



# **Etude de l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques de fonctionnement d'un ventilateur axial.**

Vu Dinh Dang

## **► To cite this version:**

Vu Dinh Dang. Etude de l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques de fonctionnement d'un ventilateur axial.. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. HESAM Université, 2021. Français. <NNT : 2021HESAE048>. <tel-03682543>

**HAL Id: tel-03682543**

**<https://pastel.hal.science/tel-03682543v1>**

Submitted on 31 May 2022

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

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



HAL Authorization

**ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES ET MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR**

**Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques  
(LIFSE) - Campus de Paris**

## **THÈSE**

*présentée par :* **Vu-Dinh DANG**

*soutenue le :* **5 Octobre 2021**

*pour obtenir le grade de :* **Docteur d'HESAM Université**

*préparée à :* **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

*Spécialité :* **Mécanique et Matériaux**

### **Étude de l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques de fonctionnement d'un ventilateur axial**

**THÈSE dirigée par :**

**Monsieur Farid BAKIR**

**et co-encadrée par :**

**Madame Amélie DANLOS**

**Monsieur Michaël PEREIRA**

#### **Jury**

<b>M. Pascal CHESSE,</b>	Professeur, Ecole Centrale de Nantes	Président
<b>M<sup>me</sup>. Béatrice Patte-Rouland,</b>	Professeur, Université Rouen Normandie	Rapporteur
<b>M. Miguel ASUAJE,</b>	Professeur, Université Simon Bolívar	Rapporteur
<b>M. Kamel AZZOUZ,</b>	Docteur, VALEO	Examineur
<b>M. Farid BAKIR,</b>	Professeur, Arts et Métiers	Examineur
<b>M. Michaël PEREIRA,</b>	Maître de conférences, Arts et Métiers	Examineur
<b>M<sup>me</sup>. Amélie DANLOS,</b>	Maître de conférences, Le Cnam	Examinatrice
<b>M. Mohammadali SHIRINBAYAN,</b>	Ingénieur de Recherche, Arts et Métiers	Examineur



# Table des matières

Table des matières	iii
Table des figures	vii
Liste des tableaux	xv
<b>1 Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1 Etat de l'Art . . . . .	1
1.2 Motivations . . . . .	8
1.3 Structure du manuscrit . . . . .	9
<b>2 Fabrication d'un ventilateur axial</b>	<b>13</b>
2.1 Conception du moule et présentation du ventilateur . . . . .	14
2.1.1 Conception du moule du ventilateur . . . . .	14
2.1.2 Fabrication de moule du ventilateur . . . . .	18
2.2 Le procédé de fabrication: le rotomoulage . . . . .	19
2.2.1 Description de la méthode de rotomoulage . . . . .	19
2.2.2 Principaux avantages et inconvénients du procédé de rotomoulage	22
2.2.3 Description de la machine . . . . .	23
2.3 Matériau utilisé pour le rotomoulage . . . . .	24
2.3.1 Caractéristiques typiques des plastiques moulés par rotation . .	24
2.3.2 Température du four et temps de chauffage . . . . .	26
2.4 Paramètres de contrôle du procédé de rotomoulage . . . . .	28
2.4.1 Masse de poudre . . . . .	28
2.4.2 Température et temps dans le four . . . . .	28
2.4.3 Temps de refroidissement . . . . .	30
2.5 Procédé de remplissage du moule avec la poudre . . . . .	31
2.6 Conclusion . . . . .	35
<b>3 Le protocole expérimental</b>	<b>37</b>
3.1 Dispositifs expérimentaux . . . . .	37
3.1.1 Description du fonctionnement du banc d'essai . . . . .	37
3.1.2 Caractéristiques du dispositif anti-giration . . . . .	38



3.1.3	Diaphragme . . . . .	39
3.1.4	Carter . . . . .	41
3.1.5	Prises de pression . . . . .	41
3.1.6	Description du protocole de montage et fixation du ventilateur . . . . .	42
3.2	Grandeurs physiques mesurées et incertitudes . . . . .	44
3.2.1	Instrumentation du banc d'essai . . . . .	44
3.2.2	L'erreur de mesure aléatoire . . . . .	44
3.2.3	L'erreur systématique . . . . .	45
3.2.4	Incertitude composée . . . . .	46
3.2.5	Détermination de l'incertitude de la mesure . . . . .	47
3.3	Analyse de la géométrie des ventilateurs . . . . .	49
3.3.1	Caractéristiques géométriques des ventilateurs . . . . .	49
3.3.2	Détermination des paramètres de géométries du ventilateur . . . . .	50
3.4	Méthode de mesure du champ de vitesse axiale . . . . .	54
3.5	Méthode de mesure de la vibration . . . . .	55
3.6	Conclusion . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Résultats expérimentaux</b>	<b>59</b>
4.1	Caractéristiques aérodynamiques des ventilateurs . . . . .	59
4.2	Champ de vitesse axiale des ventilateurs de rotomoulés . . . . .	70
4.3	Répétabilité du procédé de fabrication et des mesures . . . . .	73
4.3.1	Répétabilité de la fabrication des ventilateurs en utilisant la méthode de rotomoulage . . . . .	73
4.3.2	Répétabilité des résultats de mesure sur le banc d'essais . . . . .	75
4.3.3	Conclusion . . . . .	77
4.4	Caractérisation du ventilateur obtenu par rotomoulage . . . . .	82
4.4.1	Observation globale . . . . .	82
4.4.2	Observation par microscopie . . . . .	84
4.4.3	Conclusion . . . . .	85
4.5	Caractérisation géométrique des pales de ventilateur par la méthode du scanner 3D . . . . .	86
4.5.1	Comparaison du ventilateur PEL-500-250-12 avec le modèle CAO . . . . .	86
4.5.2	Comparaison des trois roues: PEL-300-285-20, PEL-500-250-12, PEL-600-285-12 . . . . .	87
4.5.3	Conclusion . . . . .	88
4.6	Analyse de l'épaisseur du ventilateur . . . . .	93
4.7	Etude de l'effet des vibrations sur les ventilateurs . . . . .	95
4.8	Cas particulier: ventilateur de masse 200g . . . . .	98
4.9	Conclusion . . . . .	101

<b>5</b>	<b>Caractérisations mécaniques et physico-chimiques</b>	<b>103</b>
5.1	FTIR-Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier . . . . .	103
5.1.1	Description de la méthode FTIR . . . . .	103
5.1.2	Protocole d'essais et caractéristiques du spectre FTIR . . . . .	104
5.1.3	Influence de la température et du temps de chauffage sur le développement de l'oxydation avec une masse de poudre de 200g .	106
5.1.4	Effets des paramètres sur l'oxydation avec d'autres masses de poudre 300, 400, 500 et 600g . . . . .	108
5.1.5	Conclusion . . . . .	109
5.2	DSC - Calorimétrie différentielle à balayage . . . . .	115
5.2.1	Introduction . . . . .	115
5.2.2	Description de l'équipement de test DSC . . . . .	115
5.2.3	Campagne de test DSC . . . . .	116
5.2.4	Résultats des tests DSC . . . . .	117
5.2.5	Conclusion . . . . .	118
5.3	DMA - Analyse mécanique dynamique . . . . .	122
5.3.1	Introduction du test DMA . . . . .	122
5.3.2	Résultats et discussions . . . . .	123
5.3.3	Conclusion . . . . .	124
5.4	Propriétés mécaniques en traction . . . . .	126
5.4.1	Essais de traction . . . . .	126
5.4.2	Description de l'essai de traction . . . . .	127
5.4.3	Caractéristiques du matériau . . . . .	130
5.4.4	Influence des conditions de fabrication du ventilateur . . . . .	131
5.4.5	Conclusion . . . . .	132
<b>6</b>	<b>Conclusions et perspectives</b>	<b>139</b>
6.1	Conclusions . . . . .	139
6.2	Perspectives . . . . .	144
<b>A</b>	<b>Liste des acronymes</b>	<b>I</b>
<b>B</b>	<b>Liste des symboles</b>	<b>III</b>



# Table des figures

1.1	Moteur d'entraînement de l'axe majeur et de l'axe mineur . . . . .	2
1.2	Processus de formation et de disparition des bulles: 1- La poudre de polymère se déplace à la surface du moule, 2- Les bulles d'air sont formées par piégeage dans la matière, 3, 4 - Après un certain de temps, ces bulles d'air diffusent à travers le polymère fondu et disparaissent [1] . . . . .	3
1.3	Système de contrôle de la pression et de la température sur la machine de rotomoulage [2] . . . . .	4
1.4	(a) Schéma de l'écoulement d'air du ventilateur axial, (b) ventilateur axial, (c) pale creuse [3]-[4] . . . . .	6
1.5	Sections transversales d'aubes d'éolienne [5] . . . . .	7
1.6	(a) Ventilateur axial, (b) Coupe transversale de la pale pour une application au refroidissement automobile [6], [7]. . . . .	7
1.7	(a) injection de l'air au bord de fuite de l'aube, (b) injection du côté de la virole et (c) injection à la périphérie de la virole [8] . . . . .	8
1.8	Schéma de la thèse . . . . .	11
2.1	Etapes de fabrication du moule pour le ventilateur axial . . . . .	14
2.2	Cahier des charges du ventilateur sélectionné pour l'étude et utilisé dans le logiciel MFT 3D . . . . .	15
2.3	Vue 3D du ventilateur axial dessiné par le logiciel MFT 3D . . . . .	15
2.4	Structure de l'écoulement présent dans le jeu (a) et solution proposée en utilisant une virole (b,c) [46] . . . . .	16
2.5	Différents types de configuration de ventilateur axial: (a) pale radiale, (b) pale avant courbée et (c) pale arrière courbée [6] . . . . .	16
2.6	Performances aérodynamiques et acoustiques pour les trois configurations de la figure 2.5: pale radiale, pale avant courbée, pale arrière courbée [6] . . . . .	17
2.7	Vue 3D par CAO du ventilateur axial . . . . .	17
2.8	Réalisation d'un moule de 1/6 du ventilateur: (a) géométrie du moule (CAO), (b) pale obtenue par rotomoulage avec le moule considéré . . . . .	18

2.9	Réalisation du moule complet: (a) CAO du moule de ventilateur complet, (b) ventilateur complet obtenu par rotomoulage avec le moule considéré	18
2.10	Le moule (a); l'évent (b); laine de roche (c)	19
2.11	Zone de fixation du moule dans la rotomouleuse LAB 40 de type Shultle utilisée	19
2.12	Etapes du procédé de rotomoulage	20
2.13	Evolution de la température au cours du temps: condition A: $T_0 = 285^\circ\text{C}$ et condition B: $T_0 = 330^\circ\text{C}$ ( $\Delta t_0 = 12$ min, refroidissement par l'air pendant 20 min), $T_{oven}$ désigne la température du four, $T_{polymer}$ la tem- pérature mesurée à l'intérieur du moule [9]	21
2.14	Photographies de la rotomouleuse Lab40 de type Shultle	23
2.15	Ramification de chaîne typique dans le LHPE (a) et LDPE (b) [10]	26
2.16	(a) DSC résultat pour du LDPE, et (b) courbe TGA du LDPE	26
2.17	(a) La zone bleue correspond à la zone de moulage par rotation pour un polymère semi-cristallin tel que le LDPE, (b) Fenêtre de rotomoulabilité en fonction de la température et du temps (zone bleue) [11]	27
2.18	Surface intérieure du moule mesurée avec le logiciel de CAO (Catia)	29
2.19	Défauts de fabrication au bord de fuite	31
2.20	Photographies de bavures aux six positions de remplissage de poudre à la surface des pales	32
2.21	Optimisation de la méthode de remplissage de poudre dans le moule	32
2.22	Ventilateur coupé en deux parties (PEL-500-250-12)	33
2.23	Image de transmission du ventilateur PEL-500-250-12	33
2.24	Image de transmission du ventilateur PEL-300-250-12	33
2.25	Image de transmission du ventilateur PEL-400-250-12	34
2.26	Image de transmission du ventilateur PEL-600-250-12	34
3.1	Vue schématique du banc d'essai	38
3.2	Banc d'essai pour mesurer les performances de ventilateurs axiaux	39
3.3	Schéma de position des pièces dans le caisson selon ISO 5801	39
3.4	Dispositif anti-giration	40
3.5	Fixation du diaphragme à l'aspiration	40
3.6	Schéma du diaphragme conforme à la norme ISO 5801	40
3.7	Diamètres de diaphragmes utilisés	41
3.8	Schéma du carter utilisé pour le banc d'essai de ventilateur axial	41
3.9	Emplacements des prises de pression statique sur le banc d'essai aux normes ISO 5801	42
3.10	Vue 3D schématique du support utilisé pour le perçage des roues	43
3.11	Vue 3D schématique de la pièce centrale permettant la fixation de la roue sur l'arbre	43

3.12 Schéma du châssis assurant une bonne répétabilité des essais de performances des différents ventilateurs testés . . . . .	44
3.13 Distribution normale de Gauss . . . . .	45
3.14 Erreur de mesure . . . . .	46
3.15 Coordonnées des sections transversales des pales obtenues avec le scanner Comet L3D 5M . . . . .	50
3.16 Profil de pale défini par le logiciel Paraview après l'utilisation du scanner 3D . . . . .	50
3.17 Profils de pales correspondant à 11 sections obtenus par l'utilisation du scanner 3D . . . . .	51
3.18 Vue des sections de pales cylindriques . . . . .	52
3.19 Définition d'une grille d'aubes . . . . .	52
3.20 Profil NACA - Détermination des points caractéristiques du profil . . .	53
3.21 Méthode de mesure utilisée pour déterminer le champ de vitesse axiale par tube de Pitot . . . . .	55
3.22 Vibration d'un banc d'essai en fonction du temps et de la fréquence . .	55
3.23 Signal de vibration et fréquence de vibration . . . . .	56
3.24 Mesure de l'amplitude d'une vibration . . . . .	56
3.25 (a)-Banc d'essai, (b)-Position fixe du capteur . . . . .	57
4.1 Coefficient de pression statique $\psi$ et rendement statique $\eta$ en fonction du coefficient de débit $\phi$ pour $Re = 1,2 \times 10^5$ ( $\square$ ), $Re = 1,0 \times 10^5$ ( $\triangle$ ) et $Re = 8,6 \times 10^4$ ( $\diamond$ ). Résultats pour le ventilateurs PEL-500-250-12. .	60
4.2 Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec <b>500g</b> de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents .	62
4.3 Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec <b>400g</b> de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents .	63
4.4 Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec <b>300g</b> de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents .	64
4.5 Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec <b>600g</b> de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents .	65
4.6 Rendement maximal (à la vitesse 2000 tr/min) en fonction de la température de chauffage $T_0$ et du temps $\Delta t_0$ , pour différentes masses: (a) - 300g, (b) - 400g, (c) - 500g, (d) - 600g . . . . .	66

4.7	Efficacité maximale de chaque ventilateur par rapport à la masse de poudre. Les symboles représentent la température et les couleurs, le temps de chauffage: $\bigcirc$ : $250^0C$ , $\square$ : $285^0C$ et $\triangle$ : $330^0C$ . Bleu: 12 minutes, rouge: 15 minutes et noir: 20 minutes. . . . .	67
4.8	Rendement statique et coefficient de pression en fonction du coefficient de débit des trois ventilateurs sélectionnés: $(\eta_{max})$ : PEL-300-285-20 (-■-), $(\eta_{moy})$ : PEL-500-250-12 (-●-), $(\eta_{min})$ : PEL-600-285-12 (-▲-) . . . . .	69
4.9	Vitesse axiale de l'écoulement d'air en aval du ventilateur PEL-500-285-12 pour trois vitesses de rotation: (a) - 1000 tr/min, (b) - 1500 tr/min et (c) - 2000 tr/min . . . . .	71
4.10	Comparaison de la vitesse axiale des ventilateurs à 2000 tr/min: pour les ventilateurs PEL-300-285-12 (a); PEL-400-285-12 (b); PEL-500-285-12 (c), avec une température du four à $285^0C$ et un temps de chauffage de 12 minutes . . . . .	72
4.11	Trois ventilateurs (a), (b), (c) sont fabriqués avec les mêmes conditions: PEL-300-285-20 . . . . .	74
4.12	Longueur de corde L [mm], épaisseur de pale E [mm], angle de décalage $\gamma$ [ $^0$ ] et en fonction du rayon r [mm] pour le ventilateur PEL-300-285-20: V(a) -●-; V(b) -■- . . . . .	78
4.13	Microstructure de la surface du ventilateur PEL-300-285-20 V(a) et V(b) . . . . .	79
4.14	Rendement $\eta$ et coefficient de pression statique $\psi$ en fonction du coefficient de débit $\phi$ pour trois mêmes ventilateurs PEL-300-285-20: V(a) -■-; V(b) -●-; V(c) -▲- . . . . .	79
4.15	Coefficient de pression statique $\psi$ , rendement $\eta$ et $ \eta - \langle \eta \rangle $ en fonction du coefficient de débit $\phi$ pour PEL-400-250-12: essai1 -■-; essai2 -●-; essai3 -▲- . . . . .	80
4.16	Concept de précision et de répétabilité . . . . .	81
4.17	Répartition des valeurs de rendement échantillons dans le temps . . . . .	81
4.18	Densité de probabilité de la loi normale . . . . .	81
4.19	Photographies de ventilateurs rotomoulés pour différentes masses: (a)-300 g, (b)-400 g, (c)-500 g et (d)-600 g de poudre de polymère en fonction des températures du four $T_0$ ( $^0C$ ) , sur l'axe vertical) et le temps de chauffe ( $\Delta t_0$ en minutes, sur l'axe horizontal) . . . . .	83
4.20	Défauts sur les ventilateurs avec une masse de poudre de 600g: (a) - PEL-600-285-15 et (b) - PEL-600-330-20 . . . . .	84
4.21	Observation au microscope d'échantillons prélevés sur les pales (P1 à P6) du ventilateur PEL-500-250-12 . . . . .	85
4.22	Comparaison de la structure de surface de 3 ventilateurs sur une pale: (a - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12) . . . . .	85

4.23 (a) - Position des 11 sections transversales dans la direction du rayon (b) - dimensions géométriques d'une section . . . . .	87
4.24 (a)-longueur de corde L [mm], (b)-épaisseur relative des pales, $e = \frac{E_{max}}{L}$ [%], (c)-angle de calage $\gamma$ [°], en fonction du rayon r [mm], pour le ventilateur PEL-500-250-12 . . . . .	90
4.25 (a)- épaisseur relative de la pale, $e = \frac{E_{max}}{L}$ [%], (b) - angle de décalage $\gamma$ [°] et (c) - longueur de corde L [mm] en fonction du rayon. Données du moule CAO: $\circ$ , moyenne des mesures sur les 6 pales du PEL-500-250-12 : $\bullet$ . . . . .	91
4.26 Emplacement du bourrage de matériau sur une pale du ventilateur PEL-600-285-12 . . . . .	91
4.27 (a)- longueur de corde L [mm], (b) - épaisseur de pale E [mm], (c) - angle de calage $\gamma$ [°] en fonction du rayon r [mm] pour trois ventilateurs: PEL-300-285-20 - $\blacktriangle$ -; PEL-500-250-12 - $\bullet$ -; PEL-600-285-12 - $\blacksquare$ - . . . . .	92
4.28 (a) Positions de mesure de l'épaisseur des ventilateurs rotomoulés; (b) micromètre-AK9635D . . . . .	93
4.29 Epaisseur de matériau sur les pales et sur la section transversale du centre du ventilateur pour (a) - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12 . . . . .	94
4.30 L'épaisseur des ventilateurs pour (a) - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12 . . . . .	95
4.31 Signal d'échantillon du PEL-300-250-15 . . . . .	96
4.32 FFT du signal de 3 ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15, PEL-600-250-15 . . . . .	96
4.33 Photographies de ventilateurs fabriqués par rotomoulage avec une masse de 200g par différentes température $T_0$ de chauffage et de temps $\Delta t_0$ dans le four . . . . .	98
4.34 Défauts des ventilateurs rotomoulés avec de poudre 200g (PEL-200-250-15): (a) centre du ventilateur, (b) extrados de pale, (c) intrados de pale . . . . .	99
4.35 Zone des indentations suivant la direction radiale Pour le ventilateur PEL-200-250-12 . . . . .	99
4.36 (a) - comparaison des performances aérodynamiques des ventilateurs et (b) - coefficient de pression en fonction coefficient de débit: PEL-200-250-12: - $\bullet$ - et PEL-300-285-20: - $\blacksquare$ - à la vitesse de rotation 2000 tr/min . . . . .	100
4.37 Comparaison des performances aérodynamiques des ventilateurs PEL-200-250-12: - $\bullet$ -, PEL-200-285-20: - $\blacktriangle$ - et PEL-300-285-20: - $\blacksquare$ - à la vitesse de rotation: (a) 1750 tr/min, (b) 1500 tr/min . . . . .	100
5.1 Des absorptions aux différents groupe chimiques [12] . . . . .	104



5.2	Photographie de la machine Infrarouge Spotlight 400 pour l'analyse FTIR des ventilateurs rotomoulés . . . . .	105
5.3	Caractéristiques de certains groupes chimiques . . . . .	106
5.4	Spectre infrarouge d'un échantillon de ventilateur rotomoulé PEL-200-250-12 . . . . .	107
5.5	Spectre d'absorption IR: (a) $\Delta t_0 = 12, 15, 20$ min; (b) $T_0 = 250, 285, 330^\circ\text{C}$ ; (c) $\Delta t_0 = 12, 15, 20$ min et $T_0 = 250, 285, 330^\circ\text{C}$ pour des ventilateurs fabriqués avec une masse de 200g . . . . .	110
5.6	Zoom du pectre IR dans les cas: (a) PEL-200-250-12/15/20; (b) PEL-200-250/285/330-12; (c) PEL-200-250/285/330-12/15/20 . . . . .	111
5.7	Spectre IR de ventilateurs rotomoulés fabriqués avec une masse de poudre de (a) 300g et (b) 400g . . . . .	112
5.8	Spectre IR de ventilateurs rotomoulés fabriqués avec une masse de poudre de (a) 500g et (b) 600g . . . . .	113
5.9	Comparaison des spectres IR de ventilateurs rotomoulés avec un temps de chauffage $\Delta t_0 = 20$ min et une température $T_0 = 330^\circ\text{C}$ pour différentes masses de poudre utilisées . . . . .	114
5.10	Machine Q1000 (a), balance XSR105 (b) et capsule en aluminium (c), pour les mesures DSC . . . . .	116
5.11	Comparaison les valeurs de $T_c$ et $T_f$ dans les cas: (a) PEL-300/400/500/600-330-12; (b) PEL-300/400/500/600-330-15; (c) PEL-300/400/500/600-330-20 par mesures DSC . . . . .	119
5.12	Effet de la masse sur le taux de cristallinité $X_c$ : 300g, 400g, 500g, 600g pour trois temps de chauffage $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$ min et une température dans le four $T_0 = 330^\circ\text{C}$ . . . . .	120
5.13	Taux de cristallinité $X_c$ obtenus par DSC pour 4 masses: 300g, 400g, 500, 600g pour une température dans le four de $330^\circ\text{C}$ . . . . .	120
5.14	Effet du temps de chauffage $\Delta t_0$ sur la cristallinité $X_c$ : 12, 15, 20 min pour différents ventilateurs de 300g, 400g, 500g et 600g . . . . .	120
5.15	Comparaison des valeurs de $T_c, T_f$ dans les cas (a): PEL-300-330-12/15/20; (b): PEL-500-330-12/15/20; (c): PEL-600-330-12/15/20 . . . . .	121
5.16	Equipement de mesure de DMA Q800 . . . . .	122
5.17	Relation entre les paramètres calculés . . . . .	123
5.18	Comparaison entre la condition A: PEL-500-285-12 ( <i>en rouge</i> ) et condition B: PEL-500-330-12 ( <i>en bleu</i> ) . . . . .	125
5.19	Comparaison entre la condition A: PEL-500-285-12 ( <i>en rouge</i> ) et condition C: PEL-500-285-20 ( <i>en noir</i> ) . . . . .	125
5.20	Machine de traction INSTRON 5966 . . . . .	127
5.21	Schéma de l'éprouvette standard ISO 6892-3 . . . . .	127
5.22	Éprouvettes prélevées sur les ventilateurs rotomoulés . . . . .	128

5.23	Courbe contrainte-déformation d'un ventilateur PEL-500-250-12 . . . . .	129
5.24	Résultats de l'essai de traction de trois ventilateurs: PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12 . . . . .	131
5.25	Éprouvettes après essai de traction de PEL-300-285-20 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture . . . . .	134
5.26	Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-300-285-20 . . . . .	134
5.27	Éprouvettes après essai de traction de PEL-500-250-12 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture . . . . .	135
5.28	Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-500-250-12 . . . . .	135
5.29	Éprouvettes après essai de traction de PEL-600-250-12 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture . . . . .	136
5.30	Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-600-285-12 . . . . .	136
5.31	Effet de la masse sur le module de Young E: comparaison entre les 3 ventilateurs: PEL-300-285-12: ▲, PEL-500-285-12: ● et PEL-600-285-12: ◆	137
5.32	Effet de la température de chauffage sur le module de Young E: comparaison entre les 3 ventilateurs: PEL-300-250-20: ▲, PEL-300-285-20: ◆ et PEL-300-330-20: ▲ . . . . .	137
5.33	Effet du temps de chauffage sur le module de Young E: comparaison entre les 2 ventilateurs PEL-600-285-12: ● et PEL-600-285-20: ◆ . . . . .	137
6.1	Rendement statique en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (-■-), PEL-500-250-12 (-●-) et PEL-600-285-12 (-▲-) . . . . .	142
6.2	Couple en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (-■-), PEL-500-250-12 (-●-) et PEL-600-285-12 (-▲-) . . . . .	142
6.3	Puissance mécanique en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (-■-), PEL-500-250-12 (-●-) et PEL-600-285-12 (-▲-) . . . . .	143
6.4	Les résultats du ventilateur PEL-300-285-20 (-■-) corréleront assez bien avec ceux donné par les calculs MFT-3D (-●-) . . . . .	143
6.5	Effet de la concavité sur la dissipation énergétique dans la couche de cisaillement . . . . .	144
6.6	Simulation CFD d'un ventilateur axial avec système de pré-rotation par roue centrifuge . . . . .	145
6.7	Appareil de mesure de vitesse avec fil chaud (a); LDV (b) [13] . . . . .	145



# Liste des tableaux

1.1	Rapports de vitesse recommandés pour différentes formes de moules . . .	3
2.1	Principales caractéristiques de la géométries utilisées pour la conception du ventilateur axial . . . . .	17
2.2	Plages de masse volumique du polyéthylène . . . . .	25
3.1	Diamètres intérieurs des diaphragmes utilisés (l'incertitude de $d \pm 1\text{mm}$ )	41
4.1	Caractéristiques des ventilateurs rotomoulés avec 500 g de poudre de polymère et un temps de refroidissement à l'air de 20 min. . . . .	68
4.2	Ecart de rendement des ventilateurs rotomoulés la masse de poudre utilisée . . . . .	68
4.3	Comparaison des performances aérodynamiques de 3 ventilateurs : PEL-300-285-20, PEL-500-250-12, PEL-600-285-12 . . . . .	69
4.4	Comparaison des performances aérodynamiques de 3 ventilateurs de masses: 300g, 400g et 500g . . . . .	70
4.5	Résultats aérodynamiques 3 ventilateurs sont fabriqués avec les mêmes conditions PEL-300-285-20: V(a), V(b), V(c) . . . . .	75
4.6	Résultats des tests de répétabilité du ventilateur PEL-400-250-12 avec 3 tests . . . . .	76
4.7	Caractéristiques des ventilateurs rotomoulés utilisant 500 g de poudre de polymère avec un temps de refroidissement par air de 20 min. . . . .	82
4.8	Réduction moyenne de la longueur de la corde du ventilateur PEL-500-250-12 par rapport au modèle CAO du moule, pour 11 sections radiales d'une pale . . . . .	87
4.9	Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15, PEL-600-250-15 . . . . .	97
4.10	Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-285-15, PEL-500-285-15, PEL-600-285-15 . . . . .	97
4.11	Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-330-15, PEL-500-330-15, PEL-600-330-15 . . . . .	97

4.12 Performances des ventilateurs testés: PEL-300-285-20, PEL-200-250-12, PEL-200-285-20 . . . . .	100
5.1 Paramètre géométriques de l'éprouvette standart ISO 6892-3 . . . . .	127

# Remerciements

Je tiens tout d’abord à remercier mon directeur de thèse Professeur Farid BAKIR qui m’a fait confiance durant ces années et qui a su équilibrer subtilement exigence et tolérance à mon égard. Je voudrais remercier mes deux encadrants Docteur Amélie DANLOS et Docteur Michaël PEREIRA non seulement pour leur accompagnement scientifique, mais également pour leur implication et leur patience durant mes travaux au laboratoire LIFSE.

Mes remerciements s’adressent ensuite aux membres du jury : j’exprime ma reconnaissance Professeur Pascal CHESSE, d’avoir accepté de présider le jury de ma soutenance. je remercie beaucoup Professeur Béatrice Patte-Rouland et Professeur Miguel ASUAJE pour avoir accepté de rapporter ma thèse. Enfin, je remercie Docteur Kamel AZZOUZ, Directeur métiers thermiques et thermodynamiques chez VALEO et Ingénieur de recherche Mohammadali SHIRINBAYAN, qui se sont intéressés à mes travaux.

Mes reconnaissances aux Messieurs, Ivan DOBREV, Emmanuel QUEVEN, Amrid MAMMERI, Marc JOULIN qui m’ont aidé dans le montage expérimental.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Monsieur Abbas TCHARKHTCHI et Monsieur Albert LUCAS pour leur implication et leur aide dans le domaine du rotomoulage au laboratoire PIMM.

Merci également aux autres membres du laboratoire LIFSE : Sofiane KHELADI, Florent RAVELET, Michael DELIGANT, Richard PARIDAENS, Moises SOLIS, Carole PETUREAUX... merci pour leur bonne humeur, pour leur aide et pour leurs discussions scientifiques ; à mes collègues doctorants : Birame SY, Cheikh Brahim ABED, Charles FOULQUIE, Carlos ROMERO CASADO, Killian CROCI, Van Thang NGUYEN, Navideh ABBASNEZHAD, Tchable-Nan DJANAME, Aurélie NICOLAU, MAGNE Théodor, Jianfei SONG, Ehsan DEHNAVI, Louis FONTENEAU-MARCEL, Martin BOURHIS, Mohammad ZARBINI SEYDANI, ...

Enfin, je souhaite exprimer un grand merci à mes parents, à ma femme et mon fils, à ma sœur, à mes frères, à toute ma famille et à mes amis pour leur compréhension, leur patience et leurs encouragements.



# Résumé

Le rotomoulage plastique est un procédé de fabrication qui a été développé dans les années 50. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport à d'autres (usinage, assemblage, etc.), comme notamment le coût de fabrication des pièces. Il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines d'applications, et anime encore activement la recherche. Dans cette thèse, nous nous intéresserons au domaine des turbomachines. Par exemple, les ventilateurs de refroidissement utilisés dans l'automobile est un marché industriel très actif. Dans le passé, des premières versions d'un ventilateur axial avaient été conçues et fabriquées par la méthode du rotomoulage au sein du *Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques* pour répondre à ce besoin industriel. Toutefois, aucune analyse réelle n'a été faite en termes de contrôle et d'optimisation de ce procédé de fabrication. Cette thèse s'inscrit donc naturellement dans une dynamique de recherche faisant le lien entre les performances énergétiques du système et le procédé de fabrication.

A partir des paramètres du procédé de rotomoulage (masse de poudre du polymère, température dans le four, temps de cuisson), l'idée générale de l'étude réside dans le croisement entre l'échelle macroscopique avec l'analyse qualitative et quantitative de la pièce finale (géométrie, résultats des performances aéromécaniques, etc.) d'une part, et l'échelle microscopique avec l'analyse des propriétés mécaniques et physico-chimiques du matériau d'autre part. Autrement dit, l'objectif de la présente thèse est d'*étudier l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques d'un ventilateur axial*.

Les résultats des campagnes d'essais révèlent des différences significatives sur le rendement aérodynamique des ventilateurs. Sur une étude d'un panel de 45 ventilateurs des écarts de l'ordre de  $\sim 6\%$  sont mesurés. Point notable, ces différences sont fortement corrélées à la masse de poudre de polymère utilisée pour la fabrication. Pour cette dernière, nous avons utilisé du polyéthylène (PE). Pour justifier ces écarts, une première approche fut de s'assurer du contrôle qualité de la géométrie de la pièce fabriquée (notamment au niveau des aubes: calage, corde et épaisseur) par méthode de scanner 3D. Les résultats révèlent qu'il y a peu de différences en variant les paramètres de fabrication. Cependant, à partir de l'analyse mécanique et physico-chimique du



matériau de l'ensemble des échantillons, nous avons pu montrer que pour des températures du four  $\geq 285^{\circ}\text{C}$  et des temps de cuisson  $\geq 15 \text{ min}$ , le matériau se détériorait par phénomène d'oxydation. Qualitativement, le ventilateur jaunissait; quantitativement, la spectroscopie infrarouge révélait la présence manifeste de liaisons chimiques avec l'oxygène.

En outre, les analyses mécaniques du matériau indiquent que l'effet du changement de température du procédé de fabrication induit également une modification de la résistance du matériau *via* le module d'Young. La distribution de matière dans le moule joue également un rôle. Avec des masses plus faibles (de l'ordre de  $\sim 300 \text{ g}$ ), le phénomène de balourd dynamique est moins notable. La puissance mécanique consommée est donc plus faible, impliquant un meilleur rendement. L'aspect visuel de distribution du polymère au sein de la roue, ainsi que les mesures à l'aide d'un accéléromètre ont permis de confirmer cette dispersion.

A la lumière des résultats, cette thèse a permis de mieux comprendre le comportement d'une turbomachine axiale selon ses paramètres de fabrication. Ce travail contribue également à ouvrir de nouvelles directions de recherche dans le domaine du rotomoulage, notamment appliqué aux ventilateurs de refroidissement automobile, qui présente aujourd'hui un grand intérêt.

**Mots-clés :** Aérodynamique, Mécanique, Matériau, Physico-chimique, énergétique, rendement, turbomachine, ventilateur axial, procédé fabrication, rotomoulage, contrôle, optimisation.

# Abstract

Plastic rotational molding is a manufacturing process developed in the 50's. This approach possesses numerous advantages over others, such as processing, assembly, etc. One of the most noticeable benefits is the low cost of the subassembly manufacture. Noneover, it is commonly used today in various applied fields and still actively urges new research. This thesis focuses on turbomachinery, specifically cooling fans used in automobiles, an overheating industrial market. In the past, the preliminary versions of axial fans were designed and manufactured in the "Fluid Engineering and Energy Systems Laboratory" to meet this industrial needs. However, there has not been any practical research on the control and optimization of this manufacturing process. This thesis therefore fits naturally into a research dynamic making the link between the energy performance of the system and the manufacturing process.

Resulting from the rotational molding process parameters, namely the mass of polymer powder, the temperature in the oven, and baking time, the general idea of the study lies in the interference of macroscopic scale with qualitative and quantitative analysis from the fan experiments. On one side, this would be geometry parameters, results of mechanical efficiency, etc. Besides, the output could act as the microscopic scale to identify the physical and chemical properties of the material. In other words, the thesis objective is to investigate the influence of the rotational molding process parameters in terms of the aerodynamic characteristics of axial fans.

The experimental findings reveal significant differences in the aerodynamic efficiency of the fans. For instance, in a study in which 45 fans were tested, the energy efficiency difference is around 6%. Strikingly, these discrepancies are strongly correlated with the mass of polymer powder used in manufacturing. In this study, we used polyethylene (PE). In order to clarify these differentiations, the first method was to ensure the quality control of the geometry of the manufactured part, especially at the level of the blades, like wedging, chord, and thickness, by 3D scanning methods. The results presented that there was little difference in varying the manufacturing parameters. However, thanks to the mechanical and physicochemical analysis of all the material samples, it was significant that for oven temperatures of 285°C and baking times for 15 minutes, the material degraded due to oxidation phenomena. Qualitatively, the fan was

turning yellow; quantitatively, infrared spectroscopy revealed the apparent presence of chemical bonds with oxygen.

In addition, the mechanical analyzes on the material indicated the effect of the variation in temperature, the resistance modification of the material, as well as the Young's modulus. The distribution of materials in the mold is of paramount importance. With lower masses which is 300g, the dynamic unbalance phenomenon was less significant. As a consequence, the consumed mechanical power, therefore, went down, resulting in better efficiency. The visual appearance of the polymer distribution within the axial fan and the measurements utilizing an accelerometer made it possible to confirm this dispersion.

In the light of the results, this thesis provides a better understanding of the behavior of an axial turbomachine based on its manufacturing parameters. This work also contributes to opening up new research directions in the field of rotational molding, in particular applied to automotive cooling fans, which is of great interest today.

**Keywords :** Aerodynamics, Mechanics, Material, Physico-chemical, energy, efficiency, turbomachinery, axial fan, manufacturing process, rotational molding, control, optimization.

# Chapitre 1

## Introduction générale

### Contents

---

<b>1.1</b>	<b>Etat de l'Art</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivations</b>	<b>8</b>
<b>1.3</b>	<b>Structure du manuscrit</b>	<b>9</b>

---

### 1.1 Etat de l'Art

En plasturgie, le rotomoulage est un procédé de transformation de la matière plastique par moulage afin de fabriquer des pièces creuses, de tailles et de formes simples ou complexes [14], [15], [16], [17]. L'idée principale est de chauffer un matériau, au-delà de sa température de fusion, afin de le rendre fluide. A l'intérieur d'un moule animé d'une rotation (moulage par rotation), le fluide épouse la forme souhaitée. Enfin, en refroidissant le moule, la matière se solidifie de nouveau, pour obtenir la pièce finale. Si le premier brevet de machine à rotomoulage tel que nous le connaissons aujourd'hui date de 1935, ce n'est que fin des années 50, début des années 60, que l'utilisation industrielle sur la base du polyéthylène se développe. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport à d'autres (usinage, assemblage, etc.), comme notamment le coût de fabrication des pièces. Il est aujourd'hui utilisé dans de nombreux domaines d'applications, et anime encore activement la recherche. Dans cette thèse, nous nous intéresserons au domaine des turbomachines.

Par exemple, les ventilateurs de refroidissement utilisés dans l'automobile est un marché industriel très actif. Les exigences de productivité, d'efficacité et de coût doivent être améliorées et de nouvelles méthodes de fabrication sont appliquées. Pour saisir cette nouvelle opportunité de marché, il est nécessaire d'améliorer l'adéquation entre le processus de rotomoulage et les performances. Actuellement, la technologie du rotomoulage est le secteur à la croissance la plus rapide de l'industrie plastique avec un

taux de croissance annuel d'environ 10 à 20 % [10].

Cependant, l'application de cette méthode pour créer des turbomachines axiales est limitée et repose principalement sur des connaissances expérimentales (lois empiriques, phénoménologiques, règles métiers...). Par conséquent, des recherches et des approches approfondies sont nécessaires sur l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage, sur la pièce finale.

Au sein de la machine de rotomoulage, le moule est placé sur deux axes perpendiculaires (figure 1.1). La vitesse de rotation des deux axes est indépendante et personnalisable. Ceci permet une flexibilité lors de la fabrication de pièces moulées de formes complexes ou des produits nécessitant une grande qualité [18], [10]. Habituellement, la vitesse de rotation est maintenue constante pendant le chauffage et le refroidissement. En fonction de la forme, de la taille du moule ou de la complexité du produit, il est possible de choisir la vitesse de rotation appropriée des deux axes et le rapport de vitesses des deux axes (tableau 1.1). Les rapports des deux axes sont définis selon l'équation 1.1. La vitesse de rotation des deux axes (ou le rapport de vitesses) a une grande influence sur la distribution d'épaisseur et l'uniformité du matériau dans le ventilateur.

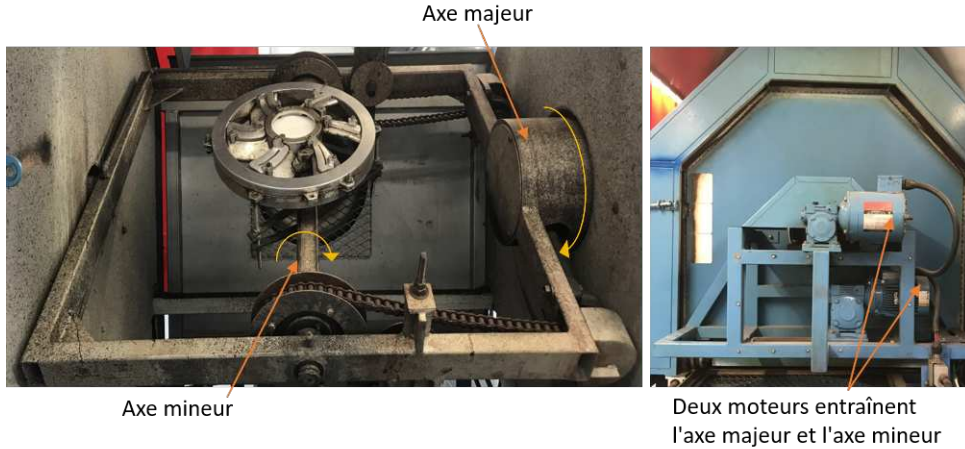


FIGURE 1.1 – Moteur d'entraînement de l'axe majeur et de l'axe mineur

$$\text{Rapport de vitesses} = \frac{\text{Axe majeur}(tr/min)}{\text{Axe mineur}(tr/min) - \text{Axe majeur}(tr/min)} \quad (1.1)$$

Un défaut classique que l'on peut retrouver dans ce procédé de rotomoulage est l'apparition de petits trous sur la surface ou des bulles d'air [19], [20]. En fait, lorsque la poudre fond, elle capture de l'air, et lorsque la matière se solidifie de nouveau, elle retient parfois ces bulles d'air. Sous l'action de la pression, la température dans les bulles d'air se diffusent à travers la couche de matière fondue, et après un temps, elles

TABLEAU 1.1 – Rapports de vitesse recommandés pour différentes formes de moules

Rapport de vitesse	Forme du moule
8/1	Oblongs, tubes droits
5/1	Tuyaux
3/1	Cubes, boules, boîtes rectangulaires, la plupart des formes régulières 3D
2/1	Anneaux, pneus, mannequins, formes plates
1/2	Pièces qui ont des variations d'épaisseur avec un rapport 2/1
1/3	Rectangles plats, formes de valise
1/4	Tuyaux courbés, Pièces qui ont des variations d'épaisseur à 3/1
1/5	Cylindres montés verticalement

disparaissent (figure 1.2). En outre, d'autres facteurs tels que la forme, la taille, la viscosité et la distribution de taille de grain du matériau influencent également la formation de bulles d'air [1]. Des études ont mis en évidence des facteurs qui influencent la forme des bulles d'air et, plus important encore, la méthode pour les éliminer.

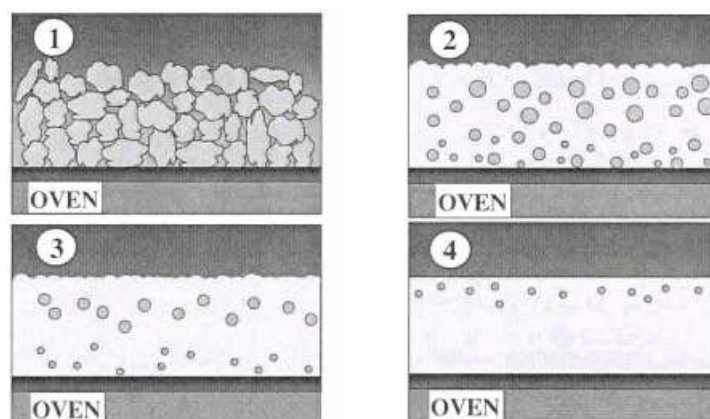


FIGURE 1.2 – Processus de formation et de disparition des bulles: 1- La poudre de polymère se déplace à la surface du moule, 2- Les bulles d'air sont formées par piégeage dans la matière, 3, 4 - Après un certain de temps, ces bulles d'air diffusent à travers le polymère fondu et disparaissent [1]

Dans les études de Xu *et al.* [21], [22] et Spence *et al.* [23], des simulations et un modèle semi-expérimental ont été présentés pour prédire la taille possible des bulles selon les conditions de fabrication ainsi que la méthode pour simuler l'élimination des bulles d'air dans des conditions normales de rotomoulage. Une autre étude réalisée par Crawford *et al.* [2], a montré que la pression est le principal paramètre affectant l'élimination des bulles d'air et des piqûres dans la surface. Les mesures de contrôle de la pression à l'intérieur d'un moule jouent un rôle important pour l'industrie du rotomoulage (figure 1.3):

- Contrôle de la qualité des produits
- Réduction du temps de cycle de rotomoulage

Malgré ces avantages, le rotomoulage n'est pas très utilisé dans l'industrie. En effet, avec le moule actuel, même si l'on veut fournir un environnement contrôlé dans lequel

la pression positive requise peut être maintenue, il y a en général des défauts qui se produisent au niveau de la ligne de division du moule. Habituellement, ce séparateur n'est pas étanche à l'air, donc des fuites peuvent apparaître.

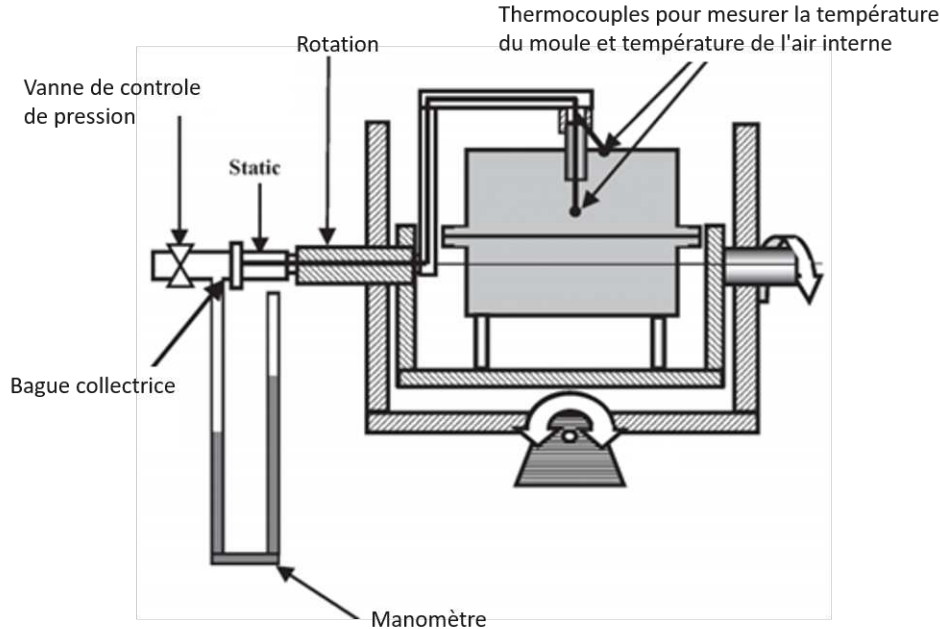


FIGURE 1.3 – Système de contrôle de la pression et de la température sur la machine de rotomoulage [2]

Spence *et al.* [24] ont mentionné une solution pour éliminer les bulles d'air en surchauffant le produit. Cette méthode est considérée comme efficace, mais elle a un effet néfaste sur la résistance mécanique du produit. De plus, le temps de cycle est plus long, cela réduit l'efficacité du procédé de rotomoulage, et augmente également le coût de fabrication (énergivore).

Dans les études de Mackinnon [25] et Nugent [26], la méthode de régulation de pression à l'aide d'un tuyau d'évent est présentée dans le processus de coulée. Un évent pénètre dans le moule pour relier l'intérieur du produit de coulée à l'environnement extérieur. Cela aide à équilibrer la pression à l'intérieur et à l'extérieur du moule et facilite la diffusion des bulles d'air du polymère fondu plus facilement pendant le chauffage. Cependant, l'utilisation du tuyau d'évent et l'élimination des bulles d'air dépendent des paramètres d'installation tels que la température et le temps du moule dans le four. Par conséquent, cela dépend de la forme, de la taille ou de la complexité du produit pour faire les ajustements appropriés.

Une caractéristique particulière du procédé de rotomoulage est que les propriétés de fusion et de cristallisation des matériaux polymères provoquent un transfert de chaleur. En fait, ce mécanisme comporte deux processus endothermiques et exother-

miques. La synchronisation des vitesses de chauffage et de refroidissement de l'air à l'intérieur du moule indique qu'il existe un mécanisme d'échange de chaleur et une transition de phase pendant le rotomoulage. Par la suite, la modélisation des échanges de chaleur pendant ce procédé a été abordée par Greco *et al.* [27]. Les transferts de chaleur jouent un rôle très important. S'il n'est pas correctement contrôlé, il peut entraîner des défauts tels que des bulles d'air, une déformation du produit, une oxydation ou une dégradation du matériau.

La réduction du temps de cycle de rotomulage est un enjeu important pour l'industrie du rotomoulage. De nombreuses études ont été menées jusqu'à présent avec le désir d'explorer plus d'aspects de cette méthode. Le cycle de rotomoulage comprend: le temps de chargement, le temps de chauffage, le temps de refroidissement, le temps de déchargement. Les recherches de Abdulla *et al.* [28], [29] ont montré que dans les bonnes conditions, lors du refroidissement par pulvérisation d'eau ou lors du réglage de la pression à l'intérieur du moule, les temps de cycle peuvent être réduits de respectivement 55% et 33%. Cependant, l'effet de la réduction du temps de cycle doit également garantir la qualité du produit obtenu. En particulier, la qualité des produits dépend fortement du processus de refroidissement et de la méthode de refroidissement. Si le processus de refroidissement est trop rapide, il entraînera la phénomène de déformation et réduira les propriétés mécaniques du produit. Ramkumar *et al.* [30] ont simulé le procédé de rotomoulage pour estimer la durée du cycle de chauffage et obtenir l'épaisseur du produit final souhaitée.

Les efforts visent ainsi à promouvoir les points forts du rotomoulage et surtout à mieux maîtriser le procédé. Récemment, des études approfondies ont été réalisées sur la méthode de rotomoulage et l'optimisation des procédés de rotomoulage conventionnel et rotomoulage réactif (Perot [31], [32] et Riviere [33]). A la différence de la méthode de rotomoulage conventionnel, où le chauffage dans le four fait fondre la poudre, puis cette dernière est uniformément répartie dans le moule, la méthode de rotomoulage par réactif consiste à placer le matériau dans un moule qui est habituellement sous forme liquide. Des réactifs élastomères et thermodurcissables sont utilisés, ce qui permet au polymère d'être synthétisé à partir d'une réaction de polymérisation. En plus de l'optimisation du temps de cycle, l'évaluation de la relation entre le matériau, le procédé de rotomoulage et la qualité de la pièce coulée sont abordés.

Enfin, une dernière étude serait à citer ici, Lucas *et al.* [9] qui ont démontré qu'une approche plus fiable du contrôle du procédé consiste à enregistrer la température de l'air à l'intérieur du moule pendant le cycle de moulage par un thermocouple.



## PROPRIÉTÉS DES TURBOMACHINES AXIALES À PALES CREUSES:

Les ventilateurs axiaux présentent généralement des conditions de débit défavorables au centre du ventilateur et en périphérie des pales, Eberlinc *et al.* [3], [34]. Par rotomoulage, les ventilateurs obtenus présentent des pales creuses. Elles permettent la circulation de l'air à l'intérieur de la roue à travers les chemins et à travers les fentes étroites dans le bord de fuite de la pale (figure 1.4). L'effet de l'écoulement d'air interne sur le champ d'écoulement d'air du ventilateur axial externe et les caractéristiques aérodynamiques ont été étudiées. Les résultats montrent une augmentation du rendement et de la pression (une différence de pression d'environ 6% sur toute la plage de fonctionnement) [4].

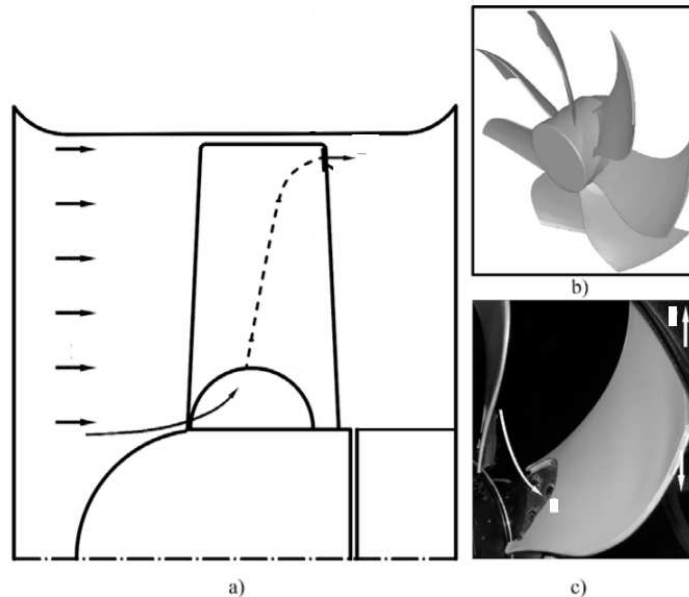


FIGURE 1.4 – (a) Schéma de l'écoulement d'air du ventilateur axial, (b) ventilateur axial, (c) pale creuse [3]-[4]

Marrero *et al.* [5] ont utilisé une méthode de rotomoulage pour fabriquer de petites pales d'éoliennes. Le but de cette étude est d'évaluer la faisabilité de petites éoliennes fabriquées par rotomoulage, sans réduire leurs performances. Les résultats de la recherche initiale montrent que cette méthode est adaptée pour générer des pales de rotor, et également qu'elle permet d'obtenir des turbines compétitives par rotomoulage. Pour assurer la rigidité et la durabilité, la résistance de la pale est renforcée par des pièces métalliques (figure 1.5).

Des efforts sont également menés en recherche pour créer un ventilateur qui puisse répondre aux exigences du refroidissement d'une voiture. Le moule est conçu pour améliorer les performances acoustiques [6], [7]. De plus, en raison de la nature creuse du ventilateur, il peut être rempli de mousse pour absorber le son (figure 1.6).

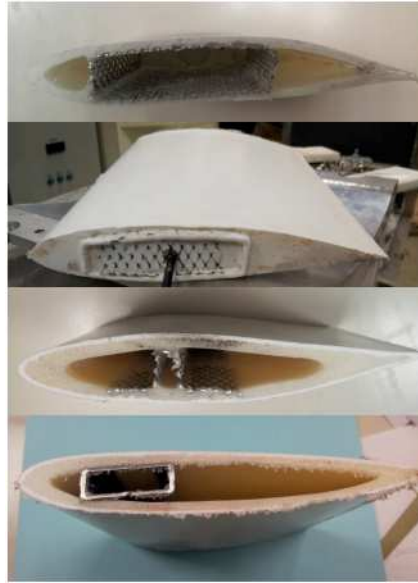


FIGURE 1.5 – Sections transversales d’aubes d’éolienne [5]

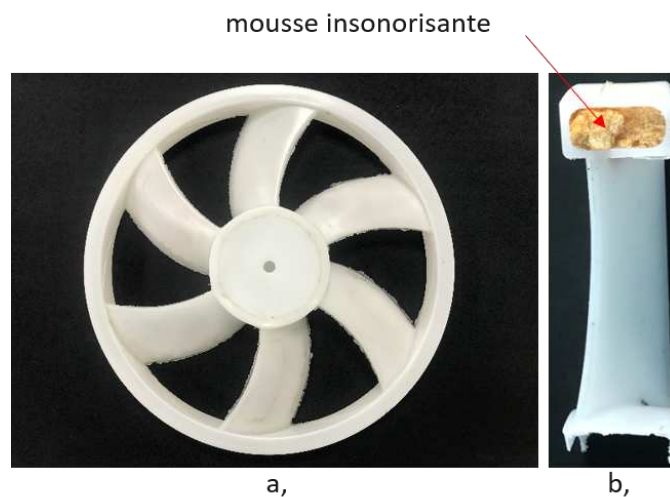


FIGURE 1.6 – (a) Ventilateur axial, (b) Coupe transversale de la pale pour une application au refroidissement automobile [6], [7].

L'inconvénient des études précédentes est que le contrôle de l'écoulement est passif et relativement complexe. Le développement du rotomoulage, dans un contexte économique qui est en pleine expansion, et l'existence de matériaux utilisables de plus en plus bon marché, implique que ce procédé a un avantage concurrentiel par rapport aux autres méthodes de fabrication traditionnelles. C'est la cas notamment dans le secteur des turbomachines, où des études ont été menées pour améliorer des performances des ventilateurs axiaux [35], [8]. L'avantage de la méthode que les auteurs présentent, est de contrôler l'écoulement en injectant ou en aspirant de l'air à l'intérieur du ventilateur (figure 1.7). Le but de l'étude était d'essayer de réduire le débit de fuite à la périphérie de la pale et d'améliorer le rendement du ventilateur axial. Nous pourrions citer également une autre étude, où l'utilisation des ventilateurs à pales creuses peut

également être intéressante avec du liquide de refroidissement pour la climatisation, Kamel Azzouz *et al* [36].

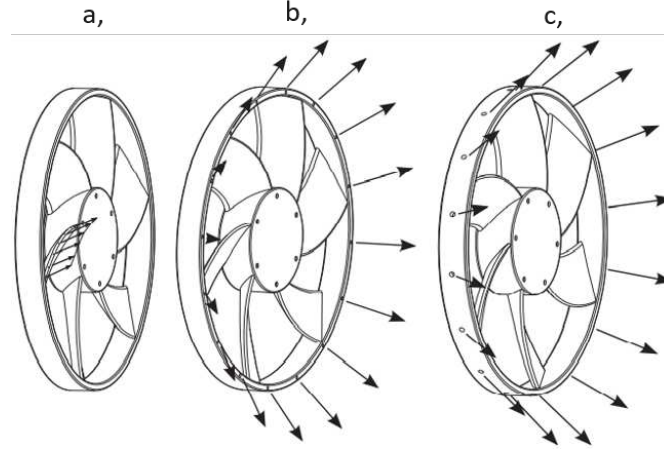


FIGURE 1.7 – (a) injection de l’air au bord de fuite de l’aube, (b) injection du côté de la virole et (c) injection à la périphérie de la virole [8]

## 1.2 Motivations

Le rotomoulage plastique est utilisé dans de nombreux domaines d’applications, et anime aujourd’hui encore activement la recherche. Dans cette thèse, nous nous intéresserons au domaine des turbomachines. Par exemple, les ventilateurs de refroidissement utilisés dans l’automobile est un marché industriel très actif. Dans le passé, des premières versions d’un ventilateur axial ont été conçues et fabriquées au sein du *Laboratoire d’Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques* pour répondre à ce besoin industriel. Toutefois, aucune analyse réelle n’a été faite en termes de contrôle et d’optimisation de ce procédé de fabrication. Cette thèse s’inscrit donc naturellement dans une dynamique de recherche faisant le lien entre les performances énergétiques du système et le procédé de fabrication.

