

RAPPORT DE PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'Obtention du

**Diplôme de Master Sciences et Techniques
Spécialité : Génie Mécanique et Productique**

Thème :

*Etude, dimensionnement et amélioration
d'un local de peinture.*

Présenté par :

Hamza FATHALLAH

Encadré par :

Pr. BOUJMAL Radouane

Département Génie Mécanique, FST Fès

Mr. SAID Mourad

Encadrant de la société ZENITH FONDERIE

Effectué à :



Soutenu le : 20/07/2022

Devant le jury :

• Pr. BOUJMAL Radouane	Faculté des Sciences et Techniques de Fès
• Pr. SEDDOUKI Abbass	Faculté des Sciences et Techniques de Fès
• Pr. EL KHALFI Ahmed	Faculté des Sciences et Techniques de Fès

Année Universitaire : 2021-2022

Remerciement :

Je tiens tout d'abord à remercier le bon Dieu tout puissant et miséricordieux, qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.

Ainsi, je remercie **Radouane BOUJMAL**, mon encadrant pédagogique, pour m'avoir encadré de très près et pour tous les efforts qu'il a consentis et conseils précieux.

A ces remerciements, je souhaite associer tous les enseignants de la faculté des sciences et techniques Fès, qui m'ont préparé théoriquement et pratiquement durant les deux ans de la formation.

Un merci bien particulier à tous les membres de Zénith Fonderie, et spécialement mon encadrant **SAID Mourad** pour m'avoir accompagné et me prendre en charge tout au long de la période de stage. Je le remercie pour le temps accordé et je suis très reconnaissant des conseils fructueux qu'il n'a cessé de me prodiguer.

Je souhaite que notre travail soit à la hauteur du niveau souhaiter

Dédicaces :

*C'est avec une grande émotion que je dédie ce projet de fin d'études aux êtres
les plus chers :*

A mes très chers parents ;

*Aucun terme et aucune langue ne pourra exprimer mon amour et mes sentiments
envers vous.*

*En témoignage de mon amour, mon affection et ma reconnaissance pour les
efforts que vous avez consentis pour moi durant toutes ces années je vous dédie
cet humble travail.*

*Que Dieu le tout puissant vous garde et vous procure santé, bonheur et longue
vie pour que vous demeuriez le flambeau illuminant de mon chemin.*

A MYASSAR Hiba ;

*Pour le soutien, l'encouragement, la patience et les moments de partage. Je ne
pourrais que te remercier pour tout ce que t'as fait pour moi, que dieux vous
bénisse et vous protège, et vous donne une vie pleine de bonheur et de succès.*

A toute ma famille ;

*Pour leur respect, leur amour et leurs encouragements. Que Dieu vous assiste et
vous fournisse de la joie.*

A mes amis ;

*Pour tous vos conseils, encouragements et les magnifiques moments que nous
avons vécus ensemble.*

Nomenclature :

Symbole	Description	Unité
Re	Le nombre Reynolds	-
Pr	Le nombre de Prandtl	-
Nu	Le nombre de Nusselt	-
T	Température	[C]
e	Epaisseur de la plaque	[m]
a	Ecartement entre les plaques	[m]
b	Largeur de la plaque	[m]
c	Hauteur de l'échangeur	[m]
λ	Conductivité thermique	[W/m.k]
Q_c	Quantité de chaleur	[W.h]
ρ	La masse volumique	[kg/m ³]
μ	La viscosité dynamique	[Pa.s]
Cp	Capacité calorifique	[J/kg.K]
V	Vitesse	[m/s]
D_h	Diamètre hydraulique	[m]
Q	Débit volumique	[m ³ /s]
ν	Viscosité cinématique	[m ² /s]
h_c	Coefficient d'échange	[W/m ² .K]
k	Coefficients d'échange globale	[W/m ² .K].
R_{ec}	Résistance thermique d'encrassement de la plaque en contact avec l'air chaud	[m ² .K/W]
R_{ef}	Résistance thermique d'encrassement de la plaque en contact avec l'air froid	[m ² .K/W]
Φ	Puissance thermique	[W]
q_m	Débit massique	[kg/s]
ΔT_{Lm}	Différence de Température Logarithmique Moyenne	[K]
η	Rendement.	-
S	Surface d'échange	[m ²]
\dot{m}_c et \dot{m}_f	Débits massiques des fluides chaud et froid	[kg/s]
S_{plaque}	Surface de la plaque	[m ²]
Nbr_Plaques	Nombre de plaques	-
$Dim_{échangeur}$	Dimensionnement de l'échangeur	[m ³]

Liste des figures :

Figure 1: Machine d'injection ZAMAK robotisée.	5
Figure 2 : Moulage en coquille.	5
Figure 3 : Machine-outil à commande numérique.	6
Figure 4 : Traitement de surface des pièces métalliques.	6
Figure 5 : (a) Pièces prés pour la peinture ; (b) Les porteurs de pièces.	8
Figure 6 : Four de chauffage.	8
Figure 7 : Peindre les pièces métalliques avec pistolet de pulvérisation.	9
Figure 8 : Chambre de dégazage.	9
Figure 9 : L'organigramme générale de Zénith Fonderie.	10
Figure 10: Cartographie Zenith Fonderie.	11
Figure 11: Les trois modes de transfert de chaleur.	14
Figure 12 : Le transfert de chaleur à l'eau dans une casserole.	15
Figure 13 : Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid.	16
Figure 14 : (A) Tour de refroidissement ; (B) Ventilateur d'un processeur d'ordinateur.	16
Figure 15 : (A) Spot halogène avec focale ; (B) Parasol chauffant.	17
Figure 16 : Développement de l'écoulement d'un fluide sur une plaque plane, trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire, transitoire, et turbulent.	20
Figure 19: les trois modes d'écoulement.	22
Figure 20: Principales technologies d'échangeurs thermiques. (10)	24
Figure 21: Répartition en pourcentage des recettes par type d'échangeur sur le marché total de l'échangeur en Europe (données 1998). (11)	24
Figure 22: Les quatre méthodes de récupération d'énergie thermique.	25
Figure 23 : Fonctionnement des caloducs.	26
Figure 24 : Fonctionnement d'un échangeur à eau glycolée.	27
Figure 25 : Fonctionnement d'un échangeur à plaques.	28
Figure 26: Echangeur à plaques	29
Figure 27: Fonctionnement d'un échangeur à plaques	30
Figure 28 : Fonctionnement d'un échangeur rotatif.	31
Figure 29 : Dessin perspective du local de peinture.	34
Figure 30 : Synoptique du local de peinture et système de distribution d'air.	34
Figure 31 : Canalisation de système de distribution de l'air.	35
Figure 32 : Description simplifié du système de ventilation.	36
Figure 33 : Description simplifié du problème à résoudre.	37
Figure 34 : Diagramme Bête à corne.	38
Figure 35 : Diagramme Pieuvre.	39
Figure 36 : Diagramme SADT.	40
Figure 37 : Diagramme FAST.	41
Figure 38: Les dimensions initiales de l'échangeur.	45

Figure 39 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur.....	47
Figure 40 : DTLM pour les modes d'écoulement :co-courant et contre-courant.	49
Figure 41: Les types de double flux avec leurs rendements. (24).....	51
Figure 42 : Les dimensions de la plaque.	52
Figure 43 : Les dimensions de l'échangeur à plaque.	52
Figure 44 : Les ailettes d'échange de chaleur : (a) Radiateur d'automobile ; (b) Moteur refroidi par air ; (c) Les différentes géométries des ailettes.....	53
Figure 45 : Exemple d'échangeur thermique formé d'ailettes entre les plaques.....	54
Figure 46 : Géométrie des ailettes ondulées pour échangeurs de chaleur à ailettes en plaques : (a) ailette triangulaire unie ; (b) ailette rectangulaire lisse ; (c) ailettes ondulées ; (d) ailette en bande décalée ; (e) ailette à volets multiples ; f) ailette perforée.	55
Figure 47 : Les dimensions des ailettes.....	56
Figure 48 : Les dimensions finals de la plaque.	56
Figure 49 : Les dimensions finals de l'échangeur à plaque.	57
Figure 50 : Vue en perspective d'échangeur à plaques.	58
Figure 51: La cabine de peinture.....	60
Figure 52 : (a) Anémomètre à hélice ; (b) Anémomètre à résistance thermique.	60
Figure 53 : l'anémomètre utilisé.....	61
Figure 54 : Le quadrillage de la cabine avec exemple des mesures.....	61
Figure 55 : Exemples des mesures de vitesse en m/s pendant 3 jours.	62
Figure 56: Le système de filtration de la cabine.	63
Figure 57 : Filtre choc métallique.	64
Figure 58 : Filtre PROCART H.	64
Figure 59 : Filtre à poche utilisé.....	66
Figure 60 : Problème d'étanchéité : (a) avant l'utilisation ; (b) en cours d'utilisation.	67
Figure 61 : Les dimensions de la cage.	68
Figure 62 : La deuxième étape du dimensionnement de filtre polyester.....	68
Figure 63 : La troisième étape du dimensionnement de filtre polyester.	69
Figure 64 : La quatrième étape du dimensionnement de filtre polyester.	69
Figure 65 : La quatrième étape du dimensionnement de filtre polyester.	70
Figure 66 : La cinquième étape du dimensionnement de filtre polyester.	71
Figure 67 : La sixième étape du dimensionnement de filtre polyester.....	71
Figure 68 : La première étape de la conception de la cage.	72
Figure 69 : La deuxième étape de la conception de la cage.....	72
Figure 70 : La troisième étape de la conception de la cage.....	73
Figure 71 : La quatrième étape de la conception de la cage.....	73
Figure 72 : La cinquième étape de la conception de la cage.....	74
Figure 73 : Vue en perspective du filtre à poche.....	74
Figure 74 : Vue en perspective éclatée du filtre à poche.	75
Figure 75 : Centrale de traitement d'air.....	77
Figure 76 : Fonctionnement du CTA simple flux.	78
Figure 77 : Fonctionnement du CTA double flux.	79
Figure 78 : Les composants du CTA.....	80
Figure 79 : Ventilateur axial.....	80

Figure 80 : ventilateur centrifuge.	81
Figure 81 : Sens général de l'écoulement d'air dans les deux types de ventilation.	81
Figure 82 : Les restrictions.	82
Figure 83 : Filtre à treillis métallique et filtre à choc.	82
Figure 84 : Filtre plan.	83
Figure 85 : Filtre à poches et filtre à dièdre.	83
Figure 86 : Filtre absolu.	84
Figure 87 : Dimensionnement du CTA.	84
Figure 88 : Système de canalisation dans la zone de peinture en intégrant les 3 CTA.	85
Figure 89 : Lignes de courant de l'air chaude (coloré par la température) dans la zone de peinture.	86

Liste des tableaux :

Tableau 1: Résumé des caractéristiques des récupérateurs. (15)	32
Tableau 2 : Le cahier de charge.	42
Tableau 3 : Classement des échangeurs.	44
Tableau 4 : Matrice de Pugh	44

Table des matières :

Introduction générale :	1
Chap. I : Préambule sur l'organisme d'accueil.	3
I. Présentation de Zénith Fonderie et ses activités :	4
I.1. Présentation de l'organisme :.....	4
I.2. Les activités principales de l'entreprise :	4
I.2.1. Le moulage :	4
I.2.2. Usinage des pièces	6
I.2.3. Traitement de surface.....	6
I.2.4. La peinture	7
II. Organisations des ressources humaines et cartographie de l'entreprise :	10
II.1. Organigramme générale.	10
II.2. Cartographie Zenith Fonderie :	11
Chap. II : Etude bibliographique	12
I. Introduction :	13
II. Le transfert de chaleur :	14
II.1. Mécanismes du transfert de chaleur	14
II.1.1. Conduction :	14
II.1.2. Convection :.....	15
II.1.3. Rayonnement :.....	16
II.2. Les coefficients du transfert thermique :	17
II.2.1. Le nombre de Reynolds :.....	17
II.2.2. Le nombre de Prandtl :	18
II.2.3. Le nombre de Nusselt :.....	18
II.3. Régimes d'écoulement :	19
II.3.1. Régimes thermiques :	20
II.4. Modes d'écoulement :	21
III. Récupération de chaleur avec un échangeur thermique :	23
III.1. Les échangeurs thermiques :.....	23

III.2. Technologie des échangeurs	23
III.3. Les systèmes de récupération de chaleur air-air :	25
III.3.1. Les caloducs :	25
III.3.2. Les échangeurs à eau glycolée :	27
III.3.3. Les échangeurs à plaques :	28
III.3.4. Les échangeurs à roue :	30
IV. Conclusion :	32
Chap. III : Analyse, études et solutions	33
I. Mise en situation le problème :	34
I.1. Introduction :	34
I.2. Description du problème :	35
I.3. Solution proposée :	36
I.4. Conclusion :	37
II. Analyse fonctionnelle :	38
II.1. Introduction :	38
II.2. Bête à cornes :	38
II.3. Diagrammes pieuvre.....	39
II.4. Diagramme S.A.D.T :	39
II.5. Diagramme FAST :	40
II.6. Conclusion :	41
III. Etude et dimensionnement d'un échangeur thermique :	43
III.1. Introduction :	43
III.2. Choix technologique :	43
III.1.1. Méthode de Pugh :	43
III.3. Dimensionnement thermique de l'échangeur :	45
III.3.1. La méthodologie de calcul :	45
III.3.2. Les ailettes :	53
III.3.3. Echangeur de chaleur à plaques avec les ailettes :	54
III.3.4. Dimensionnement d'échangeur de chaleur avec les ailettes :	56
III.4. Conclusion :	57
IV. Système de filtration :	60
IV.1. Introduction :	60
IV.2. La cabine de peinture :	60

IV.3. Le système de filtration de la cabine :	62
IV.3.1. Filtre choc :	64
IV.3.2. Filtre plissé :.....	64
IV.3.3. Filtre à Poche :	66
IV.4. Amélioration sur le système de filtration :.....	67
IV.4.1. Description du problème :.....	67
IV.4.2. La conception des filtres :	67
IV.4.2. La conception de la cage :.....	72
IV.5. