

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Hassiba Benbouali CHLEF

Faculté des Technologies

Département de génie mécanique



Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER EN GÉNIE MÉCANIQUE

Spécialité : ÉNERGÉTTQUE

Par

TAHAR BELKACEM Fodhil

TIAB Radhouane

Thème :

Etude d'un nouveau diffuseur appliqué au système de conditionnement d'air dans les voitures

Soutenu le 23/06/2025 Devant le jury composé de :

BENBRIK Mohamed

MCB

Président

ZERROUT Amar

Professeur

Examinateur

DEKKICHE Ahmed

MCB

Examinateur

KHELIL Ali

Professeur

Encadreur

Année Universitaire 2024-2025



Remerciement

*Nous adressons en premier lieu notre reconnaissance à notre DIEU le Miséricordieux, de nous a donné le courage, la force, la santé et la persistance. Nous remercions vivement, Notre encadreur monsieur **KHELIL Ali**, pour avoir accepté de nous encadrer et d'assurer la direction de ce travail, pour nous avoir apporté la rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, et pour leur soutien et leur infinie gentillesse.*

*Nous adressons également notre sincère gratitude aux drs **FELLAGUE CHEBRA Abdelhak** et **KESOUL Karim**, ainsi qu'aux frères **RAHALI Abdellah** et **ZIDANE Toufik** et sœur **MAYGA Assia**.*

L'ensemble des enseignants de l'université hassiba ben Bouali qui ont contribué à notre formation durant les 5 années particulièrement ceux de l'option énergétique chacun son nom. Toute personne qui nous a aidé de loin

Dédicace

À ma très **chère maman**, qui a toujours été là pour moi et qui m'a toujours soutenue et encouragée dans les décisions que j'ai prise. Merci pour ta patience je t'en serai éternellement reconnaissante.

À **mon père**, mon pilier, mon modèle, ma fierté. Je tiens à te remercier du plus profond de mon cœur pour tous tes encouragements afin de me dépasser et d'aller toujours plus loin. J'espère t'avoir fait honneur avec mon modeste travail.

À mes chers frères **et mes chers** sœurs qui sont un soutien indéfectible quel que soit la situation.

À tous mes amis, on particulier **YOUCEF** et **OUSSAMA** , mes frères de cœur, ainsi qu'à toute ma belle-famille.

À toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Je dédie ce travail

FODHIL

Louange à Allah, en premier et en dernier, de l'extérieur et de l'intérieur, par Sa grâce les bonnes œuvres s'accomplissent, et c'est avec Son aide et Sa faveur que ce travail a pu être réalisé.

À ma chère mère et à mon défunt père, dont les prières ont illuminé mon chemin.
Qu'Allah fasse miséricorde à mon père et récompense ma mère pour tout son amour et ses sacrifices.

À mes frères et sœurs bien-aimés, mon soutien dans cette vie, merci pour votre amour et votre présence constante.

À mon honorable Cheikh, l'imam de notre mosquée, qui n'a cessé de nous guider avec ses conseils sages, qu'Allah le récompense généreusement et bénisse son savoir et sa vie.

À tous mes amis fidèles, et en particulier à **Fodhil** et **Oussama**, merci pour votre soutien indéfectible et votre amitié sincère.

Je vous dédie humblement le fruit de ce modeste travail, en signe de reconnaissance, de fidélité et d'amour.

RADHOUANE



SOMMAIRE

Table des matières

Introduction générale	2
Problématique	3
Objectifs de la recherche.....	4
Les hypothèses	5
Démarche et méthodologie	6
I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA CLIMATISATION.....	8
I.1. Introduction	8
I.2. Définition et objectif de la climatisation automobile	9
I.2. Historique de la climatisation automobile	9
I.2.1. Interdiction Progressive de l'Utilisation du R-134a (2006-2017).....	10
Renforcement des Restrictions sur la Recharge de HCFC (2010).....	10
I.2.3. Application Complète de l'Interdiction du R-134a (2017)	10
I.2.4. Adoption Croissante du R-1234yf (2020)	10
I.2.5. Adoption du R-1234yf comme Norme Industrielle (2023)	11
I.2.6. Prévisions pour 2025 : Le R-1234yf comme Référence Industrielle Mondiale	11
I.3. Constituants d'une climatisation automobile.....	11
I.3.1. Compresseur	12
I.3.2. Condenseur	13
I.3.3. Détendeur.....	14
I.3.4. Évaporateur.....	15
I.3.5. Bouteille déshydratante.....	16
I.3.5. Fluide frigorigène	16
I.4. Principe de fonctionnement de la climatisation automobile.....	17
I.5. Le système de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) - le circuit d'air pulsé .	18

I.5.1. Le pulseur électrique.....	19
I.5.2. Le mixage d'air.....	20
I.6. Utilisation et maintenance d'une climatisation automobile.....	24
I.6.1. Utilisation	24
I.6.2. Entretien.....	24
I.6.3. Dépannage	24
I.6.4. Evolution	24
I.6.5. Impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile.....	25
Conclusion	26
II. CHAPITRE II : COCEPTION D'UN DIFFUSEUR AVEC LE SOLIDWORKS	28
II.1. Introduction	28
II.6.2. Représentation schématique des deux pièces.....	28
II.3. Création d'une pièce sur SolidWorks.....	29
II.4. Diffuseur de géométrie circulaire.....	30
II.4. Diffuseur de géométrie Lobé.....	38
II.5. Diffuseur de géométrie Tourbillonnaire	47
II.6. Conclusion.....	61
III. CHAPITRE III : L'ETUDE EXPERIMENTALE.....	63
III.1. Introduction	63
III.2. Installation expérimentale	64
III.3. Conclusion	73
IV. CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DU TRAVAIL EXPERIMENTALE.....	75
IV.1. Introduction.....	75
IV.2. Calcul des profils de vitesse 2	76

IV.2.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 2 axiale).....	76
IV.2.2. Les graphes de la Vitesse 02 radiale (A-J).....	77
IV.2.3. Interprétation de la Vitesse 2 radiale	78
IV.3. Calcul des profils de vitesse 3	80
IV.3.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 3 axiale).....	80
IV.3.2. Commentaire.....	80
IV.3.3. Les graphes de la vitesse 03 radiale.....	81
IV.3.4. Interprétation de la Vitesse 03 radiale	82
IV.4. Calcul des profils de vitesse 4	84
IV.4.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 4 axiale).....	84
IV.4.2. Commentaire.....	84
IV.4.3. Les graphes de la Vitesse 4 radiale.....	85
IV.4.4. Conclusion	88
IV.5. Interprétation globale des résultats et synthèse.....	89
V. Conclusion générale.....	92
Référence bibliographique	95

Résumé

Ce mémoire explore la conception d'un diffuseur d'air innovant pour les systèmes de climatisation automobile, en vue d'optimiser la répartition du flux d'air dans l'habitacle. La démarche combine modélisation 3D sous SolidWorks, impression additive, et validation expérimentale sur banc d'essai. L'analyse met en évidence une homogénéisation du jet d'air et une réduction des pertes d'énergies. Les résultats démontrent l'impact direct de la géométrie du diffuseur sur les performances aérauliques, améliorant le confort thermique et l'efficacité énergétique du véhicule.

ملخص

تأوه هذا البحث تصي وتقي أشز هاء يتنز خصص نظاً تنف اسبارث، بهذف تحس انتسع اشعاع بيجه ايهائ داخو القصرة. ت اعتاد هج يعدد انزاحو شو النجت اثلاثت الأبعاد باستخداً SolidWorks، وانتصع عز اطباعث ثلاثت الأبعاد، ت اجزاء تجارب خيزت دقت عي بل اختبار. أظهرت اتحابو اشنو ايهس اجند ض تغط هائت يجاست، قيو لفقذ اطاقبي، وعنس انفاء احزارت. تسبط انائج انضء عي اعلاقت ب اتص انرفسج ياشز والأداء انان ايهائ بيظاً، إ ن اتص راحت انزمام وتقيو استهلاك اطاقث

Abstract

This research investigates the design of an innovative air diffuser tailored for automotive air conditioning systems to enhance radial airflow distribution within the cabin. A structured methodology combines 3D modeling via SolidWorks, additive manufacturing, and experimental validation on a test bench. Results highlight improved aerodynamic uniformity, reduced pressure losses, and enhanced thermal efficiency. The study demonstrates the critical role of diffuser geometry in optimizing in-cabin comfort and minimizing energy consumption, establishing a direct link between design innovation and HVAC performance.

NOMENCLATURE

u	Composante axiale de la vitesse [m.s ⁻¹]
U	vitesse maximal [m.s ⁻¹]
D	Diamètre de la buse du jet, [m]
F	Fréquence, [Hz]
CIR	Circulaire
LOB	Lobé
TOUR	Tourbillonnaire
SG	Sans grille

Liste des figures

- ✓ Figure I.1 : Schéma des éléments d'un système de climatisation automobile12
- ✓ Figure I.2 : Représentative d'un Compresseur..... 13
- ✓ Figure I.3 : Représentative d'un Condenseur..... 14
- ✓ Figure I.4 : Représentative d'un Détendeur thermostatique15
- ✓ Figure I.5 : Représentative d'un Détendeur thermostatique Évaporateur..... 15
- ✓ Figure I.6 : Représentative d'une Bouteille déshydratante 16
- ✓ .
- ✓ Figure I.7 : Représentative du Principe de fonctionnement du cycle de climatisation automobile..... 17
- ✓ Figure I.8 : Représentative Schématisation du système HVAC automobile 19
- ✓ Figure I.9 : Représentative d'une Vue d'un boîtier HVAC automobile 19
- ✓ Figure I.10 : Représentative d'un Pulseur d'air habitacle..... 19
- ✓ Figure I.11 : Schématisation de l'association du circuit de refroidissement du moteur avec une boucle de climatisation automobile 20
- ✓ Figure I.12 : Représentative des conduits de l'air habitacle21
- ✓ Figure I.13 : Représentative des différents modes de distribution de l'air dans l'habitacle..... 22
- ✓ Figure I.14 : Représentative d'un Diffuseur d'air 23

✓ Figure II.1 : Représentative du Résultat de rectangle sur le plan	30
✓ Figure II.2 : Représentative des dimensions du rectangle	31
✓ Figure II.3 : Représentative d'un Bossage avec révolution	32
✓ Figure II.4 : Représentative du Bossage avec les deux directions	32
✓ Figure II.5 : Représentative des Dessins un cercle dans le rectangle.....	33
✓ Figure II.6 : Représentative du résultat actuel	33
✓ Figure II.7 : Représentative des Répétitions linéaires.....	34
✓ Figure II.8 : Représentative du Résultat Répétitions linéaires.....	34
✓ Figure II.9 : Représentative des Répétitions circulaires.....	35
✓ Figure II.10 : Représentative du Résultat répétition linéaire	35
✓ Figure II.11 : Représentative des Cliques sur la mise en plan.....	36
✓ Figure II.12 : Représentative d'un Schéma pour la géométrie du circulaire -	36
✓ Figure II.13 : Représentative de la Géométrie du circulaire en 3D	37
✓ Figure II.14 : Représentative d'un Enregistrement de la pièce au format STL -	37

✓ Figure II.15 : Représentative d'un Esquisse d'un carré avec perçage central sous SolidWorks	38
✓ Figure II.16 : Représentative d'un Design d'un cercle au centre du rectangle -	38
✓ Figure II.17 : Représentative d'un Perçage central de 9 mm de profondeur par enlèvement de matière extrudé.....	39
✓ Figure II.18 : Représentative du Résultat trou central extrudé de 9 mm de profondeur -	39
✓ Figure II.19 : Représentative d'un Opération de répétition linéaire	40
✓ Figure II.20 : Représentative d'une Opération de répétition circulaire	40
✓ Figure II.21 : Représentative du Résultat actuel.....	41
✓ Figure II.22 : Représentative d'une Création d'un nouveau plan parallèle au plan de face.....	41
✓ Figure II.23 : Représentative d'une Opération symétrique d'une ligne par rapport à l'axe	42
✓ Figure II.24 : Représentative des dimensions lobées dans le plan extérieur -	42
✓ Figure II.25 : Représentative d'une Répétition circulaire de l'arc.....	43
✓ Figure II.26 : Représentative de Répétition linéaire de lobé.....	44

✓ Figure II.27 : Représentative d'une Répétition circulaire de lobé dans le plan 01 -	44
✓ Figure II.28 : Représentative d'un Enlèvement de matière par lissage	45
✓ Figure II.29 : Représentative d'un Enlèvement de matière par extrusion de 1 mm -	45
✓ Figure II.30 : Représentative du résultat final du diffuseur pour la géométrie lobée -	46
✓ Figure II.31 : Représentative des Cliquons sur mise en plan.....	46
✓ Figure II.32 : Représentative d'un Schéma pour la géométrie de lobé -	47
✓ Figure II.33 : Représentative d'une Géométrie lobée en 3D	47
✓ Figure II.34 : Représentative d'un cercle au centre du dessin	48
✓ Figure II.35 : Représentative d'un nouveau plan.....	49
✓ Figure II.36 : Représentative d'une Création du nouveau plan parallèle au plan de face -	49
✓ Figure II.37 : Représentative d'une Ligne de construction.....	50
✓ Figure II.38 : Représentative d'une Opération symétrique d'une ligne par rapport à l'axe	50
✓ Figure II.39 : Représentative des dimensions des ailettes	51

✓ Figure II.40 : Représentative de Dessiner de l'arc.....	51
✓ Figure II.41 : Représentative d'Effacer les parties du cercle.....	52
✓ Figure II.42 : Représentative de Bossage extrudé d'ailette	52
✓ Figure II.43 : Représentative de l'étape de rotations des ailettes.....	53
✓ Figure II.44 : Représentative de l'ailette du jet tourbillonnaire	53
✓ Figure II.45 : Représentative de la Répétition circulaire des ailettes.....	54
✓ Figure II.46 : Représentative du dessin de la forme d'ailette dans l'hub.....	54
✓ Figure II.47 : Représentative de la construction de l'hub du jet tourbillonnaire par bossage extrudé.....	55
✓ Figure II.48 : Représentative du Résultat final du jet tourbillonnaire centrale.....	55
✓ Figure II.49 : Représentative de la Répétition linéaire	56
✓ Figure II.50 : Représentative de la création d'un cercle autour des ailettes -	56
✓ Figure II.51 : Représentative de la Répétition linéaire des cercles.....	57
✓ Figure II.52 : Représentative du résultat final de la répétition circulaire.....	57
✓ Figure II.53 : Représentative de la répétition circulaire d'opération de bossage du cercle.....	58

✓ Figure II.54 : Représentative du Bossage extrudé au bord extérieur	58
✓ Figure II.55 : Représentative Schéma de la géométrie tourbillonnaire.....	59
✓ Figure 2 .56 : représentative Géométrie tourbillonnaire en 3	59
✓ Figure 2 .57 : Enregistrements du fichier sous le format STL.....	60
✓ Figure 2 .58 : représentative Schéma de la géométrie tourbillonnaire.....	60
✓ Figure III.1 : Schéma descriptif de l'installation expérimentale.....	65
✓ Figure III.2 : Conception de la station de mesure.....	66
✓ Figure III.3 : Image réelle du panneau en plexiglas conçu et installé.....	67
✓ Figure III.4 : Anémomètre Type Velecicalc Plus Air Velocity-Meter	67
✓ Figure III.5 : Image d'un Nid d'abeille.....	69
✓ Figure III.6 : Diffuseurs conçus.....	69
✓ Figure III.7 : Aspirateur et Souffleur 2 en 1 800W TOTAL TB2086	70
✓ Figure N° III.8 Représentative d'un Perceuse à Colonne ADAM.....	71

Liste des tableaux

- ✓ Tableau I.1 Impact du système de climatisation.....9



Introduction générale.



Introduction générale

Le confort thermique dans les véhicules automobiles constitue aujourd'hui un critère déterminant de performance, tant du point de vue de l'utilisateur que du constructeur. Dans un contexte marqué par l'évolution constante des normes de qualité, de sécurité et de consommation énergétique, les systèmes de conditionnement d'air jouent un rôle crucial dans l'optimisation du bien-être à bord. Ces systèmes, autrefois limités à des fonctions de base comme le refroidissement ou le chauffage, sont désormais conçus pour assurer une régulation intelligente, homogène et dynamique de la température, de l'humidité, et surtout de la distribution de l'air.

Or, l'un des défis majeurs de ces systèmes reste la répartition efficace du flux d'air dans l'habitacle. Une mauvaise orientation ou une distribution inégale du flux peut entraîner des zones de surchauffe ou de sous-refroidissement, une perception d'inconfort chez les passagers, voire une augmentation inutile de la charge thermique, et donc de la consommation énergétique du système. À ce niveau, la performance des diffuseurs d'air devient déterminante. Leur géométrie, leur positionnement, ainsi que leur capacité à orienter et moduler le jet d'air conditionné conditionnent directement l'efficacité globale du système.

Les diffuseurs conventionnels, souvent conçus selon des standards anciens, montrent aujourd'hui des limites notables en matière de couverture tridimensionnelle de l'espace intérieur et de flexibilité de distribution. D'où l'intérêt de concevoir de nouvelles architectures de diffuseurs, basées sur une approche multidirectionnelle, tenant compte à la fois des critères aérodynamiques, énergétiques, et ergonomiques.

Problématique

Malgré les avancées dans les systèmes de climatisation automobile, la distribution de l'air dans l'habitacle reste souvent irrégulière, entraînant un inconfort thermique et une surconsommation d'énergie. Les diffuseurs classiques montrent des limites en termes de couverture spatiale et d'efficacité de direction du flux d'air.

Dès lors, la question centrale de ce mémoire est la suivante :

Comment concevoir un nouveau diffuseur capable d'améliorer la répartition de l'air tout en optimisant le confort thermique et la performance énergétique du système de climatisation ?

Objectifs de la recherche

Ce travail vise à :

Concevoir un nouveau modèle de diffuseur pour systèmes de climatisation automobile ;

Optimiser la diffusion de l'air dans l'habitacle pour garantir une meilleure homogénéité thermique

Réduire la consommation énergétique liée au fonctionnement du système ;

Évaluer les performances réelles du diffuseur à travers une étude expérimentale et une analyse précise des résultats.

Les hypothèses

Une géométrie innovante du diffuseur pourrait améliorer la couverture volumétrique de l'air soufflé.

La distribution homogène de l'air entraîne une amélioration du confort thermique perçu

Un bon positionnement et un bon angle de diffusion pourraient réduire les pertes de charge et améliorer le rendement global du système.

Démarche et méthodologie

Pour répondre à cette problématique, nous avons adopté une méthodologie complète combinant conception assistée par ordinateur, fabrication, expérimentation physique, et analyse numérique. Ce mémoire est structuré en quatre chapitres :

1. Le premier chapitre présente une généralité et une analyse bibliographique sur les systèmes de climatisation automobile, ainsi que les différents types de diffuseurs existants dans les véhicules actuels.
2. Le deuxième chapitre décrit les étapes de la conception du nouveau diffuseur, depuis la modélisation 3D à l'aide du logiciel SolidWorks jusqu'à la réalisation physique via une imprimante 3D.
3. Le troisième chapitre est consacré à l'étude expérimentale de la distribution de l'air, réalisée sur un banc d'essai, dans le but d'évaluer les performances aérodynamiques des différentes configurations testées
4. Enfin, le quatrième chapitre présente les résultats issus de l'expérimentation, qui ont été analysés et comparés à l'aide du logiciel ORIGIN, afin d'interpréter les données, d'évaluer les performances et de déterminer la configuration optimale du diffuseur.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LA

CLIMATISATION

AUTOMOBILE

I. CHAPITRE I : GENERALITE SUR LA CLIMATISATION

I.1. Introduction

Dans un véhicule automobile, nous disposons habituellement : du chauffage et de l'aération.

Le but de l'air conditionné est de maintenir une température constante programmée, soit par un apport d'air froid ou d'air chaud, soit par un mixage de ces éléments. Simultanément le degré d'humidité sera abaissé. La climatisation participe largement au confort, au comportement de conduite et à la sécurité des passagers par :

- Une meilleure visibilité à la suite de l'assèchement de l'air réduisant les formations de buées
- Une vigilance accrue du conducteur par une température contrôlée qui engendre une diminution de la fatigue ;
- Une sensation de bien-être des occupants du véhicule occasionné par une ambiance d'air agréable.

La mesure climatique cumulative comprend : la température, l'humidité et le mouvement de l'air, ainsi que les radiations thermiques. Une bonne connaissance théorique et pratique d'un système de climatisation est nécessaire pour pouvoir intervenir correctement, soit au cours de la première installation, soit à l'occasion de l'entretien périodique ou encore lors d'une intervention de maintenance par suite d'une anomalie constatée.

La climatisation est un système permettant de maintenir l'atmosphère d'un milieu à une pression, un degré d'humidité et une température choisie. L'air conditionné est un air auquel on a affecté une température et un degré d'humidité déterminés. L'hygrométrie détermine le degré d'humidité dans l'air atmosphérique.

La réfrigération est un abaissement programmé de la température du milieu (production de froid).¹

I.2. Définition et objectif de la climatisation automobile

La climatisation automobile est le processus par lequel l'air est refroidi, nettoyé et déshumidifié avant d'entrer, ou ré-entrer l'habitacle du véhicule. Principalement, un système de conditionnement d'air élimine la chaleur de l'habitacle en l'absorbant et le portant à l'extérieur. La climatisation automobile est l'ensemble des moyens permettant de maintenir l'atmosphère de l'habitacle à une pression, à un degré d'humidité et à une température donnée. Alors, l'objectif principal étant d'assurer la visibilité, la vigilance et le confort thermique à bord du véhicule.²

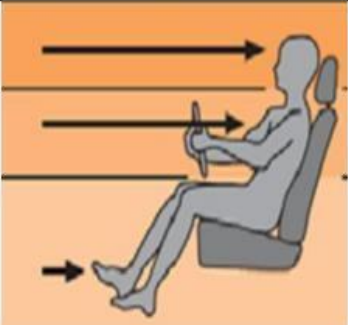
Zone		Avec climatisation	Sans climatisation
Tête		23 °C	42 °C
Milieu		24 °C	40 °C
Pieds		28 °C	35 °C

Tableau I.1 Impact du système de climatisation³

I.2. Historique de la climatisation automobile :

Pour le rafraîchissement des boissons, les civilisations grecques et égyptiennes utilisaient l'effet d'évaporation de l'eau à travers les vases et les jarres poreux. C'est au XIXème siècle que sont apparues les premières machines frigorifiques à compression de fluide.

2000 : Depuis le 31/12/2000, les distributeurs de réfrigérant ont interdiction totale de vente de CFC R12.

- 2006 : Limitation du taux de fuite de la boucle froide (40g/an pour simple boucle et 60 g/an pour double boucle).
- 2006 : Interdiction de l'utilisation du R-134a à partir de 2008 pour les nouveaux types et 2017 pour tous les types de véhicule.

- 2010 : Au 1 janvier 2010, pour l'ensemble du parc de climatisation existant, limitation du taux de rechargement en HCFC vierge à une valeur maximale de 2,5%.³

1.2.1. Interdiction Progressive de l'Utilisation du R-134a (2006-2017)

Il a été décidé en 2006 d'interdire l'utilisation du gaz R-134a dans les nouvelles voitures à partir de 2008, avec une interdiction généralisée pour tous les véhicules en 2017. Cette décision a été prise après qu'il est devenu évident que le R-134a, bien que moins nocif pour la couche d'ozone que les CFC, possède un PRG élevé (environ 1430), ce qui en fait un contributeur au réchauffement climatique. Cette interdiction a incité le secteur industriel à rechercher des alternatives plus respectueuses de l'environnement, accélérant ainsi le rythme de l'innovation dans le domaine des gaz réfrigérants.⁴

Renforcement des Restrictions sur la Recharge de HCFC (2010)

À partir de 2010, le taux de recharge des gaz HCFC dans les systèmes existants a été limité à un maximum de 2,5 %. Les gaz HCFC (tels que le R-22) étaient considérés comme des alternatives transitoires entre les CFC et les alternatives plus sûres, mais ils restent nocifs pour l'ozone et ont un PRG relativement élevé. Ce renforcement faisait partie d'un plan progressif visant à retirer ces gaz du marché et à les remplacer par des alternatives plus conformes aux exigences environnementales.⁵

1.2.3. Application Complète de l'Interdiction du R-134a (2017)

En 2017, la mise en œuvre complète de l'interdiction d'utiliser le R-134a dans toutes les nouvelles voitures en Europe a été achevée. Cette décision a marqué un tournant majeur, car il est devenu impératif pour tous les constructeurs d'adopter de nouvelles solutions respectueuses de l'environnement dans les systèmes de climatisation, ce qui a accéléré l'adoption de nouveaux gaz à faible impact environnemental.⁶

1.2.4. Adoption Croissante du R-1234yf (2020)

En 2020, l'adoption du gaz R-1234yf dans les systèmes de climatisation automobile a commencé à augmenter. Ce gaz se caractérise par un PRG très faible (inférieur à 1), une décomposition rapide dans l'atmosphère et une absence d'impact sur la couche d'ozone. Cette transition est une réponse directe aux pressions réglementaires et environnementales, et

reflète également la réaction du secteur industriel aux tendances mondiales vers des technologies plus durables.⁷

1.2.5. Adoption du R-1234yf comme Norme Industrielle (2023)

En 2023, le R-1234yf est devenu le choix standard de la plupart des constructeurs automobiles. Cette adoption généralisée est le résultat de la conformité de ce gaz aux exigences d'efficacité et de sécurité environnementale, ainsi que de sa disponibilité sur les marchés et de son acceptation par les consommateurs et les constructeurs automobiles.⁸

1.2.6. Prévisions pour 2025 : Le R-1234yf comme Référence Industrielle

Mondiale

On prévoit que d'ici 2025, le R-1234yf deviendra le gaz réfrigérant de référence dans l'industrie automobile mondiale, grâce à sa compatibilité environnementale et à sa conformité aux normes internationales. Cette tendance reflète la maturité de l'industrie dans la gestion des défis environnementaux et souligne l'importance de l'innovation durable face aux changements climatiques.⁹

Conclusion Analytique

Ces étapes montrent comment l'évolution de la climatisation automobile n'a pas été uniquement le résultat du progrès technologique, mais aussi une réponse directe aux réglementations internationales et aux pressions environnementales. Les cadres juridiques, tels que le Protocole de Montréal et les réglementations européennes, ont joué un rôle central en orientant l'industrie vers des solutions moins dommageables pour l'environnement, en mettant l'accent sur la réduction des émissions de gaz à fort impact sur le réchauffement climatique et la protection de la couche d'ozone. L'adoption du gaz R-1234yf est le couronnement de ces efforts et constitue un exemple concret de la réussite des politiques environnementales à stimuler l'innovation industrielle vers la durabilité.

I.3. Constituants d'une climatisation automobile

Le Système de climatisation automobile est basé sur le cycle à compression de vapeur, en particulier, les cycles à compression de gaz sont à la base de la presque-totalité des systèmes de climatisation automobile. Ce cycle dont la technologie est assez bien maîtrisée,

est composé de quatre phases (compression, condensation, détente et évaporation) qui correspondent aux quatre composants principaux de ce système : un compresseur, un condenseur, un détendeur et un évaporateur. Un réfrigérant ou fluide frigorigène est utilisé pour mettre en contact ces quatre éléments et former ainsi un cycle continu.¹⁰

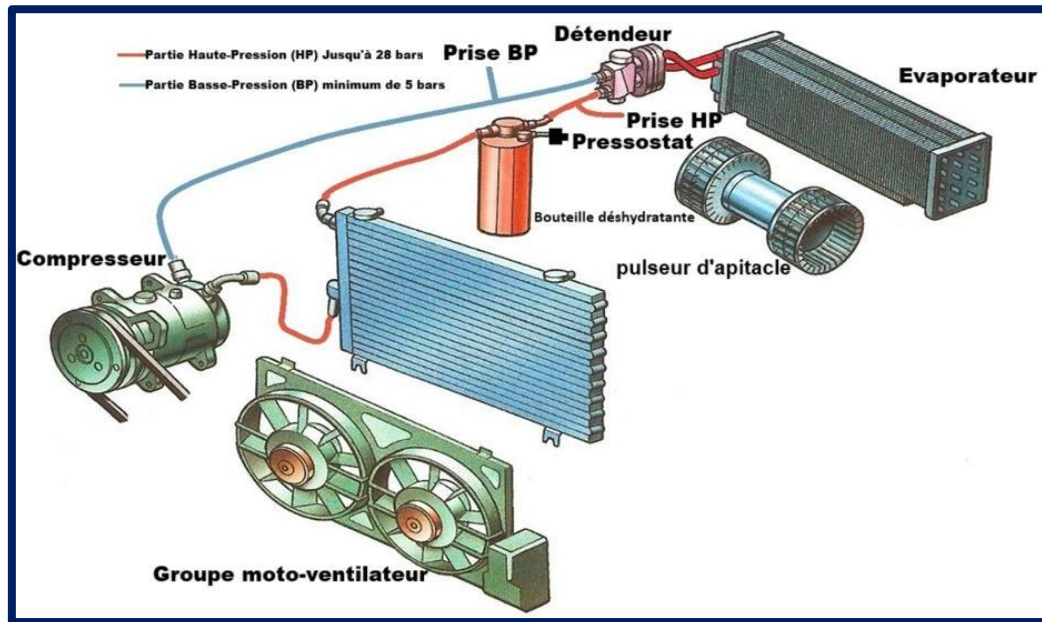


Figure I.1 Schéma des éléments d'un système de climatisation automobile¹¹

1.3.1. Compresseur :

Le rôle du compresseur est de comprimer le fluide pour augmenter la température et la pression. Les compresseurs sont entraînés directement par le moteur du véhicule, le plus souvent par l'intermédiaire d'une courroie ou d'un embrayage électromagnétique.¹¹

Il existe différentes technologies de compresseurs, les plus couramment employés actuellement en automobile sont les compresseurs à plateau oscillant, qui commandent le déplacement alternatif de plusieurs pistons.