Les propriétés mécaniques des pièces rotomoulées, telles que la résistance à la traction (module d’Young), le taux de cristallisation du matériau ou encore le degré d’oxydation sont des indicateurs de la qualité de fabrication. Ces propriétés mécaniques dépendent à leur tour d’un certain nombre de paramètres du procédé tels que: le temps, la température dans le four, la masse de poudre utilisée, le temps de refroidissement, ou encore le type de matériau utilisé [37].

Dans cette thèse, nous étudierons une turbomachine axiale conçue au sein du laboratoire. Si plusieurs premiers travaux ont porté sur ce système ([8], [9], [35], [38]-[39]), il n’en demeure pas moins que la question liée à l’optimisation n’a pas été abordée, à

savoir: comment créer un ventilateur performant et de qualité, à partir du procédé de rotomoulage ? En outre, ces études n'ont pas abordé la méthode de contrôle du retrait du matériau, ni pris en compte l'effet sur la géométrie du ventilateur obtenue. La qualité des ventilateurs affecte-t-elle le rendement ? Si oui, comment ? Peut-on expliquer les différences observées par l'analyse mécanique et physico-chimique ?

A partir des paramètres du procédé de rotomoulage (masse de poudre du polymère, température dans le four, temps de cuisson), l'idée générale de l'étude réside dans le croisement entre l'échelle macroscopique avec l'analyse qualitative et quantitative de la pièce finale (géométrie, résultats des performances aéromécaniques, etc.) d'une part, et l'échelle microscopique avec l'analyse des propriétés mécaniques et physico-chimiques du matériau d'autre part. Autrement dit, l'objectif de la présente thèse est d'*étudier l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques aérodynamiques d'un ventilateur axial*.

Grâce aux résultats de l'analyse de 45 ventilateurs obtenus par le procédé de rotomoulage, avec différentes conditions de fabrication, il est possible d'évaluer l'effet des paramètres lors du rotomoulage sur les propriétés mécaniques ainsi que les performances aérodynamiques des ventilateurs. Ces résultats sont des informations précieuses qui permettent d'optimiser et d'établir un contrôle proactif du procédé de fabrication des ventilateurs axiaux par rotomoulage.

## 1.3 Structure du manuscrit

Le présent manuscrit de thèse comporte 6 chapitres, avec un séquençement reflétant au mieux la logique de ces travaux de recherche. La figure (1.8) illustre schématiquement l'articulation du travail réalisé durant cette thèse.

- Chapitre 1: Introduction générale

Nous présentons un *état de l'art* des divers travaux de recherche issus de la littérature sur ce sujet. Il est également mis en avant les motivations de l'étude. Enfin, une présentation de la structure du manuscrit est faite.

- Chapitre 2: Fabrication d'un ventilateur axial

Dans ce chapitre, nous présenterons dans un premier temps le système étudié, à savoir: un ventilateur (turbomachine axiale) et son moule. Nous rentrerons davantage dans les détails quant au procédé de fabrication par rotomoulage. Nous définirons les paramètres sélectionnés du procédé pour cette étude et le matériau

utilisé pour la fabrication du ventilateur.

- Chapitre 3: Protocole expérimental

Afin de tester les performances aéro-mécaniques des ventilateurs, je présenterai le banc d'essai utilisé, ainsi que les différents moyens de métrologie mis en œuvre pour l'étude. Un point sera fait quant aux grandeurs physiques que l'on souhaite mesurer, ainsi que sur l'incertitude expérimentale. Nous aborderons en outre, le protocole (la démarche qualité) adopté pour contrôler les pièces fabriquées. Des méthodes de scanner 3D et de microscopie sont utilisées pour vérifier respectivement les dimensions géométriques et la structure en surface des ventilateurs.

- Chapitre 4: Résultats expérimentaux

Ce chapitre présente les mesures aérodynamiques pour 45 ventilateurs obtenus par le procédé de rotomoulage. Pour garantir la fiabilité des résultats un plan de tests de répétabilité a été réalisé, à la fois sur le procédé de fabrication et sur le banc d'essai. Une interprétation physique de l'influence des paramètres sur les performances sera faite. Ce chapitre s'intéresse globalement à des grandeurs "*globales*": le couple, la vitesse de rotation, la puissance, le rendement, ou encore le champ de vitesse.

- Chapitre 5: Caractérisation mécanique et physico-chimique

Dans ce chapitre, nous nous intéresserons plutôt à l'échelle microscopique, à savoir: les propriétés mécaniques du matériau ou encore les caractéristiques physico-chimiques de ce dernier. L'idée étant de faire un lien avec le chapitre précédent, afin d'expliquer les différences macroscopiques observées. Sur un échantillon de 45 éprouvettes divers tests seront réalisés: [Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier \(FTIR\)](#) pour contrôler les composants structuraux moléculaires du ventilateur obtenu. Le test [Calorimétrie différentielle à balayage \(DSC\)](#) et le test de traction sont utilisés pour déterminer entre autre le module d'Young  $E$  et taux de cristallisation  $X_c$ . Enfin, l' [Analyse mécanique dynamique \(DMA\)](#) permet de déterminer l'effet de la transition de phase pendant le procédé de rotomoulage sur la résistance du matériau.

- Chapitre 6: Conclusion

Le manuscrit se termine par un chapitre de conclusion général. Une synthèse sera faite sur les résultats les plus marquants permettant de répondre aux problématiques de départ. Nous aborderons également une partie sur les perspectives futures concernant ces recherches.

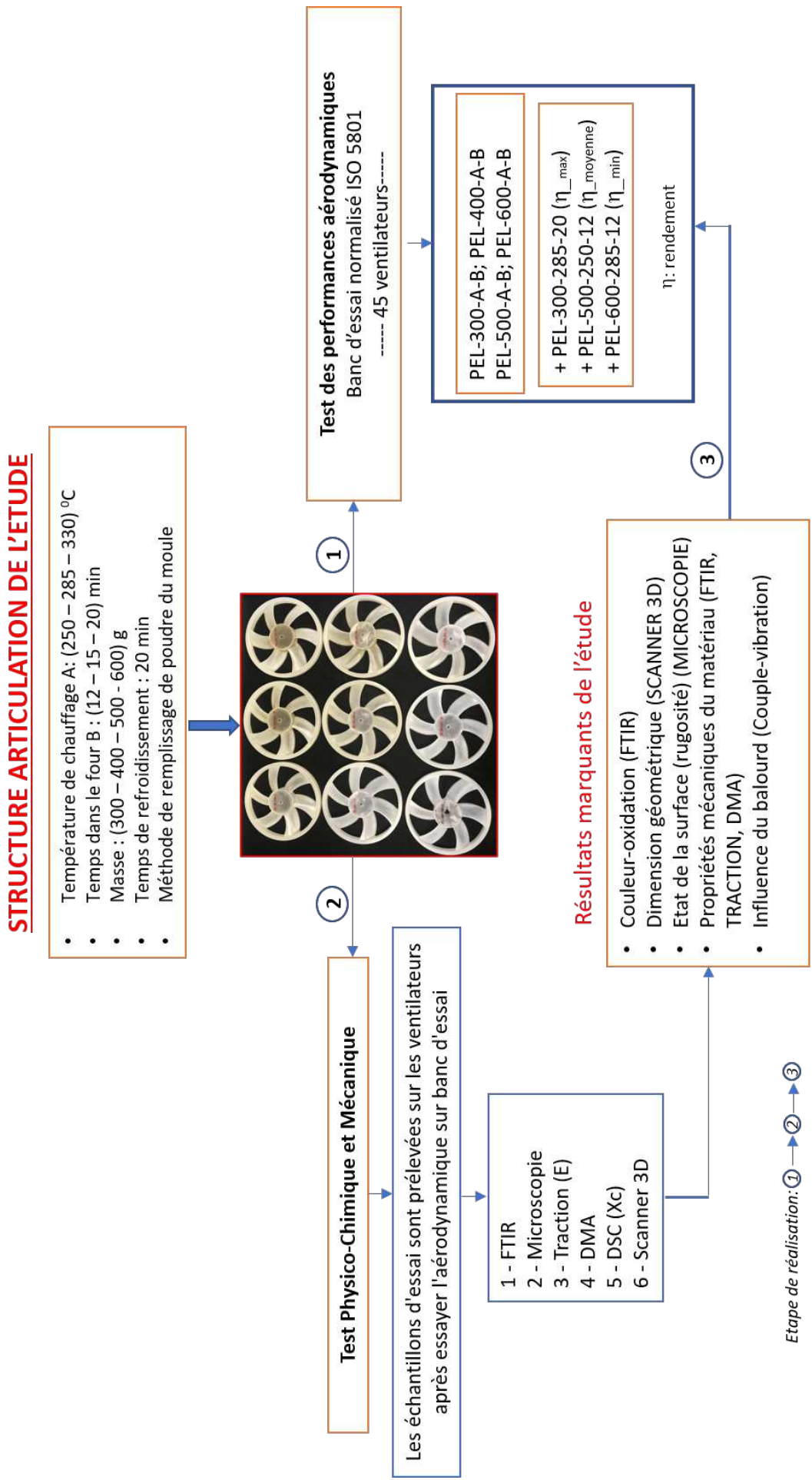


FIGURE 1.8 – Schéma de la thèse



# Chapitre 2

## Fabrication d'un ventilateur axial

### Contents

---

<b>2.1</b>	<b>Conception du moule et présentation du ventilateur . . .</b>	<b>14</b>
<b>2.2</b>	<b>Le procédé de fabrication : le rotomoulage . . . . .</b>	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Matériau utilisé pour le rotomoulage . . . . .</b>	<b>24</b>
<b>2.4</b>	<b>Paramètres de contrôle du procédé de rotomoulage . . . .</b>	<b>28</b>
<b>2.5</b>	<b>Procédé de remplissage du moule avec la poudre . . . . .</b>	<b>31</b>
<b>2.6</b>	<b>Conclusion . . . . .</b>	<b>35</b>

---

### Introduction

Le rotomoulage est un procédé qui permet la réalisation de pièces creuses de grandes dimensions (ou petites dimensions), sans reprise, ni lignes de soudure. Le procédé est connu depuis une cinquantaine d'années, mais son utilisation est restreinte. Les entreprises de rotomoulage sont généralement de petites sociétés, utilisant un savoir-faire empirique et qui sont peu génératrices d'innovations. Les inconvénients majeurs du rotomoulage sont aujourd'hui le temps de cycle et la non-maîtrise du procédé. Or de nouveaux marchés, notamment l'automobile, ayant des exigences de productivité, de rendement et de qualité se profilent. Afin de saisir l'occasion offerte par ces nouveaux marchés, il est nécessaire d'améliorer l'adéquation du procédé de rotomoulage. Durant le processus de mise en œuvre, le matériau polymère subit différentes transformations physiques : la fusion, la coalescence des particules, la densification du volume à l'état fondu et la solidification. La compréhension des mécanismes qui affectent l'état de surface et structurales du matériau a permis d'expliquer les défauts qui apparaissent dans les pièces finales. Ces défauts et propriétés des pièces moulées avec la machine de laboratoire ont été analysés (bulles, vagues, propriétés mécaniques) et mis en relation avec les propriétés du matériau et les cinétiques de coalescence et de densification. Il est important de noter que la qualité des aubes affecte les caractéristiques aérodynamiques d'un ventilateur axial. Plus précisément, les paramètres du procédé de rotomoulage jouent un rôle important dans le rendement de l'utilisation du ventilateur. La modification des paramètres au cours du procédé de rotomoulage donnera à la pièce finale



des caractéristiques différentes.

## 2.1 Conception du moule et présentation du ventilateur

### 2.1.1 Conception du moule du ventilateur

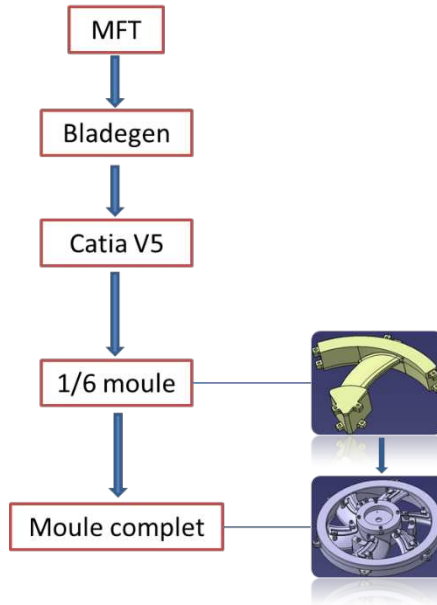


FIGURE 2.1 – Etapes de fabrication du moule pour le ventilateur axial

Avant de concevoir le moule, il faut déterminer la forme et la taille du ventilateur à réaliser. Sur la base de la surface et de la structure du ventilateur, une méthode de conception du moule est proposée (figure 2.1). La conception du ventilateur est basée sur le logiciel [Mixed-Flow Turbomachinery 3D \(MFT\)](#), développé au laboratoire [LIFSE](#) (figure 2.2 et 2.3). En se fondant sur le travail de thèse de Robert Rey [40] et par la suite, sur d'autres recherches menées par Farid Bakir [41], une méthode de conception de turbomachine axiale a été réalisée et intégrée dans [MFT](#). Cette méthode est le résultat d'une série d'études statistiques et de mesures sur des profils NACA [42], [43].

Depuis les années 1940, les écoulements, les instabilités et l'état de surface autour des ventilateurs axiaux ont été étudiés. Dans l'étude de Squire [44] et Bois [45], l'écoulement secondaire a été montré plus clairement. Des études montrent que différents mécanismes de tourbillons sont à l'origine du bruit et réduisent l'efficacité aérodynamique du ventilateur (figure 2.4). Par conséquent, avec la structure de la roue, il est nécessaire de prêter attention à ce problème. Par la suite, de nombreux auteurs ont étudié la structure et la formation de ces écoulements, en particulier la distance entre

Cahier des charges	
<b>Pression</b>	270 Pa
<b>Débit</b>	0.8 m <sup>3</sup> /s
<b>Vitesse de rotation</b>	2500 tr/min
<b>Vitesse spécifique nsq :</b>	214,68562
<b>Vitesse spécifique Omega :</b>	4,05583
<input type="button" value="Retour"/> <input type="button" value="Valider"/>	

Angle moyen statorique :	22.5 Deg
Angle moyen rotorique :	72 Deg
<input type="radio"/> Vortex libre <input type="radio"/> Vortex constant <input checked="" type="radio"/> Vortex forcé	
Facteur de diffusion en pied :	0,372
Facteur de diffusion en périphérie :	0,65
Nbre aubes	6
Ep Max	10 mm

FIGURE 2.2 – Cahier des charges du ventilateur sélectionné pour l'étude et utilisé dans le logiciel MFT 3D

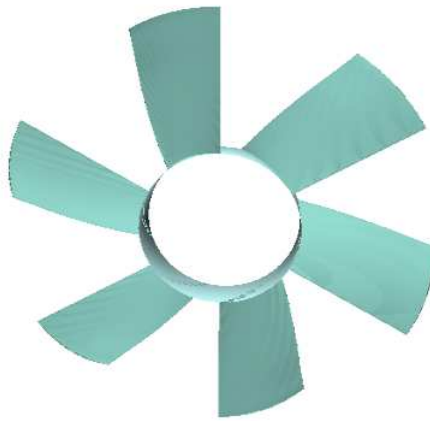


FIGURE 2.3 – Vue 3D du ventilateur axial dessiné par le logiciel MFT 3D

le sommet des pales et le carter. Pardowitz [46] a réussi à supprimer cet écoulement de fuite en utilisant une virole en aluminium d'une épaisseur de 0,05 mm autour du sommet des pales du ventilateur (figure 2.4)

Par conséquent, cette structure est mentionnée dans l'étude de conception de moule de Pellicer [38]. En outre, nous voyons que l'utilisation de la virole présente les principaux avantages suivants :

- Augmentation de la résistance mécanique des pales et limitation de la déformation des pales. Ceci est très important pour les ventilateurs fabriqués selon la méthode de rotomoulage. En travaillant à un débit élevé, la déformation de la roue est très susceptible de se produire en raison de la nature creuse du ventilateur.

- Réduction du bruit (amélioration des performances aéroacoustiques)

- Solution compatible avec la conception de moules. Une virole de 17mm de largeur et 34mm de hauteur sera donc utilisée dans la cadre de cette thèse. Cela facilite le

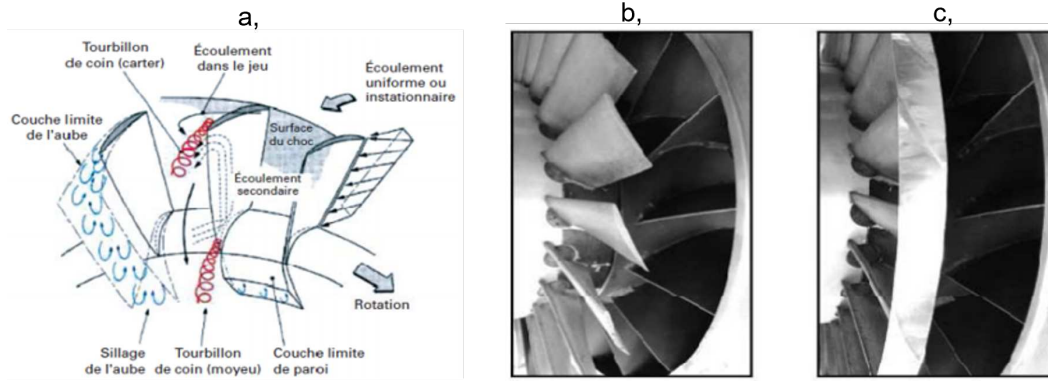


FIGURE 2.4 – Structure de l'écoulement présent dans le jeu (a) et solution proposée en utilisant une virole (b,c) [46]

déplacement du matériau uniformément réparti sur les pales.

Dans la recherche sur les turbomachines et surtout aujourd'hui pour les ventilateurs utilisés dans le refroidissement automobile, en plus de l'amélioration des performances aérodynamiques, l'amélioration des performances aéroacoustiques est essentiel. Par conséquent, des modifications de la structure de la roue conçue avec le logiciel [MFT](#) sont nécessaires pour répondre à cette exigence. Dans le but d'améliorer les performances acoustiques des ventilateurs, Hurault [6] et Kergourlay [7] ont étudié le sens d'empilement des pales avec 3 configurations proposées à la figure 2.5. D'un point de vue acoustique, ce changement a considérablement réduit le bruit produit, surtout avec la configuration de la figure 2.5b (pales avant courbées). Il y a cependant une légère diminution des performances pour cette configuration par rapport à une configuration de pales radiales (figure 2.5a).

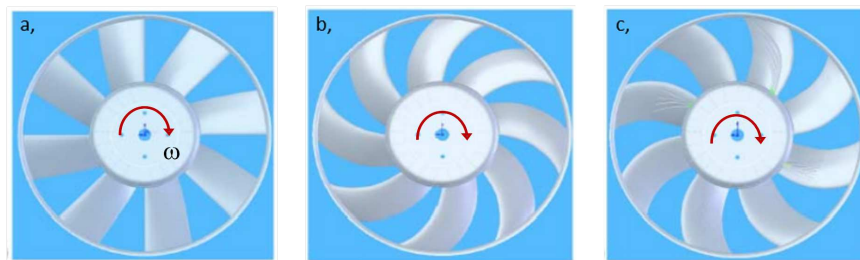


FIGURE 2.5 – Différents types de configuration de ventilateur axial: (a) pale radiale, (b) pale avant courbée et (c) pale arrière courbée [6]

Cette configuration à pales avant courbées a donc été choisie pour la conception d'un prototype de ventilateur complet (figure 2.7). Les principales caractéristiques de chaque pale sont présentées dans le tableau 2.1. Chaque ventilateur a 6 pales, avec un profil de pale de type Naca-65(aa)bb. Le 6 fait référence à la série 6, le 5 correspond à la position relative à la corde de la pression minimale sur l'extrados, "aa" correspond au coefficient de portance à incidence nulle, soit le coefficient de cambrure aérodynamique (multiplié par 10) et enfin "bb" correspond à l'épaisseur maximale relative à la corde (en

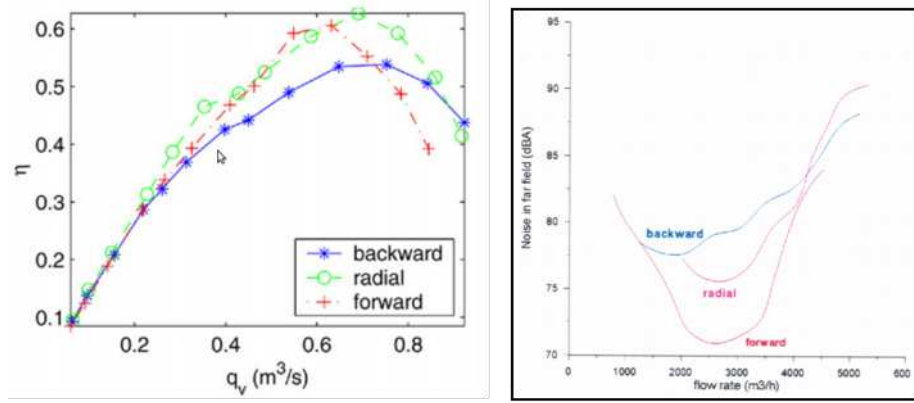


FIGURE 2.6 – Performances aérodynamiques et acoustiques pour les trois configurations de la figure 2.5: pale radiale, pale avant courbée, pale arrière courbée [6]

pourcentage). Le rapport  $R_{min}/R_{max} = 0,365$  avec  $R_{max} = 179$  mm. Pour la virole, 17 mm de largeur et 34 mm de hauteur ont été utilisées, comme expliqué précédemment.

TABLEAU 2.1 – Principales caractéristiques de la géométries utilisées pour la conception du ventilateur axial

	R [mm]	L [mm]	$\theta$	$\gamma$	Profile	K
Hub	65	66.6	0.97	53	NACA 65(07)06	0.372
Mid-span	122.2	74.0	0.58	66	NACA 65(10)05	
Tip	179.0	81.3	0.43	70	NACA 65(11)05	0.650



FIGURE 2.7 – Vue 3D par CAO du ventilateur axial

Dans la première étape de conception du moule, créer un moule complet de ventilateur semblait très risqué, car les essais faits jusqu'à ce moment n'assuraient pas un remplissage total de l'empreinte du moule. Par conséquent, la conception de 1/6 du moule est nécessaire (figure 2.8). Considérons ensuite l'adaptabilité du moule au mouvement du matériau dans le moule, et à la qualité du ventilateur qu'on obtenu. À partir de là, il est possible de compléter le moule pour un ventilateur complet. Le moule est conçu avec le logiciel CATIAV5R17. Puisque la pièce n'est pas symétrique, il a fallu concevoir deux demi moules différents, en faisant en sorte que le plan de joint passe par la corde de la pale afin que celui-ci n'influe pas sur les caractéristiques aérodynamiques

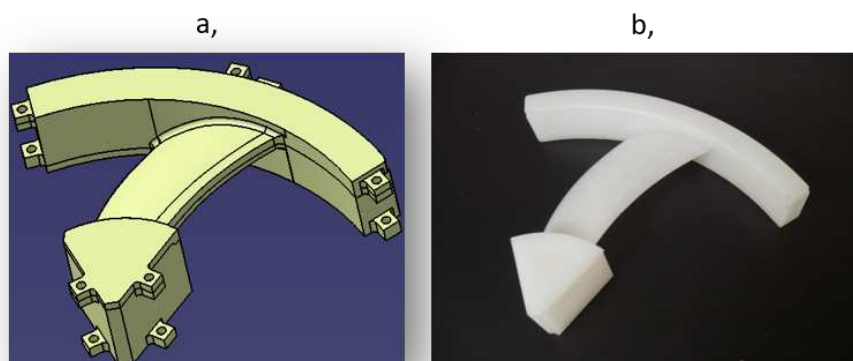


FIGURE 2.8 – Réalisation d'un moule de 1/6 du ventilateur: (a) géométrie du moule (CAO), (b) pale obtenue par rotomoulage avec le moule considéré

du ventilateur. Ce travail a été réalisé par Sifres [38]. Ensuite, Martinez [47] et Canne [39] ont réalisé une étude approfondie pour créer un moule complet (figure 2.9). Les résultats montrent l'adaptabilité du matériau dans le moule. Cependant, des analyses et des tests sont nécessaires pour améliorer encore ce procédé.

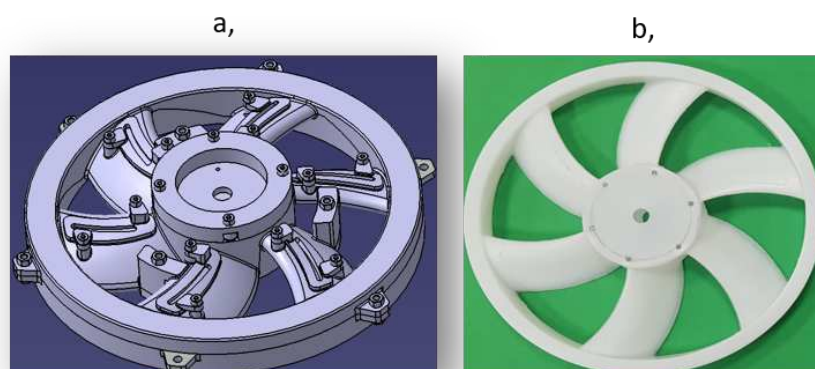


FIGURE 2.9 – Réalisation du moule complet: (a) CAO du moule de ventilateur complet, (b) ventilateur complet obtenu par rotomoulage avec le moule considéré

### 2.1.2 Fabrication de moule du ventilateur

La partie centrale du moule est équipée d'un évent d'aération en caoutchouc résistant à la chaleur. L'évent est rempli au milieu de laine de roche pour empêcher la poudre ou la poudre fondue de s'écouler. Le but de l'utilisation de ce évent est de maintenir l'équilibre de pression à l'intérieur du moule pendant les deux cycles de chauffage et de refroidissement. De plus, le dessus du moule comporte 6 rainures sur les pales (figure 2.10). Nous pouvons remplir le moule de poudre à ces positions. Le moule est ensuite sur la machine (figure 2.11).



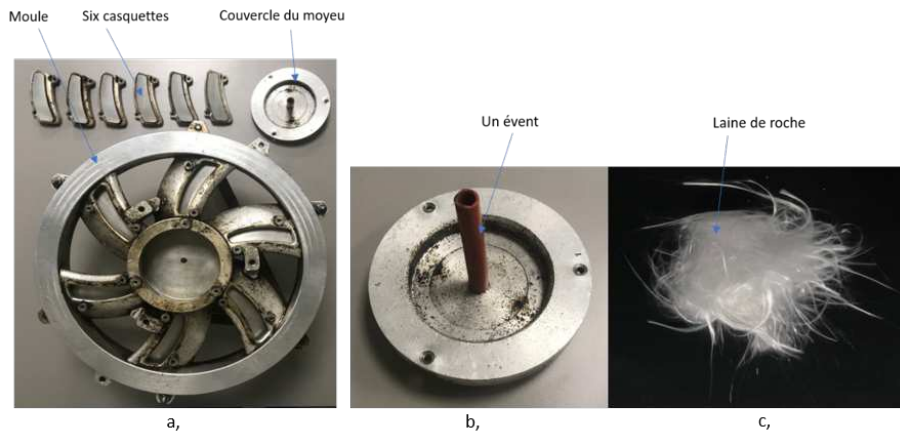


FIGURE 2.10 – Le moule (a); l'évent (b); laine de roche (c)

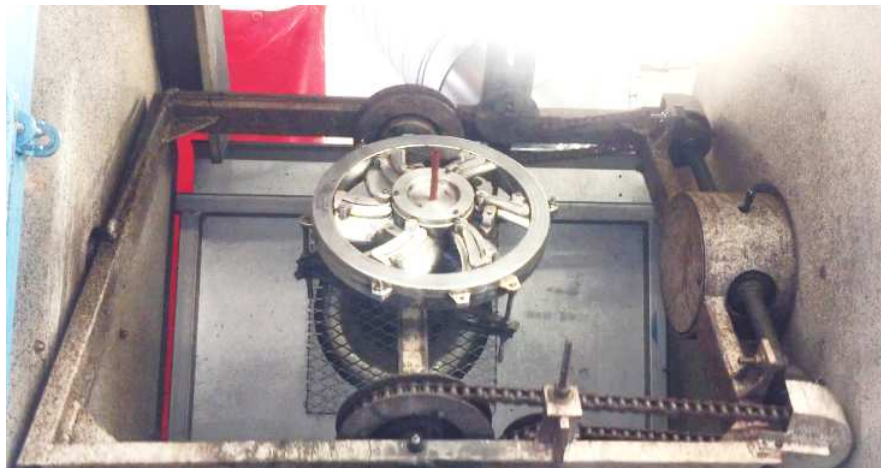


FIGURE 2.11 – Zone de fixation du moule dans la rotomouleuse LAB 40 de type Shultle utilisée

## 2.2 Le procédé de fabrication: le rotomoulage

### 2.2.1 Description de la méthode de rotomoulage

Les principales étapes du cycle de rotomoulage sont présentées à la figure 2.12:

**Etape 1 :** Introduction de la poudre dans le moule. Le moule est en aluminium, reflétant la forme de la pièce à fabriquer. La quantité de poudre utilisée dans le moule est déterminée par la taille, la forme et l'épaisseur du matériau utilisé. Le moule est ensuite fermé. Pour obtenir un résultat optimal, le moule doit être complètement étanche.

**Etape 2 :** Rotation du moule et chauffage. Une fois la poudre placée à l'intérieur, le moule est introduit dans le four, où la température augmente progressivement. La première couche de polymère commence à fondre et à se fixer à la paroi du moule. Ensuite, toute la poudre de polymère fond et le plastique recouvre toute la surface du moule par l'action de l'arbre rotatif. Ensuite, la température continue de monter, permettant la répartition du matériau et la réduction de la viscosité du matériau, éliminant ainsi les bulles internes. La fusion est complète lorsque la distribution du

polymère est homogène. Le moule tourne autour de deux axes perpendiculaires. La vitesse de rotation du moule ainsi que la différence de vitesse entre les deux axes affectent l'uniformité de la pièce finie. Il est essentiel de contrôler ces paramètres.

**Etape 3 :** Rotation du moule et refroidissement. Le moule continue de tourner et il est déplacé dans la zone de refroidissement. Le refroidissement du moule peut se faire de plusieurs manières: à l'eau, à l'air ou avec une combinaison des deux. Ce processus se termine lorsque le polymère est complètement solidifié.

**Etape 4 :** Pièce finale (Démoulage). La pièce est maintenant complètement solidifiée et peut se détacher du moule. Ensuite, un nouveau cycle pourra commencer.

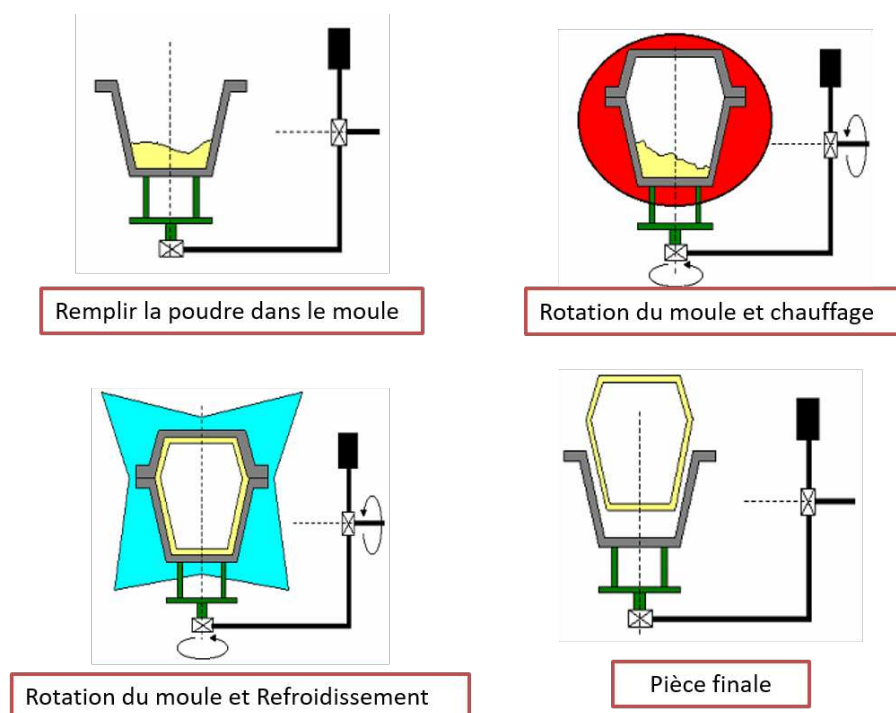


FIGURE 2.12 – Etapes du procédé de rotomoulage

Pour mieux contrôler la qualité de la pièce obtenue par rotomoulage, il est nécessaire d'analyser l'évolution de la température au cours du procédé. La figure 2.13 représente l'évolution de la température au cours des différentes étapes du procédé pour deux conditions A (température de chauffage de 285°C, temps de chauffage de 12 min et refroidissement par air) et B (température de chauffage de 330°C, temps de chauffage de 12 min, et refroidissement par l'air).

La figure 2.13 montre les périodes de chauffage et de refroidissement. Cette figure illustre également le comportement du [Polyéthylène base densité \(LDPE\)](#) dans le moule ainsi que ses changements de phase. Ce diagramme permet de suivre les changements de l'état physique du [LDPE](#) au cours du processus. Il permet également de distinguer plusieurs étapes lors de cette transformation :

- **Au départ**, le moule et le polymère sont à la température ambiante. La vitesse d'élévation de la température dépend de la chaleur apportée et de la capacité

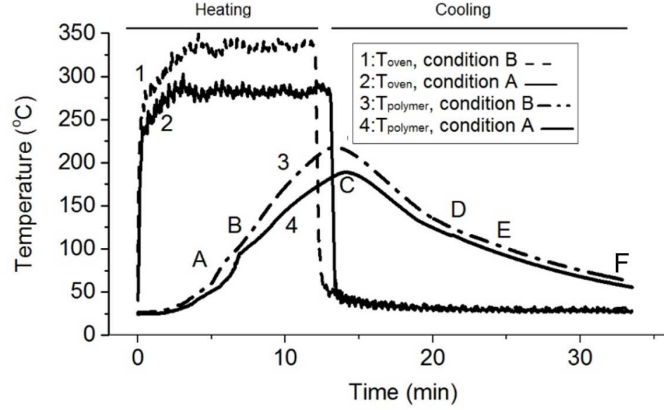


FIGURE 2.13 – Evolution de la température au cours du temps: condition A:  $T_0 = 285^\circ\text{C}$  et condition B:  $T_0 = 330^\circ\text{C}$  ( $\Delta t_0 = 12$  min, refroidissement par l'air pendant 20 min),  $T_{oven}$  désigne la température du four,  $T_{polymer}$  la température mesurée à l'intérieur du moule [9]

thermique du polymère.

- **Au point A** de la figure 2.13, proche du point de fusion (dans le cas du LDPE  $\approx 124^\circ\text{C}$ ), la première couche fondue de polymère adhère au moule. La vitesse d'augmentation de la température diminue. Pour le LDPE semi-cristallin, cette diminution s'explique principalement par l'absorption d'énergie due à la chaleur latente de fusion. A partir de ce moment, jusqu'au point B, le matériau continue de fondre et de s'étaler sur la paroi pour recouvrir la surface interne du moule. Une fois la première couche de polymère formée, de la chaleur est transférée à travers cette couche pour faire fondre les poudres des couches suivantes et donc jusqu'à ce que l'épaisseur de la pièce soit obtenue à la fin du procédé. Le phénomène physique dominant entre les points A et B est la coalescence des particules. Ce phénomène s'accompagne du phénomène de migration de l'air emprisonné entre les grains et de la densification.

- **Au point B** de la figure 2.13, toute la poudre est fondue. A partir de ce point, la viscosité diminue avec l'augmentation de la température. Cette diminution de viscosité favorise la répartition homogène du polymère sur la paroi interne du moule et l'élimination de l'air emprisonné dans la masse fondue (densification). La température monte à une température maximale (point C). Le choix de cette température est très important, car une température trop basse ne fournit pas la fluidité nécessaire à l'élimination totale des bulles d'air, une température trop élevée poussera le polymère vers la dégradation.

- **Entre les points B et C**, la surface interne devient lisse et la densité de la pièce augmente. La majorité de l'air initial présent entre les grains de poudre quitte le matériau et pénètre dans l'air interne du moule; cependant, certaines des bulles traversent la masse fondue pour créer une fine couche d'air entre la surface interne du moule et l'épaisseur du polymère.

- **Quelques minutes avant le point C**, le chauffage est éteint. Le moule



est sorti du four et placé dans la chambre de refroidissement. À partir de ce point, la température commence à diminuer. Cette diminution, tant que le polymère est à l'état fondu, sera relativement linéaire.

- **Près du point D** de la figure 2.13, la vitesse de diminution de la température ralentit et un plateau est observé sur la thermographie. Ce phénomène correspond au changement d'état physique et à la solidification du polymère. Dans le cas des polymères semi-cristallins, cela correspond au phénomène de cristallisation.

- **Près du point E**, la pièce est complètement solidifiée et se détache du moule. A partir de là, le régime de transfert de chaleur change ce qui provoque un changement de la pente au niveau de la courbe de température. Au point F, nous pouvons démouler la pièce.

L'analyse des courbes obtenues montre que les plateaux observés sur la courbe de l'air interne au moule pendant le chauffage comme pendant le refroidissement correspondent au pic de fusion et au pic de cristallisation, respectivement. En visualisant ces courbes en temps réel, on peut savoir quand le polymère a fini de fondre et à quel moment il cristallise. Ceci permet d'optimiser les temps de chauffe et de refroidissement et d'adapter les vitesses de refroidissement.

## 2.2.2 Principaux avantages et inconvénients du procédé de rotomoulage

Pour évaluer les avantages et les inconvénients du procédé de rotomoulage, il faut s'appuyer sur un certain nombre de critères : matériaux utilisés dans le domaine du rotomoulage, moules (structures, matériaux pour moules), la machine de rotomoulage ... Par conséquent, certains des principaux avantages et inconvénients de ce procédé sont:

### Avantages du procédé de rotomoulage:

- Le moule est simple et relativement bon marché. Ceci est dû au fait que les moules rotatifs sont un procédé à basse pression et qu'il n'est donc pas nécessaire de fabriquer le moule à partir d'alliages métalliques coûteux, comme dans le procédé de moulage par injection.

- L'épaisseur de paroi des pièces produites par rotomoulage est plus uniforme par rapport aux produits d'autres procédés et il est possible de modifier l'épaisseur de paroi de la pièce sans altérer le moule.

- Les pièces fabriquées par rotomoulage seront creuses, sans soudure et pratiquement sans contrainte.

- Il n'y a pas de gaspillage de matière dans la mesure où la charge complète de matière est normalement consommée lors de la fabrication de la pièce.

- Différents types de produits peuvent être moulés ensemble sur une seule machine.

### Inconvénients du procédé de rotomoulage:

- L'un des principaux inconvénients liés au rotomoulage est que le nombre de matériaux adaptés au procédé de rotomoulage est plus limité que pour les autres procédés.
- Le moulage par rotation ne convient généralement pas aux grandes séries de petites pièces, car les temps longs de cycle le rendraient non rentable.
- Un autre inconvénient du procédé est qu'il demande beaucoup de travail du fait des opérations manuelles de chargement et de déchargement.
- Les temps de cycle sont beaucoup plus longs que ceux des autres procédés car à la fois le plastique et le moule doivent être chauffés de la température ambiante à la température de moulage pour le plastique, puis refroidis à température ambiante pendant chaque cycle.

### 2.2.3 Description de la machine

Dans ce travail, le procédé de rotomoulage utilisé est conventionnel. La fabrication des ventilateurs se fait dans le laboratoire PIMM. Il s'agit d'une rotomouleuse LAB 40 de type Shultle par STP. Elle est équipée d'un écran d'ordinateur qui permet de fixer les paramètres de fonctionnement du procédé de rotomoulage sur la figure 2.14: la température, le temps dans le four, la vitesse de rotation des deux axes, le temps de refroidissement, ... La vitesse de rotation des deux axes dépend de la taille et de la forme du moule (tableau 1.1). Pour le ventilateur étudié, la vitesse de rotation de l'axe principal est de 7,0 tr/min, la vitesse de rotation de l'axe secondaire est de 5,3 tr/min. Pendant les étapes de chauffage et de fabrication du moule, les vitesses des deux axes sont maintenues constantes. Si les vitesses changent pendant la période de refroidissement, des déformations peuvent apparaître sur la surface du ventilateur.

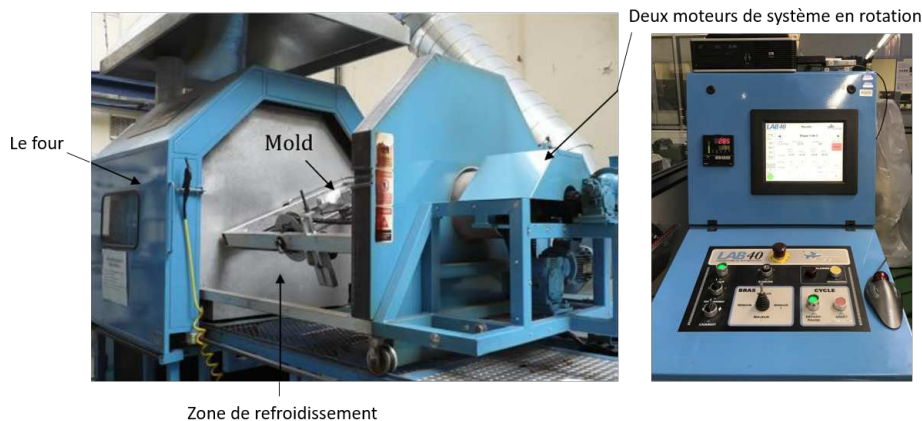


FIGURE 2.14 – Photographies de la rotomouleuse Lab40 de type Shultle

## 2.3 Matériau utilisé pour le rotomoulage

Il existe deux classes principales de plastiques. Environ 80% des millions de tonnes de plastiques utilisés dans le monde chaque année sont «thermoplastiques» et les 20% restants sont «thermodurcissables». La grande majorité des plastiques utilisés dans le moulage par rotation sont des thermoplastiques, mais certains mouleurs fabricants des matériaux ayant des caractéristiques thermodurcissables - par exemple, le polyéthylène réticulé. Le polyéthylène et le polypropylène sont des thermoplastiques appartenant à la même famille de polyoléfines. Avec le polystyrène et le chlorure de polyvinyle, ils sont les polymères thermoplastiques les plus courants et sont souvent appelés les plastiques de base.

Une subdivision importante au sein du groupe des matériaux thermoplastiques est liée au fait qu'ils aient une structure cristalline (ordonnée) ou amorphe (aléatoire). En pratique, il n'est pas possible pour un plastique d'avoir une structure totalement cristalline. Certains plastiques, tels que le polyéthylène et le nylon, peuvent atteindre un degré élevé de cristallinité, mais ils sont probablement plus précisément identifiés comme étant partiellement cristallins ou semi-cristallins. D'autres plastiques tels que l'acrylique et le polystyrène sont toujours amorphes. Le degré de cristallinité dans ces matières plastiques capables de cristalliser dépend fortement de leur histoire thermique et donc des conditions de traitement utilisées pour produire l'article moulé. À leur tour, les propriétés mécaniques du moulage sont très sensibles au fait que le plastique possède ou non une cristallinité. Ces faits sont très importants pour les rotomouleuses car la vitesse du refroidissement a un effet majeur sur le degré de cristallinité et donc sur les propriétés de la pièce moulée.

### 2.3.1 Caractéristiques typiques des plastiques moulés par rotation

La gamme de plastiques désormais disponibles pour les fabricants est vaste. Cependant, tous les plastiques ne peuvent pas encore être moulés par rotation avec succès. Les plastiques doivent satisfaire à certains critères généraux avant de pouvoir être classés comme convenant à cette technique de traitement.

- Premièrement, ils doivent pouvoir être produits de manière économique sous forme de poudre à écoulement libre (ou ils doivent être commodément disponibles sous forme liquide).

- D'autre part, au fur et à mesure que le plastique est chauffé, il doit passer de l'état solide à l'état fondu relativement rapidement afin d'éviter la formation de grumeaux à l'intérieur du moule rotatif. La matière plastique fondue doit également avoir

la capacité de revêtir la surface du moule de manière uniforme, de manière à produire une partie de la distribution d'épaisseur de paroi souhaitée. Généralement, cela inclut la capacité de former une surface intérieure lisse, car il n'y a pas de moule pour définir les contours de la surface libre. Cependant, la matière plastique fondue ne doit pas être de faible viscosité ou s'écouler trop librement sous la forme fondue, car les vitesses de rotation sont relativement lentes et une matière plastique à faible viscosité aurait tendance à s'écouler vers le fond du moule. Il est également important que la stabilité thermique de la masse fondue soit telle qu'elle puisse supporter de longues périodes à des températures élevées sans dégradation. Comme pour les autres méthodes de traitement des plastiques, il n'existe pas de matériau idéal pour toutes les applications. Par conséquent, le concepteur doit sélectionner le plastique et la qualité appropriés pour répondre à la forme et aux spécifications de performance du produit final. Les matériaux de rotomoulage typiques sont décrits dans les sections suivantes.

Actuellement, le polyéthylène (PEL), sous ses nombreuses formes, représente environ 90% de tous les polymères qui sont moulés par rotation. Les raisons les plus évidentes à cela sont la capacité du PE à résister à l'environnement longue durée-température du procédé et son coût relativement faible. Les polyéthylènes sont généralement résistants à l'eau, aux huiles végétales, aux alcalis et à la plupart des acides concentrés à température ambiante. Le polyéthylène est compatible avec une gamme complète de pigments pour produire des pièces colorées. La nature physique de la poudre peut avoir un effet important sur les performances lors du moulage et les propriétés du produit final. Le polyéthylène est normalement subdivisé en l'une des trois catégories indiquées dans le tableau 2.2 en fonction de la masse volumique.

TABLEAU 2.2 – Plages de masse volumique du polyéthylène

Matériau	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{cm}^3$ )
Polyéthylène base densité (LDPE)	915-929
Polyéthylène moyenne densité (MDPE)	930-939
Polyéthylène haute densité (HDPE)	940-965

En général, les propriétés telles que la rigidité, le retrait, la résistance chimique et la dureté augmentent à mesure que la densité augmente. Les propriétés telles que la résistance aux chocs et la résistance à la fissuration sous contrainte diminuent à mesure que la densité augmente. Les différences fondamentales entre les qualités de polyéthylène basse et haute densité résultent de différences structurales. Dans les qualités à haute densité, les chaînes moléculaires sont essentiellement linéaires avec peu de branches latérales de sorte que les chaînes peuvent se tasser étroitement ensemble pour fournir plus de matériau par unité de volume, c'est-à-dire une densité plus élevée. Dans la gamme à faible densité, il y a de nombreuses branches latérales de sorte que les

chaînes ne peuvent pas se tasser étroitement ensemble. Le fait que les chaînes en LDPE soient plus éloignées, et donc que les forces d'attraction entre elles sont moins fortes, se traduit par ses propriétés caractéristiques, c'est-à-dire une résistance inférieure, une rigidité inférieure (flexibilité) et une meilleure capacité à absorber les chocs (résilience).

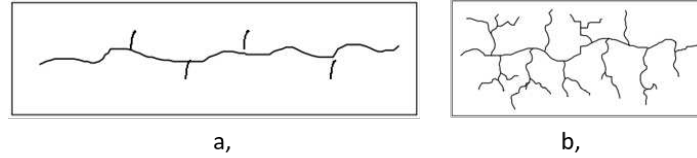


FIGURE 2.15 – Ramification de chaîne typique dans le LHPE (a) et LDPE (b) [10]

### 2.3.2 Température du four et temps de chauffage

Quand le moule rotatif est introduit dans un four, il est chauffé à une température supérieure au point de fusion  $T_f$  des polymères semi-cristallins (LDPE). Les températures de fusion et de cristallisation ( $T_f$  et  $T_c$ ) du LDPE sont définies par analyse thermique à l'aide d'un dispositif «TA Instruments Q10 DSC». Les résultats DSC (Calorimétrie différentielle à balayage) du LDPE (figure 2.16a) montrent les températures de fusion et de cristallisation d'environ 124°C et 110°C, respectivement. De plus, la courbe Analyse thermogravimétrique (TGA) du LDPE (figure 2.16b) montre que celui-ci ne perd pas de masse significative avant 130°C et qu'il perd près de 2% de sa masse initiale à 350°C. La cinétique de perte de masse change, à partir de 280°C environ, indiquant un autre mécanisme. On peut conclure que la température de dégradation initiale du LDPE utilisé est d'environ 300°C.

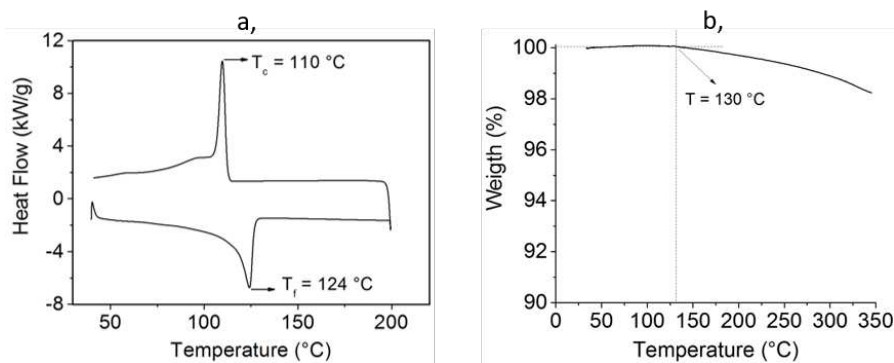


FIGURE 2.16 – (a) DSC résultat pour du LDPE, et (b) courbe TGA du LDPE

Généralement, le polyéthylène a un point de fusion bas. Cependant, il résiste à la chaleur. Pour cette raison, la température et le temps de chauffage doivent être optimisés pour avoir de bonnes pièces. Pour pouvoir rotomouler le LDPE, il doit être à l'état fondu avec une viscosité relativement faible. Cette condition limite la gamme d'utilisation. Le diagramme température-masse molaire de chaque polymère permet d'en

connaître la zone de rotomoulage (figure 2.17a). A partir de cette figure, on peut noter que  $T_D$  correspond à la température de dégradation et  $T_f$  correspond à la température de fusion. De plus, sur ce schéma, les différentes zones correspondent aux différents états physiques du LDPE :

- Zone I : état solide,
- Zone II : état caoutchouteux,
- Zone III : état liquide / visqueux,
- Zone IV : zone de dégradation.

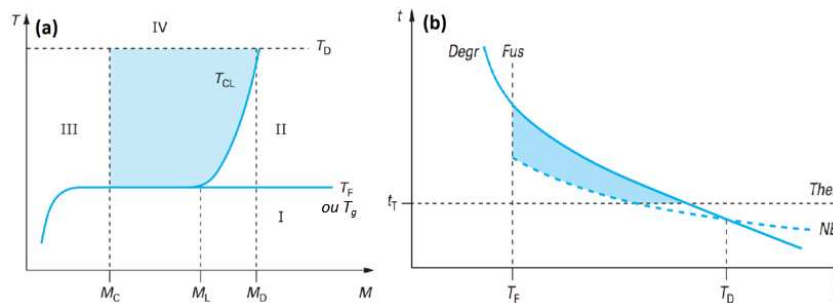


FIGURE 2.17 – (a) La zone bleue correspond à la zone de moulage par rotation pour un polymère semi-cristallin tel que le LDPE, (b) Fenêtre de rotomoulabilité en fonction de la température et du temps (zone bleue) [11]

On peut noter que, soit en raison de la viscoélasticité, soit en raison du caractère cinétique de la transition vitreuse  $T_g$  ou de la dégradation chimique  $T_D$ , le diagramme doit être représenté dans un repère tridimensionnel ayant pour axes le temps, la température et masse molaire, mais on considère ici que les températures de transition ont été définies sur un temps pertinent de quelques dizaines de minutes pour le procédé de rotomoulage. De plus, on peut remarquer qu'au cours du procédé de rotomoulage, divers phénomènes couplés, tels que la diffusion thermique, l'écoulement du polymère, la dégradation thermique et la cristallisation se sont produits. Les conditions critiques propres à chacun de ces phénomènes peuvent se traduire par une frontière dans l'espace temps-température. À l'état liquide, la carte de température peut être représentée comme sur la figure 2.17b et dans laquelle quatre frontières différentes peuvent être observées :

- «Degr» pour dégradation thermique: au-delà de cette courbe, le matériau change.
- «NE» pour non coulant: en dessous de cette limite, la viscosité est trop élevée et l'adhérence du polymère au moule est insuffisante.
- «Ther» pour diffusion thermique : en dessous de cette frontière horizontale ( $t = t_T$ ), le temps de chauffe est trop court pour que tout le volume de l'échantillon soit à l'état fondu.
- «Fus» pour la fusion (bordure verticale :  $T = T_f$ ).

Dans cette étude, pour respecter ces contraintes, les températures de chauffage choi-

sies sont: 250, 285 et 330°C. De plus, les temps de chauffage de 12, 15 et 20 minutes ont été considérés.

Il est possible de placer les thermocouples à différents endroits pour mesurer les changements de température du polymère et la température du four. La figure 2.13, le changement de la température au cours des différentes étapes du procédé ( $m = 500g$ ,  $T_0 = 330^\circ C$ ,  $\Delta t_0 = 12 \text{ min}$ ,  $\Delta t_r = 20 \text{ min}$  de refroidissement par air).

On peut noter que bien que la température maximale du four ait été choisie à 330°C, selon l'évolution de la température du four et du LDPE pendant le processus de moulage par rotation, la température du polymère atteint environ la plage de températures de 280 à 300°C. Cette température est proche de la température de dégradation du LDPE, Hoff *et al* [48]. Sur cette base, la qualité des ventilateurs rotomoulés à haute température et à temps de chauffage élevé doit être vérifiée. On peut observer le changement de couleur en jaune pour ces conditions.

## 2.4 Paramètres de contrôle du procédé de rotomoulage

### 2.4.1 Masse de poudre

La masse de poudre est un des facteurs affectant la qualité finale de la roue, tels que: l'épaisseur, la dureté, la ténacité, le mouvement de la poudre de fusion dans le moule ... La poudre de masse ( $m$ ) est calculée selon l'équation 2.1:

$$m = s.e.\rho \quad (2.1)$$

où  $s$ : est la surface intérieure du moule (figure 2.18),  $e$ : l'épaisseur de la pièce et  $\rho$ : la masse volumique du matériau utilisé.

Dans l'équation 2.1, on voit que  $s$  et  $\rho$  sont deux quantités fixes, de sorte que la masse de poudre placée dans le moule dépend de l'épaisseur du ventilateur  $e$ . Nous avons constaté que lorsque l'épaisseur  $e$  est trop grande, il n'est pas possible de profiter de tous les avantages de cette méthode. D'autre part, si elle est trop mince, l'épaisseur de la roue aura une incidence sur les propriétés mécaniques des pales. En particulier, lorsque le rotor du ventilateur tourne à vitesse élevée, il se déforme facilement et l'instabilité du système augmente le bruit. Par conséquent, afin d'optimiser l'épaisseur du rotor obtenue, la quantité du poudre à utiliser étudiée ici est: 300g, 400g, 500g et 600g.

### 2.4.2 Température et temps dans le four

Lorsque le moule rotatif est dans le four, le moule se réchauffe en absorbant la chaleur du four. Lorsque la température dans le moule atteint le point de fusion du



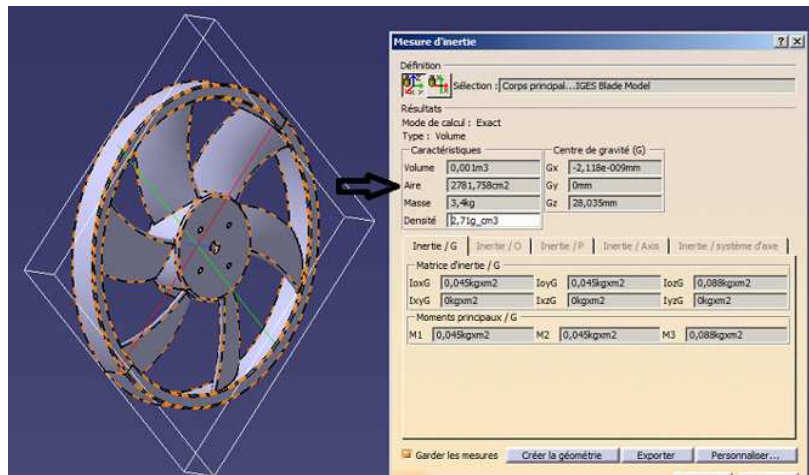


FIGURE 2.18 – Surface intérieure du moule mesurée avec le logiciel de CAO (Catia)

matériau, au point de contact entre la poudre et le moule se forme la première couche de matériau fondu qui adhère à la surface du moule. Après cela, la chaleur continue à se transmettre à travers le moule et la première couche en fusion pour créer la couche de matière fondue suivante. Le processus se déroule jusqu'à ce que la poudre dans le moule soit complètement fondue et devienne homogène.

Pendant le rotomoulage, la température et le temps sont généralement choisis pour ajuster le cycle de moulage par rotation et optimiser le procédé. Chacune de ces variables a un effet sur les propriétés du ventilateur obtenu. Si le temps est trop court ou la température du four est faible, le polyéthylène n'a pas assez de temps pour fondre complètement. Il en résulte alors une durabilité, et rigidité plus faibles. A l'inverse, si le matériau est chauffé trop longtemps dans le four ou la température trop élevée, la matière se dégrade. Cela conduit à des changements de couleur et le ventilateur devient plus fragile.

Lors du processus de fusion du matériau dans le moule, des bulles d'air se forment entre les couches de matériau fondu. Cependant, sous l'influence de la température, sur une période de temps assez longue, elles disparaissent. Une caractéristique notable des études de Crawford [10] indique que lorsque les dernières bulles d'air disparaissent, le processus de dégradation du matériau commence à apparaître. Ce phénomène est très difficile à déterminer. Par conséquent, dans ce travail, la température et le temps de chauffage sont étudiés indépendamment pour assurer une meilleure qualité de ventilateur. Selon les résultats de recherche de Lucas *et al* [9], les durées de chauffage et la température dans le four choisies sont:

- $\Delta t_o = (12, 15, 20)$  minutes
- $T_o = (250, 285, 330)$  °C



### 2.4.3 Temps de refroidissement

En raison des structures petites et étroites à l'intérieur du moule, la méthode de refroidissement choisie est un refroidissement externe. Cette étape conduit à la cristallisation du matériau dans le moule (le matériau passe d'une phase liquide à une phase solide). Les ventilateurs sont grandement affectés par ce processus puisqu'il influe sur la forme, la taille et les propriétés mécaniques.

