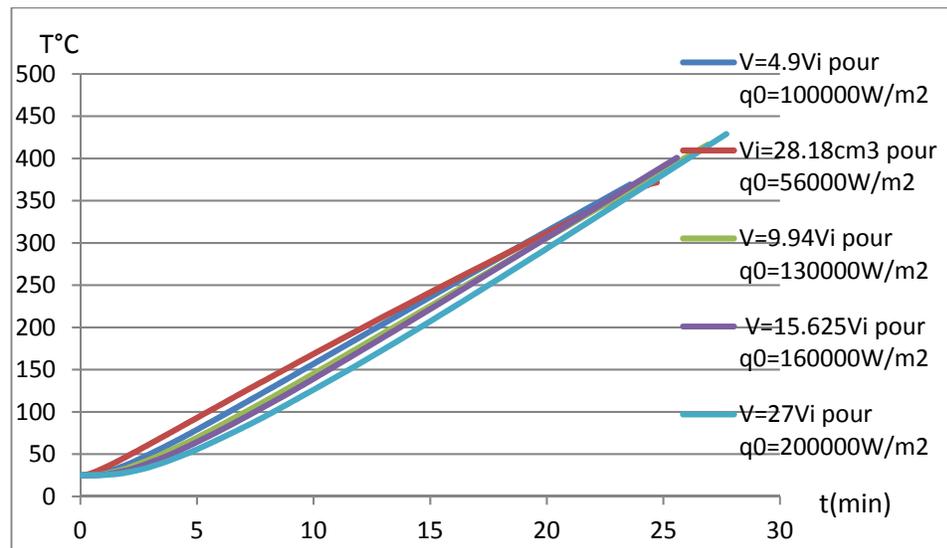


Figure 4.13 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour 5 volumes de la pièce

La figure 4.14 représente la répartition de la température dans la pièce en forme T pour un volume 4.9 fois plus grand.



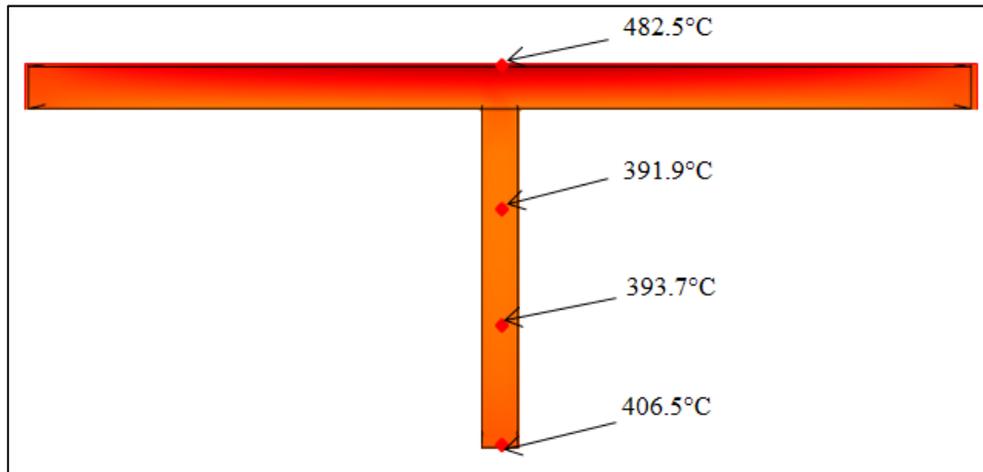


Figure 4.14 La répartition des températures pour 4.9 fois le volume de la pièce en forme T après 25min de chauffage

D'après la figure 4.14, après 25min de chauffage avec une puissance de chauffage de 5,63kW, la température au centre de la pièce est de 391.9°C et la température sur la surface supérieure de la pièce est de 482.5°C.

Le tableau 4.5 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 5 volumes étudiés de la pièce en forme T.

Tableau 4.5 La variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme T

P(kW)	Volume de la pièce (cm^3)	q_0 (W/m^2)	Coefficient d'augmentation du volume	Échelle
1,092	28,18	56000	1	1
5,63	138,5	100000	4,914	1.5
11,713	280,1	130000	9,94	2.15
19,504	440,3	160000	15,625	2.5
35,1	760,9	200000	27	3

La figure 4.15 démontre l'évolution de la puissance de chauffage de la pièce en forme T en fonction du volume de la pièce.

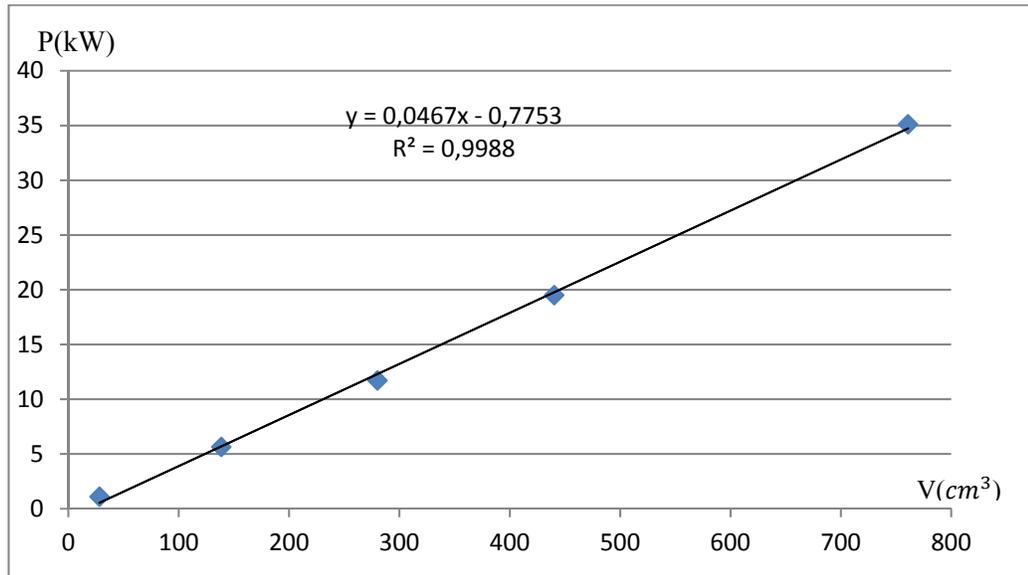


Figure 4.15 L'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce en forme T

D'après cette figure l'évolution de puissance de chauffage de la pièce en forme T en fonction de l'épaisseur est linéaire et exprimée par l'équation suivante :

$$y = 0.0467x - 0,7753 \quad (4.4)$$

4.2.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce en forme T sur l'énergie de chauffage.

La figure 4.16 représente les 3 cycles de chauffage pour les 3 largeurs étudiées en fonction du temps.

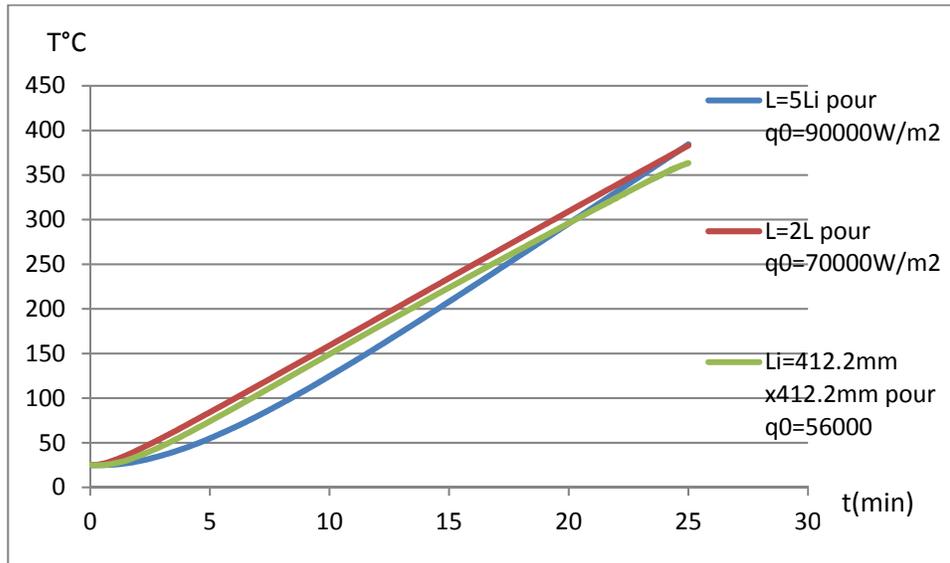


Figure 4.16 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme T pour les 3 largeurs de la pièce

D'après cette figure, plus la largeur de la pièce augmente, plus la puissance de chauffage augmente et plus le trajet de chauffage change. La figure 4.17 démontre la répartition des températures dans la pièce en forme T pour 5 fois la largeur de la pièce.

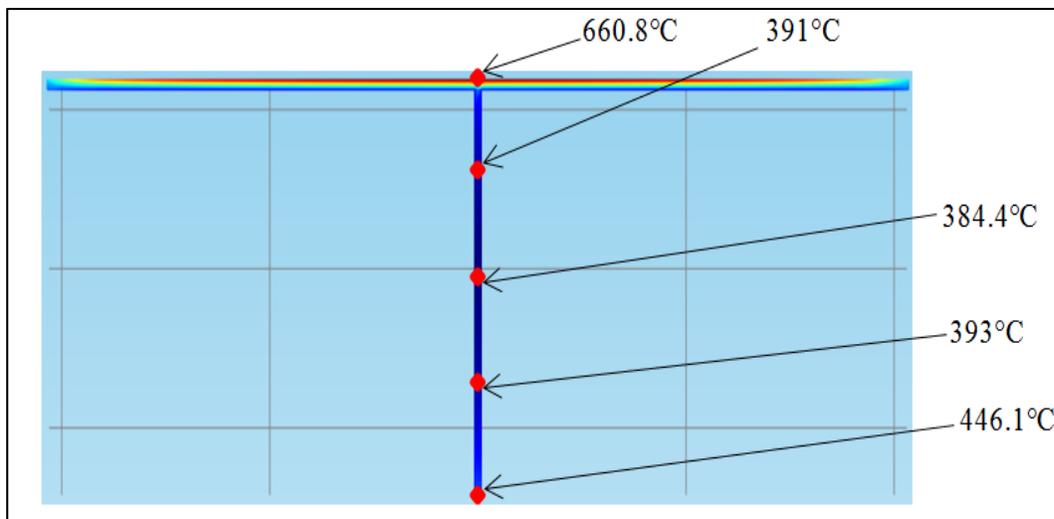


Figure 4.17 La répartition de la température dans la pièce en forme T après 25min de chauffage pour 5 fois la largeur de la pièce

Selon cette figure, pour atteindre une température de 384,4 ° C au centre de la pièce dans un temps de 25min avec une puissance de 68.13kW, la température de la surface supérieure de la pièce est de 660.8°C. Cette température est très élevée par rapport à la température de chauffage de 380°C et peut endommager la surface de la pièce.

Le tableau 4.3 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 3 largeurs étudiées de la pièce en forme T.

Tableau 4.6 La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce en forme T

Coefficient d'augmentation de largeur	q_0 (W/m ²)	P (kW)
1	56000	1,092
2	70000	5,447
5	90000	68.13

La figure 4.6 démontre l'évolution de la largeur de la pièce en forme T pour un facteur d'augmentation de la largeur de 2 fois plus et 5 fois plus en fonction de la puissance de chauffage.

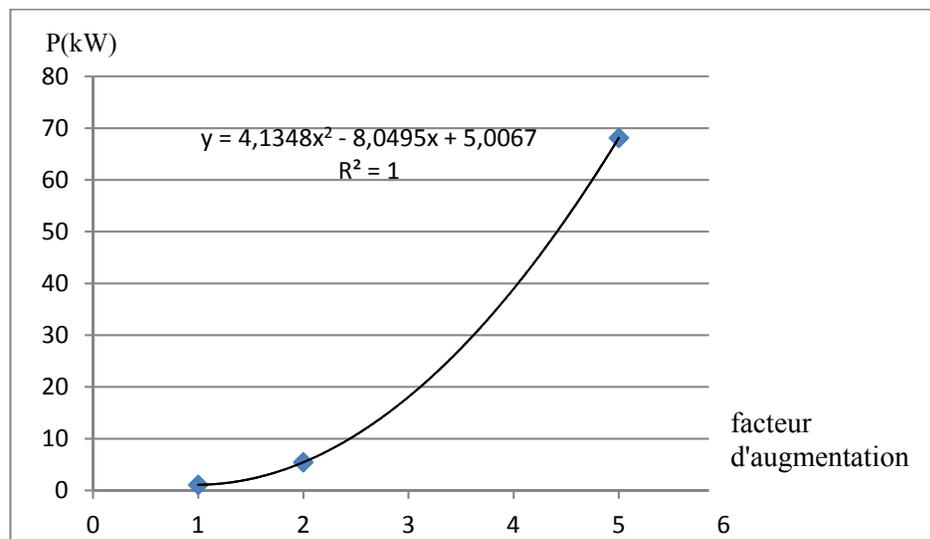


Figure 4.18 L'effet de la largeur de la pièce en forme T sur la puissance de chauffage

D'après cette figure, lorsqu'on augmente la largeur de la pièce en forme T, la puissance de chauffage augmente aussi d'une fonction polynomiale d'ordre 2 exprimée par l'équation suivante :

$$y = 4,1348x^2 - 8,0495x + 5,0067 \quad (4.6)$$

4.2.4 Discussion

Les trois raisons pour lesquelles la puissance de chauffage de la pièce en forme T est beaucoup plus faible que la puissance de chauffage de la plaque sont comme suit :

- 1 Le nombre limité des tubes de chauffage ;
- 2 La courte durée de chauffage ;
- 3 La faible puissance de chauffage.

L'évolution de la puissance de chauffage de la pièce en forme T, en fonction de l'épaisseur est une fonction polynomiale d'ordre 2 d'après la figure 4.12. Mais, l'évolution de la puissance chauffage de la pièce en forme T, en fonction du volume de la pièce est une fonction linéaire d'après la figure 4.15 due à l'augmentation de la taille du moule et l'aire de surface des cylindres de chauffage.

L'augmentation de la largeur de la pièce en forme T a plus d'effet sur la puissance de chauffage comparé à l'augmentation de l'épaisseur et du volume de cette pièce, en dépit du fait que les facteurs d'augmentations de volume et de l'épaisseur sont supérieurs. Il est démontré que l'augmentation de la largeur de la pièce a plus d'effet sur la puissance de chauffage due à la forme de la pièce qui nécessite une augmentation latérale et longitudinale de la taille du moule puisqu'une plus grande quantité de matériaux à chauffer nécessite invariablement plus d'énergie.

Pour un volume de la pièce en forme T de 280.1cm^3 , la puissance de chauffage nécessaire pour que la température au centre de la pièce atteigne 380°C dans 25min est comme suit :

- 2.62kW pour une épaisseur de la pièce de 31.5mm.

- 11.713kw pour une augmentation du volume de la pièce par la fonction échelle (échelle = 2.15)
- 205kW pour une augmentation de la largeur de la pièce par un facteur de 8.

Pour un même volume de la pièce, on remarque une grande différence entre les puissances de chauffage pour la pièce d'une épaisseur de 31.5mm et la pièce 8 fois plus large due à l'augmentation de la largeur du moule et du nombre des tubes de chauffage pour cette dernière ce qui invariablement nécessite une plus grande puissance de chauffage.

4.3 La pièce en forme L

4.3.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage

Les cycles de chauffage des 4 épaisseurs étudiées jusqu'à une température de chauffage de 380°C pour 4 densités de puissance différentes sont présentés dans la figure 4.19.

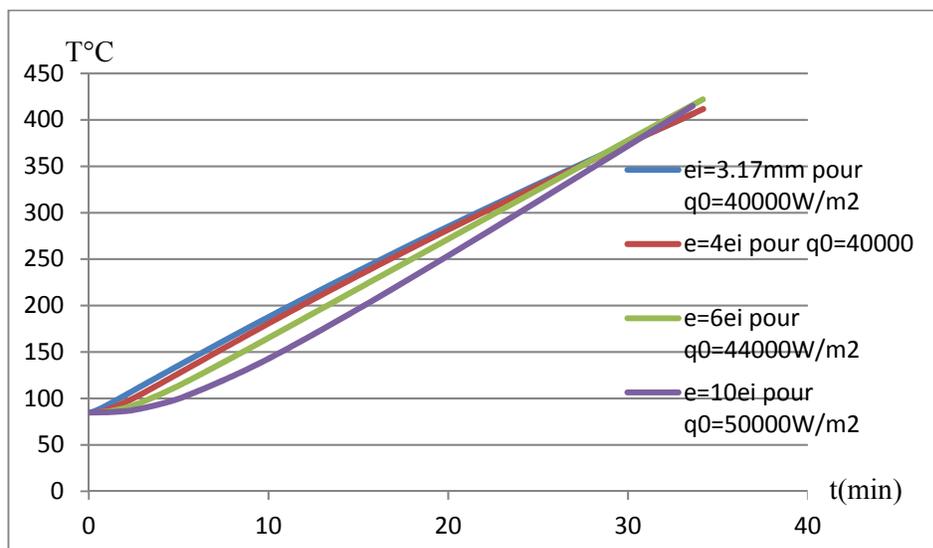


Figure 4.19 Comparaison des cycles de chauffage des 4 épaisseurs étudiées de la pièce en forme L

La répartition de la température dans la pièce 6 fois plus épaisse, après 30min de chauffage est présentée dans la figure 4.20.

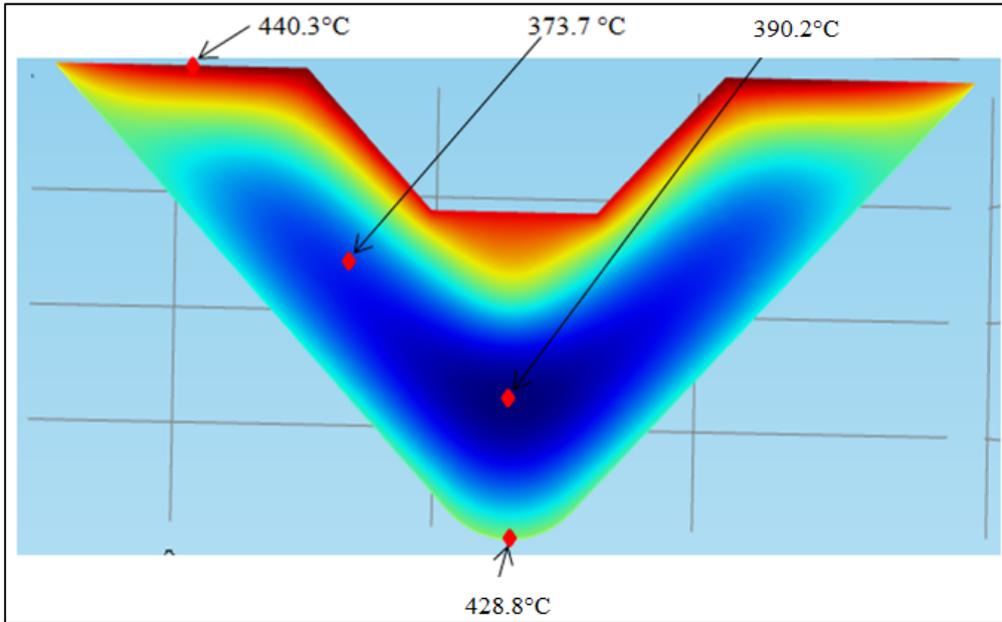


Figure 4.20 La répartition de la température dans la pièce en forme L après 30min de chauffage pour 6 fois l'épaisseur de la pièce

Selon cette figure, il est noté que les surfaces extérieures de la pièce sont chauffées plus vite que le centre de la pièce en raison de leur contact direct avec le moule. La surface supérieure de la pièce est chauffée à 440.3°C dans une période de 30min alors que le centre de la pièce n'atteint que 373.7°C.