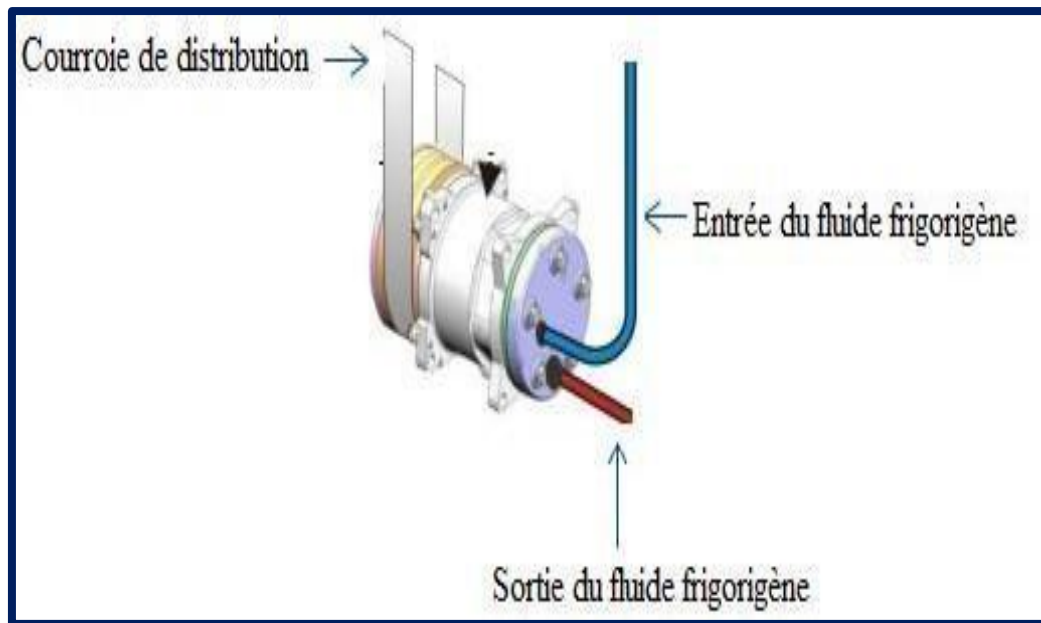


Figure I.2 représentative d'un Compresseur ¹²

1.3.2. Condenseur :

Il s'agit d'un échangeur thermique placé à l'avant du véhicule, entre le radiateur de refroidissement du moteur et le groupe moto ventilateur. Il permet la liquéfaction du fluide frigorigène gazeux provenant du compresseur : le fluide se liquéfie dans le condenseur par l'échange thermique causé par l'air frais qui le traverse. Le condenseur a pour fonction d'évacuer la chaleur de l'habitacle du véhicule ainsi que l'énergie consommée par le compresseur.¹³

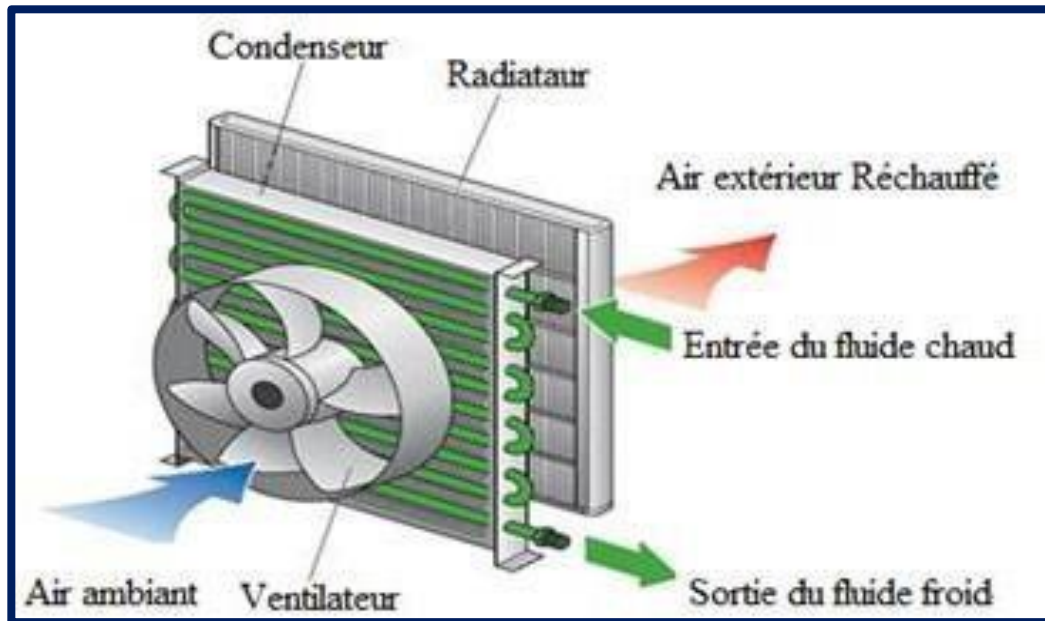


Figure I.3 représentative d'un Condenseur ¹⁴

1.3.3. Détendeur

Son rôle est de détendre le liquide frigorigène arrivant à l'état de liquide à haute pression, pour le transformer en liquide à basse pression ; pour assurer la pression d'évaporation, le phénomène de détente provoque une chute de température jusqu'à la température critique, et une évaporation partielle. Le détendeur contient généralement un thermostat qui permet de réguler le débit par la variation de la température du gaz en sortie de l'évaporateur.¹⁵

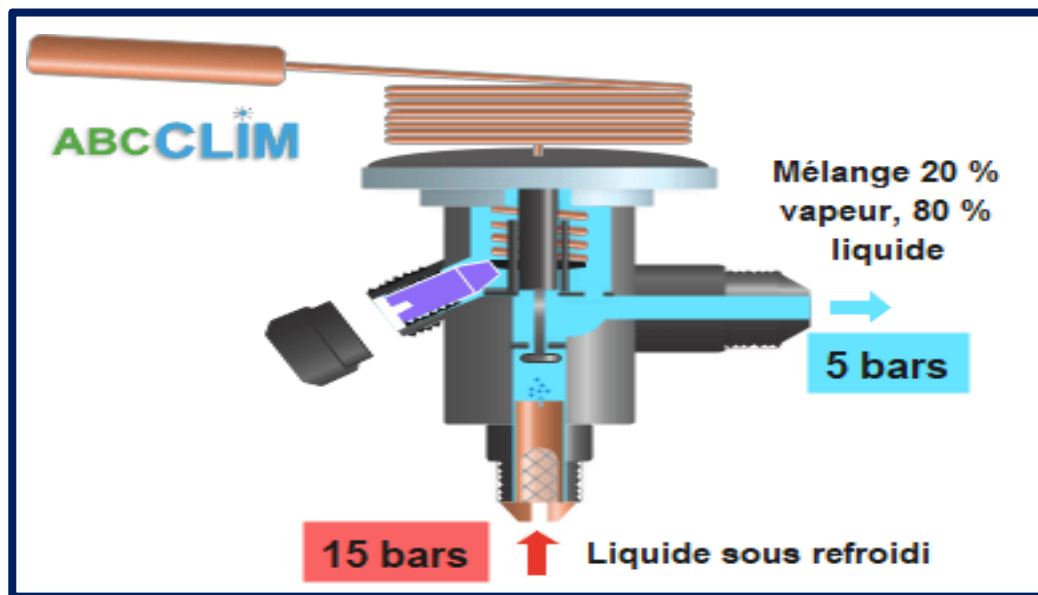


Figure I.4 représentative d'un Détendeur thermostatique¹²

I.3.4. Évaporateur

il s'agit d'un échangeur thermique. Son rôle est d'assurer la transformation complète du liquide frigorigène en gaz après son passage dans le détendeur. Au cours de l'évaporation ; le fluide absorbe l'énergie de l'air envoyé dans l'habitacle qui se refroidit en traversant le faisceau de l'évaporateur.¹⁶

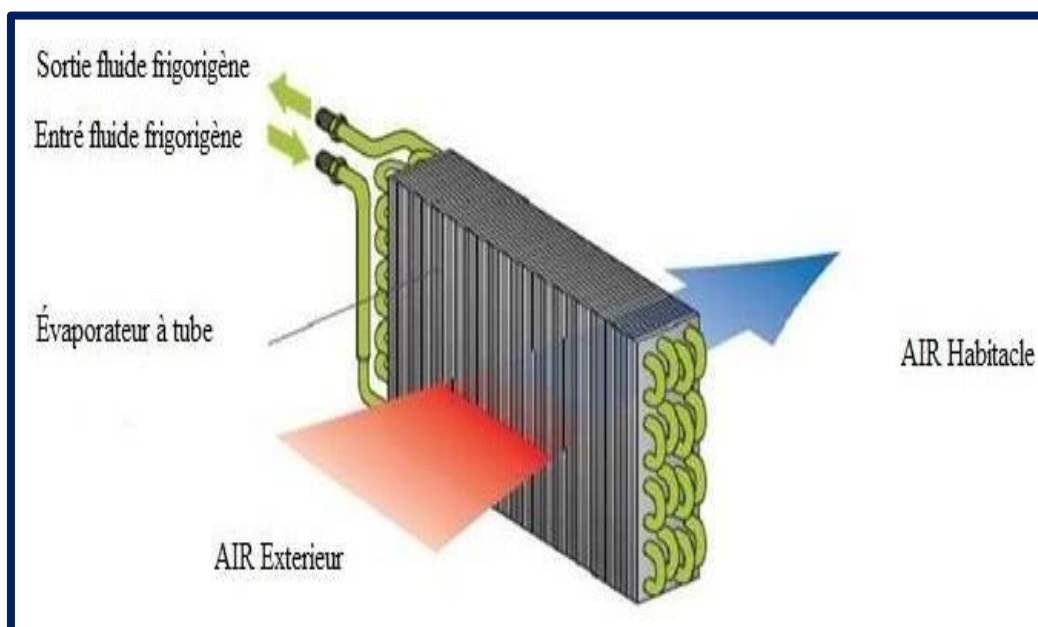


Figure I.5. Représentative d'un Détendeur thermostatique Évaporateur¹⁷

1.3.5. Bouteille déshydratante

Elle est placée à la sortie du condenseur, elle sert comme un réservoir pour le liquide frigorigène, elle est composée d'un filtre qui sert à retenir les impuretés subsistant dans le circuit et de sels dessiccateurs qui absorbent l'humidité.¹⁸

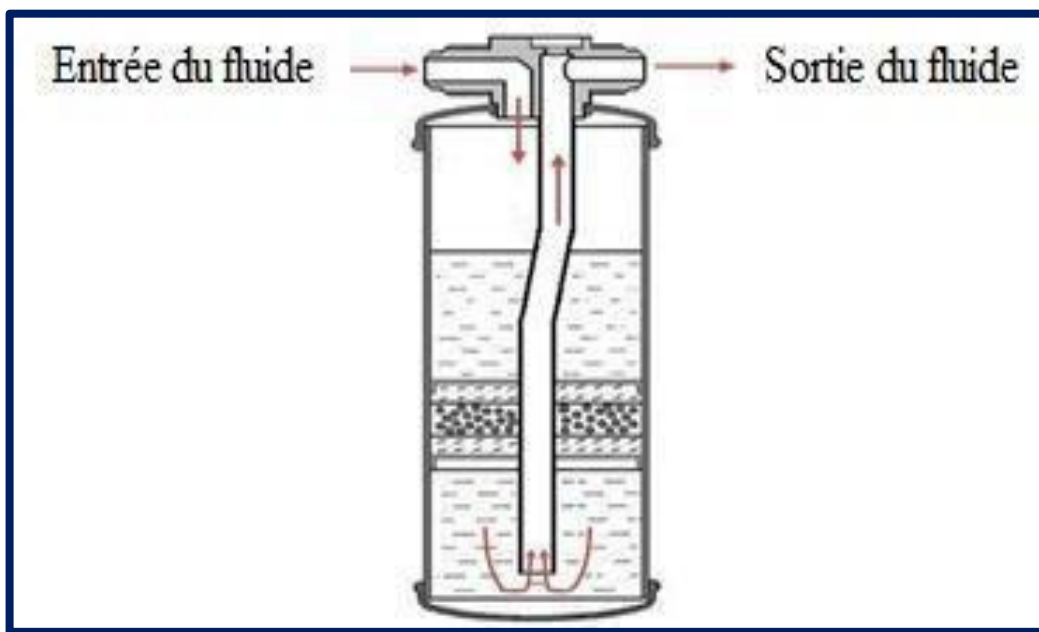


Figure I.6. Représentative d'une Bouteille déshydratante¹⁹

1.3.5. Fluide frigorigène

Son rôle est de permettre les échanges de chaleur par ses changements d'états (évaporation et condensation). Jusqu'en 1995 le fluide frigorigène employé était le R12, il s'agit d'un chlore fluor carbone (fréon) qui possédait deux graves inconvénients, il a été remplacé par le fluide R134a, il s'agit d'un hydro fluor carbone qui ne contient pas d'atome de chlore et qui participe douze fois moins au réchauffement climatique que le R12. Les fluides frigorigènes à base d'hydrofluorocarbures (HFC – R134a) sont bien plus nocifs pour l'environnement que le dioxyde de carbone, puisque, du point de vue de l'effet de serre, les hydrofluorocarbures ont un pouvoir de réchauffement global de 1300 à 1700 fois supérieur au dioxyde de carbone²⁰

I.4. Principe de fonctionnement de la climatisation automobile

La climatisation automobile est basée sur le cycle de compression, consiste à absorber de la chaleur dans le volume à traiter en l'occurrence l'habitacle de la voiture. Le climatiseur fonctionne comme un réfrigérateur domestique à compression. Un fluide frigorigène spécifique, qui change d'état (gazeux ou liquide) et de pression dans les différentes zones du circuit, génère un phénomène de transfert de chaleur.

Pour comprendre le principe physique de fonctionnement, on peut suivre le parcours du fluide frigorigène en partant du compresseur. Le fluide frigorigène à l'état gazeux est comprimé donc s'échauffe ; il peut atteindre par exemple 90° C mais tout dépend de ses propriétés physiques. A la Sortie du compresseur, le gaz arrive dans le condenseur où il rencontre à travers cet échangeur la source chaude, sa température baisse (désurchauffe) par exemple jusqu'à 45°C (la source chaude est plus froide que le fluide), puis il se liquéfie.

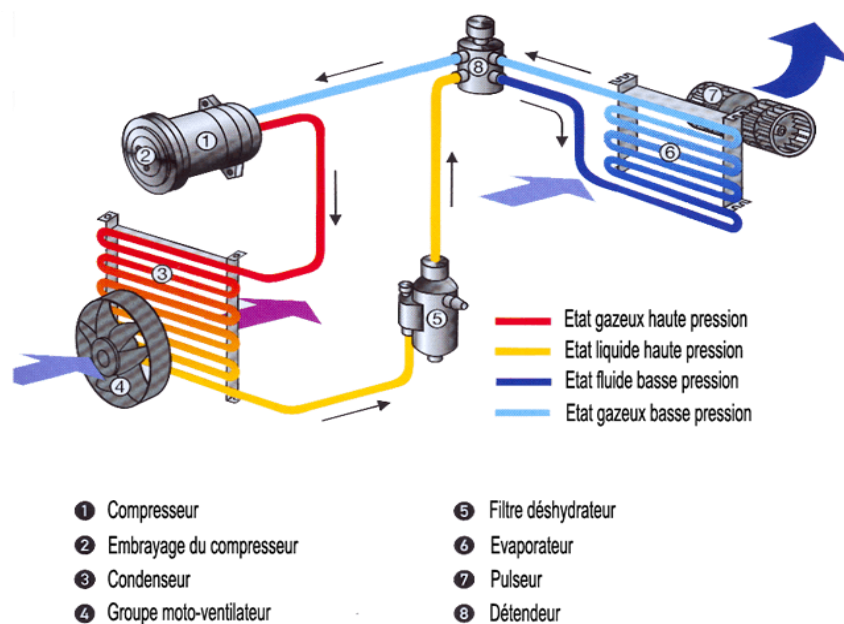


Figure I.7 : représentative du Principe de fonctionnement du cycle de climatisation automobile

Deux phénomènes de transfert de chaleur sont alors mis en jeu : un abaissement de température qui représente environ 15% de l'énergie totale échangée dans le condenseur et une quantité de chaleur échangée grâce à la chaleur latente de liquéfaction. En effet, au cours du changement d'état (gaz / liquide), le fluide va céder de la chaleur à température constante 45°C.

Suivant le dimensionnement de l'échangeur (condenseur), le fluide entièrement liquide peut perdre quelques degrés (par exemple de 45°C à 40°C). Le fluide frigorigène liquide passe à travers un détendeur, sa pression chute (par exemple de 20 bars à 2 bars), ce qui provoque une baisse de température brutale du fluide (-10°C) et une évaporation partielle.

A ce stade le fluide frigorigène constitue un mélange de gaz et de liquide (gouttelettes). En contact avec la source froide (à travers l'évaporateur), le fluide va bouillir (évaporation : transformation en gaz) en absorbant de la chaleur à température constante (-3°C : surchauffé ; le fluide est plus froid que la source froide). L'évaporation représente plus de 80% de l'énergie mise en œuvre pour capter de la chaleur à la source froide, le reste provient de la détente du fluide. En sortant de l'évaporateur, le gaz est aspiré par le compresseur et le cycle se poursuit (voir la fig. I.7)²¹

I.5. Le système de chauffage, ventilation et climatisation (HVAC) - le circuit d'air pulsé

La Figure 1.8 présente, à gauche, une schématisation, et à droite une vue du système HVAC automobile. Comme son nom l'indique, le système HVAC (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) assure à la fois le chauffage, la climatisation et la distribution de l'air dans l'habitacle par l'intermédiaire des conduits. Ce système constitue l'interface entre la source d'énergie et l'habitacle.

Sur la schématisation à gauche de la Figure 2.6, on voit que, dans un premier temps, l'air est admis à travers une grille située en dessous du pare-brise, appelée grille d'auvent. L'air suit ensuite un chemin qui diffère selon la position de trois types de volets dont le rôle est discuté dans les sections 2.1.3.2 à 2.1.3.4 : le volet de recirculation, le volet de mixage et les volets de distribution d'air dans l'habitacle. L'air est également purifié à travers un filtre habitacle à pollen qui va filtrer non seulement ces allergènes, mais également la plupart des particules telles que les gaz, la poussière, certains germes etc. Cette filtration se fait avant de traverser l'évaporateur (source froide). A la sortie de l'évaporateur, l'air peut éventuellement traverser un radiateur de chauffage (source chaude) en fonction de la position du volet de mixage.²²

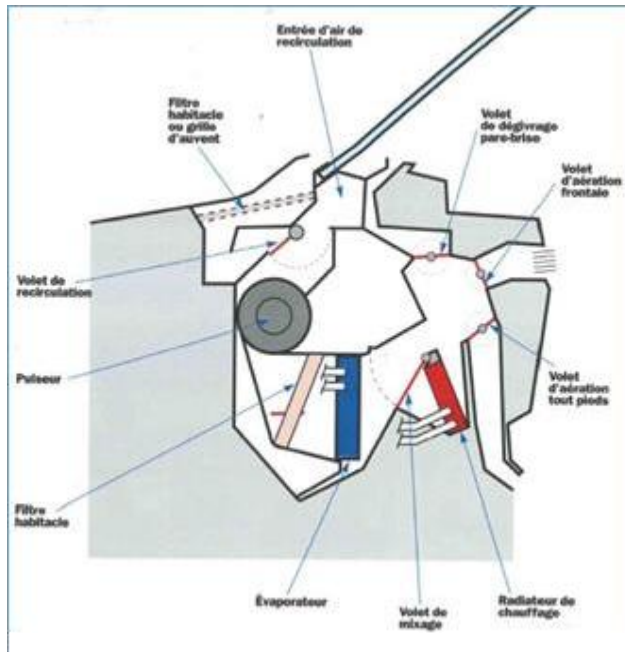


Figure 1.8: Représentative Schématisation du système HVAC automobile. **Figure 1.9 :** Représentative d'une Vue d'un boîtier HVAC automobile¹⁷

1.5.1. Le pulseur électrique

Le pulseur électrique permet de faire circuler l'air à travers l'évaporateur, en balayant une plage donnée de variation de débit d'air soufflé. A titre d'exemple, les grands débits peuvent servir à atteindre rapidement le confort thermique. Tandis que les petits débits d'air peuvent servir à maintenir le confort thermique lorsque ce dernier est atteint, tout en minimisant la gêne acoustique. Le pulseur habitacle est alimenté électriquement par l'intermédiaire de l'alternateur. La Figure 2.9 montre une vue d'un pulseur d'air habitacle.



Figure 1.10. Représentative d'un Pulseur d'air habitacle¹⁹

1.5.2. Le mixage d'air

Après la traversée de l'évaporateur, l'air peut passer, en fonction de la position d'un volet de mixage, par un radiateur de chauffage, appelé également aérotherme. Ce radiateur assure le chauffage de l'habitacle, et fait partie du circuit de refroidissement du moteur, ou boucle chaude, schématisée en rouge sur la Figure 1.11.

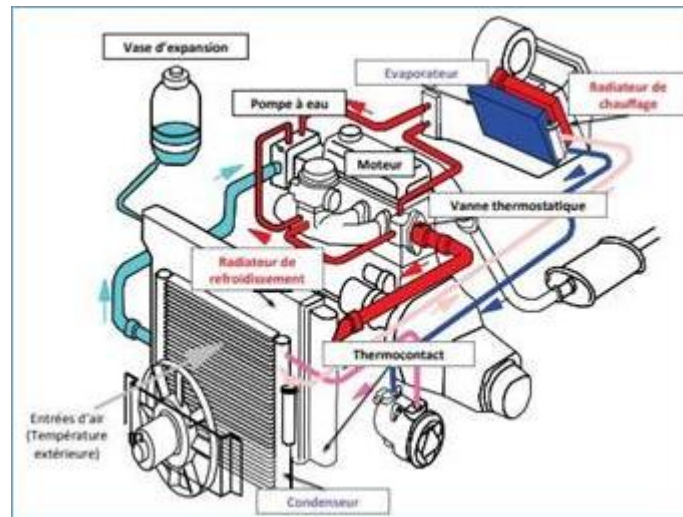


Figure 1.11 : Schématisation de l'association du circuit de refroidissement du moteur avec une boucle de climatisation automobile ²³

Le circuit de refroidissement sert principalement à transférer l'excès de chaleur du moteur à un fluide caloporteur (constitué généralement d'eau à laquelle on rajoute des additifs pour éviter le gel et la corrosion) appelé eau ou liquide de refroidissement. Cet excédent de chaleur est évacué à travers un radiateur de refroidissement placé à l'avant du véhicule. La circulation du liquide de refroidissement est assurée par une pompe.

Le volet de mixage permet de contrôler le taux de mixage. Un taux de mixage de 0% correspond au passage de l'air par l'évaporateur uniquement (by-pass de l'aérotherme), tandis que la valeur 100% correspond au passage de tout l'air par l'évaporateur et ensuite par l'aérotherme. Dans le cas d'un mixage partiel, une fraction de l'air passe uniquement par l'évaporateur, alors que l'autre fraction passe à la fois par l'évaporateur et l'aérotherme. Les deux fractions sont ensuite mixées avant d'être soufflées dans l'habitacle.²⁴

Les conduits et les modes de distribution d'air

Après avoir traversé l'évaporateur, et éventuellement l'aérotherme, l'air est acheminé vers l'habitacle à travers des conduits qui distribuent l'air vers différentes régions de la cabine comme montré sur la Figure 1.12. Vu de l'intérieur de la voiture, la cabine voit arriver l'air par différents aérateurs qui sont les extrémités des conduits d'air.

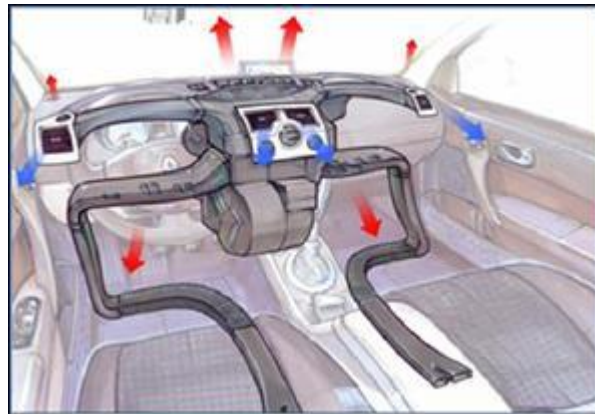


Figure 1.12 : Les conduits de l'air habitacle²³

Généralement, il existe trois principaux modes de distribution d'air, dont l'activation est contrôlée à travers les trois volets de distribution montrés sur la Figure 2.6 : le volet de dégivrage, le volet d'aération frontale et le volet d'aération pieds. Il est à noter que la combinaison de ces trois modes de distribution est possible dans la quasi-totalité des véhicules commerciaux mis en vente sur le marché.²⁵

La Figure 1.11 montre les trois principaux modes de distribution de l'air dans l'habitacle. On distingue :

- ✚ **Le mode ventilation** : l'air sort par les aérateurs centraux, et est dirigé vers les têtes des passagers avant. En ambiance chaude, ce mode permet de refroidir la tête qui est la zone la plus sensible au chaud. Les aérateurs sont orientables, ce qui permet un ajustement aux différentes postures des passagers.
- ✚ **Le mode pieds** : l'air sort par la cave à pied de l'habitacle. En ambiance froide, ce mode permet de réchauffer les extrémités du corps humain du moment qu'elles sont les plus concernées par les déperditions énergétiques. Contrairement au mode ventilation, ce mode n'offre aucune possibilité de réglage de position.

- ✚ **Le mode dégivrage / désembuage :** l'air sort à travers les frises situées à proximité des vitres (parebrise et vitres latérales avant). Ce mode de distribution permet d'assurer une meilleure visibilité au conducteur, soit en dégivrant les vitres en ambiance froide, soit en les désembuant en cas de présence de la buée.

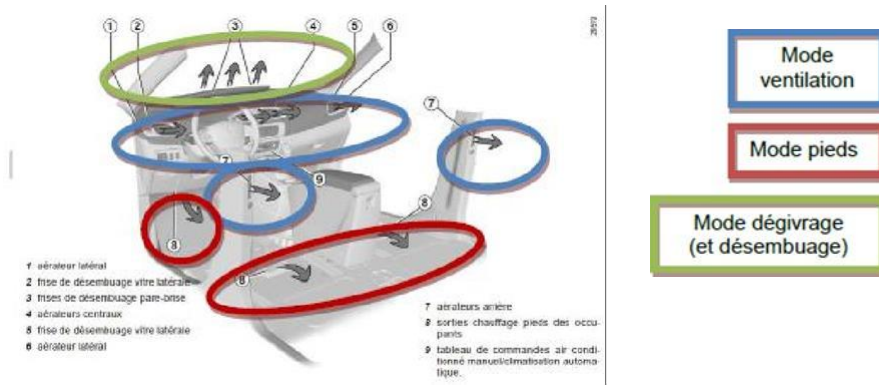


Figure 1.13 : Les différents modes de distribution de l'air dans l'habitacle

En parcourant les conduits, l'air soufflé subit une stratification thermique (voir section 2.2.3). Les conduits d'air sont également sujets à des pertes thermiques, et sont généralement bien isolés en vue de les réduire.²⁵

Les diffuseurs d'air dans l'habitacle

Par défaut, l'air qui circule au sein de l'habitacle provient de l'extérieur. Cet air, après être passé dans le système de ventilation, qui va réchauffer l'habitacle (chauffage) ou le refroidir (climatisation) en fonction de la demande du conducteur, sera propulsé au sein de l'habitacle grâce à des buses, ces derniers sont reliés au niveau de tableau de bord par des diffuseurs d'aération sont nommés aussi diffuseurs d'air.



Figure 1.14 : Diffuseur d'air

I.5 la tendance et l'évolution en matière de climatisations et de confort dans l'habitacle

Les climatisations multizones sont de plus en plus la norme. Les véhicules haut de gamme proposent déjà des climatisations avec une gestion de l'humidité, qui évite que l'air ne devienne trop sec. La gestion du climat intérieur fera à l'avenir partie du système de climatisation et de **ventilation**. Cela signifie que l'utilisation de capteurs de qualité de l'air permettra d'obtenir le meilleur climat intérieur possible grâce aux systèmes de traitement de l'air. Les compresseurs de climatisation à régulation électronique s'imposeront pour tous les véhicules, peu importe leur catégorie. Ils permettent d'ajuster la puissance de façon individuelle, ce qui diminue également la consommation de carburant. À l'avenir, la perte de fluide frigorigène pourra être minimisée grâce à l'utilisation de composants, de durites et de joints encore améliorés.

I.6. Utilisation et maintenance d'une climatisation automobile

I.6.1. Utilisation :

- ✚ Éviter les chocs thermiques trop brutaux (ex : en sortant du véhicule).
- ✚ Limiter les courants d'air directs sur les occupants.
- ✚ Utiliser la climatisation en hiver pour le désembuage ainsi que pour diminuer les désagréments d'un air trop humide.
- ✚ Faire fonctionner la climatisation régulièrement pour assurer la lubrification des joints de compresseur, ce qui évitera les fuites du fluide frigorigène.

I.6.2. Entretien :

- ✚ Il est conseillé de changer le filtre déshydrateur une fois tous les deux ans.
- ✚ Vérifier la tension de la courroie de compresseur à chaque révision.
- ✚ Vérifier régulièrement le bon fonctionnement en utilisant le verre regard du filtre.

I.6.3. Dépannage :

Les installations climatiques sont en général très fiables. Les deux pannes les plus classiques sont :

- ✚ Le manque de fluide frigorigène dans l'installation.
- ✚ La mauvaise tension de la courroie du compresseur. Ces deux pannes sont bénignes et rapidement réparables.

Les fuites de fluide nécessitent une opération de décharge puis de charge

Grâce à une station spéciale. Il est absolument nécessaire de récupérer le fluide pour éviter la pollution.

I.6.4. Evolution :

Les climatisations « haut de gamme » sont entièrement automatisées : l'affichage de la

température désirée sur un écran digital provoquera le fonctionnement et la régulation permanente de la température dans l'habitacle.

Les climatisations « mécaniques » demandent l'intervention du conducteur pour assurer la stabilité de la température, mais elles sont tout aussi performantes et efficaces que les systèmes plus évolués.²⁵

1.6.5. Impact énergétique et environnemental de la climatisation automobile :

Durant les trois dernières décennies, les constructeurs automobiles ont réalisé d'importants progrès sur la consommation spécifique de carburant et les émissions de polluants du moteur. Cependant, l'impact de ces améliorations sur la consommation des véhicules a été limité par l'accroissement des performances dynamiques (vitesse maximale, couple), des prestations de sécurité (direction et freinage assisté ou intelligent) ou de confort (réduction des bruits et vibrations, lève-vitres et confort thermique). De ce fait, le niveau réel de rejets de CO₂ des véhicules est encore élevé, dans un contexte où les transports routiers ont une grande responsabilité dans le bilan des émissions de gaz à effet de serre, et donc dans le respect de la convention internationale sur le climat.

Bien que les constructeurs européens, japonais et coréens aient signé un accord important avec la Commission européenne sur la réduction volontaire des émissions de CO₂ de leurs véhicules, avec un objectif d'émission moyenne pondérée par les ventes de 140 grammes par km sur le cycle d'homologation MVEG en 2008, il convient de noter que les procédures européennes de mesure des consommations et des rejets de CO₂ ne prennent pas en compte le fonctionnement des auxiliaires, notamment celui de la climatisation. L'essor de cet équipement, reconnu comme étant très consommateur d'énergie et employant un fluide frigorigène à fort potentiel de réchauffement de l'atmosphère, a conduit l'ADEME à mettre en place une série d'actions d'évaluation de son impact énergétique et Environnemental.

Elles comportent notamment l'étude du taux d'équipement des véhicules, l'analyse des effets sur la consommation de carburant, ainsi que sur les rejets de polluants réglementés à l'échappement, la caractérisation des niveaux de fuite en fluide frigorigène, puis l'estimation des rejets de gaz à effet de serre de l'ensemble des véhicules climatisés.

Cette plaquette présente une synthèse des résultats de ces actions. L'ensemble de ces études, ainsi que des données complémentaires sont présentés plus en détail dans l'ouvrage —La climatisation automobile.‖²²

Conclusion :

En quelques années, la climatisation est passée de statut d'option de luxe, réservé aux berlines haut de gamme à celui d'équipement de base demandé en série. D'une part, des études ont montré que, lorsque la température de l'habitacle dépassé la norme, le comportement de conducteur tend à se dégrader, en raison de l'inconfort et de la fatigue engendrés par la température excessive.

Ce premier chapitre résume le développement d'automobile et celle de leur climatisation depuis plusieurs années et cite aussi les différents obstacles dans l'industrie automobile et comment le rythme a été évalué rapidement dans cette industrie par création des différentes options confortement comme la climatisation qui a été connue une grande importance par les utilisateurs et même pour le créateur d'automobile.

CHAPITRE II

Conception du diffuseur avec
SolidWorks

II. CHAPITRE II : COCEPTION D'UN DIFFUSEUR AVEC LE SOLIDWORKS

II.1. Introduction

Ce chapitre débute par une présentation du logiciel de conception utilisé, SolidWorks. Nous exposerons ensuite de manière détaillée les différentes étapes du processus de conception, jusqu'à la réalisation de l'impression 3D de nos nouveaux diffuseurs d'air

II.2. Présentation de SolidWorks

SolidWorks est un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (C.A.O.) appartenant à la catégorie des modeleurs volumiques. Autrement dit, il offre la possibilité de créer des pièces ou d'assembler des composants directement en trois dimensions. Les objets réalisés ne sont donc pas représentés uniquement par leurs arêtes ou leurs faces, mais bien par leur volume, c'est-à-dire la matière contenue à l'intérieur de chaque pièce.

II.2.1. Modélisation du nouveau diffuseur d'air sous SolidWorks

Le nouveau diffuseur d'air conçu dans le cadre de cette étude se compose de deux éléments distincts :

- Une cage extérieure servant de système de fixation au tableau de bord.
- Un système interne de diffusion d'air, constituant l'élément central de notre analyse énergétique.

Dans ce contexte, chaque composant est modélisé séparément à l'aide de fichiers de pièces distincts. Par la suite, ces éléments sont assemblés dans un fichier d'assemblage, ce qui permet de vérifier la conformité et la précision des cotes adoptées pour le diffuseur d'air.