- Un refroidissement lent a tendance à augmenter la surface portante et la rigidité, mais réduit la résistance aux chocs
- Avec un refroidissement rapide, le ventilateur obtenu sera plus rigide, mais peut être déformé et les aubes peuvent devenir cassantes

Les caractéristiques de fonctionnement des pales ont besoin de rigidité et résilience. Par conséquent, nous avons choisi une méthode de refroidissement lent pour garantir ce facteur. Lors du processus de refroidissement du moule, Lucas *et al* [9] ont utilisé des thermocouples et des capteurs de température. Cela aide à contrôler la température dans le four et la température de l'air à l'intérieur du moule. De cette manière, l'évaluation de la méthode de refroidissement (air, eau) et du temps de refroidissement est relativement précise. Les résultats ont montré que la méthode de refroidissement par air ou par eau n'avait pas de différence significative. Pour cette raison, dans cette étude, le refroidissement par air et le temps de refroidissement  $t = 20$  minutes ont été utilisés pour tous les tests.

Dans cette étude, les paramètres considérés sont la masse de matière, la température du four, et le temps de chauffe. Pour distinguer chaque ventilateur rotomoulé, une nomenclature est adoptée suivant le code :

$$\text{PEL} - \text{m} - T_o - \Delta t_o - \Delta t_r$$

- Matériau utilisé: PEL - polyéthylène basse densité (LDPE-3200)
- Masse du matériau  $\text{m} = [300, 400, 500, 600]$ , g
- Température du four  $T_o = [250, 285, 330]$ , °C
- Temps de chauffage  $\Delta t_o = [12, 15, 20]$ , min
- Méthode de refroidissement du moule: refroidissement par soufflage d'air pendant  $\Delta t_r = 20$  min

## 2.5 Procédé de remplissage du moule avec la poudre

Dans les travaux d'Azzam [8] et Lucas *et al* [9], les ventilateurs sont fabriqués par rotomoulage. Cependant, le processus de fabrication des ventilateurs reste à discuter en détail. De plus, la quantité de poudre qui était introduite dans le moule était fixée à une masse de 500g et le nombre de ventilateurs fabriqués n'était pas important. Par conséquent, il convient de considérer le choix de la méthode de remplissage de poudre optimale pour ce moule. Avec ce moule, le matériau est normalement rempli dans la partie centrale (figure 2.10). Lorsque le moule tourne, sous la force centrifuge, la matière fondue remplit la périphérie du ventilateur. Par conséquent, il faut s'assurer la répartition uniforme du matériau sur la surface de l'intérieur du moule. Avec une masse de poudre de 500g, si la masse de poudre est remplie uniquement au centre du ventilateur, cela gênera le mouvement de la poudre fondue. Cela conduit à bloquer le matériau ou bien la poudre ne fond pas complètement en raison d'une température et d'un temps de fusion insuffisants (au centre du moule), ce qui entraîne des défauts sur le ventilateur, notamment au bord de fuite des pales (figure 2.19). De plus, l'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne garantit pas la cohérence entre les moments de remplissage de la poudre dans le moule, et ce qui peut conduire à ce que la qualité des ventilateurs puisse être différente dans des conditions de fabrication identique (la masse de poudre  $m$ , le temps  $\Delta t_0$  et la température dans le four  $T_0$ ). Par conséquent, il est nécessaire de sélectionner la méthode appropriée pour s'adapter à toutes les masses de poudre utilisées dans cette étude.

Il est possible de placer la poudre au centre du moule et dans les six ouvertures situés

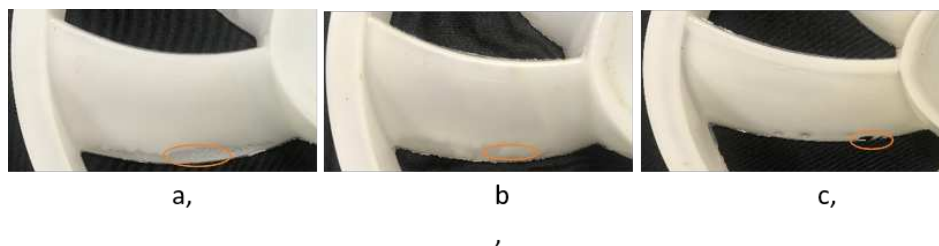


FIGURE 2.19 – Défauts de fabrication au bord de fuite

sur les pales. Cependant, en raison de l'épaisseur étroite des ouvertures des pales, la masse de poudre déposée à ces endroits est limitée pour s'assurer qu'elle soit entièrement fondue. De plus, ces rainures, si elles ne sont pas correctement scellées, créeront des défauts à la surface du ventilateur (figure 2.20). Par conséquent, cela affectera l'écoulement sur la surface de la roue, ainsi que la dynamique du ventilateur, la génération du bruit... Cette méthode ne convient pas aux conditions de fabrication d'un grand nombre de ventilateurs. Une deuxième méthode consiste à placer une partie de la poudre au centre du moule puis à l'aide d'un marteau en caoutchouc, en tapant sur la périphérie du ventilateur, des vibrations sont créées qui remplissent la périphérie du

ventilateur. Cette démarche est ensuite répétée avec la quantité restante de poudre. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle prend beaucoup de temps, et que la poudre est collée ou inégalement répartie. Par conséquent, une nouvelle méthode présentée sur

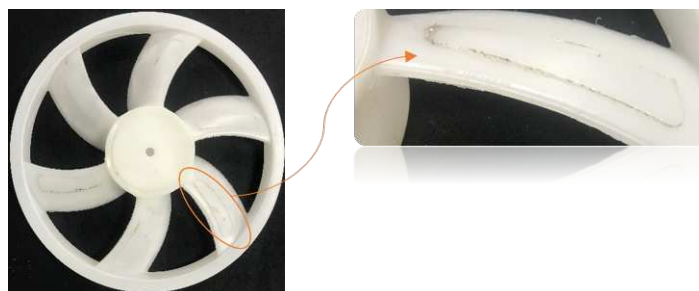


FIGURE 2.20 – Photographies de bavures aux six positions de remplissage de poudre à la surface des pales

la figure 2.21 est proposée pour résoudre ce problème. Par exemple, pour une masse de 500g de polyéthylène, une première portion de masse de poudre d'environ 150g est placée directement à la périphérie du moule avec un entonnoir. La masse restante de 350g est placée au centre du moule (figure 2.21). La roue obtenue est présentée à la figure 2.22. Pour observer la répartition de la matière à l'intérieur de la roue, elle a été photographiée sur un fond de lumière blanche (figure 2.23). Le résultat montre qu'il n'y a pas de blocage de matière. La matière fondue est bien répartie dans le moule et assure une uniformité sur la surface du ventilateur obtenu. Cette méthode s'applique aux masses 300g (PEL-300-250-12), 400g (PEL-400-250-12) et 600g (PEL-600-250-12). Les résultats obtenus présentés sur les figures 2.24, 2.25, 2.26 montrent que cette méthode permet d'obtenir une bonne répartition de la matière.



FIGURE 2.21 – Optimisation de la méthode de remplissage de poudre dans le moule



FIGURE 2.22 – Ventilateur coupé en deux parties (PEL-500-250-12)

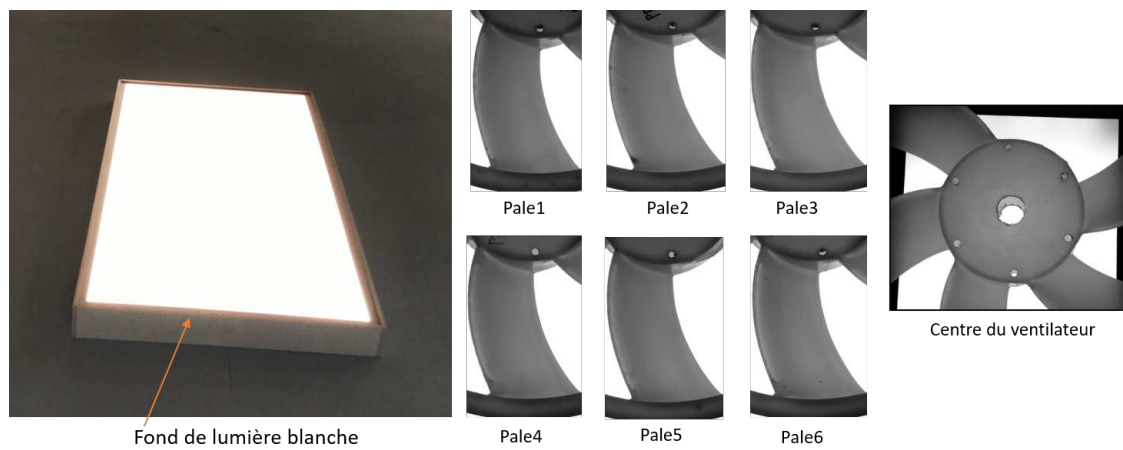


FIGURE 2.23 – Image de transmission du ventilateur PEL-500-250-12

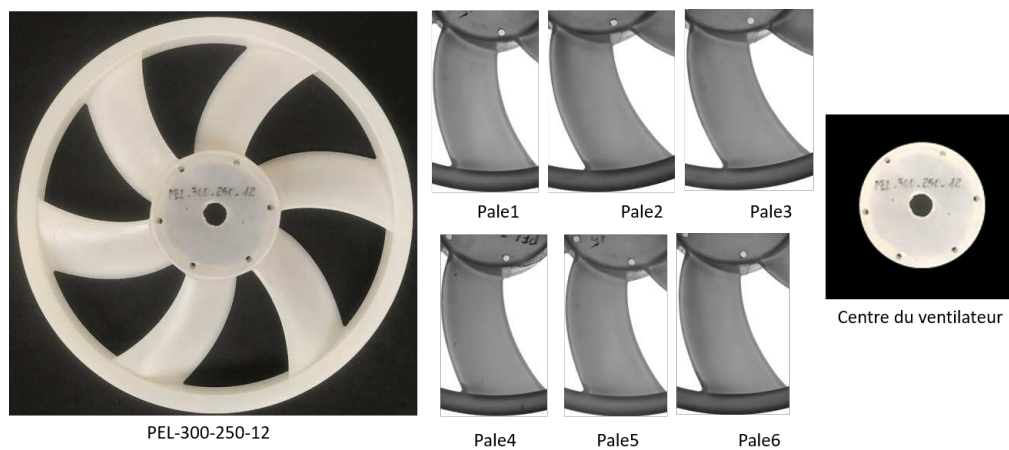


FIGURE 2.24 – Image de transmission du ventilateur PEL-300-250-12

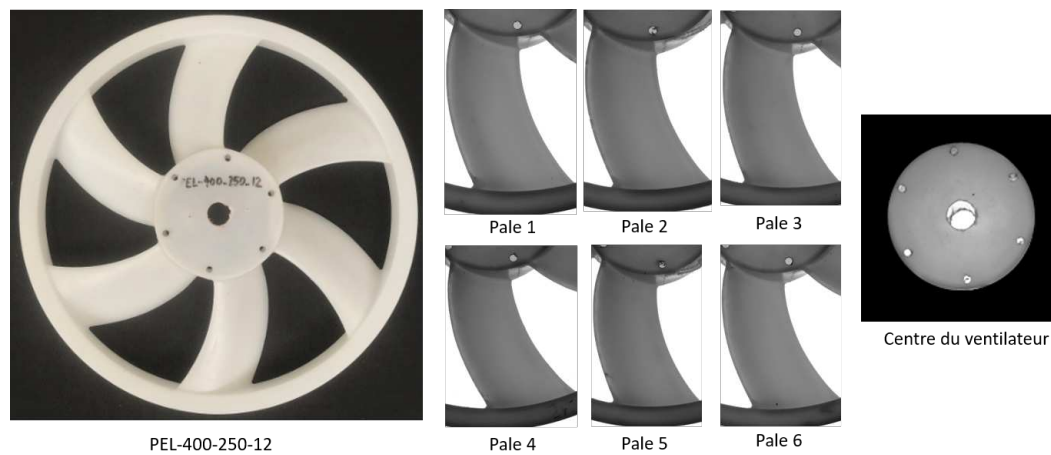


FIGURE 2.25 – Image de transmission du ventilateur PEL-400-250-12

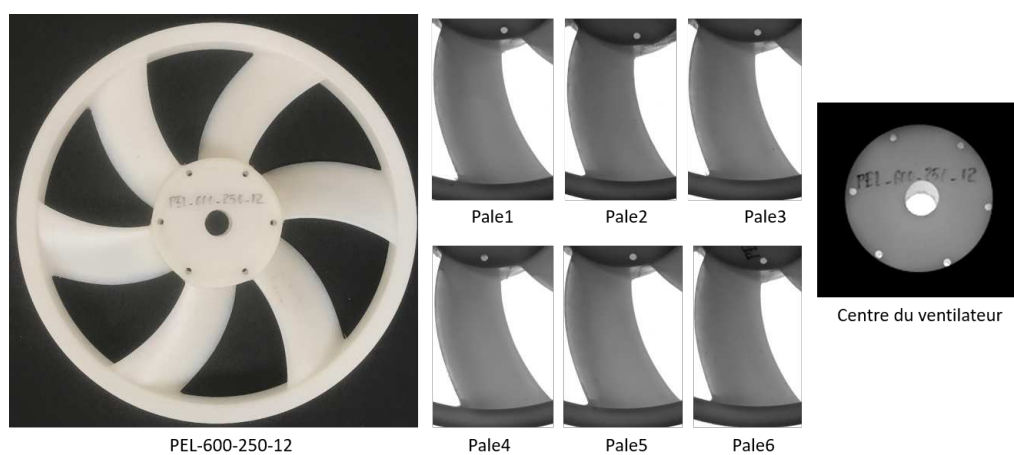


FIGURE 2.26 – Image de transmission du ventilateur PEL-600-250-12

## 2.6 Conclusion

Le contenu de ce chapitre se concentre sur trois aspects principaux:

Dans cette section, la méthode de conception du moule est présentée. Les changements dans le processus de conception du moule visaient à créer une version de ventilateur adapté à une utilisation pour le refroidissement automobile. Le rotomoulage crée des ventilateurs creux, ce qui est très utile dans de nombreuses applications. Les premiers résultats de recherche montrent la faisabilité du procédé de fabrication des ventilateurs par rotomoulage et les exigences liées au domaine d'application de ce type de ventilateur.

Les principaux paramètres identifiés pour cette étude dans la fabrication des ventilateurs par rotomoulage sont température, temps de chauffage, masse de poudre, temps de refroidissement. Ce sont des paramètres liés directement à la qualité du ventilateur réalisé. De plus, l'optimisation du procédé de fabrication du ventilateur dépend beaucoup de ces paramètres sélectionnés.

Le remplissage du moule avec la poudre a également été discuté dans ce chapitre. La première solution, pour laquelle la poudre est introduite au centre, ne permet pas d'obtenir un ventilateur homogène. Une autre solution proposée consiste à remplir le moule de poudre en partie au centre, et en partie dans chaque pale du moule. Le ventilateur généré par cette méthode peut cependant présenter encore des défauts selon les paramètres choisis: bulles d'air, bavures aux positions de remplissage sur les pales, matériaux fins sur le bord de fuite de la pale... Dans cette étude, le ventilateur est fabriqué en grande quantité, il est donc nécessaire d'envisager une nouvelle méthode de remplissage de poudre. Par conséquent, une nouvelle méthode de placement de la masse dans le moule a été introduite. L'adaptation de cette méthode garantit la fabrication d'un grand nombre de ventilateurs (cela a été prouvé par la répétabilité du procédé de fabrication du ventilateur - chapitre 4).



# Chapitre 3

## Le protocole expérimental

### Contents

<b>3.1</b>	<b>Dispositifs expérimentaux</b>	<b>37</b>
<b>3.2</b>	<b>Grandeurs physiques mesurées et incertitudes</b>	<b>44</b>
<b>3.3</b>	<b>Analyse de la géométrie des ventilateurs</b>	<b>49</b>
<b>3.4</b>	<b>Méthode de mesure du champ de vitesse axiale</b>	<b>54</b>
<b>3.5</b>	<b>Méthode de mesure de la vibration</b>	<b>55</b>
<b>3.6</b>	<b>Conclusion</b>	<b>57</b>

### 3.1 Dispositifs expérimentaux

#### 3.1.1 Description du fonctionnement du banc d'essai

Le banc d'essai utilisé pour tester les ventilateurs est conforme à la norme ISO 5801 [49] et permet de déterminer les performances aérodynamiques des ventilateurs de tous types. Cette norme fixe la méthodologie de calcul des différentes caractéristiques aérodynamiques et les incertitudes attachées à ces grandeurs. Le banc est constitué d'un caisson d'aspiration hermétique. L'utilisation de diaphragmes de diamètres différents permet de faire varier la résistance hydraulique du circuit et donc d'explorer différents points de la caractéristique du ventilateur. Ce banc d'essai est muni de prises de pression statique en paroi qui vont permettre de mesurer la différence de pression fournie par le ventilateur et, connaissant les lois reliant la différence de pression et le débit pour chaque diaphragme, d'en déduire le débit.

Le banc d'essai de la présente étude a été conçu au laboratoire d'ingénierie des fluides et systèmes énergétiques LIFSE (figures 3.1 et 3.2). Il permet de déterminer les caractéristiques du ventilateur " aspirant " à travers le couple débit-pression.

Le banc d'essai se compose des parties principales suivantes :

- Châssis



- Carter en polystyrène dans lequel s'emboîte le ventilateur
- Plan de mesure de pression
- Dispositif anti-giration ou "nid d'abeilles"
- Caisson de dimensions (1.3m x 1.3m x 1.8m)
- Diaphragme
- Moteur
- Mesure du couple

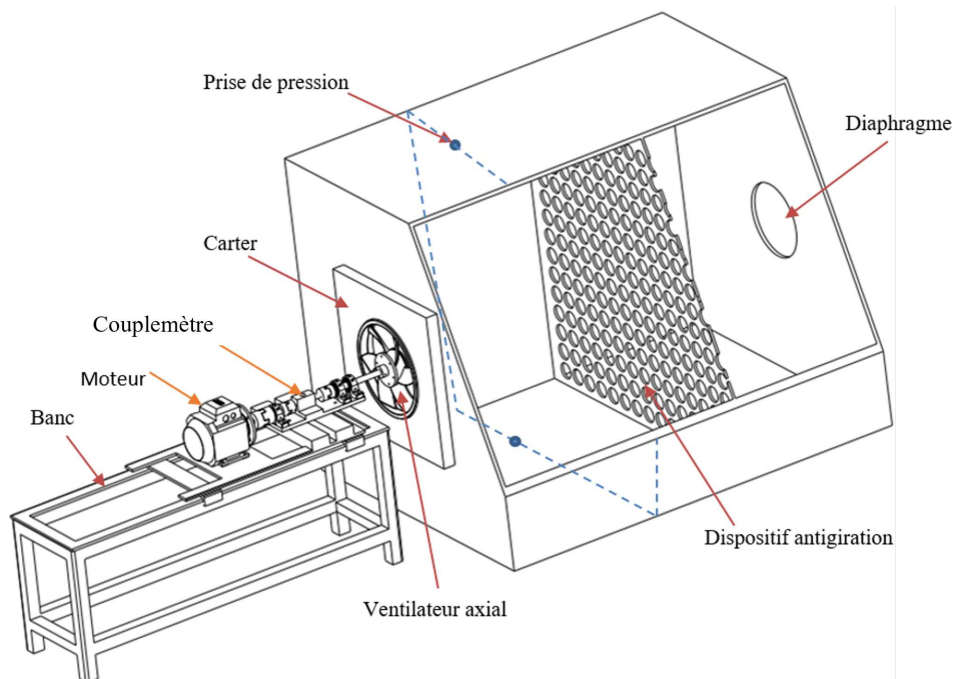


FIGURE 3.1 – Vue schématique du banc d'essai

### 3.1.2 Caractéristiques du dispositif anti-giration

La fonction du dispositif anti-giration est d'homogénéiser l'écoulement et de le rendre uniforme avant les zones de mesure pour que celles-ci soient le moins affectées possibles et ainsi, obtenir une mesure uniforme de la pression au niveau des prises de pression. Les dimensions du dispositif anti-giration sont fixées par la norme ISO 5801. Sa position est imposée par les dimensions du caisson (figure 3.3). L'appareil doit être situé à  $0.5D$  minimum du diaphragme,  $0.3D$  des prises de pressions et  $0.5D$

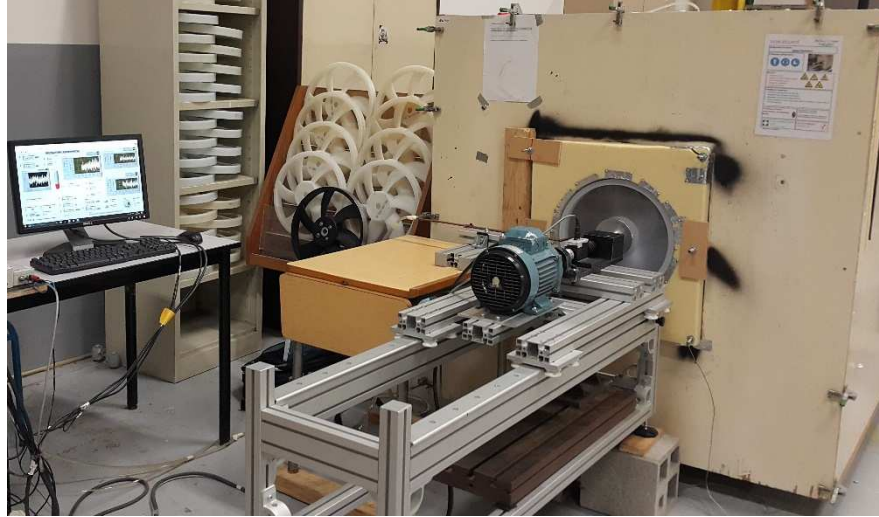


FIGURE 3.2 – Banc d’essai pour mesurer les performances de ventilateurs axiaux

minimum de l’extrémité du ventilateur,  $D$  est la hauteur du caisson. En outre, Il est également prescrit que le caisson doit avoir une surface vide de 40 à 60% de la surface de la chambre.

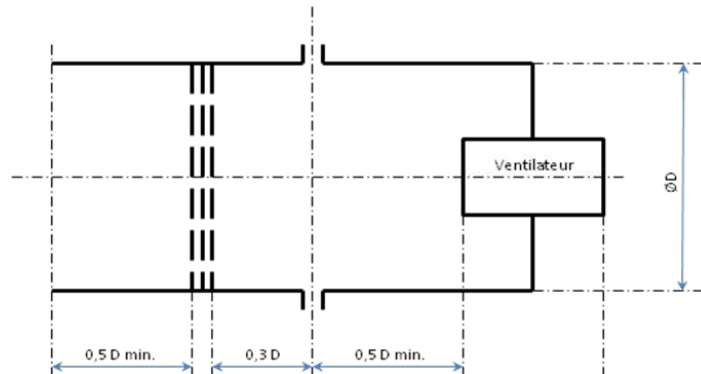


FIGURE 3.3 – Schéma de position des pièces dans le caisson selon ISO 5801

Dans cette étude, un dispositif anti-giration avec des cellules circulaires de diamètre 60 mm, d’épaisseur 12 mm et de hauteur  $D = 1400$  mm ont été utilisés (figure 3.4).

### 3.1.3 Diaphragme

Le diaphragme est placé à l’entrée du banc d’essai, au niveau de l’aspiration (figure 3.5). Il permet de contrôler le débit à travers le caisson en faisant varier son diamètre. La norme ISO 5801 impose les spécifications de tels débitmètres. Quand le système est mis en route, le débit est déterminé par la formule suivante.

$$Q_v = \frac{\epsilon \cdot \alpha \cdot \pi \cdot d^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (3.1)$$

Avec  $Q_v$  : le débit volumique en  $m^3/s$ ;  $d$  : le diamètre intérieur du diaphragme en m;

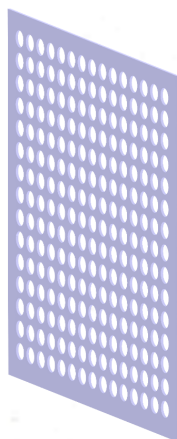


FIGURE 3.4 – Dispositif anti-giration

$\alpha$  : coefficient de débit,  $\epsilon$  : coefficient de détente ( $\alpha.\epsilon = 0,6$  selon la norme ISO 5801);  
 $\Delta p$  : la différence de pression entre pression atmosphérique et pression dans le caisson,  
 en Pa ;  $\rho$  : la masse volumique en  $\text{kg}/\text{m}^3$ .

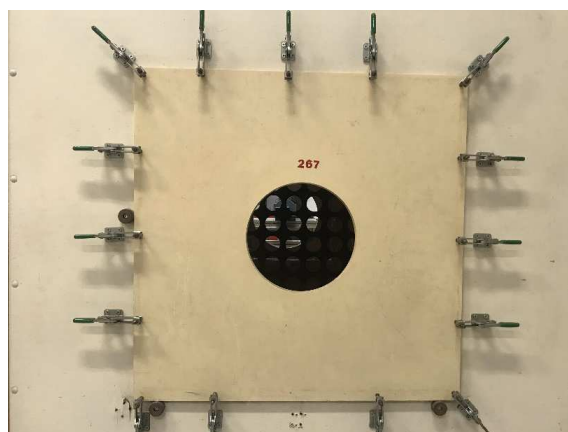


FIGURE 3.5 – Fixation du diaphragme à l'aspiration

La géométrie du diaphragme est également conçue selon des standards. Sur le côté aval du diaphragme, un chanfrein de  $45 \pm 15^\circ$  est ajouté pour changer le débit lors du passage à travers le diaphragme (et donc le nombre de Reynolds), permettant ainsi un meilleur contrôle de l'écoulement d'air en sortie (figure 3.6).

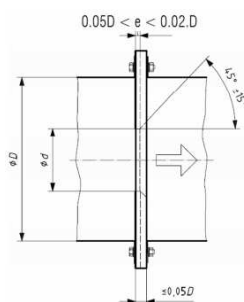


FIGURE 3.6 – Schéma du diaphragme conforme à la norme ISO 5801

Le nombre de Reynolds est déterminé par :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu} \quad (3.2)$$

Avec  $\mu$  : viscosité dynamique en Pa.s;  $d$  : diamètre intérieur du diaphragme en m;  $Re$ : nombre de Reynolds.

Dans cette étude, les 11 diaphragmes utilisés sont présentés dans le tableau 3.1 et figure 3.7.

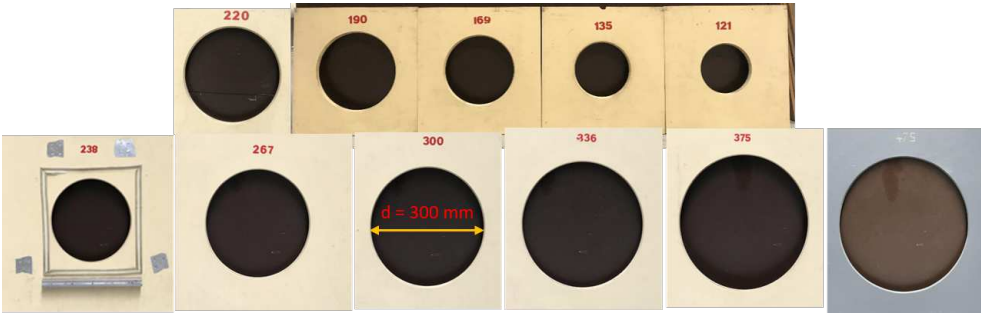


FIGURE 3.7 – Diamètres de diaphragmes utilisés

TABLEAU 3.1 – Diamètres intérieurs des diaphragmes utilisés (l'incertitude de  $d \pm 1\text{mm}$ )

d[mm]	121	135	169	190	220	238	267	300	336	375	475
-------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

### 3.1.4 Carter

Dans cette étude, un carter en mousse polyuréthane a été utilisé (figure 3.8) et le jeu entre le carter et le ventilateur est de 2,5 mm.

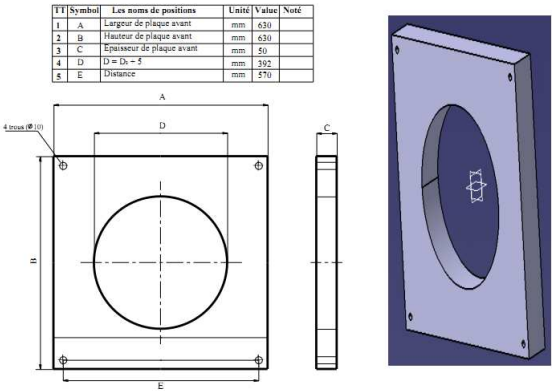


FIGURE 3.8 – Schéma du carter utilisé pour le banc d'essai de ventilateur axial

### 3.1.5 Prises de pression

Pour les prises de pression, la norme recommande 4 prises de pression distribuées autour du caisson. Le diamètre des prises de pression est réglé de 6 à 10 mm (figure

3.9). Toutes les prises de pression sont connectées à un manomètre. La différence de pression  $\Delta p$  entre l'atmosphère et le caisson a été mesurée par un capteur FCO318, avec une plage de  $\pm 500$  Pa et une précision de  $\pm 0,2\%$ . Il correspond à la montée en pression statique du ventilateur.



FIGURE 3.9 – Emplacements des prises de pression statique sur le banc d'essai aux normes ISO 5801

### 3.1.6 Description du protocole de montage et fixation du ventilateur

Dans cette étude, nous avons fabriqué 36 roues par rotomoulage avec des masses ( $m \pm 0.001g$ ): 300g, 400g, 500g et 600g. Par conséquent, pour assurer une évaluation précise des effets des paramètres de procédé de rotomoulage sur les performances aérodynamiques des roues. Il faut respecter un protocole d'installation du ventilateur rigoureux défini comme suite :

- Percer les trous de positionnement sur la roue rotomoulée
- Fixer la roue
- Installer la roue sur le châssis

#### ***Support de perçage***

Un support de perçage est conçu (figure 3.10). Les roues obtenues par le procédé de rotomoulage présentent certaines déformations dues au retrait du matériau. Par conséquent, lors du perçage des trous de positionnement sur la roue, il faut éviter ce facteur pour garantir la concentricité et la précision des trous. La roue est maintenue sur 6 faces libres et résistantes à la rotation lors du perçage par la dalle fixe (1),

deux vis (3) et 4 bords sur la périphérie. Les 6 trous de perçage sont guidés par la plaque de guidage (2). Ce support de perçage est utilisé pour percer les 36 ventilateurs rotomoulés.

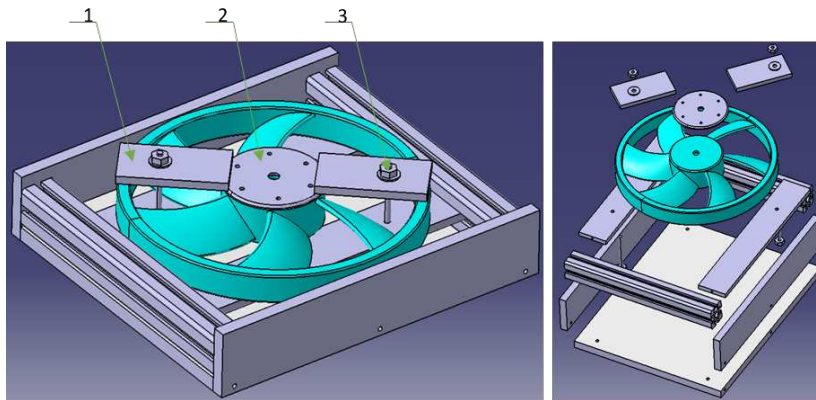


FIGURE 3.10 – Vue 3D schématique du support utilisé pour le perçage des roues

### ***Fixation du ventilateur***

Le ventilateur est fixé par deux pièces (plaque avant, plaque arrière) et 6 vis (figure 3.11). Cela garantit la stabilité et la rigidité lors de la fixation du ventilateur. Cette méthode doit garantir que la direction de l'écoulement de l'amont vers l'aval du ventilateur ne soit pas modifiée par le changement de ventilateur.

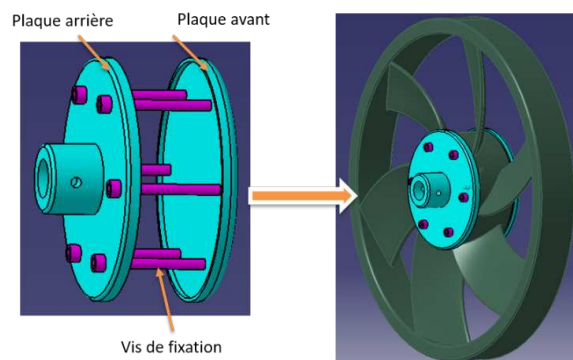


FIGURE 3.11 – Vue 3D schématique de la pièce centrale permettant la fixation de la roue sur l'arbre

### ***Le châssis***

En outre, la garantie de stabilité lors de l'installation et du remplacement des ventilateurs doit être assurée. Une étude de la stabilité du banc est réalisée au chapitre 4. Le nombre de ventilateurs testés sur le banc est important, une structure spéciale sur ce banc d'essai est donc conçue pour que tous les essais soient comparables. La figure 3.12 montre que le ventilateur, le moteur, l'accouplement et le couplemètre sont montés sur un support qui peut être déplacé dans une seule direction grâce à un rail et des roues (1). Ce support est fixé par une vis (2).



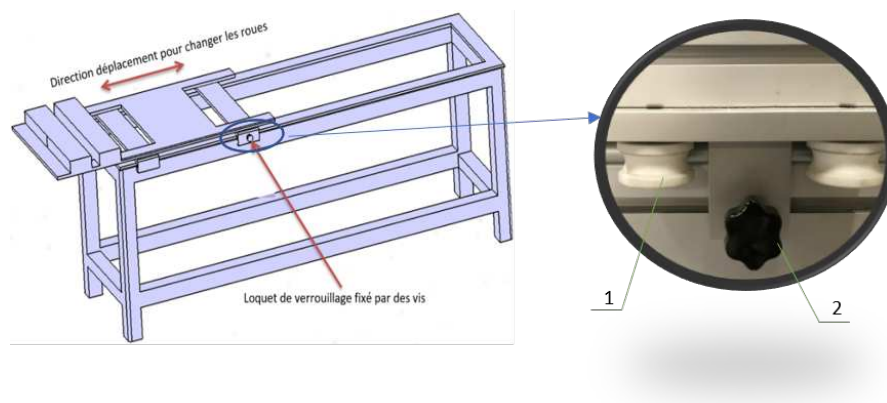


FIGURE 3.12 – Schéma du châssis assurant une bonne répétabilité des essais de performances des différents ventilateurs testés

## 3.2 Grandeurs physiques mesurées et incertitudes

### 3.2.1 Instrumentation du banc d'essai

En métrologie, l'incertitude de mesure est l'expression de la dispersion statistique des valeurs attribuées à une grandeur mesurée. Toutes les mesures sont sujettes à une incertitude et un résultat de mesure n'est complet que s'il est accompagné d'un énoncé de l'incertitude associée, telle que l'écart type. Mesurer une quantité n'est pas simplement une question de trouver sa valeur, mais aussi d'associer l'incertitude avec elle pour déterminer la qualité de la mesure. Pour évaluer l'incertitude d'une mesure, il est nécessaire de tenir compte des diverses effets qui peuvent avoir une incidence sur cette mesure. Il existe de nombreuses raisons à l'erreur d'une mesure, mais les principales causes sont les suivantes :

- Le type de machines et d'instruments de mesure
- Les capacités physiques l'opérateur
- Les conditions externes (température ambiante, humidité, météo...)

### 3.2.2 L'erreur de mesure aléatoire

L'erreur aléatoire est due aux variations des conditions environnementales pendant la mesure. Par conséquent, lorsque la même personne effectue des mesures répétées, dans les mêmes conditions, pour la mesure d'une même quantité, le résultat peut être différent. Cette erreur est appelée erreur aléatoire de mesure. Cette incertitude est appelée l'incertitude de répétabilité (type A). L'incertitude de type A est l'évaluation

d'une composante de l'incertitude de mesure par une analyse statistique des valeurs de grandeur mesurées obtenues dans des conditions de mesure définies. La valeur moyenne est calculée à l'aide de l'équation 3.3

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^K .x_i}{K} \quad (3.3)$$

Où :  $x_i$  est la  $i$ -ème valeur mesurée,  $K$  est le nombre de répétitions,  $\bar{x}$  est la moyenne. L'écart-type est une quantité utilisée pour refléter le degré de dispersion d'une variable autour de la moyenne. L'écart-type peut être calculé en prenant la racine carrée de la variance. Elle est calculée à partir d'un échantillon des résultats observés (équation 3.4).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^K .(x_i - \bar{x})^2}{K}} \quad (3.4)$$

Comme le montre la figure 3.13, nous voyons que la dispersion des erreurs aléatoires suit généralement une distribution donnée par la courbe de Gauss en forme de cloche (distribution normale de Gauss). Par conséquent, si une autre mesure est effectuée pour le même point de mesure, il y a 68% de chances que la mesure se situe dans un écart type de la moyenne et 95% de chances qu'elle soit à moins de deux écarts-types.

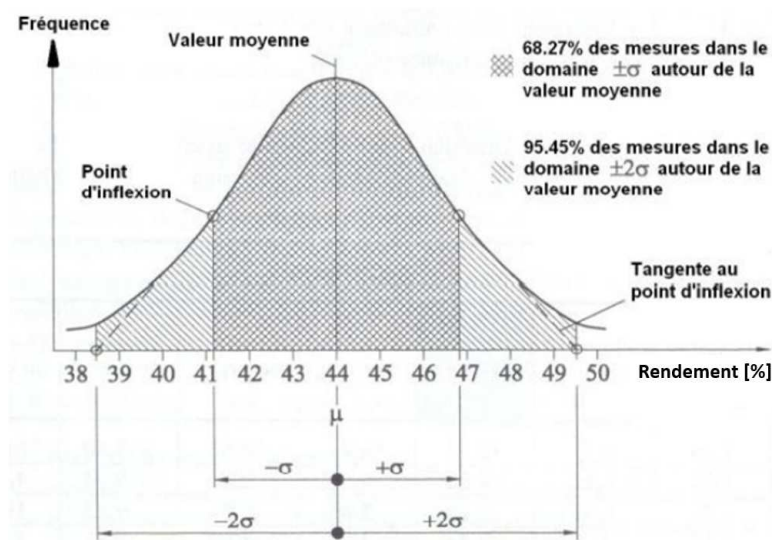


FIGURE 3.13 – Distribution normale de Gauss

### 3.2.3 L'erreur systématique

Les erreurs systématiques sont des écarts dans les mesures qui conduisent à la situation où la moyenne de plusieurs mesures séparées diffère sensiblement de la valeur réelle de la grandeur mesurée. Toutes les mesures sont sujettes à des erreurs systématiques, souvent de plusieurs types différents. Les sources d'erreur systématique peuvent être



un mauvais étalonnage des instruments de mesure, des changements dans l'environnement qui interfèrent avec le processus de mesure et parfois des méthodes imparfaites d'observation. Ces facteurs correspondent à une erreur systématique connue comme une incertitude de type B. Une incertitude de type B est intrinsèque à la méthode de mesure et nécessite une bonne connaissance des processus de mesure et du matériel utilisé.

### 3.2.4 Incertitude composée

Pour assurer la confiance de la mesure, il est important d'identifier les facteurs qui influent sur les résultats de mesure. Par conséquent, lors de la détermination des résultats de mesure, il est nécessaire de prendre en compte les deux éléments mentionnés à la figure 3.14

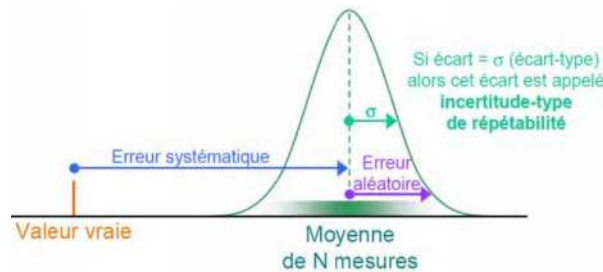


FIGURE 3.14 – Erreur de mesure

Lorsque la valeur  $X$  est calculée à partir de  $X_1$  et  $X_2$  connus avec une incertitude de type B. La valeur de  $X$  est également affectée par ces incertitudes de mesure. Le calcul de  $u(X)$  est effectué à partir de  $s(X_1)$  et  $s(X_2)$ . En termes de problèmes expérimentaux pratiques, les fonctions de transfert peuvent être les suivantes :

- Fonction d'addition ou de soustraction :  $X = X_1 + X_2$  ou  $X = X_1 - X_2$

L'incertitude est déterminée par :

$$s(X) = \sqrt{s(X_1)^2 + s(X_2)^2} \quad (3.5)$$

- Fonction de multiplication ou de division :  $X = X_1 \cdot X_2$  ou  $X = X_1 / X_2$

L'incertitude est déterminée par :

$$\frac{s(X)}{X} = \sqrt{\left(\frac{s(X_1)}{X_1}\right)^2 + \left(\frac{s(X_2)}{X_2}\right)^2} \quad (3.6)$$

- fonctions puissances :  $X = (X_1)^n$  . L'incertitude est déterminée par :

$$\frac{s(X)}{X} = n \frac{s(X_1)}{X_1} \quad (3.7)$$

### 3.2.5 Détermination de l'incertitude de la mesure

#### \*Mesure de température

Le thermocouple PT100 est un type de sonde de résistance. L'élément PT100 a une résistance de 100 ohms à 0°C et il est le type de capteur le plus largement utilisé. Sa précision est de  $\pm 0,1\%$  pour la plage de température -100 °C et + 100 °C. En règle générale, ces capteurs sont protégés par une gaine et ils sont souvent désignés comme étant soit un PRT (thermomètre à résistance de platine) soit une sonde PT100. La température est calculée par l'équation 3.9 en fonction de la résistance R (équation 3.8):

$$R = R_0(1 + aT) \quad (3.8)$$

$$T = \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{R}{R_0} - 1 \right) \quad (3.9)$$

Ou : R - Résistance à la température T

$R_0$  - Résistance à 0°C

a - Coefficient de température de la sonde ( $3,85 \cdot 10^{-3} \Omega/\Omega/^\circ\text{C}$ )

T - Température en °C

L'incertitude totale de la température est déterminée par l'incertitude du capteur PT100 et de la carte d'acquisition NI (National instrument). Elle peut être calculée par l'équation suivante :

$$\delta_T = \sqrt{\delta_{Ni}^2 + \delta_{Capteur-PT100}^2} \quad (3.10)$$

#### \*Détermination de la masse volumique

La masse volumique de l'air au moment de la mesure a été déterminée par :

$$\rho = \frac{P + P^*}{r(T + 273,15)} \quad (3.11)$$

r - la capacité thermique spécifique (287 J/kg.K)

P - pression atmosphérique mesure (Pa)

P\* - pression atmosphérique au niveau de la mer (Pa)

L'incertitude de masse volumique est obtenue par :

$$\rho = |\rho| \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_p}{|P|}\right)^2 + \left(\frac{\delta_T}{|T|}\right)^2} \quad (3.12)$$

### **\*Mesure de la pression statique**

La pression statique est déterminée en mesurant la différence entre la pression à l'intérieur du caisson et la pression atmosphérique. Elle est mesurée avec un manomètre FC322 avec une échelle de  $\pm 500$  Pa et une précision de 0,5% de la lecture. L'incertitude totale de la pression d'entrée peut être déterminée par la relation suivante :

$$\delta_{\Delta P} = \sqrt{\delta_{Ni}^2 + \delta_{Capteur-FC}^2} \quad (3.13)$$

Ou  $\delta_{Capteur-FC} = 0,005 \cdot |\Delta P|$  et  $\delta_{Ni} = 0,52 \%$

### **\*Mesure de débit**

L'équation 3.1 désigne le débit volumique en fonction de la pression et de la masse volumique. La masse volumique et le débit massique étant les seules variables issues de la mesure, l'incertitude du débit est déterminée par :

$$\delta_{Q_v} = \frac{1}{2} \cdot |Q_v| \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta p}}{|\Delta P|}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{\rho}}{|\rho|}\right)^2} \quad (3.14)$$

### **\*Mesure de couple**

La valeur de couple est déterminée par le capteur HBM T20WN avec une plage de 5 N.m et une précision relative de  $\pm 0,2\%$ . L'incertitude de couple est déterminée par :

$$\delta_{\Delta C} = \sqrt{\delta_{Ni}^2 + \delta_{Capteur-HBM}^2} \quad (3.15)$$

Ou  $\delta_{\text{Capteur-FC}} = 0,002 \cdot |C|$  et  $\delta_{Ni} = 0,52 \%$

### **\*Incertitude sur les mesures de rendement statique**

Selon l'équation 3.16 la fonction de rendement  $\eta$  a trois variables (pression statique ( $\Delta P$ ), débit massique  $Q_v$  et couple ( $C$ )). L'incertitude relative  $\delta_n$  peut être calculée par l'équation 3.17:

$$\eta = \frac{\Delta P \cdot Q_v}{C \cdot \omega} \quad (3.16)$$

$$\delta_\eta = |\eta| \cdot \sqrt{\left(\frac{\delta_{\Delta P}}{|\Delta P|}\right)^2 + \left(\frac{\delta_C}{|C|}\right)^2 + \left(\frac{\delta_{Q_v}}{|Q_v|}\right)^2} \quad (3.17)$$

## **3.3 Analyse de la géométrie des ventilateurs**

### **3.3.1 Caractéristiques géométriques des ventilateurs**

Ce travail étant axé sur les effets des paramètres du procédé de rotomoulage sur les ventilateurs et notamment sur les performances aérodynamiques, il est nécessaire de contrôler les caractéristiques géométriques des ventilateurs pour chaque configuration de paramètre du procédé de rotomoulage. Pour obtenir des résultats précis pour comparer les ventilateurs obtenus avec le procédé de rotomoulage, un scanner 3D a été utilisé pour déterminer leur géométrie [50], [51]. Cette méthode utilise le scanner Comet L3D 5M (les dimensions des objets mesurables sont de 45 mm x 38 mm x 30 mm) basé sur la lumière structurée (LED bleue) avec un capteur de 5 mégapixels [52]. Cet appareil permet d'obtenir une précision et une fiabilité élevées (résolution de 18  $\mu\text{m}$ ).

Lors du balayage du ventilateur, les données de coordonnées du nuage sont obtenues sur toute la géométrie du ventilateur (figure 3.15 a) pour déterminer les caractéristiques de deux des pales numérotées de 1 à 6 (figure 3.15c). Chaque pale est divisée en onze sections ( $r_1$  à  $r_{11}$ ) comme le montre la figure 3.15b.

Le scanner est utilisé sur le ventilateur rotomoulé pour déterminer l'effet du procédé de rotomoulage sur les caractéristiques géométriques des ventilateurs. Dans ce procédé, le matériau, lors de la transition entre phases (liquide-solide), est soumis à des phénomènes qui peuvent affecter la géométrie des aubes puis les performances du ventilateur : déformation, retrait des matériaux, défauts, dégradation du matériau.

À partir du fichier de données du scanner 3D de chaque ventilateur, traité par

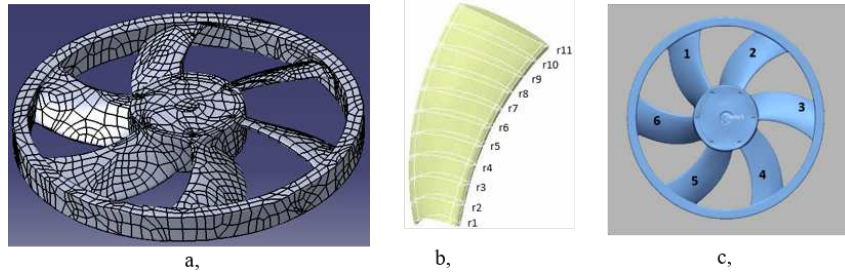


FIGURE 3.15 – Coordonnées des sections transversales des pales obtenues avec le scanner Comet L3D 5M

le logiciel Paraview, chaque pale est divisée en 11 parties figure 3.16a, coupées par un cylindre de diamètres  $r_1$  à  $r_{11}$  respectivement (figure 3.16a). Le profil de chaque section est montré figure 3.16b. Le profil de chaque pale est créé par un ensemble de données avec des coordonnées spatiales en 3 dimensions. Chaque section est définie par 4000 points correspondants. La figure 3.17 montre les profils d'une pale complète pour l'ensemble du ventilateur.

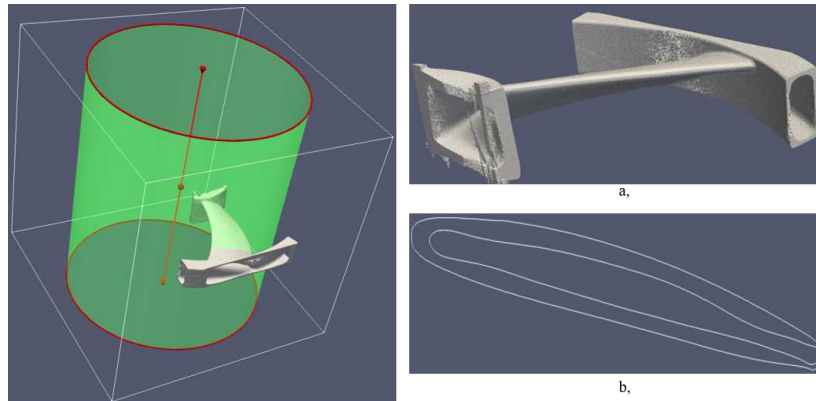


FIGURE 3.16 – Profil de pale défini par le logiciel Paraview après l'utilisation du scanner 3D

### 3.3.2 Détermination des paramètres de géométries du ventilateur

#### *Description des la pales*

La roue joue un rôle important dans les performances globales du ventilateur. En particulier, la structure et la forme des pales ont une grande influence sur l'écoulement et les effets qu'elles créent.

Les principaux paramètres de géométrie du ventilateur considérés sont:

- La corde  $L$  (mm)
- L'épaisseur maximale  $E_{max}$  (mm)
- L'angle de calage  $\gamma$
- L'angle de serrage  $\alpha$

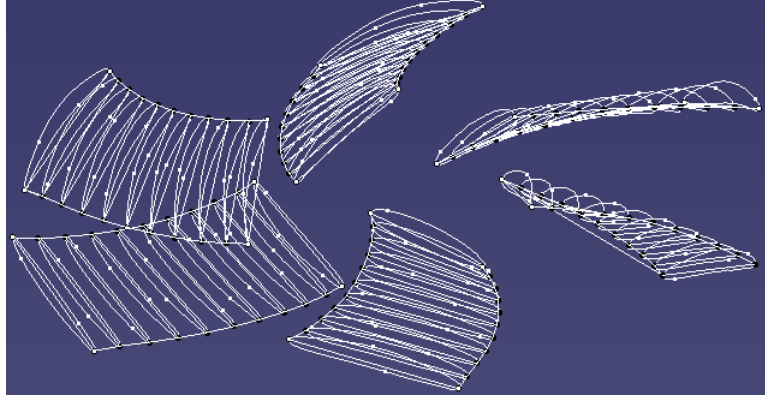


FIGURE 3.17 – Profils de pales correspondant à 11 sections obtenus par l'utilisation du scanner 3D

#### \* La corde

La corde est la ligne reliant deux points AB du bord d'attaque au bord de fuite (figure 3.18). Dans le triangle rectangle ABC, le segment AC est défini:

$$AC = \sqrt{AB^2 - BC^2} \quad (3.18)$$

Avec: BC = "z" - est la coordonnée de projection;  $z = z_A - z_B$

$$AB = \sqrt{(x_A - x_B)^2 - (y_A - y_B)^2 - (z_A - z_B)^2} \quad (3.19)$$

L'angle  $\phi_r$  est défini dans le triangle AOC:

$$AC^2 = 2r^2 - 2r^2 \cdot \cos(\phi_r) \quad (3.20)$$

$$\phi_r = \arccos\left(\frac{2r^2 - AC^2}{2r^2}\right) \quad (3.21)$$

Par conséquent, l'angle AC est défini comme:

$$\widehat{AC} = \left(\frac{\pi \cdot r \cdot \phi_r}{180}\right) \quad (3.22)$$

La longueur de la corde est alors:

$$L = \sqrt{z^2 + \left(\frac{\pi \cdot r \cdot \phi_r}{180}\right)^2} \quad (3.23)$$

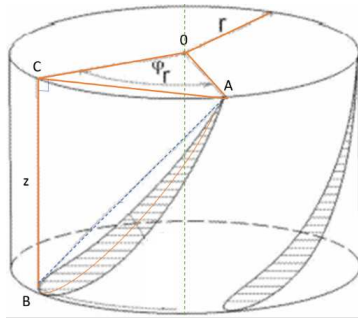


FIGURE 3.18 – Vue des sections de pales cylindriques

Pour simplifier les paramètres géométriques d'une pale, on détermine le profil de la pale en faisant rouler ce profil sur un plan. On obtient alors dans un profil 2D de la pale (figure 3.19). Ce profil est constitué de deux surfaces courbes (la surface convexe - "extrados" est la surface concave "intrados").

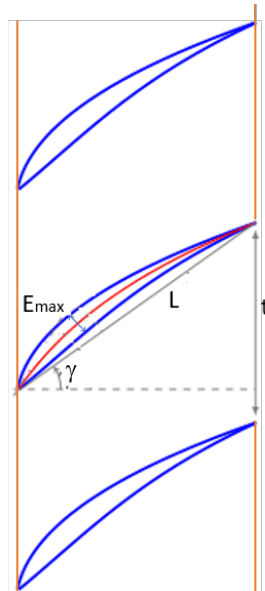


FIGURE 3.19 – Définition d'une grille d'aubes

La conception du profil NACA consiste en une spécification d'une ligne de cambrure de profil aérodynamique suivie du calcul du corps d'un profil aérodynamique. Un profil aérodynamique se compose de deux courbes paraboliques qui ont une ligne tangente commune qui est parallèle à une corde de profil. La distance entre une tangente et un bord d'attaque est égale à  $L^*$ . Il faut connaître les caractéristiques géométriques d'un profil qui a été calculé lors de la conception d'une roue pour dessiner une forme de ligne de cambrure. Ensuite, nous pouvons passer au calcul de la ligne de cambrure du profil NACA avec l'algorithme suivant:

- Il est nécessaire de choisir les coordonnées d'un bord d'attaque d'un profil où  $x = 0$  jusqu'à une extrémité du profil où  $x = 1$  (figure 3.20).

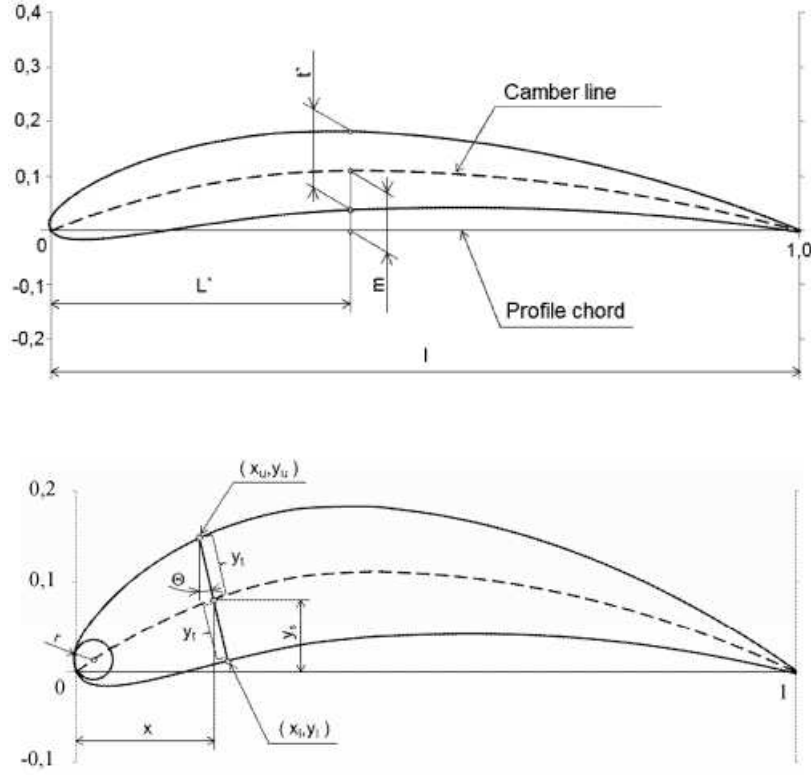


FIGURE 3.20 – Profil NACA - Détermination des points caractéristiques du profil

- Après avoir déterminé les points nécessaires avec les coordonnées  $x$ , nous pouvons commencer par évaluer les coordonnées  $y_s$  d'une ligne de cambrure. Ces équations décrivent une ligne de cambrure [53] :

$$y_s = \frac{\frac{m}{l}}{\left(\frac{L^*}{l}\right)^2} \left[ 2 \cdot \frac{L^*}{l} \cdot x - x^2 \right] \quad \text{for } 0 \leq x \leq L^* \quad (3.24)$$

$$y_s = \frac{\frac{m}{l}}{\left(1 - \frac{L^*}{l}\right)^2} \left[ 1 - 2 \frac{L^*}{l} + 2 \cdot \frac{L^*}{l} \cdot x - x^2 \right] \quad \text{for } L^* \leq x \leq 1 \quad (3.25)$$

Une demi-épaisseur d'un profil  $y_t$  correspond à un point particulier de la ligne de carrossage  $(x_t, y_t)$  calculé selon l'équation :

$$y_t = \frac{\frac{t^*}{l}}{0.2} (0.2969\sqrt{x} - 0.126x + 0.3516x^2 + 0.2843x^3 - 0.1015x^4) \quad (3.26)$$

L'épaisseur de la pale est définie comme:

$$E_{max} = 2 \cdot y_t \quad (3.27)$$

L'épaisseur relative est:



$$E(\%) = \frac{E_{max}}{L} \quad (3.28)$$

L'angle de calage est:

$$\gamma = \arccos\left(\frac{z}{L}\right) \quad (3.29)$$

L'angle de serrage est:

$$\alpha = \frac{L.t}{2.\pi.R} \quad (3.30)$$

### 3.4 Méthode de mesure du champ de vitesse axiale

Le banc d'essai est équipé pour mesurer la vitesse axiale (en l'aval du ventilateur) à l'aide d'un tube de Pitot statique. Cette méthode est souvent utilisée pour mesurer la vitesse dans de nombreux domaines différents: pipelines, anémométrie aéronautique, etc... Il comprend essentiellement deux tubes concentriques, intérieur et extérieur, permettant respectivement de mesurer la pression totale à l'avant du flux au point d'arrêt A, et la pression statique au point tangentiel B figure 3.21c. Le déplacement axial et radial de cet instrument de mesure est assuré par un système de translation tridimensionnel DANTEC 3D (figure 3.21b). La zone de mesure correspond à une largeur de 240 mm et une hauteur radiale de 160 mm. Ces dimensions dépendent des limites fixées par le système de traverse DANTEC 3D. L'utilisation du tube de Pitot suppose l'adoption de l'hypothèse d'un écoulement où les tourbillons sont négligés. En réalité, le fonctionnement du ventilateur induit toujours l'écoulement d'air dans les deux sens : radiale pour les faibles débits  $V_r(r, z)$  et axiale pour les hauts débits  $V_z(r, z)$  figure 3.21a. Pour s'assurer que le débit dans la direction axiale est le plus grand pour ces mesures de vitesse, le diaphragme utilisé est de diamètre 475 mm.

L'emplacement de la sonde du tube de Pitot est à une distance en aval de 40mm par rapport au ventilateur et une hauteur radiale de 65,5 mm. Cette position de l'origine est prise comme position axiale de référence ( $z = 0$ ). En aval du ventilateur, le tube de Pitot statique est déplacé pour scanner la zone de mesure. Les champs d'écoulement ont été mesurés sur une grille qui s'étend typiquement de  $z = 0$  mm à  $z = 240$  mm avec un espacement de 30 mm (9 points dans le sens axial) et de  $r/R = 0.365$  à  $r/R = 1.090$  avec un espacement de 10 mm (14 points dans la direction radiale).

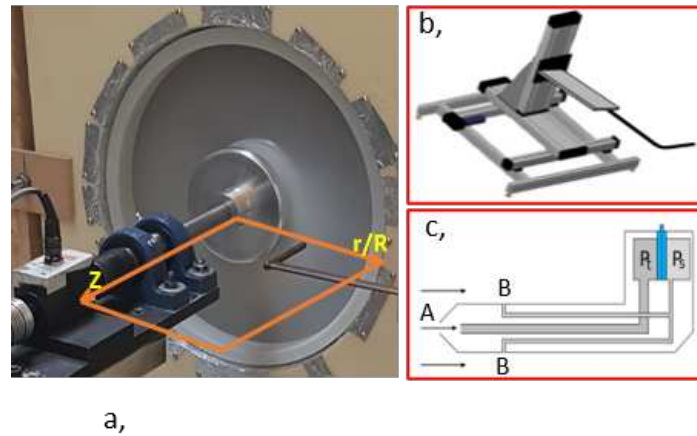


FIGURE 3.21 – Méthode de mesure utilisée pour déterminer le champ de vitesse axiale par tube de Pitot

## 3.5 Méthode de mesure de la vibration

### a, Description de vibration

La vibration la plus simple peut être déterminée mathématiquement en utilisant la fonction  $f(t) = A \cos(\omega t + T)$ , où  $T$  est appelée la période de la vibration,  $|A|$ : l'amplitude maximale de vibration,  $\omega$  est la fréquence angulaire. La fréquence ( $f$ ) est le nombre de fois que le phénomène se produit par seconde (équation 3.31).

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.31)$$

En effet, dans un système (ou un banc d'essai), il existe de nombreux facteurs qui affectent la vibration tels que: l'installation expérimentale, défaut de roulements, actionneur (ventilateur), ... (figure 3.22).

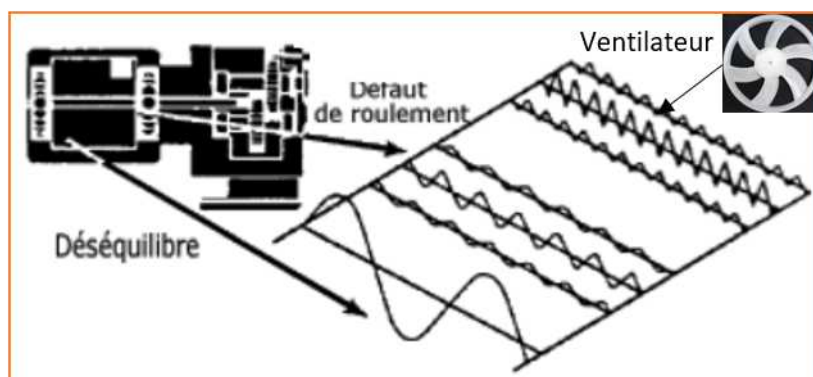


FIGURE 3.22 – Vibration d'un banc d'essai en fonction du temps et de la fréquence

Le signal obtenu de  $f(t)$  et la fréquence de la vibration sont présentés dans la figure 3.23

### b, Mesure de l'amplitude

La valeur de crête-à-crête indique la différence entre les amplitudes maximale et

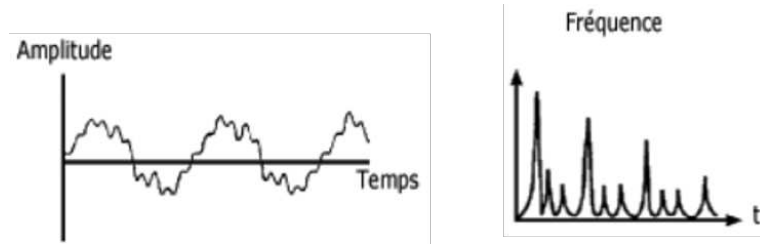


FIGURE 3.23 – Signal de vibration et fréquence de vibration

minimale. C'est une grandeur utile pour déterminer le déplacement d'un composant, ce qui est important pour considérer les effets des facteurs de déstabilisation mécanique du système (figure 3.24)

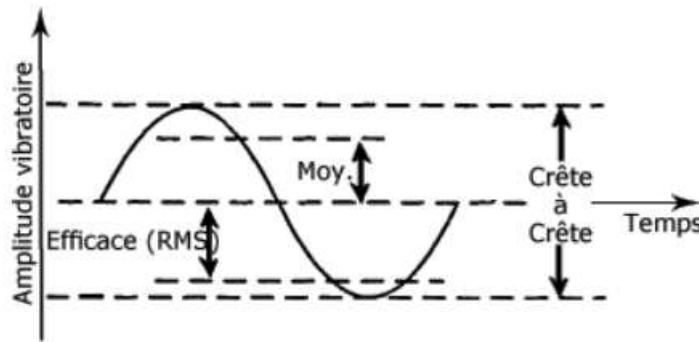


FIGURE 3.24 – Mesure de l'amplitude d'une vibration

Après avoir reçu le signal  $f(t)$  précédent, le système électronique peut mesurer avec précision la valeur RMS (root mean square) du signal. La valeur RMS de période  $T$  est notée  $\langle \omega \rangle$  et est définie comme suit (équation 3.32) [54] :

$$\langle \omega \rangle = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt} \quad (3.32)$$

La valeur moyenne de la vibration  $\bar{V}$  obtenue avec ce signal est déterminée par l'équation (équation 3.33)

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T |x| dt \quad (3.33)$$

### c, Préparation de l'appareil de mesure des vibrations

Un plan de mesure de la vibration est réalisé: sur la figure 3.25, un capteur accéléromètre de Brüel-Kjær (type 4518-002) avec une précision de  $\pm 0,1\%$ , est fixé sur le roulement. Pour une vitesse de rotation du moteur  $N = 1800$  tr/min, 10.000 échantillons sont prélevés en 5s avec une fréquence d'échantillonnage de 2000 Hz. Le capteur est connecté à un ordinateur, le signal reçu est traité par le logiciel Labview.

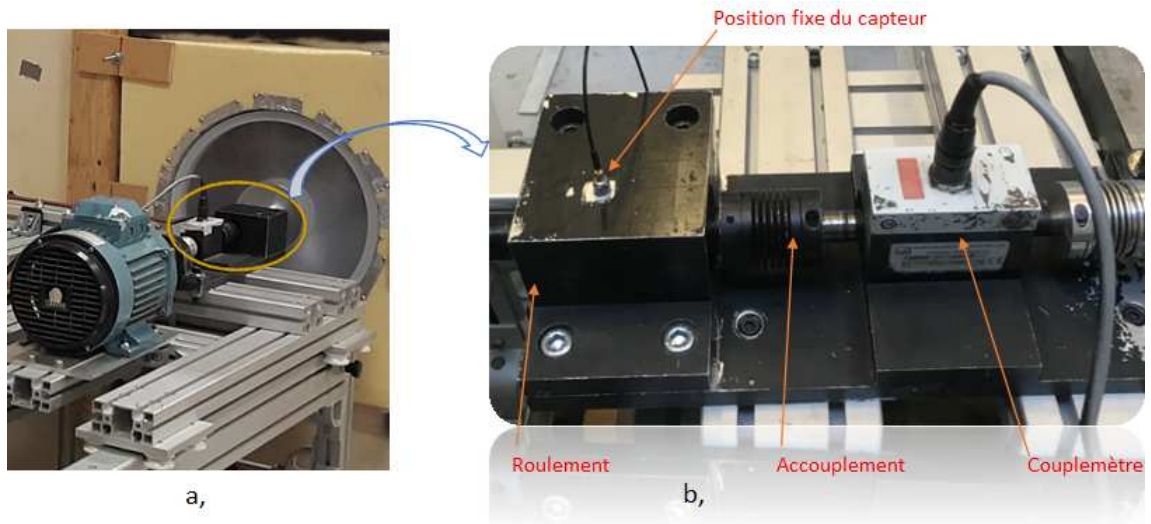


FIGURE 3.25 – (a)-Banc d'essai, (b)-Position fixe du capteur

### 3.6 Conclusion

Le système de banc d'essai est développé dans le laboratoire [LIFSE](#). En raison du nombre grande de ventilateurs testés (45 ventilateurs), l'exigence est d'assurer la précision et la stabilité. Plus précisément, le protocole de forage et de fixation du ventilateur est réalisé de la même manière avec tous les ventilateurs. Le ventilateur est monté sur un support coulissant pour assurer un retrait et une installation faciles du ventilateur pendant les essais. Les dispositifs de mesure et les méthodes de calcul de l'incertitude des paramètres de travail sont introduits pour expliqués les résultats du chapitre 4. Par ailleurs, la méthode de mesure du champ de vitesse axiale en aval du ventilateur avec un tube de Pitot est présentée. Ceci permet d'évaluer les effets des conditions de fabrication des ventilateurs sur leurs paramètres aérodynamiques. Les dimensions géométriques des ventilateurs obtenus par rotomoulage ont été déterminées par la méthode du scanner 3D. Le retrait du matériau est contrôlé par les paramètres correspondant à 11 sections ( $r_1$ - $r_{11}$ ) sur la pale: la corde ( $L$ ), l'épaisseur ( $E_{max}$ ), l'angle de calage ( $\gamma$ )...

Dans le chapitre suivant, les résultats expérimentaux et l'analyse détaillée des paramètres aérodynamiques des 45 ventilateurs utilisées dans cette étude sont présentés.



# Chapitre 4

## Résultats expérimentaux

### Contents

4.1	Caractéristiques aérodynamiques des ventilateurs . . . . .	59
4.2	Champ de vitesse axiale des ventilateurs de rotomoulés .	70
4.3	Répétabilité du procédé de fabrication et des mesures . .	73
4.4	Caractérisation du ventilateur obtenu par rotomoulage .	82
4.5	Caractérisation géométrique des pales de ventilateur par la méthode du scanner 3D . . . . .	86
4.6	Analyse de l'épaisseur du ventilateur . . . . .	93
4.7	Etude de l'effet des vibrations sur les ventilateurs . . . . .	95
4.8	Cas particulier : ventilateur de masse 200g . . . . .	98
4.9	Conclusion . . . . .	101

### 4.1 Caractéristiques aérodynamiques des ventilateurs

Le coefficient de débit  $\phi$  et le coefficient de pression statique  $\psi$  sont déterminés selon les équations 4.1 et 4.2.

$$\phi = \frac{Q_v}{\pi \omega R^3} \quad (4.1)$$

$$\psi = \frac{2\Delta P}{\rho \omega^2 R^2} \quad (4.2)$$

Le coefficient pression statique  $\psi$  et le rendement statique  $\eta$  ont été mesurés pour différents débits, à différentes vitesses de rotation: 1500 tr/min, 1750 tr/min et 2000 tr/min. Les nombres de Reynolds basé sur la longueur moyenne de la corde et sur la vitesse relative au rayon moyen sont faibles dans ce cas, allant de  $8,6 \times 10^4$  à  $1,2 \times 10^5$ . Les résultats pour un seul ventilateur axial, à savoir le PEL-500-250-12, sont représentés sur la figure 4.1 Le coefficient de montée en pression en fonction du coefficient de débit

est sensiblement le même pour les trois nombres de Reynolds. Cependant, le rendement est plus élevé pour des valeurs plus importantes du nombre de Reynolds: le rendement maximal pour ce ventilateur est de l'ordre de 37,4 % à 1500 tr/min (vert) alors qu'il est de l'ordre de 43,8 % à 2000 tr/min. Ceci est cohérent avec le comportement attendu des ventilateurs axiaux, la valeur du nombre de Reynolds auquel le rendement saturerait étant de l'ordre de  $2 \times 10^5$ , Farid Bakir [55]. La même différence d'environ 6 points de pourcentage à l'efficacité maximale a été observée pour les 36 ventilateurs de cette étude.

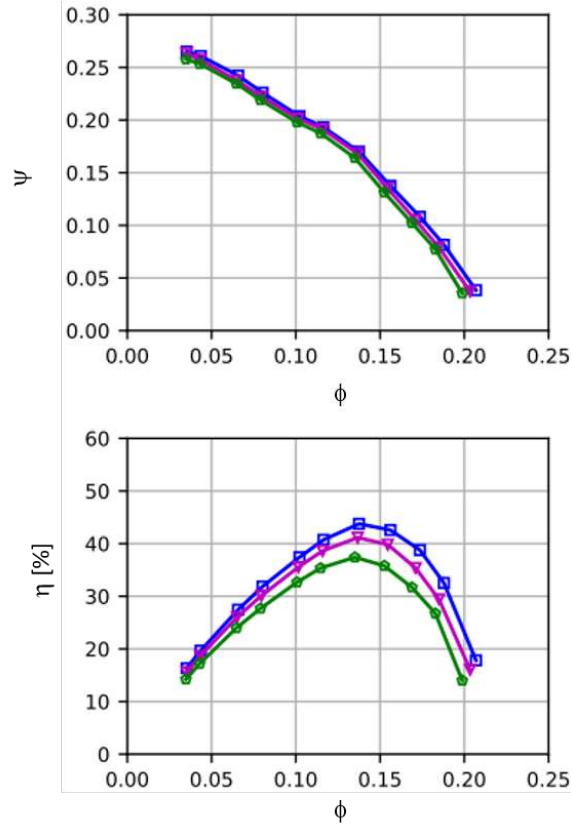


FIGURE 4.1 – Coefficient de pression statique  $\psi$  et rendement statique  $\eta$  en fonction du coefficient de débit  $\phi$  pour  $Re = 1,2 \times 10^5$  ( $\square$ ),  $Re = 1,0 \times 10^5$  ( $\triangle$ ) et  $Re = 8,6 \times 10^4$  ( $\diamond$ ). Résultats pour le ventilateurs PEL-500-250-12.

Avec une masse de 500g (figure 4.2), les ventilateurs tournent à trois vitesses différentes 1500, 1750 et 2000 tr/min. Le rendement statique (figures 4.2 (a), (b), (c)) et les coefficients de pression (Figures 4.2 (d), (e), (f)) sont présentés en fonction du coefficient d'écoulement  $\phi$ . Nous avons constaté que les tendances de courbe des 9 ventilateurs obtenus avec les rendements et les coefficients des pressions sont les mêmes. Au point nominal de conception  $\phi = 0.14$ , correspondant à diaphragme diamètre  $d = 0.267\text{m}$ , la valeur maximale du rendement à 2000 tr/min est de 45,4% pour un temps de chauffage  $\Delta t_0 = 20$  minutes et à la température de four  $T_0 = 330^\circ\text{C}$ .

D'autre part, d'après la figure 4.19, on voit que lorsque  $\Delta t_0 > 15$  mins et  $T_0 > 285^\circ\text{C}$ , la couleur du ventilateur change de manière significative (la couleur devient plus foncée surtout à  $330^\circ\text{C}$  et le temps de cuisson est de 20 minutes). Ce changement de couleur peut être expliquée par l'oxydation polymère, lorsque le temps dans le four est trop long ou la température est trop élevée (cette hypothèse sera présentée plus en détail dans le chapitre 5). Les résultats des tests ont montré que, pour la même quantité de poudre utilisée, les facteurs de température et de temps ont une influence sur les rendements des ventilateurs. Plus précisément, en plus de l'observation d'un changement de couleur du ventilateur, la plus grande différence de rendement  $|\eta_{max} - \eta_{min}|$  pour la masse 500g est de  $2,23 \pm 0,5\%$ .

Pour élargir l'investigation de l'influence des paramètres fixés lors du rotomoulage sur l'aérodynamique des ventilateurs, d'autres masses sont utilisées dans la fabrication du ventilateur: 300g, 400g et 600g. Les conditions de temps et de température de chauffe sont maintenues constantes. Les résultats de performance aérodynamique des ventilateurs sont montrés sur les figures (4.3, 4.4, 4.5).

La figure 4.4 montre que pour une masse de poudre de PE utilisée de 300g, le rendement maximal est de  $46,87 \pm 0,5\%$  à la vitesse de rotation de 2000 tr/min, avec un temps de chauffage de 20 minutes et une température dans le four  $285^\circ\text{C}$  (PEL-300-285-20). Semblable à une masse de poudre de 400g (figure 4.3), le rendement maximal à une vitesse de rotation de 2000 tr-min est de  $46,3 \pm 0,5\%$  avec un temps de 12 minutes et une température dans le four de  $285^\circ\text{C}$  (PEL-400-285-12). Ce résultat confirme également les résultats des travaux [9] lorsque la température utilisée dans le procédé de rotomoulage est de  $285^\circ\text{C}$ . La différence de rendement maximale entre les ventilateurs  $|\eta_{max} - \eta_{min}|$  correspondant aux masses 300g et 400 g sont respectivement  $2,42 \pm 0,5\%$  et  $2,61 \pm 0,5\%$ .

Cependant, avec une masse de 600g, nous avons constaté que les valeurs de performance des ventilateurs étaient considérablement réduites par rapport à une masse de 300g. La valeur du rendement maximale est de  $44,01\%$ , ce qui correspond à la température du four de  $330^\circ\text{C}$  et le temps de four 12 minutes. La différence maximale de rendement entre  $|\eta_{max} - \eta_{min}|$  pour la masse 300g est de  $2,94 \pm 0,5\%$ .



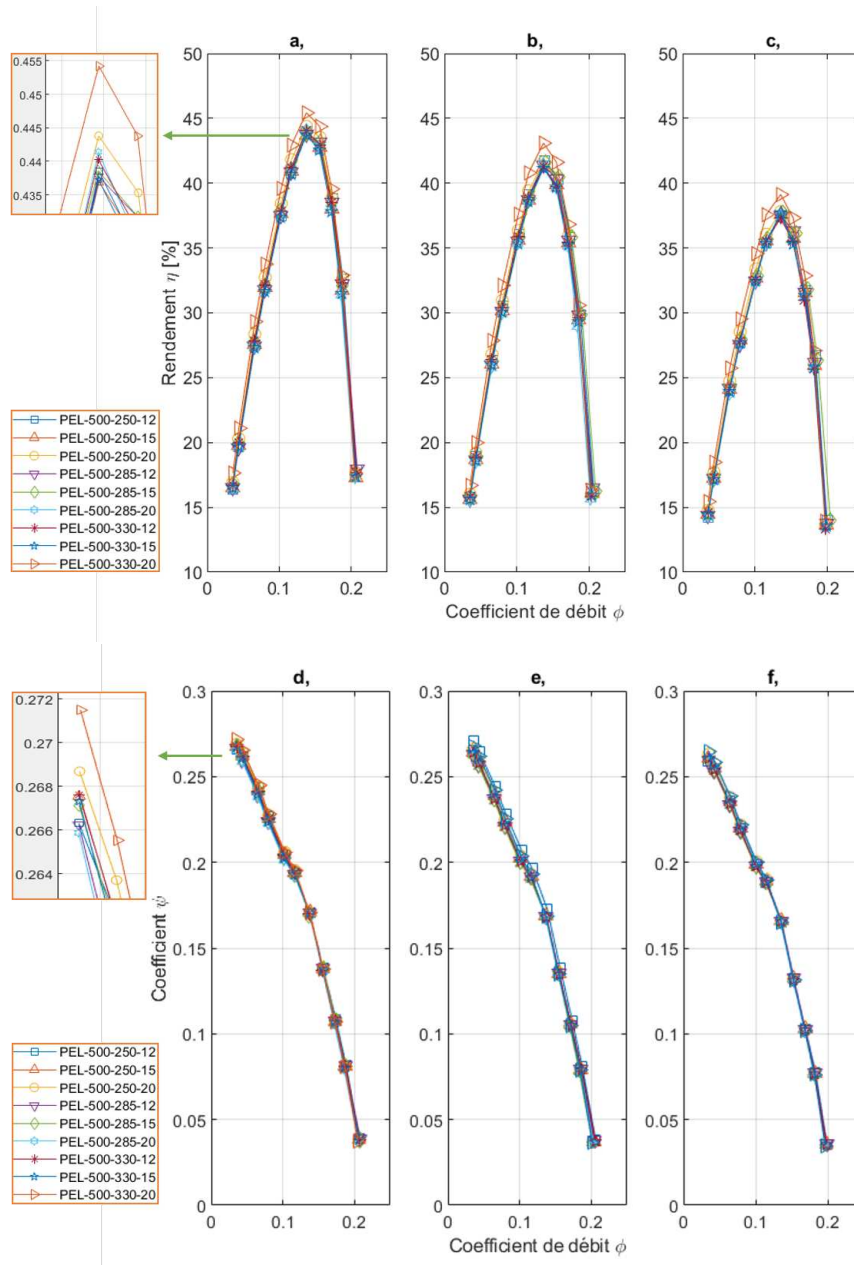


FIGURE 4.2 – Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec **500g** de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents

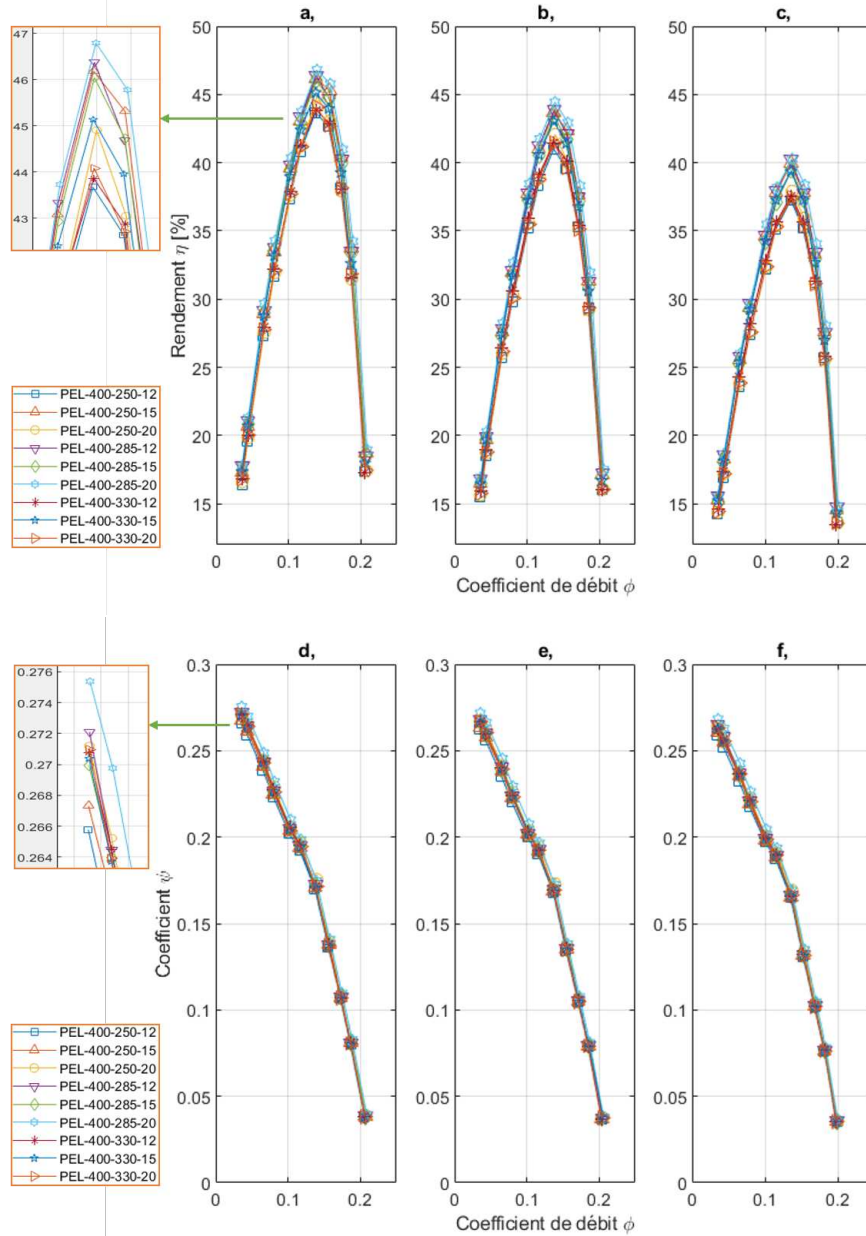


FIGURE 4.3 – Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec **400g** de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents

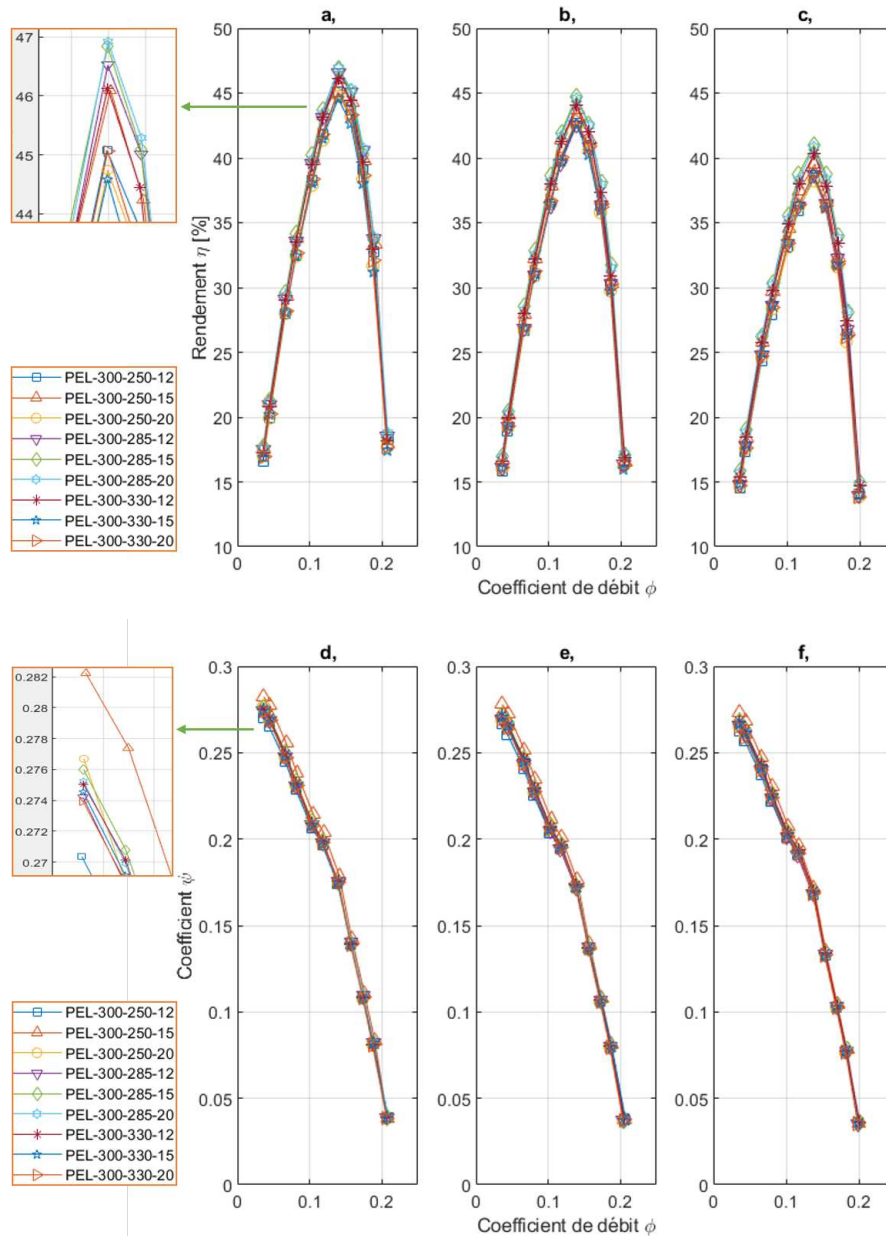


FIGURE 4.4 – Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec **300g** de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents

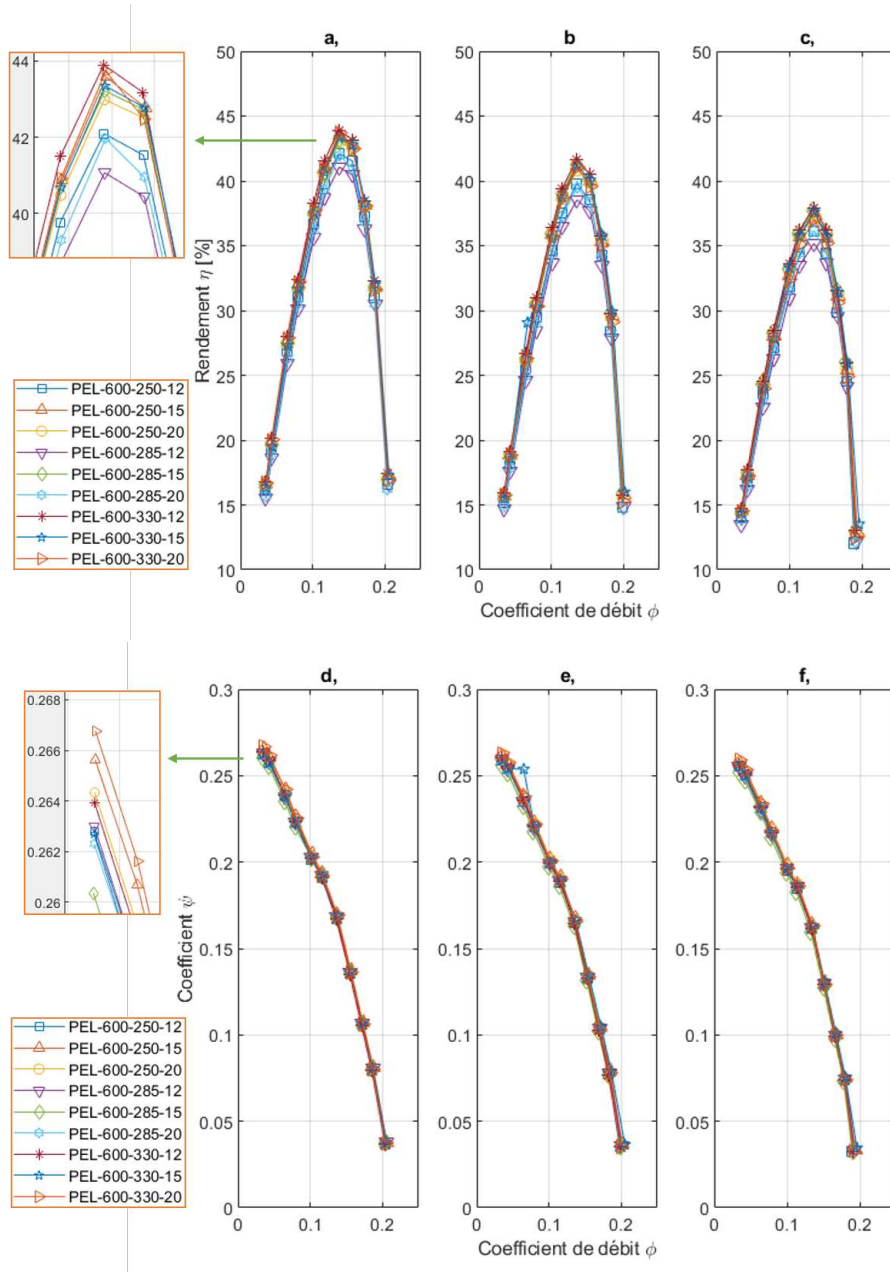


FIGURE 4.5 – Performances aérodynamiques de ventilateurs rotomoulés avec **600g** de poudre de PEL, à la vitesse 2000 tr/min (a); 1750 tr/min (b); 1500 tr/min (c) pour des températures et des temps dans le four différents

Pour résumer, nous pouvons observer les résultats de performance aérodynamiques des ventilateurs obtenus (figure 4.6). Considérons les rendements correspondant à 300g - (a), 400g - (b), 500g - (c), 600g - (d). Sur la figure 4.6a, la zone jaune représente les conditions pour lesquelles le rendement maximal est environ 46% - 47%, c'est-à-dire pour un temps de chauffage  $\Delta t_0 = 12, 15, 20$  minutes et une température de 285°C. La zone de couleur verte correspond à une plus petite valeur de rendement, environ 45% - 46% et la zone bleu pétrole à une valeur du rendement d'environ 44,5% à 45%.

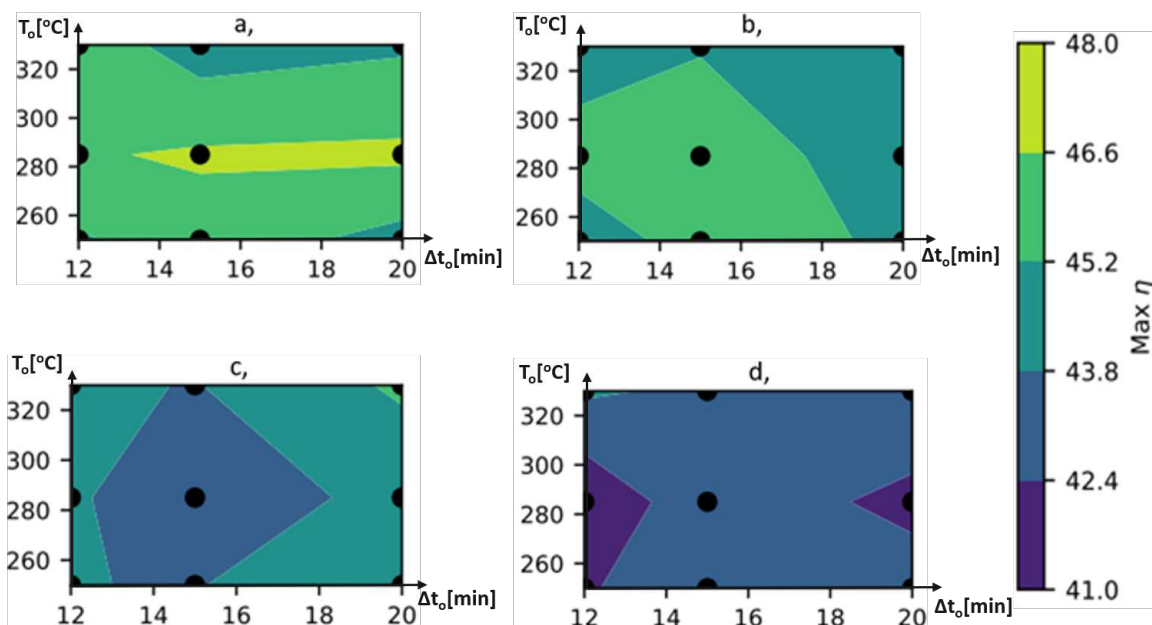


FIGURE 4.6 – Rendement maximal (à la vitesse 2000 tr/min) en fonction de la température de chauffage  $T_0$  et du temps  $\Delta t_0$ , pour différentes masses: (a) - 300g, (b) - 400g, (c) - 500g, (d) - 600g

Sur la figure 4.7, le rendement statique des ventilateurs est présenté. Il semble y avoir une tendance de la performance globale observée. Lorsque la température et le temps de chauffage dans le four sont fixes  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  minutes et  $T_0 = (250, 285, 330)$  °C. La valeur de rendement du ventilateur diminue avec l'augmentation de la masse de polymère. L'augmentation de la masse de poudre augmente les coûts de production, en particulier à l'échelle industrielle, alors que le rendement n'est pas amélioré.

A partir des résultats d'analyse aérodynamique des ventilateurs obtenus selon différentes conditions de production: masse, température, temps de chauffage, il est possible d'avoir une vue d'ensemble de l'effet de ces paramètres sur les ventilateurs rotomoulés. L'évaluation du comportement, le changement de certains paramètres dans le procédé de rotomoulage et la qualité du produit rotomoulé sont importants à étudier. Sur cette base, nous pouvons améliorer la qualité du produit et procéder à l'optimisation procédé. Selon le tableau 4.2 on voit que la différence entre les valeurs de rendement maximum et minimum avec une même masse de poudre de 500g est d'environ 2,2%. De plus,

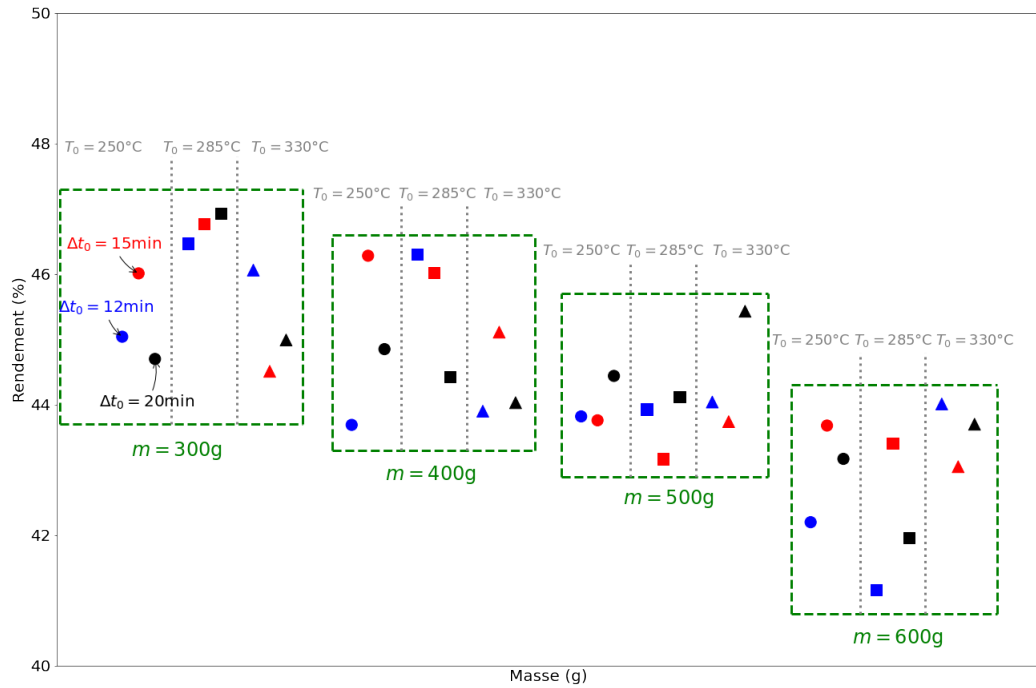


FIGURE 4.7 – Efficacité maximale de chaque ventilateur par rapport à la masse de poudre. Les symboles représentent la température et les couleurs, le temps de chauffage:  $\bigcirc$  :  $250^{\circ}\text{C}$ ,  $\square$  :  $285^{\circ}\text{C}$  et  $\triangle$  :  $330^{\circ}\text{C}$ . Bleu: 12 minutes, rouge: 15 minutes et noir: 20 minutes.

lorsque l'on compare les valeurs de rendement d'autres ventilateurs, la différence n'est pas très prononcée et reste dans les limites de l'incertitude de l'équipement de mesure. Par conséquent, il est difficile d'évaluer les effets des paramètres du procédé sur la qualité du produit et l'aérodynamique du ventilateur qui en résulte. Ce résultat est similaire pour les masses 300g, 400g et 600g.

Pour une meilleure illustration, 3 ventilateurs ont été sélectionnés pour représenter les valeurs de performance des ventilateurs mesurés: les ventilateurs présentant le rendement maximal, moyenne et minimal: PEL-300-285-20; PEL-500-250-12; PEL-600-285-12. Les caractéristiques aérodynamiques de ces trois ventilateurs sont indiquées sur la figure 4.8. Les résultats montrent qu'avec deux ventilateurs PEL-300-285-20 et PEL-600-285-12 produits par le procédé de rotomoulage, avec un même moule et différents paramètres de procédé, la différence de rendement obtenue sur le banc d'essai est de l'ordre de 6% (tableau 4.3). Cette différence est significativement plus grande que l'incertitude d'instrumentation. Par conséquent, il peut être confirmé que: les paramètres de procédé de rotomoulage affectent les caractéristiques aérodynamiques des ventilateurs obtenus.

TABLEAU 4.1 – Caractéristiques des ventilateurs rotomoulés avec 500 g de poudre de polymère et un temps de refroidissement à l'air de 20 min.

$m$ [g]	$T_0$ [ $^{\circ}C$ ]	$\Delta t_0$ [min]	$\phi$	$\psi$	$\eta$ [%]
300	250	12	0.1417	0.1683	$45.04 \pm 0.5$
300	250	15	0.1410	0.1776	$46.01 \pm 0.5$
300	250	20	0.1417	0.1701	$44.70 \pm 0.5$
300	285	12	0.1417	0.1705	$46.47 \pm 0.5$
300	285	15	0.1410	0.1713	$46.77 \pm 0.5$
300	285	20	0.1417	0.1708	$46.93 \pm 0.5$
300	330	12	0.1403	0.1726	$46.06 \pm 0.5$
300	330	15	0.1396	0.1734	$44.51 \pm 0.5$
300	330	20	0.1403	0.1725	$44.99 \pm 0.5$
400	250	12	0.1410	0.1627	$43.69 \pm 0.5$
400	250	15	0.1431	0.1614	$46.28 \pm 0.5$
400	250	20	0.1410	0.1718	$44.85 \pm 0.5$
400	285	12	0.1417	0.1690	$46.30 \pm 0.5$
400	285	15	0.1396	0.1664	$46.02 \pm 0.5$
400	285	20	0.1410	0.1580	$44.43 \pm 0.5$
400	330	12	0.1438	0.1625	$43.90 \pm 0.5$
400	330	15	0.1410	0.1634	$45.11 \pm 0.5$
400	330	20	0.1403	0.1668	$44.03 \pm 0.5$
500	250	12	0.1403	0.1656	$43.82 \pm 0.5$
500	250	15	0.1431	0.1610	$43.76 \pm 0.5$
500	250	20	0.1431	0.1603	$44.44 \pm 0.5$
500	285	12	0.1445	0.1581	$43.93 \pm 0.5$
500	285	15	0.1410	0.1636	$43.17 \pm 0.5$
500	285	20	0.1403	0.1643	$44.12 \pm 0.5$
500	330	12	0.1417	0.1619	$44.04 \pm 0.5$
500	330	15	0.1410	0.1636	$43.74 \pm 0.5$
500	330	20	0.1417	0.1626	$45.43 \pm 0.5$
600	250	12	0.1431	0.1554	$42.20 \pm 0.5$
600	250	15	0.1431	0.1594	$43.68 \pm 0.5$
600	250	20	0.1438	0.1551	$43.17 \pm 0.5$
600	285	12	0.1431	0.1557	$41.17 \pm 0.5$
600	285	15	0.1445	0.1541	$43.41 \pm 0.5$
600	285	20	0.1410	0.1617	$41.96 \pm 0.5$
600	330	12	0.1424	0.1559	$44.01 \pm 0.5$
600	330	15	0.1438	0.1564	$43.05 \pm 0.5$
600	330	20	0.1395	0.1642	$43.70 \pm 0.5$

TABLEAU 4.2 – Ecart de rendement des ventilateurs rotomoulés la masse de poudre utilisée

Masse (g)	$\eta_{min}$ (%)	$\eta_{max}$ (%)	Ecart- $\eta$ (%)
300	$44.51 \pm 0.5$	$46.93 \pm 0.5$	2.42
400	$43.69 \pm 0.5$	$46.30 \pm 0.5$	2.61
500	$43.17 \pm 0.5$	$45.43 \pm 0.5$	2.26
600	$41.17 \pm 0.5$	$44.10 \pm 0.5$	2.93

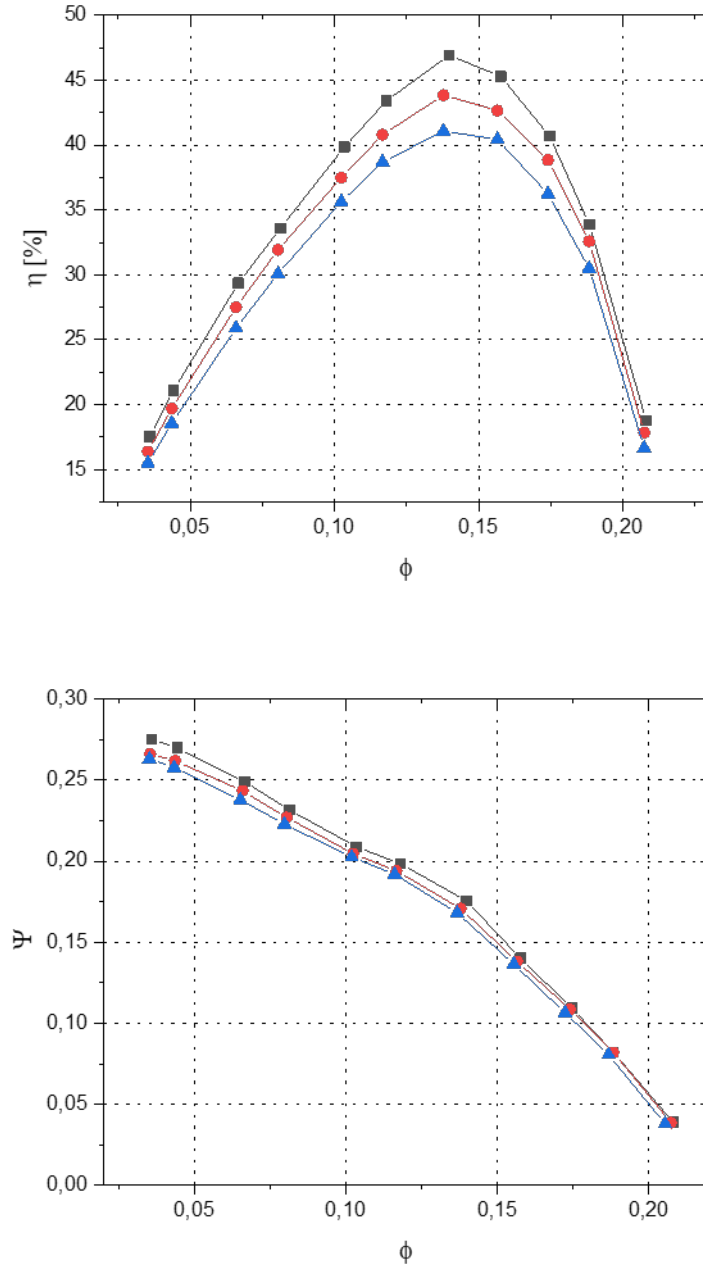


FIGURE 4.8 – Rendement statique et coefficient de pression en fonction du coefficient de débit des trois ventilateurs sélectionnés: ( $\eta_{max}$ ): PEL-300-285-20 (-■-), ( $\eta_{moy}$ ): PEL-500-250-12 (-●-), ( $\eta_{min}$ ): PEL-600-285-12 (-▲-)

TABLEAU 4.3 – Comparaison des performances aérodynamiques de 3 ventilateurs : PEL-300-285-20, PEL-500-250-12, PEL-600-285-12

Code de ventilateur	$\psi$	$\phi$	$\eta_{max}$ [%]
PEL-300-285-20	$0.1708 \pm 0.003$	$0.1417 \pm 0.005$	$46.93 \pm 0.5$
PEL-500-250-12	$0.1656 \pm 0.003$	$0.1403 \pm 0.005$	$43.82 \pm 0.5$
PEL-600-285-12	$0.1554 \pm 0.003$	$0.1431 \pm 0.005$	$41.17 \pm 0.5$



## 4.2 Champ de vitesse axiale des ventilateurs de rotomoulés

Pour approfondir l'analyse des effets des paramètres du procédé de rotomoulage, le champ de vitesse de l'écoulement en sortie du ventilateur est mesuré pour une même température et un même temps de chauffage. La méthode de mesure de la vitesse est présentée au chapitre 3, la section 3.4. La quantité de poudre utilisée dans la fabrication du ventilateur influe sur la qualité du ventilateur: épaisseur, dureté, ... Par conséquent, cette étude examinera l'impact de ce paramètre sur l'écoulement du ventilateur. Des mesures de vitesse ont été effectuées avec des ventilateur de trois masses différentes: 300 g, 400 g et 500 g, tandis que les conditions de chauffage ont été maintenues constantes avec la température du four de 285°C et le temps de chauffage dans le four de 12 minutes. En changeant la position de la sonde du tube de Pitot par le système DANTEC 3D pour balayer la direction (z) et la direction du rayon (r/R). La figure 4.9. montre la vitesse de l'écoulement d'air en aval du ventilateur PEL-500-285-12 pour trois vitesses de rotation: (a) - 1000 tr/min, (b) - 1500 tr/min et (c) - 2000 tr/min

La vitesse axiale est mesurée pour les trois ventilateurs à des positions axiales allant de 0 à 240 mm. Les contours du champ de vitesse axiale  $V_z(r, z)$  sont montrés sur la figure 4.10. On voit que la vitesse en aval des trois ventilateurs a presque les mêmes valeurs, pour un débit de refoulement  $Q_v$  fixé, ces valeurs sont également présentées dans le tableau 4.4. Cela montre que l'influence de la masse est négligeable sur la vitesse de l'écoulement d'air.

Et pourtant une différence de rendement entre les trois ventilateur pour un débit  $Q_v = 0.782 \text{ m}^3/\text{s}$  correspondant à  $\phi = 0.207$  est observée, soit: 46,47% pour le ventilateur PEL-300-285-12; 46,30% pour le ventilateur PEL-400-285-12 et 43,77% pour le ventilateur PEL-500-285-12. Avec la production en grande quantité, les économies de matière et la garantie des propriétés mécaniques de la pièce finale méritent d'être considérées. Surtout lorsqu'il est nécessaire d'utiliser toutes sortes de matériaux à coût élevé. Par conséquent, cela devrait être examiné en détail en affinant l'étude par une analyse des propriétés physiques et chimiques des matériaux. D'autre part, il est également nécessaire d'expliquer pourquoi il y a cette différence significative du rendement.

TABLEAU 4.4 – Comparaison des performances aérodynamiques de 3 ventilateurs de masses: 300g, 400g et 500g

Code ventilateur	Masse $m$ (g)	$Q_v(m^3/s)$	$\Delta P$ (Pa)	$\phi$	$\psi$
PEL-300-285-12	300	$0.782 \pm 0.05$	$32,45 \pm 0.6$	$0.207 \pm 0.005$	$0.038 \pm 0.003$
PEL-400-285-12	400	$0.782 \pm 0.05$	$33,13 \pm 0.6$	$0.207 \pm 0.005$	$0.038 \pm 0.003$
PEL-500-285-12	500	$0.785 \pm 0.05$	$33,40 \pm 0.6$	$0.208 \pm 0.005$	$0.039 \pm 0.003$

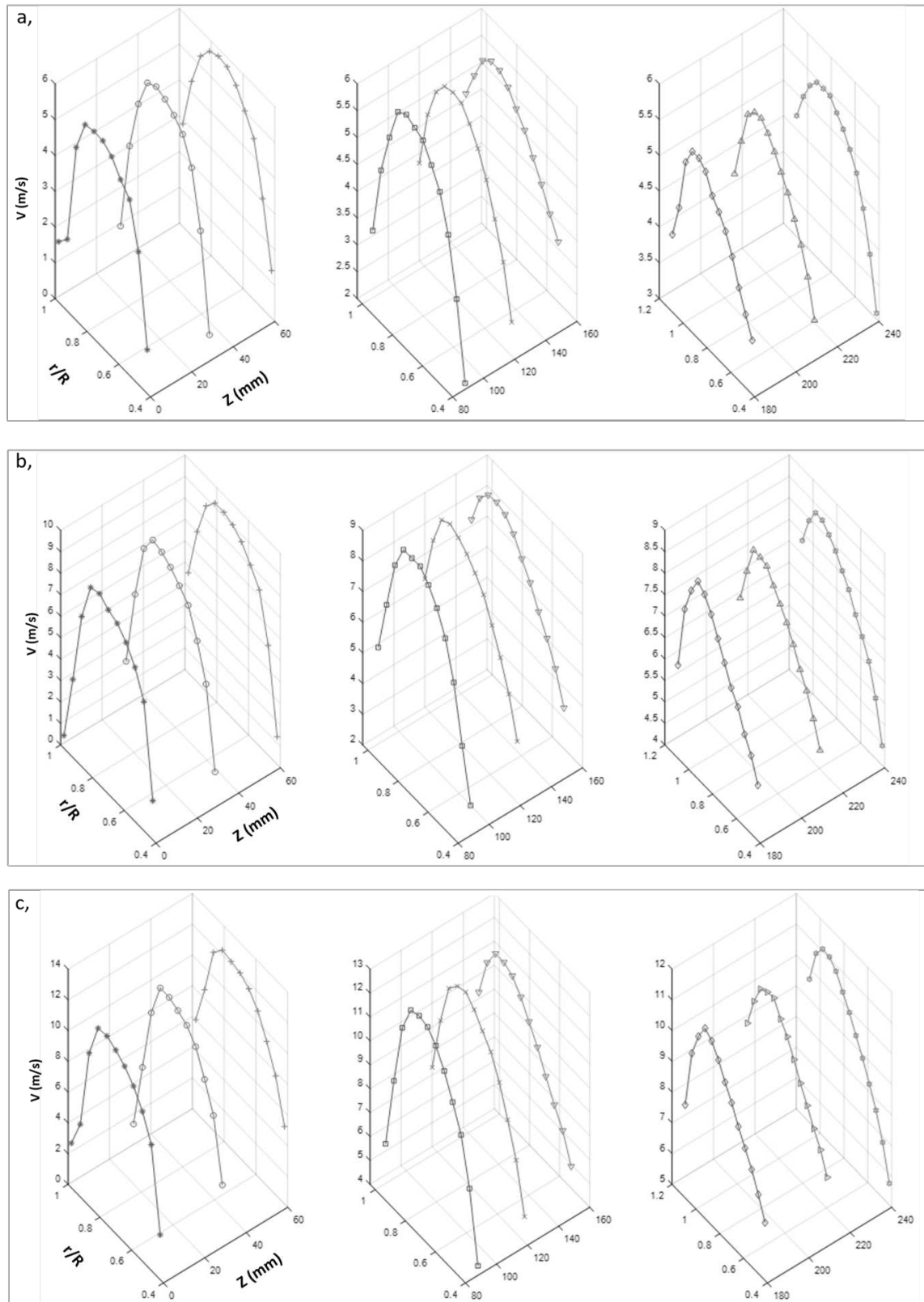


FIGURE 4.9 – Vitesse axiale de l'écoulement d'air en aval du ventilateur PEL-500-285-12 pour trois vitesses de rotation: (a) - 1000 tr/min, (b) - 1500 tr/min et (c) - 2000 tr/min

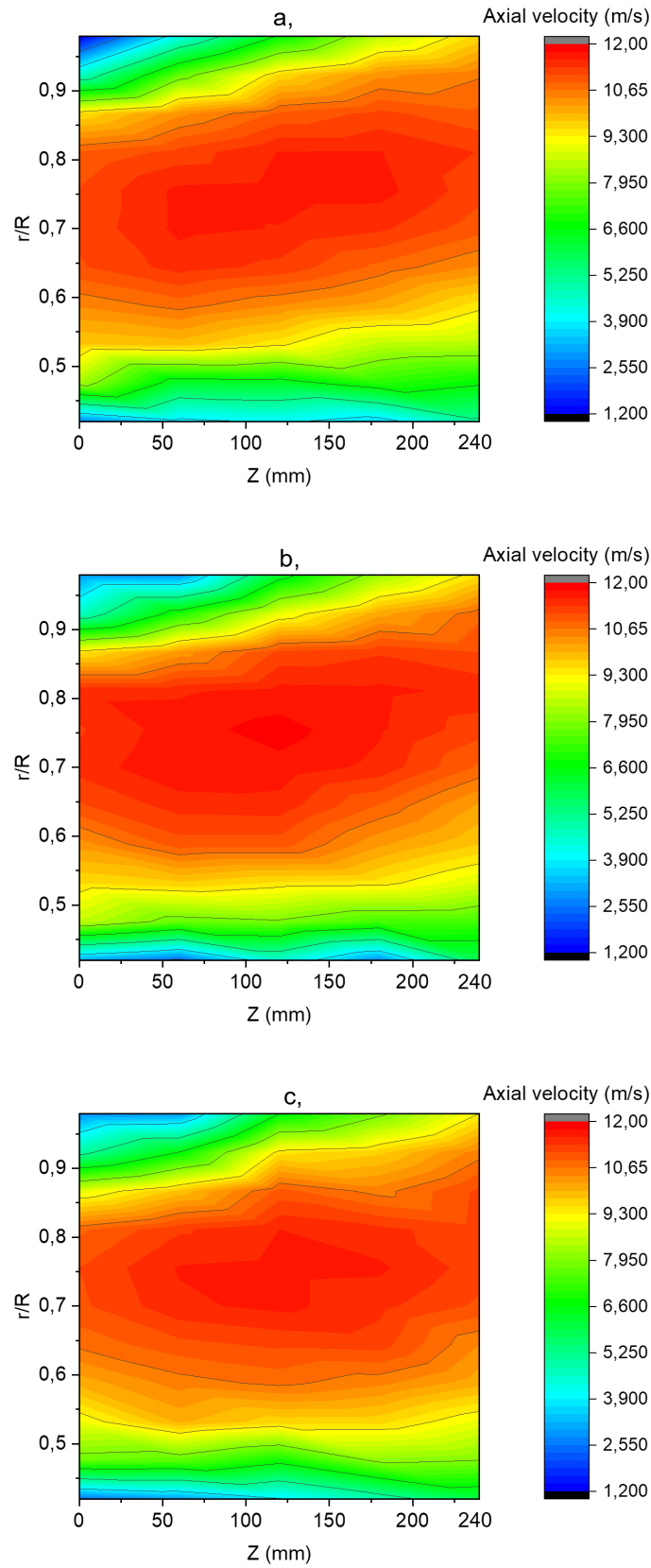


FIGURE 4.10 – Comparaison de la vitesse axiale des ventilateurs à 2000 tr/min: pour les ventilateurs PEL-300-285-12 (a); PEL-400-285-12 (b); PEL-500-285-12 (c), avec une température du four à  $285^{\circ}\text{C}$  et un temps de chauffage de 12 minutes

## 4.3 Répétabilité du procédé de fabrication et des mesures

Dans le processus de résolution de problèmes expérimentaux, la précision et la stabilité des résultats de mesure jouent un rôle important. Cependant, un autre facteur tout aussi important est la répétabilité du procédé de fabrication et la répétabilité de la mesure. De nombreux facteurs influencent la répétabilité des mesures et du procédé de fabrication :

- Pendant le processus de mesure: qualité des équipements - machines, outils de mesure, méthodes de collecte et de traitement des données ...
- Dans le procédé de fabrication: machine de rotomoulage, méthode de remplissage du moule, vitesse de rotation du moteur d'entraînement, processus de refroidissement, processus de chauffage ...

Dans cette étude, 36 ventilateurs ont été fabriqués en utilisant la méthode de rotomoulage. La fiabilité des résultats de mesure et la stabilité du système de rotomoulage jouent un rôle important dans l'évaluation de l'influence des conditions de fabrication sur les paramètres aérodynamiques des ventilateurs résultants. Par conséquent, le but de cette section est de confirmer les résultats des paramètres dynamiques présentés dans la section [4.1](#)

### 4.3.1 Répétabilité de la fabrication des ventilateurs en utilisant la méthode de rotomoulage

Cette section traite de la répétabilité du procédé de fabrication de ventilateur. Plus précisément, avec le même ensemble de paramètres fixes (masse de poudre, temps et température dans le four, temps de refroidissement), ce procédé crée-t-il la même roue? Pour répondre à ce problème, le procédé de fabrication du ventilateur est envisagé sous trois aspects :

- Paramètres dimensionnels des ventilateurs
- État de surface
- L'aérodynamique des ventilateurs obtenus

#### Métrologie dimensionnels des ventilateurs :

En sélectionnant un ventilateur avec un ensemble fixe de paramètres de fabrication, par exemple : PEL-300-285-20, 3 ventilateurs sont créés par rotomoulage avec 300g de poudre un temps de chauffage dans le four de 20 minutes, une température du four de  $285^{\circ}\text{C}$ , et un temps de refroidissement de 20 minutes. Par cette approche, nous aurons

une meilleure vue de la répétabilité du procédé. Par conséquent, des facteurs tels que la couleur du ventilateur, le retrait du matériau, les dimensions géométriques des pales ... sont analysés. Nous veillons à ce que les éléments du procédé de fabrication soient identiques : les réglages, la méthode de remplissage du moule, la vitesse de rotation des deux axes de la rotomouleuse, la méthode de refroidissement ...

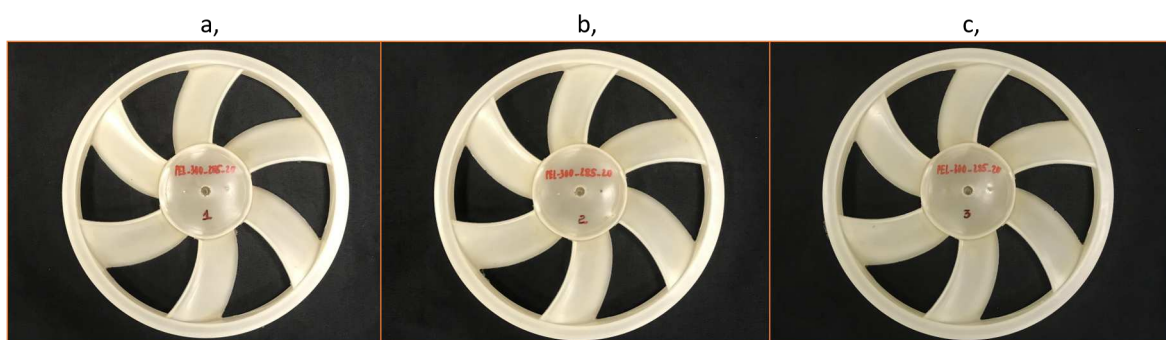


FIGURE 4.11 – Trois ventilateurs (a), (b), (c) sont fabriqués avec les mêmes conditions: PEL-300-285-20

En utilisant une méthode de scanner 3D, une analyse de la géométrie de la roue est effectuée. Les différents paramètres géométriques du profil des pales: la longueur de la corde, l'épaisseur de la pale, l'angle de calage en fonction du rayon. Les valeurs sont moyennées sur 6 pales. Chaque roue est examinée en 11 sections, correspondant aux rayons de  $r_1$ - $r_{11}$  sur la figure 4.12, les ventilateurs (a) et (b) ont été comparés. Les courbes résultantes ont tendance à être identiques pour la longueur de corde, l'angle de calage et l'épaisseur maximale de la pale. Du fait de l'effet de retrait du matériau, on voit que la valeur maximale de celui-ci est observé en position  $r_8 = 142,23$  mm et est de 1,38 mm. Le rétrécissement du matériau diminue dans les zones proches du centre et de la virole. Les résultats ont montré qu'aucune différence significative n'a été observée. D'un point de vue géométrique, le procédé de fabrication est répétable.

#### Microstructure de la surface du ventilateur:

Sur la figure 4.11, on constate que les couleurs obtenues pour les 3 ventilateurs sont identiques. Il n'y a pas de différence notable. Pour une meilleure analyse de la roue, des observations microscopiques, à l'aide d'un microscope électronique à balayage «HITA-CHI 4800» sont réalisées pour étudier la microstructure à la surface des matériaux. La figure 4.13 montre des images de l'état de surface du polymère, observé au microscope à une résolution de  $200 \mu\text{m}$ . Cette observation est indiquée pour les ventilateurs (a) et (b). Là encore, il n'y a pas de différence notable dans les états de surface des deux ventilateurs, ce qui indique la reproductibilité du processus de fabrication.

### L'aérodynamique des ventilateurs:

Ces trois ventilateurs, obtenus par ce procédé, ont à leur tour été testés sur le banc d'essai standard 5801. Les mesures ont été effectuées à une vitesse de rotation de 2000 tr/min. Les résultats sont présentés sur la figure 4.14, en montrant le coefficient  $\psi$  et le rendement en fonction du coefficient  $\phi$ . A partir de ce résultat, on voit que les résultats de mesure sont quasi identiques (tableau 4.5). Ceci est destiné à aider à éliminer tout doute sur le procédé de rotomoulage. La répétabilité de cette procédure a été confirmée.

TABLEAU 4.5 – Résultats aérodynamiques 3 ventilateurs sont fabriqués avec les mêmes conditions PEL-300-285-20: V(a), V(b), V(c)

PEL-300-285-20	$\psi$	$\phi$	$\eta_{max}$ [%]
a	$0.1379 \pm 0.003$	$0.1710 \pm 0.005$	$45.93 \pm 0.5$
b	$0.1374 \pm 0.003$	$0.1717 \pm 0.005$	$46.62 \pm 0.5$
c	$0.1382 \pm 0.003$	$0.1701 \pm 0.005$	$46.35 \pm 0.5$

### 4.3.2 Répétabilité des résultats de mesure sur le banc d'essais

D'autre part, pour assurer la cohérence et la fiabilité des résultats de mesure. Une étude de répétabilité de la mesure des paramètres aérodynamique du ventilateur sur le banc d'essai a été réalisée. Nous vérifions que les tests donnent des résultats reproductibles. Un code de ventilateur aléatoire est choisi: PEL-400-250-12, trois mesures du coefficient de pression statique  $\psi$ , et du rendement en fonction du facteur d'écoulement  $\phi$  sont prises. Le processus d'inspection est effectué également 3 fois et le processus de mesure est garanti : entre chaque mesure, le ventilateur est démonté, remonté et mesuré à des jours différents.

La figure 4.15 montre les résultats des tests montrant des caractéristiques aérodynamiques parfaitement reproductible par le procédé de rotomoulage. La précision des appareils de mesure du banc d'essai pour l'incertitude relative de performance est de 0,5%. Dans les trois bancs d'essai, nous avons constaté que l'écart de la performance de mesure du rendement par rapport à la performance moyenne était  $|\eta - \bar{\eta}|$ . Nous voyons que l'écart est très faible et tout est en dessous de la barre d'incertitude. Cela garantit la fiabilité des résultats obtenus.

Nous nous intéressons à présent à la dispersion des valeurs que nous obtenons. Dans cette étude, nous abordons la loi de distribution gaussienne standard. Chaque courbe est caractérisée par 11 points de mesure, ce qui équivaut à 11 diaphragmes (figure 3.7). Chaque point de mesure est défini comme la moyenne, il est donc nécessaire de vérifier la dispersion des valeurs à chaque point de mesure. Cependant, pour observer facilement le domaine de la distribution des valeurs mesurées au point d'observation, on ne considère les valeurs obtenues que pour un rendement maximal, correspondant

au diaphragme  $\Phi = 267$  mm.

Dans de nombreux cas, les tests sur des sujets et dans des conditions différentes ne donnent souvent pas les mêmes résultats. Cela est dû aux erreurs aléatoires de chaque processus, nous ne pouvons pas contrôler complètement tous les facteurs qui affectent les résultats des tests. Par conséquent, pour contrôler ces erreurs, le concept de précision doit être utilisé (figure 4.16). La précision dépend uniquement de l'erreur aléatoire et ne se rapporte pas aux valeurs réelles. La précision est un concept qualitatif et s'exprime quantitativement par l'écart type ou le coefficient de variation. Plus la précision est faible, plus l'écart type ou le coefficient de variation est élevé. La précision peut être classée dans les trois catégories suivantes :

- Répétabilité
- Précision intermédiaire
- Reproductibilité

Pour chaque point de mesure, des échantillons sont enregistrés en 180s, avec une fréquence d'échantillonnage de 1000Hz (figure 4.17). On voit que cette valeur est relativement stable. Les valeurs d'échantillons mesurées sont distribuées symétriquement autour de la moyenne. D'autre part, pour confirmer davantage la distribution et faire confiance à ce domaine de valeur, nous considérons la distribution de probabilité des valeurs selon des critères gaussiens. L'équation 4.3 permet de définir le domaine de distribution des valeurs mesurées dans la plage  $[-\sigma; +\sigma]$ ,  $[-2\sigma; +2\sigma]$ . Les résultats montrent que la distribution probable de la valeur mesurée dans la plage  $[-\sigma; +\sigma]$  est de 69,4%, et dans la plage  $[-2\sigma; +2\sigma]$ , elle représente 95,24% (figure 4.18)

$$f(x) = \frac{1}{\alpha \cdot \sqrt{2\pi}} \cdot e^{\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (4.3)$$

TABLEAU 4.6 – Résultats des tests de répétabilité du ventilateur PEL-400-250-12 avec 3 tests

PEL-400-250-12	$\psi$	$\phi$	$\eta_{max}$ [%]
Test1	$0.1383 \pm 0.003$	$0.1721 \pm 0.005$	$43.13 \pm 0.5$
Test2	$0.1374 \pm 0.003$	$0.6960 \pm 0.005$	$42.73 \pm 0.5$
Test3	$0.1382 \pm 0.003$	$0.1716 \pm 0.005$	$43.14 \pm 0.5$

### 4.3.3 Conclusion

Pour garantir la précision et la fiabilité des résultats de la mesure, un plan de test est réalisé avec deux contenus principaux:

- Reproductibilité des résultats de mesure sur le banc d'essai: un ventilateur aléatoire de la série de ventilateurs fabriqués est sélectionné. Le nombre de mesures est effectué au moins 3 fois, après chaque mesure le ventilateur sera déposé et remonté. De plus, ces 3 mesures ont également été mesurées à différentes heures et dates.

- Répétabilité du processus de fabrication du ventilateur: 3 ventilateurs sont fabriqués avec les mêmes paramètres d'installation, et à condition que les pales soient fabriquées à des moments différents, à des dates différentes. Les mesures dynamiques des 3 ventilateurs ont été effectuées sur la même banc d'essai.

Les dimensions géométriques du ventilateur sont contrôlées par la méthode du scanner 3D, l'état de surface des pales est vérifié par Microscopie et l'aérodynamique du ventilateur est réalisée sur le banc d'essai. Les résultats montrent que: la répétabilité du procédé est parfaite, les résultats garantissent la fiabilité dans les limites de mesure des équipements sur la machine rotomoulage et sur le banc d'essai. De plus, ce résultat confirme également l'adaptabilité du procédé de remplissage de poudre avec ce moule.



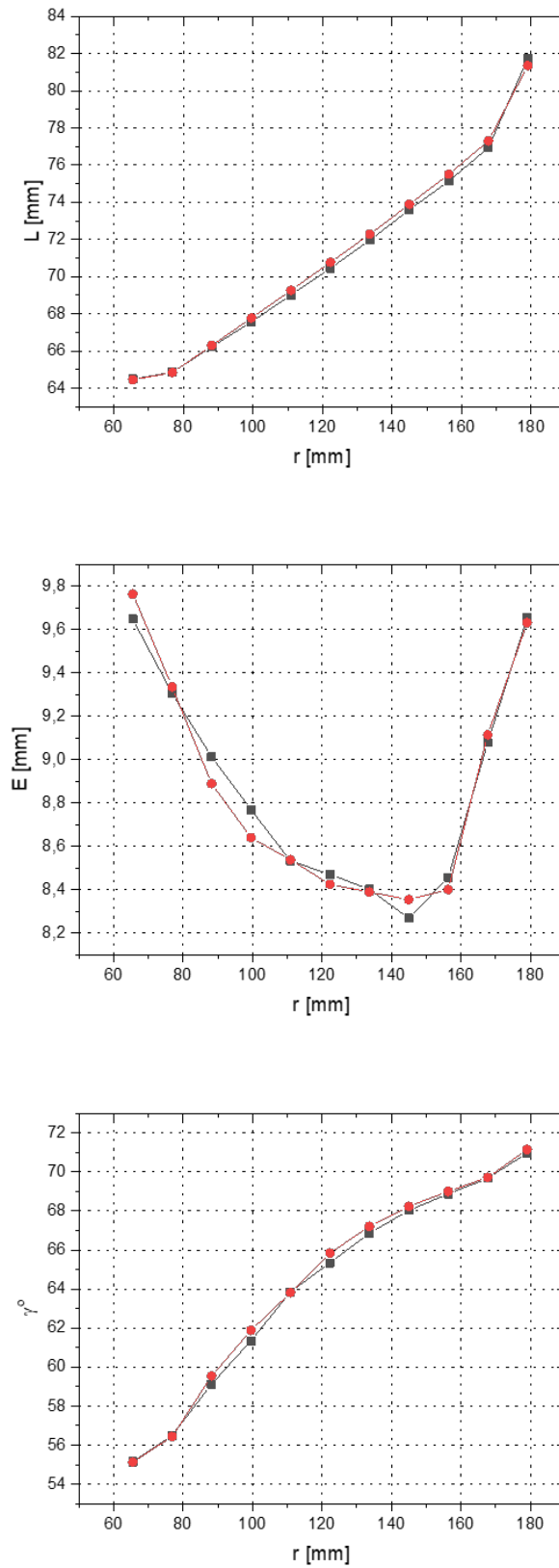


FIGURE 4.12 – Longueur de corde  $L$  [mm], épaisseur de pale  $E$  [mm], angle de décalage  $\gamma$  [°] et en fonction du rayon  $r$  [mm] pour le ventilateur PEL-300-285-20: V(a) -●-; V(b) -■-

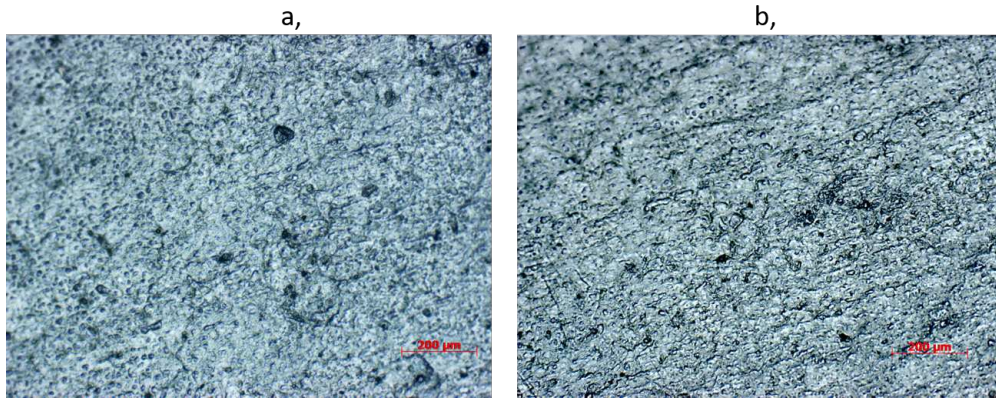


FIGURE 4.13 – Microstructure de la surface du ventilateur PEL-300-285-20 V(a) et V(b)

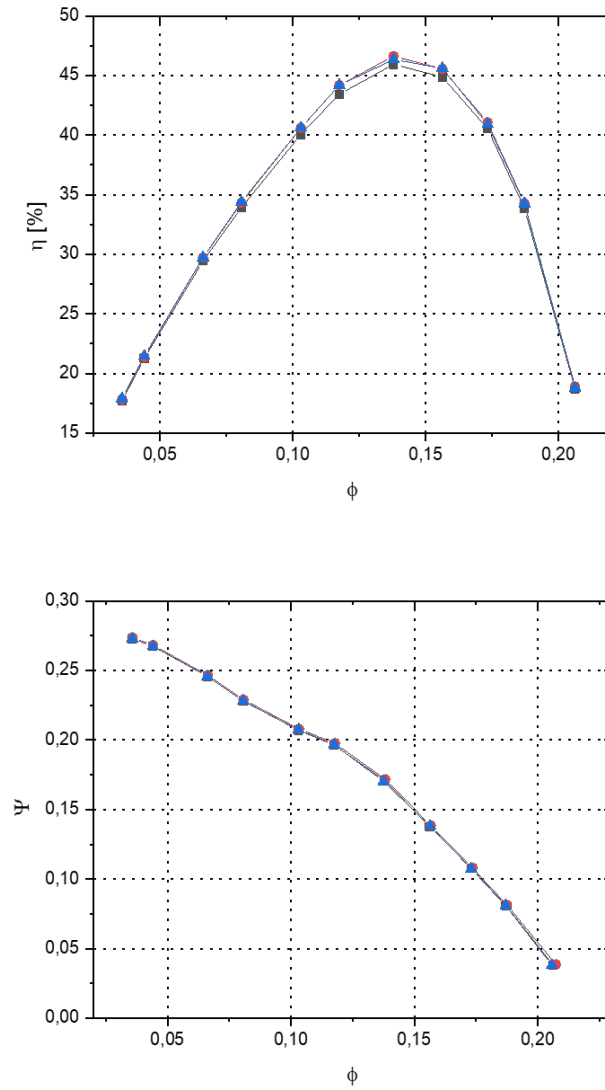


FIGURE 4.14 – Rendement  $\eta$  et coefficient de pression statique  $\psi$  en fonction du coefficient de débit  $\phi$  pour trois mêmes ventilateurs PEL-300-285-20: V(a) -■-; V(b) -●-; V(c) -▲-

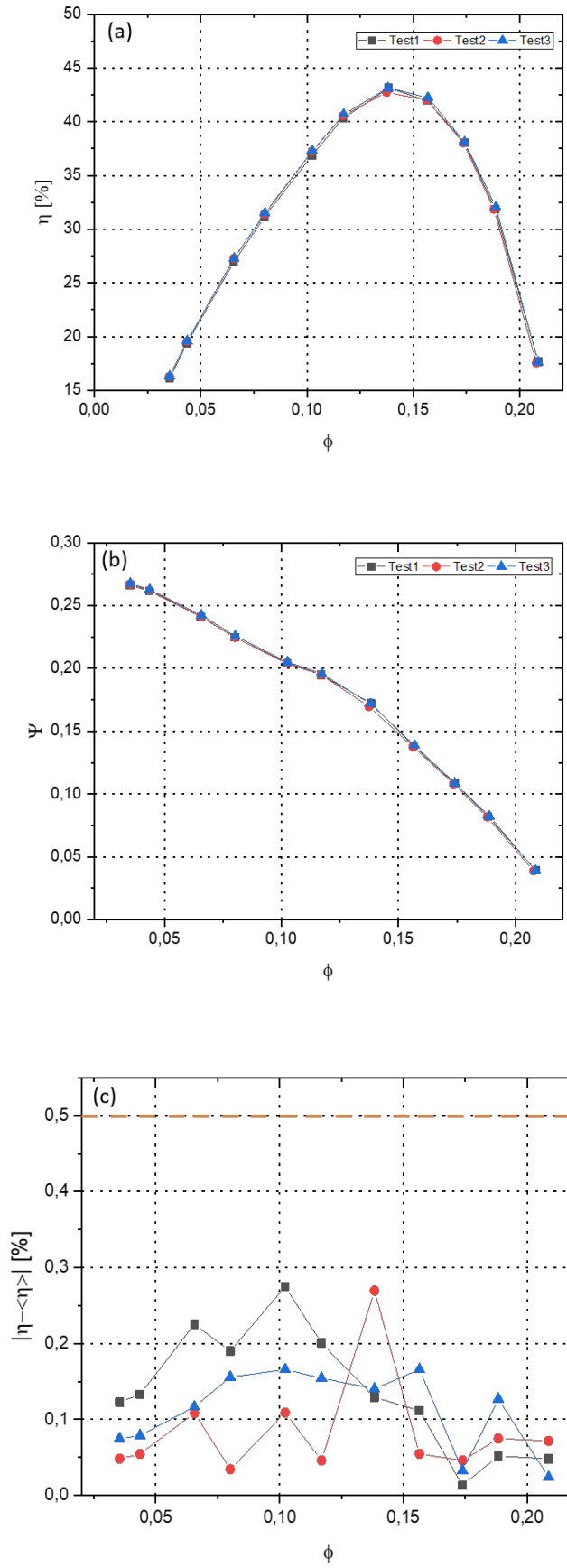


FIGURE 4.15 – Coefficient de pression statique  $\psi$ , rendement  $\eta$  et  $|\eta - \langle \eta \rangle|$  en fonction du coefficient de débit  $\phi$  pour PEL-400-250-12: essai1 -■-; essai2 -●-; essai3 -▲-

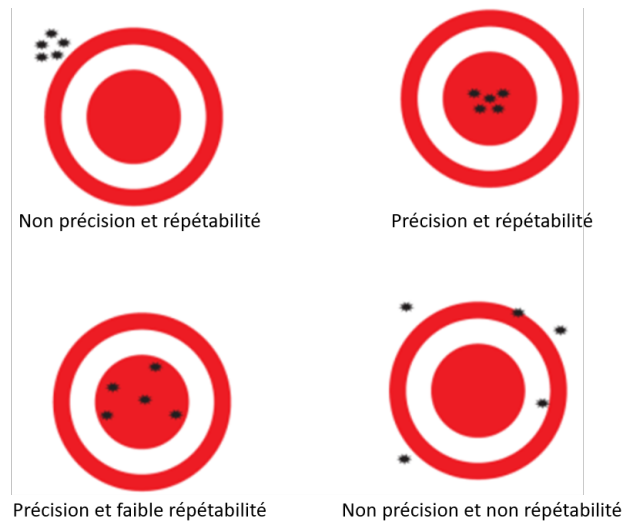


FIGURE 4.16 – Concept de précision et de répétabilité

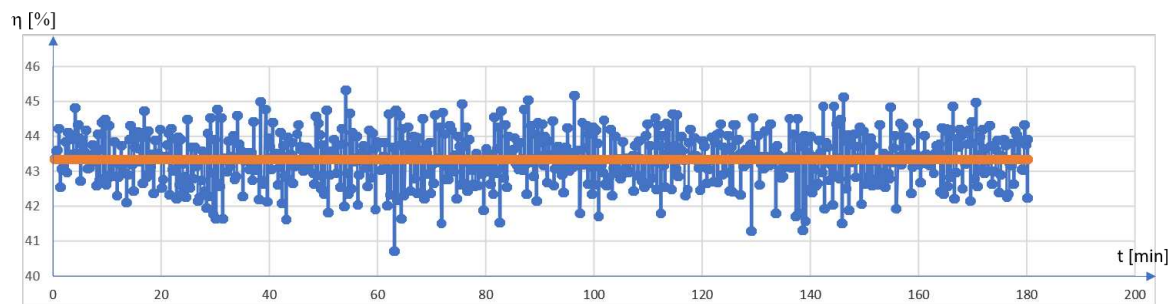


FIGURE 4.17 – Répartition des valeurs de rendement échantillons dans le temps

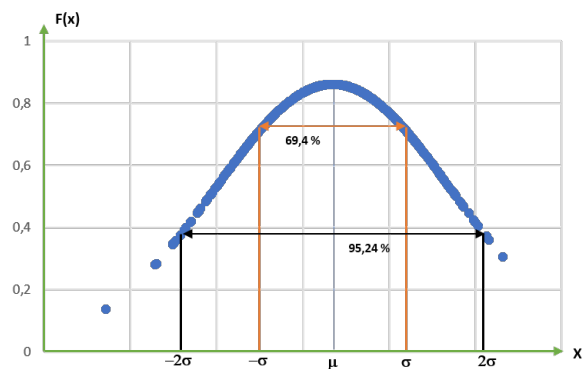


FIGURE 4.18 – Densité de probabilité de la loi normale

## 4.4 Caractérisation du ventilateur obtenu par rotomoulage

### 4.4.1 Observation globale

Les photographies des ventilateurs sont présentées sur la figure 4.19. Elles sont regroupées par masse de poudre utilisée: (a) - 300 g, (b) - 400 g, (c) - 500 g et (d) - 600 g, par exemple: 9 ventilateurs sont fabriqués avec la masse de 500g (tableau 4.7) . En observant ces photographies, le matériau semble être uniformément réparti pour des temps de chauffage inférieurs à 15 minutes et des températures de four inférieures à 285°C. La poudre semble donc fondre complètement. Cela montre une bonne adaptation du matériau en mouvement dans le moule, et valide également la méthode de remplissage du moule. De plus, la différence de couleur de la pièce finale est également très perceptible. Les changements de couleur proviennent de phénomènes chimiques qui se produisent lors du rotomoulage. Nous avons constaté que, lorsque la température de chauffage était supérieure à 285°C, pendant une période de 15 minutes, le ventilateur devenait jaune et avait une odeur "piquante", en particulier avec une masse de 300 g (figure 4.19a). Ces phénomènes s'expliquent par l'oxydation du matériau. Selon Lucas [9], l'oxydation du polymère peut produire de l'hydroperoxyde qui change la couleur du ventilateur. La dégradation du polyéthylène commence sur la surface intérieure du ventilateur en raison de la combinaison de la température et de l'oxygène disponible. Le ventilateur devient moins ductile, la résistance et la rigidité augmentent, le ventilateur devient donc plus cassant. Une diminution significative du module de Young et de la ductilité a été rapportée dans ces cas (chapitre 5).

TABLEAU 4.7 – Caractéristiques des ventilateurs rotomoulés utilisant 500 g de poudre de polymère avec un temps de refroidissement par air de 20 min.

Code ventilateur	masse $m$ (g)	$T_0$ (°C)	$\Delta t_0$ (min)	$\Delta t_r$ (min)
PEL-500-250-12	500	250	12	20
PEL-500-250-15	500	250	15	20
PEL-500-250-20	500	250	20	20
PEL-500-285-12	500	285	12	20
PEL-500-285-15	500	285	15	20
PEL-500-285-20	500	285	20	20
PEL-500-330-12	500	330	12	20
PEL-500-330-15	500	330	15	20
PEL-500-330-20	500	330	20	20

En revanche avec une masse de 600g, des stries marron foncé peuvent être observées sur les 6 pales (figure 4.20). On voit que le matériau n'est pas uniformément réparti, ce qui entraîne une épaisseur de pale différente. Lors de l'étape de chauffage, la matière fondue peut être mal répartie dans le moule. De plus, une trop grande concentration

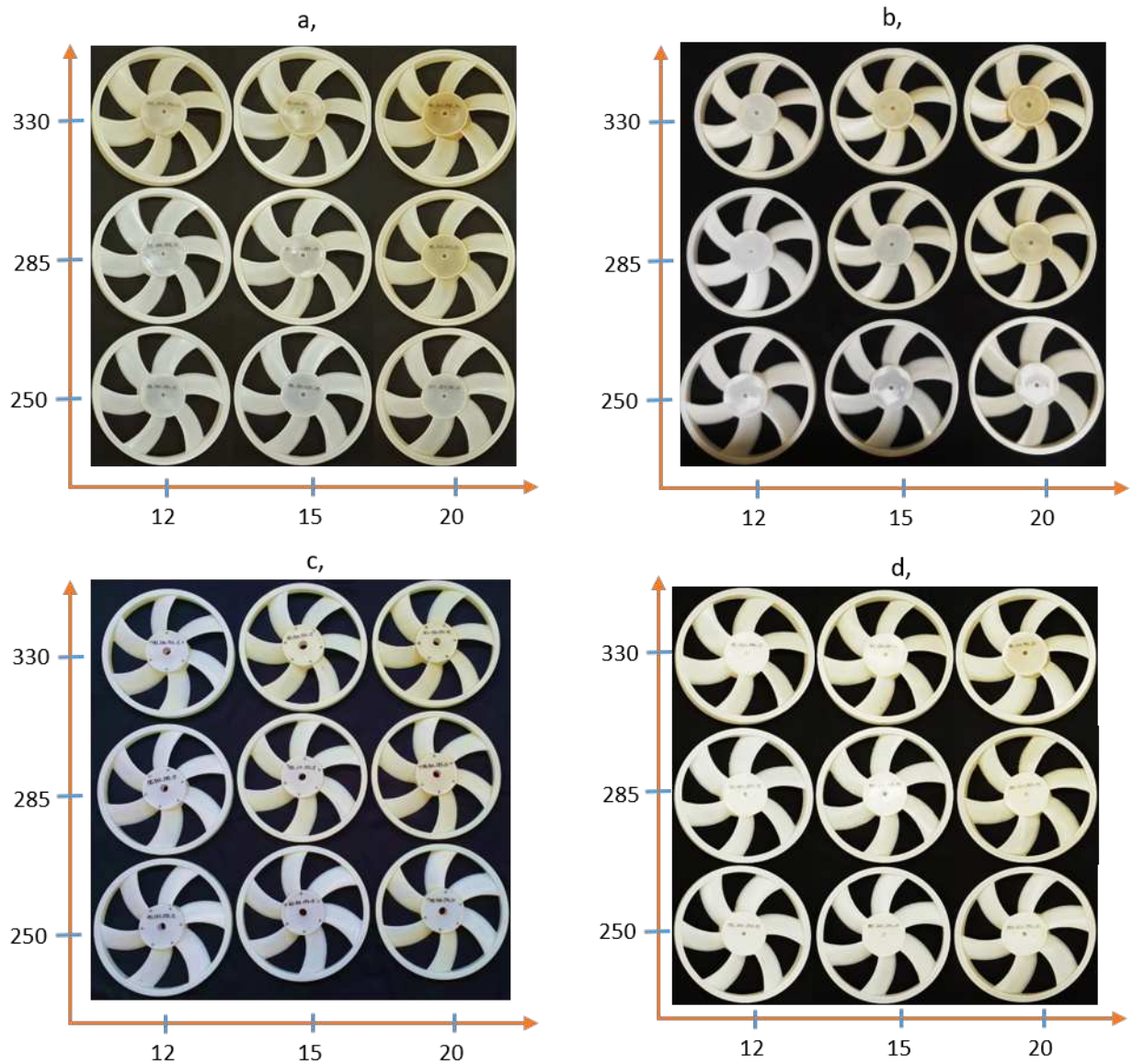


FIGURE 4.19 – Photographies de ventilateurs rotomoulés pour différentes masses: (a)-300 g, (b)-400 g, (c)-500 g et (d)-600 g de poudre de polymère en fonction des températures du four  $T_0$  (°C) , sur l'axe vertical) et le temps de chauffe ( $\Delta t_0$  en minutes, sur l'axe horizontal)

de poudre au centre du ventilateur peut également être à l'origine de ce phénomène. Ainsi, dans ce contexte précis, le ventilateur obtenu avec une masse de poudre de 500g semble être la limite maximale pour la fabrication de ventilateurs par le procédé de rotomoulage, pour le moule utilisé.

Dans cette première approche qualitative, on note qu'une température de 285°C semble être plus adaptée au processus de fabrication, puisque le ventilateur formé ne semble pas être oxydée. Par la suite, pour une approche quantitative, nous utiliserons des mesures dimensionnelles pour caractériser la géométrie du ventilateur. Enfin, nous analyserons l'efficacité aérodynamique de la roue pour comprendre comment les paramètres de fabrication affectent les performances globales du ventilateur.



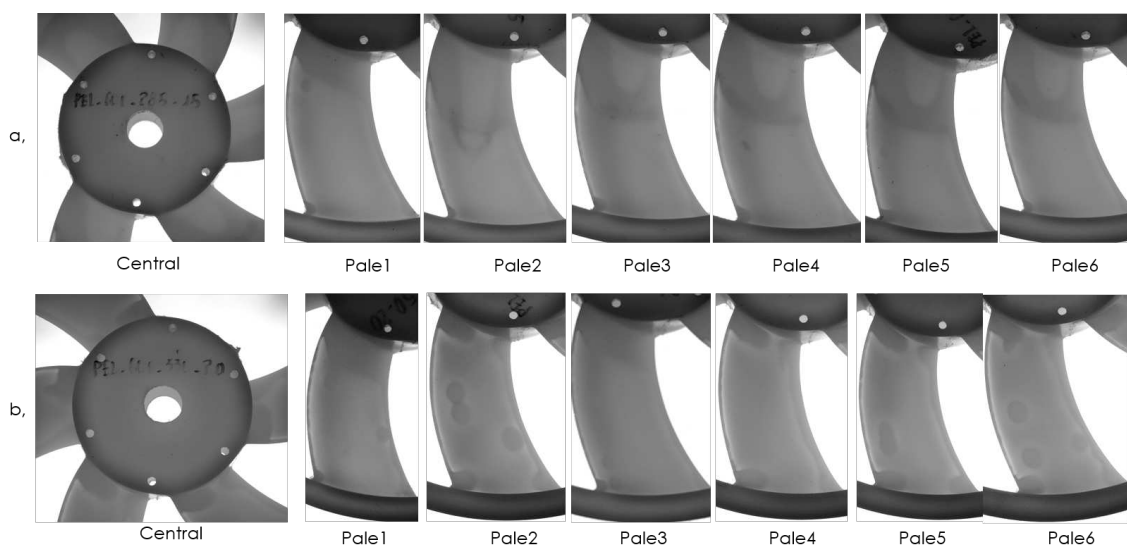


FIGURE 4.20 – Défauts sur les ventilateurs avec une masse de poudre de 600g: (a) - PEL-600-285-15 et (b) - PEL-600-330-20

#### 4.4.2 Observation par microscopie

Dans cette étude, l'analyse des surfaces des roues obtenues par le procédé de rotomoulage présentée. La structure de surface de la roue résultante reflète les facteurs choisis pour la fabrication tels que: la température ou le temps dans le four. Ces conditions affecteront la qualité de la pièce finale telles que la rugosité de surface, les bulles d'air, les propriétés du matériau ... De plus, la vitesse de refroidissement peut également affecter les propriétés du produit final ainsi que l'aspect du matériau. Dans le cas des polymères semi-cristallins, cela a plus d'effet sur la cristallisation et la vitesse de croissance des sphérulites et leur taille. Cependant, certains polymères semi-cristallins tels que le polyéthylène maintiennent des taux de cristallisation relativement élevés. Par conséquent, l'effet de la vitesse de refroidissement est moindre.

La figure 4.21 montre la structure de la surface observée au microscope optique avec un objectif d'un grandissement et sur 6 pales d'un ventilateur. Les résultats ont montré une uniformité sur les 6 pales, aucune différence notable. Ceci est également obtenu avec les roues PEL-300-285-20 et PEL-600-285-12.

La figure 4.22 présente les résultats de la comparaison de 3 ventilateurs. Il n'y a pas de différences significatives dans la microstructure de surface des 3 ventilateurs. Cependant, avec des différences de conditions de procédé telles que la température et le temps de cuisson dans le four, la couleur du ventilateur change sensiblement, en particulier pour les ventilateurs d'une masse de 300g. Un changement de couleur peut indiquer une oxydation du matériau. Une analyse FTIR est nécessaire pour déterminer cette cause.

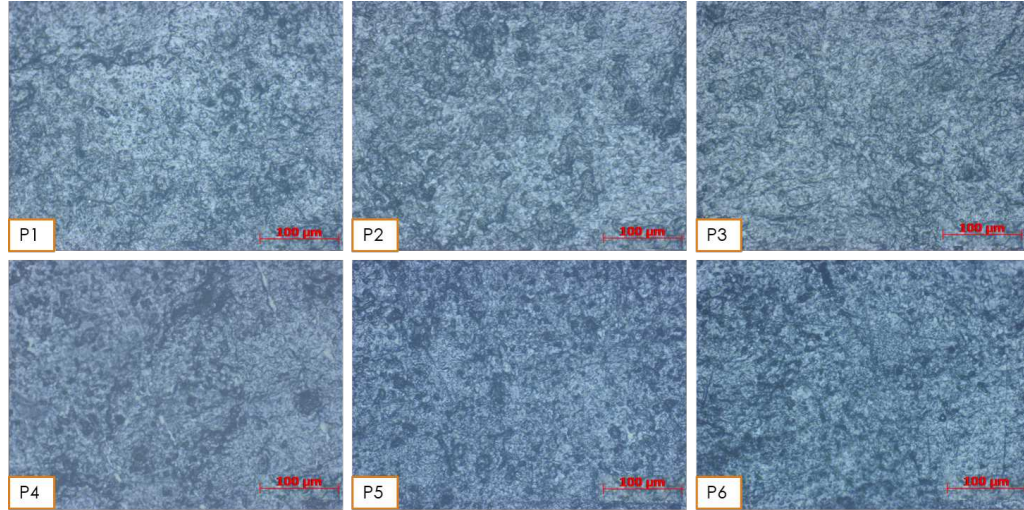


FIGURE 4.21 – Observation au microscopie d'échantillons prélevés sur les pales (P1 à P6) du ventilateur PEL-500-250-12

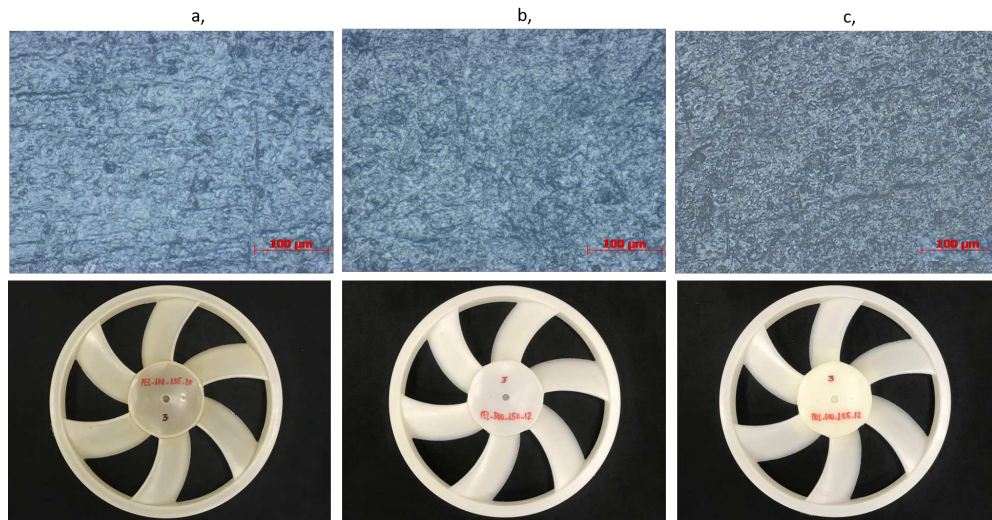


FIGURE 4.22 – Comparaison de la structure de surface de 3 ventilateurs sur une pale: (a - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12)

### 4.4.3 Conclusion

Avec différentes conditions de rotomoulage utilisées dans cette étude ( $\Delta t_0$ ,  $T_0$ ,  $m$ ). Les résultats obtenus à partir du procédé de rotomoulage montrent un changement significatif de la couleur des ventilateurs. Surtout lorsque la température  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$  et le temps dans le four  $\Delta t_0 \geq 15$  min, la couleur des ventilateurs devient plus jaune. Cela peut s'expliquer par l'oxydation du matériau. Pour le confirmer, des tests chimiques de ces ventilateurs sont nécessaires (voir chapitre 5). De plus, les résultats de la vérification de l'état de surface des hélices (PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12) par la méthode Microscope n'ont pas montré de différence.



## 4.5 Caractérisation géométrique des pales de ventilateur par la méthode du scanner 3D

### 4.5.1 Comparaison du ventilateur PEL-500-250-12 avec le modèle CAO

Lors de la fabrication, une fois la poudre fondue, le matériau effectue une transition entre les phases liquide lors du chauffage et solide lors du refroidissement. Ce phénomène peut s'accompagner de divers effets tels que le retrait ou l'oxydation du matériau, comme il est expliqué par Crawford [10]. En conséquence, la forme extérieure des pales pourrait être différente de celle attendue, ce qui pourrait entraîner des changements importants du comportement aérodynamique du ventilateur. La géométrie d'une sélection de ventilateurs a été mesurée avec un scanner 3D et comparée à la conception CAO (conception assistée par ordinateur). Afin de ne pas rendre la lecture des résultats trop confuse, 3 ventilateurs ont été soigneusement choisis parmi les 36 cas pour montrer l'influence des paramètres de fabrication sur la géométrie obtenue:

★ PEL - 300 - 285 - 20; PEL - 500 - 250 - 12 et PEL - 600 - 285 - 12

Le choix de ces trois ventilateurs correspond, respectivement, au ventilateur avec le rendement aérodynamique le plus élevé, un ventilateur de rendement moyen et le ventilateur présentant le rendement le plus faible.

Position des sections et caractérisation géométrique d'une pale (figure 4.23), les résultats de l'analyse ont montré que sur la surface de contact entre le matériau et le moule, il y a un retrait lors du processus de refroidissement. Sur la figure 4.24, examinée avec le ventilateur PEL-500-250-12, nous voyons que les courbes obtenues avec 6 pales (la corde, l'épaisseur relative, l'angle de calage, respectivement) ont tendance à être similaires. L'épaisseur de la pale est réduite avec la position en section ( $r_1$ - $r_{11}$ ). Le plus gros retrait de matériau se produit au milieu des pales et diminue progressivement. Ceci peut s'expliquer par la présence de la partie centrale ( $r_1$ ) et de la partie virole du ventilateur ( $r_{11}$ ). La plus grande différence d'épaisseur apparue sur la pale (3) et la pale (6) à  $r_8 = 142,23$  mm est de 0,47 mm (environ 5,2%). Les résultats ont montré que la géométrie générale du ventilateur obtenue par le procédé de rotomoulage est relativement homogène. Cela montre l'adaptation du matériau dans le moule.

Pour une vue plus claire, pour évaluer l'effet du rotomoulage sur la géométrie du ventilateur, nous faisons une comparaison de ce ventilateur avec le modèle de CAO du moule. Les paramètres géométriques de la grille d'aubes mesurés pour le ventilateur PEL-500-250-12 sont comparés à ceux du moule CAO sur la figure 4.25. Les valeurs moyennes des 6 pales ont été utilisées pour la comparaison. On peut remarquer que

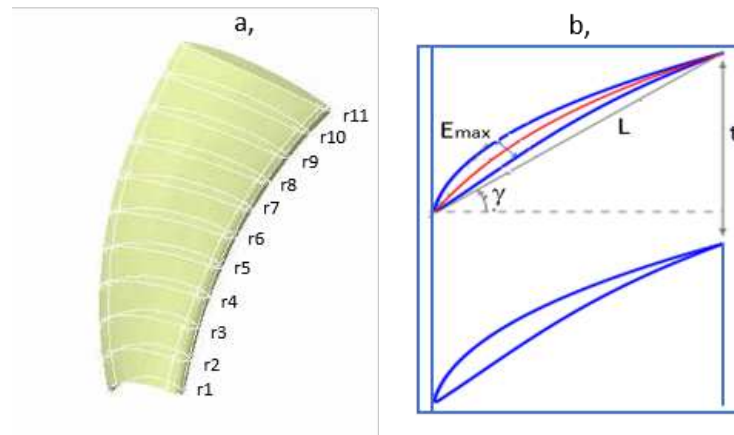


FIGURE 4.23 – (a) - Position des 11 sections transversales dans la direction du rayon (b) - dimensions géométriques d'une section

le profil des angles de calage du ventilateur réellement fabriqué est cohérent avec le CAO du moule. Cependant, tant l'épaisseur relative que la corde sont plus petites que la dimension CAO du moule. Le retrait du matériau est lié à l'épaisseur de la pale obtenue par procédé du rotomoulage. La diminution maximale de la géométrie du ventilateur rotomoulé par rapport au moule est observée à la position  $r_8 = 142,23$  mm et est de 1,3 mm (environ 13,8%). En outre, le retrait affecte la longueur de la corde. Ce comportement est similaire à l'évolution de l'épaisseur des pales. La plus grande diminution de la longueur de la corde observée à la position  $r_8$  est de 3,58 mm et diminue progressivement aux positions proches du centre  $r_1$  et de la virole  $r_{11}$  (table 4.8)

TABLEAU 4.8 – Réduction moyenne de la longueur de la corde du ventilateur PEL-500-250-12 par rapport au modèle CAO du moule, pour 11 sections radiales d'une pale

$r_1$ (mm)	$r_2$ (mm)	$r_3$ (mm)	$r_4$ (mm)	$r_5$ (mm)	$r_6$ (mm)	$r_7$ (mm)	$r_8$ (mm)	$r_9$ (mm)	$r_{10}$ (mm)	$r_{11}$ (mm)
2.15	2.85	2.96	3,06	3.25	3.36	3.51	3.58	3.45	3.02	2.81

#### 4.5.2 Comparaison des trois roues: PEL-300-285-20, PEL-500-250-12, PEL-600-285-12

D'après les résultats de performances aérodynamiques obtenus pour les 3 ventilateurs (tableau 4.1 et tableau 4.2), l'influence des conditions de fabrication du rotomoulage: masse, température, temps dans le four sur les paramètres géométriques des ventilateurs sont très importants. En effet, la variation de la dimension de la géométrie des pales peut provoquer une différence aérodynamique des ventilateurs résultants. Par la méthode du scanner 3D, il est possible de déterminer les paramètres géométriques du ventilateur, et ainsi d'avoir des explications pour les différences aérodynamiques. Comme le montre la figure 4.27, les résultats de comparaison des 3 ventilateurs

PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12 sont montrés en prenant la valeur moyenne des 6 pales. Les tendances des courbes obtenues pour la longueur de corde  $L$  (mm), l'épaisseur de l'aube  $E$  (mm) et l'angle de calage ( $^{\circ}C$ ) aux 11 sections sont presque similaires. Cependant, il existe également des différences notables. Sur la figure 4.27a, la valeur de la longueur de corde est présentée en fonction du rayon  $r$  (mm). Le retrait du matériau de la roue PEL-300-285-20 est inférieur à celui des pales de 500g et 600g. Plus précisément, le retrait maximum des ventilateurs par rapport à la CAO du moule, est 2,81 mm pour une masse de poudre de 300g; 3,58 mm pour une masse de 500g et 3,52 mm pour 600g en position  $r_8$ . Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs:

- Avec le bloc de roue PEL-300-285-20 (masse 300g), la poudre peut être facilement distribuée à l'intérieur du moule et à la surface du moule. Surtout dans les endroits étroits comme le bord d'attaque et le bord de fuite.
- Avec une masse de 300g, un temps plus court est suffisant pour fondre complètement la poudre. Par conséquent, le matériau fondu peut être facilement réparti uniformément sur la surface intérieure du moule.

En outre, selon la figure 4.27b, nous constatons que la modification de la masse pendant le procédé de rotomoulage qui affecte l'épaisseur des ventilateurs résultants. Plus précisément dans ce cas, l'épaisseur de la pièce finale est influencée par deux facteurs: la masse de poudre et le retrait du matériau. D'après les résultats du scanner 3D, il est montré qu'avec une masse de poudre de 500g, l'épaisseur moyenne des 6 pales obtenues est d'au moins 8,65 mm; correspondant au retrait maximal du matériau de 1,35 mm en position  $r_8$ . En outre, avec une masse de poudre de 300g et de 600g, l'épaisseur de pale minimale moyenne est respectivement de 8,24 mm et 8,35 mm. Le retrait maximal correspondant est de 1,76 mm et 1,65 mm. Ceci est expliqué par le matériau coincé (y compris la poudre Polyéthylène (PE) et la poudre fondues). Avec une masse de poudre de 600g, il semble que le matériau se concentre trop au centre et que le matériau ne se répartisse pas bien. En particulier aux positions de  $r_1$  à  $r_3$ . Cela réduit la distribution de matière fondue à la surface des pales (figure 4.26).

### 4.5.3 Conclusion

Dans l'industrie du plastique en général et dans l'industrie du rotomoulage en particulier, le phénomène du retrait de matière existe toujours. Par conséquent, le contrôle de ce facteur joue un rôle important. Dans le procédé de rotomoulage, différentes conditions de fabrication auront une certaine influence sur ce phénomène. Le contenu de cette étude présente les résultats de comparaison de 3 ventilateurs PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12, correspondant à 3 ventilateurs avec le rendement le plus élevé, moyen et minimum. Les résultats montrent que le retrait du matériau est le plus

grand sur la longueur de la corde ( $L$ ) d'environ 2 - 3,5 mm (le retrait est le plus grand à la position médiane de la pale (position  $r_8$ ) et diminue progressivement aux sections transversales à proximité du centre du ventilateur et périphérie du ventilateur). Le retrait le plus important en épaisseur  $E_{max}$  est d'environ 1,76 mm en position  $r_8$  de la pale. De plus, les résultats de comparaison des 3 ventilateurs sélectionnés montrent que le retrait a tendance à être le même et qu'il n'y a pas beaucoup de différence. Le retrait affecte l'épaisseur globale du ventilateur par rapport à la CAO du moule, de sorte que les résultats jouent également un rôle important dans la reconception éventuelle du moule en tenant compte de l'influence de ce facteur.

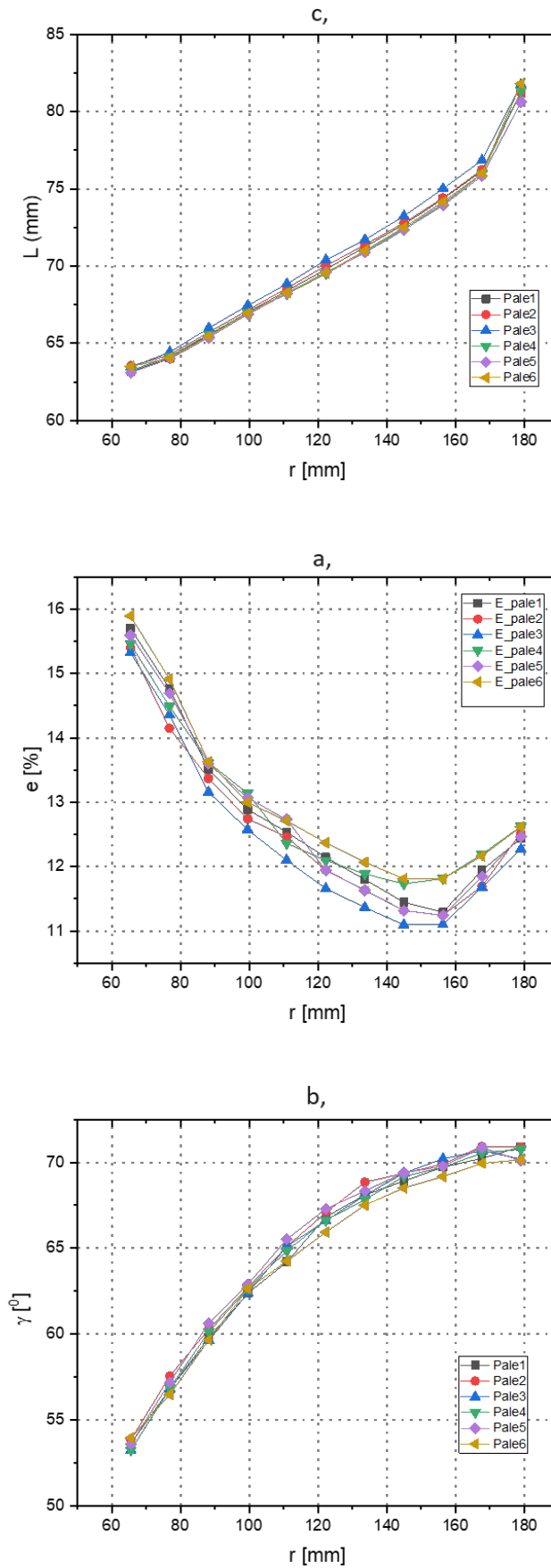


FIGURE 4.24 – (a)-longueur de corde  $L$  [mm], (b)-épaisseur relative des pales,  $e = \frac{E_{max}}{L}$  [%], (c)-angle de calage  $\gamma$  [°], en fonction du rayon  $r$  [mm], pour le ventilateur PEL-500-250-12

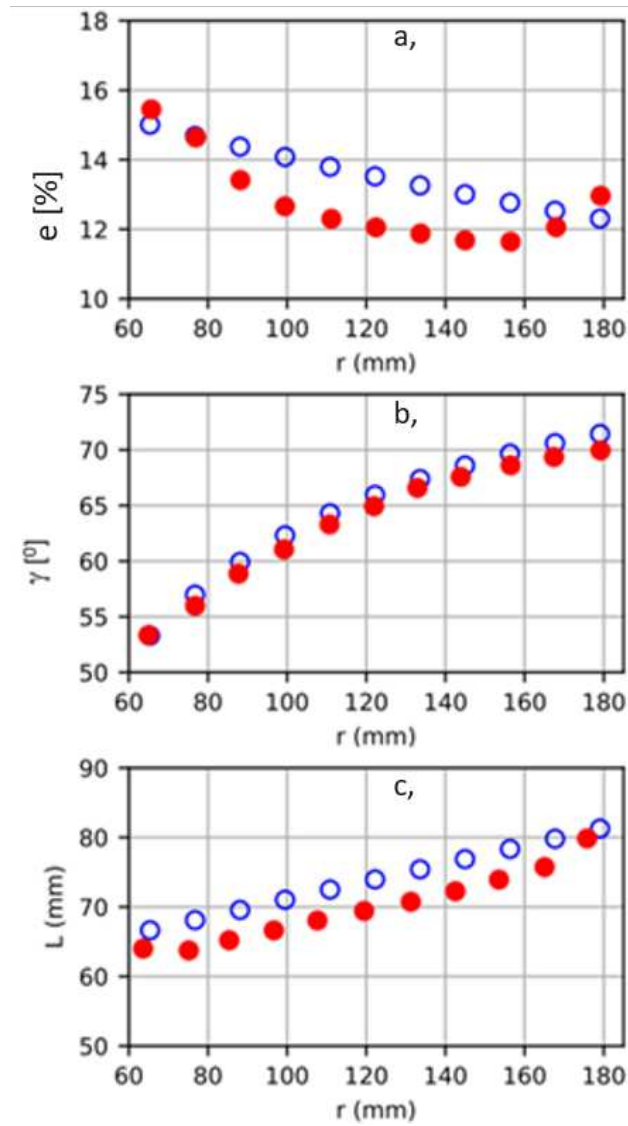


FIGURE 4.25 – (a)- épaisseur relative de la pale,  $e = \frac{E_{max}}{L}$  [%], (b) - angle de décalage  $\gamma$  [°] et (c) - longueur de corde  $L$  [mm] en fonction du rayon. Données du moule CAO:  $\circ$ , moyenne des mesures sur les 6 pales du PEL-500-250-12 :  $\bullet$

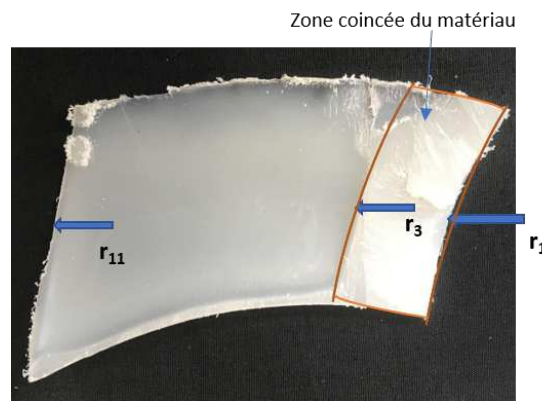


FIGURE 4.26 – Emplacement du bourrage de matériau sur une pale du ventilateur PEL-600-285-12

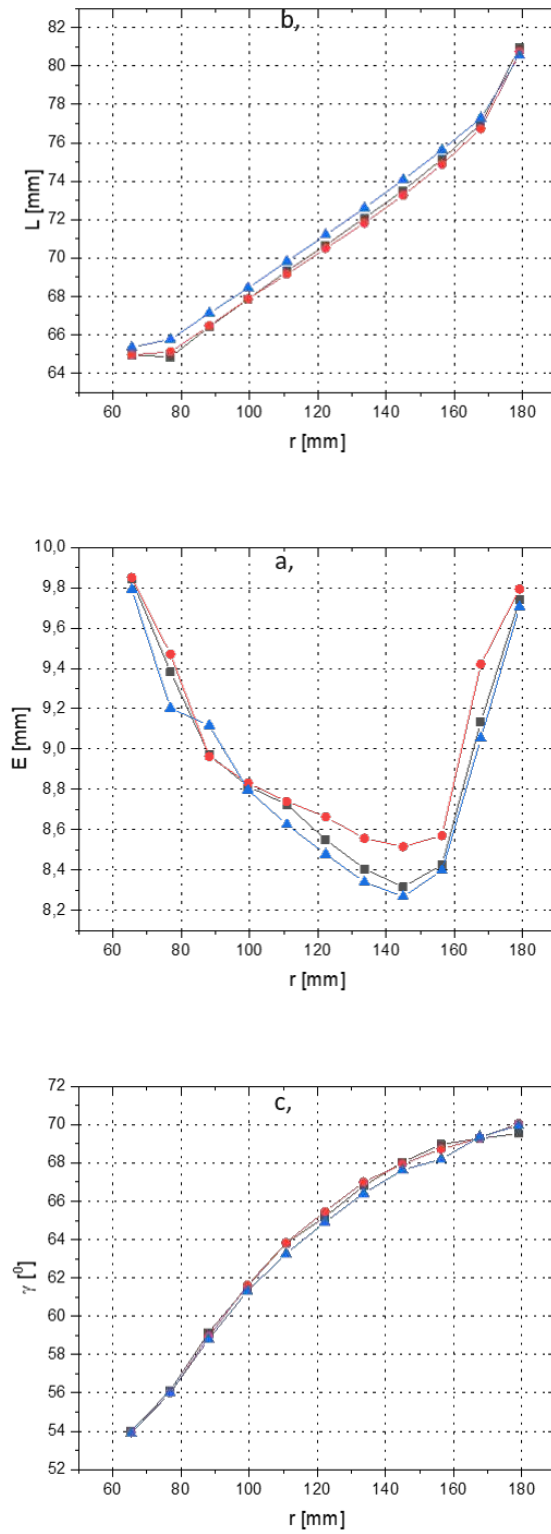


FIGURE 4.27 – (a)- longueur de corde  $L$  [mm], (b) - épaisseur de pale  $E$  [mm], (c) - angle de calage  $\gamma$  [°] en fonction du rayon  $r$  [mm] pour trois ventilateurs: PEL-300-285-20 -▲-; PEL-500-250-12 -●-; PEL-600-285-12 -■-

## 4.6 Analyse de l'épaisseur du ventilateur

Pour contrôler l'épaisseur du matériau du ventilateur après la fabrication par roto-moulage, des mesures ont été prises. Les positions d'échantillonnage ont été choisies sur différentes aux positions, sur l'extrados et l'intrados de 6 pales et au centre du ventilateur. La figure 4.28 montre l'emplacement de ces échantillons. Les valeurs d'épaisseur sont mesurées avec un micromètre de précision «0-25mm / 0.001mm - AK9635D», dont l'incertitude est de  $\pm 0,1\%$ .

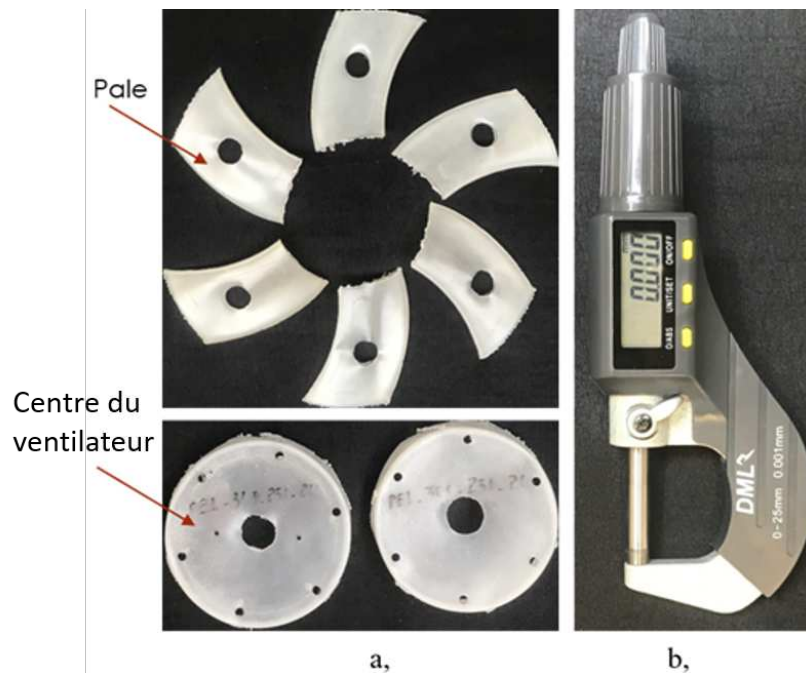





FIGURE 4.28 – (a) Positions de mesure de l'épaisseur des ventilateurs rotomoulés; (b) micromètre-AK9635D

Les résultats des mesures sont présentés sur la figure 4.29 pour 3 ventilateurs PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12. On voit que les valeurs d'épaisseur sur les pales et l'épaisseur au centre du ventilateur sont différentes selon la masse de poudre utilisée pour remplir le moule. Lors de la rotation du moule, sous l'effet de la force centrifuge, le matériau fondu est réparti sur les 6 pales et dans la virole du ventilateur. Un résultat remarquable pour l'utilisation d'une masse de 600 g est que l'épaisseur moyenne du matériau sur les pales est réduite d'environ 9,8% par rapport à une masse de 500 g. Mais en revanche, l'épaisseur du matériau au centre du ventilateur ( $\delta = 5.319 \pm 0.001$  mm) est bien supérieure à celle obtenue avec une masse de 300g à 500g (figure 4.29). Ceci s'explique par un blocage de matière. La poudre s'est davantage concentrée au centre du ventilateur. Dans ce cas, le matériau PE en cours de remplissage dans le moule a été complètement fondu pendant 12 minutes, pour une température dans le four de 285°C. Cependant, le matériau fondu n'est pas bien réparti dans le moule. De plus, lorsque le temps et la température dans le four augmentent, la viscosité diminue. Ce qui gêne le mouvement de la couche de matériau fondu. Il affecte



également la distribution uniforme de l'épaisseur du matériau sur les pales, ou entraîne des défauts sur les aubes.

Code de ventilateur	PEL-300-285-20	PEL-500-250-12	PEL-600-285-12
Temps de refroidissement (min)	20		
Epaisseur moyenne des pales (mm)	$0,923 \pm 0,001$	$1,835 \pm 0,001$	$1,655 \pm 0,001$
Epaisseur moyenne au centre (mm)	$0,752 \pm 0,001$	$1,640 \pm 0,001$	$5,319 \pm 0,001$
Image des roues			

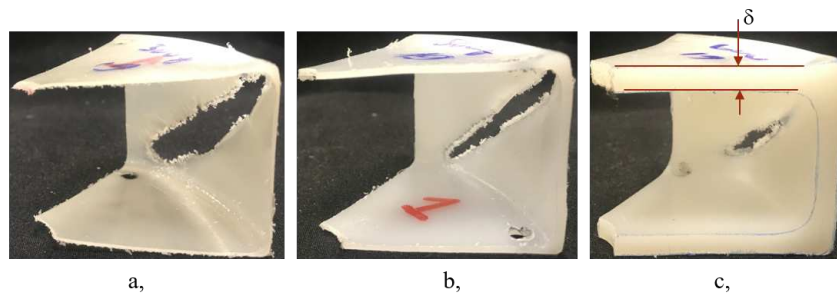


FIGURE 4.29 – Epaisseur de matériau sur les pales et sur la section transversale du centre du ventilateur pour (a) - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12

La figure 4.30 montre l'épaisseur du matériau sur les ventilateurs correspondant à 3 masses de poudre: 300g, 500g et 600g. Avec une masse de 300g, l'épaisseur du matériau sur les 6 pales est répartie de manière relativement homogène, cela montre une bonne distribution de la matière fondue dans le moule. Avec une masse de 500g, l'épaisseur moyenne des pales obtenue par le procédé de rotomoulage est nettement augmentée par rapport à la masse de 300g. L'écart d'épaisseur entre les pales a tendance à augmenter également: En plus de la tendance à réduire l'épaisseur des aubes, la différence d'épaisseur entre les pales devient de plus en plus évidente pour 600g. Le plus grand écart d'épaisseur de matériau entre les pales de PEL-500-250-12 est d'environ  $0,5 \pm 0,001$  mm et avec les pales de PEL-600-285-12 d'environ  $0,88 \pm 0,001$  mm. Dans les travaux de Pellicer [38], ce problème a été mentionné. Au cours du procédé de rotomoulage, les changements constants des sections ainsi que des parois face à face très proches dans le moule favorisent une accumulation de matière due à la tension superficielle et la viscosité élevée du matériau fondu. Ceci ne garantit pas la répartition homogène du matériau sur les pales. Lorsque les pales sont hétérogènes, cela affecte les propriétés mécaniques et l'aérodynamique du ventilateur.

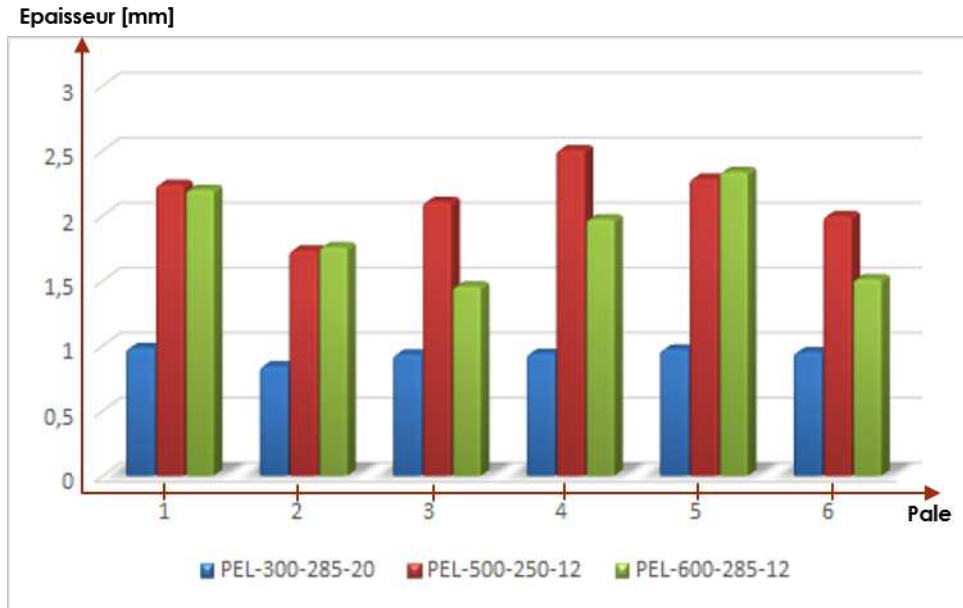


FIGURE 4.30 – L'épaisseur des ventilateurs pour (a) - PEL-300-285-20, (b) - PEL-500-250-12, (c) - PEL-600-285-12

## 4.7 Etude de l'effet des vibrations sur les ventilateurs

Outre les causes de vibration sur le système telles que: roulement à bille, instabilité d'installation, etc... L'objectif de cette étude est de déterminer l'influence des ventilateurs sur la vibration globale du système. La qualité du ventilateur est affectée par différentes conditions de fabrication, cela a-t-il un effet sur la stabilité (vibration) du système? Pour résoudre ce problème, un plan de test est réalisé. Trois ventilateurs sont fabriqués avec trois masses  $m$  (300g, 500g, 600g), et les mêmes conditions de température  $T_0 = 250^\circ\text{C}$ , le temps de four  $\Delta t_0 = 15$  min, respectivement PEL-300-250-15, PEL-500-250-15 et PEL -600-250-15.

Le temps d'échantillonnage pour chaque mesure est de 5s, le nombre d'échantillons est de 10,000 échantillons (figure 4.31). Une analyse FFT montre la présence de pics notables (figure 4.32). Le pic (a), qui est l'influence de la fréquence de rotation du moteur, montre que le premier pic se produit à la fréquence  $f_1 = 1800/60 = 30$  Hz, l'occurrence des pics suivants correspond à la fréquence  $f_n = n f_1$  (60Hz, 90Hz, 120Hz...). De plus, il y a un pic (b), qui est la fréquence provoquée par la fréquence électrique 50Hz utilisée dans le système électrique du laboratoire LIFSE. La courbe obtenue avec les trois ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15 et PEL-600-250-15 est presque la même.

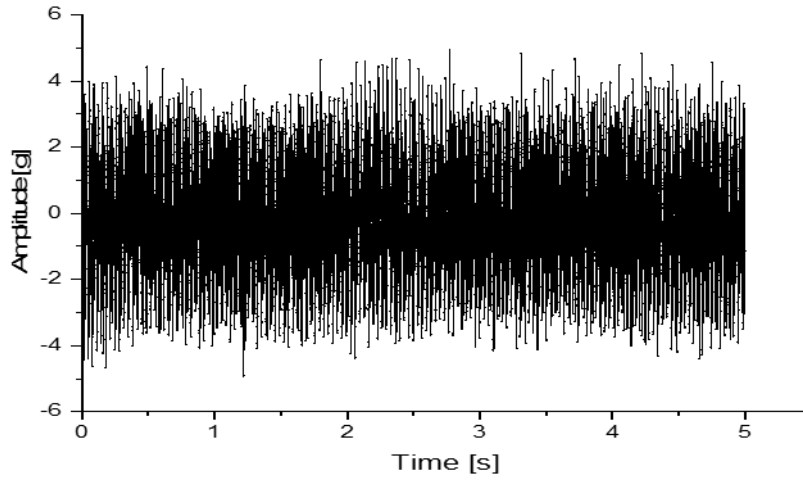


FIGURE 4.31 – Signal d'échantillon du PEL-300-250-15

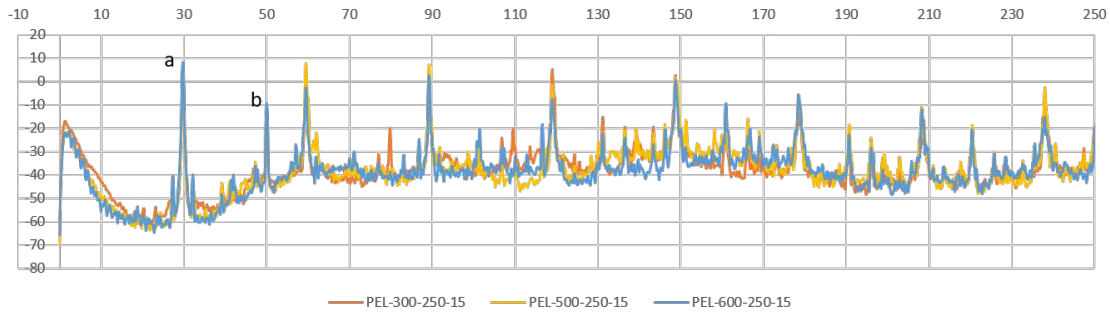


FIGURE 4.32 – FFT du signal de 3 ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15, PEL-600-250-15

### Résultats et discussion

Grâce au signal reçu et les résultats d'analyse: le test montre des résultats très notables avec les 3 ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15 et PEL-600-250-15, tableau 4.9. L'accélération de la pesanteur est utilisée pour quantifier l'amplitude des mesures faites en accélération.

Les résultats montrent que la valeur RMS ou la valeur moyenne d'amplitude de vibration obtenue avec la masse de ventilateur 300g est toujours inférieure que les autre masses. Valeur RMS ou  $\bar{V}$  n'est pas inférieure aux deux ventilateurs PEL-500-250-15 et PEL-600-250-15 comme prévu, mais ce résultat est également très intéressant. Il est possible qu'avec la température  $T_0 = 250^\circ\text{C}$  et le temps dans le four  $\Delta t_0 = 15$  min, le poudre a perdu le temps pour fondre complètement et répartir uniformément la poudre fondue dans le moule. Pour le confirmer, des tests avec d'autres ventilateurs à une température plus importante (la température de four  $T_0 = 285^\circ\text{C}$  et le temps  $\Delta t_0 = 15$  min) sont nécessaires pour répondre à cette hypothèse.

TABLEAU 4.9 – Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-250-15, PEL-500-250-15, PEL-600-250-15

Code de ventilateur	RMS	$\overline{V}$	Unité
PEL-300-250-15	$2,318 \pm 0,003$	$2,200 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-500-250-15	$2,710 \pm 0,003$	$2,531 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-600-250-15	$2,762 \pm 0,003$	$2,543 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$

Des tests supplémentaires ont été réalisés avec 3 ventilateurs PEL-300-285-15, PEL-500-285-15 et PEL-600-285-15. Les résultats montrent que la valeur RMS et  $\overline{V}$  de masse 300g sont toujours inférieure que les autres masses 500g et 600g (tableau 4.10). De plus, on voit que cette valeur a diminué par rapport à un ventilateur de 300g fabriqué avec une température de  $\Delta t_0 = 15$  min et  $T_0 = 250^\circ\text{C}$ , ce qui montre que l'hypothèse est correcte.

TABLEAU 4.10 – Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-285-15, PEL-500-285-15, PEL-600-285-15

Code de ventilateur	RMS	$\overline{V}$	Unité
PEL-300-285-15	$2,147 \pm 0,003$	$2,000 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-500-285-15	$2,638 \pm 0,003$	$3,119 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-600-285-15	$2,821 \pm 0,003$	$2,811 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$

Ensuite, considérons l'effet des vibrations avec les 3 ventilateurs PEL-300-330-15, PEL-500-330-15 et PEL-600-330-15. Les résultats montrent que la valeur RMS et  $\overline{V}$  avec la masse de ventilateur de 300g augmentent considérablement (figure 4.11). Ceci peut s'expliquer lorsque la température  $T_0$  augmente jusqu'à  $330^\circ\text{C}$ , la poudre peut fondre plus rapidement, mais du fait que la température est trop élevée, la viscosité d'écoulement de matière fondue diminue rapidement. Ceci augmente encore la résistance et la distribution de poudre fondue dans le moule. En outre, un changement de couleur notable avec les 3 ventilateurs étudiés.

Ainsi, les paramètres de température  $T_0$  et de temps  $\Delta t_0$ , la masse de la poudre affectent clairement la répartition des matériaux, l'uniformité des matériaux sur le profil du ventilateur. Enfin l'influence de vibration du ventilateur ainsi que la stabilité du système de banc d'essai.

TABLEAU 4.11 – Valeur de vibration expérimentale de 3 ventilateurs PEL-300-330-15, PEL-500-330-15, PEL-600-330-15

Code de ventilateur	RMS	$\overline{V}$	Unité
PEL-300-330-15	$2,790 \pm 0,003$	$2,721 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-500-330-15	$2,974 \pm 0,003$	$2,952 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$
PEL-600-330-15	$3,140 \pm 0,003$	$3,067 \pm 0,003$	$m.s^{-2}$

## 4.8 Cas particulier: ventilateur de masse 200g

Pour évaluer la limite inférieure de la masse de poudre à utiliser pour concevoir un ventilateur par rotomoulage, il est proposé d'étudier le cas où 200g de poudre sont utilisés pour remplir le moule. Les conditions de fabrication du ventilateur sont les mêmes que pour les autres masses en ce qui concerne la température, le temps dans le four et le temps de refroidissement. La figure 4.33, photos présente les images des ventilateurs obtenus par rotomoulage pour 200g de poudre. La tendance du changement de couleur du ventilateur obtenu est similaire aux résultats obtenus avec des masses de 300g, 400g, 500g et 600g. Cependant, la qualité de la roue présente les défauts suivants:

- L'épaisseur du matériau est trop fine, ce qui réduit la rigidité de la roue
- De nombreux petits trous apparaissent dans la partie centrale et sur les surfaces des pales (figure 4.34)
- Il y a des indentations (suivant la direction radiale) sur les surfaces supérieures des aubes, en particulier la partie proche du bord de fuite (figure 4.35)

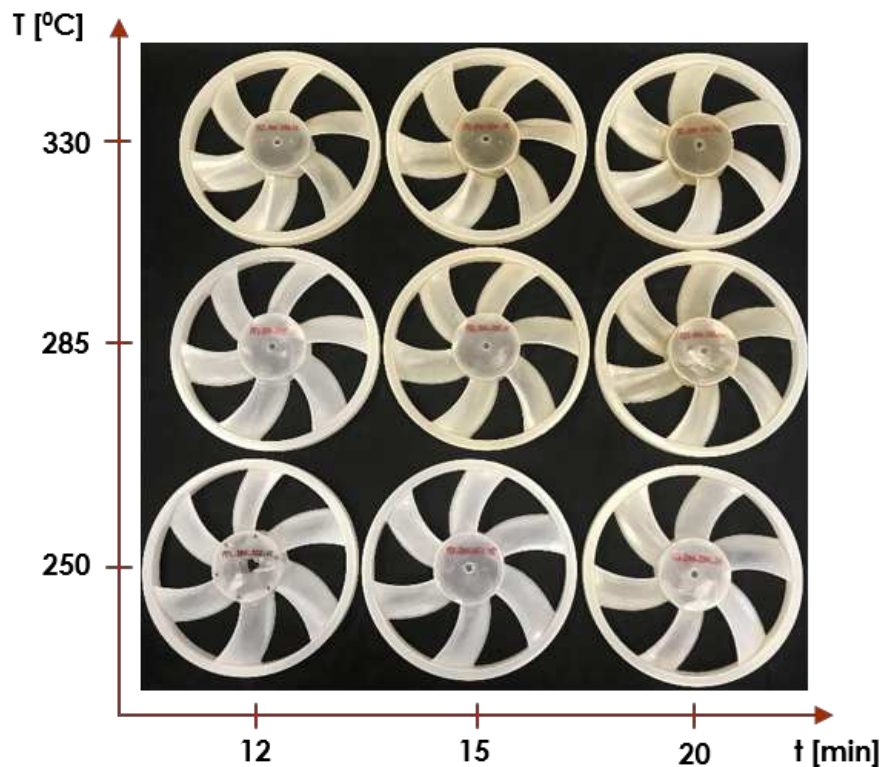


FIGURE 4.33 – Photographies de ventilateurs fabriqués par rotomoulage avec une masse de 200g par différentes température  $T_0$  de chauffage et de temps  $\Delta t_0$  dans le four

Les ventilateurs obtenus sont testés sur le banc d'essai standard 5801. Sur la figure 4.36, les résultats des essais pour le ventilateur PEL-200-250-12 sont comparés aux résultats du ventilateur PEL-300-285-20. Les résultats montrent que la tendance de la courbe de performance pour le ventilateur d'une masse de 200g est assez similaire. Au

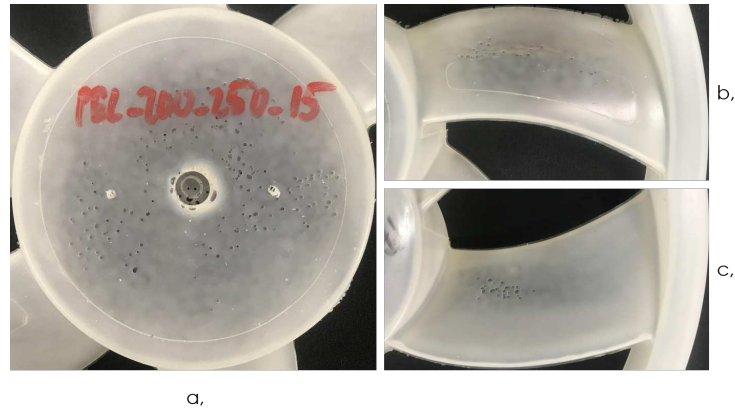


FIGURE 4.34 – Défauts des ventilateurs rotomoulés avec de poudre 200g (PEL-200-250-15):  
(a) centre du ventilateur, (b) extrados de pale, (c) intrados de pale

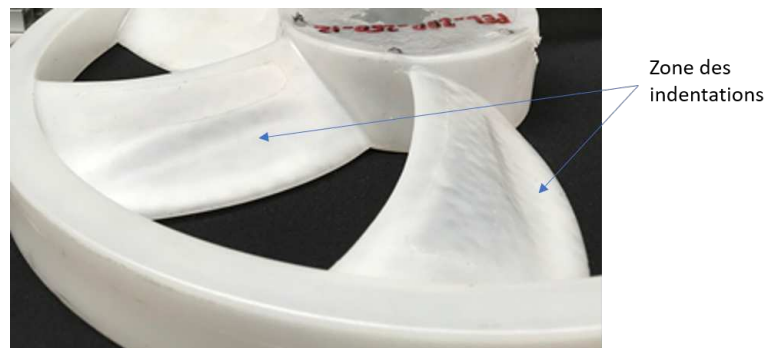


FIGURE 4.35 – Zone des indentations suivant la direction radiale Pour le ventilateur  
PEL-200-250-12

point de conception  $\phi = 0.14$ , le rendement d'un ventilateur de 200g mesurée à une vitesse de rotation de 2000 tr/min est réduite d'environ 1% par rapport à un ventilateur de référence de 300g.

Une caractéristique notable est observée avec une masse de 200g lors du test à la vitesse de rotation du moteur 2000 tr/min, lorsque le diamètre du diaphragme diminue, la pression statique dans le caisson augmente. Cela induit une augmentation du bruit, les pales sont déformées et la virole touche le carter. En raison de l'épaisseur du matériau trop mince dans les pales, la déformation est en dehors des limites de fonctionnement en raison de la différence de pression entre l'amont et l'aval du ventilateur. Il apparaît que la masse de poudre de 300g est la plus petite limite pouvant être utilisée dans ce procédé de rotomoulage pour le moule utilisé. Cependant, lorsque la vitesse de rotation est inférieure à 2000 tr/min, la masse de 200g présente les mêmes avantages du rotomoulage que des masses supérieures. La figure 4.37 montre les résultats des ventilateurs PEL-200-250-12 et PEL-200-285-20 comparés au ventilateur PEL-300-285-20 à 1750 tr/min (a) et 1500 tr/min (b). Les performances des ventilateurs testés sont quasiment égales, dans la limite des incertitudes (tableau 4.12).



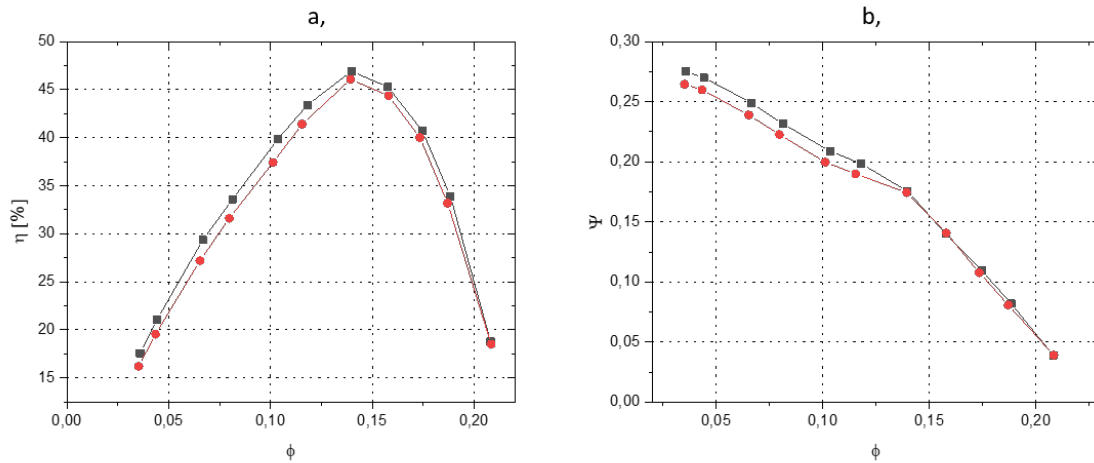


FIGURE 4.36 – (a) - comparaison des performances aérodynamiques des ventilateurs et (b) - coefficient de pression en fonction coefficient de débit: PEL-200-250-12: -●- et PEL-300-285-20: -■- à la vitesse de rotation 2000 tr/min

TABEAU 4.12 – Performances des ventilateurs testés: PEL-300-285-20, PEL-200-250-12, PEL-200-285-20

Code ventilateur	$\eta_{max}$ [%]		
	2000 tr/min	1750 tr/min	1500 tr/min
PEL-300-285-20	$46,9 \pm 0,5$	$44,56 \pm 0,5$	$40,82 \pm 0,5$
PEL-200-250-12	$46,0 \pm 0,5$	$44,73 \pm 0,5$	$41,18 \pm 0,5$
PEL-200-285-20	-	$43,96 \pm 0,5$	$40,60 \pm 0,5$

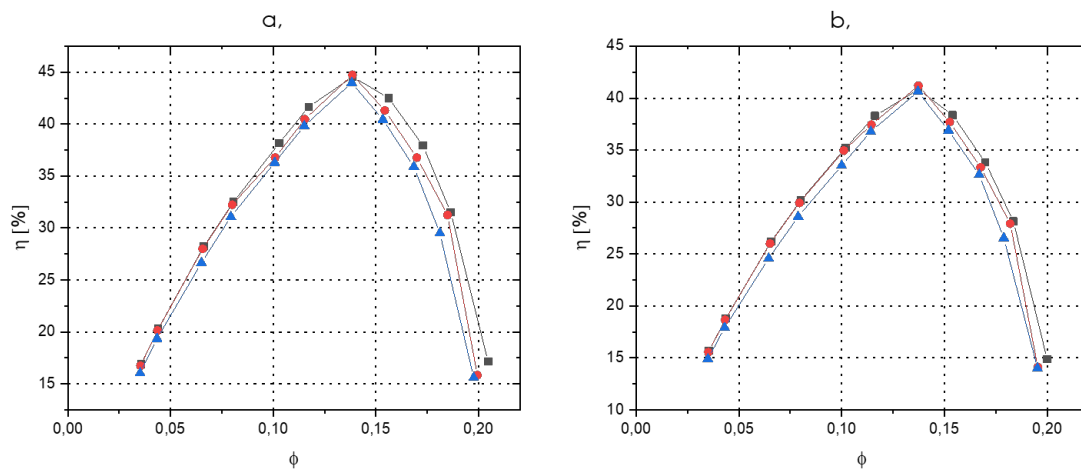


FIGURE 4.37 – Comparaison des performances aérodynamiques des ventilateurs PEL-200-250-12: -●-, PEL-200-285-20: -▲- et PEL-300-285-20: -■- à la vitesse de rotation: (a) 1750 tr/min, (b) 1500 tr/min

## 4.9 Conclusion

Les résultats de cette étude sont présentés dans les principaux contenus suivants:

- La couleur des 36 ventilateurs obtenues par rotomoulage est remarquable. En effet, lorsque la température  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$  et le temps dans le four  $\Delta t_0 \geq 15$  min, la couleur du ventilateur devient plus jaune. Surtout à une température de  $330^\circ\text{C}$  et un temps de 20 min, en plus du changement de couleur, il y a aussi une odeur piquante désagréable lors du retrait du ventilateur du moule. Ce phénomène peut s'expliquer par l'oxydation du matériau ou la dégradation du polymère.

- Les résultats des essais aérodynamiques des ventilateurs montrent des différences significatives. La plus grande différence de performance entre les ventilateurs fabriqués avec la même masse ( $m$ ) est de 2,42% (300g), respectivement; 2,61% (400g); 2,26% (500g) et 3% (600g). De plus, la plus grande différence de performance entre les ventilateurs est d'environ 6% entre les deux ventilateurs PEL-300-285-20 et PEL-600-285-12.

- Pour garantir la fiabilité des résultats expérimentaux, j'ai vérifié la répétabilité du processus de fabrication du ventilateur et la répétabilité du processus de mesure sur le banc d'essai. Les résultats montrent que la répétabilité est garantie pour ces deux essais.

- Avec 600g de masse de poudre utilisée, il semble que le matériau n'ait pas assez de temps pour se disperser sur les surfaces du moule. En revanche, la viscosité du matériau fondue diminue progressivement, en particulier lorsque la température est élevée, ce qui conduit au phénomène que l'écoulement de matière fondue est obstrué et piégé au milieu du ventilateur. Par ailleurs, la matière trop concentrée au centre est également à l'origine de ce phénomène: Les résultats, de mesures montrent que l'épaisseur au centre du ventilateur est de 5,32 mm (600g), 1,64 mm (500g), respectivement 0,75 mm (300g). Pendant ce temps, l'épaisseur moyenne de l'aube est réduite par rapport au ventilateur de 500g correspondant: 1,65 mm (600g), 1,84 mm (500g). De plus, les performances du ventilateur se dégradent rapidement. Il semble que la masse de poudre 500g soit la limite maximale d'utilisation utilisée avec ce moule.

- Diminuer la masse de poudre utilisée pour fabriquer les ventilateurs. La masse de poudre de 200g a été considérée pour fabriquer 9 ventilateurs avec les conditions de fabrication sélectionnées. Les images des ventilateurs montrent qu'il existe aussi des différences de couleur. Cependant, il semble que la couleur de l'éventail produit avec une masse de 200g soit légèrement plus jaune que les autres masses étudiées. Les résultats d'essais d'aérodynamique obtenus sont positifs. Cependant, comme le ventilateur est trop mince, lorsqu'il fonctionne à grande vitesse (environ 2000 tr/min), le ventilateur est déformé et une instabilité. De plus, sur le ventilateur, il y a de nombreux défauts, cela est dû au manque de matériaux. Par conséquent, pour garantir la qualité, les propriétés mécaniques du ventilateur semblent avec la masse de 300g est la limite minimale de masse utilisée avec ce moule.





# Chapitre 5

## Caractérisations mécaniques et physico-chimiques

### Contents

---

<b>5.1 FTIR-Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier</b>	<b>103</b>
<b>5.2 DSC - Calorimétrie différentielle à balayage . . . . .</b>	<b>115</b>
<b>5.3 DMA - Analyse mécanique dynamique . . . . .</b>	<b>122</b>
<b>5.4 Propriétés mécaniques en traction . . . . .</b>	<b>126</b>

---

### Introduction

Il s'agit ici d'étudier la microstructure et la rhéologie du polyéthylène au cours du procédé de rotomoulage. L'influence des paramètres du procédé (température et temps de chauffage, temps de refroidissement, épaisseur, etc.) sur la santé matière et sur ses propriétés sera présentée. Des essais mécaniques ont systématiquement été réalisés afin d'évaluer l'impact des paramètres du procédé sur les caractéristiques mécaniques du matériau. La réponse à l'ensemble de ces points de vue doit être apportée afin d'aider l'optimisation des paramètres du procédé (température, pression, temps) et conduire à l'obtention de pièces fiables à microstructure maîtrisée et présentant de bonnes propriétés mécaniques.

## 5.1 FTIR-Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier

### 5.1.1 Description de la méthode **FTIR**

La spectroscopie infrarouge est une technique d'analyse physico-chimique qui détecte les liaisons entre les noyaux atomiques et leur disposition. Cette méthode fournit un accès direct aux informations moléculaires, à la nature chimique, à l'organisation et à la structure du matériau à analyser. Sous l'effet du rayonnement infrarouge, les

molécules de l'échantillon analysé subissent des changements d'état d'oscillation à la fréquence caractéristique de la molécule (Azizi [56]). La spectroscopie infrarouge permet de déterminer la nature chimique des matériaux à analyser grâce à la détection de fluctuations caractéristiques des liaisons moléculaires. L'échantillon est soumis à un faisceau infrarouge sur une gamme de fréquences, lorsque l'une des fréquences du faisceau correspond à la fréquence d'oscillation de la liaison moléculaire ou du groupe chimique, le rayonnement est absorbé et donc l'intensité du rayonnement est réduite. Par conséquent, un matériau constitué d'un certain type de liaison chimique tel qu'un polymère donnera une certaine quantité de pics d'absorption infrarouge correspondant à la transition fluctuante de liaisons ou de groupes chimiques.

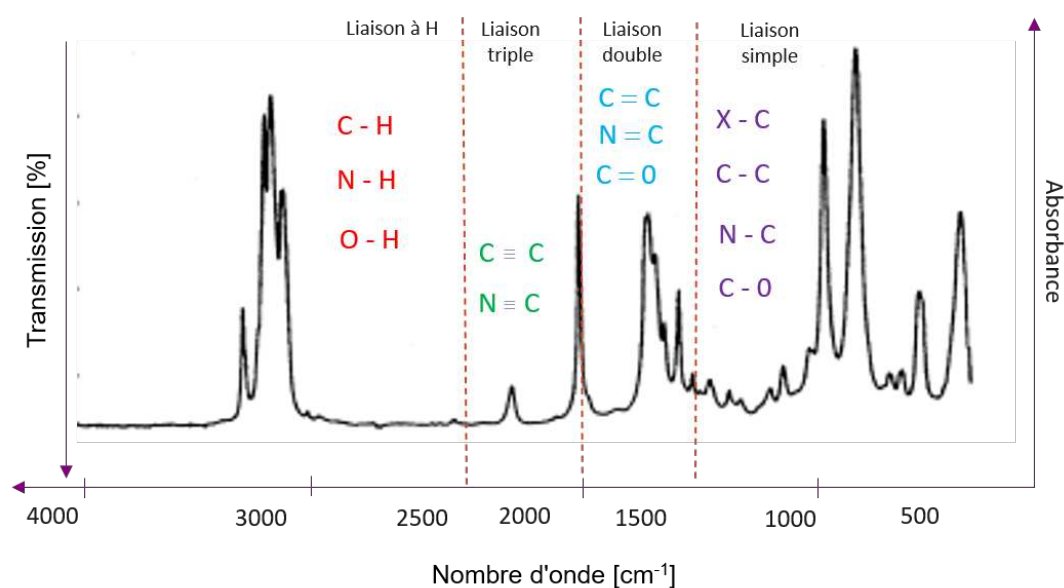


FIGURE 5.1 – Des absorptions aux différents groupe chimiques [12]

Chaque groupe lié (ou groupe fonctionnel) correspond à une zone sur le spectre résultant. Il est donc plus simple d'identifier les changements dans le spectre, ou plus précisément, l'occurrence d'interactions de groupes fonctionnels dans chaque région (Coates [12]). Par exemple, figure 5.1 dans la région  $(1400 - 550) \text{ cm}^{-1}$  les pics correspondent aux liaisons simples (C-O, C-C, N-C ...), dans la région  $(1600 - 1800) \text{ cm}^{-1}$ , il s'agit de liaisons doubles (C=O, C=C ...), dans la région avec des bandes d'absorption de  $(2500 - 2000) \text{ cm}^{-1}$ , les pics correspondent à 3 liaisons (C≡C, C≡N). Dans la zone d'absorption  $(2500 - 3500) \text{ cm}^{-1}$ , les pics correspondent à des liaisons hydrogène (C-H, N-H, O-H).

### 5.1.2 Protocole d'essais et caractéristiques du spectre FTIR

L'aspect qualitatif de la spectroscopie infrarouge est l'une des propriétés les plus puissantes de cette technique analytique polyvalente. Actuellement, il existe de nombreuses publications sur les fréquences d'absorption fondamentales (fréquences de groupe)

[12], [57]. Ces fréquences permettent d'identifier les relations structurales et les caractéristiques spectrales des vibrations moléculaires associées.

La campagne d'essais a été réalisée avec 45 ventilateurs (5 masses de poudre: 200g, 300g, 400g, 500g et 600g respectivement). L'appareil utilisé dans cette étude est la machine Spotlight 400 du constructeur Perkin Elmer, au laboratoire PIMM. Un spectre de milieu de gamme a été utilisé dans l'étude et varie de  $4000$  à  $550\text{ cm}^{-1}$  avec une résolution spectrale de  $4\text{ cm}^{-1}$ . Des éprouvettes de dimensions  $2\text{cm} \times 2\text{cm}$  ont été prélevées sur une pale de chaque ventilateur obtenu.

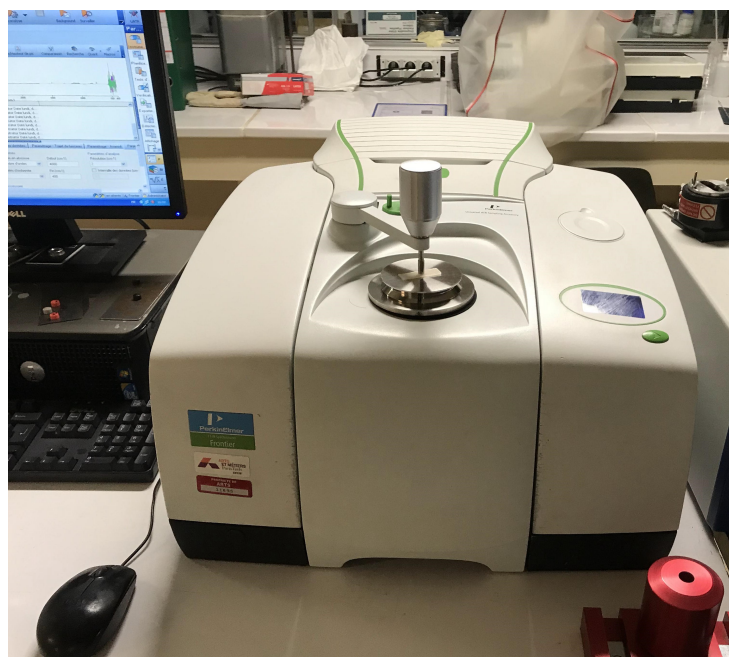


FIGURE 5.2 – Photographie de la machine Infrarouge Spotlight 400 pour l'analyse FTIR des ventilateurs rotomoulés

Les résultats de l'analyse spectrale permettent de déterminer des bandes d'absorption, des liaisons ou des groupes fonctionnels chimiques caractéristiques correspondant à chaque configuration de fabrication différente. De plus, avec cette méthode, il est également possible de contrôler les propriétés chimiques des matériaux affectant la qualité des ventilateurs obtenus. En particulier, dans ce cas, l'analyse de l'oxydation permet d'identifier son apparition dans les échantillons d'essai. Une étude de l'oxydation du polyéthylène basse densité (LDPE) à une température d'environ  $264\text{-}289^\circ\text{C}$  a été publiée par Hoff et Jaconsson [48]. Grâce au changement de couleur et à l'analyse par spectrométrie de masse pour déterminer les produits d'oxydation de LDPE, il a été montré qu'il existe environ 44 composés représentatifs tels que les hydrocarbures, les alcools, les aldéhydes, les cétones, les acides, les esters ... dans lesquels les composants identifiés comme acides gras et aldéhydes prédominent (figure 5.3).

Les conditions de fabrication du ventilateur (Par exemple: PEL-200-250-12) correspondent aux caractéristiques indiquées par le spectre obtenu. La figure 5.4 montre le

Groupe caractéristique	Type de liaison	Nombre d'onde [ $\text{cm}^{-1}$ ]
Cétone $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{R} \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$	1705 – 1725
Aldéhyde $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{H} \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$ $\text{C}-\text{H}$	1720 - 1740 2650 - 2930
Acide carboxylique $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{OH} \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$ $\text{O}-\text{H}$	1730 3200 - 3400
Ester $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{OR} \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$	1750
Anhydride $\begin{array}{c} \text{O} \quad \text{O} \\    \quad    \\ -\text{C}-\text{O}-\text{C}- \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$	1760 - 1800 900 -1300
Acide halide $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ \text{C}-\text{C}-\text{X} \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$	1800
Amide $\begin{array}{c} \text{O} \\    \\ -\text{C}-\text{NH}_2 \end{array}$	$\text{C}=\text{O}$ $\text{N}-\text{H}$ $\text{N}\equiv\text{C}$	1680 1650 3350

FIGURE 5.3 – Caractéristiques de certains groupes chimiques

spectre obtenu avec un échantillon dans les conditions de fabrication: masse de poudre 200g, temps  $\Delta t_0 = 12$  minutes et température dans le four  $T_0 = 250^\circ\text{C}$ . • La zone d'absorption (2500-3000)  $\text{cm}^{-1}$  (région hydroxyle), montre une bande assez large caractérisant l'oscillation covalente des liaisons (C - H). Les pics observés dans cette région sont de 2848  $\text{cm}^{-1}$  et 2915  $\text{cm}^{-1}$ .

- La région (1600-1800)  $\text{cm}^{-1}$  est la bande caractéristique des fluctuations covalentes de la liaison carbonyle ( $\text{C}=\text{O}$ ). Cette région est constituée de divers produits d'oxydation tels que l'aldéhyde, la cétone, l'acide, l'ester ... Le temps de chauffage  $\Delta t_0 = 12$  minutes et  $T_0 = 250^\circ\text{C}$  montrent une absence de liaisons ( $\text{C}=\text{O}$ ). Cela signifie qu'aucune oxydation ne s'est produite.

- Zone d'empreintes digitales ou zone à faible énergie (1500 - 550)  $\text{cm}^{-1}$ , c'est une zone assez compliquée. Les liaisons (C - H) sont caractéristiques des liaisons chimiques dans cette région.

### 5.1.3 Influence de la température et du temps de chauffage sur le développement de l'oxydation avec une masse de poudre de 200g

Pour évaluer l'impact des facteurs dans la fabrication du ventilateur par la méthode de rotomoulage avec une masse  $m = 200\text{g}$ , une comparaison des spectres obtenus est

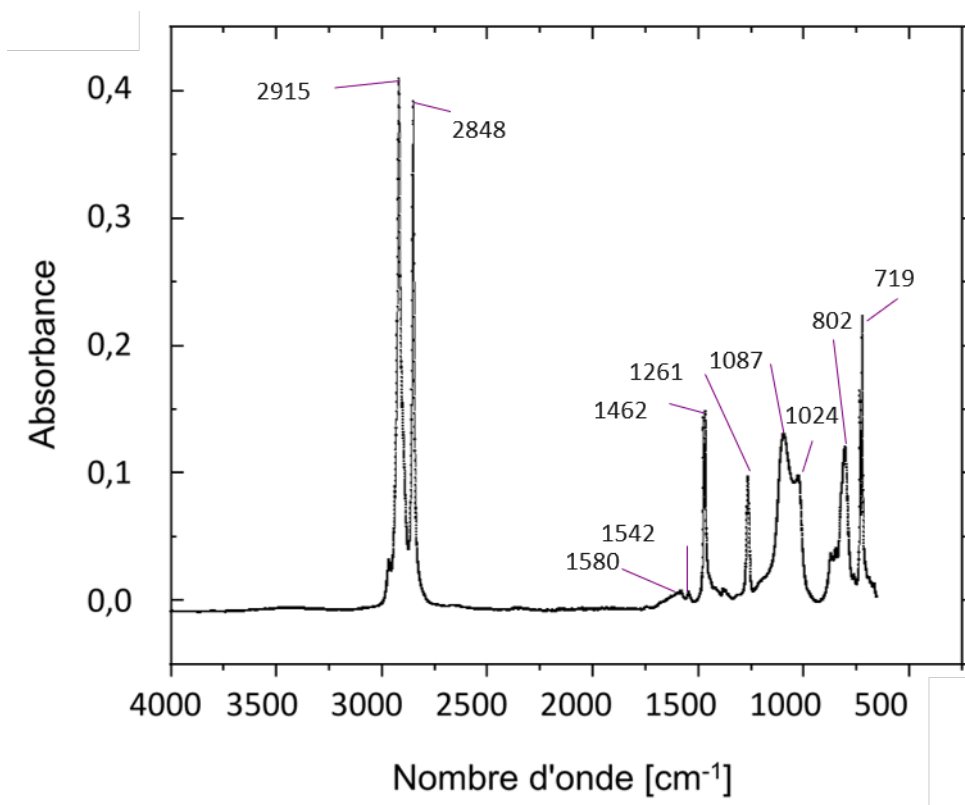


FIGURE 5.4 – Spectre infrarouge d'un échantillon de ventilateur rotomoulé PEL-200-250-12

présentée sur la figure 5.5. Plus précisément, le spectre obtenu sur la figure 5.5a, correspond à une température de chauffage constante 250°C et une variation du temps  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  min. Sur la figure 5.5b, les résultats correspondent à un temps du four constant de 12 minutes et à une variation de la température dans le four pour  $T_0 = (250, 285, 330)$  °C. La figure 5.5c montre le changement simultané de la température et du temps dans le four  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  min et  $T_0 = (250, 285, 330)$  °C.

La présence d'un groupe de liaison ( $C = O$ ) indique que l'oxydation a commencé à se produire. Les résultats de l'analyse spectrale montrent qu'à mesure que le temps ou la température augmente, les pics dans la gamme de fréquences de  $1720\text{ cm}^{-1}$  sont observés plus clairement. En revanche, les résultats de la recherche montrent que lorsque le temps dans le four est supérieur à 15 minutes et que la température du four est supérieure à 285°C, le développement de la liaison ( $C = O$ ) est assez fort. Cette évolution caractérise l'oxydation du matériau par rapport aux conditions de fabrication du ventilateur. Ceci est très cohérent avec le changement de couleur que nous observons avec les ventilateurs obtenus par rotomoulage et une odeur acre obtenue lors du retrait du ventilateur du moule (figure 5.6). De plus, des bandes d'absorption indiquent que plus d'un produit d'oxydation s'est formé. En particulier, en plus de l'apparition d'un pic de  $1720\text{ cm}^{-1}$ , un autre pic a été observé au niveau de la bande d'absorption de  $1735\text{ cm}^{-1}$ . Cela reflète les concentrations relativement différentes des produits formés par le

processus d'oxydation. Ces nouvelles bandes apparaissent au temps  $\Delta t_0 \geq 15$  minutes et  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$ . Ces allongements d'absorption sont caractéristiques du niveau d'oxydation de chaque éprouvette (ou condition de rotomoulage) et peuvent être associés à une dégradation du matériau.

#### 5.1.4 Effets des paramètres sur l'oxydation avec d'autres masses de poudre 300, 400, 500 et 600g

Nous avons constaté que le changement de la masse de poudre placée dans le moule affecte le mouvement de la matière fondu dans le moule et l'épaisseur de la pièce finale (chapitre 2 et chapitre 3). En outre, une autre question préoccupante ici, est : est-ce que le changement de masse de poudre affecte les propriétés chimiques du polymère? Pour clarifier ce problème, une analyse du spectre FTIR a également été réalisée avec des échantillons de ventilateurs de masses différentes. Les figures 5.7 et 5.8 présentent des résultats spectraux obtenus avec des masses de 300, 400, 500 et 600g. Les résultats ont montré qu'avec le changement des paramètres de fabrication du ventilateur  $\Delta t_0$  et  $T_0$ , les phénomènes chimiques affectant les échantillons étaient presque les mêmes qu'avec une masse de 200g. Dans la région «d'empreinte digitale» avec la fréquence d'oscillation  $< 1500\text{ cm}^{-1}$  et la région hydroxyle ( $2500\text{-}3500\text{ cm}^{-1}$ ), il n'y a pas beaucoup de différence notable. Cependant, dans la région carbonyle, la présence de liaisons ( $\text{C}=\text{O}$ ) à un pic de  $1720\text{ cm}^{-1}$  et  $1735\text{ cm}^{-1}$  a encore été observée dans des conditions de chauffe  $\Delta t_0 \geq 15$  minutes et  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$ . On peut observer une augmentation de l'intensité de l'oxydation de la bande de carbonyle avec l'augmentation du temps  $\Delta t_0$  de (15-20) minutes et de la température  $T_0$  de ( $285 - 330$ ) $^\circ\text{C}$ . Ainsi, dans les conditions limites du temps de coulée  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  minutes et de la température du four  $T_0 = (250, 285, 330)^\circ\text{C}$ , cela montre les propriétés chimiques et le changement de couleur du polymère. Cela semble jouer un rôle clé dans l'optimisation du procédé de fabrication du ventilateur et nous permet de contrôler l'oxydation du polymère par analyse spectroscopique. À partir de là, il est possible de faire un choix raisonnable pour les paramètres du procédé de rotomoulage.

La figure 5.9 présente une comparaison du développement de la liaison ( $\text{C}=\text{O}$ ) dans la zone des fluctuations du carbonyle ( $1600\text{-}1800\text{ cm}^{-1}$ ) pour 5 masses avec les mêmes conditions de fabrication:  $\Delta t_0 = 12$  minutes,  $T_0 = 330^\circ\text{C}$ . Les résultats indiquent qu'il semble y avoir une tendance graduelle de l'intensité d'absorption aux pics de  $1720\text{ cm}^{-1}$  et  $1735\text{ cm}^{-1}$  à mesure que la masse diminue (masses: 200, 300, 400 et 500 g). Cela peut s'expliquer comme suit:

- Avec plus de matière : 400g, 500g, le centre du ventilateur est plus rempli de matériau. De plus, lors du chauffage du moule dans le four, les couches de matériau à

l'intérieur mettent un certain temps pour que la température monte progressivement jusqu'à ce que la poudre soit complètement fondue. Quant à la masse de 200g, la capacité de mouvement et le temps de fusion complète de la masse sont plus rapides. Par conséquent, la couche de matériau complètement fondu dans le moule a plus de temps d'exposition à la température. Cela correspond également parfaitement aux observations visuelles des ventilateurs résultants. Les ventilateurs fabriqués avec une masse de 200g semblent être de couleur plus jaune par rapport aux autres masses.

- Avec une masse de 600g, en raison d'une concentration excessive de matière au centre du ventilateur, cela affecte également l'épaisseur ainsi que la répartition du matériau sur les pales (figure 4.20). Par conséquent, cela affecte les propriétés physico-chimiques de cette masse.

### 5.1.5 Conclusion

Les résultats de l'analyse FTIR permettent de déterminer les bandes de fréquence d'absorption, les liaisons moléculaires et les groupes fonctionnels chimiques. Avec les 5 masses utilisées  $m = (200g, 300g, 400g, 500g \text{ et } 600g)$ , il a été montré que: lorsque la température  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$  et le temps dans le four  $\Delta t_0 \geq 15 \text{ min}$ , l'oxydation du matériau se produit. Plus précisément, une liaison ( $\text{C} = \text{O}$ ) est observée au pic de  $1720 \text{ cm}^{-1}$ . Surtout avec la condition  $T_0 = 330^\circ\text{C}$  et le temps  $\Delta t_0 = 20 \text{ min}$ , ce pic augmente très fortement à la fréquence d'absorption  $1720 \text{ cm}^{-1}$ , et un autre pic est observé à la fréquence d'absorption  $1735 \text{ cm}^{-1}$ . Cela montre qu'il y a eu différents produits formés. Ce résultat a confirmé les soupçons précédents lorsque nous avons observé des changements de couleur des ventilateurs. Par conséquent, si la température est trop élevée ou si le moule reste trop longtemps dans le four, cela entraînera une oxydation. Cela affectera la qualité ainsi que les propriétés mécaniques du ventilateur. En revanche, plus la masse de poudre utilisée est petite, plus le processus d'oxydation est rapide, en particulier avec la masse de 200g de poudre, le pic avec la fréquence d'absorption de  $1720 \text{ cm}^{-1}$  augmente très fortement. Il est expliqué que le temps pour la poudre de fondre complètement dans le moule sera plus rapide que pour les autres masses. Par conséquent, la couche fondue de matériau a un temps d'exposition plus long à la température, en particulier à haute température et pour un temps long dans le four.