Le tableau 4.7 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 4 épaisseurs étudiées de la pièce en forme L.

Tableau 4.7 La variation de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme L

q_0 (W/m ²)	e (mm)	Surface des cylindres de chauffage (m ²)	P (kW)
40000	3,17	0.1945	0,778
40000	12,68	0.1945	0,778
44000	19	0.04308	1,89552
50000	31,7	0.0688	3,44

La figure 4.21 représente la variation de puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme L pour le même temps de chauffage.

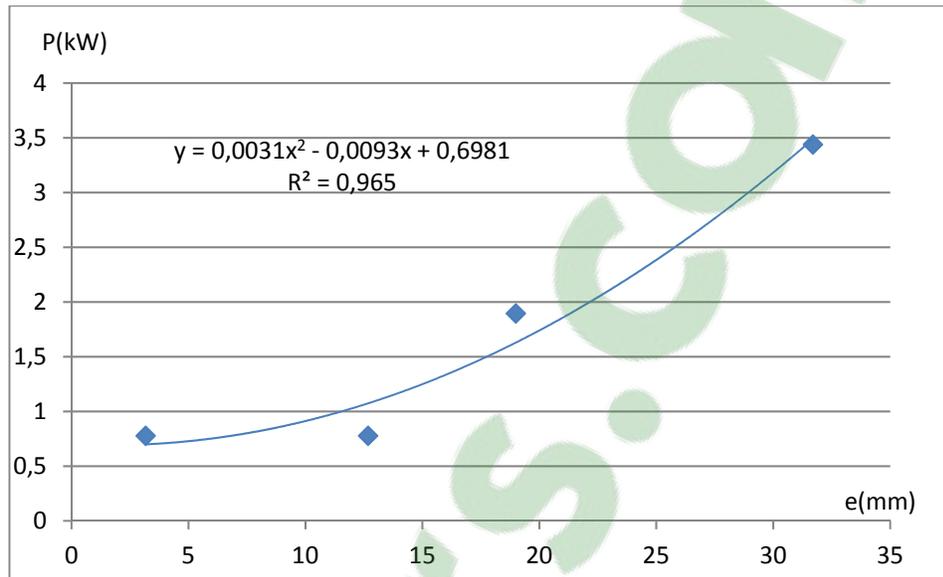


Figure 4.21 L'effet de l'épaisseur de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage

L'énergie de chauffage a augmenté plus que le double pour un facteur d'augmentation d'épaisseur de 6 fois plus pour la pièce en forme L. Le profil de variation de la puissance en fonction de l'épaisseur de la pièce en forme L est polynomiale d'ordre 2 et exprimée par l'équation suivante :

$$y = 0,0031x^2 - 0,0093x + 0,6981 \quad (4.7)$$

4.3.2 Étude de l'influence du volume de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage

L'étude de l'effet du volume de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage consiste à augmenter le volume de la pièce et du moule jusqu'à un facteur de 27 fois plus. Les cycles de chauffage des 5 volumes étudiés de la pièce en forme L en fonction de la densité surfacique de puissance sont représentés dans la figure 4.22.

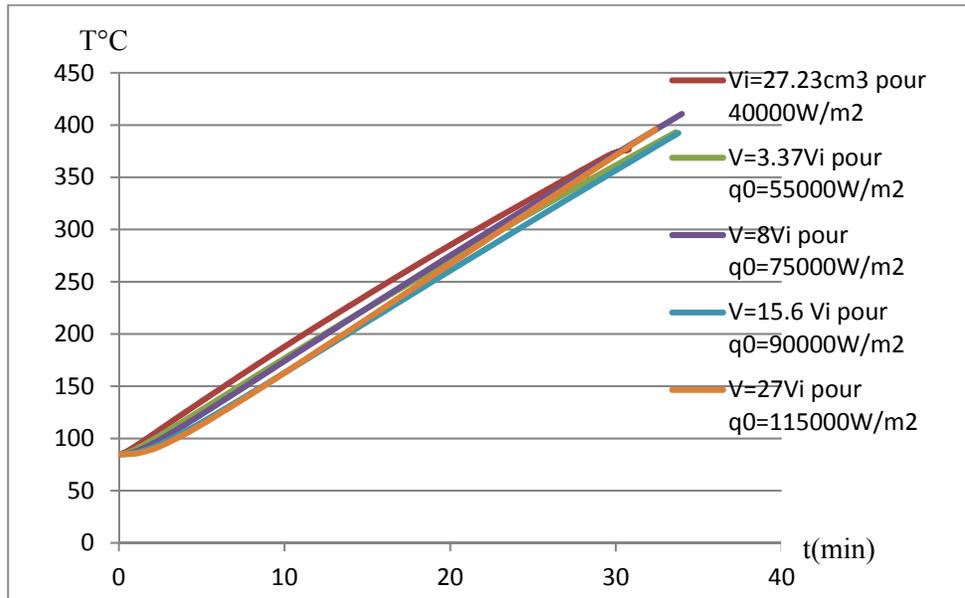


Figure 4.22 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme L pour les 5 volumes étudiés

La figure 4.23 démontre la répartition des températures à l'intérieur de la pièce en forme L pour 8 fois plus le volume de la pièce.

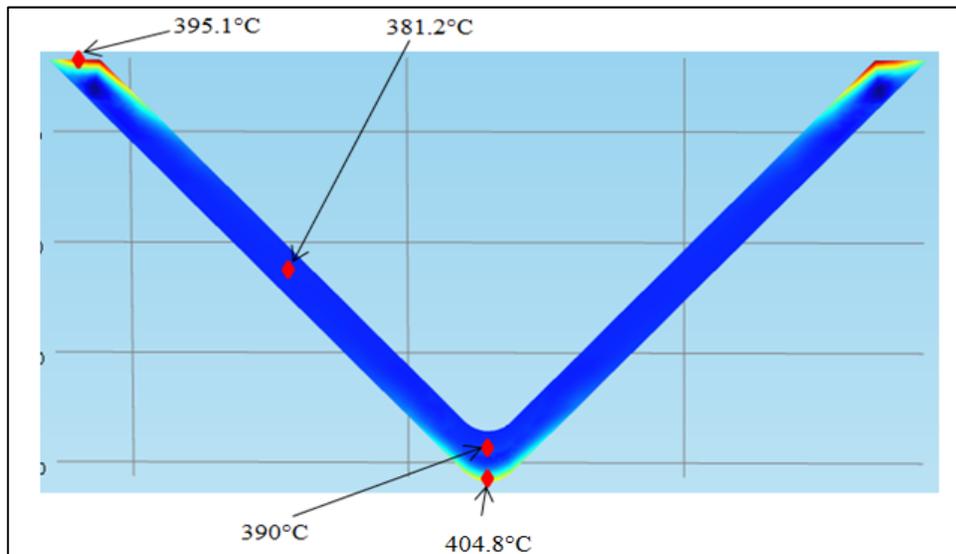


Figure 4.23 La répartition de la température dans la pièce en forme L après 30 min de chauffage pour 8 fois plus le volume de la pièce

Tableau 4.8 La variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme L

P (kW)	Volume de la pièce (cm ³)	Coefficient d'augmentation du volume	q_0 (W/m ²)	Échelle
0,778	27,23	1	40000	1
2,413	91,91	3,37	55000	1,5
5,85	217,9	8	75000	2
10,97	425,5	15,6	90000	2,5
20,18	735,2	27	115000	3

La figure 4.24 représente la variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme L, pour le même temps de chauffage sachant que le volume du moule a augmenté d'un même facteur d'augmentation que le volume de la pièce.

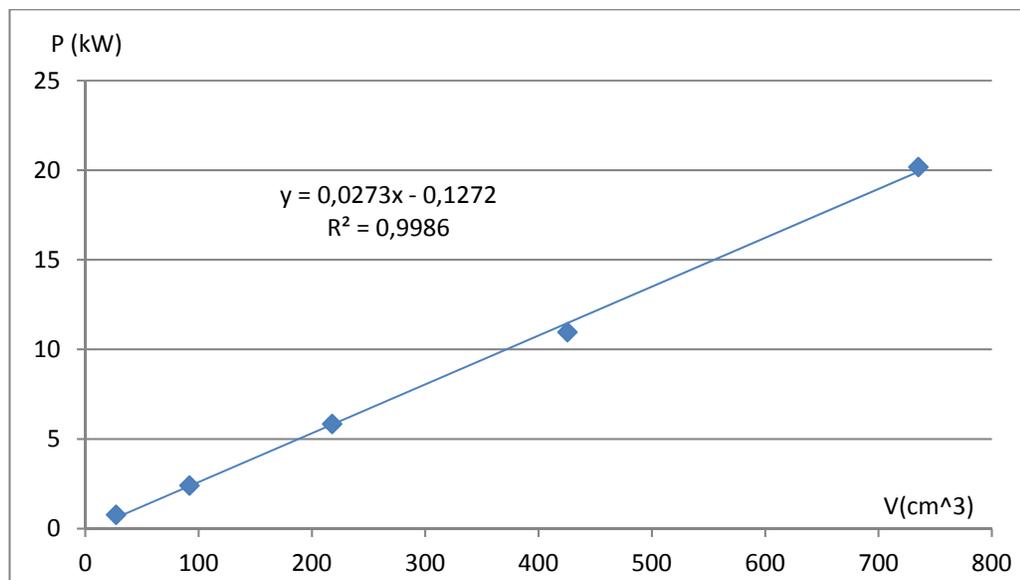


Figure4.24 L'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce en forme L

Comme pour la pièce en forme T, l'évolution de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce en forme L est une droite exprimée par l'équation suivante :

Clicours.COM

$$y = 0,0273x - 0,1272 \quad (4.8)$$

4.3.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce en forme L sur l'énergie de chauffage.

Pour étudier l'effet de la largeur de la pièce en forme de L sur l'énergie de chauffage, il est nécessaire que les cycles de chauffage des 3 largeurs étudiées atteignent la température de chauffage de 380°C dans le même temps. La figure 4.25 démontre les cycles de chauffage et les densités surfaciques de puissance nécessaires pour atteindre 380°C en 30min.

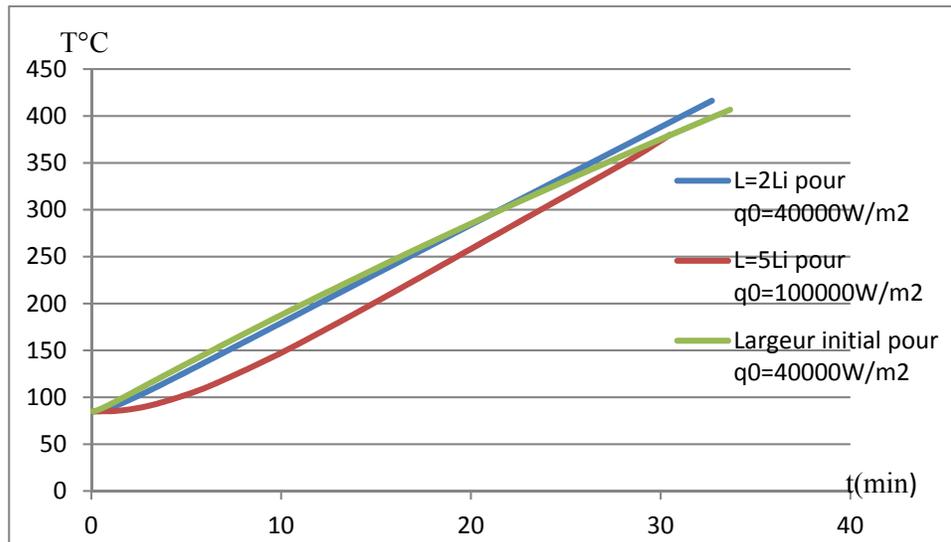


Figure 4.25 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce en forme L pour les 3 largeurs de la pièce

La figure 4.26 représente la répartition des températures dans la pièce en forme L après 30min de chauffage.

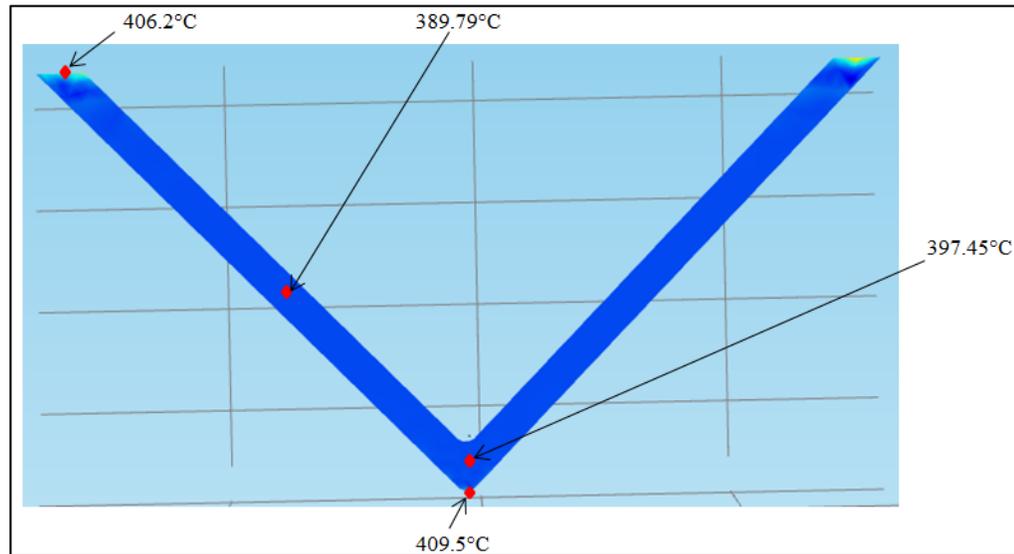


Figure 4.26 La répartition de la température dans la pièce en forme L pour 2 fois plus la largeur de la pièce

Le tableau 4.9 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage pour les 3 largeurs étudiées de la pièce en forme L.

Tableau 4.9 La variation de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce en forme L

q_0 (W/m^2)	Coefficient d'augmentation de la largeur	P (kW)
40000	1	0,776
40000	2	2,64
100000	5	36,7

La figure 4.27 démontre l'évolution de la largeur de la pièce en forme L pour un facteur d'augmentation de 2 fois et 5 fois plus sur la puissance de chauffage pour le même temps de chauffage.

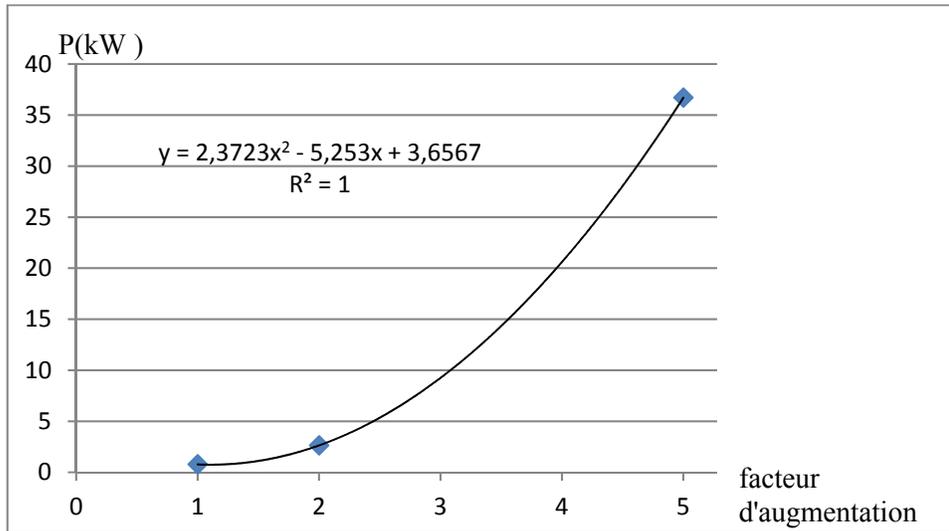


Figure 4.27 L'effet de la largeur de la pièce en forme L sur la puissance de chauffage

Selon cette figure, lorsque l'on augmente la largeur de la pièce en forme L, la puissance de chauffage augmente aussi d'une fonction polynomiale d'ordre 2 exprimée par l'équation suivante :

$$y = 2,3723x^2 - 5,253x + 3,6567 \quad (4.9)$$

4.3.4 Discussion

La pièce en forme L a la même dimension et la même structure du moule que la pièce en forme T. Pour la même épaisseur des pièces, la puissance de chauffage de la pièce en forme L est moindre que celui de la pièce en forme T due à la différence des conditions initiales de chauffage sachant que la température initiale de chauffage pour la pièce en forme L est de 80°C alors que la température initiale de chauffage de la pièce en forme T est de 25°C.

Pour un volume de la pièce en forme L de 91.91 cm^3 , la puissance de chauffage nécessaire pour que la température au centre de la pièce atteigne 380°C dans 30min est comme suit :

- 0.778kW pour une épaisseur de la pièce de 11mm.
- 2.41kw pour une augmentation du volume de la pièce par la fonction échelle (échelle = 1.5)

- 1.58kW pour une augmentation de la largeur de la pièce par un facteur de 1.7.

Contrairement à la plaque et la pièce en forme T, pour un même volume de la pièce en forme L, on remarque que l'augmentation du volume de la pièce par la fonction échelle a le plus d'effet sur la puissance de chauffage que l'augmentation du volume de la pièce par la largeur ou l'épaisseur.

Le fait que l'augmentation de l'épaisseur de la pièce a le moindre effet sur l'énergie de chauffage comparé à l'effet du volume et de la largeur de la pièce est donc conclu.

4.4 La pièce en forme concave

4.4.1 Étude de l'influence de l'épaisseur de la pièce concave sur l'énergie de chauffage

L'étude de l'effet de l'épaisseur de la pièce concave sur l'énergie de chauffage consiste à chauffer les 5 épaisseurs étudiées dans un four infrarouge avec des puissances de chauffages différentes jusqu'à une température de chauffage de 420°C pour un temps de 250s. La figure 4.28 représente les cycles de chauffage des épaisseurs étudiées en fonction du temps.

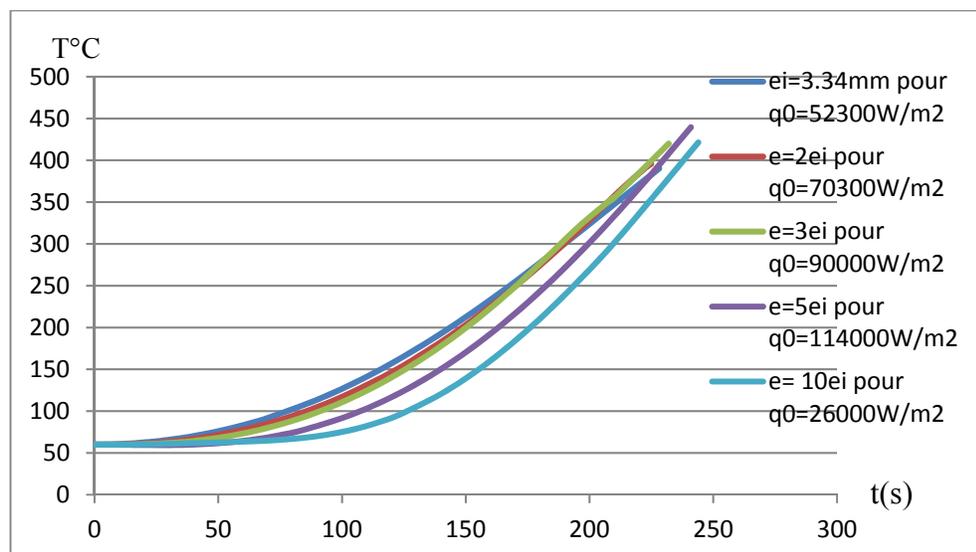


Figure 4.28 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 5 épaisseurs de la pièce

La figure 4.29 démontre la répartition de la température dans la pièce concave après 250s de chauffage pour 5 fois plus l'épaisseur de la pièce.

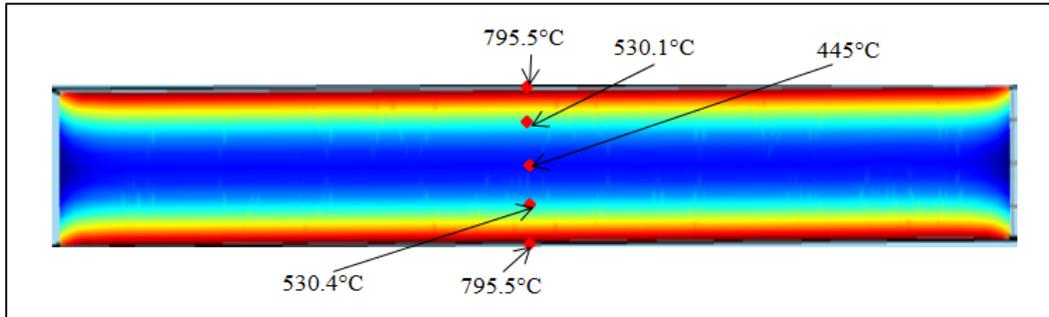


Figure 4.29 La répartition de la température dans la pièce concave pour 5 fois plus l'épaisseur de la pièce

Selon cette figure, il est noté que les surfaces supérieures et inférieures de la pièce sont chauffées jusqu'à 795,5°C avec une puissance de chauffage de 54,1272kW alors que la température au centre de la pièce n'est que de 445°C. Le tableau 4.10 représente les puissances de chauffage et les surfaces des éléments de chauffage pour les 4 épaisseurs étudiées de la pièce concave dans le four.

Tableau 4.10 La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction de l'épaisseur de la pièce concave

P (kW)	q_0 (W/m^2)	Surface des éléments de chauffage (m^2)	Épaisseur de la pièce (mm)
24,83204	52300	0.4748	3,35
33,37844	70300	0.4748	6,7
42,732	90000	0.4748	10,7
54,1272	114000	0.4748	16,75
123,448	260000	0.4748	33,5

D'après ce tableau, plus l'épaisseur de la pièce augmente plus la puissance de chauffage augmente sachant que la puissance de chauffage du moule à vide de 9.5kW est demeuré constante pour les 5 épaisseurs de la pièce étudiées. La figure 4.30 représente la variation de puissance de chauffage de la pièce concave dans le four en fonction de l'épaisseur.

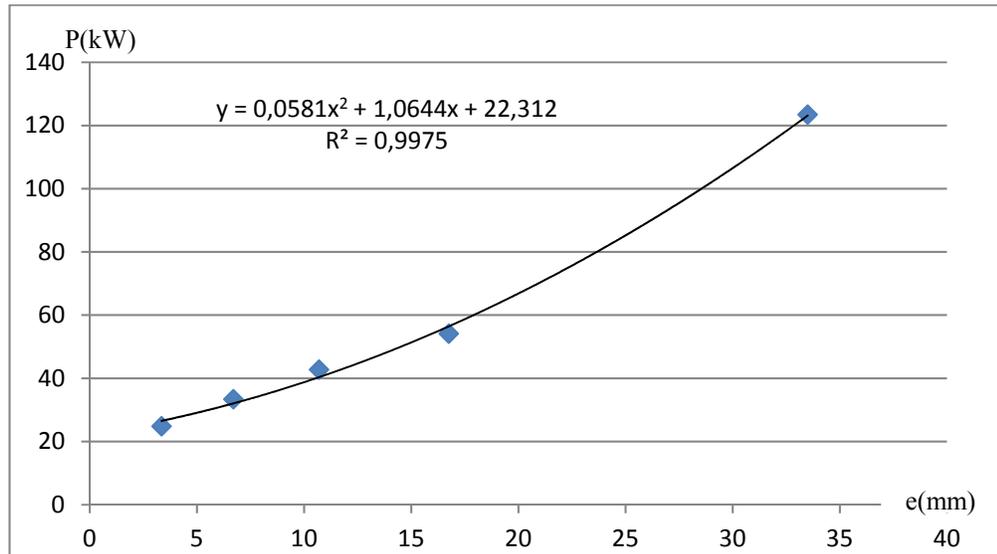


Figure 4.30 L'effet de l'épaisseur de la pièce sur la puissance de chauffage de la pièce concave dans le four

D'après cette figure, l'évolution de la puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce concave est une fonction polynomiale d'ordre 2 et exprimée par l'équation :

$$y = 0,0581x^2 + 1,0644x + 22,312 \quad (4.10)$$

4.4.2 Étude de l'influence du volume de la pièce concave sur l'énergie de chauffage

L'étude de l'effet du volume de la pièce sur l'énergie de chauffage consiste à augmenter la largeur, l'épaisseur et la profondeur de la pièce d'un même facteur et de chauffer le centre de la pièce à une température de 420°C dans un four infrarouge pour 250s. Les cycles de chauffage des 3 volumes de la pièce concave, chauffée dans le four, sont illustrés dans la Figure 4.31.

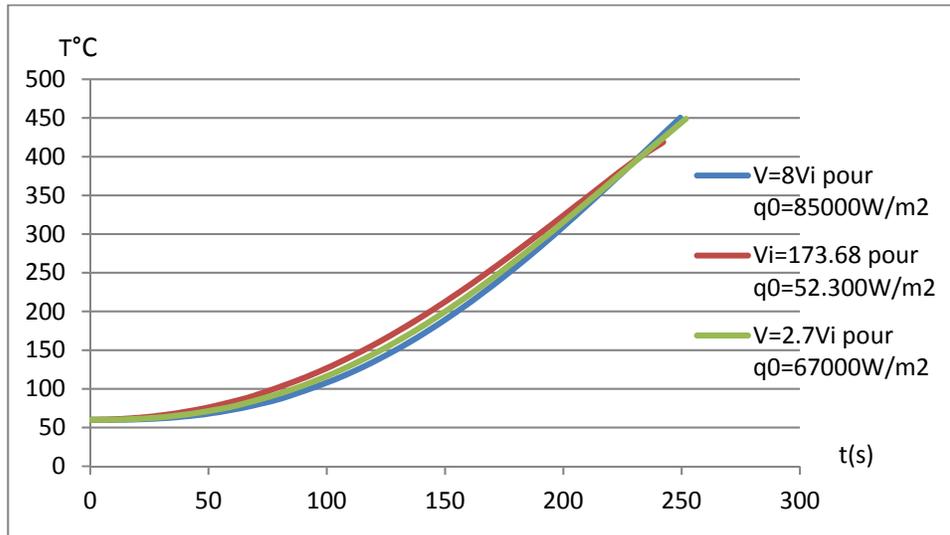


Figure4.31 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 3 volumes de la pièce

La figure 4.32 démontre la répartition de la température dans la pièce concave après 250s de chauffage, pour 8 fois plus le volume de la pièce.

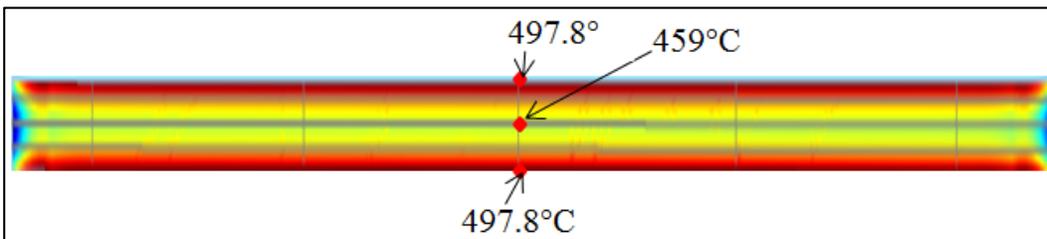


Figure 4.32 La répartition de la température dans la pièce concave pour 8 fois plus le volume de la pièce

Le tableau 4.11 représente les puissances de chauffage et les surfaces des éléments de chauffage du four pour les 3 volumes étudiés de la pièce concave.

Tableau 4.11 La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction du volume de la pièce concave

q_0 (W/m ²)	Volume de la pièce (cm ³)	P (kW)	Échelle
52300	173,68	24,83	1
67000	476,6	62,31	1,4
85000	1389	161,41	2

Le tableau 4.12 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage du moule à vide pour les 3 volumes étudiés de la pièce concave.