II.6.2. Représentation schématique des deux pièces

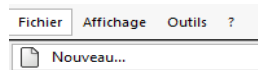
Des schémas de définition détaillés seront présentés ci-après, afin de permettre une compréhension précise de la géométrie, de la forme générale ainsi que des dimensions spécifiques des deux pièces constituant notre diffuseur, ce qui facilitera l'analyse et la visualisation de leur conception technique

II.3. Création d'une pièce sur SolidWorks

- **Phase N° 01 :** Pour lancer SolidWorks, double-cliquez sur son icône située sur le bureau de votre ordinateur.



- **Phase N° 02 :** Une fois le logiciel ouvert, cliquez sur **Fichier > Nouveau**, puis choisissez **Pièce** et validez en cliquant sur **OK**.

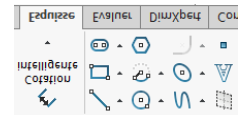


- **Phase N° 03 :** Sélectionnez un plan de travail (par exemple : plan de face) pour démarrer votre conception.

- **Phase N° 04 :** Passez en mode **Esquisse** en cliquant sur l'icône correspondante.



- **Phase N° 05 :** Utilisez les outils de dessin disponibles (ligne, cercle, rectangle, spline, etc.) pour créer votre géométrie en **2D**.

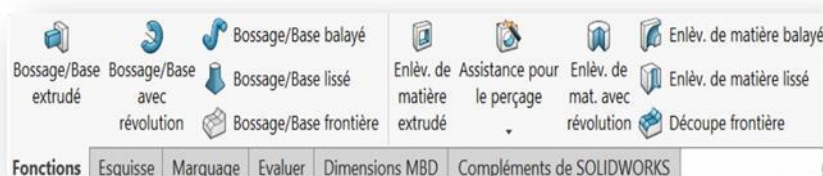


- **Phase N° 06 :** Pour ajouter des dimensions à votre esquisse, cliquez sur l'outil **Cotation intelligente**, puis appliquez les côtes nécessaires aux éléments dessinés.



- **Phase N° 07 :** Une fois l'esquisse terminée et entièrement définie, quittez le mode esquisse pour accéder aux fonctionnalités de modélisation 3D (extrusion, révolution, enlèvement de matière...).

- **Phase N° 08 :** Une fois l'esquisse en deux dimensions complètement définie, l'utilisateur peut entamer la phase de modélisation tridimensionnelle. Cette transition du mode 2D vers le mode 3D s'effectue à l'aide des fonctions de base proposées par SolidWorks, telles que **le bossage-extrudé**, **la révolution**, **le lissage**, ou encore **le balayage**. Ces opérations permettent de donner un volume à l'esquisse initiale, en fonction de la géométrie souhaitée et des exigences de conception.



II.4. Diffuseur de géométrie circulaire

➤ L'étape N° 01. Construirons une plaque avec la fonction

À ce stade de la conception du diffuseur d'air avec le logiciel SolidWorks, le « plan de face » a été sélectionné comme point de départ pour la création de l'esquisse bidimensionnelle de la pièce. Ensuite, le mode esquisse a été activé à partir de la barre d'outils, puis l'outil « Rectangle par coin » a été choisi afin de tracer un rectangle sur le plan sélectionné. Ce rectangle constitue la section de base du diffuseur. La précision dans la définition de cette forme initiale est essentielle, car elle sert de fondation géométrique pour la modélisation tridimensionnelle ultérieure et le développement des détails du design.

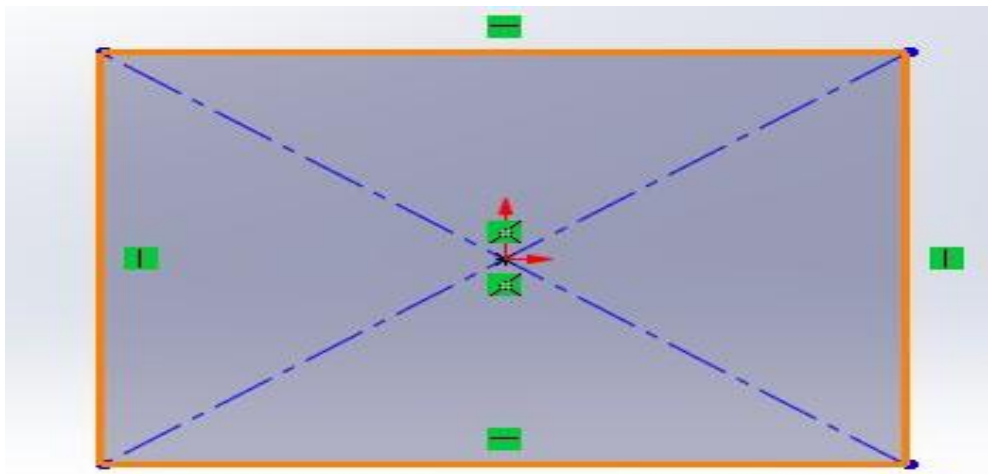
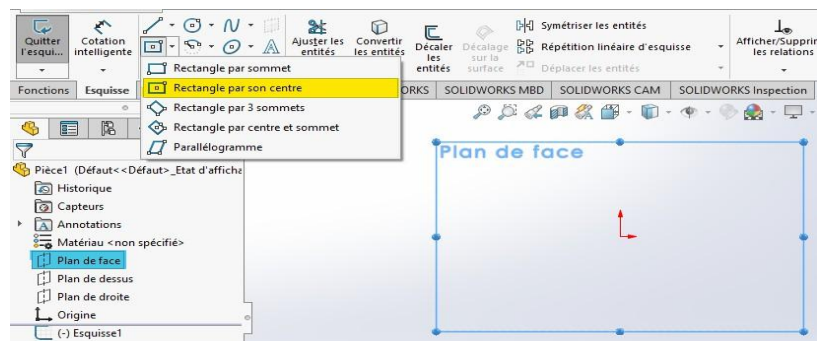


Figure 2.1 : Représentative Résultat de rectangle sur le plan

➤ *L'étape N° 02.* À ce stade, les dimensions du rectangle ont été définies à l'aide de l'outil « Cotation intelligente », en fixant la longueur et la largeur à 120 mm Cette opération garantit la précision des dimensions de la section de base du diffuseur d'air, ce qui est essentiel pour la conformité du modèle final aux spécifications requises.

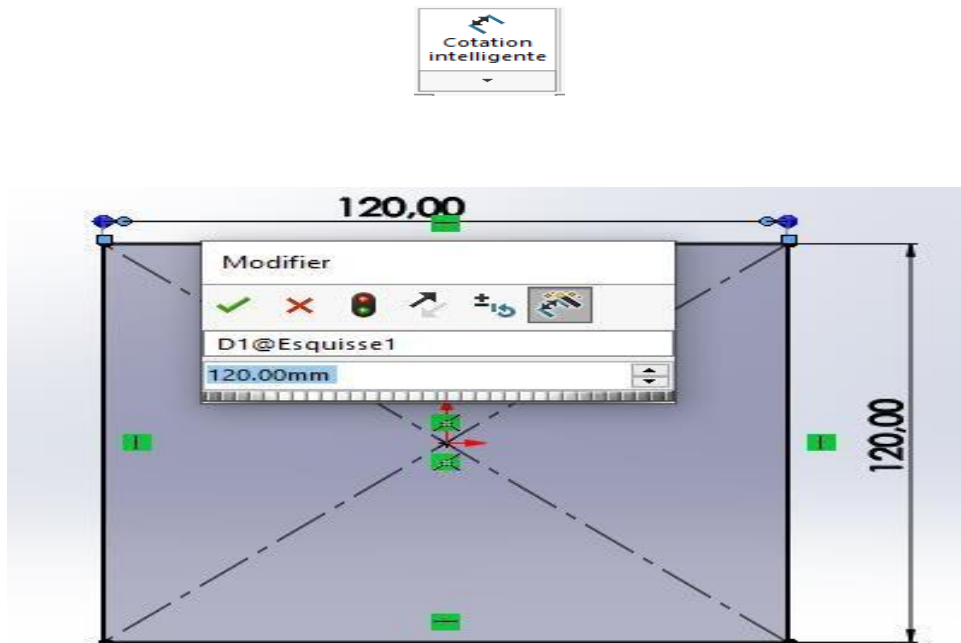


Figure 2.2 : Représentative Les dimensions du rectangle

➤ *L'étape N° 03* Après avoir dessiné le rectangle de 120 mm × 120 mm, on utilise la fonction Base/Bossage extrudé et on définit l'épaisseur à 10 mm pour obtenir un solide en 3D.

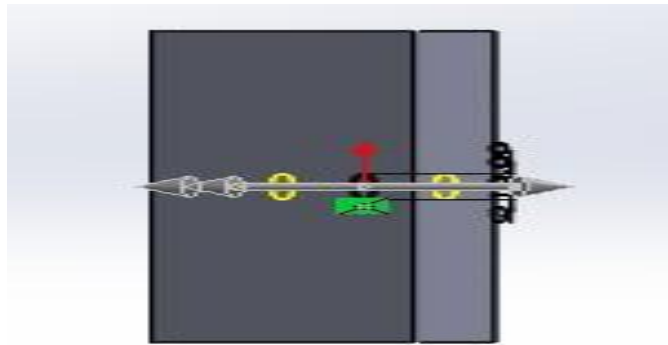
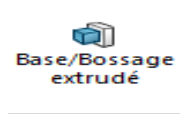


Figure 2.3 : Représentative du Bossage avec révolution

➤ *L'étape N° 04* : Après avoir tracé le rectangle de 120 mm × 120 mm, on utilise la fonction Base/Bossage extrudé en choisissant l'option Borgne avec une épaisseur de 10 mm pour Générer le solide 3D.

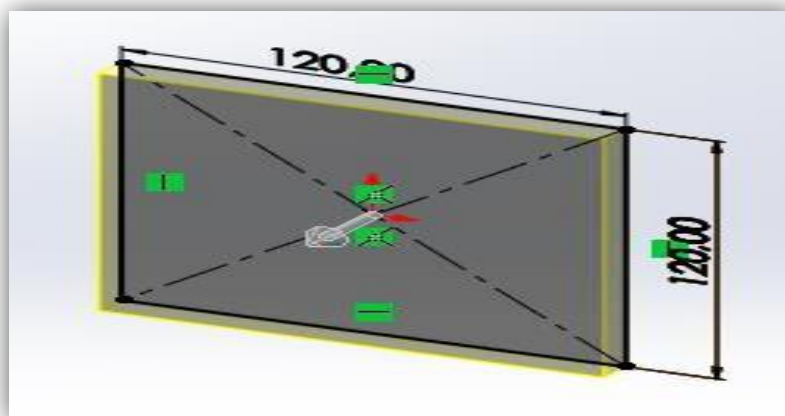
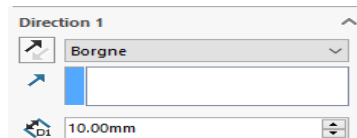


Figure 2.4 : représentative du Bossage avec les deux directions

- *L'étape N° 05* : dessiné Un cercle de diamètre 10 mm dans un coin du rectangle.

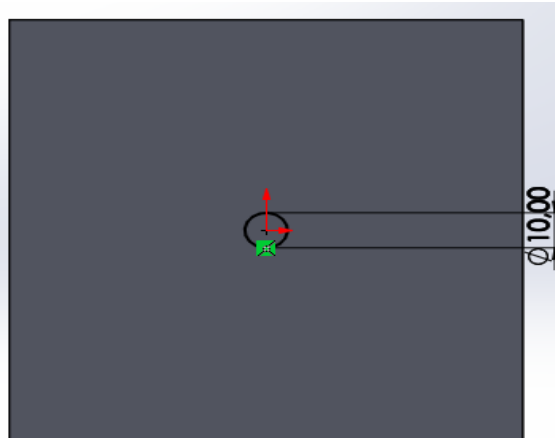


Figure 2.5 : représentative des Dessinons un cercle dans le rectangle

- *L'étape N° 06* : Un cercle de diamètre 10 mm a été dessiné dans un coin du rectangle, puis l'option Enlèvement de matière extrudé a été utilisée pour réaliser un trou traversant le solide.

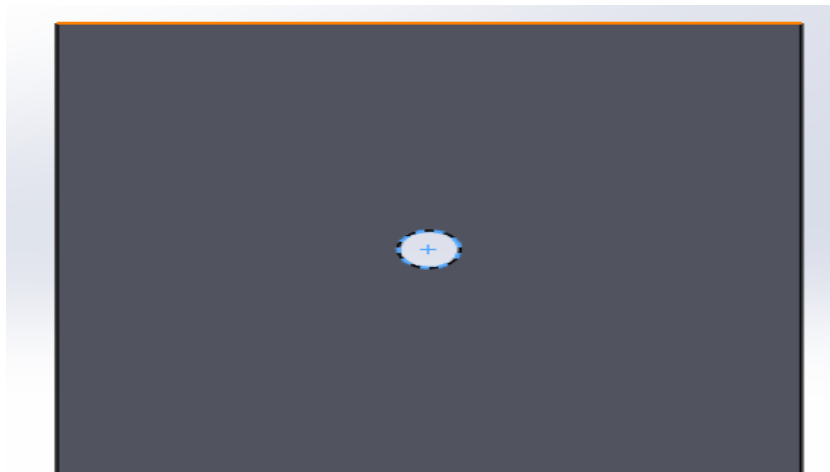


Figure 2.6 représentative du résultat actuel

- *L'étape N° 07* : Pour cette étape, la fonction Répétition linéaire a été utilisée afin de dupliquer le trou de diamètre 10 mm le long du plan de dessus. Un espacement de 20 mm a été défini entre

chaque occurrence, avec un total de trois trous alignés. Cette opération permet d'obtenir une distribution régulière des perçages sur la pièce.

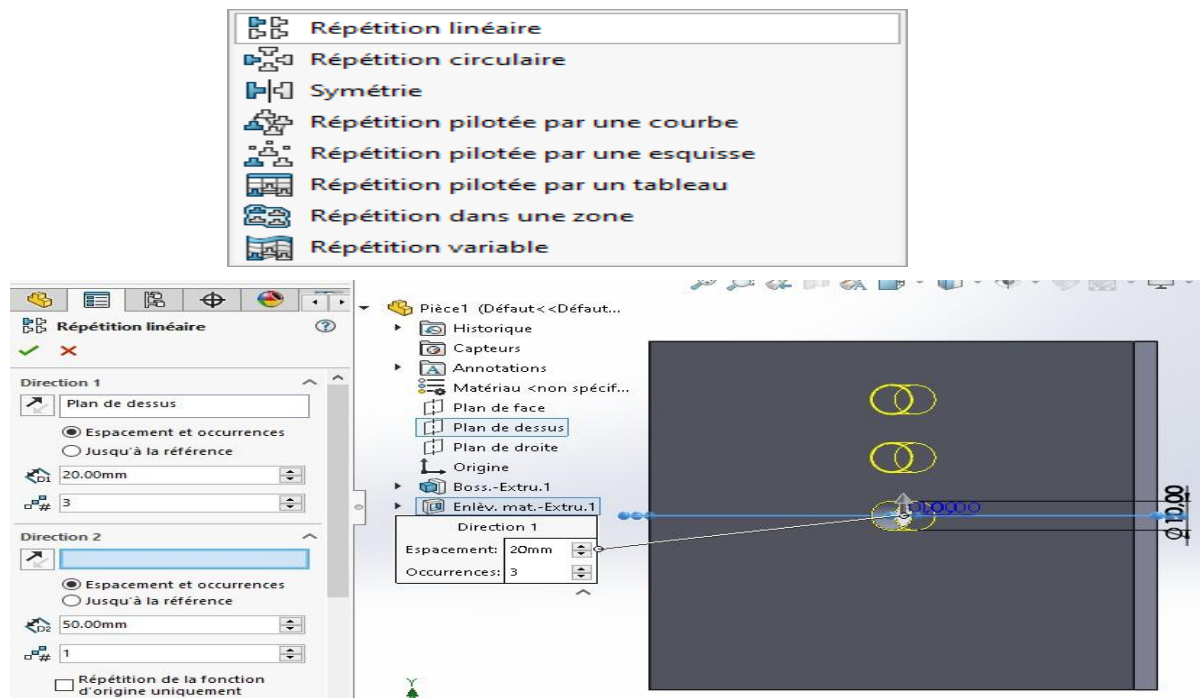


Figure 2.7 : représentative des Répétitions linéaire

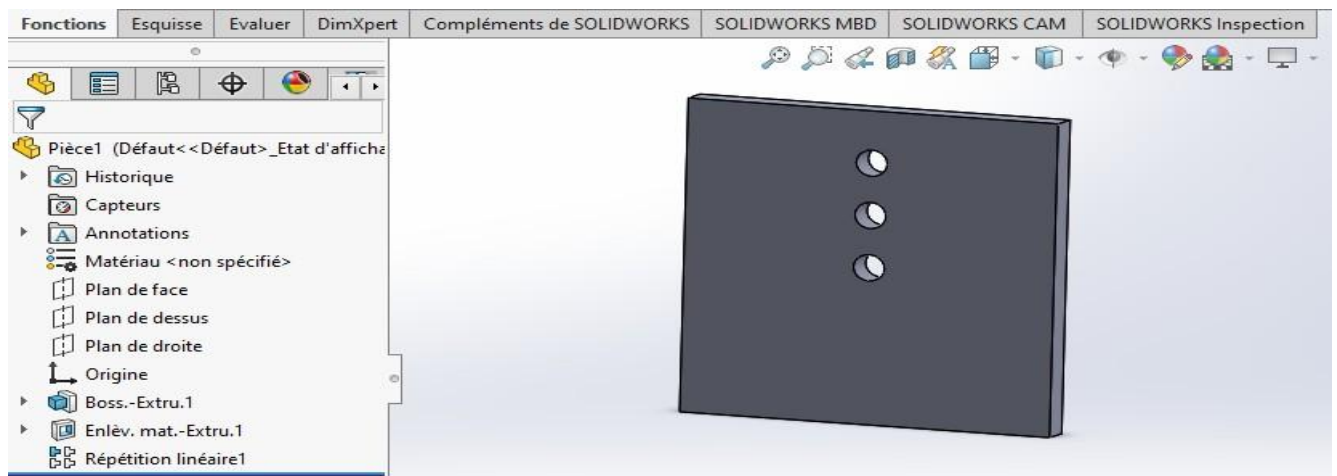


Figure 2.8 représentatives du Résultat Répétitions linéaire

➤ **L'étape N° 08 :** Pour cette étape, la fonction Répétition circulaire a été appliquée afin de dupliquer le trou initial autour d'un axe de rotation.

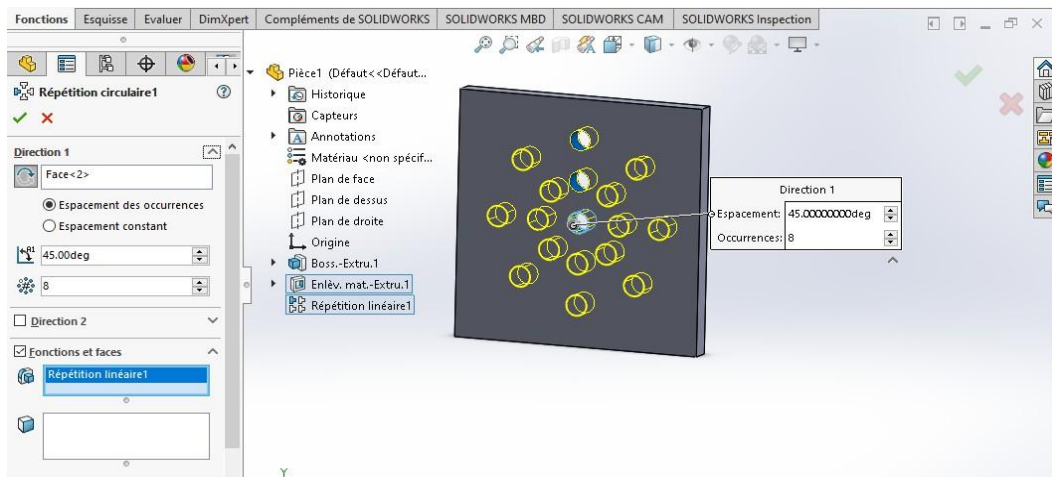


Figure 2.9 représentative des Répétitions circulaire

➤ **L'étape N° 09 :** En résultat.

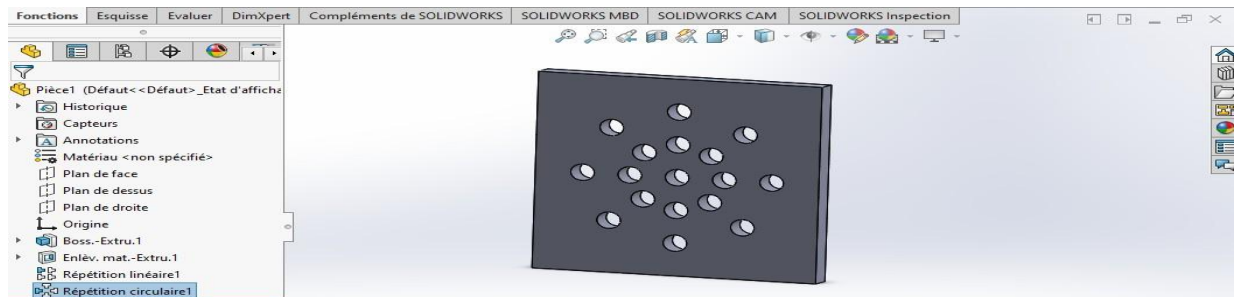


Figure 2.10 représentative du Résultat répétition linéaire

➤ **L'étape N° 10 :** Après avoir terminé la modélisation, je suis passé à l'onglet Mise en plan et j'ai choisi un format de feuille A4 (ISO). Ensuite, j'ai inséré la pièce dans la feuille et ajouté un cartouche pour indiquer les informations principales. J'ai utilisé les outils de cotation pour annoter et préciser les dimensions de la pièce, comme illustré sur l'image, afin de présenter clairement tous les détails nécessaires à la fabrication.



Figure 2.11 représentatives des Cliquons sur la mise en plan

➤ *L'étape N° 11* : En suite.

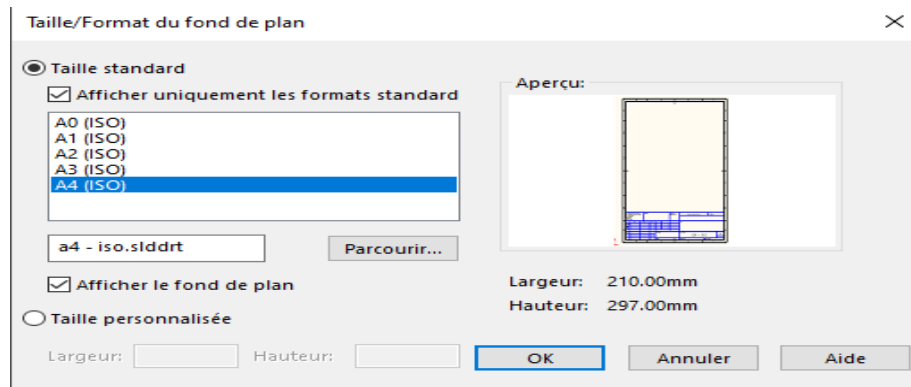


Figure II.12 Choisi un format de feuille A4 (ISO)

➤ *L'étape N° 12* : En suite.

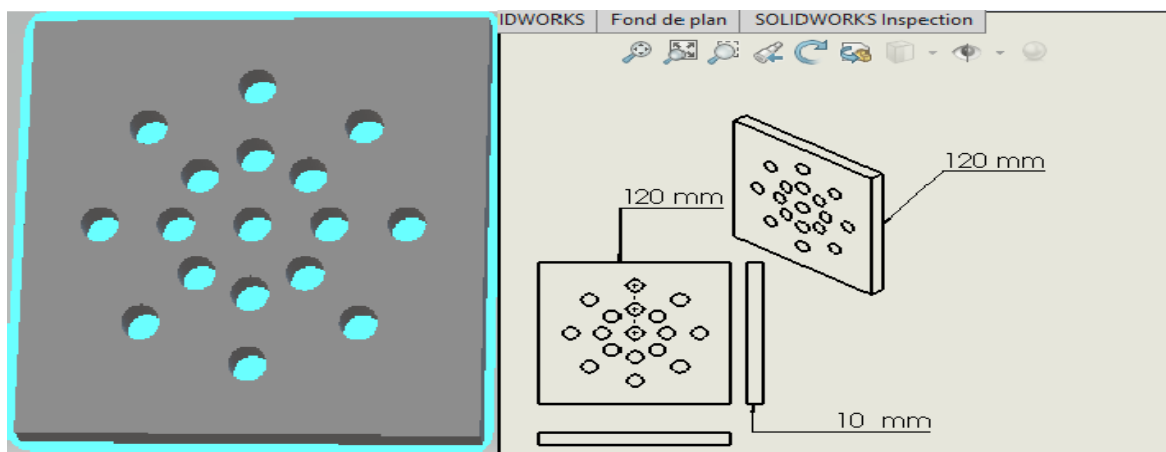


Figure 2.13 représentatives d'un Schéma pour la géométrie du circulaire

➤ *L'étape N° 13* : Une fois le diffuseur d'air circulaire modélisé, il convient de l'enregistrer au format STL (*.stl) afin de le rendre exploitable par les logiciels de tranchage en vue de l'impression 3D.

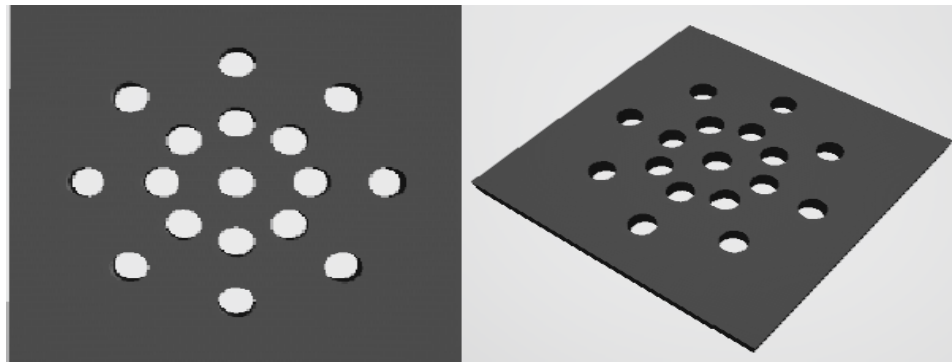


Figure 2.14 représentatives de la Géométrie du circulaire en 3D

➤ **L'étape N° 14** : Le format **STL (Stéréolithographie)** constitue le standard d'échange entre les logiciels de modélisation 3D et les outils de fabrication additive. Pour générer ce fichier, l'utilisateur doit accéder à l'option **Fichier > Enregistrer sous**, puis sélectionner le type **STL**, assurant ainsi la compatibilité avec les logiciels de tranchage.

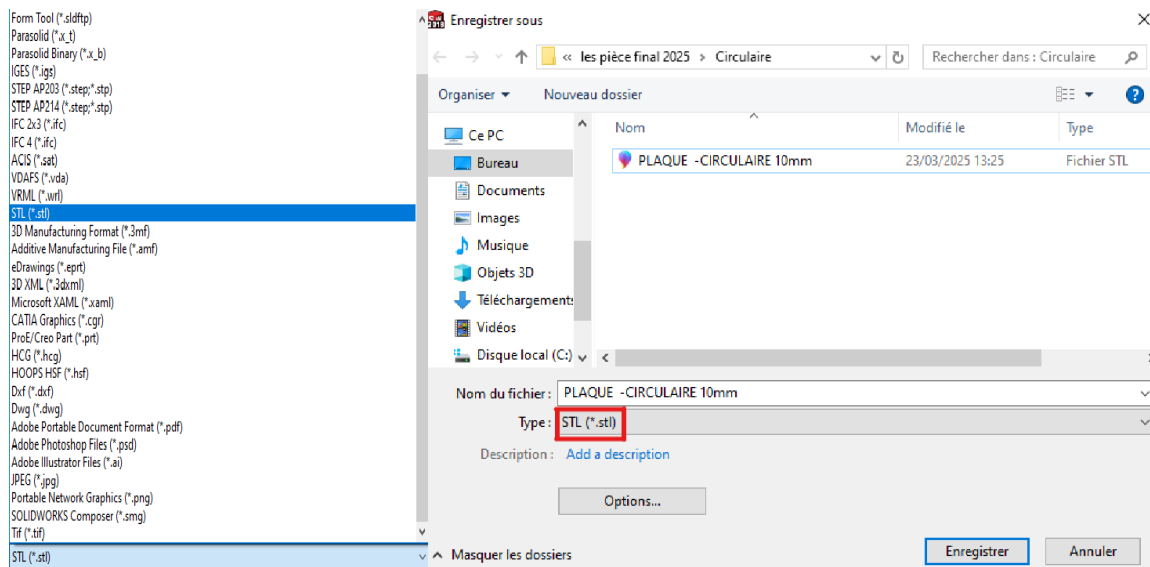


Figure 2.15 : représentative d'un Enregistrement la pièce au format STL

II.4. Diffuseur de géométrie Lobé :

➤ **L'étape N° 01 :** Un rectangle de 120 mm × 120 mm a été tracé sur le plan de dessus à l'aide de l'outil Rectangle. Son centre a été positionné sur l'origine pour assurer la symétrie. Les dimensions ont été définies avec l'outil Cotation intelligente. Cette esquisse servira de base à la suite de la modélisation.

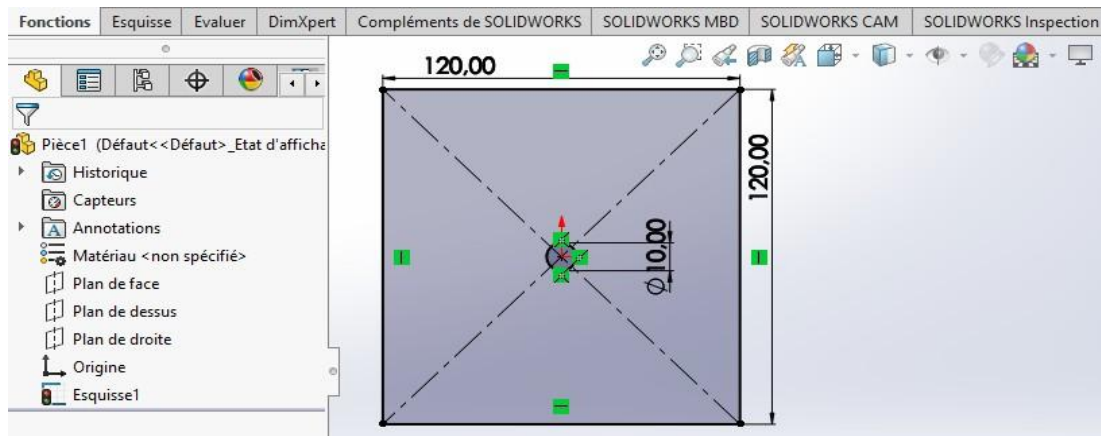


Figure 2.16 : représentative d'un Esquisse d'un carré avec perçage central sous SolidWorks

➤ **L'étape N° 02 :** Un cercle de 10 mm de diamètre a été inséré au centre du rectangle, en prenant l'origine comme point de référence. Cette démarche permet de garantir à la fois la précision géométrique et la symétrie du modèle

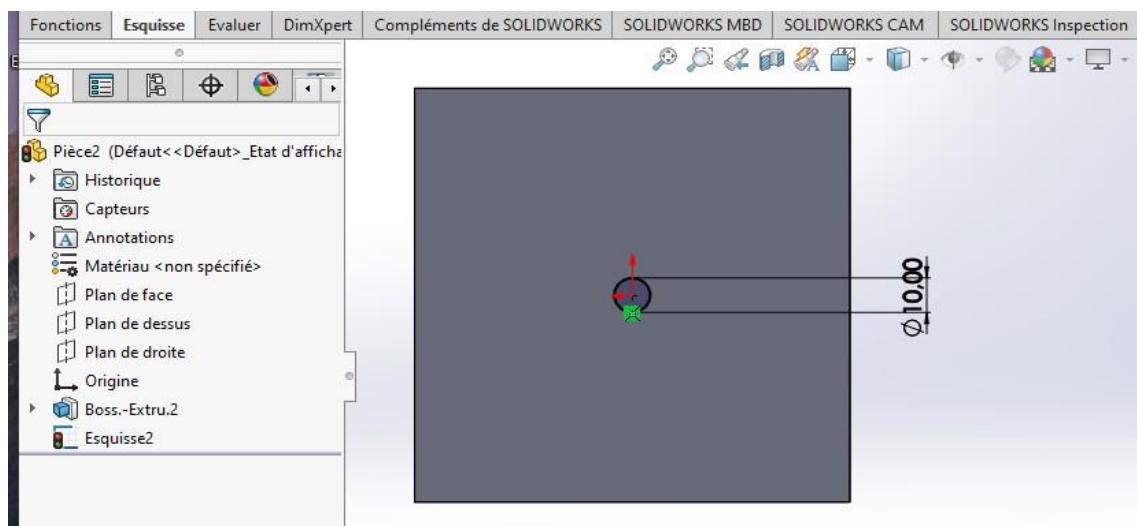


Figure 2.17 : représentative d'un Design un cercle au centre du rectangle

➤ **L'étape N° 03 :** À cette étape de la conception, un cercle de diamètre 10 mm a été positionné avec précision au centre du modèle. Cette esquisse constitue la base de l'opération de perçage cylindrique, qui sera effectuée sur une profondeur de 9 mm, à travers l'épaisseur totale de 10 mm de la pièce. Ce choix technique vise à conserver une base de 1 mm.

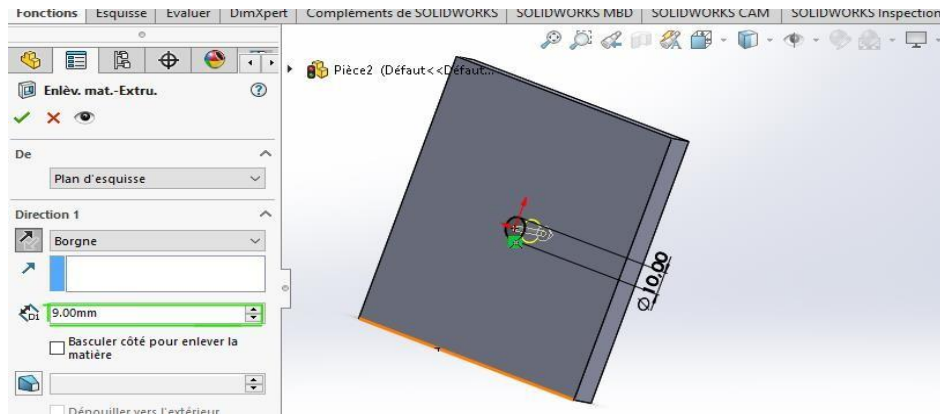


Figure 2.18 : représentative d'un Perçage central de 9 mm de profondeur par enlèvement de matière extrudé

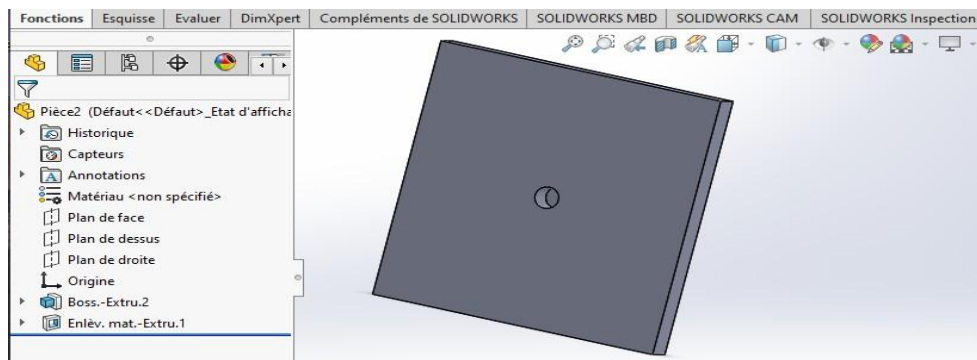


Figure 2.19 : représentative du Résultat trou central extrudé de 9 mm de profondeur

➤ *L'étape N° 04* : À cette étape, la fonction de répétition linéaire a été appliquée sur le plan de dessus afin de reproduire trois fois le perçage cylindrique (diamètre 10 mm, profondeur 9 mm).

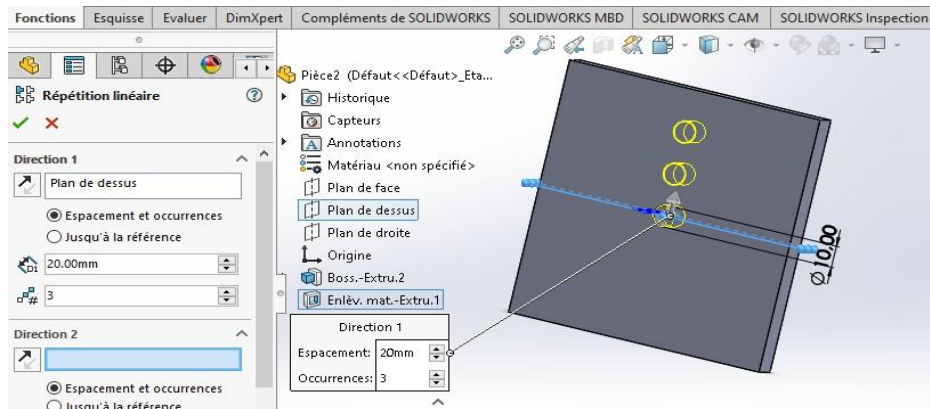


Figure 2.20 : représentative d'un Opération de répétition linéaire

➤ *L'étape N° 05* : À cette étape, la fonction de répétition circulaire a été utilisée autour d'un axe de référence (face <1>) pour dupliquer le perçage cylindrique **huit fois** autour du centre, avec un angle de 45° entre chaque trou. Cette répartition circulaire des perçages permet d'assurer l'équilibre et la régularité dans la conception du diffuseur d'air.

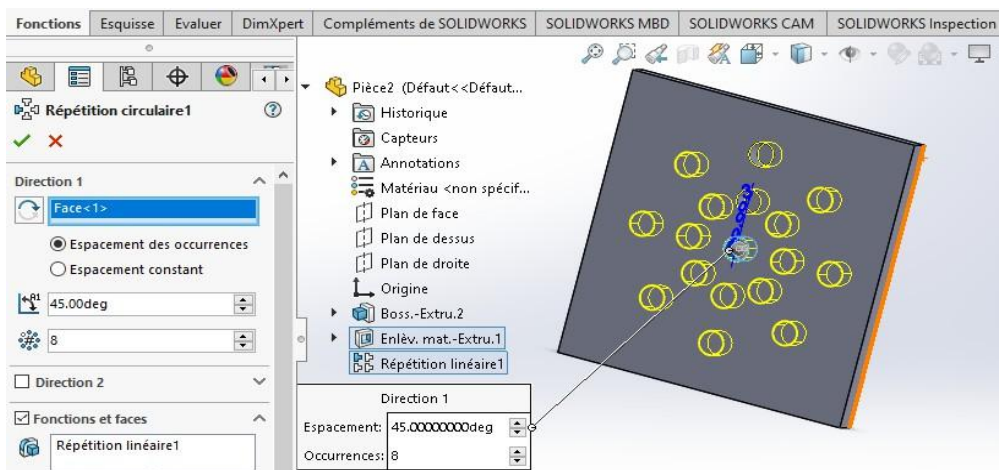


Figure 2.21. Représentative d'une Opération de répétition circulaire

➤ *L'étape N° 06 :* En résultat

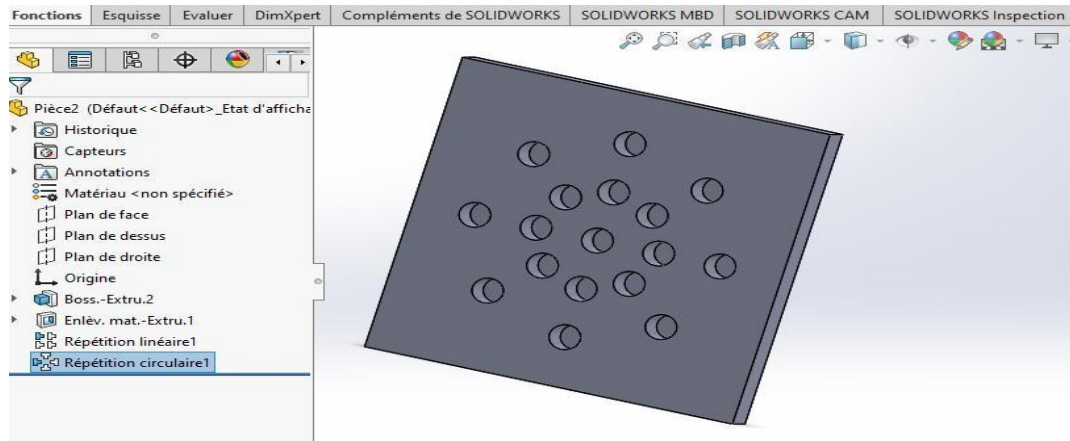


Figure 2.22 représentative du Résultat actuel

➤ *L'étape N° 07 :* Après avoir finalisé la distribution de l'ensemble des perçages, la fonction « Géométrie de référence » a été utilisée pour créer un plan parallèle au plan de face, situé à une distance de 15 mm. Ce plan servira de base pour les opérations supplémentaires prévues dans les étapes ultérieures de la modélisation.

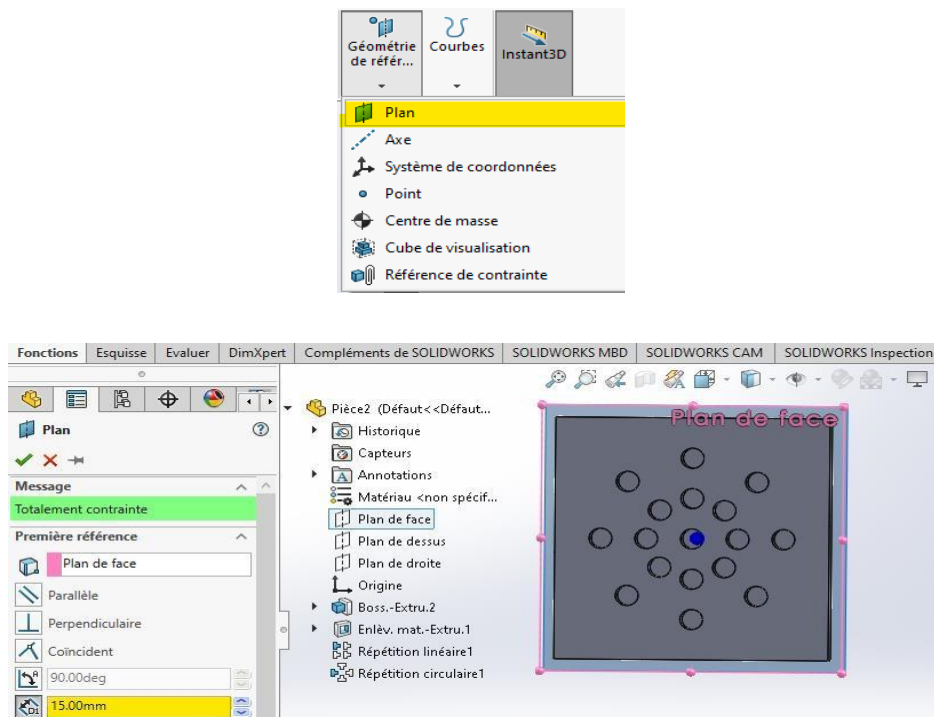


Figure 2.23 Création d'un nouveau plan parallèle au plan de face

➤ *L'étape N° 09* : Une ligne de 2 mm de longueur a été tracée, située à 1 mm de l'axe principal et à 2 mm du centre du dessin. Ensuite, la fonction de symétrie (« Symétriser les entités ») a été utilisée pour créer une ligne symétrique par rapport à l'axe.

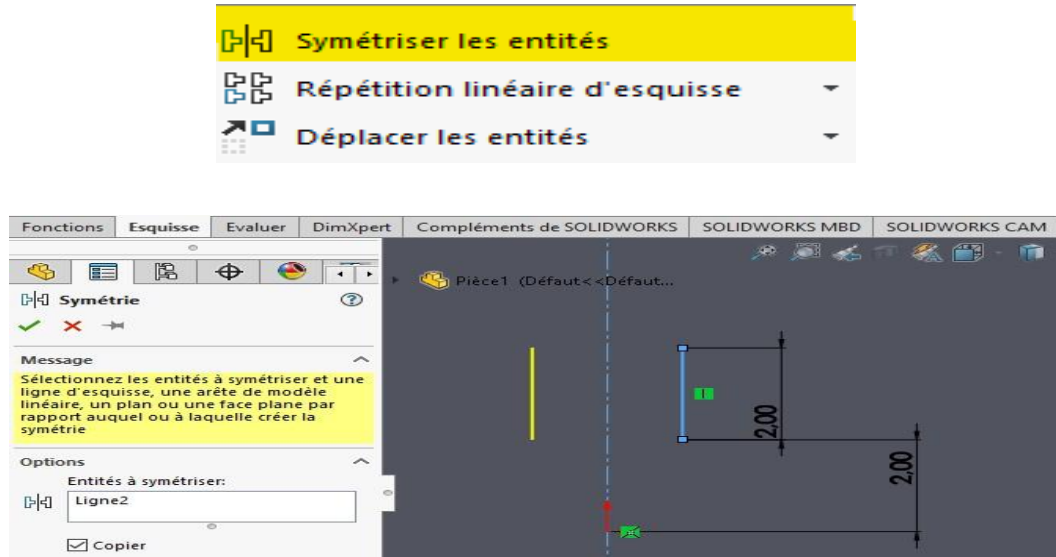


Figure 2.24 : Opération symétrique une ligne par rapport à l'axe

➤ *L'étape N° 10* : En résultat :

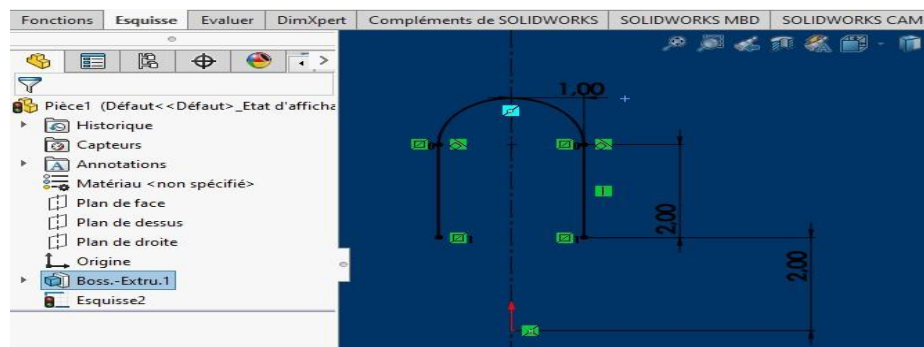


Figure 2.25 : Les dimensions lobées dans le plan extérieur

➤ **L'étape N° 11 :** Après la formation de l'arc, la fonction de répétition circulaire a été appliquée autour du point de référence « point-1 » avec une rotation de 360 degrés, ce qui a permis d'obtenir quatre copies identiques et symétriquement réparties autour du centre de rotation.

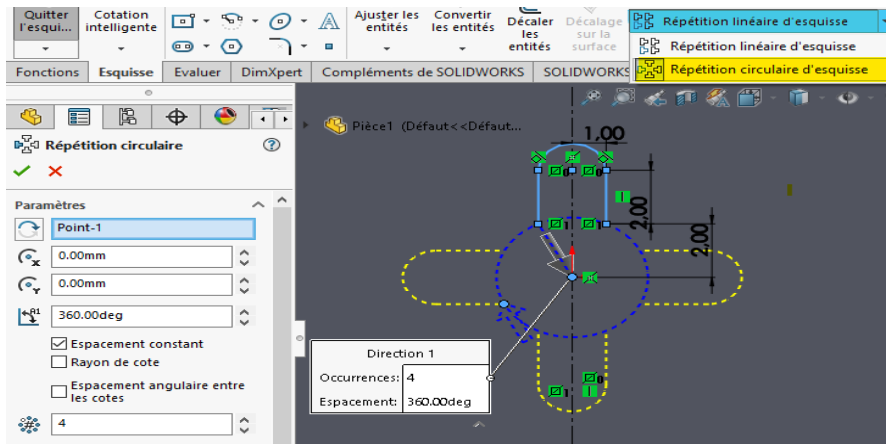


Figure 2.26 : Répétition circulaire de l'arc

L'étape N° 12 : Ensuite, la fonction de répétition linéaire (répétition linéaire) a été utilisée pour dupliquer la ligne sur l'axe linéaire Axe X, en répétant l'opération trois fois afin d'obtenir trois copies identiques sur cet axe.

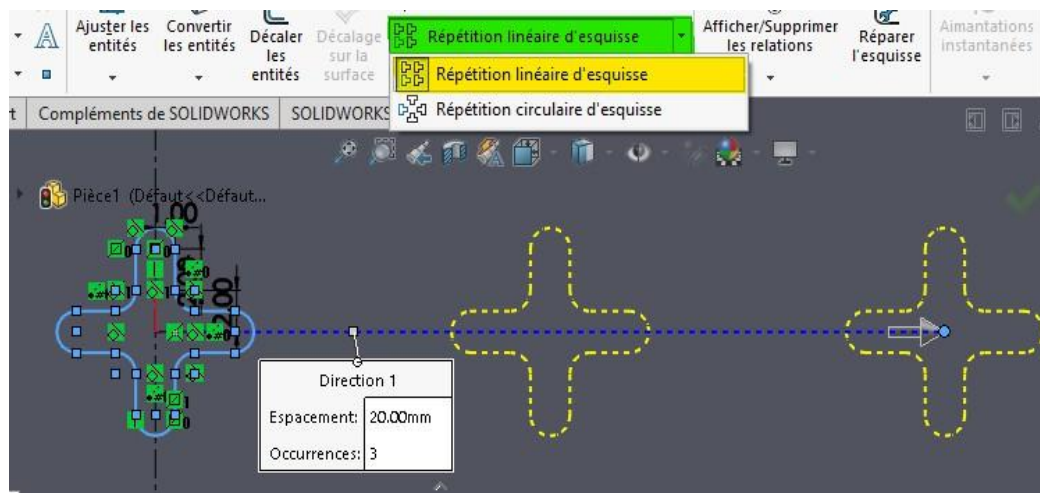


Figure 2.27 : représentative de Répétition linéaire de lobé

➤ **L'étape N° 14 :** Par la suite, la fonction de répétition circulaire a été mise en œuvre afin de reproduire l'entité sélectionnée huit fois autour du point de rotation nommé « point-1 », sur l'ensemble des 360 degrés. Cette opération a permis d'obtenir huit copies parfaitement équidistantes et symétriquement disposées autour du centre de rotation.

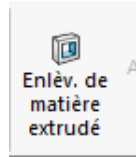
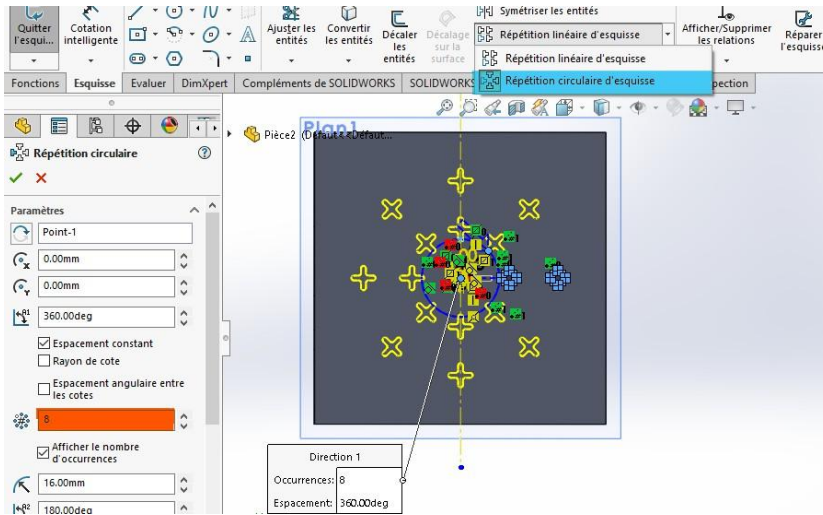


Figure 2.28 ; Répétition circulaire de loper dans le plan 01

➤ **L'étape N° 15 :** Après avoir obtenu la géométrie désirée grâce aux opérations de répétition linéaire et circulaire, une étape de soustraction de matière par extrusion a été réalisée. Cette opération permet de créer une perforation traversant l'épaisseur totale du volume (1 mm), afin d'aboutir à la forme géométrique finale en conformité avec les exigences du projet.

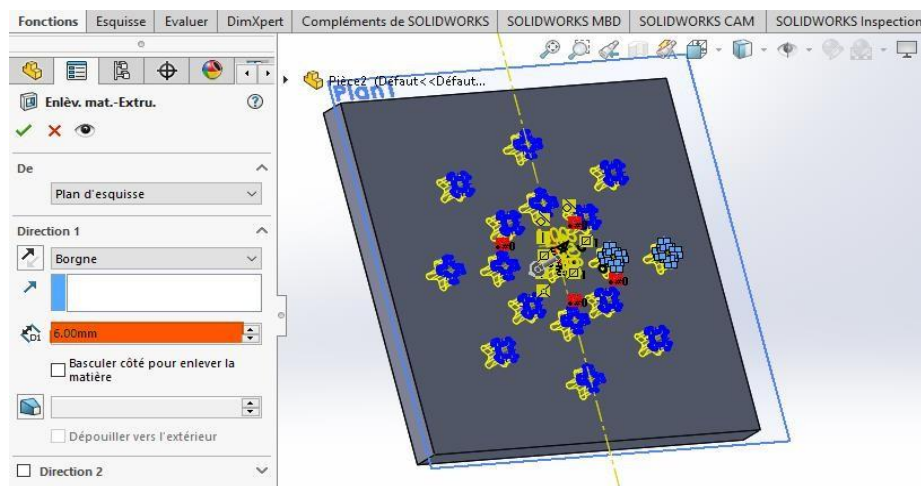


Figure 2.29 : Enlèvement de matière par lissage

➤ **L'étape N° 16 :** Après avoir obtenu la géométrie désirée grâce aux opérations de répétition linéaire et circulaire, une étape de soustraction de matière par extrusion a été réalisée. Cette opération permet de créer une perforation traversant l'épaisseur totale du volume (1 mm), afin d'aboutir à la forme géométrique finale en conformité avec les exigences du projet.

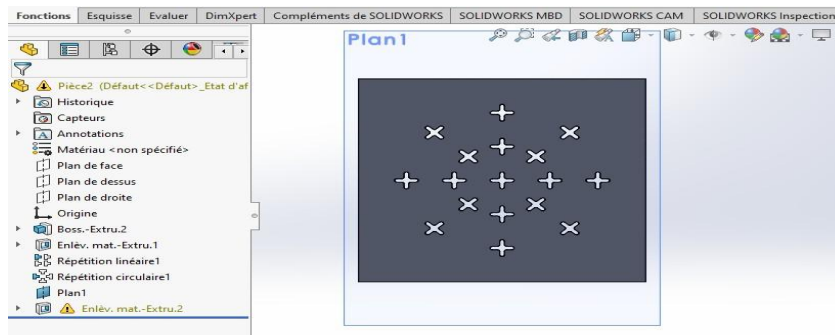


Figure 2.30 Enlève de matière par extrusion 1 mm

➤ **L'étape N° 17 :** Après la finalisation du modèle géométrique et la vérification de toutes les spécifications, le fichier est enregistré au format STL via l'option « enregistrer sous ». Ce choix permet d'exporter le modèle dans un format universellement reconnu par les logiciels d'impression 3D, facilitant ainsi son transfert vers l'imprimante pour une fabrication physique précise et conforme aux exigences du projet.

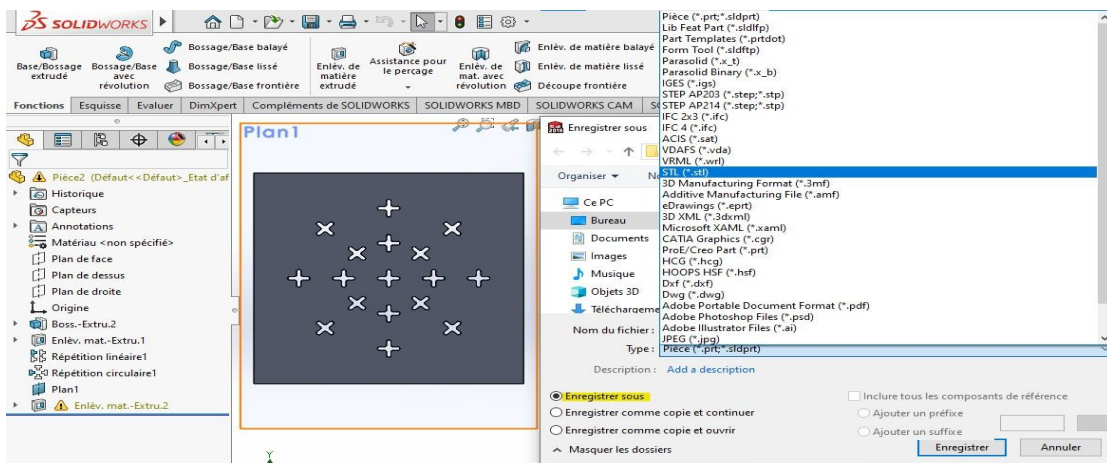


Figure 2.31 : Le résultat final du diffuseur pour la géométrie lobée

➤ **L'étape N° 18 :** Après la finalisation de la conception du modèle géométrique, la phase de « mise en plan » a été initiée. Une feuille de dessin au format A4 (ISO) a été choisie comme cadre de travail principal. Dans cette étape, le modèle géométrique a été inséré dans la feuille de dessin afin de préciser les dimensions exactes de chaque partie du modèle, tout en mettant en évidence les détails de la vue avant et arrière. Cette démarche contribue à fournir une représentation claire et précise du modèle, facilitant ainsi l'analyse technique et la préparation à la fabrication ultérieure.

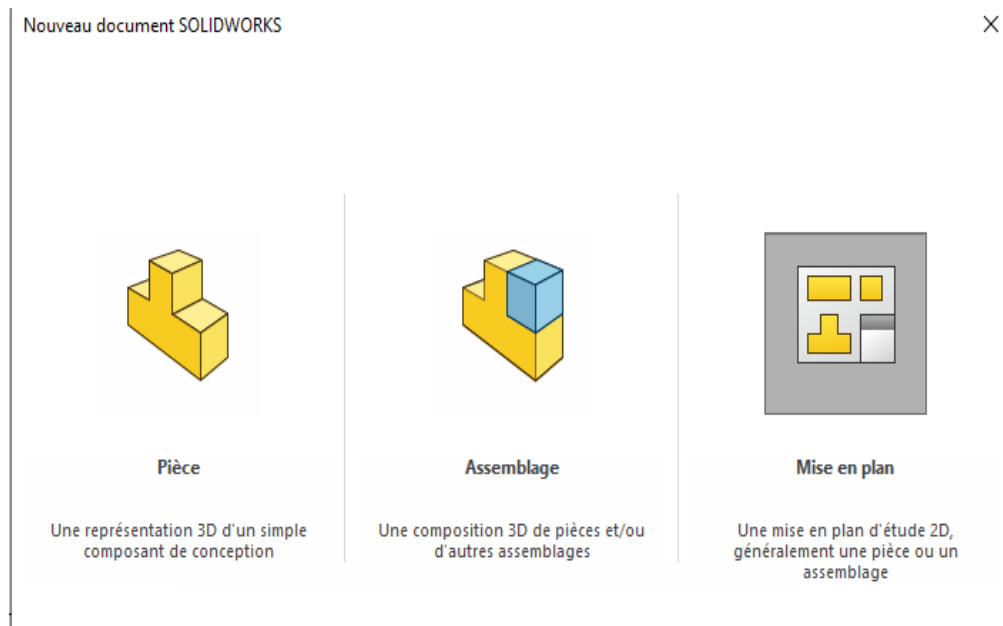


Figure .32 : Cliquons sur mise en plan

➤ **L'étape N° 19 :** En résulte

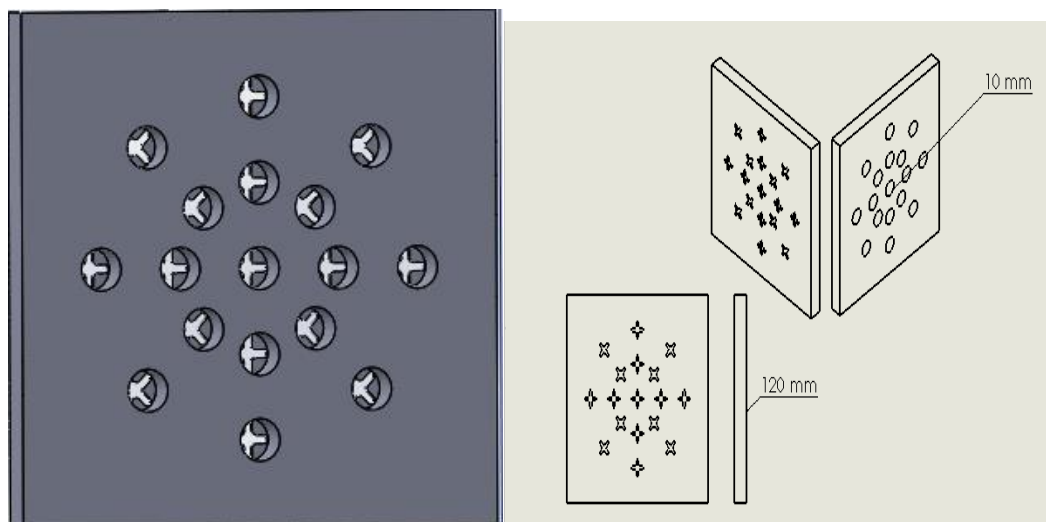


Figure 2.33 : Schéma pour la géométrie de lobée

- *L'étape N° 20* : Finalement la pièce géométrie lobé en 3D

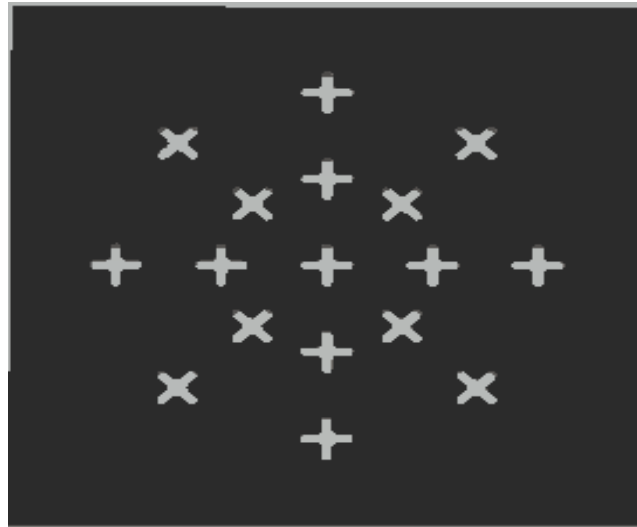


Figure 2.34 : Géométrie lobé en 3D

II.5. Diffuseur de géométrie Tourbillonnaire :

- *L'étape N° 01* : Dans cette étape, un cercle de diamètre 12 mm a été tracé sur le plan de face à l'aide de l'outil Cercle, puis coté précisément avec l'outil Cotation intelligente dans l'environnement d'esquisse de SOLIDWORKS.

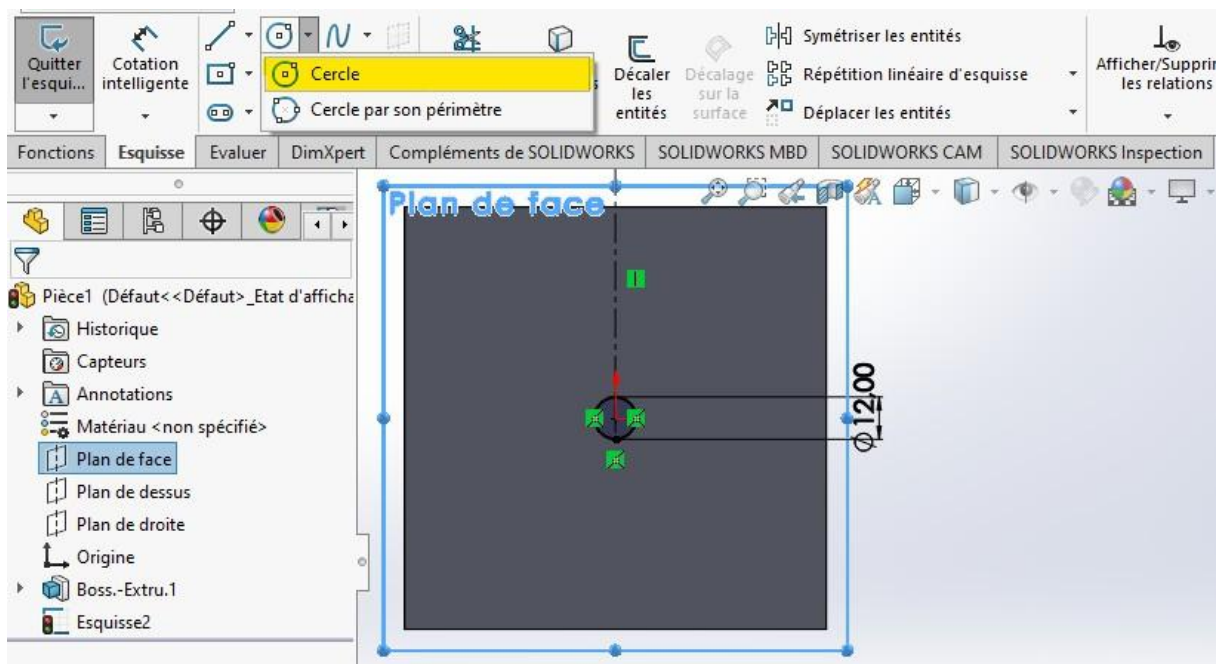


Figure 2.35 : Créations un cercle au centre de rectangle 12 mm

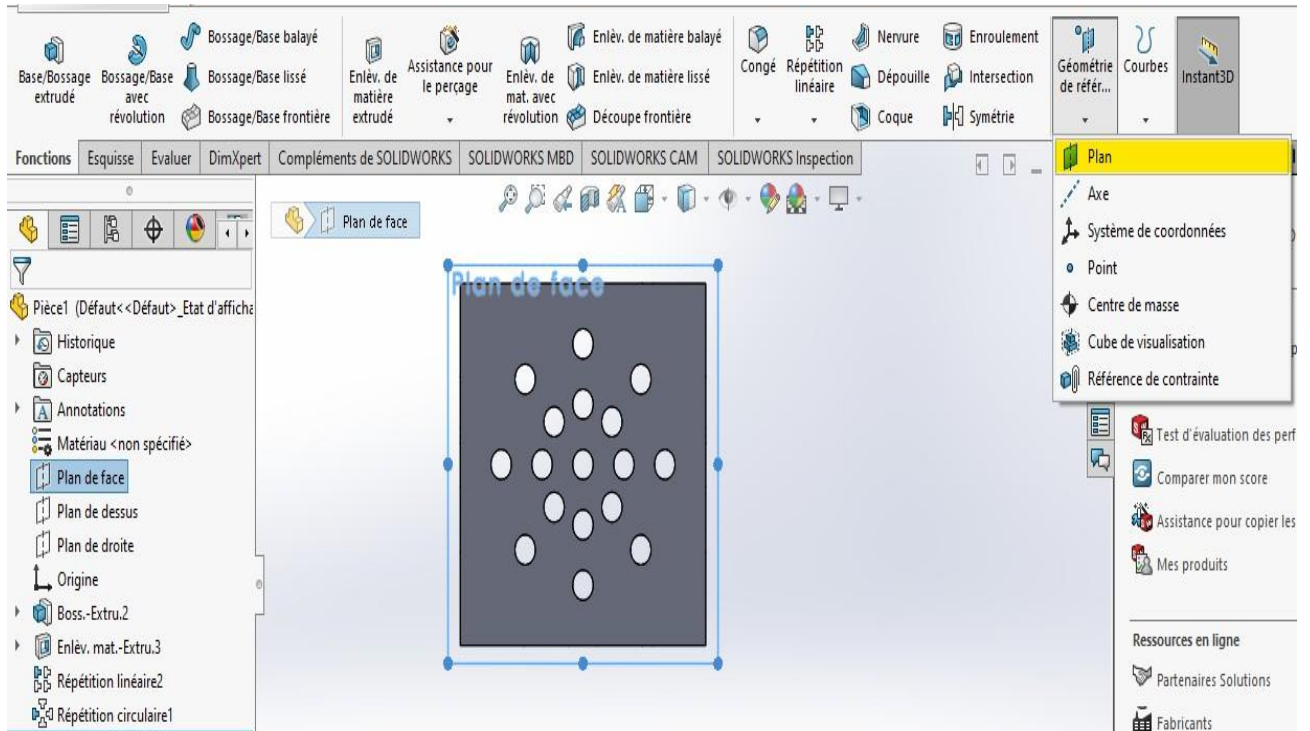


Figure 2.36 : Création d'un nouveau plan

- **L'étape N° 02 :** Fonction Géométrie de référence. Cette étape permet de définir un plan supplémentaire, nécessaire pour réaliser des opérations ou des esquisses sur une orientation spécifique par rapport à la géométrie existante.
- **L'étape N° 03 :** Le nouveau plan a ensuite été positionné à une distance de 8 mm par rapport à la géométrie de référence, en utilisant l'option de décalage lors de la création du plan dans Géométrie de référence. Cette opération permet de définir précisément l'emplacement du plan pour les étapes de modélisation suivantes

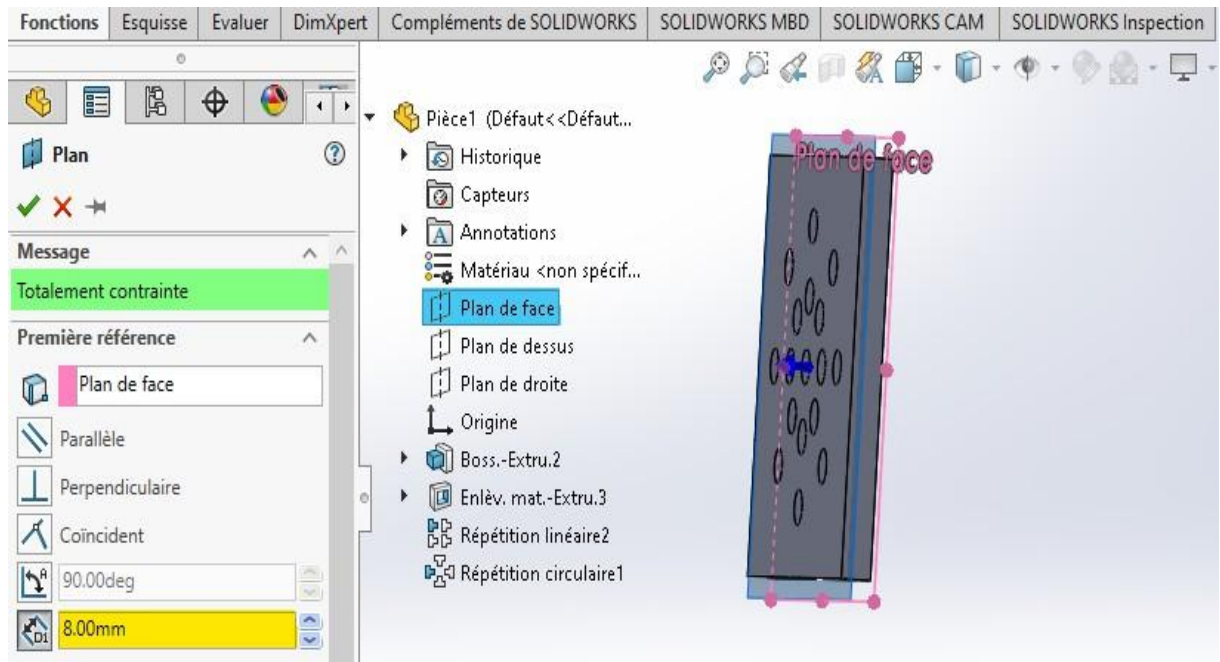


Figure 2 .37 : Création du nouveau plan parallèle au plan de face

- **L'étape N° 04 :** Ensuite, nous sommes entrés dans l'environnement Esquisse sur le Plan1 afin de tracer une ligne de construction.

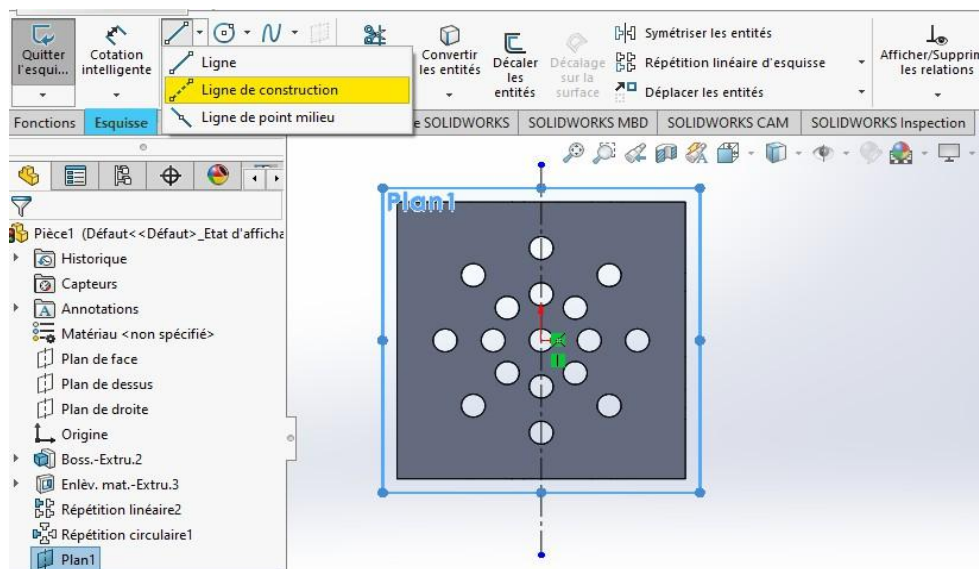


Figure 2 .38: Ligne de construction

- **L'étape N° 05 :** J'ai commencé à dessiner les ailettes. J'ai tracé une ligne inclinée de 5 mm de longueur, puis j'ai utilisé la fonction de symétrie pour la dupliquer par rapport à l'axe de construction ligne.

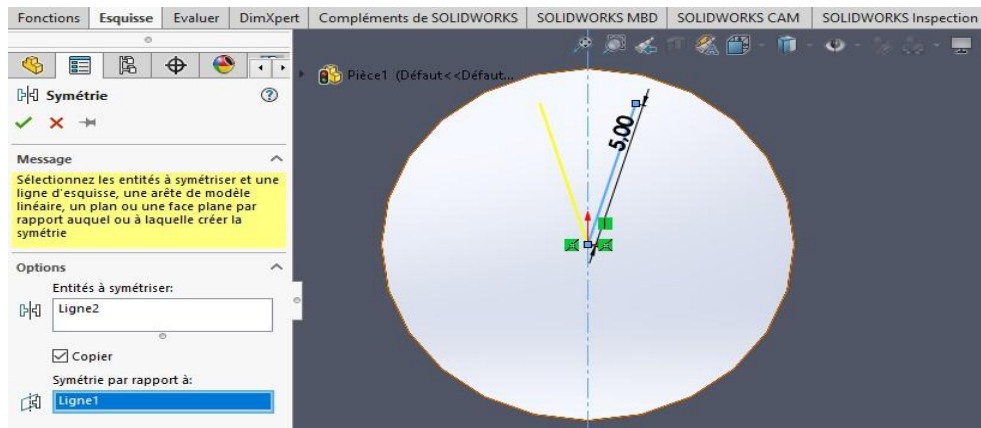


Figure 2.39 : Opération symétrique une ligne par rapport à l'axe

- **L'étape N° 06 :** sa distance par rapport à l'axe (1 mm) et la distance entre les deux lignes symétriques (2mm).

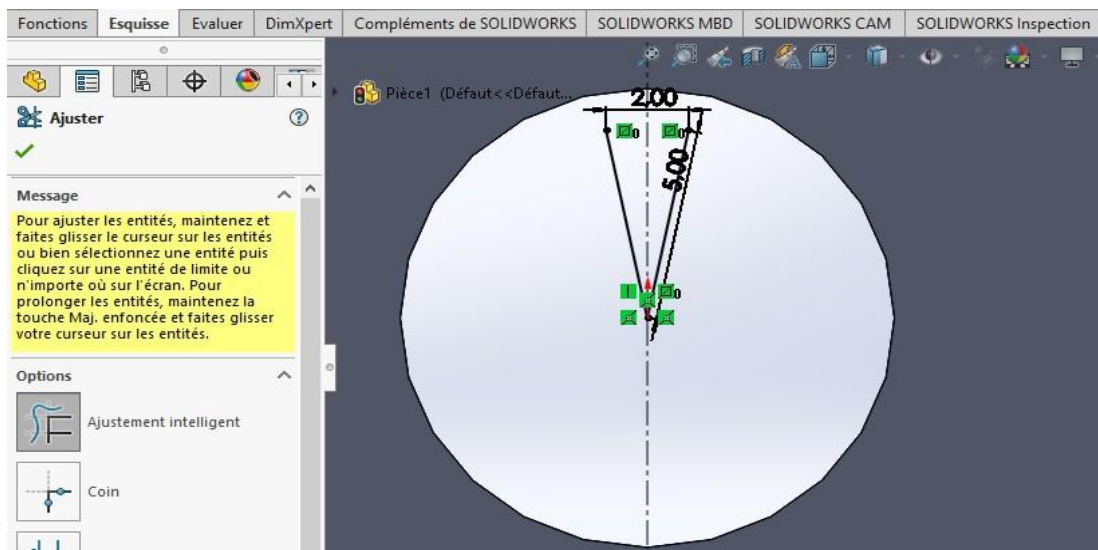


Figure 2.40 : Les dimensions ailettes

- **L'étape N° 07 :** Déterminer le centre du cercle ou de l'arc entre les deux lignes symétriques.

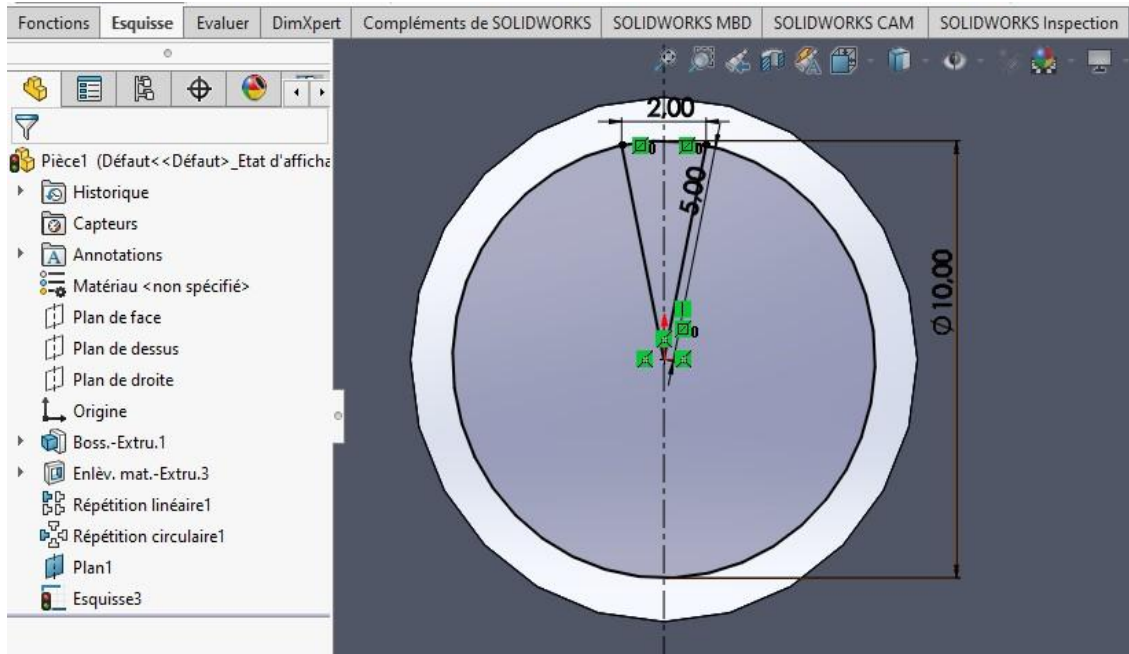


Figure 2.41 : représentative Dessiner de l'arc

➤ L'étape N° 08 : Dans cette étape, Nous avons simplement supprimé certaines parties du cercle.

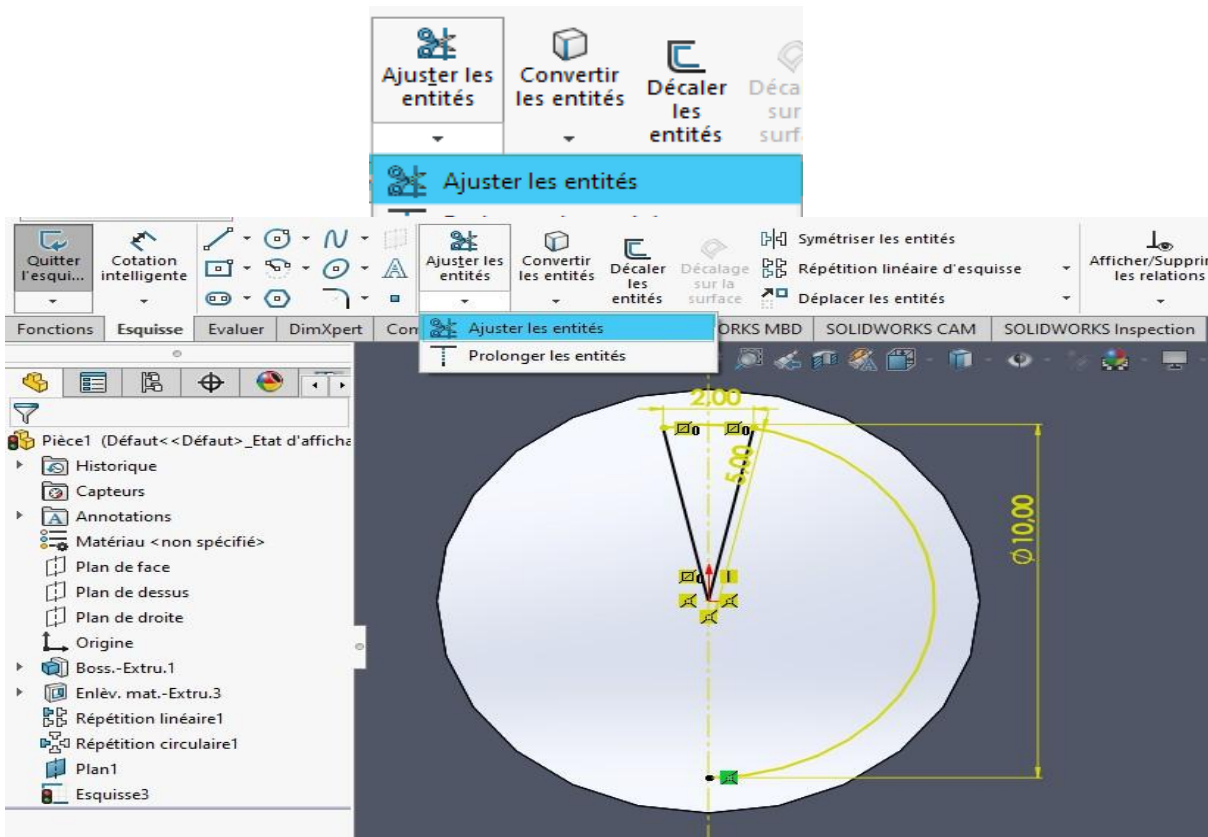


Figure 2.42 : Effacer les parties du cercle

L'étape N° 09 : Lors de cette étape utilisé la fonction "Bossage-extrudé" pour définir la forme sur le plan médian (plan milieu) avec une épaisseur de 01mm.

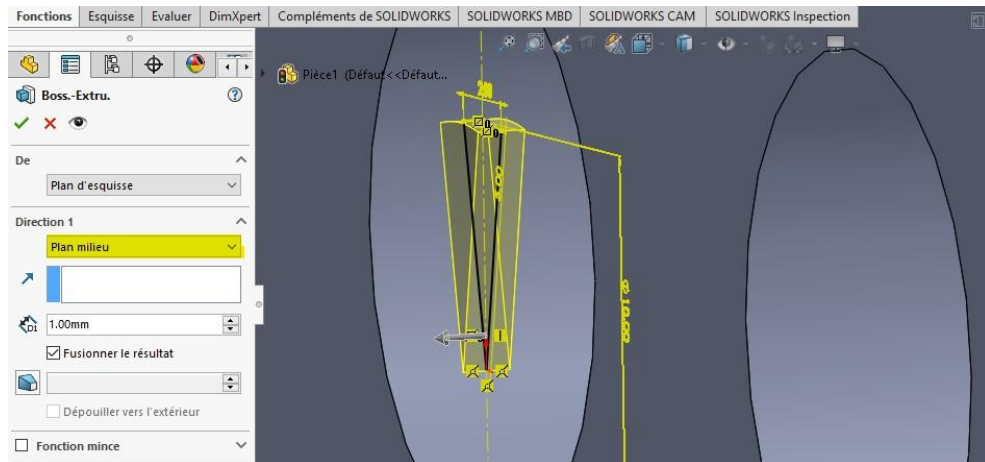


Figure 2.43 : représentative Bossage extrudé d'ailette

➤ L'étape N° 10 : Après avoir sélectionné la forme et utilisé les fonctions Insertion, Surface et Déplacer/Copier.

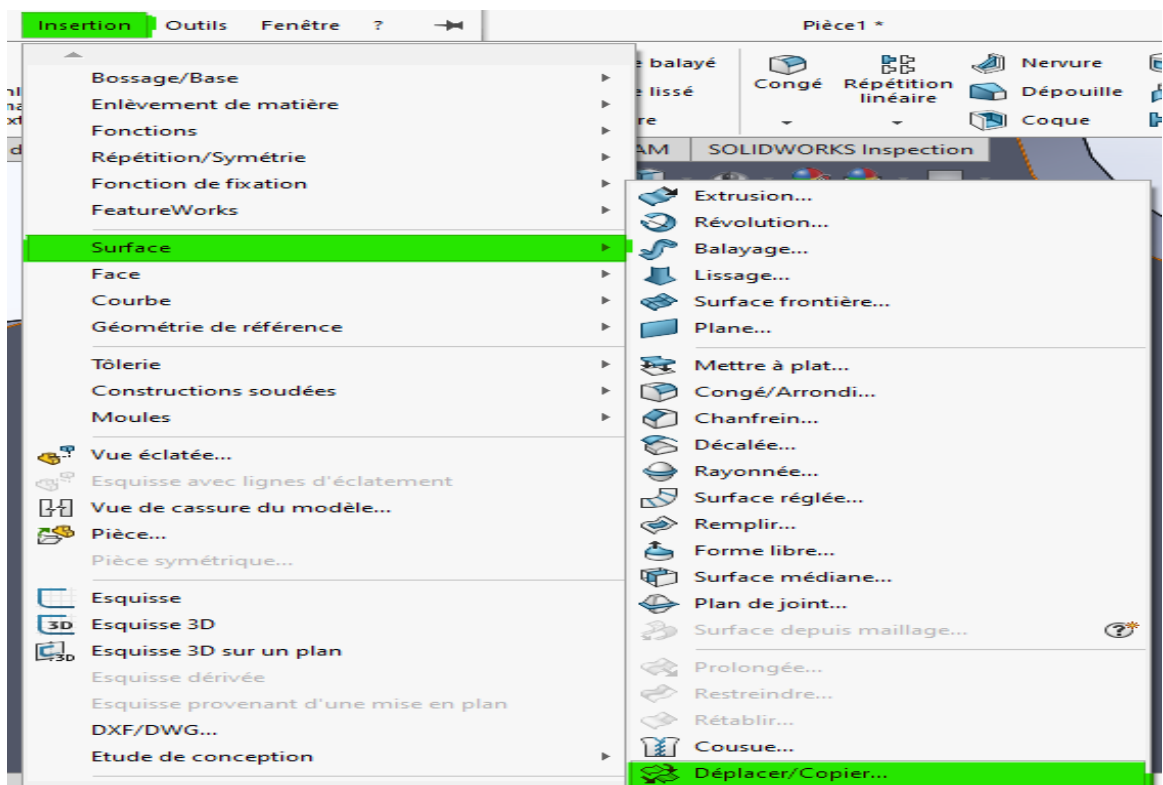


Figure 2.44 : représentative L'étape de rotations ailettes

- **L'étape N° 11 :** Ensuite la forme a été tournée autour de l'axe avec un angle de 60 degrés.

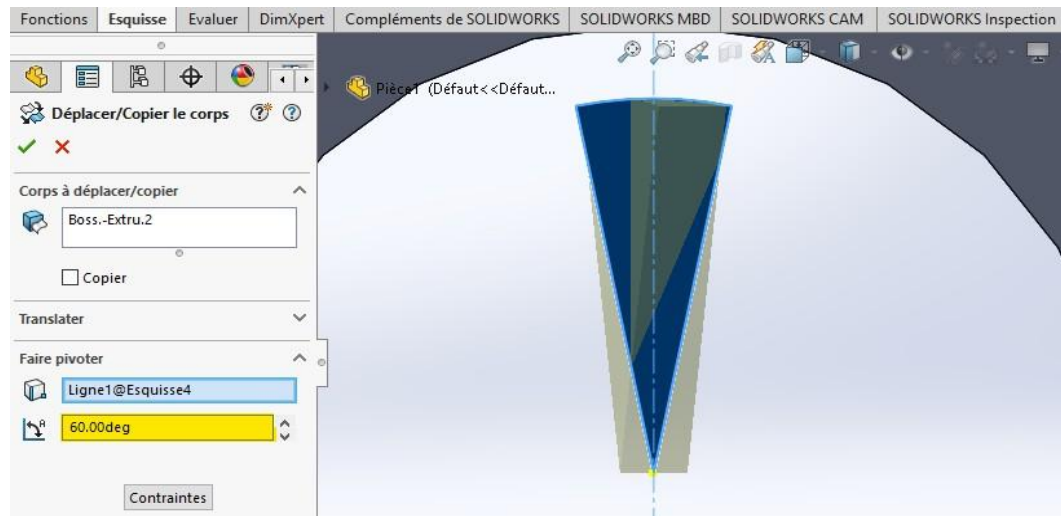


Figure II .45 : représentative des rotations ailettes 60 degrés

- **L'étape N° 12 :** Construisons une ailette puis la répété circulairement pour obtenir un jet tourbillonnaire de quatre ailettes. En passe au plan de droite pour répéter de cette façon.
- **L'étape N° 13 :** dans cette étape nous sommes arrivés à cette résultat :

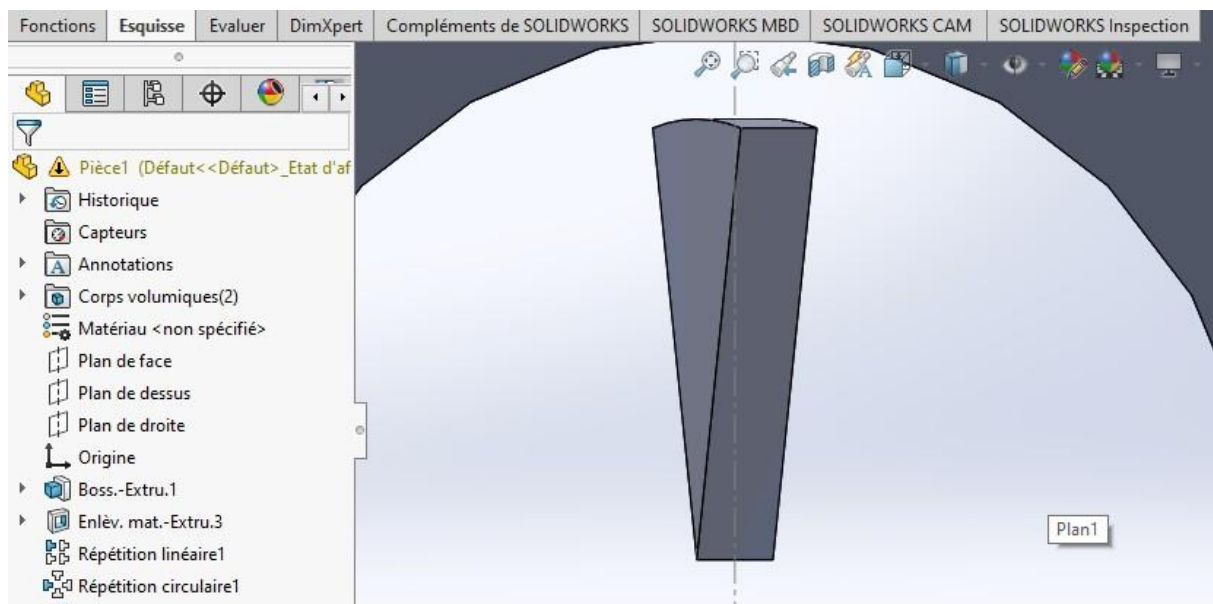


Figure 2 .46 : représentative de l'ailette du jet tourbillonnaire

- **L'étape N° 14 :** Ensuite, utilisé la fonction de répétition circulaire pour dupliquer la forme des ailettes quatre fois autour de l'axe défini par la face <1>, chaque duplication étant séparée par un angle de 90 degrés.

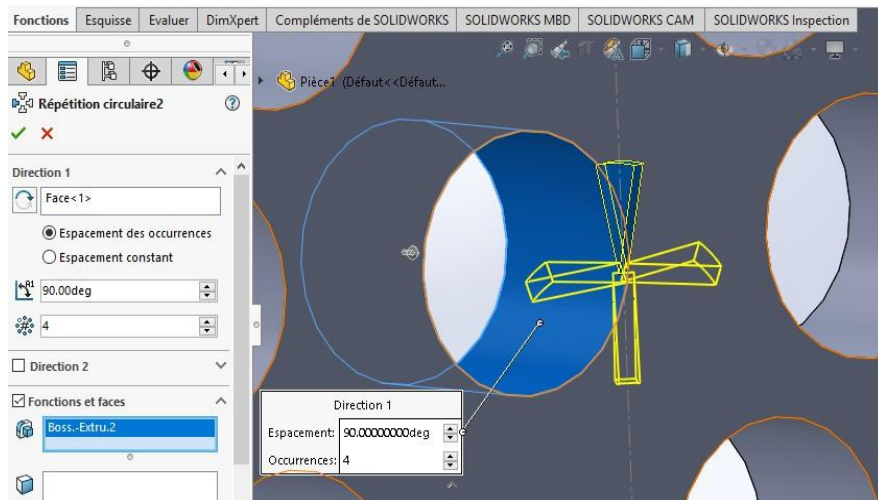


Figure 2.47 : représentative de la Répétition circulaire de ailettes

- *L'étape N° 15* : Dans ce plan en construisons le cylindre ou l'hub du jet tourbillonnaire

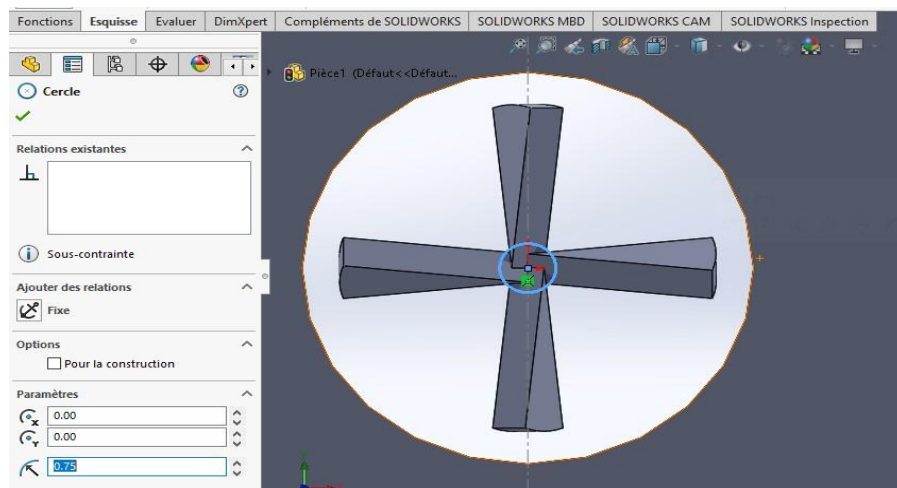


Figure 2.48 : représentative du dessin de la forme d'ailette dans l'hub

- *L'étape N° 16* : Puis en faisons le bossage de ce dessin avec les paramètres du bossage qui sont présenter dans la figure ci-dessous

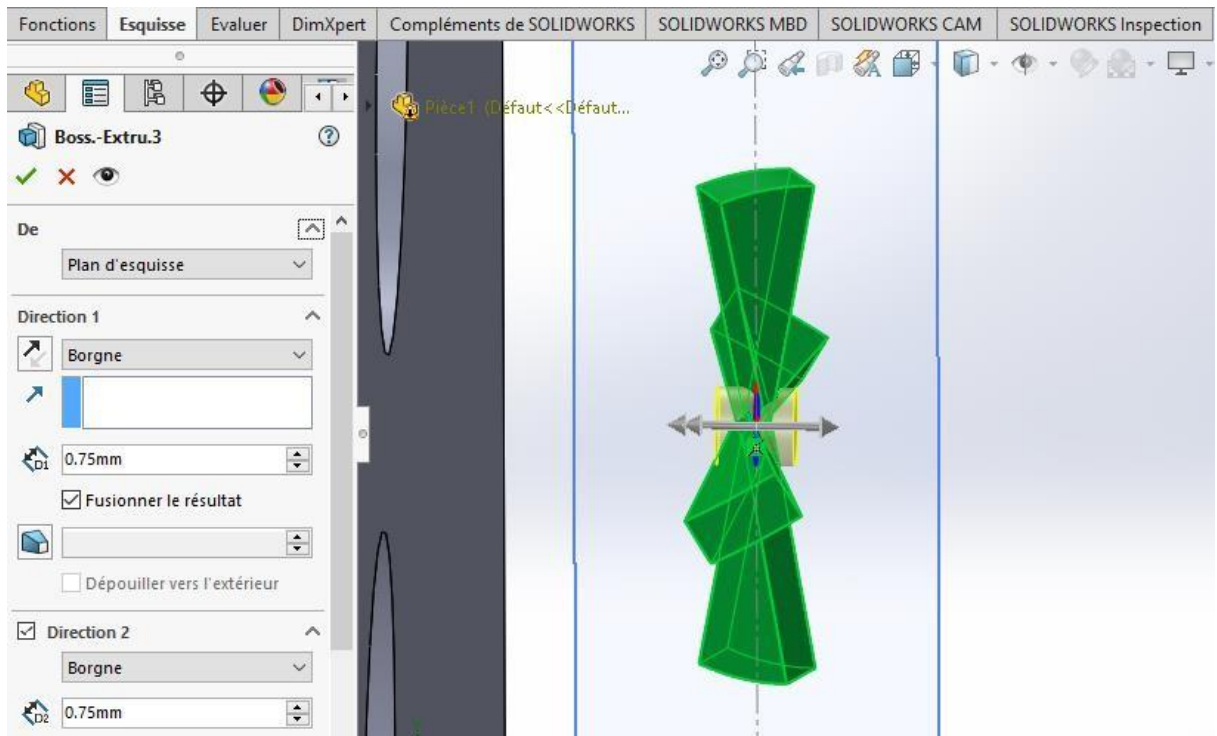


Figure 2.49 : représentative de la construction de l'hub du jet tourbillonnaire par bossage extrudé

➤ L'étape N° 17 : En suite :

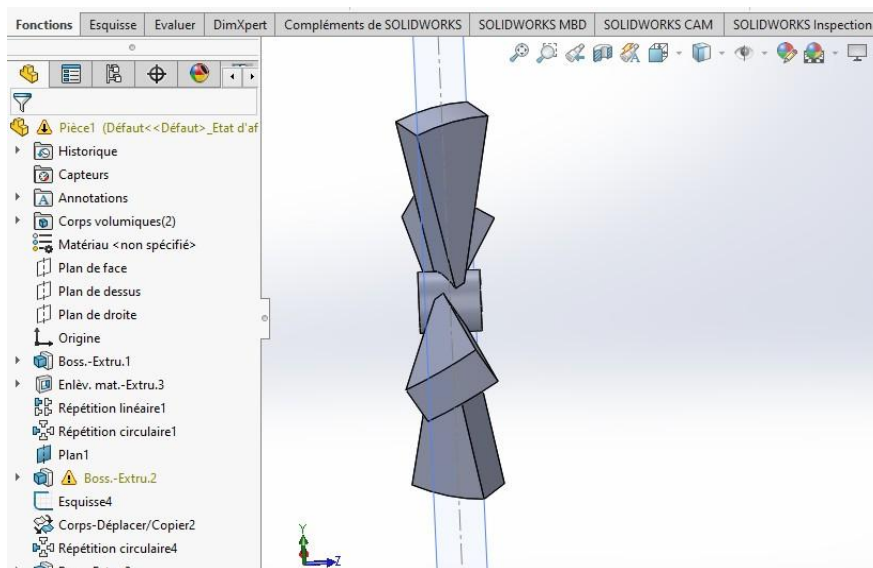


Figure 2.50 : représentative du Résultat final du jet tourbillonnaire centrale

➤ L'étape N° 18 : À cette étape, la fonction de répétition linéaire a été utilisée pour copier les ailerons et les petites ouvertures circulaires. Par la suite, une répétition circulaire de huit copies avec un angle de 45 degrés.

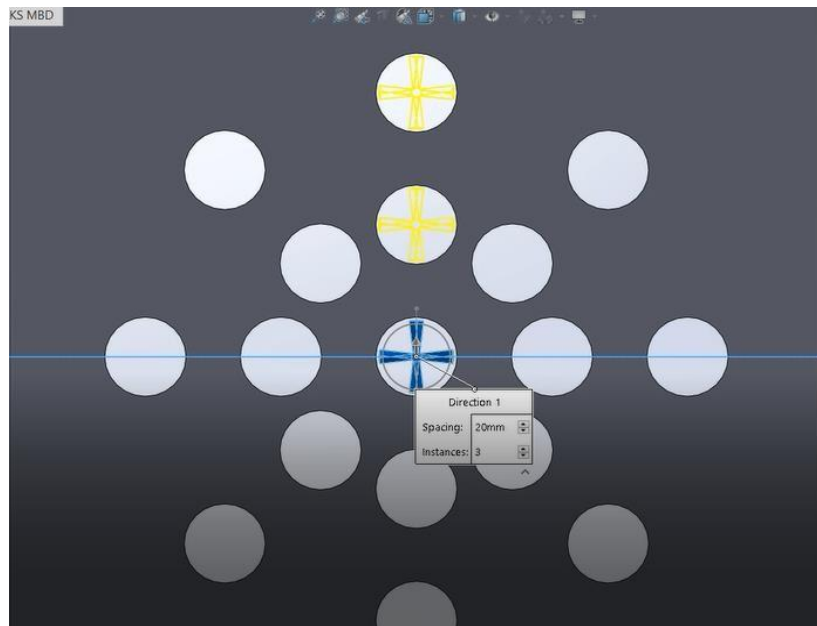


Figure 2.51 : représentative de la Répétition linéaire

L'étape N° 19 : À cette étape, un cercle de 10 mm de diamètre a été tracé au centre du dessin, de manière à passer par toutes les ailettes, afin de définir la limite extérieure des éléments et faciliter les opérations de modélisation ultérieures.

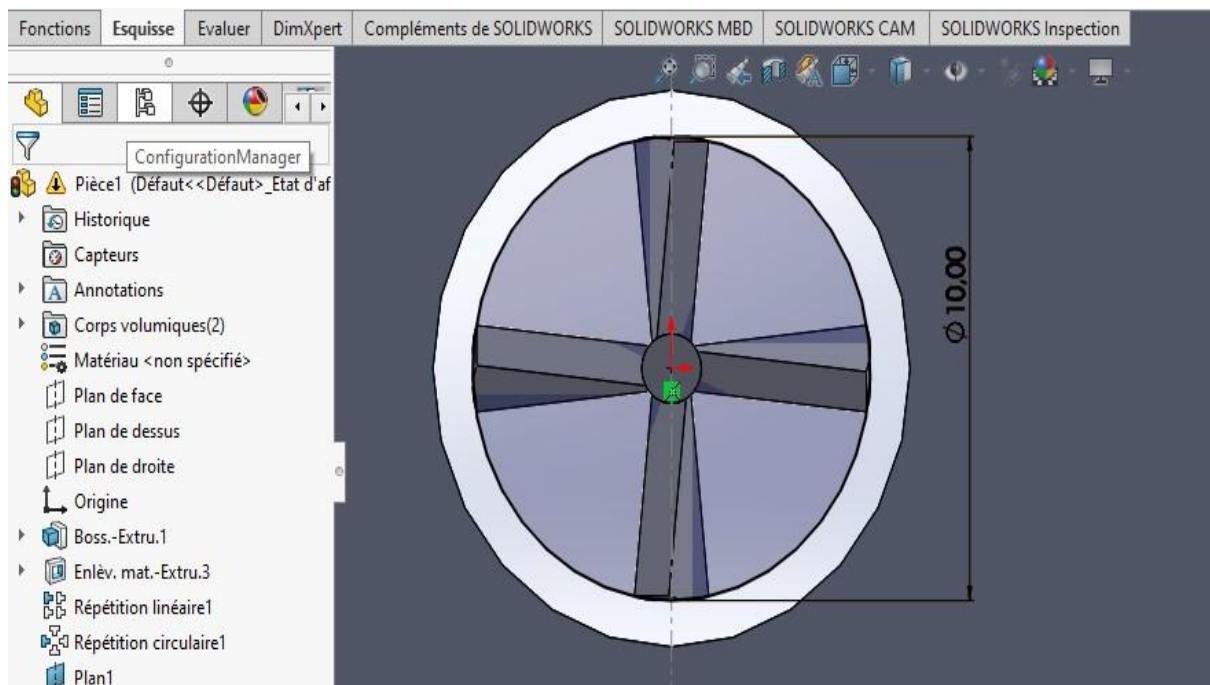


Figure 2.52 : représentative de la création d'un cercle autour des ailettes

➤ **L'étape N° 20 :** Ensuite, répétition linéaire d'un cercle autour des ailettes .

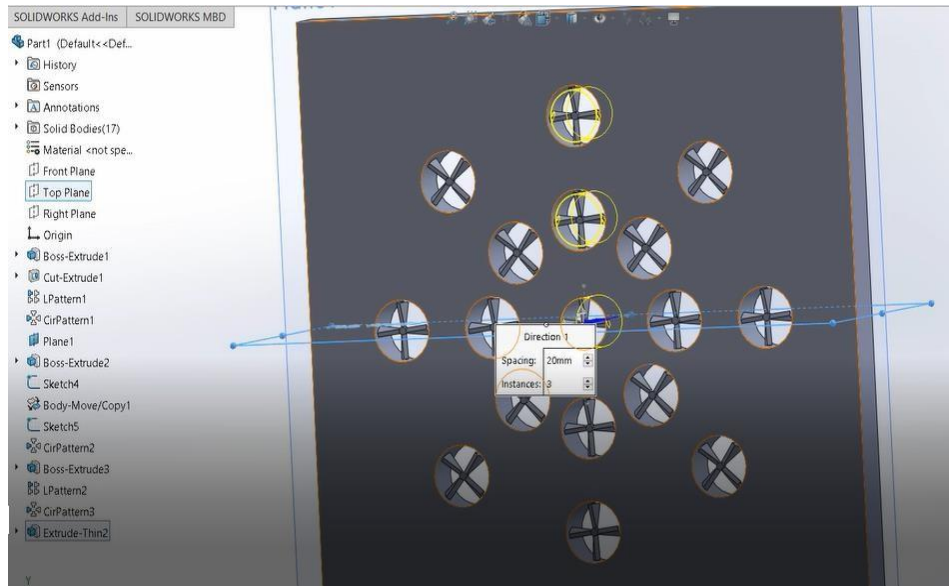


Figure 2.53 : représentative de la Répétition linéaire des cercles

➤ **L'étape N° 20 :** Ensuite, répétition circulaire d'un cercle autour des ailettes l'angle est 45 degrés.

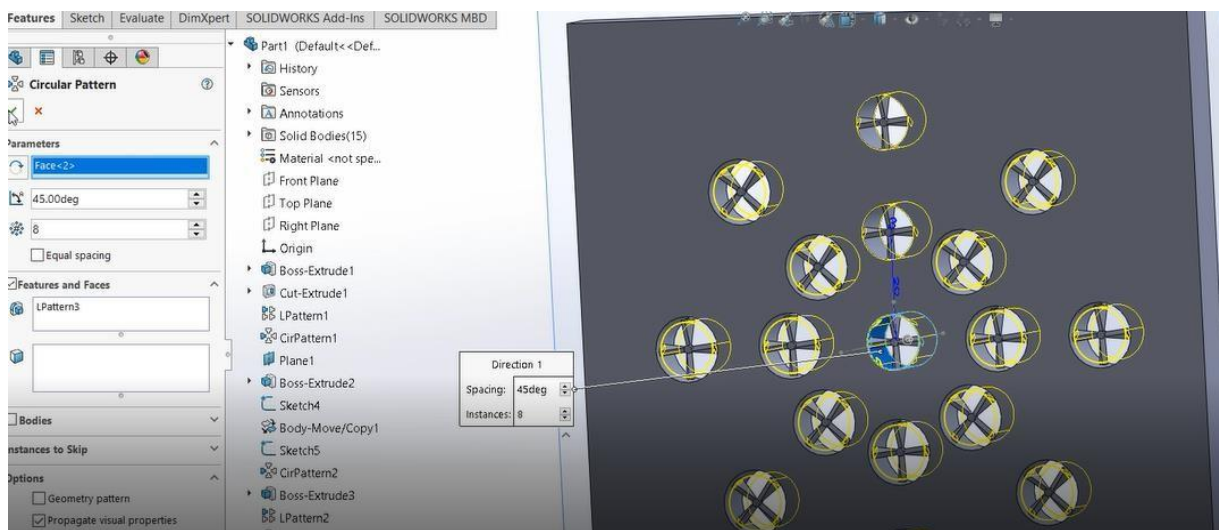


Figure 2.53 : représentative du résultat final de la répétition circulaire

➤ **L'étape N° 21 :** À cette étape, après avoir dessiné un cercle de 10 mm de diamètre et réparti les ailettes, la fonction Bossage-extrudé a été utilisée pour ajouter une épaisseur de 2 mm sur le pourtour du cercle de 10 mm

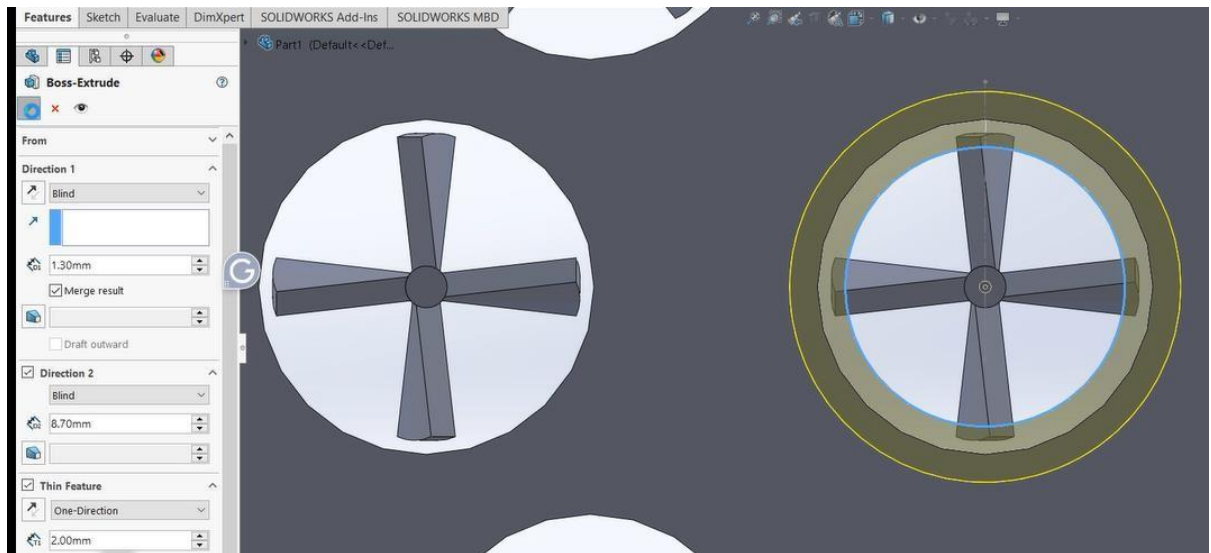


Figure 2.54 : représentative de la répétition circulaire d'opération de bossage du cercle

➤ **L'étape N° 22 :** La position de toutes les ailettes a été définie de manière que leur distance par rapport au bord extérieur de la structure soit fixée à 8,70 mm, comme illustré sur la figure.

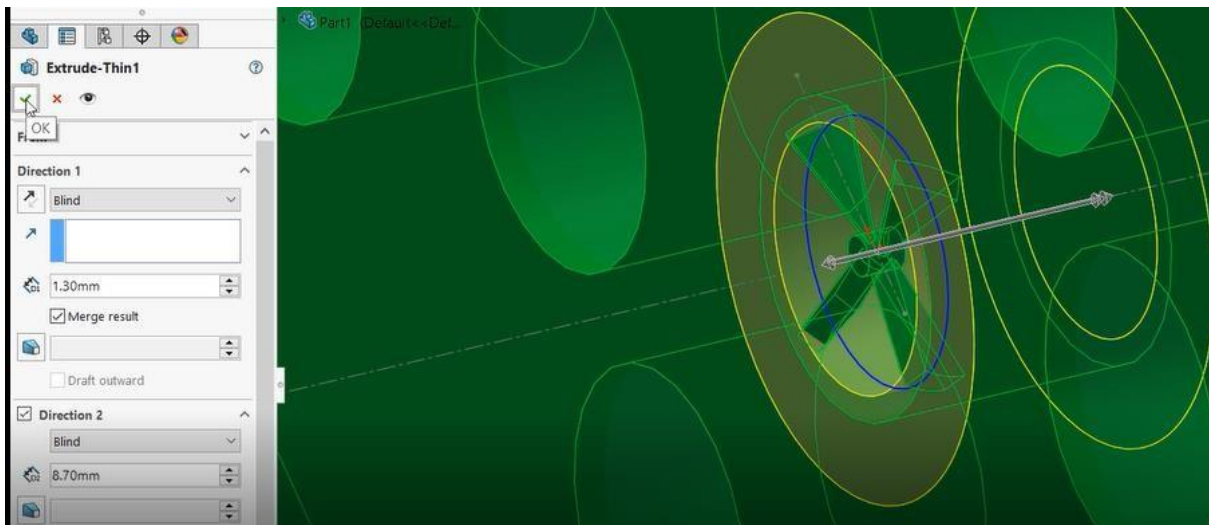


Figure 2.55 : représentative du Bossage extrudé au bord extérieur

➤ **L'étape N° 23 :** Donc ça c'est le résultat final pour notre diffuseur de géométrie tourbillonnaire

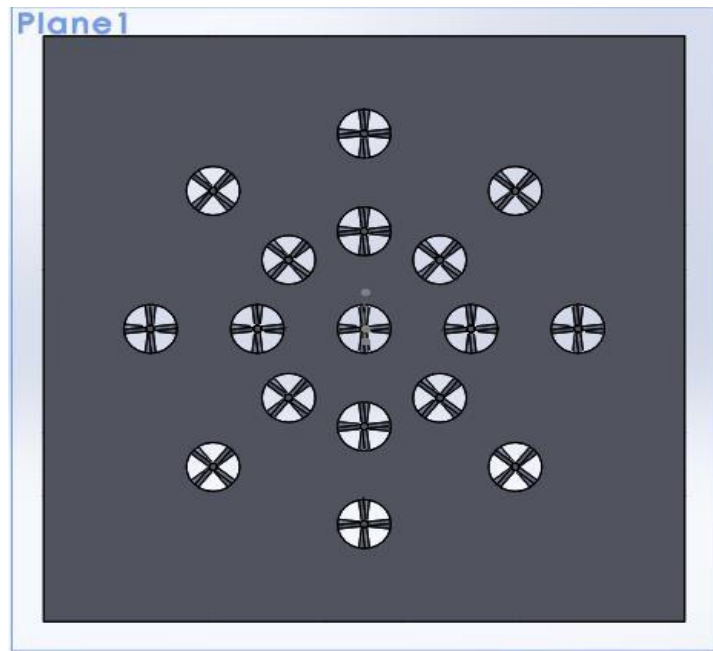


Figure II .56 : Résultat final pour le diffuseur de géométrie tourbillonnaire

➤ **L'étape N° 24 : Ensuite**, utilisé la fonction mise en plan et choisi le format A4 (ISO). Ensuite inséré la géométrie du diffuseur et défini les dimensions, comme illustré sur la figure.

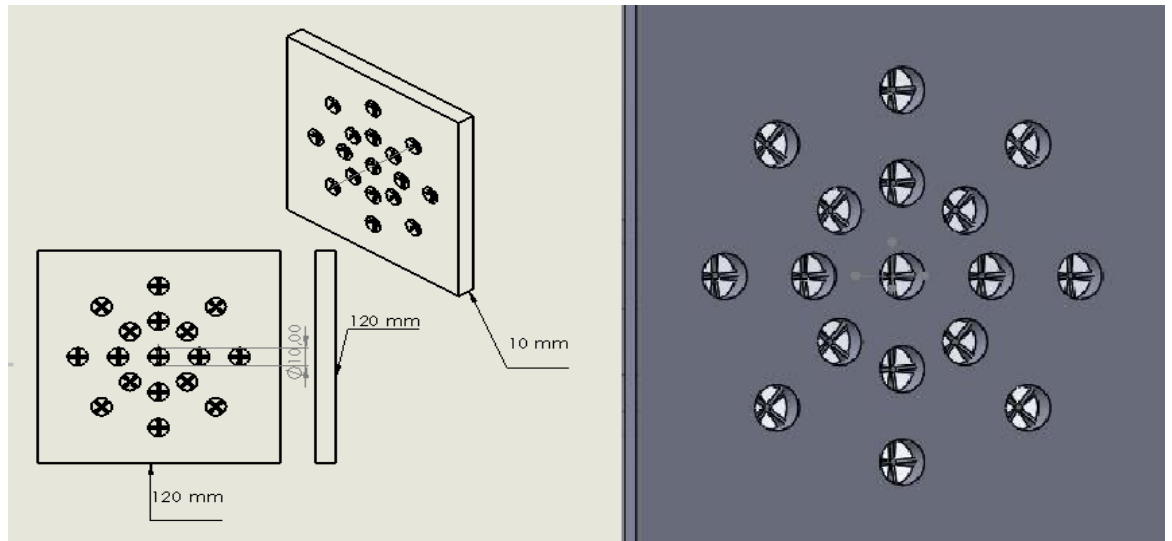


Figure 2 .57 : représentative Schéma de la géométrie tourbillonnaire

➤ **L'étape N° 25 : Impression des diffuseurs en 3D**

Pour passer à l'impression en 3D il faut enregistrer la format STL voir figure.

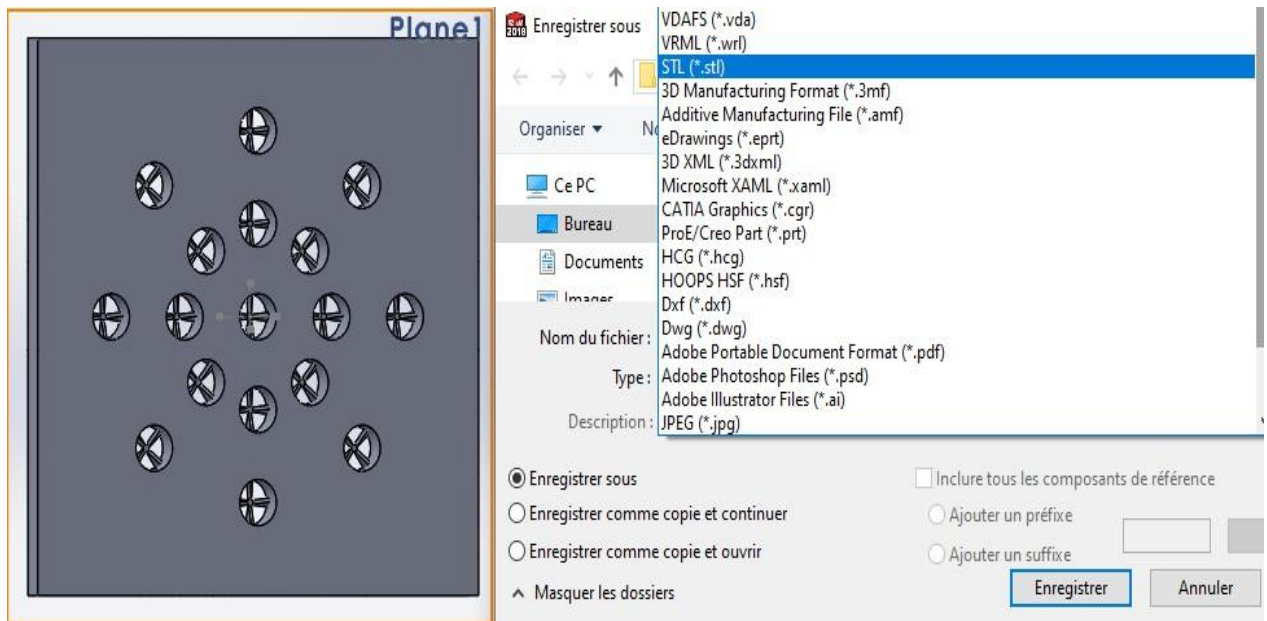


Figure 2.58 : Enregistrements du fichier sous le format STL

➤ L'étape N° 26 : Résultat final du diffuseur pour la géométrie tourbillonnaire en 3D.

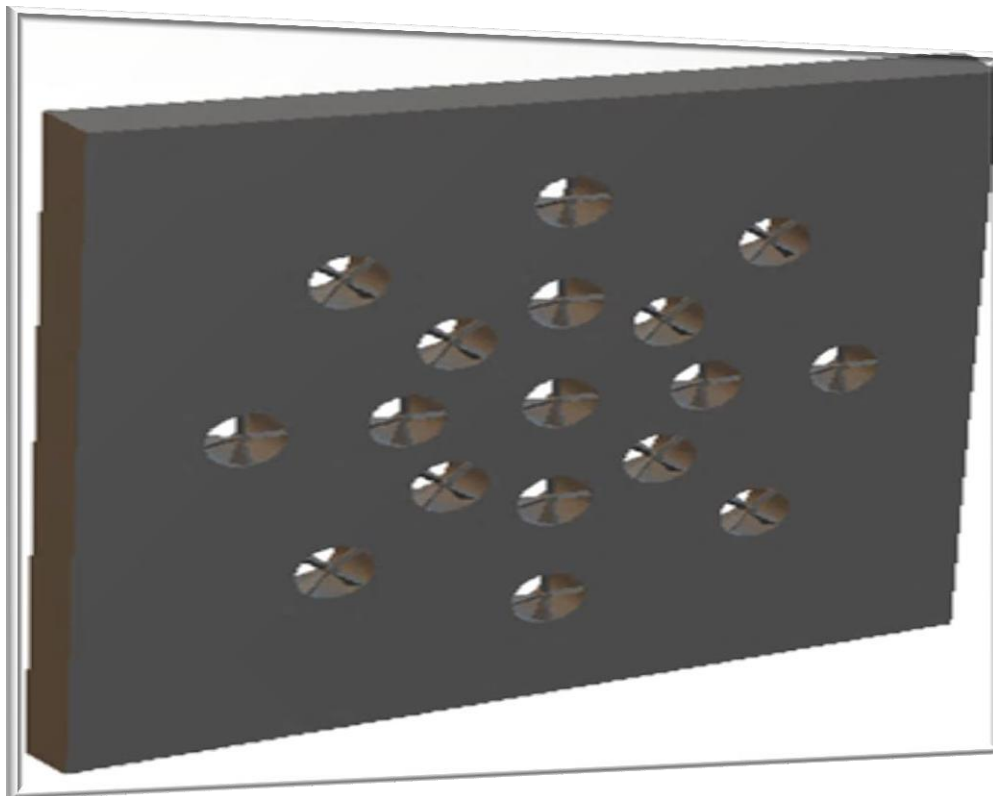


Figure 2.59 : représentative Géométrie tourbillonnaire en 3D

II.6. Conclusion :

Le développement des diffuseurs a suivi une méthodologie en deux étapes : d'abord la conception assistée par ordinateur via SolidWorks pour générer les modèles tridimensionnels, puis la préparation de ces modèles pour l'impression 3D, assurant ainsi leur matérialisation fidèle à partir des fichiers numériques.

CHAPITRE III

L'étude expérimentale

III. CHAPITRE : L'ETUDE EXPERIMENTALE

III.1. Introduction

Ce chapitre porte sur une étude expérimentale visant à analyser la distribution d'un jet d'air en configuration radiale. L'objectif principal est de caractériser le comportement de l'écoulement d'air généré à l'aide d'un système simple basé sur un aspirateur servant de source de soufflage. Au cours de cette phase expérimentale, le jet a été dirigé horizontalement à travers un diffuseur, et les vitesses d'écoulement ont été mesurées à différentes positions le long de l'axe central. Cette étude permet de mettre en évidence l'évolution du profil de vitesse en fonction de la distance, ainsi que la manière dont le jet se développe et se propage dans le milieu environnant. Dans un objectif comparatif, trois types de diffuseurs ont été utilisés : le diffuseur circulaire, le diffuseur lobé et le diffuseur tourbillonnaire, afin d'évaluer l'influence de la géométrie du diffuseur sur les caractéristiques de la distribution radiale.

III.2. Installation expérimentale

L'installation expérimentale a été soigneusement conçue pour simuler les conditions réelles de fonctionnement d'un système de climatisation automobile, tout en offrant la flexibilité nécessaire pour tester différentes configurations de diffuseurs.

Elle se compose principalement des éléments suivants :

- Un aspirateur axial à vitesse réglable.
- Un conduit transparent rectiligne permettant la visualisation et l'accès aux mesures, de dimensions normalisées ;
- Des diffuseurs interchangeables montés à l'extrémité du conduit ;
- Un système de repérage spatial réparti en plusieurs stations de mesure ($x = 3.5$ cm, 7.5 cm, 11.5 cm, 15.5 cm, etc.) pour capter les données de vitesses radiales et axiales ;
- Des instruments de mesure de la vitesse de l'air placés selon une grille spatiale standardisée

L'ensemble de l'installation a été calibré pour garantir une précision de mesure suffisante, avec une attention particulière portée sur la reproductibilité des résultats. Le positionnement exact anémomètre a été validé à travers des essais préliminaires, assurant une couverture complète du profil aérodynamique au niveau de chaque station de mesure.

Les principales caractéristiques techniques du banc d'essai sont :

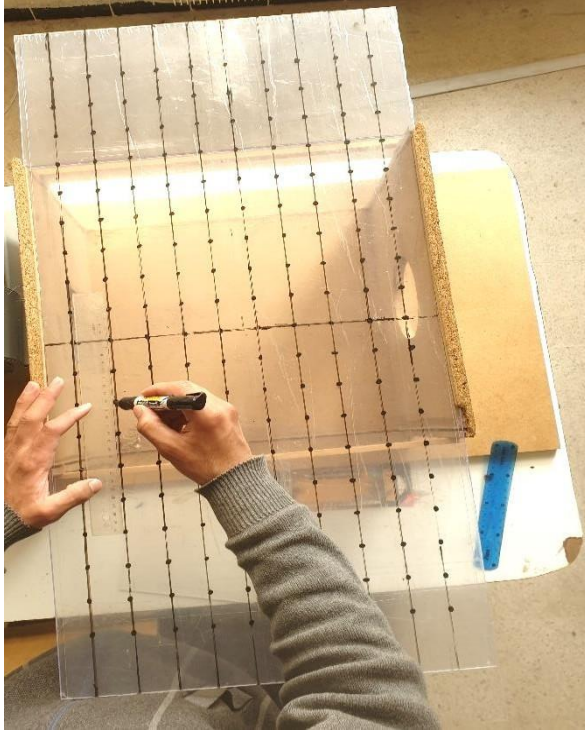
- Dimensions du conduit : longueur ≈ 1 m, section transversale rectangulaire (ex. : 10×10 cm)
- Matériau : plexiglas transparent, pour permettre l'observation visuelle du flux ;
- Source de ventilation : soufflerie ou axial réglable à trois vitesses distinctes (V_2 , V_3 , V_4) ;
- Dispositif de fixation d'anémomètre : système mobile de translation manuelle sur plaque
- Le banc permet ainsi d'obtenir des profils de vitesses à différentes vitesses de fonctionnement. **Les mesures sont prises en deux axes :**
- Axe axial (longitudinal) : pour caractériser l'intensité centrale du jet d'air ;

Les données collectées serviront, dans le chapitre suivant, à comparer le comportement du nouveau diffuseur à celui des systèmes classiques, et à valider l'hypothèse de départ concernant l'optimisation du confort thermique par une meilleure distribution du flux.