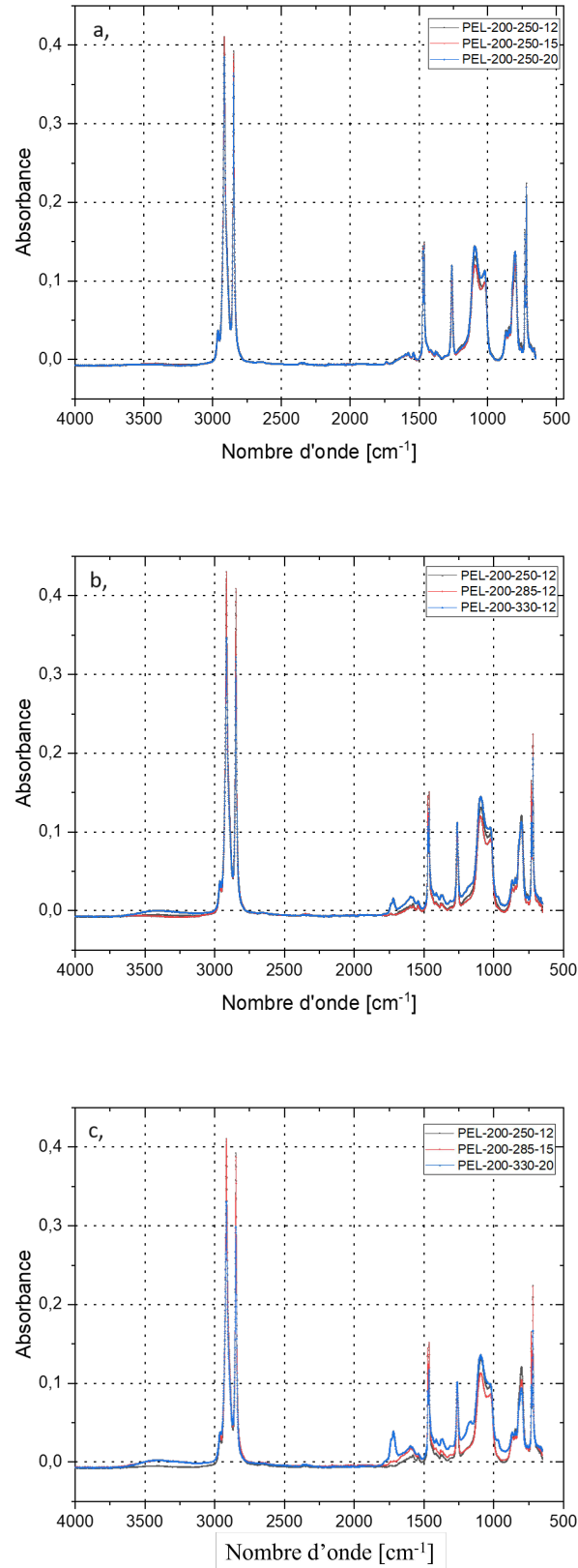


FIGURE 5.5 – Spectre d'absorption IR: (a)  $\Delta t_0 = 12, 15, 20$  min; (b)  $T_0 = 250, 285, 330^\circ\text{C}$ ; (c)  $\Delta t_0 = 12, 15, 20$  min et  $T_0 = 250, 285, 330^\circ\text{C}$  pour des ventilateurs fabriqués avec une masse de 200g

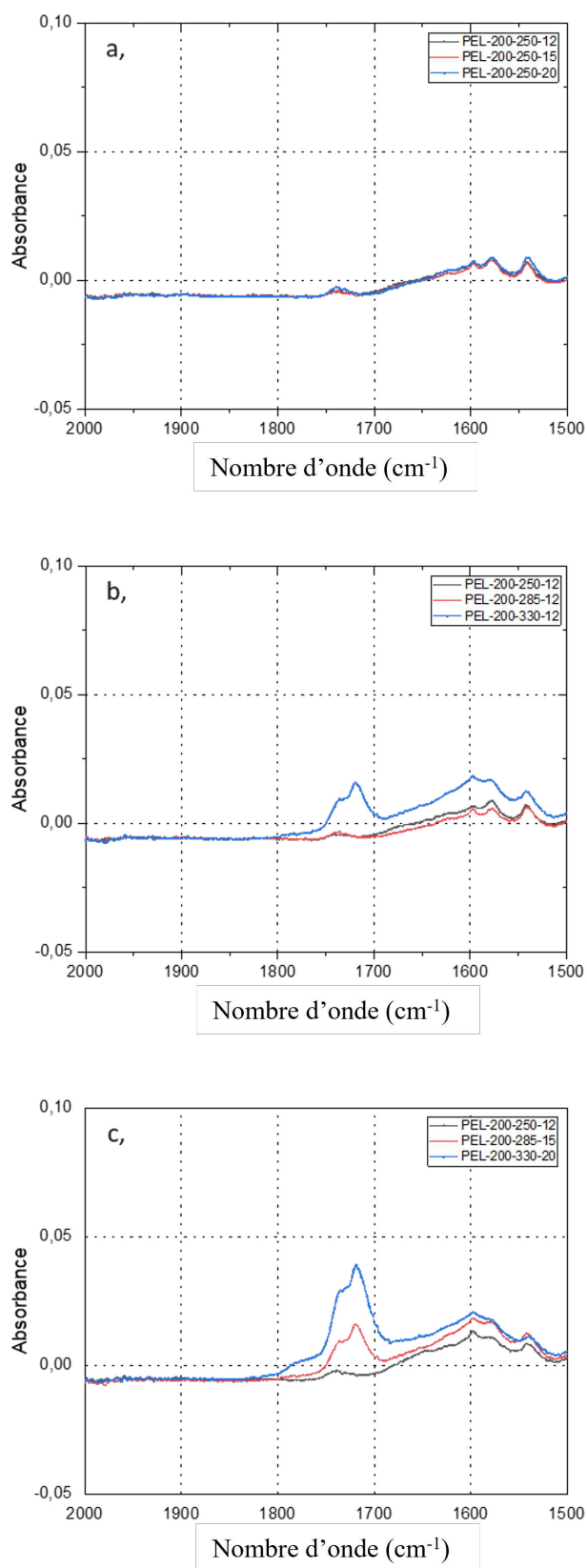


FIGURE 5.6 – Zoom du pectre IR dans les cas: (a) PEL-200-250-12/15/20; (b) PEL-200-250/285/330-12; (c) PEL-200-250/285/330-12/15/20

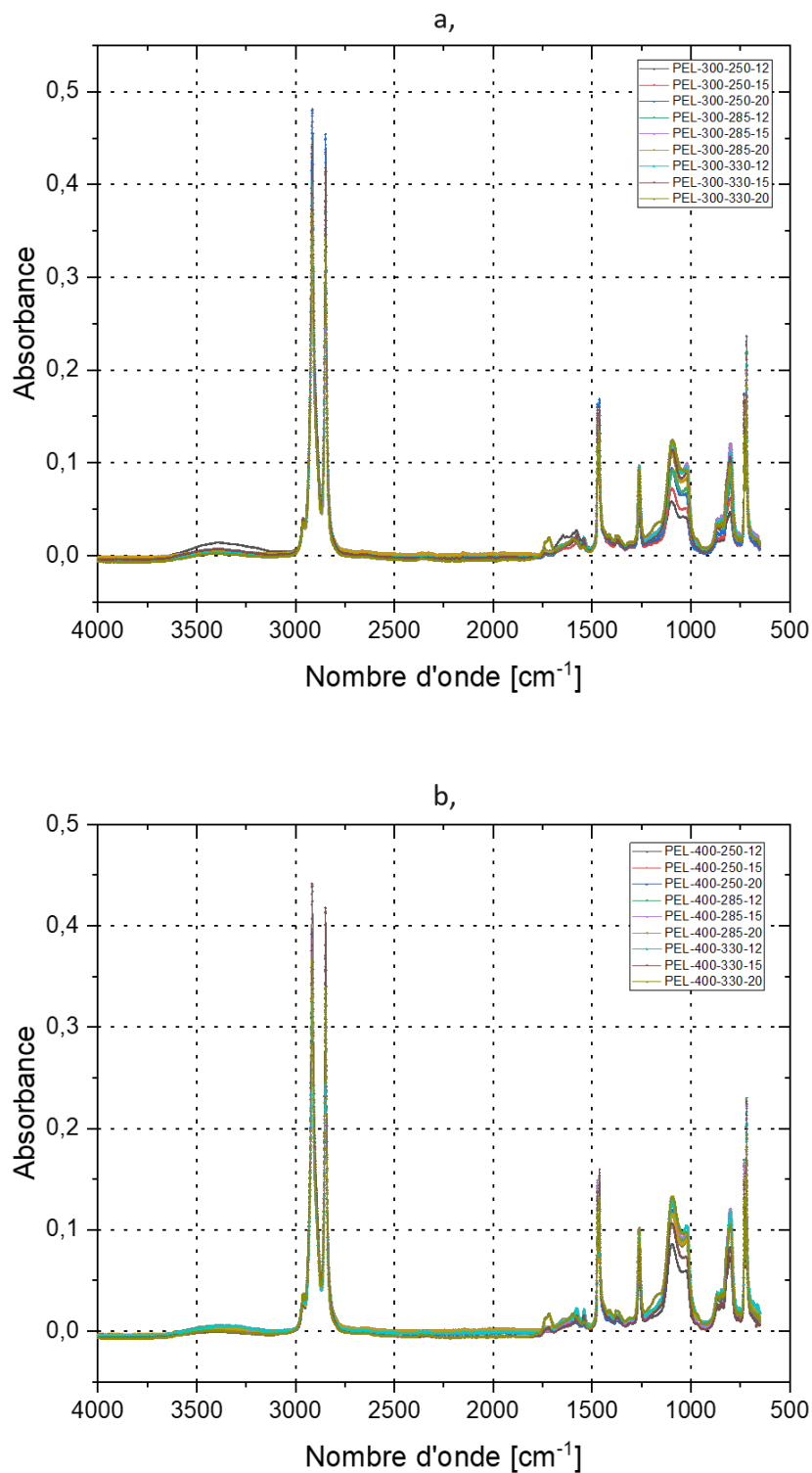


FIGURE 5.7 – Spectre IR de ventilateurs rotomoulés fabriqués avec une masse de poudre de (a) 300g et (b) 400g

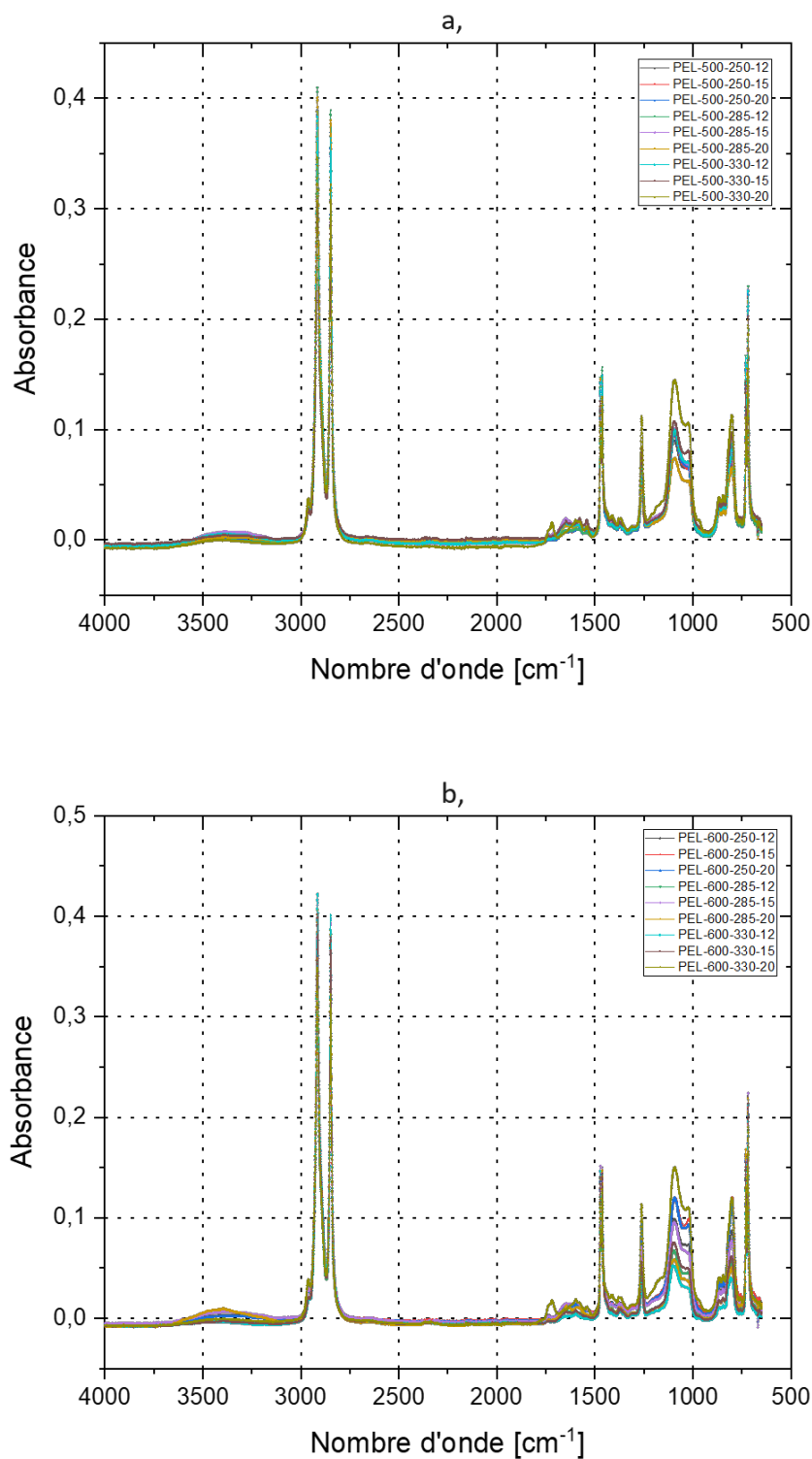


FIGURE 5.8 – Spectre IR de ventilateurs rotomoulés fabriqués avec une masse de poudre de (a) 500g et (b) 600g

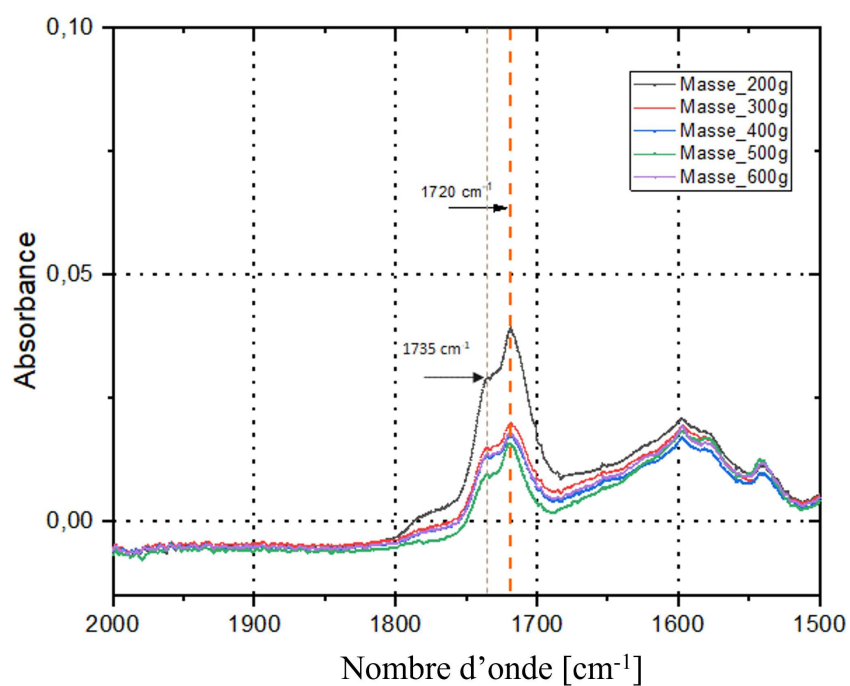


FIGURE 5.9 – Comparaison des spectres IR de ventilateurs rotomoulés avec un temps de chauffage  $\Delta t_0 = 20$  min et une température  $T_0 = 330^\circ\text{C}$  pour différentes masses de poudre utilisées

## 5.2 DSC - Calorimétrie différentielle à balayage

### 5.2.1 Introduction

Le degré de cristallisation et la morphologie affectent de manière significative les propriétés du polymère. Les polymères à haute cristallinité ont une température de transition vitreuse plus élevée, un module d'Young plus élevé, une meilleure rigidité, une plus grande dureté et résistance à la traction et aux solvants, mais moins de résistance aux chocs (Farukkawa *et al* [58]). Pour étudier les propriétés des polymères lorsqu'ils sont chauffés sur une certaine plage à une vitesse spécifique, une technique de calorimétrie différentielle à balayage ([Calorimétrie différentielle à balayage \(DSC\)](#)) a été utilisée dans cette étude. Il s'agit d'une technique permettant de mesurer les propriétés thermiques des polymères en fonction de la vitesse à laquelle ils absorbent l'énergie thermique par rapport au matériau de référence. Les principaux paramètres recherchés comprennent:

- Température de fusion  $T_f$
- Enthalpie du point de fusion ( $\Delta H_f$ )
- Température de cristallisation  $T_c$
- Enthalpie du point de cristallisation ( $\Delta H_c$ )

Le taux de cristallinité est calculé par la formule:

$$X_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^0} \quad (5.1)$$

$X_c$ : Taux de cristallinité (%)

$\Delta H_f$ : enthalpie de fusion d'échantillon (J/g)

$\Delta H_f^0$ : enthalpie standard de fusion du PEL.  $\Delta H_f^0$  du polyéthylène est de 293 J/g [Ahmed *et al* [59], Alapati *et al* [60]]

L'analyse de la courbe obtenue permet d'évaluer les effets de différents paramètres (temps et température dans le four, temps de refroidissement, masse de poudre du [PE](#) utilisée ...) sur la température de fusion  $T_f$ , la température de cristallisation  $T_c$ , et le taux de cristallinité  $X_c$ .

### 5.2.2 Description de l'équipement de test DSC

Le dispositif utilisé dans l'analyse est le [DSC Q1000](#) (figure 5.10a): la précision de la température est de  $\pm 0,05^\circ\text{C}$ , et la plage de températures s'étend de  $-180^\circ\text{C}$  à  $725^\circ\text{C}$ .

Un transformateur de refroidissement pour  $N_2$  (refroidissement à l'azote liquide) et 45 éprouvettes ont été utilisées. Chaque éprouvette de test est prélevée sur un ventilateur complet (correspondant à différentes conditions de rotomoulage: masse de poudre utilisée, température et temps dans le four, temps de refroidissement...). La masse de chaque échantillon utilisé dans cette étude était de 9 mg, (masse contrôlée par une balance METTLER TOLEDO XSR105, figure 5.10b). L'échantillon a été placé dans une capsule en aluminium (figure 5.10c).

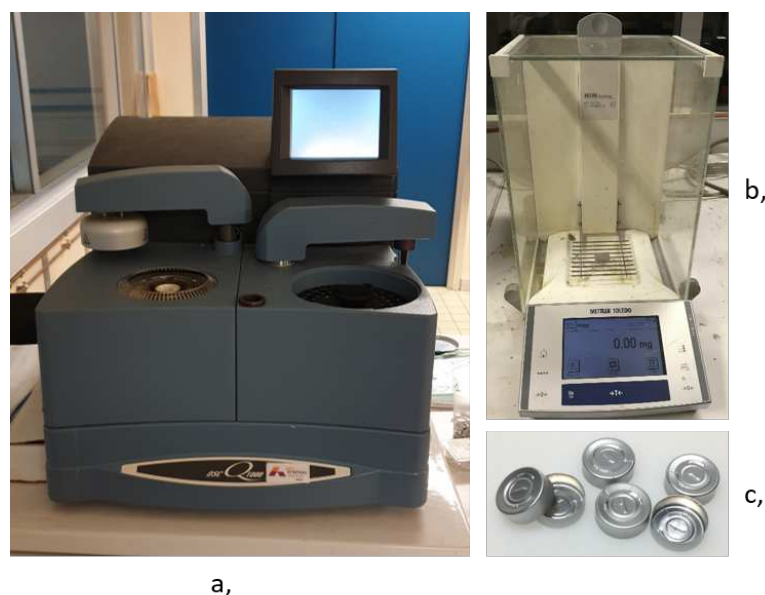


FIGURE 5.10 – Machine Q1000 (a), balance XSR105 (b) et capsule en aluminium (c), pour les mesures DSC

### 5.2.3 Campagne de test DSC

Chaque éprouvette est soumise à deux processus de chauffage et de refroidissement. Les valeurs des données d'évaluation et d'analyse sont considérées dans le deuxième cycle. Par conséquent, une campagne de tests a été menée selon le cycle principal comme suit:

- Equilibrer à  $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Stockage des données activé
- Rampe de  $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$  à  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$
- + Marquer la fin du cycle 1
- Isotherme pendant 5 min
- Rampe de  $10\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$  à  $-70^{\circ}\text{C}$
- + Marquer la fin du cycle 2
- Isotherme pendant 5 min
- Stockage des données ont été enregistrées

### 5.2.4 Résultats des tests DSC

La figure 5.11 présente les résultats de mesure DSC pour des ventilateur utilisant quatre masses de 300g, 400g, 500g et 600g. La configuration considérée est: le temps de chauffage de  $\Delta t_0 = 12$  min, 15 min et 20 min, et la température dans le four maintenue constante à  $T_0 = 330^\circ\text{C}$ . Ces courbes montrent que la température de fusion  $T_f$  et la température de cristallisation  $T_c$  sont relativement similaires pour les roues constituées d'une masse de 300g et 600g respectivement:  $126^\circ\text{C}$  et  $114^\circ\text{C}$ . De même, avec les roues de masse 400g et 500g:  $128^\circ\text{C}$  et  $116^\circ\text{C}$  (figure 5.11 (a, b, c)). Les températures de fusion et de cristallisation des roues générées par des masses de 400g et 500g sont supérieures à celles des masses de 300 et 600g. Cette augmentation du point de fusion peut être liée au fait que la morphologie cristalline de l'échantillon produit par ces conditions est plus stable thermiquement. Cela signifie que le taux de cristallinité augmente avec les masse de 400g et 500g. Les résultats de la détermination des valeurs du taux de cristallinité  $X_c$  sont présentés sur les figures 5.12, 5.13 et 5.14.

Une autre évaluation examine l'effet du temps ( $\Delta t_0$ ) dans le four sur les propriétés mécaniques du matériau et le comportement induit. Les ventilateurs obtenus par rotomoulage sont considérés pour les conditions suivantes:  $\Delta t_0 = 12$ , 15 et 20 min, la température du four  $T_0 = 330^\circ\text{C}$  étant maintenue constante, avec des masses de 300 g, 500 g et 600 g (figure 5.15). Lors du changement du temps  $\Delta t_0 = 12$ , 15 et 20 min, la tendance de la courbe est presque la même pour les quatre masses. Les résultats indiquent que la vitesse de cristallisation a tendance à augmenter légèrement avec la même masse. Le pourcentage de cristallisation a augmenté avec des masses de 300g à 400g, alors que cette valeur a tendance à diminuer avec des masses de 500g et 600g. Cela suggère que la quantité de poudre utilisée affecte également les propriétés mécaniques du matériau ou de la roue obtenue par le procédé. La cause peut être expliquée par le mouvement et la distribution du matériau dans le moule. La distribution hétérogène du matériau sur la roue complète semble être un obstacle au procédé de rotomoulage et ce problème a été mentionné dans l'étude d'Azzam [8] avec une masse de poudre de 500g. En revanche, cet effet était encore plus prononcé avec les 600g de poudre utilisée et accompagné d'une diminution de la valeur  $X_c$  observée par l'analyse DSC.

Les résultats de l'étude FTIR montrent qu'au fur et à mesure que la température et le temps dans le four augmentent, il se produit une oxydation ( $\Delta t_0 > 15$  min et  $T_0 > 285^\circ\text{C}$ , surtout avec une température dans le four  $\Delta t_0 = 330^\circ\text{C}$ ,  $T_0 = 20$  min. L'oxydation doit être contrôlée, en particulier dans le domaine du rotomoulage. On observe dans les stades amorphes d'oxydation et de clivage, un réarrangement des macromolécules et de leur orientation. L'oxydation entraîne une dégradation du matériau si le moule reste dans le four trop longtemps ou que la température est trop élevée.



### 5.2.5 Conclusion

Lors du rotomoulage, le matériau subit une fusion  $T_f$  et une recristallisation  $T_c$ . Ensuite, un arrangement partiel des chaînes moléculaires dans ce polymère se produit. À partir des noyaux de cristallisation, les chaînes moléculaires s'empilent les unes sur les autres sous forme de plis et forment des lamelles. Le taux de cristallinité ( $X_c$ ) est déterminé par le rapport entre l'enthalpie de fusion et l'enthalpie de fusion dans la condition standard. Lorsque la valeur de  $X_c$  augmente, cela affecte la densité, la rigidité, la durabilité ... En d'autres termes, le processus de cristallisation a une grande influence sur les propriétés mécaniques du matériau, et cela dépend des conditions du procédé de fabrication du ventilateur. Les résultats des tests montrent qu'avec la même masse, par exemple 300g et température  $T_0 = 330^\circ\text{C}$ , lors du changement du temps de fabrication  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  min, les valeurs de  $T_c$  et  $T_f$  sont quasiment inchangées. Cela montre que la valeur de  $X_c$  est peu affectée lorsque le temps passé dans le four varie de 12 à 20 min. Par contre, lorsque le temps  $\Delta t_0$  et la température  $T_0$  dans le four ne changent pas, nous constatons que la tendance de la courbe est la même pour les 4 masses: 300g, 400g, 500g, 600g. Cependant, les résultats montrent que la valeur  $X_c$  augmente avec le changement de masse de 300g à 400g. Ensuite, la valeur de  $X_c$  diminue progressivement à mesure que la masse de poudre continue d'augmenter à 500g ou 600g.

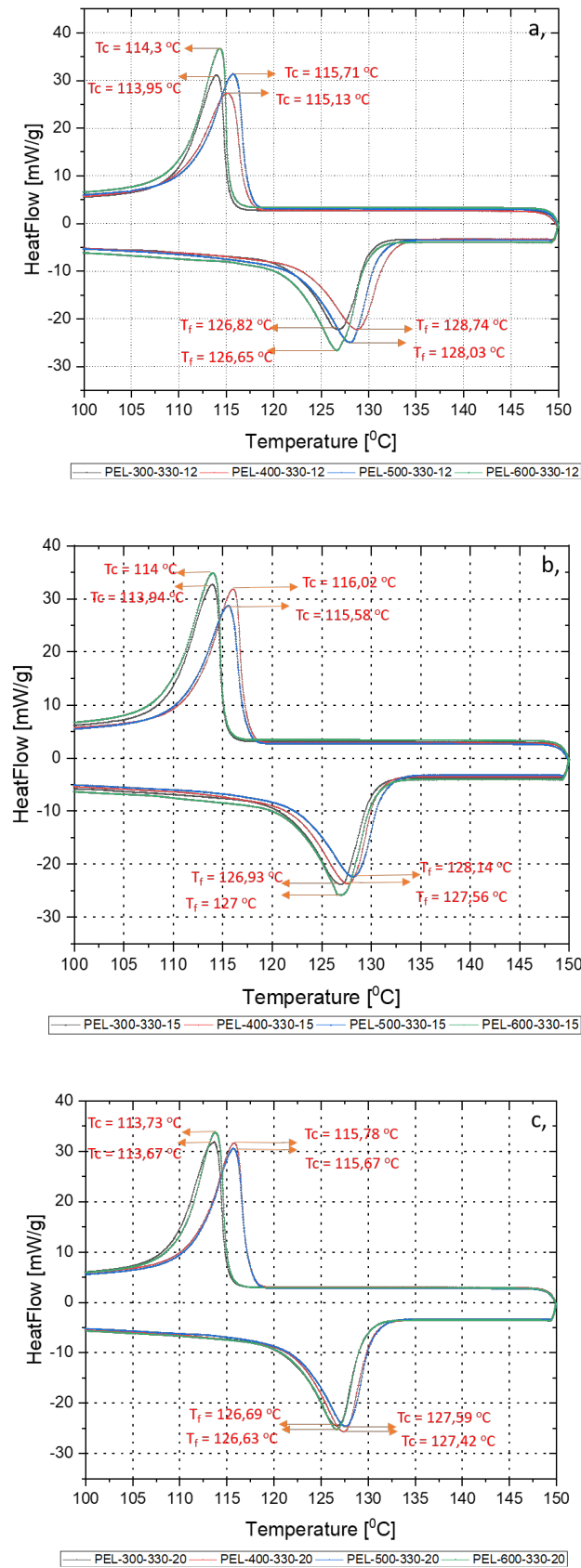


FIGURE 5.11 – Comparaison les valeurs de  $T_c$  et  $T_f$  dans les cas: (a) PEL-300/400/500/600-330-12; (b) PEL-300/400/500/600-330-15; (c) PEL-300/400/500/600-330-20 par mesures DSC

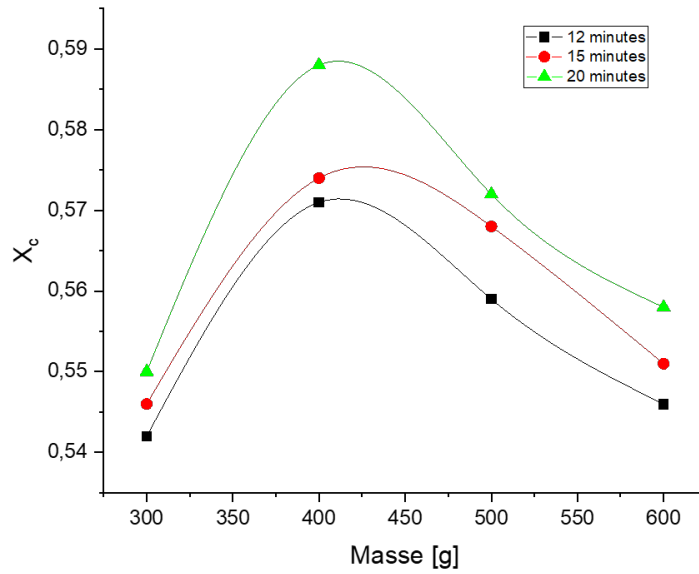


FIGURE 5.12 – Effet de la masse sur le taux de cristallinité  $X_c$ : 300g, 400g, 500g, 600g pour trois temps de chauffage  $\Delta t_0 = (12, 15, 20)$  min et une température dans le four  $T_0 = 330^\circ\text{C}$

PE		300	400	500	600
$T_0$	$\Delta t_0$	g			
$^\circ\text{C}$	min	Taux de cristallinité $X_c$			
330	12	0,542	0,571	0,599	0,546
330	15	0,546	0,574	0,568	0,551
330	20	0,551	0,588	0,572	0,558

FIGURE 5.13 – Taux de cristallinité  $X_c$  obtenus par DSC pour 4 masses: 300g, 400g, 500, 600g pour une température dans le four de  $330^\circ\text{C}$

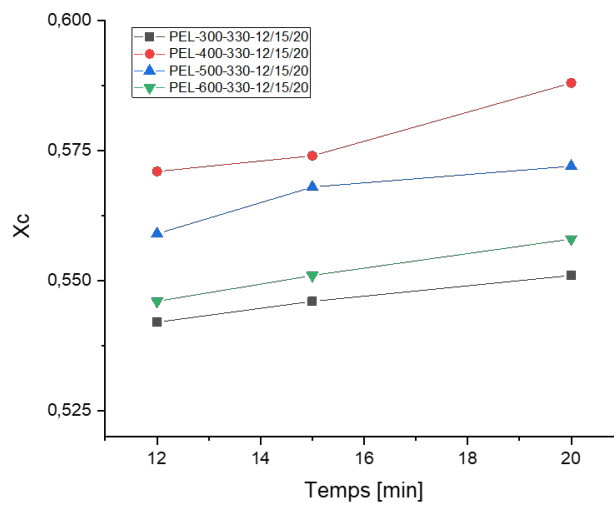


FIGURE 5.14 – Effet du temps de chauffage  $\Delta t_0$  sur la cristallinité  $X_c$ : 12, 15, 20 min pour différents ventilateurs de 300g, 400g, 500g et 600g

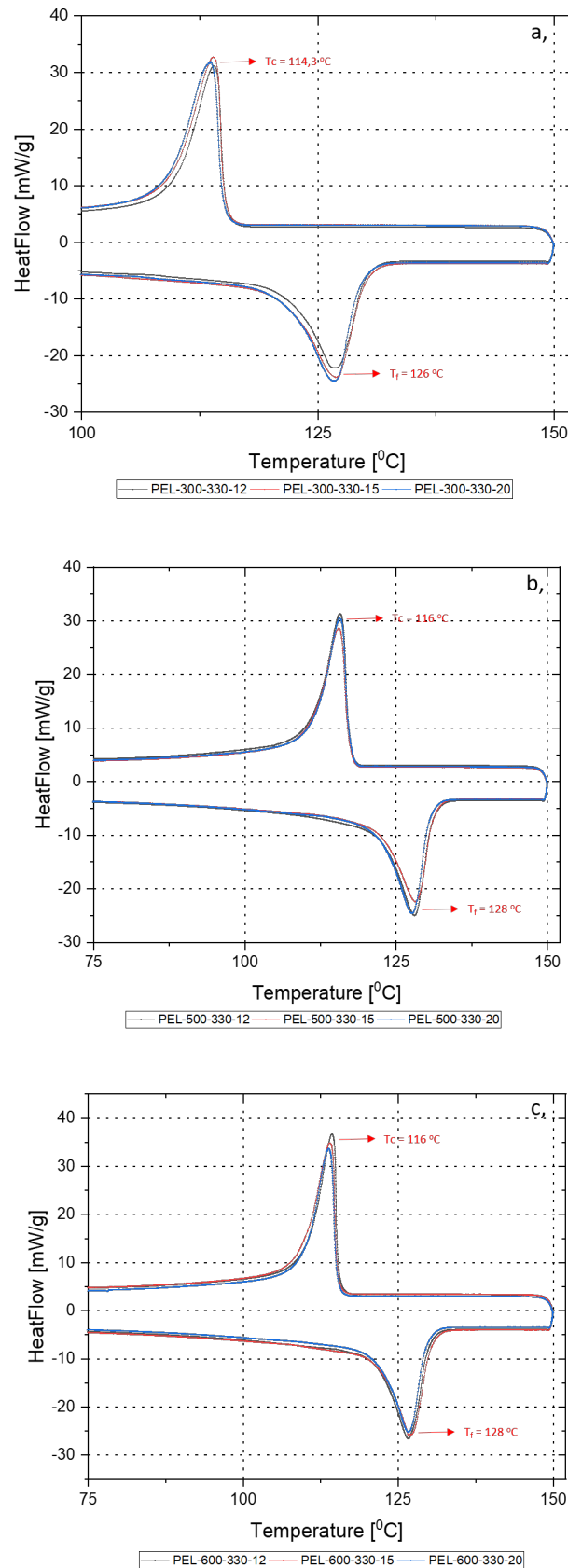


FIGURE 5.15 – Comparaison des valeurs de  $T_c$ ,  $T_f$  dans les cas (a): PEL-300-330-12/15/20; (b): PEL-500-330-12/15/20; (c): PEL-600-330-12/15/20

## 5.3 DMA - Analyse mécanique dynamique

### 5.3.1 Introduction du test DMA

L'analyse mécanique dynamique (DMA) est une technique utilisée pour mesurer les propriétés mécaniques de nombreux matériaux, y compris les polymères qui agissent comme un solide élastique et un liquide visqueux. La DMA diffère des autres tests mécaniques de deux manières importantes. Premièrement, l'équipement d'essai de traction typique se concentre uniquement sur les composants élastiques. Dans de nombreuses applications, la composition inélastique ou visqueuse est critique. C'est le composant visqueux qui détermine les propriétés telles que la résistance aux chocs. Deuxièmement, les testeurs de traction fonctionnent principalement en dehors de la plage de viscosité linéaire. La DMA fonctionne principalement dans la gamme viscoélastique linéaire et est donc plus sensible à la structure (figure 5.16).

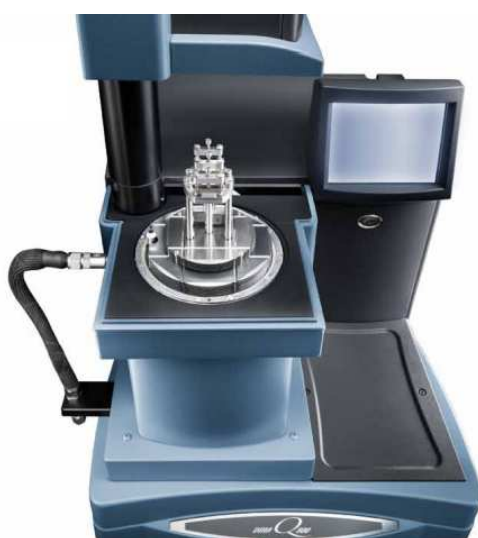


FIGURE 5.16 – Equipement de mesure de DMA Q800

Puisque le module est égal à la contrainte/déformation, ( $E$ ) peut être calculé. A partir de  $E$  et de la mesure  $\delta$ , le module de stockage ( $E'$ ) et le module de perte ( $E''$ ), peuvent être calculés comme illustré sur la figure 5.17. Le module de stockage ( $E'$ ) est un composant élastique et concerne la rigidité du modèle. La perte de module ( $E''$ ) est un composant visqueux et est liée à la capacité de l'échantillon à dissiper l'énergie mécanique par le mouvement moléculaire. La tangente du déphasage ou  $\tan\delta$ , est un autre paramètre courant qui fournit des informations sur les relations entre les composants élastiques et inélastiques.

Le module d'Young est déterminé par l'équation:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (5.2)$$

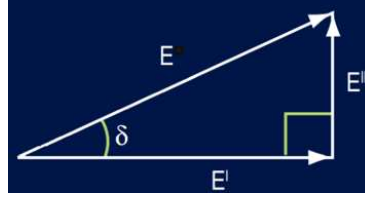


FIGURE 5.17 – Relation entre les paramètres calculés

Le module de stockage ( $E'$ ) et le module de perte ( $E''$ ) sont déterminés par les équations 5.3, 5.4:

$$E' = E \cdot \cos \delta \quad (5.3)$$

$$E'' = E \cdot \sin \delta \quad (5.4)$$

$$\tan \delta = \frac{E''}{E'} \quad (5.5)$$

Dans cette étude, pour évaluer l'effet des facteurs de température et de temps dans le four sur les propriétés des matériaux, le test DMA est de préférence utilisé pour étudier le changement d'état du polymère. Des échantillons créés pour trois configurations différentes, avec la même masse de 500g: PEL-500-285-12; PEL-500-330-12; PEL-500-285-20 sont comparés. Les tests DMA (DMA Q800) sont réalisés avec une configuration de flexion alternée et dans la plage de température de 30°C à 100°C (figure 5.16). Dans ces expériences, la phase amorphe du polyéthylène est à l'état de caoutchouc. La mobilité moléculaire dans cet état est plus élevée et le polymère est très sensible.

### 5.3.2 Résultats et discussions

Les résultats des tests présentés la figure 5.18 montrent qu'il y a une transition autour de 50°C. La références indique que pour certains polymères semi-cristallins, il existe une transition appelée "transition  $T_\alpha C$ ", dans l'intervalle de température entre  $T_g$  et  $T_c$ . Celle-ci est liée à la mobilité des segments macromoléculaires de la phase amorphe qui sont proches ou en relation avec les lamelles cristallines. Dans le cas de l'utilisation du polyéthylène (LDPE), on peut raisonnablement supposer qu'un changement significatif autour de 50°C de  $E'$  et  $E''$ , est lié à cette «transition  $T_\alpha C$ ».

La figure 5.19 montre que  $E'$  dans la condition B ( $T_0 = 330^\circ\text{C}$ ) est légèrement supérieur à  $E'$  sous la condition A ( $T_0 = 285^\circ\text{C}$ ). Cela montre qu'il y a certains effets lors de l'augmentation de la température dans le four. La figure 5.19, permet de comparer la condition A ( $\Delta t_0 = 12$  min) et la condition C ( $\Delta t_0 = 20$  min). Les résultats indiquent qu'il n'y a pas de différence significative dans les propriétés thermodynamiques des courbes obtenues. Avec ce test, j'ai trouvé qu'avec une température  $T_0 =$

285°C, lorsque la durée dans le four augmentait à environ 12-20 min, les propriétés mécaniques du matériau ne changeaient pas beaucoup, sauf qu'une légère différence de couleur était observée. Cela a été expliqué par l'influence de l'oxydation. Cependant, lorsque la température est augmentée de 285-330°C, les changements sont perceptibles avec les résultats obtenus.

### 5.3.3 Conclusion

Avec le test DMA, il est possible de déterminer l'influence de deux facteurs, la température  $T_0$  et le temps  $\Delta t_0$ , sur les propriétés mécaniques du matériau:

- Effet de la température  $T_0$ : considéré avec deux ventilateurs PEL-500-285-12 et PEL-500-330-12, les résultats des tests montrent qu'en augmentant la température du four de 285°C à 330°C, il y a un léger changement de  $E'$  et  $E''$  dans la plage de température de 50°C. Cependant, la sensibilité de cette méthode est limitée et ne peut pas révéler avec précision l'impact de changement de température. Il est alors nécessaire d'approfondir cet effet plus en détails par des tests mécaniques (essais de traction).

- Effet du temps ( $\Delta t_0$ ): deux ventilateurs ont été analysés PEL-500-285-12 et PEL-500-285-20, les résultats d'analyse ont montré qu'en augmentant le temps dans le four de 12 à 20 min, les courbes de  $E'$  et  $E''$  coïncident presque. Cela indique que les propriétés thermomécaniques du matériau ne sont pas beaucoup affectées, à l'exception d'un léger changement de couleur du ventilateur.

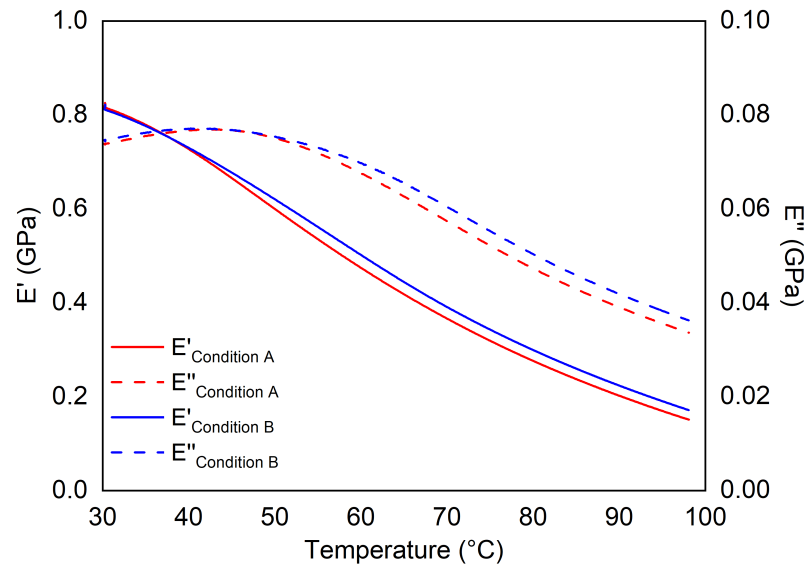


FIGURE 5.18 – Comparaison entre la condition A: PEL-500-285-12 (*en rouge*) et condition B: PEL-500-330-12 (*en bleu*)

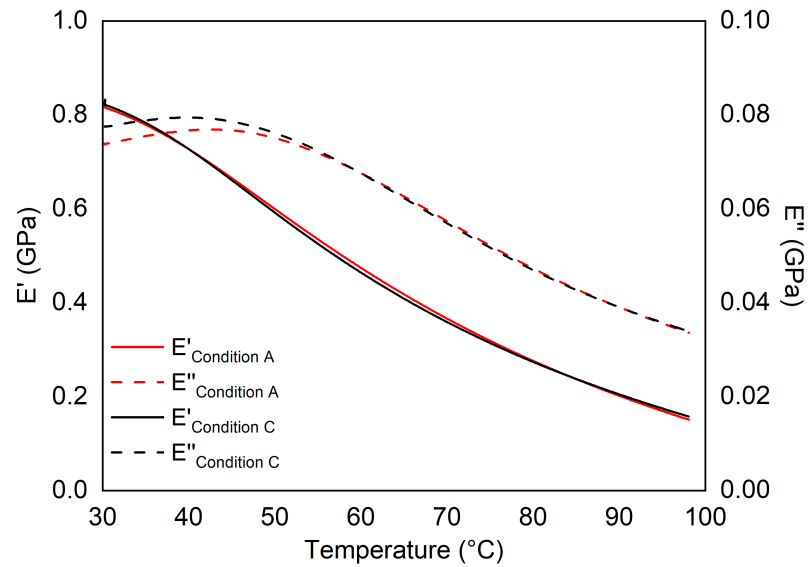


FIGURE 5.19 – Comparaison entre la condition A: PEL-500-285-12 (*en rouge*) et condition C: PEL-500-285-20 (*en noir*)



## 5.4 Propriétés mécaniques en traction

### 5.4.1 Essais de traction

Les essais de traction sont couramment utilisés pour déterminer les propriétés mécaniques ou le comportement des matériaux [61], [62]. L'essai de traction permet de déterminer certaines propriétés intrinsèques du matériau telles que: module d'Young  $E$  (Gpa), la contrainte  $\sigma$  (Mpa), la déformation  $\varepsilon$  [%] ...

La contrainte ( $\sigma$ ) est la force ( $F$ ) qui agit sur une unité de surface du matériau ( $S$ ), (équation 5.6). La contrainte détermine avec quelle intensité les atomes du matériau sont écartés les uns des autres ou comprimés les uns sur les autres.

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (5.6)$$

La déformation ( $\varepsilon$ ) est le rapport de l'allongement ( $\Delta L = L - L_o$ ) à la longueur initiale  $L_o$ , (équation 5.7). La déformation indique dans quelles proportions les liaisons inter atomiques et la structure elle-même ont été déformées.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_o} \quad (5.7)$$

L'objectif de ce test est d'évaluer les effets des paramètres de fabrication du ventilateur (masse, température et temps dans le four) par la méthode de rotomoulage sur les propriétés mécaniques et physiques du matériau, surtout avec cette méthode pour créer un ventilateur creux. Par conséquent, des critères tels que les propriétés mécaniques, la rigidité, la durabilité... qui jouent un rôle important sont étudiés. Dans la section 5.1.6, il a été montré que dans les conditions  $\Delta t_0 \geq 15$  minutes et  $T_0 \geq 285^\circ\text{C}$ , l'oxydation du polymère est mise en évidence par le contrôle des produits résultants du procédé par la méthode FTIR. Cela aura un effet certain sur les propriétés mécaniques des ventilateurs résultants. De plus, la masse de poudre utilisée affecte également la distribution de la matière fondue dans le moule, ainsi que l'épaisseur du ventilateur résultant.

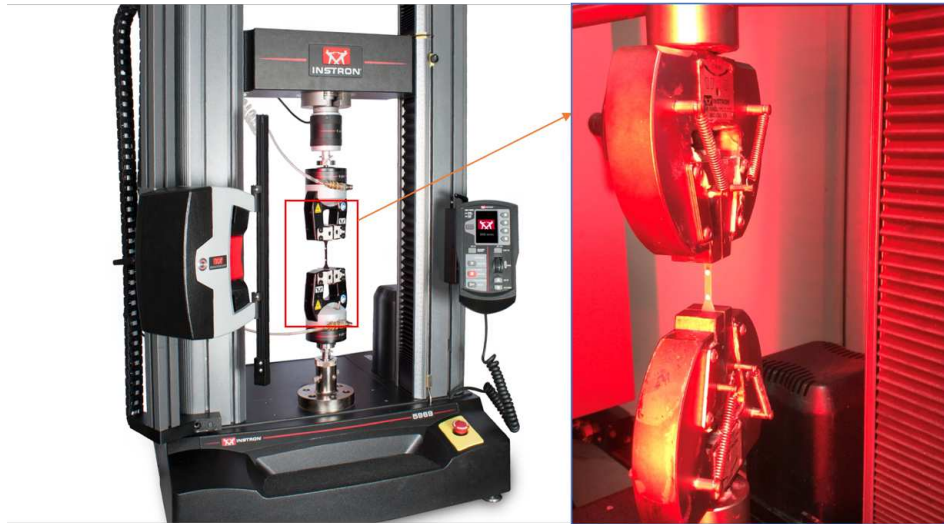


FIGURE 5.20 – Machine de traction INSTRON 5966

### 5.4.2 Description de l'essai de traction

Les échantillons ont été pris directement sur 6 pales différentes. Par conséquent, un minimum de 6 échantillons sont réalisés pour chaque ventilateur. Il existe de nombreuses normes relatives aux modèles utilisés pour différents matériaux: ISO 3167, ISO 527, ISO 6892...(Sauvage [63]). Dans cette étude, l'échantillon standard (figures 5.21 et 5.22) - ISO 6892 type3 a été utilisé pour toutes les éprouvettes. Les paramètres de géométrie standard de l'échantillon sont indiqués dans le tableau 5.1.

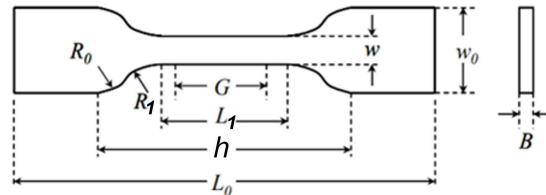


FIGURE 5.21 – Schéma de l'éprouvette standard ISO 6892-3

TABLEAU 5.1 – Paramètre géométriques de l'éprouvette standart ISO 6892-3

Paramètres de l'éprouvette	Symbole	Dimension [mm]
Largeur extrémités d'éprouvette	$w_0$	8.5
Largeur partie étroite	$W$	4
Épaisseur	$B$	1.3 - 3
Petit rayon	$R_1$	7.5
Grand rayon	$R_0$	10
Longueur de la zone calibrée	$L_1$	17
Distance initiale de la position de la mâchoire	$h$	25
Longueur d'éprouvette	$L_0$	50

Des tests ont été réalisés sur la machine INSTRON 5966 (figure 5.20). Le testeur est équipé d'une cellule 10 KN et est connecté à un ordinateur. Les données sont traitées

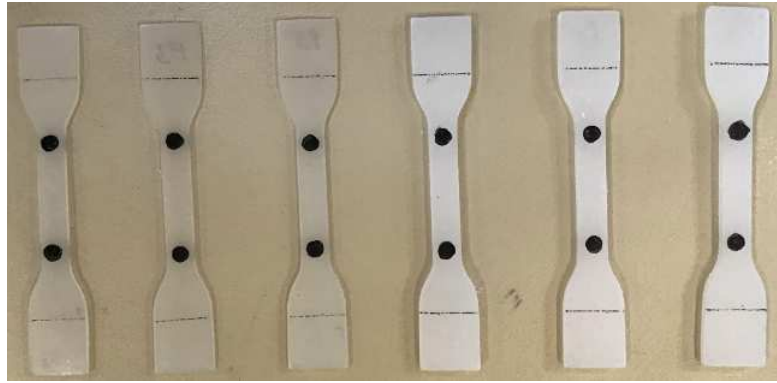


FIGURE 5.22 – Éprouvettes prélevées sur les ventilateurs rotomoulés

à l'aide du logiciel TestXpert. Au cours de ce processus, une éprouvette de dimensions standard est montée dans la machine. Une extrémité de l'éprouvette est serrée et maintenue en place et une force longitudinale est appliquée à l'autre extrémité. Le test a été réalisé à température ambiante de 20°C. La machine étire ensuite l'échantillon lentement et en continu à une vitesse de 5 mm/min jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement cassé. Les contraintes des éprouvettes dues à l'effet de la tension sont enregistrées sur le diagramme. Sur le tracé (figure 5.23), la contrainte est représentée en fonction de l'allongement de l'éprouvette.

Le diagramme d'allongement ou le diagramme de contrainte de l'éprouvette montre quatre régions distinctes représentant les quatre différents types de résistance à la traction présentés dans la figure 5.23:

(1) Zone de déformation élastique: cette région correspond à la plus grande contrainte que le matériau peut supporter sans se déformer en permanence, lorsque l'éprouvette est étirée aux premiers stades du test. La pente initiale du tracé des contraintes de déformation est linéaire, ce qui signifie que la contrainte dans l'éprouvette est proportionnelle à la déformation appliquée. Cette première étape est considérée comme la région élastique linéaire et le matériau obéit toujours à la loi de Hooke. En regardant cette droite linéaire, la relation suivante devient plus claire: plus la ligne est grande, plus la contrainte doit être appliquée à une déformation (élastique) donnée. Cela montre que la pente est une mesure de la rigidité du matériau et est appelée module élastique (ou module d'Young).

(2) Après que l'éprouvette de matière ait traversé la zone élastique sous l'effet de la traction de la machine, l'état du matériau entre dans la zone de déformation plastique. A ce stade, le matériau de l'éprouvette est étiré au point d'être déformé en permanence. Le début de la déformation plastique se caractérise par une diminution du stress dans le court temps et puis continuer à augmenter à nouveau. La cause de ce phénomène s'explique par l'interaction entre l'accumulation atomique et la déflexion créant des

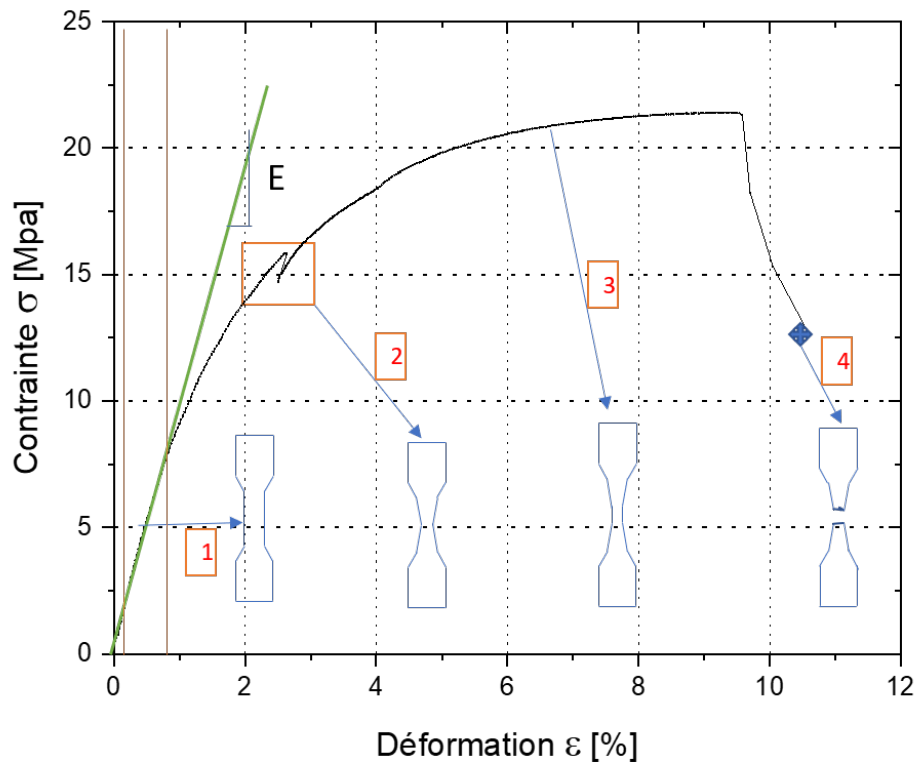


FIGURE 5.23 – Courbe contrainte-déformation d'un ventilateur PEL-500-250-12

régions d'expansion. Seulement à partir d'un certain niveau de contrainte peuvent les joints d'alignement séparés des atomes, et la déformation plastique commence soudainement. Ceci s'accompagne d'une force réduite et d'une contrainte réduite en peu de temps.

(3) Dans la zone de déformation plastique: la contrainte continue d'augmenter à nouveau pour allonger l'échantillon. Dans cette région, l'éprouvette devient très élastique car la section transversale de l'éprouvette est réduite uniformément. Cette déformation est également appelée déformation plastique homogène. Dans la région de déformation plastique, la force opposée continue d'augmenter à mesure que l'éprouvette résiste à l'allongement. Ce renforcement apparent du matériau se produit en raison d'un phénomène appelé raidissement en déformation. Pendant le durcissement par déformation, la structure cristalline microscopique du matériau subit un réarrangement permanent. La contrainte de traction va maintenant augmenter très lentement, en raison de la réduction de la section transversale de l'éprouvette. Cette contrainte augmente jusqu'à une valeur maximale avant de diminuer une fois de plus.

(4) Lorsque le niveau de contrainte et la section transversale de l'éprouvette sont dépassés, un retrait local de la section transversale de l'éprouvette se produit. Cette

région de la courbe est appelée la «zone de striction». La contrainte de traction est réduite car il y a besoin uniquement d'une force nettement plus faible pour étirer l'échantillon avec une section transversale plus petite. L'éprouvette est encore étirée jusqu'à ce qu'elle se rompt en deux morceaux séparés.

### 5.4.3 Caractéristiques du matériau

Les tests de traction permettent de déterminer les propriétés standards des matériaux, qui sont souvent requises dans les spécifications suivantes: module d'élasticité, contrainte, charge, allongement à la rupture ... Toutefois, afin d'assurer la fiabilité des résultats reçus, l'essai de traction doit prendre certaines précautions lors de l'essai de traction B. Deriquehem [64]. Les essais de traction sont garantis dans les mêmes conditions. Les résultats des essais de traction sont présentés aux figures (5.26, 5.28, 5.30), pour trois ventilateurs de masses 300g, 500g et 600g. En effet, dans la première phase, une partie de la courbe a une forme presque linéaire. Cette zone concerne des déformations élastiques et des contraintes qui obéissent à la loi de Hooke. Cette déformation est fournie par la phase amorphe et est liée à la déformation des liaisons de Van der Waals.

Les cristaux déformés sont flexibles et subissent une découpe locale de la résine dans des plans de glissement. Le durcissement plastique est en partie dû à la consolidation de cette plasticité cristalline, mais largement dû aux effets entropiques de l'orientation moléculaire dans la phase amorphe puis dans les cristaux eux-mêmes. Les figures (5.25, 5.27, 5.29) sont testées sous la même vitesse de traction de l'échantillon de 5 mm/min. Les résultats ont montré qu'il existe des différences notables dans le comportement des échantillons de test. Avec une masse de 300g, après une déformation élastique, la contrainte continue d'augmenter jusqu'à sa valeur maximale et commence à diminuer dès qu'une striction se forme jusqu'à ce que l'échantillon soit complètement cassé. Cependant, pour des masses de 500g et 600g, le phénomène de striction n'apparaît pas et l'éprouvette se brise plus rapidement. De plus, la déformation allongée des échantillons d'une masse de 300g (environ 75%) est supérieure à celle des échantillons d'une masse de 500g (environ 18%) et 600g (environ 23%). Ce résultat reflète les conditions de fabrication qui affectent les propriétés mécaniques des ventilateurs obtenus par le procédé de rotomoulage, et plus précisément, les facteurs de température et temps de chauffage dans le four. Cependant, l'expérience FTIR a montré que lorsque la température et le temps dans le four sont trop longs, l'oxydation du matériau se produit. Par conséquent, il faut optimiser ces paramètres pour limiter le degré d'oxydation.

La figure 5.24 montre les valeurs du module d'élasticité  $E$  et de la contrainte de traction maximale  $\sigma$  pour les éprouvettes de trois ventilateurs (PEL-300-285-20, PEL-

500-250-12 et PEL-600-285-12). Du point de vue de la dispersion, les résultats obtenus avec des essais de traction sur les éprouvettes montrent qu'avec une masse de 300g, le ventilateur PEL-300-285-20, présente une répartition du matériau assez homogène, car les coefficients de variation sont inférieurs à 4% et 2% respectivement pour le module d'élasticité et les contraintes finales. Comme prévu, les coefficients de variation pour les contraintes et les modules d'Young de masses 300g sont toujours inférieurs à ceux des masses de 500g et 600g. Ceci s'explique par l'effet bénéfique du processus d'homogénéisation sur les bons échantillons. Cette amélioration est particulièrement significative pour le module d'élasticité final lorsque le coefficient de variation est réduit de 8,97% (masse 500g) et 16,76% (masse 600g) à 3,81%, et le coefficient de variation de contrainte est diminué de 3,74% (500g) et 2,36% (600g) à 1,66% (300g). De plus, sur la figure 5.25, nous voyons que la position de fracture et le comportement des éprouvettes sont presque les mêmes. Cela montre que la masse de 300g dans le procédé de fabrication du ventilateur, avec ce moule, est la masse optimale à utiliser.

	PEL-300-285-20		PEL-500-250-12		PEL-600-285-12	
Pale	Module d'élasticité (E)	Contrainte Maximale ( $\sigma$ )	Module d'élasticité (E)	Contrainte Maximale ( $\sigma$ )	Module d'élasticité (E)	Contrainte Maximale ( $\sigma$ )
	Gpa	Mpa	Gpa	Mpa	Gpa	Mpa
1	0,82	18,42	1,289	21,4	1,03	19,85
2	0,75	18,48	1,183	19,92	0,67	19,67
3	0,84	17,84	1,02	20,56	0,825	19,82
4	0,81	18,64	1,301	22,19	0,89	20,59
5	0,8	18,14	1,291	20,85	0,74	19,33
6	0,82	18,04	1,178	20,63	1,01	20,41
Moyenne	0,81	18,26	1,21	20,93	0,86	19,95
Ecart-type	0,03	0,30	0,11	0,78	0,14	0,47
Coefficient de vibration	3,81	1,66	8,97	3,74	16,76	2,36

FIGURE 5.24 – Résultats de l'essai de traction de trois ventilateurs: PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12

#### 5.4.4 Influence des conditions de fabrication du ventilateur

Le test de traction permet de déterminer certaines propriétés des matériaux comme : Module d'Young  $E$  (Gpa), contrainte de traction  $\sigma$  (Mpa), déformation de déplacement  $\varepsilon$  (%) ... Pour contrôler et maîtriser le procédé de moulage par rotation, il est toujours nécessaire de faire de nouvelles recherches et d'aborder le problème sous différents angles. Dans cette étude, j'ai mentionné l'impact et l'influence des ventilateurs obtenus par des facteurs tels que le temps  $\Delta t_0$  (min), la température  $T_0$  (°C) et la masse de poudre utilisée  $m$  (g). Ces paramètres affecteront directement les propriétés physiques et chimiques du matériau et donc également les propriétés mécaniques du ventilateur. Plus précisément, le test de traction permet de déterminer les causes affectant la mécanique du produit final: défauts du produit, bulles d'air, homogénéité ... Pour évaluer l'effet de la masse, j'ai considéré trois ventilateurs réalisés pour des

conditions  $\Delta t_0 = 12$  min,  $T_0 = 285^\circ\text{C}$ , masse de poudre m: 300g, 500g, 600g - (correspondant aux codes de fabrication PEL-300-285-12, PEL-500-285-12, PEL-600-285-12 respectivement). Les résultats des essais de traction sont présentés sur la figure 5.31. L'observation de la dispersion de valeur du module  $E$  montre que le ventilateur de masse 300g est relativement homogène. Lorsque la masse de poudre dans le moule passe de 300 g à 500 g, la valeur du module  $E$  ainsi que la dispersion de cette valeur augmentent. Cependant, cette valeur  $E$  est réduite avec la masse de 600g. Dans les conditions de fabrication  $\Delta t_0 = 12$  min et  $T_0 = 285^\circ\text{C}$ , le matériau n'est pas affecté par l'oxydation. Ce problème peut donc s'expliquer par la différence d'épaisseur des éprouvettes. Les essais de traction avec des conditions de température et de temps plus élevées sont ensuite étudiés.