Tableau 4.12 La variation de la puissance de chauffage du moule à vide en fonction du volume de la pièce concave

q_0 (W/m ²)	Surface des cylindres de chauffage (m ²)	P (kW)	Échelle
53000	0,1792	9,49	1
60000	0,357	21,42	1,4
75000	0,729	54,67	2

La figure 4.33 représente la variation de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce concave pour le même temps de chauffage dans le four.

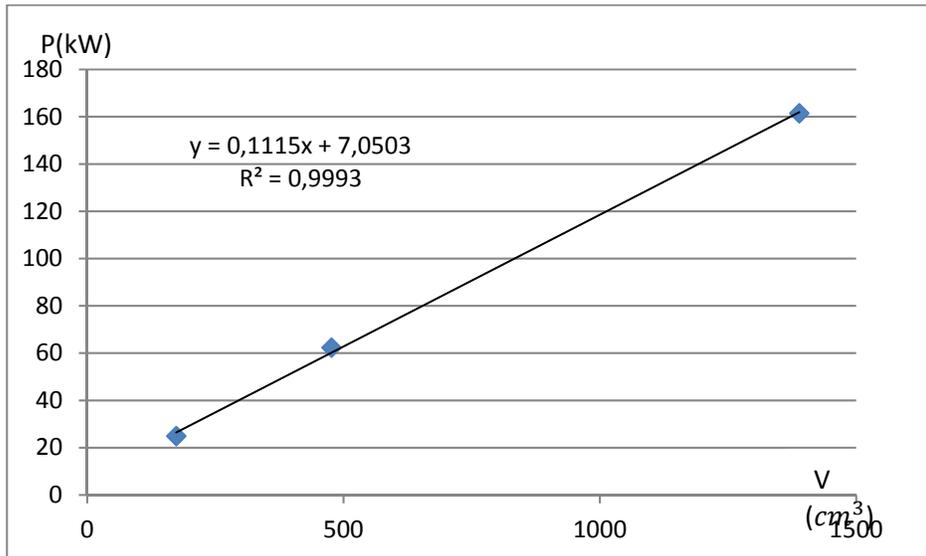


Figure 4.33 l'effet du volume sur la puissance de chauffage de la pièce concave

L'évolution de la puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce concave dans le four est une droite exprimée par l'équation suivante :

$$y = 0,1115x + 7,0503 \quad (4.11)$$

4.4.3 Étude de l'influence de la largeur de la pièce concave sur l'énergie de chauffage

Les cycles de chauffage, des 3 largeurs étudiées, sont représentées dans la figure 4.34 sachant que le temps de chauffage est de 250s dans un four infrarouge.

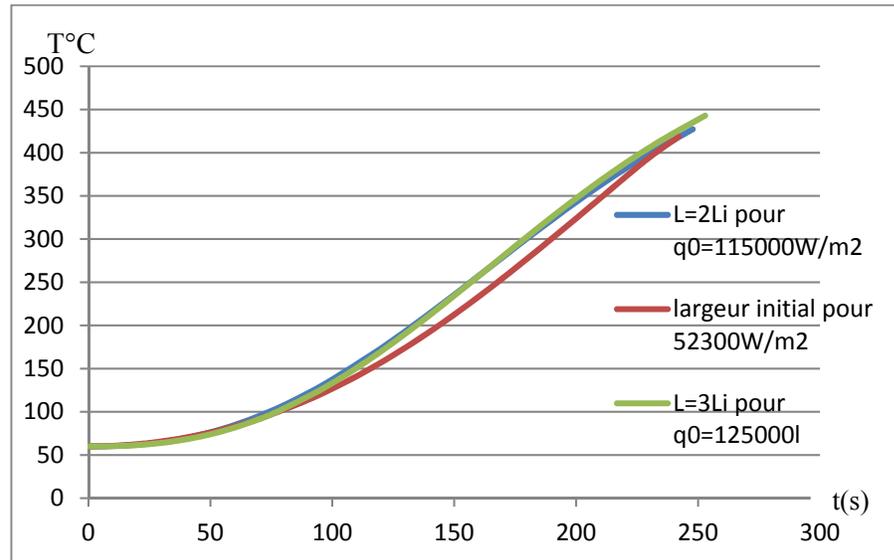


Figure 4.34 Comparaison des cycles de chauffage de la pièce concave dans le four pour les 3 largeurs de la pièce

Le tableau 4.13 représente les puissances de chauffage et les surfaces des éléments de chauffage du four pour les 3 largeurs étudiées de la pièce concave.

Tableau 4.13 La variation de la puissance de chauffage dans le four en fonction de la largeur de la pièce concave

q_0 (W/m^2)	Coefficient d'augmentation de la largeur de la pièce	P (kW)	Coefficient d'augmentation de la dimension du four	Dimension de la pièce concave
52300	1	24,83	1	200mm x260mm x3.34mm
115000	2	106,95	1,4	400mm x520mm x3.34mm
125000	3	237,375	2	600mm x780mm x3.34mm

Le tableau 4.14 représente les puissances de chauffage et les surfaces des cylindres de chauffage du moule à vide pour les 3 largeurs étudiées de la pièce concave.

Tableau 4.14 La variation de la puissance de chauffage du moule à vide en fonction de la largeur de la pièce concave

q_0 (W/m ²)	Surface des cylindres de chauffage (m ²)	P (kW)	Coefficient de multiplication des dimensions du moule
53000	0,1792	9,487	1
75000	0,729	54,67	2
115000	1,64	188,6	3

La figure 4.35 représente la variation de la puissance de chauffage de la pièce concave, dans le four, en fonction de la largeur de la pièce pour le même temps de chauffage.

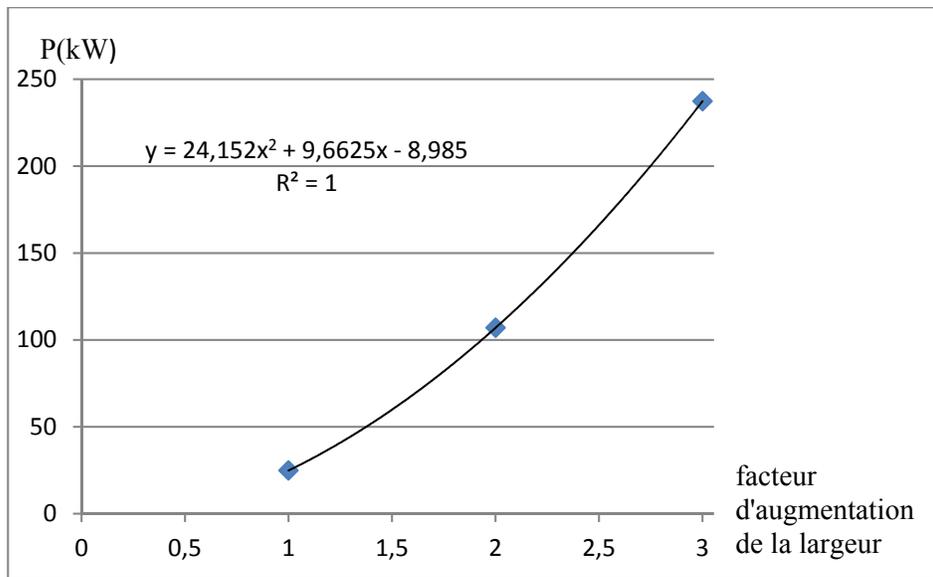


Figure 4.35 L'effet de la largeur sur la puissance de chauffage de la pièce concave

D'après cette figure, l'évolution de la puissance de chauffage en fonction de la largeur de la pièce concave est une fonction polynomiale d'ordre 2 et exprimée par l'équation suivante :

$$y = 24,152x^2 + 9,6625x - 8,985 \quad (4.12)$$

4.4.4 Discussion

Les puissances de chauffage de la pièce concave pour les 5 différentes épaisseurs sont toutes considérées faibles comparées à celle de la plaque en raison de la courte durée de chauffage de la pièce concave.

Pour les 4 premières épaisseurs étudiées, on remarque que la variation d'épaisseur en fonction de la puissance de chauffage est linéaire et peut être exprimée par l'équation suivante :

$$y = 2,1777x + 18,351 \quad (4.13)$$

Pour un volume de la pièce concave de 476.6cm^3 , la puissance de chauffage nécessaire pour que la température au centre de la pièce atteigne 420°C dans 253s est comme suit:

- 37.18kW pour une épaisseur de la pièce de 9mm.
- 62.31kw pour une augmentation du volume de la pièce par la fonction échelle (échelle = 1.4)
- 77.22kW pour une augmentation de la largeur de la pièce par un facteur de 1.7.

Pour un même volume de la pièce concave, la largeur de la pièce a le plus d'effet sur la puissance de chauffage comparé à l'effet de l'augmentation de l'épaisseur ou du volume. Et, c'est l'augmentation de l'épaisseur de la pièce qui a le moindre effet sur la puissance de chauffage.

4.5 Conclusion

Cette étude a permis d'étudier l'influence de certains paramètres de conception sur les puissances de chauffages de 4 pièces de forme différente.

CONCLUSION

Le travail présenté a consisté à l'élaboration des modèles théoriques permettant d'étudier l'effet des paramètres géométriques sur le cycle de chauffage et sur la puissance de chauffage pour 4 pièces différentes en composite thermoplastique CF/PEEK obtenues par le procédé de moulage par compression.

Les pièces élaborées furent inspirées d'une recherche bibliographique et modélisée par le logiciel CATIA. Les équations de transfert de chaleur relative à ces modèles ont été résolues par la méthode des éléments finis par le logiciel COMSOL.

Une série de simulations numériques a été présentée et elle a permis de caractériser le cycle de chauffage et de refroidissement des pièces et la puissance de chauffage en fonction de la géométrie de la pièce. En dernière analyse, ces études de simulations ont globalement conclu les points suivants :

1. Le temps de cycle y compris l'étape de chauffage et de refroidissement, estimé par les modèles numériques, a été validé par comparaison avec des résultats expérimentaux.
2. L'épaisseur n'a aucun effet sur la puissance de chauffage jusqu'à un facteur d'augmentation de 5 fois plus pour les pièces chauffées dans le moule (pièce en forme L, pièce en forme T et la plaque) sachant que les dimensions du moule non pas été pas modifiées. Enfin l'épaisseur de la pièce a le moins d'effet sur la puissance de chauffage comparé à l'effet du volume et de la largeur.
3. La largeur de la pièce a le plus d'effet sur la puissance de chauffage pour la plaque, la pièce en forme T et la pièce concave puisque les dimensions des plateaux de chauffage et le nombre des tubes de chauffage sont augmentées pour s'adapter à la largeur de la pièce. Mais ce n'est pas le cas pour la pièce en forme L puisque la position de la pièce dans le moule ne nécessite pas une grande augmentation de la taille des plateaux de chauffage.

4. L'évolution de puissance de chauffage en fonction de l'épaisseur de la pièce est une fonction polynomiale d'ordre 2 pour les 4 modèles étudiés (la plaque, la pièce en forme T, la pièce en forme L est la pièce concave).
5. L'évolution de puissance de chauffage en fonction du volume de la pièce est linéaire pour les 4 modèles étudiés (la plaque, la pièce en forme T, la pièce en forme L est la pièce concave).
6. La puissance de chauffage pour la fabrication de la plaque est élevée par rapport aux puissances de chauffage des autres pièces en raison de la grande taille des plateaux de chauffage.
7. Les puissances de chauffages pour la fabrication d'une pièce en forme T ou en forme L ou d'une pièce concave sont faibles en raison du court temps de chauffage des pièces et de la faible géométrie des moules et des plateaux de chauffage.

RECOMMENDATIONS

- Étudier l'effet de la réaction exothermique du composite CF/PEEK sur la puissance de chauffage en fonction des paramètres géométriques des pièces.
- Étudier l'effet de la forme et la position des tubes de chauffages sur la puissance de chauffage.
- Étudier l'effet de la répartition de la température sur la qualité des pièces en fonction de la position et de la taille de ces pièces en question.

ANNEXE I

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PLAQUE SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE

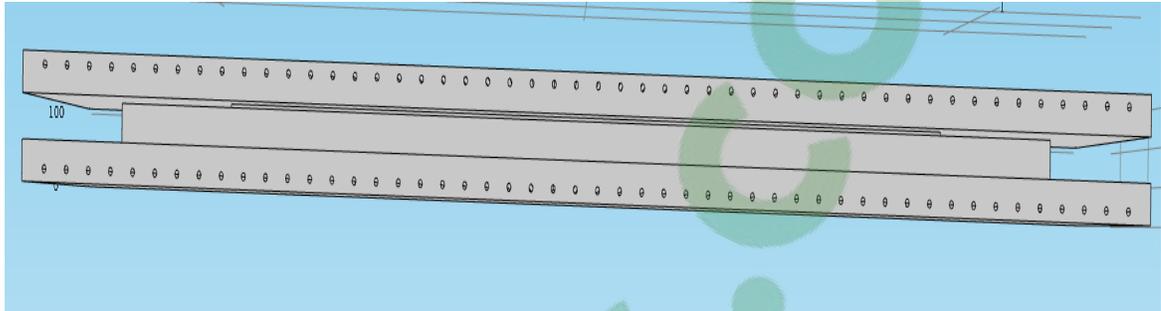


Figure-A I-1 le modèle de chauffage pour la plaque 5 fois plus large et 5 fois plus épaisse

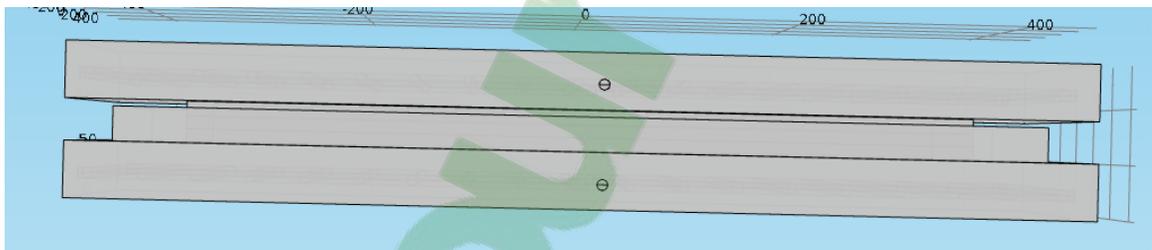


Figure-A I-2 le modèle de chauffage pour la plaque 2 fois plus large et 2 fois plus épaisse

ANNEXE II

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE EN FORME T SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE

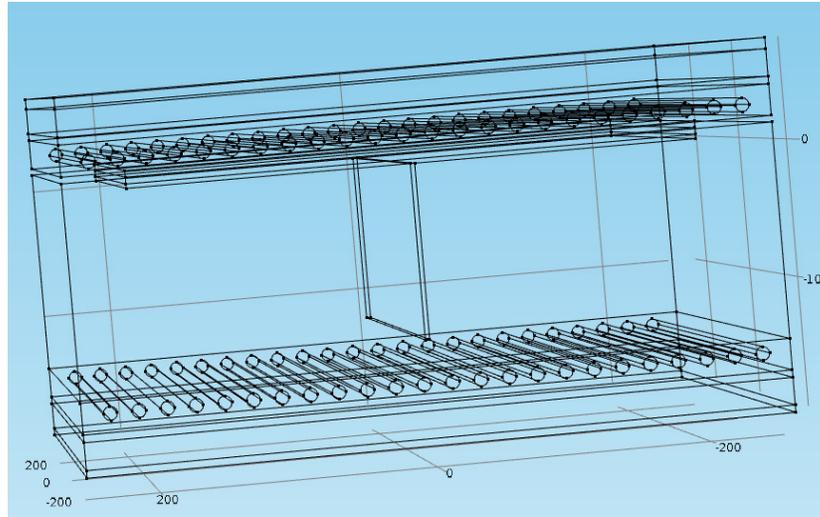


Figure-A II-1 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme T 5 fois plus large

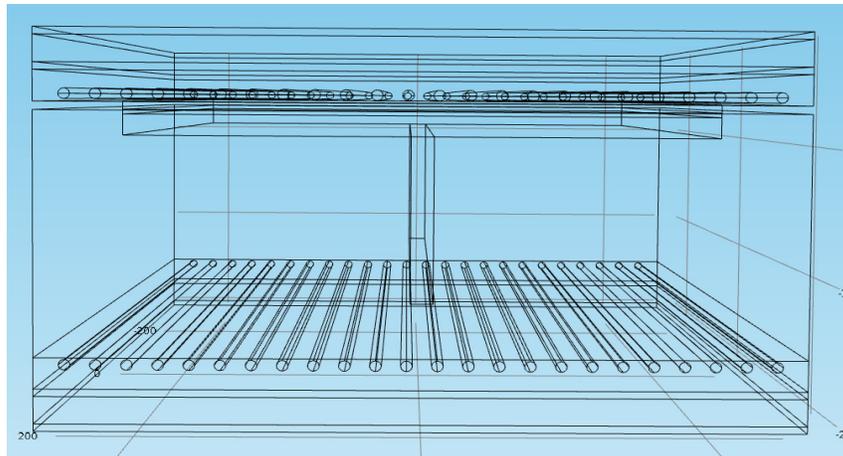


Figure-A II-2 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme T 5 fois plus large et 5 fois plus épaisse

ANNEXE III

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE EN FORME L SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE

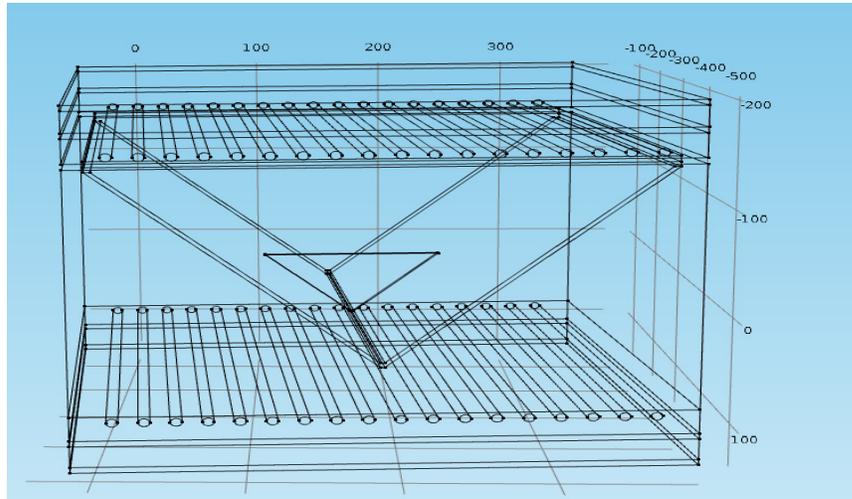


Figure-A III-1 Le modèle de chauffage pour la pièce en forme L 5 fois plus large

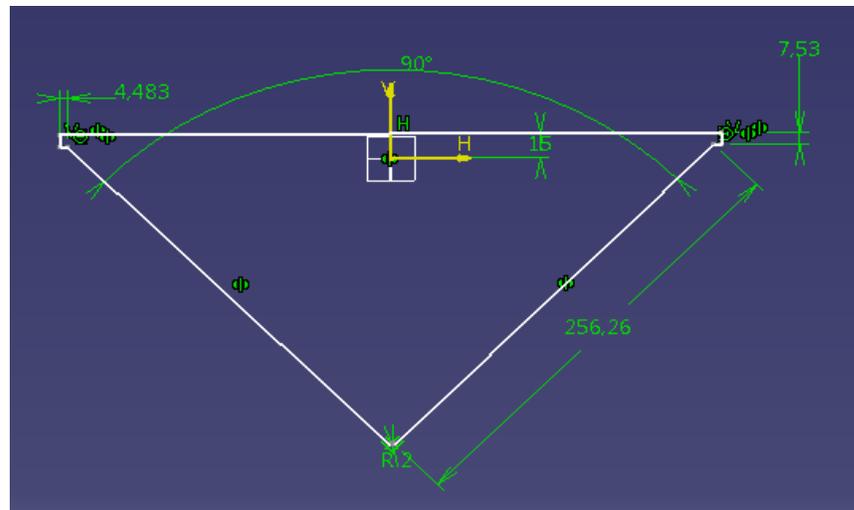


Figure-A III-2 les propriétés géométriques du poinçon pour la pièce en forme L 5 fois plus large

ANNEXE IV

ÉTUDE DE L'EFFET DES PARAMÈTRES GÉOMÉTRIQUES DE LA PIÈCE CONCAVE SUR LA PUISSANCE DE CHAUFFAGE

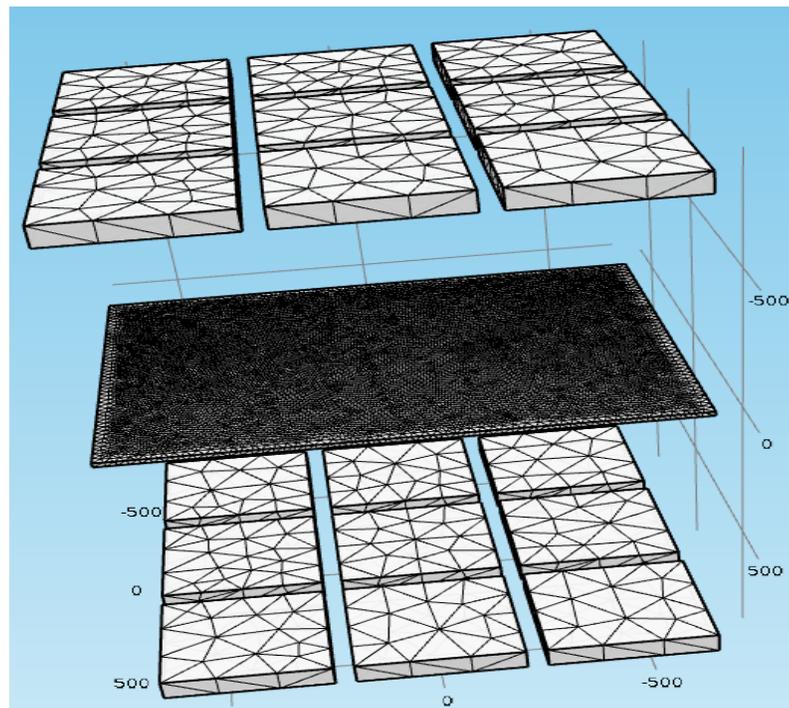


Figure-A IV -1 le maillage pour la pièce
concave 5 fois plus large

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- El Wazziki, M., Ngo, A. D. & Leblanc, D. (2015). *Modelling of compression moulding process cycle time and application of dfma concept to evaluate the tooling costs for carbon fiber reinforced thermoplastic composites t-shape parts*. Affiche présentée à in 20th International Conference on Composite Materials (ICCM20), Copenhagen, Denmark, Scandinavia. Repéré à <http://www.iccm-central.org/Proceedings/ICCM20proceedings/papers/paper-3107-4.pdf>
- El Wazziki, M. et Ngo, A. D. (2015). *Modelling of compression moulding process cycle time for carbon fibre reinforced thermoplastic flat panels*. In Design, manufacturing and applications of composites: proceedings of the Tenth Joint Canada-Japan Workshop on Composites, the University of British Columbia, Vancouver, Canada, August 2014 (Vancouver, BC, Canada, Aug. 19-21, 2014), p. 222-230. DEStech Publications inc. Repéré à https://books.google.ca/books?hl=fr&lr=&id=_okSBwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA222&dq=Application+of+DFMA+concept+to+evaluate+the+tooling+cost+for+carbon+fibre+reinforced+thermoplastic+composites+compression+moulding+processes&ots=DROEG1CzxK&sig=KlluiCgDWQ3NvsiRcHfBg2eu2-8#v=onepage&q&f=false
- El Wazziki, (2016). *development of cost estimating tool for thermoplastic composite aerospace parts manufactured by compression moulding process*. (Thèse de doctorat, École de Technologie Supérieure, QC, Canada)
- LeBlanc, D., Landry, B., Levy, A., Hubert, P., Roy, S., & Yousefpour, A. (2014). *Compression moulding of complex parts using randomly-oriented strands thermoplastic composites*. Paper presented at the SAMPE Tech Seattle 2014 Conference, June 2, 2014 - June 5, 2014, 800 Convention Place, Seattle, WA 98101-2350, United states. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/263231423_Compression_moulding_of_complex_parts_using_randomly-oriented_strands_thermoplastic_composites
- Lessard, H. (2014). *Évaluation expérimentale du procédé de thermoformage-estampage d'un composite PEEK/carbone constitué de plis unidirectionnels*. (Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC) repéré à <http://depot-e.uqtr.ca/7429/1/030791296.pdf>
- Leblanc, D., Levy, A., Hubert, P., Roy, S., & Yousefpour, A. (2014). *Compression moulding of stiffened brackets using randomly-oriented strands thermoplastic composites*. Paper presented at the Composites and Advanced Materials Expo: Combined Strength. Unsurpassed Innovation., CAMX 2014, October 13, 2014 - October 16, 2014, Orlando, FL, United states.

- A Levy. (2014). [Physical and thermal properties of CF/PEEK composites materials] Données brutes inédites
- Baran, I., Cinar, K., Ersoy, N., Akkerman, R., & Hattel, J. H. (2017). *A Review on the Mechanical Modeling of Composite Manufacturing Processes*. Archives of Computational Methods in Engineering, 24(2), 365-395. doi:10.1007/s11831-016-9167-2
- Kessler, M. R., & White, S. R. (2002). *Cure kinetics of the ring-opening metathesis polymerization of dicyclopentadiene*. Journal of Polymer Science, Part A: Polymer Chemistry, 40(14), 2373-2383. doi:10.1002/pola.10317
- Hache, F., Delichatsios, M., Fateh, T., & Zhang, J. (2015). *Comparison of methods for thermal analysis: Application to PEEK and a composite PEEK+CF*. Journal of Fire Sciences, 33(3), 232-246. doi:10.1177/0734904115584154
- Phillips, R., Glauser, T., & Manson, J. A. E. (1997). *Thermal stability of PEEK/carbon fiber in air and its influence on consolidation*. Polymer Composites, 18(4), 500-508. doi: 10.1002/pc.10302
- Margaret, R., John, W & Sons, L. (2004). *An Introduction to Chemical Kinetics: By Margaret Robson Wright (Angewandte Chemie International Edition)*. Repéré à <https://books.google.ca/books?id=4hY2iSt1o0wC&printsec=frontcover&hl=fr#v=onepage&q&f=false>
- Ramani, R., & Alam, S. (2010). *Composition optimization of PEEK/PEI blend using model-free kinetics analysis*. Thermochemica Acta, 511(1), 179-188. doi: 10.1016/j.tca.2010.08.012
- Advani, S. G., & Hsiao, K. T. (2012). *Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs): Elsevier Inc. Doi: 10.1533/9780857096258*
- Leonardi, A. (2013). *Liaison structurale par collage de composite fibre carbone/PEEK: élaboration et analyse des propriétés physiques*. (Thèse, Université Toulouse III-Paul Sabatier, Toulouse, France). Repéré à <http://thesesups.ups-tlse.fr/2396/1/2013TOU30332.pdf>
- Ye, L., Friedrich, K., Kastel, J., & Mai, Y.-W. (1995). *Consolidation of unidirectional CF/PEEK composites from commingled yarn prepreg*. Composites Science and Technology, 54(4), 349-358. doi: 10.1016/0266-3538(95)00061-5
- M. Selezneva. (2013). [Temperature profile versus time at three positions for the same thickness of ROS flat plate]. Données brutes inédites

- D. LeBlanc. (2014). [Temperature profile versus time through the thickness of ROS T-shape]. Données brutes inédites
- Lessard, H. (2014). [Profil de température en fonction du temps à travers l'épaisseur de la pièce concave]. Données brutes inédites
- D. LeBlanc, (2014). [Profil de température en fonction du temps à travers l'épaisseur de la pièce ROS en forme L]. Données brutes inédites
- Haffner, Sascha Marcel. 2002. [Cost modeling and design for manufacturing guidelines for advanced composite fabrication]. Ph.D Thesis in Mechanical Engineering. Massachusetts institute of Technology, 493 p.
- Advani, S. G., & Hsiao, K. T. (2012). Manufacturing techniques for polymer matrix composites (PMCs): University of Delaware, Newark, United States. DOI: 10.1533/9780857096258
- Gutowski, Timothy G., et al. (1994). Development of a theoretical cost model for advanced composite fabrication. Composites manufacturing, vol. 5, n4. P231-239
- J. Crabol (1989). Transfert de chaleur: tome 1- les principes (1^{er} édition). Paris: Masson.
- Frank Kreith (1968). Principles of heat transfer (deuxième édition). Pennsylvania: International textbook company