Figure III.1 : Schéma descriptif de l'installation expérimentale.

La (Figure III.1) montre l'organisation expérimental utilisée pour mesuré la vitesse de l'air qui s'écoule vers l'extérieur par le diffuseur d'air , qui est exprimé en couleur blanc dans la figure , cette expérimentation est fabriqué par un moteur électrique (aspirateur) agir comme producteur d'air ,avec une porte sonde donc on a utilisé un anémomètre pour mesurer la vitesse de l'air dans plusieurs points différentes dans le but d'étudier et diffuser la vitesse de l'air dans des confidences précise



A



B

**Figure III.2: conception de la station de mesure (A) : tracer des points de perforation ;
(B) : perforation à l'aide de la perceuse sensitive a colon)**

Dans le cadre de la réalisation du dispositif expérimental une plaque en plexi glasses de dimension 430*860 mm a été choisi. Sur cette plaque des points représentant les stations de mesure avec un espacement de 3D entre les orifices a été faite (voir figure III.2)

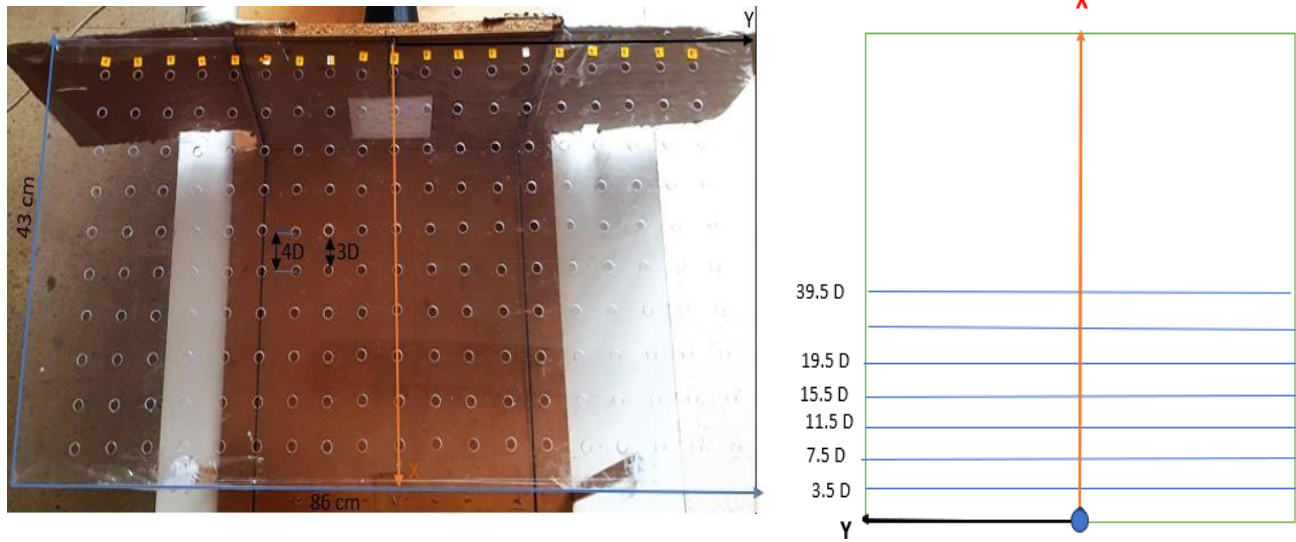


Figure III.3 : Image réelle du panneau en plexiglas conçu et installé



Figure III.4 : Anémomètre Type Velecicalc Plus Air Velocity-Meter

Nous avons utilisé cet appareil pour mesurer la vitesse de l'air qui circule.

Un anémomètre numérique (ou digital) est un appareil qui permet de mesurer la vitesse du vent ou de l'air, souvent avec un affichage numérique. Il est généralement portable et permet de suivre la vitesse du vent, la température et parfois l'humidité, offrant ainsi une vue plus complète des conditions atmosphériques.

3.Méthode de calcul de la vitesse d'entrée

L'anémomètre 8386 (**Figure III.4**), spécifiquement conçu pour mesurer la vitesse de l'air, fournit une solution précise pour évaluer la dynamique du mouvement de l'air. Pour effectuer une mesure de la vitesse d'entrée dans un canal carré, un processus systématique peut être suivi :

- Préparation de l'anémomètre : Avant toute mesure, il est impératif de s'assurer que l'anémomètre est en parfait état de fonctionnement et que sa batterie est suffisamment chargée, garantissant ainsi des résultats fiables.
- Sélection de l'emplacement de mesure : L'emplacement de mesure est crucial. Nous positionnons l'anémomètre à l'entrée d'un canal carré pour capturer directement le flux d'air en cours d'évaluation.
- Activation de l'appareil : L'anémomètre est activé en appuyant sur un bouton d'alimentation, ce qui lance le processus de mesure.
- Sélection de l'unité de mesure : Pour personnaliser les résultats selon nos besoins, nous choisissons l'unité de mesure appropriée parmi celles proposées par l'anémomètre, telles que les mètres par seconde, les kilomètres par heure, etc.
- Orientation de l'anémomètre : L'orientation correcte de l'anémomètre est cruciale pour une mesure précise. Nous plaçons l'anémomètre de manière à ce que son axe de mesure soit perpendiculaire au flux d'air, assurant ainsi une évaluation précise de la vitesse.
- Exécution de la mesure : Maintenir la stabilité de l'anémomètre est essentiel. Attendre que la lecture se stabilise garantit des données cohérentes et précises.

Enregistrement des résultats : Nous notons la vitesse d'entrée mesurée, qui est clairement affichée sur l'écran de l'anémomètre



Figure III.5: Image d'un Nid d'abeille

La figure montre le Nid d'abeille qui est utilisé dans le dispositif expérimental pour contrôler la diffusion d'air, sa forme hexagonale dans une vision préalable sur les cellules d'abeilles ce qui aide à diffuser l'air d'une façon égal et minimiser le déséquilibre ce qui assure une bonne fonctionnalité de système d'air et donc des résultats fiables

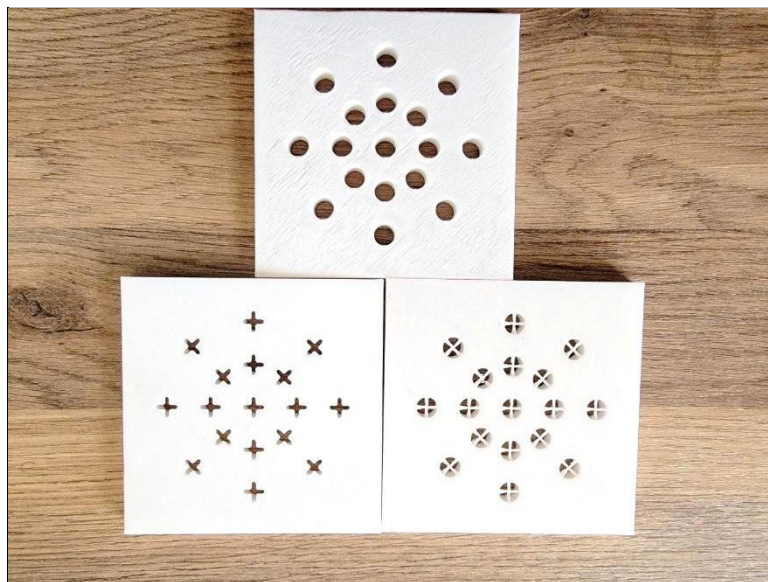


Figure III.6: Diffuseurs conçus

Dans cette expérience, Trois modèles différents de diffuseurs ont été conçus et fabriqués, chacun avec un motif différent d'ouvertures géométriques (circulaire, tourbillonnaire et lobé) , pour étudier l'effet de la forme des ouvertures sur la façon dont l'air circule.



Figure III. 7 Aspirateur et Souffleur 2en1 800W TOTAL TB2086

Tension	220-240V
Fréquence	50/60Hz
Puissance d'entrée	800W
Vitesse	0-15000 tr / min
Taux de soufflage maximum	0-4,5 m ³ / min



Figure N° III.8 Représentative d'un Perceuse à Colonne ADAM²⁶

Fiche technique d'un Perceuse à Colonne ADAM

Caractéristique	Description
Marque / Fabricant	ADAM
Origine	Chambray-lès-Tours, France
Type de machine	Perceuse à colonne (verticale)
Nombre de vitesses	4 vitesses
Vitesses de rotation	480 / 680 / 960 / 1440 tr/min
Mode de changement de vitesse	Mécanique, par leviers manuels
Type de table	Table circulaire avec étau de fixation
Type de commande	Manuelle
Utilisation principale	Perçage de pièces métalliques, plastiques, et bois léger
Fixation de la machine	Fixée au sol avec une base rigide
Puissance estimée du moteur	Environ 0,75 à 1,5 kW (non précisée sur la plaque)
Capacité de perçage (estimée)	Environ 13 à 20 mm (selon le foret utilisé)
Sécurité	Arrêt d'urgence (bouton rouge visible)

III.3. Conclusion

L'étude expérimentale menée a permis de mettre en évidence des résultats prometteurs concernant la performance aérodynamique du nouveau diffuseur. L'analyse des vitesses mesurées en différents points a révélé une amélioration significative de la régularité de la distribution radiale de l'air, traduisant une meilleure couverture spatiale au sein du conduit.

Grâce au traitement des courbes sur le logiciel Origin, nous avons observé une atténuation des pics de vitesse et une répartition plus uniforme du flux, ce qui tend à réduire les écarts thermiques ressentis par les passagers. Ces constats renforcent l'idée que la géométrie optimisée et l'orientation multidirectionnelle du diffuseur contribuent de manière tangible à l'amélioration du confort thermique.

Ainsi, cette phase expérimentale constitue une base solide pour l'analyse approfondie qui sera présentée dans le chapitre suivant. Elle ouvre également la voie à de futures optimisations, intégrant potentiellement des dispositifs de régulation intelligente ou des systèmes adaptatifs, en vue de concevoir une génération nouvelle de diffuseurs à haut rendement énergétique et à confort optimisé.

CHAPITRE IV

Présentation et discussion des
résultats du travail expérimental

IV. CHAPITRE IV : PRESENTATION ET DISCUSSION DES RESULTATS DU TRAVAIL EXPERIMENTALE

IV.1. Introduction :

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter et d'analyser de manière critique les résultats expérimentaux obtenus lors de l'évaluation des performances du nouveau diffuseur d'air appliqué au système de climatisation automobile. Après avoir recueilli des données précises sur les différentes vitesses de l'air en plusieurs points du conduit expérimental, nous procédons ici à une analyse comparative et interprétative, visant à valider l'efficacité du diffuseur conçu.

Notre étude s'est concentrée sur trois vitesses de fonctionnement différentes, notées Vitesse 2, Vitesse 3 et Vitesse 4, représentant des régimes d'écoulement variés et simulant des conditions d'utilisation réelles du climatiseur. Pour chaque vitesse, nous avons mesuré la vitesse axiale (ou longitudinale) au centre de l'écoulement, ainsi que dix vitesses radiales réparties symétriquement autour de l'axe central, aux positions $x = 3.5, 7.5, 11.5, 15.5$ cm, etc.

Le logiciel Origin Pro a permis de tracer les courbes caractéristiques de chaque régime, offrant ainsi une lecture claire de la répartition du flux d'air en fonction de la distance et de la position. Ces représentations graphiques nous ont permis de mieux comprendre la dynamique du flux, les zones de stagnation, ainsi que les performances du diffuseur selon la configuration testée.

IV.2. Calcul des profils de vitesse 2

IV.2.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 2 axiale)

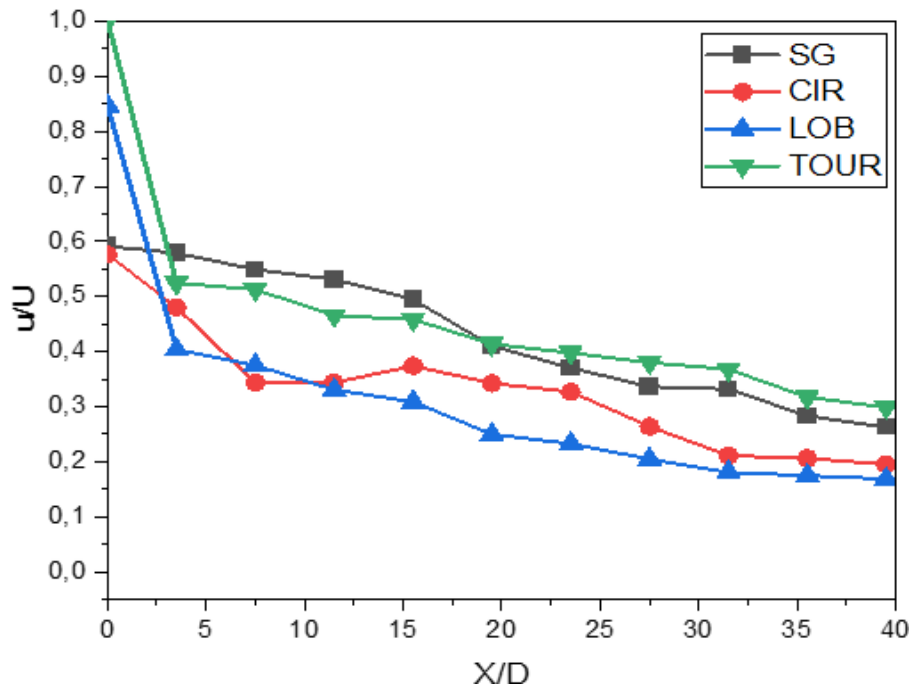


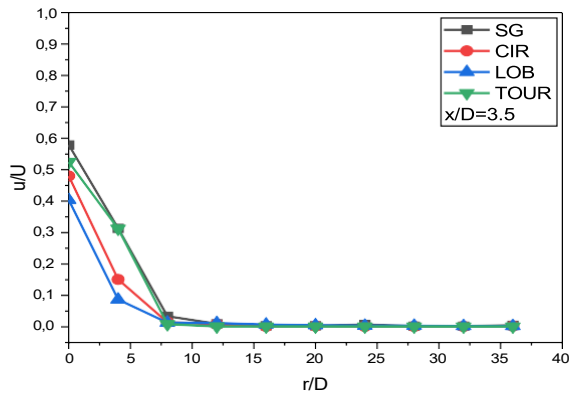
Figure IV. 1 : Représentative la vitesse adimensionnelle avec les conditions de $V_s = 4,9$ m/s et vitesse maximale à la sortie des diffuseurs égale à 8,29m/s.

IV.2.1.1. Commentaire : Au début de soufflage de l'air, le jet tourbillonnaire et le jet lobé en des valeurs maximales par rapport le jet circulaire et le jet sans grille et cette remarque est due au changement de section du diffuseur. On remarque une diminution rapide pour le jet tourbillonnaire et le jet lobé mais avec une différence de 15% entre les deux en revanche le jet circulaire et le jet sans grille ont diminué de 40% moins rapidement que les deux autres jets. Cette diminution rapide de la vitesse axiale pour les deux jets tourbillonnaire et lobé est le résultat de la transformation de l'énergie axiale vers une énergie radiale qui donne un élargissement radial. Cette qualité est avantageuse pour l'application de la climatisation.

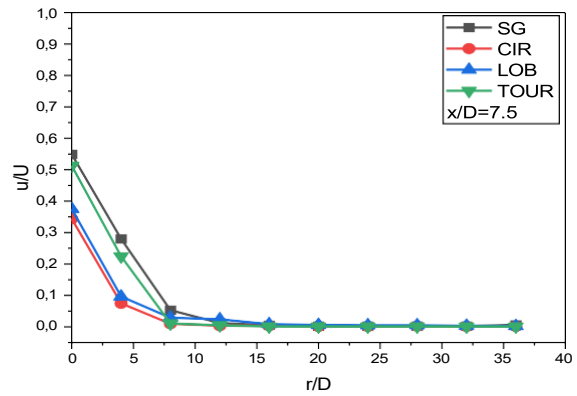
La stabilisation de l'écoulement pour le jet tourbillonnaire et lobé commence à partir

2,7D et pour le jet circulaire à partir de 7,5D enfin le jet sans grille est à partir de 27,5D. On conclut que le jet tourbillonnaire présente un grand élargissement radial par rapport aux autres jets.

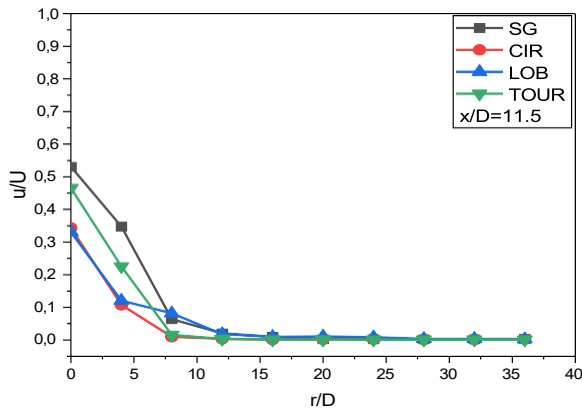
IV.2.2. Les graphes de la Vitesse 02 radiale (A-J)



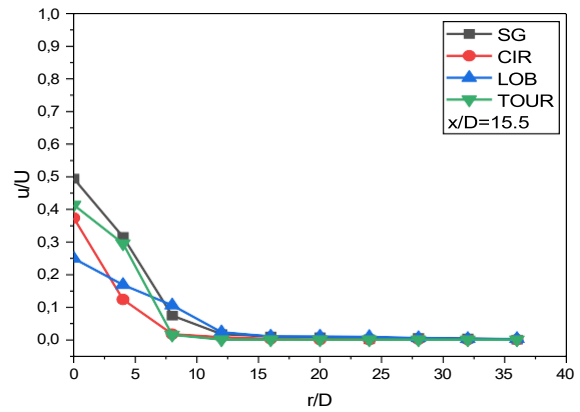
A



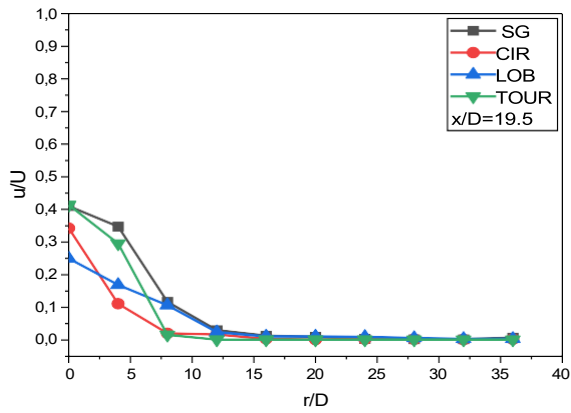
B



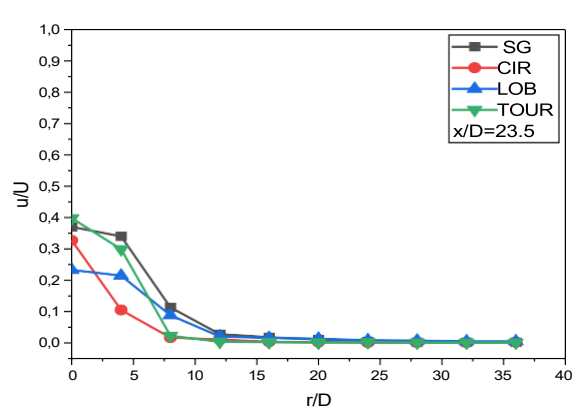
C



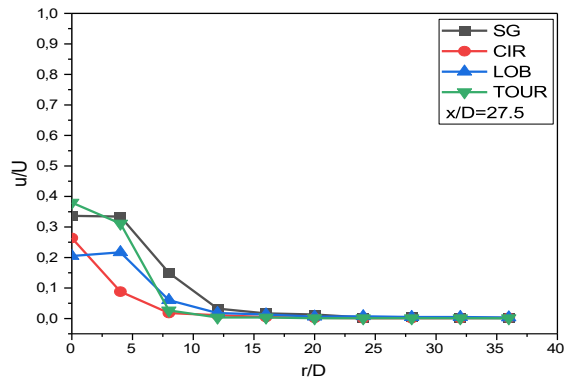
D



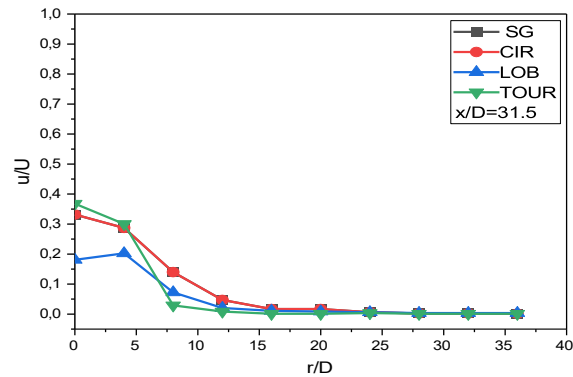
E



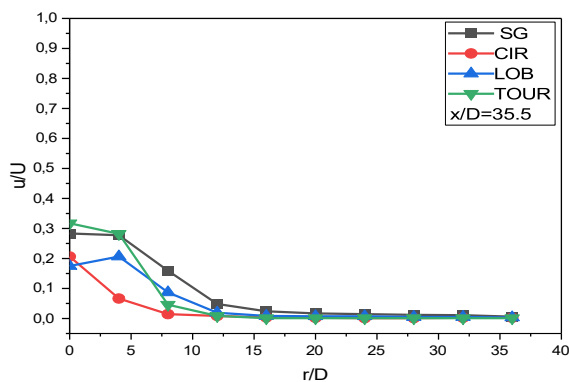
F



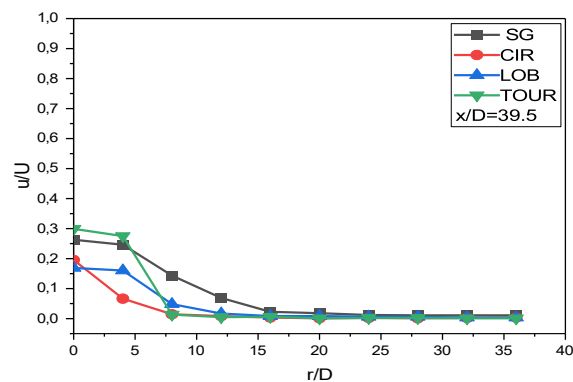
G



H



I



J

IV.2.3. Interprétation de la Vitesse 2 radiale :

Les figures de la vitesse radiale présentent l'évolution de la vitesse adimensionnelle u/U en fonction de la position radiale à dix stations réparties de $X/D = 3,5$ jusqu'à $X/D = 39,5$, avec un pas régulier de $4D$.

Au début du soufflage, aux premières stations ($X/D = 3,5$ à $11,5$), les jets lobé et tourbillonnaire montrent des vitesses radiales maximales comparées aux jets circulaires et sans grille, avec des valeurs supérieures d'environ 25 à 35 %. Cette différence est due à la capacité plus marquée de ces jets à transformer l'énergie axiale en énergie radiale, favorisant un élargissement rapide du jet.

En progressant vers les stations intermédiaires ($X/D = 15,5$ à $27,5$), le jet tourbillonnaire maintient une vitesse radiale élevée et stable. Il surpasse le jet lobé d'environ 10 à 15 %,

traduisant une meilleure stabilité du comportement tourbillonnaire. À ces mêmes stations, les jets circulaires et sans grille présentent une performance plus faible, avec des vitesses radiales inférieures de près de 40 % par rapport au jet tourbillonnaire.

Aux stations les plus éloignées ($X/D = 31,5$ à $39,5$), l'écart devient encore plus prononcé. Le jet tourbillonnaire conserve des valeurs dominantes, tandis que le jet lobé perd progressivement de l'intensité, affichant une baisse estimée à 20 % par rapport au tourbillonnaire. Le jet circulaire et le jet sans grille, quant à eux, montrent des vitesses très faibles, atteignant des niveaux inférieurs de 50 à 60 % par rapport au jet tourbillonnaire.

Cette évolution traduit un comportement radial optimal du jet tourbillonnaire, lié à la présence de structures tourbillonnaires secondaires qui facilitent la diffusion latérale du flux sur toute la portée du jet.

En conclusion, le jet tourbillonnaire offre la meilleure répartition radiale de l'air, avec un gain moyen de 40 à 50 % en vitesse radiale par rapport aux autres jets, ce qui en fait le plus performant pour les systèmes de climatisation et de ventilation exigeant une couverture large et uniforme. Le jet lobé suit en deuxième position avec de bonnes performances, alors que les jets circulaires et sans grille restent limités en diffusion latérale.

IV.3. Calcul des profils de vitesse 3

IV.3.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 3 axiale)

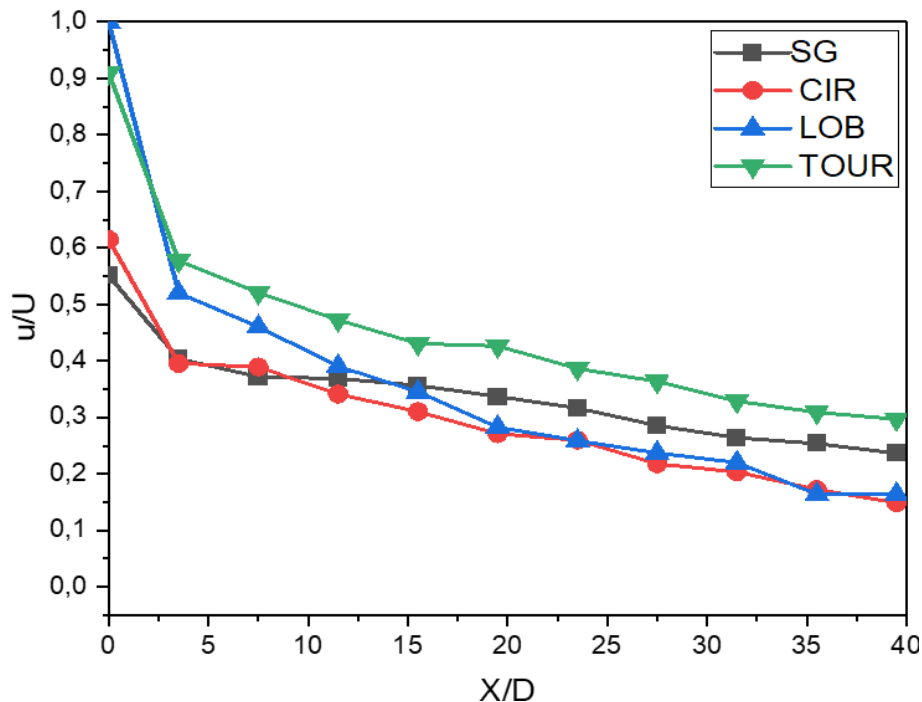


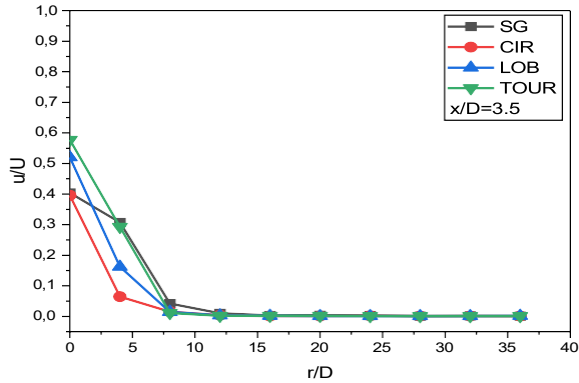
Figure IV. 2 : illustre l'évolution de la vitesse axiale adimensionnelle dans des conditions de fonctionnement où $V_s = 5,36$ m/s et la vitesse maximale à la sortie des diffuseurs est de 9,73 m/s.

IV.3.2. Commentaire : en fonction notre expérimentation nous avons constaté que dès le début du soufflage, les jets lobé et tourbillonnaire présentent des vitesses maximales supérieures à celles des jets circulaires et sans grille, ce qui s'explique par la variation de la section du diffuseur. Une diminution rapide de la vitesse est observée pour les jets lobé et tourbillonnaire, avec une différence d'environ 10 % entre eux. En revanche, les jets circulaires et sans grille affichent une baisse de vitesse d'environ 45 % par rapport aux deux premiers.

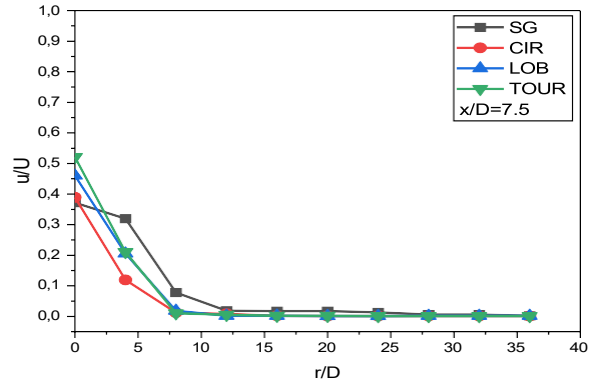
Cette chute rapide de la vitesse axiale pour les jets lobé et tourbillonnaire résulte d'une conversion efficace de l'énergie axiale en énergie radiale, conduisant à un élargissement radial important – une caractéristique recherchée dans les applications de climatisation.

La stabilisation de l'écoulement débute à 2,9D pour les jets lobé et tourbillonnaire, à 7,8D pour le jet circulaire, et à 27,2D pour le jet sans grille. En conclusion, le jet lobé distingue par un élargissement radial plus marqué par rapport aux autres types de jets.