La figure 5.32 montre les résultats de l'essai de traction pour un changement de température de four  $T_0$  avec trois ventilateurs considérés: PEL-300-250-20, PEL-300-285-20 et PEL-300-330-20. Les résultats montrent une tendance à augmenter le module élastique  $E$  avec  $T_0$ . Cela suggère qu'il est possible que l'oxydation mise en évidence par l'analyse FTIR soit la cause de l'augmentation de cette valeur. Par conséquent, l'augmentation de la température a un effet très prononcé sur la qualité du ventilateur. Il est plus facile d'observer un changement de couleur des deux ventilateurs obtenus PEL-300-250-20 et PEL-300-330-20, mais cette analyse confirme cette première intuition

L'effet du changement de temps dans le four est montré à la figure 5.33. Les deux roues choisies sont: PEL-600-285-12 et PEL-600-285-20. Quand la température augmente de 12 min à 20 min, la valeur du module élastique ne semble pas augmenter de manière significative. Les propriétés mécaniques du matériau ne sont pas beaucoup affectées par l'augmentation du temps  $\Delta t_0$  12 à 20 min. Cependant, le changement de couleur de ces deux ventilateurs est perceptible.

### 5.4.5 Conclusion

Les résultats permettent d'évaluer l'influence des paramètres dans le procédé de fabrication sur les propriétés mécaniques des ventilateurs :

- Effet de masse ( $m$ ): Avec le même temps  $\Delta t_0 = 12$  min et  $T_0 = 285^\circ\text{C}$ , le module d'Young  $E$  a tendance à augmenter en augmentant la masse de la poudre de 300g à 500g. Cependant, cette valeur a diminué à mesure que la masse continuait d'augmenter de 500 g à 600 g.

- Effet de la température ( $T_0$ ): Les résultats montrent qu'avec la même masse de poudre en utilisant  $m = 300$ g, le temps dans le four  $\Delta t_0 = 20$  min, lors du changement de température dans le four  $T_0 = (250, 285, 330)^\circ\text{C}$ , le module d'Young a tendance à



augmenter. Cela montre l'effet de l'oxydation sur les propriétés mécaniques du matériau. Cet impact rend le matériau plus rigide, mais le matériau devient plus fragile.

- Effet du temps ( $\Delta t_0$ ): Avec deux ventilateurs réalisés avec la même masse de poudre de 600g et la température  $T_0 = 285^\circ\text{C}$ , en augmentant le temps dans le four de 12 à 20 min, le module d'Young ( $E$ ) a augmenté mais pas de manière significative.

En revanche, les résultats du test de traction montrent qu'avec une masse de poudre de 300g, le coefficient de vibration de module d'Young ( $E$ ) et la contrainte ( $\sigma$ ) sont respectivement inférieurs à 4% et 2%. De plus, les positions de rupture des éprouvettes sont presque identiques. Ceci montre que les ventilateurs sont réalisés avec une masse de poudre 300g uniformément répartie sur le ventilateur et surtout uniformément sur les 6 pales du ventilateur. Par conséquent, on peut affirmer qu'une masse de poudre 300g est la masse optimale adaptée à ce moule.



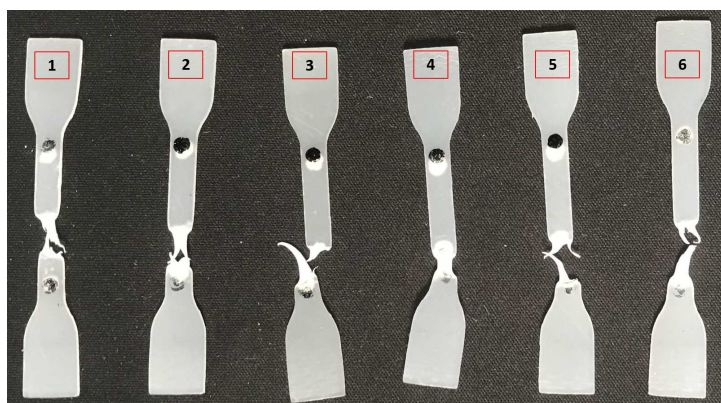


FIGURE 5.25 – Éprouvettes après essai de traction de PEL-300-285-20 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture

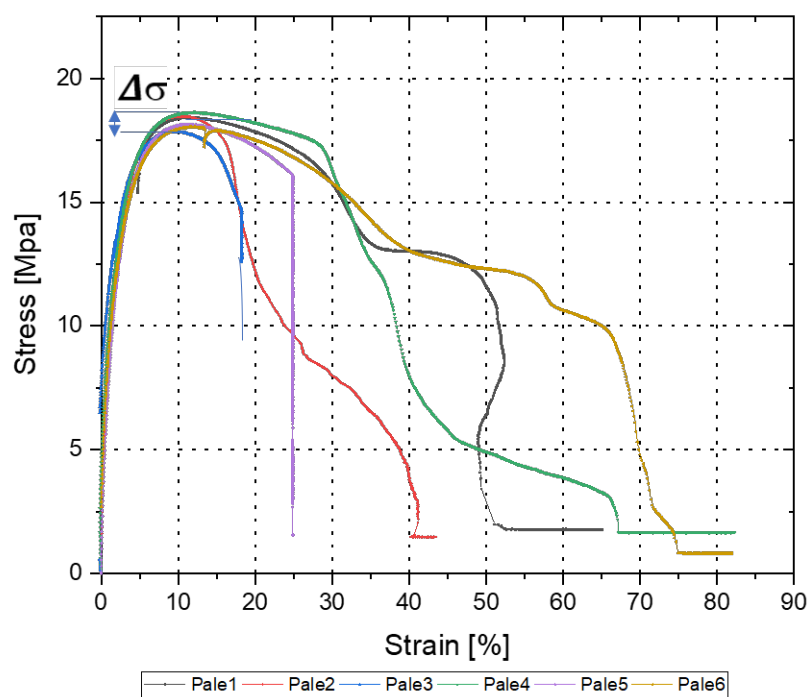


FIGURE 5.26 – Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-300-285-20

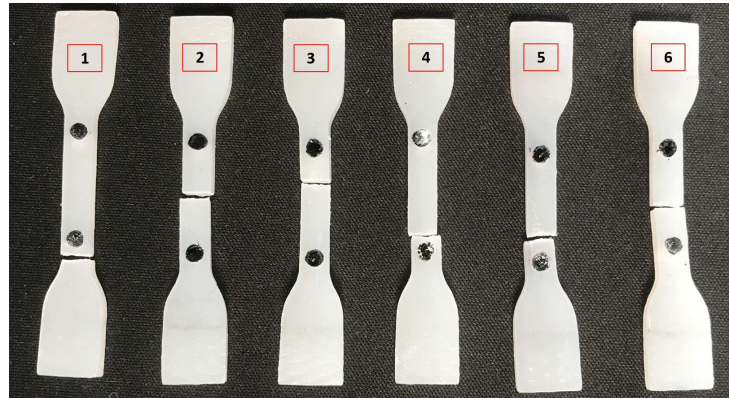


FIGURE 5.27 – Éprouvettes après essai de traction de PEL-500-250-12 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture

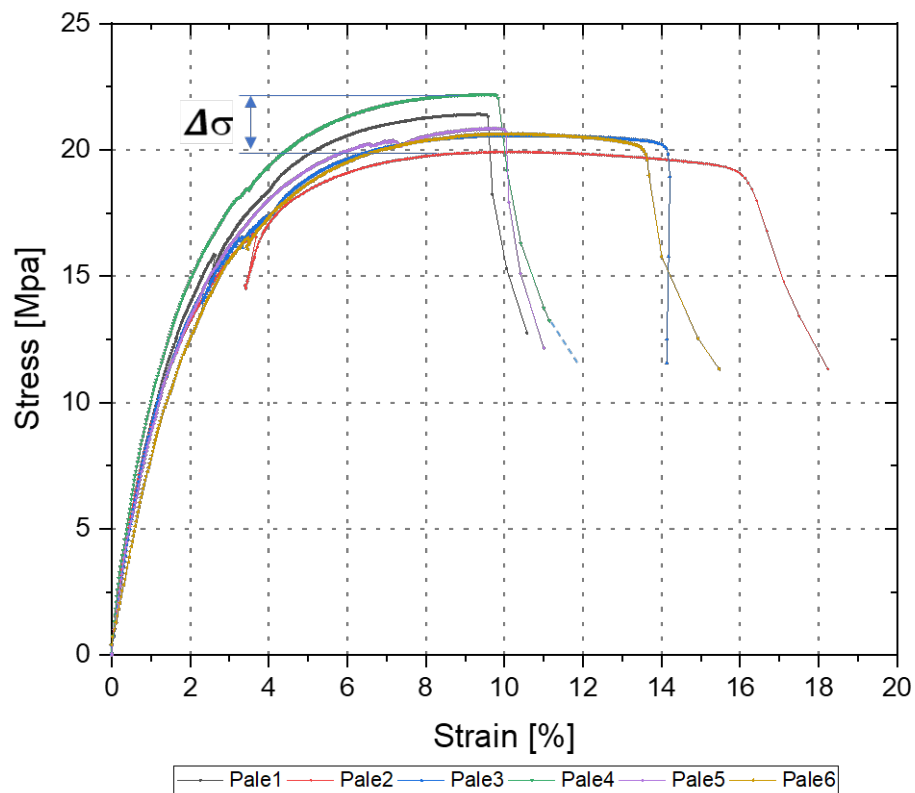


FIGURE 5.28 – Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-500-250-12

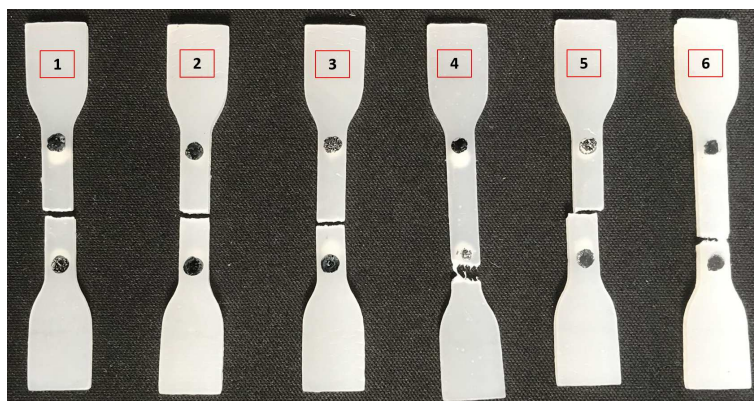


FIGURE 5.29 – Éprouvettes après essai de traction de PEL-600-250-12 sur 6 pales (pale 1, pale 2, pale 3, pale 4, pale 5, pale 6) et positions de rupture

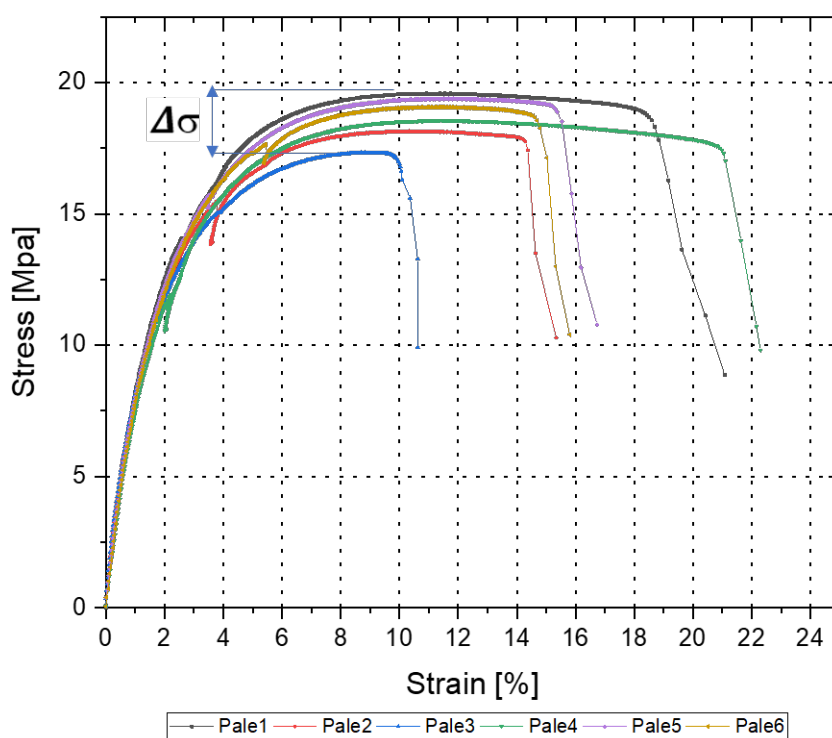


FIGURE 5.30 – Courbes de la contrainte en fonction de la déformation pour 6 pales du ventilateur PEL-600-285-12

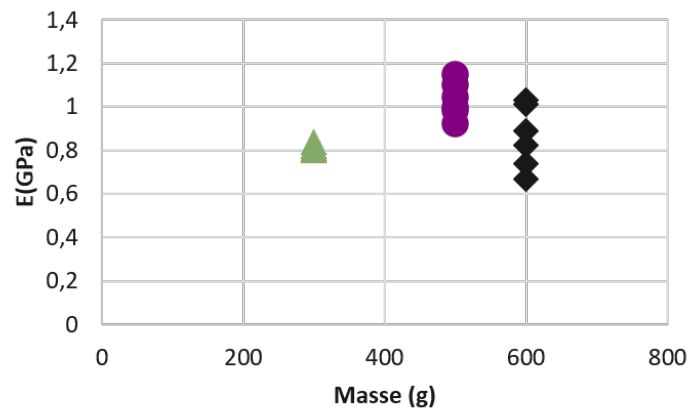


FIGURE 5.31 – Effet de la masse sur le module de Young  $E$ : comparaison entre les 3 ventilateurs: PEL-300-285-12: ▲, PEL-500-285-12: ● et PEL-600-285-12: ◆

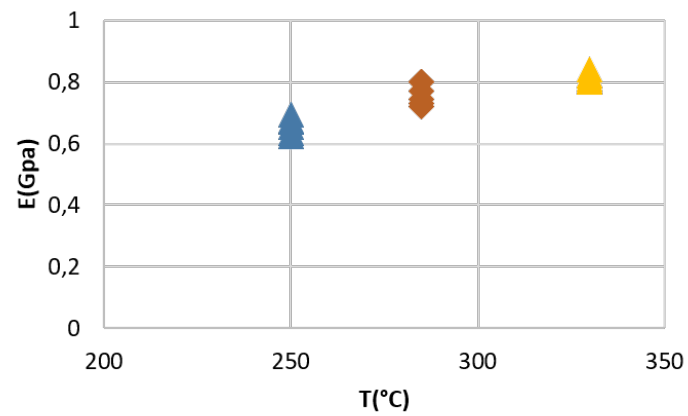


FIGURE 5.32 – Effet de la température de chauffage sur le module de Young  $E$ : comparaison entre les 3 ventilateurs: PEL-300-250-20: ▲, PEL-300-285-20: ◆ et PEL-300-330-20: ▲

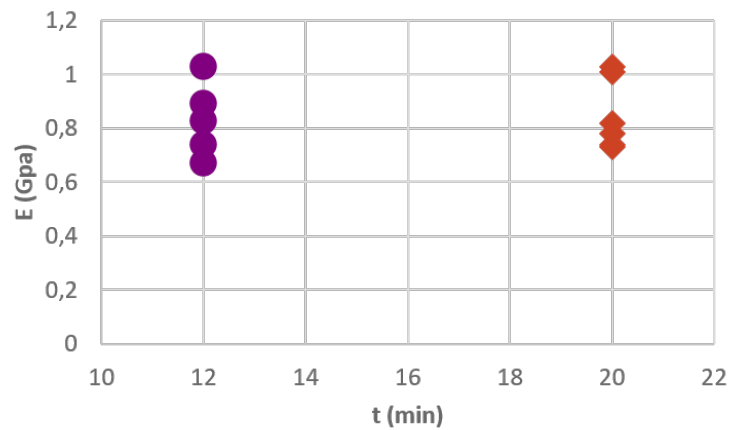


FIGURE 5.33 – Effet du temps de chauffage sur le module de Young  $E$ : comparaison entre les 2 ventilateurs PEL-600-285-12: ● et PEL-600-285-20: ◆



# Chapitre 6

## Conclusions et perspectives

### 6.1 Conclusions

Dans ce travail, j'ai changé certains paramètres de fabrication dans le procédé de rotomoulage : le temps  $\Delta t_0$ , la température  $T_0$  et la masse de poudre  $m$ , pour réaliser de nombreuses versions d'un ventilateur axial. L'objectif de l'étude était d'évaluer l'influence de ces paramètres sur les caractéristiques aérodynamiques du ventilateur obtenue. L'étude a été réalisée en collaboration entre les deux laboratoires [Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques \(LIFSE\)](#) et [Procédé et Ingénierie en Mécanique et Matériaux \(PIMM\)](#). Les étapes principales de cette étude étant:

- La fabrication des ventilateurs
- Les essais aérodynamiques des ventilateurs sur le banc d'essai normalisé iso 5801
- Les essais mécaniques et physico-chimiques

Des études antérieures ont créé des prototype de ventilateur par méthode de rotomoulage. Cependant, ces ventilateurs présentent des inconvénients : répartition inégale de la matière sur les pales, nombreux défauts (bulles d'air, bavures sur les pales), couche de matière trop fine sur le bord de fuite de la pale. Par conséquent, une campagne pour éliminer ces problèmes a été menée dans cette étude. Une nouvelle méthode de remplissage de poudre dans le moule est appliquée pour fabriquer les ventilateurs. Ainsi, il est possible d'économiser le temps de remplissage de la poudre dans le moule et d'élargir la gamme de masse de poudre à étudier.

Pour évaluer l'influence des paramètres utilisés dans le procédé de rotomoulage, les versions de ventilateurs ont été testées sur le banc d'essai standard ISO 5801. Les résultats de l'analyse ont montré une différence significative dans l'étude de la performance aérodynamique des ventilateurs. Plus précisément, entre les ventilateurs avec la même masse de poudre en utilisant  $m = (300g, 400g, 500g)$ , la plus grande différence de performance est d'environ 2,2%, la masse de 600g étant près de 3%. De plus, en

comparant tous les ventilateurs fabriqués par rotomoulage, la plus grande différence est de 6% entre les deux ventilateurs PEL-300-285-20 et PEL-600-285-12 (figure 6.1). Les résultats de l'étude montrent également qu'à température intermédiaire (285 °C) le rendement est meilleure pour les masses faibles (300g et 400g).

En revanche pour les masses plus importantes c'est mieux de retenir la température la plus élevée (330°). Pour expliquer les différence écarts de rendement de 3 ventilateurs PEL-300-285-20, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12: des défauts sur les pales (figure 4.20), les études sur l'épaisseur des 6 pales (figure 4.30), des essais de vibration (chapitre 4, section 4.7 (page 95), des essais de traction (figure 5.26, 5.24) ont été réalisés. Les résultats ont montré que l'effet de balourd dynamique du ventilateur lors de la rotation est la principale cause de cette différence. Plus le balourd est important, plus la valeur de couple sur l'arbre est élevée. Particulièrement avec les ventilateurs fabriqués avec une masse de poudre de 600g. Les valeurs de couple diminuent à mesure que la masse de poudre utilisée est progressivement réduite (figure 6.2). Le balourd mécanique du ventilateur a causé des pertes mécaniques importantes dans cette étude (figure 6.3). En outre, une comparaison du ventilateur PEL-300-285-20 avec le calcul théorique de MFT, montre que la corrélation est très bonne entre les courbes de rendement ( $\eta$ ) et de pression ( $\Delta P$ ), figure 6.4. Les résultats de l'étude montrent qu'avec une masse de 300g la répartition de la matière fondue dans le moule est bonne. Les pales des ventilateurs de masse 300g deviennent plus homogènes.

Dans un autre aspect, l'étude a également montré l'effet du retrait du matériau sur les dimensions géométriques des ventilateurs obtenues par rotomoulage. La méthode du scanner 3D est utilisée pour contrôler ce phénomène. Pour le ventilateur PEL-500-250-12, le retrait du matériau est comparé à la CAO du moule: le retrait maximal du matériau dans la longueur de la corde ( $L$ ) est de 2 – 3,5 mm, et de 1,7 mm en épaisseur  $E_{max}$ . Cependant, les résultats de comparaison de 3 ventilateurs (PEL-300-285-12, PEL-500-250-12 et PEL-600-285-12) montrent que le retrait du matériau est le même. Cela signifie qu'il n'y a pas de différence significative dans les dimensions géométriques de ces 3 ventilateurs. Ce résultat d'analyse du scanner 3D contribue également à concevoir le moule en tenant compte de l'effet du retrait du matériau.

Pour déterminer la masse minimale de poudre à utiliser avec ce moule, nous avons testé une masse de 200g. Bien que les résultats aérodynamiques obtenus soient satisfaisants, la qualité du ventilateur n'est pas garantie. En raison du manque de matière, le ventilateur est trop mince, au centre du ventilateur et les positions sur la surface de la pale comportent de nombreux trous (d'environ 1,5 mm de diamètre). Le fonctionne-

ment du ventilateur est instable, surtout lors du fonctionnement avec un grand débit, vitesse de rotation élevée, les pales se déforment facilement. Par conséquent, il est suggéré que la masse de poudre optimale à utiliser avec ce moule soit de 300g. En outre, la méthode de rotomoulage économise des matériaux et réduit les coûts par rapport à d'autres méthodes de productions traditionnelles telles que la coulée, l'estampage, le moulage par injection, l'usinage CNC (Computer Numerical Control)...

Pour évaluer l'influence des paramètres lors du rotomoulage sur les propriétés mécaniques du matériau, des analyses de traction, [Calorimétrie différentielle à balayage \(DSC\)](#), [Analyse mécanique dynamique \(DMA\)](#), [Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier \(FTIR\)](#) ont été faites. Les résultats de l'analyse FTIR ont montré que lorsque la température  $T_0 \geq 285\text{ }^{\circ}\text{C}$  et le temps dans le four  $\Delta t_0 \geq 15\text{ min}$ , l'oxydation du matériau commence à apparaître. Plus précisément, le groupe de liaison ( $C = O$ ) est observé au pic avec une fréquence de  $1720\text{ cm}^{-1}$ . Ceci explique pourquoi il y a un changement de couleur importe des ventilateurs obtenus. De plus, grâce aux résultats des tests de traction, [DSC](#), [DMA](#), il est possible d'évaluer l'influence de  $(\Delta t_0, T_0, m)$  sur les propriétés mécaniques du matériau. En effet, en augmentant la température ( $T_0$ ) et le temps ( $\Delta t_0$ ) dans le four, les valeurs du module d'Young ([E](#)) et du taux de cristallisation  $X_c$  augmentent. L'effet de l'augmentation de la température  $T_0$  (250, 285, 330)  $^{\circ}\text{C}$  sur les propriétés du matériau est plus significatif que l'allongement du temps dans le four  $\Delta t_0$  (12, 15, 20)  $\text{min}$ . Au fur et à mesure que les valeurs [E](#) et  $X_c$  augmentent, les propriétés mécaniques du matériau sont améliorées. Cependant, il convient de noter que lorsque l'oxydation se produit, elle provoquera des effets indésirables, en particulier un changement de couleur et une dégradation du matériau. L'analyse physico-chimique montre que le procédé de rotomoulage est adapté à la condition  $T_0 = 285\text{ }^{\circ}\text{C}$  et au temps passé dans le four  $\Delta t_0 = 15\text{ min}$ .



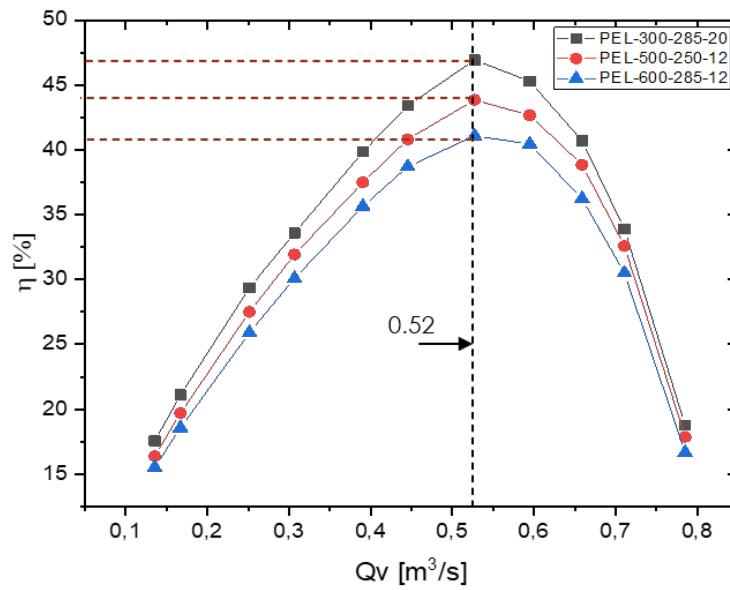


FIGURE 6.1 – Rendement statique en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (■-), PEL-500-250-12 (●-) et PEL-600-285-12 (▲-)

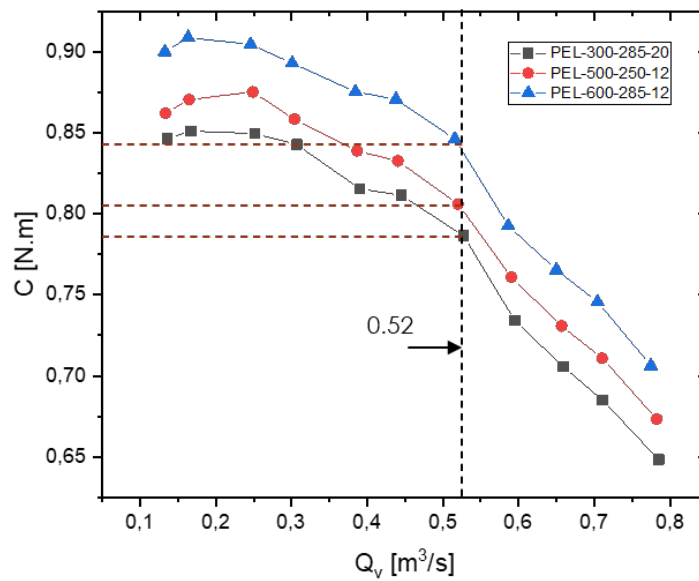


FIGURE 6.2 – Couple en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (■-), PEL-500-250-12 (●-) et PEL-600-285-12 (▲-)

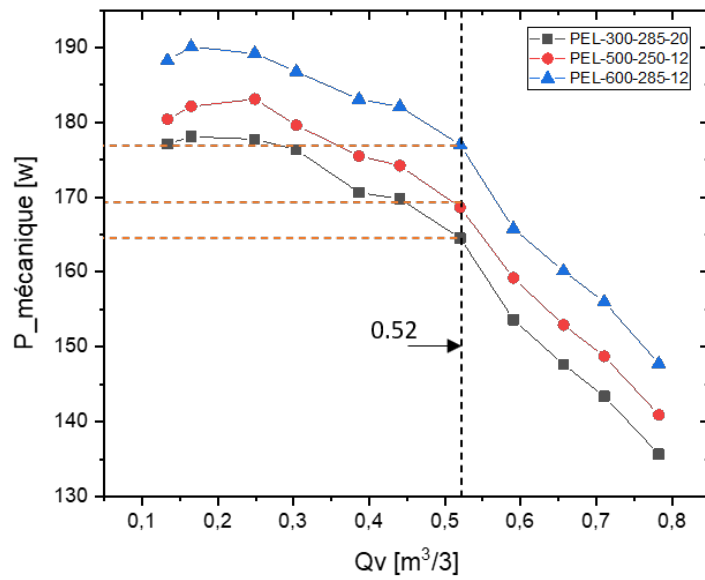


FIGURE 6.3 – Puissance mécanique en fonction du débit de 3 ventilateurs PEL-300-285-20 (-■-), PEL-500-250-12 (-●-) et PEL-600-285-12 (-▲-)

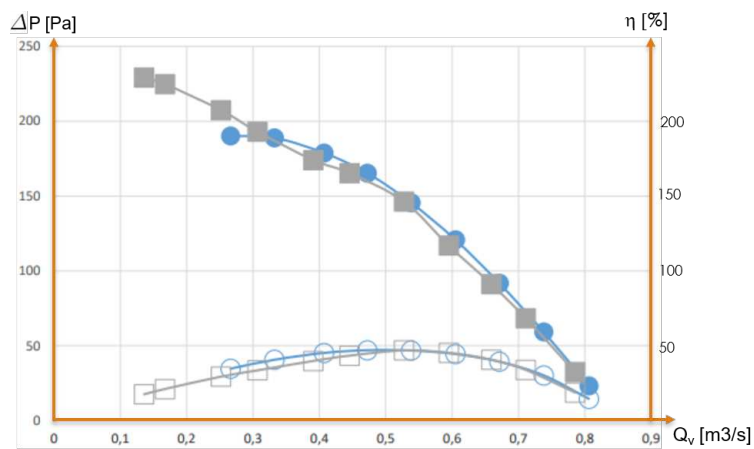


FIGURE 6.4 – Les résultats du ventilateur PEL-300-285-20 (-■-) corrélient assez bien avec ceux donné par les calculs MFT-3D (-●-)

## 6.2 Perspectives

Au terme de ces recherches, il en ressort quelques perspectives qui mériteraient notre attention dans les années futures. Cette thèse s'inscrit dans un dynamique de recherche sur un sujet dans lequel encore des questions restent en suspens. Voici quelques points intéressants constituant une liste non exhaustive:

- La procédé de rotomoulage est de plus en plus utilisé dans de nombreux domaines de l'industrie. Dans le cas des turbomachines, il serait donc intéressant de tester d'autres matériaux utilisés en rotomoulage, comme par exemple le polyuréthane, le **LLDPE** (polyéthylène base densité linéaire), ou encore des matériaux biosourcés. Ces derniers ayant l'avantage d'être recyclables.
- A la différence d'une roue métallique usinée, la roue rotomoulée en plastique présente une certaine souplesse. En effet, les pales peuvent se déformer (flexion) sous l'effet de la rotation. Il aurait été judicieux de se pencher sur une étude interaction fluide/structure. Les phénomènes d'aéro-élasticité peuvent jouer un rôle important dans les performances de la machine.
- Évaluer l'effet de la concavité de la virole à la périphérie du ventilateur sur la dissipation énergétique. En effet, entre le ventilateur et le bâti, la rotation engendre une couche cisaillement où la machine dissipe par viscosité (figure 6.5).

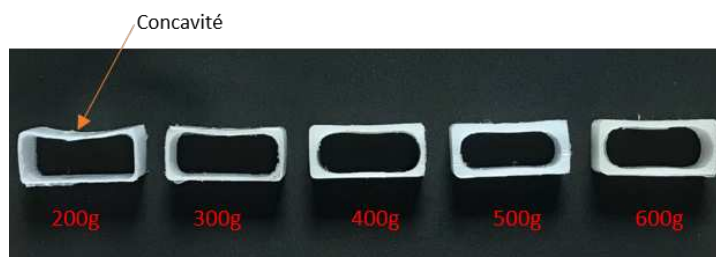


FIGURE 6.5 – Effet de la concavité sur la dissipation énergétique dans la couche de cisaillement

- D'après Michael Pereira *et al* [65], il est possible d'améliorer les performances du ventilateur axial en modifiant l'écoulement dans le jeu entre le carter et la virole. Les pièces rotomoulées sont creuses. En conséquence, un contrôle actif est envisageable, en injectant de l'air comprimé au centre du ventilateur, dans les pales, pour sortir au travers des trous de la virole. L'inconvénient d'un tel système est qu'il demande un apport d'énergie pour injecter l'air. L'ajout d'une roue centrifuge au niveau du moyeu permettrait de guider l'écoulement dans les

pales de manière passive. Afin de vérifier cela, j'ai dessiné une roue centrifuge, pour la tester dans une pré-étude numérique par simulation CFD (figure 6.6).

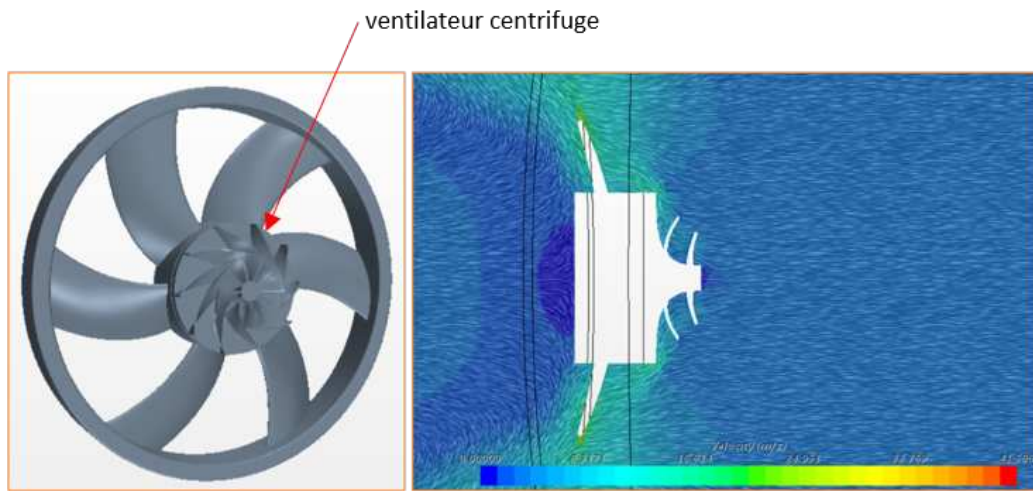


FIGURE 6.6 – Simulation CFD d'un ventilateur axial avec système de pré-rotation par roue centrifuge

- La mesure du champ de vitesse en aval du fan, a été faite en utilisant un tube Pitot de précision. Cela permet d'obtenir la composante axiale du champ de vitesse. Toutefois, afin de caractériser au mieux la morphologie de l'écoulement, nous pourrions envisager d'utiliser d'autres instruments de mesures tridimensionnelles, tels que: la stéréo-PIV (Particle Image Velocimetry), la LDV (Laser Doppler Velocimetry) ou encore les fils chauds (figure 6.7).

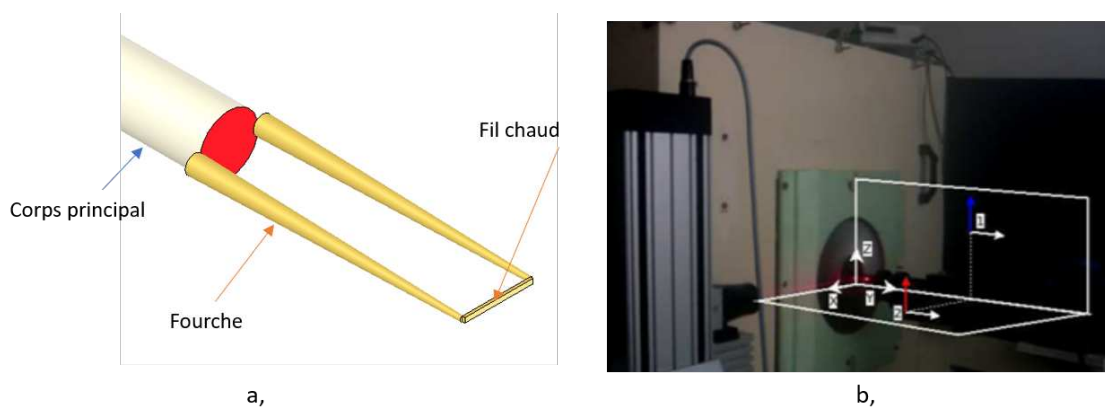


FIGURE 6.7 – Appareil de mesure de vitesse avec fil chaud (a); LDV (b) [13]

- Concernant le procédé de fabrication en lui même, le temps de refroidissement ou encore la vitesse de rotation des deux axes de la machine, n'ont pas été abordés. Dans une prochaine étude, il pourra être intéressant de se pencher sur ces paramètres de fabrication. Il est possible également d'envisager une autre géométrie de turbomachine. Pour un même matériau et un même procédé, les conclusions

de cette présente thèse sont ils encore valides pour un autre type de turbomachine.

- Nous avons étudié la microstructure du matériau obtenu après fabrication. Toutefois, d'un point de vue plus global, les performances aérodynamiques sont corrélées à l'état de surface de la pale. Il serait donc intéressant d'étudier la rugosité de la pièce finale en fonction des paramètres du procédé de fabrication.
- Pour étudier l'impact des paramètres d'un procédé de fabrication sur les performances d'une machine, il faut beaucoup d'essais expérimentaux... Dans notre cas, 45 ventilateurs (pour une géométrie) ont été nécessaires pour étudier 3 paramètres. Ainsi, si nous voulions tirer davantage de conclusions et de lois d'évolution, il nous faudrait constituer une base importante de données expérimentales. Dit autrement, rentrer dans le domaine du "*Machine learning*" semble intéressant pour ce type de recherche.

# Références

- [1] Roy James Crawford and James L Throne. *Rotational molding technology*. William Andrew, 2001. [vii](#), [3](#)
- [2] RJ Crawford, AG Spence, MC Cramez, and MJ Oliveira. Mould pressure control in rotational moulding. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 218(12):1683–1693, 2004. [vii](#), [3](#), [4](#)
- [3] M Eberlinc, B Širok, M Hočevár, M Dular, and Slovenian Intellectual Property Office. Axial turbine machine hollow blade with internal and external flow field. *The Slovenian Intellectual Property Office, Patent No. P*, 200700271, 2007. [vii](#), [6](#)
- [4] Matjaz Eberlinc, Brane Sirok, and Marko Hocevar. Patented hollow blades of the axial fan with trailing edge self-induced blowing. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2(1):1–7, 2009. [vii](#), [6](#)
- [5] M Dolores Marrero, Pedro Hernández, Luis Suárez, David Pestana, Antonio Benítez, José Martín, Silvia Rivero, and Estela Calero. Rotational molding applied to the manufacturing of blades of small wind turbine. In *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014. [vii](#), [6](#), [7](#)
- [6] J Hurault, S Kouidri, F Bakir, and R Rey. Experimental and numerical study of the sweep effect on three-dimensional flow downstream of axial flow fans. *Flow measurement and instrumentation*, 21(2):155–165, 2010. [vii](#), [6](#), [7](#), [16](#)
- [7] Gerald Kergourlay, Smaïne Kouidri, Gary W Rankin, and Robert Rey. Experimental investigation of the 3d unsteady flow field downstream of axial fans. *Flow Measurement and Instrumentation*, 17(5):303–314, 2006. [vii](#), [6](#), [7](#), [16](#)
- [8] Tarik Azzam. Aérodynamique et contrôle de l’écoulement de jeu dans un ventilateur axial obtenu par rotomoulage., Thèse de doctorat, Ecole nationale supérieure d’arts et métiers - ENSAM, 2018. [vii](#), [7](#), [8](#), [31](#), [117](#)
- [9] Albert Lucas, Amélie Danlos, Mohammadali Shirinbayan, Vajihe Motaharinejad, Richard Paridaens, Khaled Benfriha, Farid Bakir, and Abbas Tcharkhtchi.

- Conventional rotational molding process and aerodynamic characteristics of an axial-flow hollow blades rotor. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 104(1):1183–1194, 2019. [viii](#), [5](#), [8](#), [21](#), [29](#), [30](#), [31](#), [61](#), [82](#)
- [10] Roy J Crawford. *Practical guide to rotational moulding*. Smithers Rapra, 2012. [viii](#), [2](#), [26](#), [29](#), [86](#)
- [11] Abbas Tcharkhtchi and Jacques Verdu. Structure-processibility relationships during rotational moulding of plastics. *Advanced Engineering Materials*, 6(12):983–992, 2004. [viii](#), [27](#)
- [12] John Coates. Interpretation of infrared spectra, a practical approach. *Encyclopedia of analytical chemistry: applications, theory and instrumentation*, 2006. [xi](#), [104](#), [105](#)
- [13] Christophe Sarraf, Hussain Nouri, Florent Ravelet, and Farid Bakir. Experimental study of blade thickness effects on the overall and local performances of a controlled vortex designed axial-flow fan. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(4):684–693, 2011. [xiii](#), [145](#)
- [14] RJ Crawford and Susan Gibson. Rotational molding: the basics for designers. *Rotoworld*, March-April, 2006. [1](#)
- [15] Roy James Crawford and Roy James Crawford. *Rotational moulding of plastics*, volume 2. Research Studies PressLtd, 1996. [1](#)
- [16] I Zonszain. Rotomoulage peu connu mais performant. *Plastiques Modernes et élastomères*, 50(9):36–39, 1998. [1](#)
- [17] MJ Oliveira and MC Cramez. Rotational molding of polyolefins: Processing, morphology, and properties. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 40(3-4):457–471, 2001. [1](#)
- [18] Mark Kearns and RJ Crawford. Practical guide to rotational moulding. 2003. [2](#)
- [19] M Narkis, M Puterman, H Boneh, and S Kenig. Rotational molding of thermosetting three-phase syntactic foams. *Polymer Engineering & Science*, 22(7):417–421, 1982. [2](#)
- [20] A Tcharkhtchi. Mechanism of foaming during rotational moulding. In *3rd Pan European Conference on Rotational Molding*, 2004. [2](#)
- [21] L Xu and RJ Crawford. Analysis of the formation and removal of gas bubbles in rotationally moulded thermoplastics. *Journal of materials science*, 28(8):2067–2074, 1993. [3](#)

- [22] L Xu and RJ Crawford. Analysis of bubble size in rotationally moulded products. *Mater. Engrs*, 16:27–40, 1996. [3](#)
- [23] AG Spence and RJ Crawford. Simulated bubble removal under pressurised rotational moulding conditions. *Rotation*, 4(3):17–23, 1995. [3](#)
- [24] AG Spence and RJ Crawford. The effect of processing variables on the formation and removal of bubbles in rotationally molded products. *Polymer Engineering & Science*, 36(7):993–1009, 1996. [4](#)
- [25] C MacKinnon. Venting in rotational moulding—another perspective. *Rotation*, 9(1):40–44, 2000. [4](#)
- [26] P Nugent. Venting of molds for rotational molding. In *Proceedings of the 20th Annual Spring Association of Rotational Molders (ARM) Meeting, Orlando, Florida*, 1996. [4](#)
- [27] A Greco, A Maffezzoli, and J Vlachopoulos. Simulation of heat transfer during rotational molding. *Advances in Polymer Technology: Journal of the Polymer Processing Institute*, 22(4):271–279, 2003. [5](#)
- [28] Mohamad Zaki Abdullah, S Bickerton, and D Bhattacharyya. Rotational molding cycle time reduction through surface enhanced molds: Part a—theoretical study. *Polymer Engineering & Science*, 47(9):1406–1419, 2007. [5](#)
- [29] Mohamad Zaki Abdullah, Simon Bickerton, Debes Bhattacharyya, RJ Crawford, and Eileen Harkin-Jones. Rotational molding cycle time reduction using a combination of physical techniques. *Polymer Engineering & Science*, 49(9):1846–1854, 2009. [5](#)
- [30] PL Ramkumar, Sachin D Waigaonkar, and DM Kulkarni. Effect of oven residence time on mechanical properties in rotomoulding of lldpe. *Sāadhanā*, 41(5):571–582, 2016. [5](#)
- [31] Estelle Pérot. Optimisation et modélisation du procédé de rotomoulage. *Thèse de doctorat, INSA de Lyon*, 2006. [5](#)
- [32] E Perot, Khalid Lamnawar, and Abderrahim Maazouz. Optimization and modelling of rotational molding process. *International Journal of Material Forming*, 1(1):783–786, 2008. [5](#)
- [33] Sylvain Riviere. Optimisation et simulation du rotomoulage réactif, 2012, Thèse de doctorat, Paris, ENSAM. [5](#)



- [34] Matjaž Eberlinc, Brane Širok, and Marko Hočevár. Experimental investigation of the interaction of two flows on the axial fan hollow blades by flow visualization and hot-wire anemometry. *Experimental thermal and fluid science*, 33(5):929–937, 2009. [6](#)
- [35] Tarik Azzam, Richard Paridaens, Florent Ravelet, Sofiane Khelladi, Hamid Oualli, and Farid Bakir. Experimental investigation of an actively controlled automotive cooling fan using steady air injection in the leakage gap. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 231(1):59–67, 2017. [7](#), [8](#)
- [36] Kamel Azzouz, Farid Bakir, and Sofiane Khelladi. Motor-fan assembly comprising a hydraulic heat transfer fluid cooling circuit, June 6 2019. US Patent App. 16/081,679. [8](#)
- [37] RJ Crawford. Recent advances in the manufacture of plastic products by rotomoulding. *Journal of materials processing technology*, 56(1-4):263–271, 1996. [8](#)
- [38] Victoria Pellicer Sifres. Conception et qualification de ventilateurs de refroidissement par rotomoulage, . Thèse de doctorat, 2013. [8](#), [15](#), [18](#), [94](#)
- [39] B Cann. *Conception de qualification de ventilateurs de refroidissement par rotomoulage. Mémoire de Master IMCE*. Arts et Métiers, 2009. [8](#), [18](#)
- [40] Robert Rey. Méthode générale de détermination d’un étage de turbomachine axiale de compression (fluide incompressible). 1981. [14](#)
- [41] Farid Bakir. *Méthode de dimensionnement et d’analyse des machines de compression hélico-centrifuges en régime incompressible*. PhD thesis, Paris, ENSAM, 1992. [14](#)
- [42] Eastman Nixon Jacobs, Kenneth Edwards Ward, and Robert McLean Pinkerton. *The Characteristics of 78 related airfoil section from tests in the Variable-Density Wind Tunnel*. Number 460. US Government Printing Office, 1933. [14](#)
- [43] R Noguera, R Rey, F Massouh, and F Bakir. Design and analysis of axial flow pumps. *ASME-PUBLICATIONS-FED*, 154:95–95, 1993. [14](#)
- [44] HB Squire and KG Winter. The secondary flow in a cascade of airfoils in a nonuniform stream. *Journal of the Aeronautical Sciences*, 18(4):271–277, 1951. [14](#)
- [45] Gérard BOIS. Turbomachines: calcul des écoulements incompressibles modélisation. *Techniques de l’ingénieur. Génie mécanique*, (BM4219), 2008. [14](#)

- [46] Benjamin Pardowitz, Antoine Moreau, Ulf Tapken, and Lars Enghardt. Experimental identification of rotating instability of an axial fan with shrouded rotor. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 229(5):520–528, 2015. 15
- [47] M Martinez. *Procédé innovant dans la conception de ventilateurs de refroidissement moteur automobile: Amélioration et qualification du process de rotomoulage. Mémoire de Master IMCE*. Arts et Métiers, 2009. 18
- [48] A Hoff and S Jacobsson. Thermo-oxidative degradation of low-density polyethylene close to industrial processing conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, 26(10):3409–3423, 1981. 28, 105
- [49] NFEN ISO. 5801 (2007),“. *Ventilateurs industriels—Essais aérauliques sur circuit normalisés*, 2007. 37
- [50] Lili Ma, Tianmin Xu, and Jiuxiang Lin. Validation of a three-dimensional facial scanning system based on structured light techniques. *Computer methods and programs in biomedicine*, 94(3):290–298, 2009. 49
- [51] Seth M Weinberg, Sybill Naidoo, Daniel P Govier, Rick A Martin, Alex A Kane, and Mary L Marazita. Anthropometric precision and accuracy of digital three-dimensional photogrammetry: comparing the genex and 3dmd imaging systems with one another and with direct anthropometry. *Journal of Craniofacial Surgery*, 17(3):477–483, 2006. 49
- [52] COMETL3D. <http://optotechnik.zeiss.com/en/products/3dscanning/comet-l3d>. 49
- [53] Michal Varchola, Tomáš Bielik, and Peter Hlbocan. Methodology of 3d hydraulic design of a impeller of axial turbo machine. *Engineering Mechanics*, 20(2):107–118, 2013. 53
- [54] David Dureisseix. *Exercices de dynamique et vibration mécanique*. PhD thesis, Université Montpellier 2, 2010. 56
- [55] F Bakir, S Kouidri, R Noguera, and R Rey. Design and analysis of axial inducers performances. In *ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting. Washington DC, USA*, 1998. 60
- [56] Abdelkader AZIZI. Etude par spectroscopie infrarouge et raman de la transition de phase dans le picrate de pyridine, Thèse de doctorat, Université 08 Mai 1945 de Guelma, 2016. 104

- [57] KG Pachler, F Matlok, and HU Gremlich. Merck ft-ir atlas: Eine sammlung von ft-ir-spektren teil i/ii a collection of ft-ir spectra. 105
- [58] Tsuyoshi Furukawa, Harumi Sato, Yasuo Kita, Kimihiro Matsukawa, Hiroshi Yamaguchi, Shukichi Ochiai, Heinz W Siesler, and Yukihiro Ozaki. Molecular structure, crystallinity and morphology of polyethylene/polypropylene blends studied by raman mapping, scanning electron microscopy, wide angle x-ray diffraction, and differential scanning calorimetry. *Polymer journal*, 38(11):1127–1136, 2006. 115
- [59] Tahir Ahmed and Othman Mamat. The development and characterization of hdpe-silica sand nanoparticles composites. In *2011 IEEE Colloquium on Humanities, Science and Engineering*, pages 6–11. IEEE, 2011. 115
- [60] Sridhar Alapati, Joy Thomas Meledath, and Ajay Karmarkar. Effect of morphology on electrical treeing in low density polyethylene nanocomposites. *IET Science, Measurement & Technology*, 8(2):60–68, 2014. 115
- [61] Joseph R Davis. *Tensile testing*. ASM international, 2004. 126
- [62] Marc Blétry. Méthodes de caractérisation mécanique des matériaux. *École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2006-2007)*, 2006. 126
- [63] Jean-Baptiste Sauvage. Caractérisation et modélisation de l’adhérence dans les assemblages collés, Thèse de doctorat, Université de Haute-Alsace, 2016. 127
- [64] Bernard Deriquehem. *Pratique des plastiques et composites: choix, contrôle, production, qualité*. Dunod, 2000. 130
- [65] Michael Pereira, Florent Ravelet, Kamel Azzouz, Tarik Azzam, Hamid Oualli, Smaine Kouidri, and Farid Bakir. Improved aerodynamics of a hollow-blade axial flow fan by controlling the leakage flow rate by air injection at the rotating shroud. In *13th International Conference on Computational Heat Mass and Momentum Transfer (ICCHMT 2021)*, 2021. 144

# Annexes A

## Liste des acronymes

**DMA** Analyse mécanique dynamique. [v](#), [xii](#), [10](#), [103](#), [122–125](#), [141](#)

**DSC** Calorimétrie différentielle à balayage. [v](#), [xii](#), [10](#), [26](#), [115–117](#), [120](#), [141](#)

**FTIR** Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier. [v](#), [10](#), [84](#), [103](#), [104](#), [109](#), [117](#), [126](#), [130](#), [132](#), [141](#)

**LDPE** Polyéthylène base densité. [viii](#), [20](#), [21](#), [26](#), [28](#), [30](#), [105](#), [123](#)

**LHPE** Polyéthylène haute densité. [viii](#), [26](#)

**LIFSE** Laboratoire d'Ingénierie des Fluides et des Systèmes Énergétiques. [14](#), [37](#), [57](#), [95](#), [139](#)

**LLDPE** Polyéthylène base densité linéaire. [144](#)

**MFT** Mixed-Flow Turbomachinery 3D. [14](#), [16](#), [140](#)

**PE** Polyéthylène. [88](#), [115](#)

**PIMM** Procédé et Ingénierie en Mécanique et Matériaux. [23](#), [105](#), [139](#)

**TGA** Analyse thermogravimétrique. [viii](#), [26](#)



# Annexes B

## Liste des symboles

$\gamma$  Angle de calage. [xi](#), [17](#), [50](#), [57](#), [90–92](#)

$\alpha$  Angle de serrage. [50](#), [54](#)

$\phi$  Coefficient de débit. [ix](#), [x](#), [59](#), [60](#), [68–70](#), [75](#), [76](#), [79](#), [80](#), [99](#)

$\psi$  Coefficient de pression. [ix](#), [x](#), [59](#), [60](#), [68–70](#), [75](#), [76](#), [79](#), [80](#)

$\varepsilon$  Déformation de déplacement, %. [122](#), [126](#), [131](#)

$T_0$  Température du four. [viii–xii](#), [21](#), [28](#), [30](#), [31](#), [60](#), [61](#), [66](#), [68](#), [82](#), [83](#), [85](#), [95–98](#), [101](#), [106–110](#), [114](#), [117](#), [118](#), [120](#), [123](#), [124](#), [126](#), [131–133](#), [139](#), [141](#)

$h$  Distance initiale de la position de la mâchoire, *mm*. [127](#)

$d$  Diamètre intérieur du diaphragme, *m*. [39](#), [41](#)

$\Delta H_c$  Enthalpie de point de cristallisation, *J/g*. [115](#)

$\Delta H_f$  Enthalpie de point de fusion, *J/g*. [115](#)

$B$  Epaisseur d'échantillon, *mm*. [127](#)

$E_{max}$  Epaisseur maximale de pale, *mm*. [xi](#), [50](#), [53](#), [54](#), [57](#), [89–91](#), [140](#)

**K** Facteur diffusion en pied et en périphérie de ventilateur. [17](#)

$R_0$  Grande rayon, *mm*. [127](#)

$D$  Hauteur du caisson, *m*. [38](#), [39](#)

$z$  La direction axiale. [54](#)

$r$  La direction radiale. [54](#)

$F$  La force de traction. [126](#)

$W$  Largeur partie étroite, *mm*. [127](#)

$w_0$  Largeur extrémités d'éprouvette, *mm*. [127](#)

- $S$  La surface d'échantillon. 126
- $\bar{V}$  Valeur moyenne de la vibration. 56, 96, 97
- $\sigma$  Contrainte,  $Mpa$ . 122, 126, 130, 131, 133
- $L$  corde,  $mm$ . xi, 17, 50, 54, 57, 88–90, 92, 140
- $t$  Le pas entre deux pales dans une grille d'aube,  $mm$ . 54
- $m$  Masse,  $g$ . 28, 30, 68, 70, 82, 85, 101, 106, 131, 132, 139, 141
- $L_1$  Longueur de la zone calibrée,  $mm$ . 127
- $L_0$  Longueur d'éprouvette,  $mm$ . 127
- $\delta$  Angle de phase. 122
- $E''$  Module de perte. 123
- $E'$  Module de stockage. 123
- $\rho$  Masse volumique,  $kg/m^3$ . 28, 40
- $E$  Module de Young,  $Gpa$ . xiii, 10, 122, 126, 130–133, 137, 141
- $Re$  Nombre de Reynolds. ix, 60
- $R_1$  Petite rayon,  $mm$ . 127
- $R_{max}$  Rayon périphérique de la pale,  $mm$ . 17
- $R_{min}$  Rayon au pied de la pale,  $mm$ . 17
- $\eta$  Rendement statique. ix, x, 59, 60, 68, 79, 80, 140
- $N$  Vitesse de rotation,  $tr/min$ . 56
- $R$  Rayon de pale,  $mm$ . 17
- $s$  Surface intérieur du moule,  $mm$ . 28
- $T_c$  Température de cristallisation. xii, 26, 115, 117–119, 121
- $X_c$  Taux de cristallisation. xii, 10, 39, 70, 115, 117, 118, 120, 141
- $T_D$  Température de dégradation. 27
- $\Delta t_0$  Temps dans le four. viii–xii, 21, 28, 30, 31, 60, 61, 66, 68, 82, 83, 85, 95–98, 101, 106–110, 114, 117, 118, 120, 123, 124, 126, 131–133, 139, 141
- $\Delta t_r$  Temps de refroidissement. 28, 30, 82
- $T_f$  Température de fusion. xii, 26, 27, 115, 117–119, 121
- $T_g$  Température de transition vitreuse. 27
- $\mu$  Viscosité dynamique,  $Pa.s$ . 41





**Résumé :** L'objectif de la présente thèse est d'étudier l'influence des paramètres du procédé de rotomoulage (masse de poudre du polymère, température dans le four, temps de cuisson) sur les caractéristiques aérodynamiques d'un ventilateur axial. Les résultats des campagnes d'essais révèlent des différences significatives sur l'efficacité aérodynamique des ventilateurs. Sur une étude d'un panel de 45 ventilateurs des écarts de performances de l'ordre de 6% sont mesurés. Point notable, ces différences sont fortement corrélées à la masse de poudre de polymère utilisée pour la fabrication. Pour justifier ces écarts, une première approche a été de s'assurer du contrôle qualité de la géométrie de la pièce fabriquée (notamment au niveau des aubes: calage, corde et épaisseur) par méthode de scanner 3D. Enfin, à partir de l'analyse mécanique et physico-chimique du matériau de l'ensemble des échantillons, nous avons pu expliquer ces écarts de rendement. A la lumière des résultats présentés dans cette thèse, nous pouvons mieux comprendre le comportement d'une turbomachine axiale selon ses paramètres de fabrication. Ce travail contribue à l'optimisation du procédé et également à ouvrir de nouvelles directions de recherche dans le domaine du rotomoulage, notamment appliqué aux turbomachines.

**Mots-clés :** Aérodynamique, Mécanique, Matériau, Physico-chimie, énergétique, rendement, turbomachine, ventilateur axial, procédé fabrication, rotomoulage, contrôle, optimisation.

**Abstract :** This thesis aims to study the influence of the parameters of the rotational molding process (mass of polymer powder, temperature, time in the oven) on the aerodynamic characteristics of an axial fan. The results of the test campaigns reveal significant differences in the aerodynamic efficiency of the fans. In a study in which 45 fans were surveyed, the efficiency deviation was 6%. Strikingly, these discriminations are strongly correlated with the mass of polymer powder used in manufacturing. In order to shed light on these differentiations, the first method was to ensure the quality control of the geometry of the manufactured part, especially at the level of the blades, like wedging, chord, and thickness, by 3D scanning methods. Finally, we elaborated on these differences in inefficiency from the mechanical and physicochemical analysis of the material samples. In the light of the results presented in this thesis, we can better understand the behavior of an axial turbomachine according to its manufacturing parameters. This work contributes to optimizing the process and opens up new research directions in rotational casting, specifically the application for turbine rotary machines.

**Keywords :** Aérodynamique, Mécanique, Matériau, Physico-chimie, énergétique, rendement, turbomachinery, ventilateur axial, procédé fabrication, rotomoulage, contrôle, optimisation