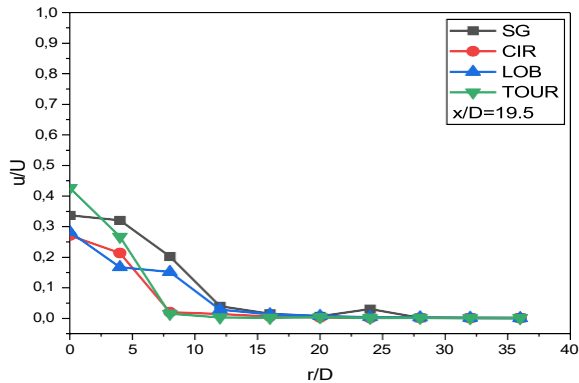
IV.3.3. Les graphes de la vitesse 03 radiale :



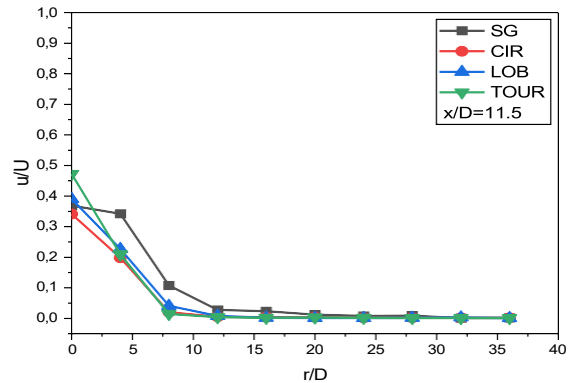
A



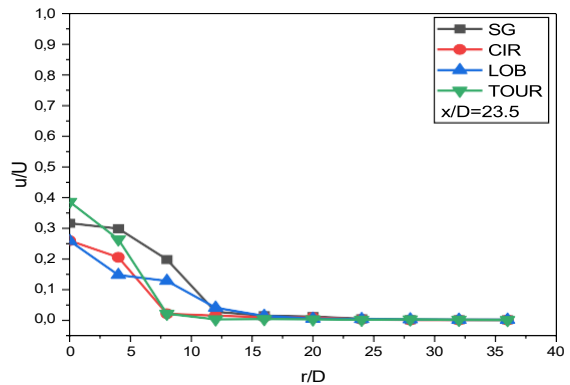
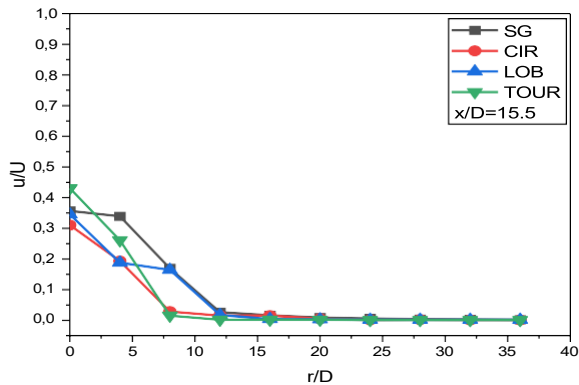
B

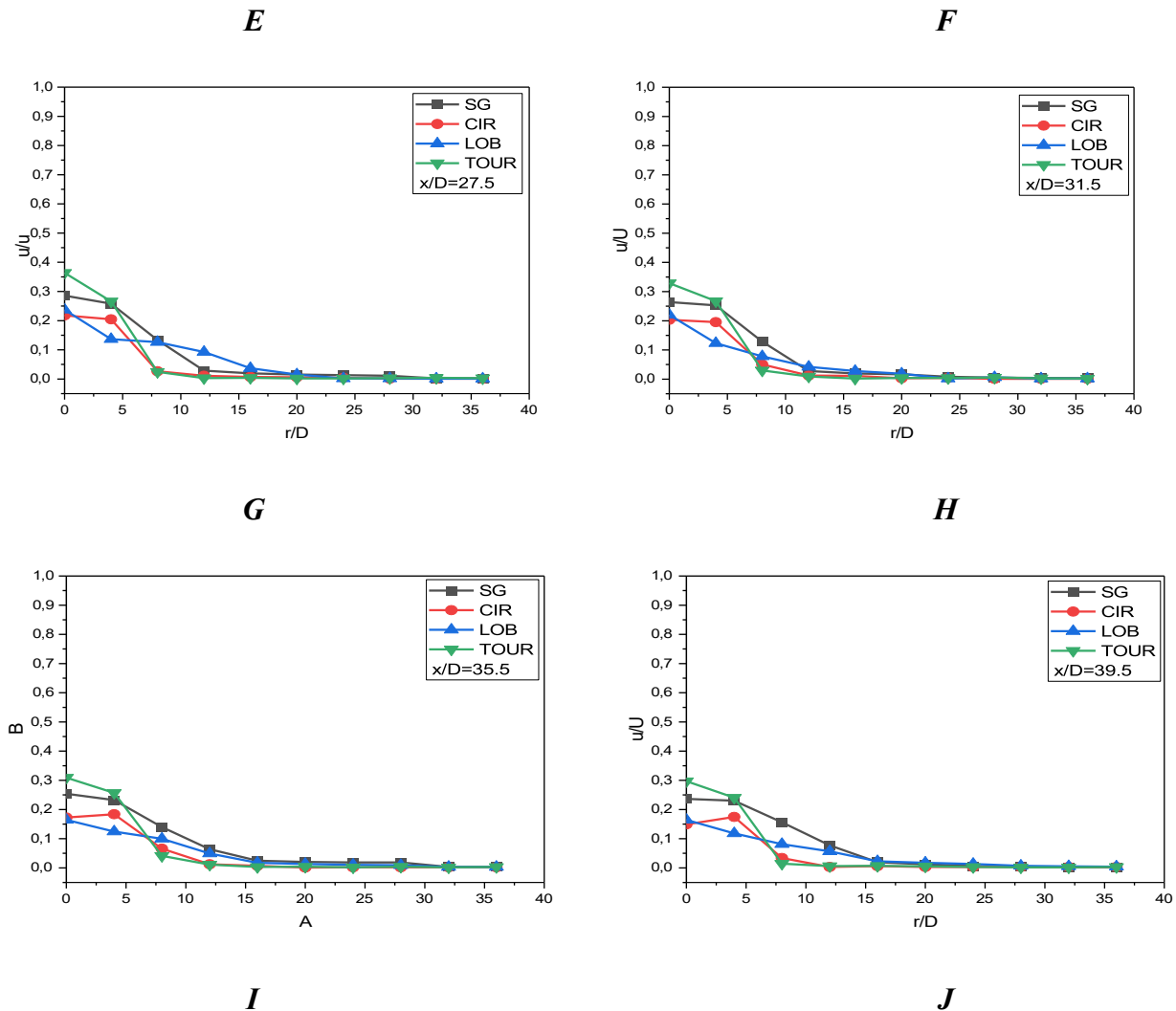


C



D





IV.3.4. Interprétation de la Vitesse 03 radiale :

Les figures de la vitesse radiale 3 présentent l'évolution de la vitesse adimensionnelle u/U en fonction de la position radiale à dix stations réparties de $X/D = 3,5$ à $X/D = 39,5$, avec un pas régulier de $4D$.

Au début du soufflage, aux premières stations ($X/D = 3,5$ à $7,5$), les jets lobé et tourbillonnaire affichent des vitesses radiales maximales nettement supérieures, avec des valeurs dépassant de 25 à 35 % celles des jets circulaires et sans grille. Cette différence provient de leur capacité plus importante à convertir l'énergie axiale en énergie radiale, ce qui favorise une expansion latérale rapide du jet. Le jet sans grille reste très concentré au centre, avec une diffusion latérale minimale.

En progressant vers les stations intermédiaires ($X/D = 11,5$ à $19,5$), le jet tourbillonnaire maintient une vitesse radiale élevée et stable, avec une variation de l'ordre de 10 %, indiquant une excellente stabilité du flux. Le jet lobé suit avec de bonnes performances mais enregistre une légère baisse estimée à 15 %. À ces mêmes stations, les jets circulaires et sans grille montrent une diminution importante de performance, avec des vitesses radiales inférieures de 40 à 50 % par rapport au jet tourbillonnaire.

Aux stations les plus éloignées ($X/D = 23,5$ à $39,5$), l'écart devient encore plus marqué. Le jet tourbillonnaire conserve des vitesses dominantes, surpassant les autres jets de 50 à 60 %. Le jet lobé commence à perdre de l'intensité, avec une réduction évaluée à 20 % par rapport aux stations précédentes. Quant aux jets circulaires et sans grille, ils montrent des vitesses très faibles, atteignant des niveaux inférieurs de plus de 60 % par rapport au jet tourbillonnaire.

Cette évolution met en évidence un comportement radial optimal du jet tourbillonnaire, lié à la présence de structures secondaires tourbillonnaires favorisant une large diffusion latérale du flux sur toute la portée du jet. Le jet lobé se montre également performant, bien qu'il nécessite une distance plus importante pour atteindre sa pleine efficacité. En revanche, les jets circulaires et sans grille restent fortement limités par leur diffusion radiale faible et leur concentration centrale.

En conclusion, le jet tourbillonnaire offre la meilleure répartition radiale de l'air, avec un gain moyen de 40 à 60 % en vitesse radiale par rapport aux autres jets. Cela en fait la solution la plus efficace pour les systèmes de climatisation automobile nécessitant une distribution homogène et large du flux d'air. Le jet lobé arrive en deuxième position avec de bonnes performances. Les jets circulaires et sans grille, quant à eux, montrent les performances les plus faibles et une diffusion latérale insuffisante.

IV.4. Calcul des profils de vitesse 4

IV.4.1. Graphe de la vitesse u/U Selon l'axe X (VITESSE 4 axiale)

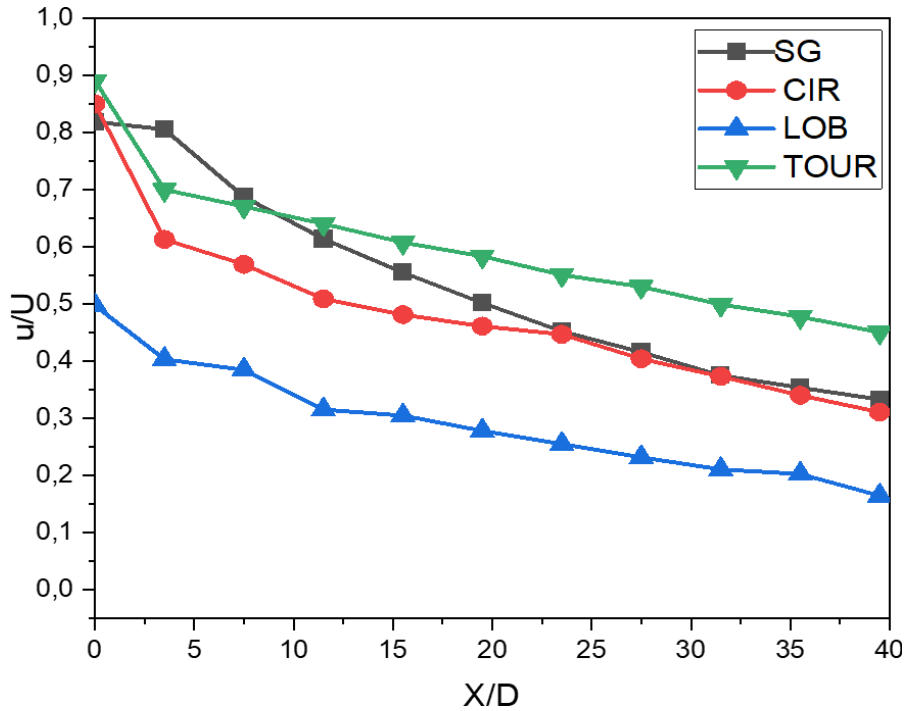
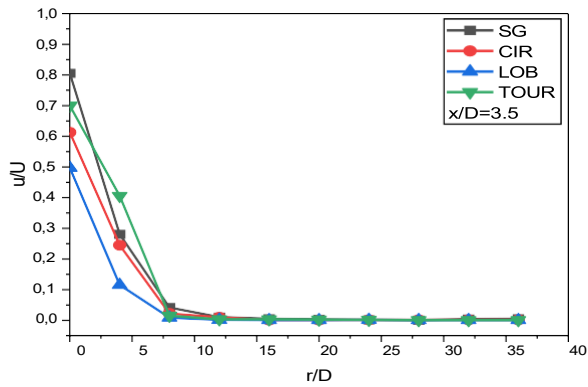


Figure IV. 3 : représentative la vitesse adimensionnelle avec les conditions de $V_s = 9,22\text{m/s}$ et vitesse maximale à la sortie des diffuseurs égale à $11,26\text{m/s}$.

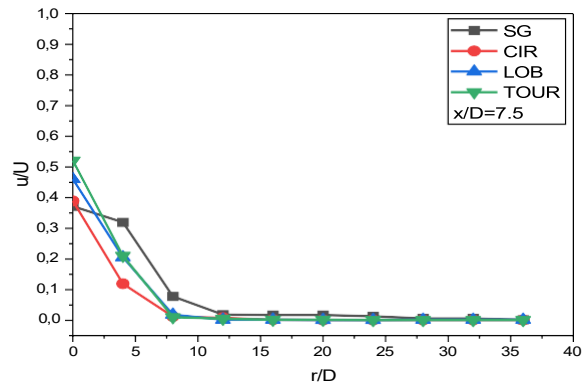
IV.4.2. Commentaire : Au début de soufflage de l'air, le jet tourbillonnaire et le jet circulaire en des valeurs maximales par rapport le jet sans grille et le jet lobé et cette remarque et due au changement de section du diffuseur. On remarque une diminution rapide pour le jet tourbillonnaire et le jet circulaire mais avec une différence de 5% entre les deux en revanche le jet sans grille le jet lobé ont diminués de 8% et 40% respectivement moins rapides que le jet tourbillonnaire. Cette diminution rapide de la vitesse axiale pour les deux jets tourbillonnaire et circulaire et résulte de la transformation de l'énergie axiale vers une énergie radiale qui donne un élargissement radial. Cette qualité est avantageuse pour l'application de la climatisation.

La stabilisation de l'écoulement pour jet tourbillonnaire et circulaire Commence à partir de $2,7D$ et pour le jet lobé à partir de $12D$ enfin le jet sans grille est à partir de $28D$ On conclusion que le jet tourbillonnaire présente un grand élargissement radial par rapport autre jets.

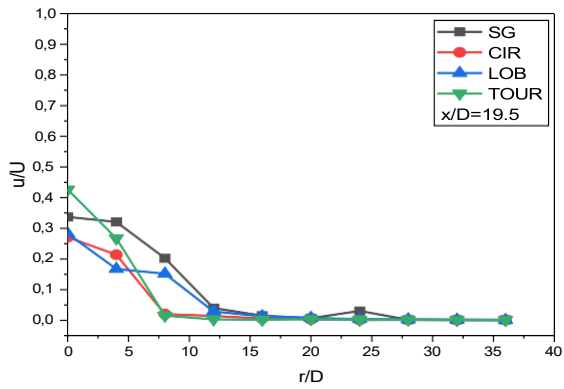
IV.4.3. Les graphes de la Vitesse 4 radiale



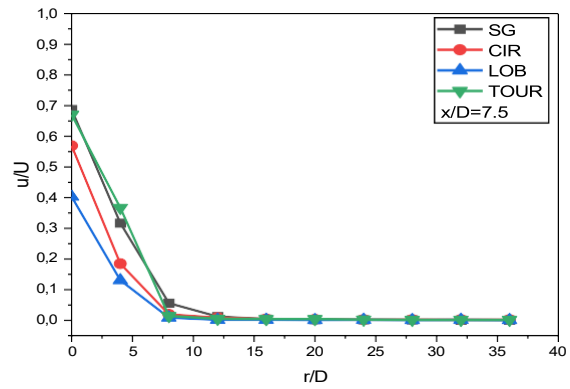
A



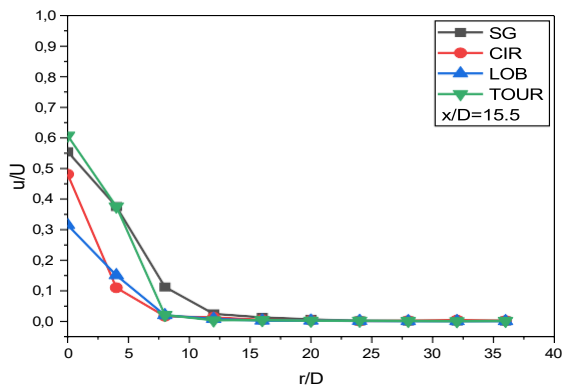
B



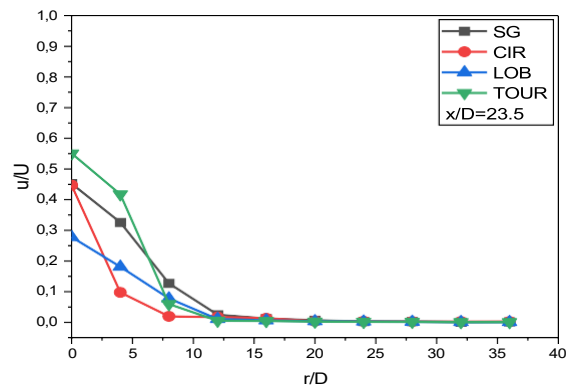
C



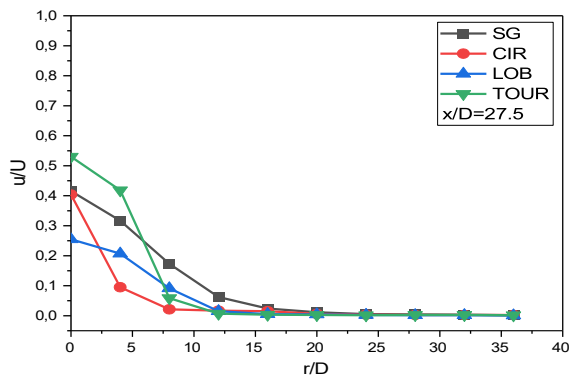
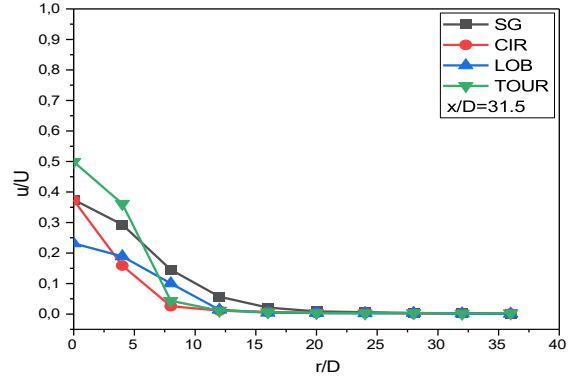
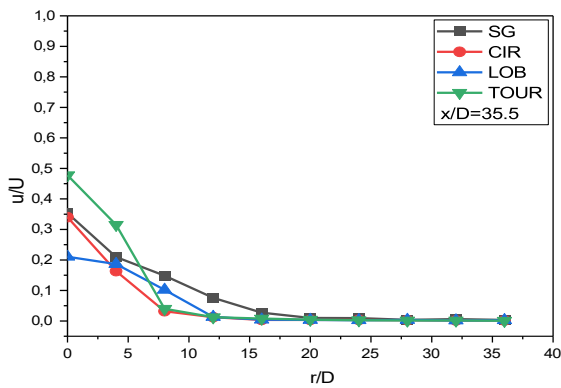
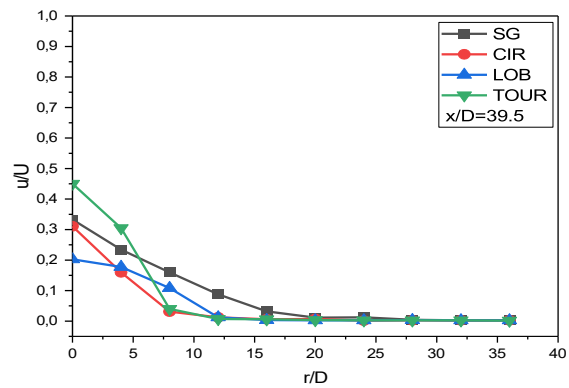
D



E



F

**G****H****I****J**

Les figures de la vitesse radiale 4 présentent l'évolution de la vitesse adimensionnelle u/U en fonction de la position radiale à dix stations réparties de $X/D = 3,5$ à $X/D = 39,5$, avec un pas régulier de $4D$. Au début du soufflage, les jets lobé et tourbillonnaire affichent des vitesses radiales maximales nettement supérieures par rapport aux jets circulaire et sans grille, avec des écarts de l'ordre de 25 à 35 %, ce qui s'explique par leur capacité plus importante à convertir l'énergie axiale en énergie radiale favorisant un élargissement latéral rapide du jet. Le jet sans grille reste fortement concentré au centre avec une diffusion minimale. En progressant vers les stations intermédiaires ($X/D = 11,5$ à $19,5$), le jet tourbillonnaire maintient une vitesse radiale élevée et stable, avec une variation de 10 %, traduisant une bonne stabilité du flux. Le jet lobé reste performant mais enregistre une baisse d'environ 15 %, alors que les jets circulaires et sans grille montrent une nette diminution, avec des vitesses radiales inférieures de 40 à 50 % par rapport au jet tourbillonnaire. Aux stations les plus éloignées ($X/D = 23,5$ à $39,5$), l'écart devient encore plus marqué : le jet tourbillonnaire conserve des vitesses dominantes, dépassant les autres

jets de 50 à 60 %, tandis que le jet lobé commence à perdre en intensité avec une baisse estimée à 20 %. Les jets circulaires et sans grille présentent alors des vitesses très faibles, inférieures de plus de 60 % par rapport au jet tourbillonnaire. Cette évolution traduit un comportement radial optimal du jet tourbillonnaire, grâce à la présence de structures tourbillonnaires secondaires favorisant une large diffusion latérale de l'air. Le jet lobé reste également performant, bien qu'il nécessite une distance de développement plus longue pour exprimer son plein potentiel. En revanche, les jets circulaires et sans grille restent limités par une diffusion radiale faible et une forte concentration axiale.

En conclusion, le jet tourbillonnaire offre la meilleure répartition radiale de l'air, avec un gain moyen de 40 à 60 % en vitesse radiale par rapport aux autres jets. Cela en fait la solution la plus efficace pour les systèmes de climatisation nécessitant une diffusion homogène et large du flux d'air. Le jet lobé arrive en deuxième position, tandis que les jets circulaires et sans grille montrent les performances les plus faibles.

IV.4.4. Conclusion

L'analyse approfondie des résultats expérimentaux obtenus pour les vitesses 2, 3 et 4 met en lumière un comportement aérodynamique globalement cohérent et satisfaisant du nouveau diffuseur conçu. En particulier :

Pour la vitesse 2, les courbes indiquent une stabilité du flux axial, accompagnée d'une distribution radiale relativement homogène. Le profil de vitesse présente un pic central modéré et des diminutions progressives vers les bords, ce qui traduit une bonne diffusion dans toutes les directions.

Les résultats obtenus pour les vitesses 3 et 4, bien qu'un peu plus dynamiques en raison de l'augmentation du débit, confirment la même tendance générale. La distribution radiale reste équilibrée, avec une intensité accrue mais sans perturbation excessive, ce qui démontre la capacité du diffuseur à maintenir des performances constantes à des régimes plus élevés.

Dans l'ensemble, les dix courbes radiales couplées à la courbe axiale pour chaque vitesse révèlent que le système mis au point favorise une répartition symétrique de l'air dans le conduit expérimental, réduisant ainsi les zones mortes ou sur ventilées. Cette homogénéité est un indicateur fort de l'efficacité du diffuseur dans une application réelle à l'intérieur de l'habitacle.

Par ailleurs, la comparaison entre les trois régimes a permis de valider l'hypothèse initiale selon laquelle un design optimisé du diffuseur peut corriger les défauts classiques de la diffusion radiale. Ces résultats ouvrent des perspectives pour une intégration future dans des modèles de véhicules, avec des adaptations possibles en fonction du type de véhicule et de la configuration du système de ventilation.

IV.5. Interprétation globale des résultats et synthèse :

Vitesse axiale

- ✚ Les jets **lobé** et **tourbillonnaire** affichent des vitesses initiales plus élevées que les jets **circulaire** et **sans grille**.
- ✚ Le **jet tourbillonnaire** présente une **chute rapide de la vitesse axiale**, signe d'une conversion efficace en **énergie radiale**, favorable à une bonne diffusion.
- ✚ La **stabilisation du flux** est plus rapide avec les jets **lobé** et **tourbillonnaire** (2,7D à 2,9D), contre 28D pour le jet sans grille.

Vitesse radiale

- ✚ Le jet tourbillonnaire montre la meilleure répartition radiale, avec des vitesses jusqu'à 60 % supérieures.
- ✚ Le jet lobé reste performant à courte et moyenne distance.
- ✚ Les jets circulaires et sans grille montrent une diffusion centrée et peu efficace à longue distance.

Synthèse comparative

- ✚ Le **jet tourbillonnaire** combine **stabilité axiale** et **diffusion radiale homogène** : c'est le plus performant.
- ✚ Le **jet lobé** est bon sur courte distance.
- ✚ Les jets **circulaire** et **sans grille** sont peu efficaces et très directifs.

Notre Hypothèse 01 nous l'avons confirmée :

La géométrie a un impact déterminant sur la couverture volumétrique. Le diffuseur tourbillonnaire stabilise rapidement le jet et diffuse sur un large volume.

Notre Hypothèse 02 nous confirmée :

La diffusion homogène améliore significativement le confort thermique, en réduisant les zones de variation thermique dans l'habitacle.

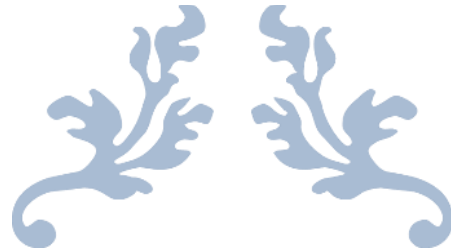
Notre Hypothèse 03 nous l'avons confirmée :

Le positionnement et l'angle de diffusion influencent les pertes de charge : le diffuseur tourbillonnaire, par sa spirale fluide, limite les turbulences et favorise un meilleur rendement énergétique.

L'étude démontre clairement que la **conception géométrique** du diffuseur joue un rôle central dans la qualité de diffusion de l'air en climatisation automobile. Parmi les configurations testées, le **diffuseur tourbillonnaire** se distingue nettement par :

- Une meilleure couverture spatiale du jet d'air,
- Une homogénéité thermique accrue dans l'habitacle,
- Une réduction des pertes de charge grâce à une dynamique spiralaire contrôlée.

Ces résultats plaident en faveur de son intégration potentielle dans les futurs systèmes de ventilation des véhicules modernes, à condition de procéder à des adaptations techniques selon les contraintes industrielles spécifiques.



Conclusion Générale



V. Conclusion générale

Ce travail s'inscrit dans une dynamique d'optimisation des systèmes de climatisation automobile, en réponse aux enjeux croissants de confort thermique, d'efficacité énergétique et de répartition homogène de l'air dans l'habitacle. Partant d'une problématique concrète — la faiblesse de la diffusion radiale avec les diffuseurs classiques —, une nouvelle conception de diffuseur multi-ouvertures a été développée, testée et comparée expérimentalement.

L'analyse des vitesses radiales et axiales à travers plusieurs stations a mis en évidence les performances différenciées des quatre types de jets (tourbillonnaire, lobé, circulaire et sans grille). Les résultats peuvent être synthétisés comme suit :

Le jet tourbillonnaire est le plus performant, affichant une répartition radiale supérieure de 40 à 60 % en moyenne par rapport aux jets classiques. Il présente également une stabilité remarquable dans les zones intermédiaires et éloignées.

Le jet lobé vient en seconde position, avec une amélioration de 25 à 35 % par rapport aux jets circulaires et sans grille. Toutefois, son efficacité décroît légèrement à longue distance (réduction estimée à 15-20 %).

Les jets circulaires et sans grille affichent des performances inférieures, avec des vitesses radiales en baisse de 50 à 60 % selon les zones, ce qui traduit une faible capacité de diffusion latérale.

Ces observations confirment la validité de notre approche expérimentale et la pertinence du design proposé. Le diffuseur innovant permet une meilleure homogénéisation de l'écoulement d'air, limite les zones mortes et assure une régularité du confort thermique dans l'habitacle.

Ce travail ouvre ainsi des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes de climatisation plus intelligents, adaptatifs et écoénergétiques, à intégrer dans les véhicules de nouvelle génération.

Sur la base de ces observations, plusieurs propositions et recommandations peuvent être formulées pour enrichir les recherches futures et perfectionner le système proposé :

Les suggestions

- ✓ Intégration d'algorithmes de commande intelligents (à base d'IA ou de régulateurs PID) pour une gestion automatique et adaptative de la direction et de la vitesse de l'air, en fonction de la position des passagers et des besoins thermiques spécifiques.
- ✓ Développement de modèles de simulation CFD 3D pour représenter avec précision les écoulements internes, en intégrant les interactions thermiques et corporelles des occupants.
- ✓ Conception de diffuseurs flexibles et motorisés, capables d'un réglage bidirectionnel (radial et axial) pour une distribution fine et personnalisée.
- ✓ Réalisation de tests de performance dans des conditions environnementales variées (été, hiver, humidité) pour évaluer la robustesse et la polyvalence du diffuseur.
- ✓ Installation d'un réseau de capteurs thermiques intelligents dans l'habitacle, permettant une régulation en temps réel du débit et de l'orientation du flux selon les besoins détectés.

Ces recommandations ouvrent la voie à une nouvelle génération de systèmes de climatisation, alliant efficacité énergétique, confort thermique et intelligence adaptative, en parfaite adéquation avec les exigences des véhicules de demain, notamment les véhicules électriques et hybrides où chaque gain énergétique est capital.

En conclusion, ce travail représente une étape fondamentale dans la reconfiguration des approches de distribution d'air à l'intérieur des véhicules, en mettant l'accent sur la maîtrise du champ radial comme levier d'optimisation thermique. Nous espérons que ces résultats serviront de base à des études plus avancées, alliant simulation numérique de haute précision, intelligence embarquée et prototypage industriel, en vue de systèmes innovants pleinement adaptés aux réalités du marché et aux attentes des utilisateurs.



RÉFÉRENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

Référence bibliographique

- [1] Bosch, *Manuel de technologie automobile*, 28e éd. Éditions du Renouveau Pédagogique, 2014.
- [2] J.-J. Dangelser, *Climatiseur automobile : principes, composants, maintenance*, Casteilla, 2008.
- [3] J. D. Halderman, *Automotive Heating and Air Conditioning*, 8th ed., Pearson Education, 2015.
- [4] A. Sharma and S. Verma, —Automobile air conditioning – A review,|| *Int. J. Eng. Res. Appl.* , vol. 7, no. 3, pp. 12–17, 2017.
- [5] SAE International, *Improvement of Automotive Air Conditioning Systems Performance*, SAE Tech. Paper 2005-01-2007, 2005.
- [6] X. Zhang, —Vapor Compression Cycle Control for Automotive Air Conditioning Systems...,|| *arXiv preprint arXiv:1701.03785*, 2017.
- [7] H. Wang et al., —Combined Energy and Comfort Optimization...,|| *arXiv preprint arXiv:1909.12448*, 2019.
- [8] J. Liu et al., —Nonlinear Modeling of an Automotive Air Conditioning System...,|| *Transportation Engineering*, vol. 4, art. 6, 2021.
- [9] D. C. Planchard, *SolidWorks 2023: A Power Guide for Beginners and Intermediate Users*, CADArtifex, 2023.
- [10] P. Tran, *SolidWorks 2023: Part I – Basic Tools*, SDC Publications, 2023.
- [11] L. J. Segerlind, *Modeling and Simulation using SolidWorks and COMSOL Multiphysics*, Springer, 2021.
- [12] D. McGuire-Lavallee, —Testing Airflow Through a Classic Car With SolidWorks Flow Simulation,|| Hawk Ridge Systems, 2020.

Références bibliographiques

- [13] L. Prabhu et al., —Aerodynamics analysis of the car using SolidWorks flow simulation...,|| *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 993, art. 012002, 2020.
- [14] C. S. Vishwanadha et al., Prediction of automotive HVAC duct acoustic properties...,|| *Int. J. Automot. Eng. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 1–7, 2021.
- [15] L. Guzzella and A. Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems*, 3rd ed., Springer, 2013.
- [16] Behr Hella Service, Automotive Air Conditioning Training Manual, Behr GmbH, 2018.
- [17] T. Yilmaz and Ü. Özkol, —Energy efficiency in automotive air conditioning systems: A review, || Renew. Sust. Energy Rev., vol. 113, 2019.
- [18] Y. Liu and Z. Liu, —Optimization of automotive air conditioning systems using R1234yf, || Appl. Therm. Eng., vol. 164, 2020.
- [19] Z. Li, Z. Wang and H. Peng, —Dynamic modeling and control of A/C systems for electric vehicles, || IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 29, no. 3, pp. 1045–1057, 2021.
- [20] K. Howard, SolidWorks Simulation 2019 Black Book, CAD/CAM/CAE Works, 2019.
- [21] P. Kurowski, Engineering Analysis with SolidWorks Simulation 2021, SDC Publications, 2021.
- [22] S. Sadhu and A. Biswas, —Modeling heat exchangers for HVAC in SolidWorks Flow Simulation, || Therm. Sci. Eng. Prog., vol. 26, art. 101093, 2022.
- [23] Y. Zhang and Y. Chen, SolidWorks-based CFD simulation for thermal analysis of car cabin airflow, || IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci., vol. 558, art. 012084, 2020.

Références bibliographiques

[24] S. Kumar and P. Dinesh, Evaluation of vehicle aerodynamics using SolidWorks

CFD tools, *Mater. Today: Proc.*, vol. 72, pp. 456–462, 2023.

[25] Rau, G . (2006). *Systèmes d e climatisation automobile .*

[26] Laboratoire de mécanique – Faculté des Sciences et Technologies, Université Hassiba Ben Bouali – Chlef. **Perceuse à colonne ADAM – observation sur site**, 2025.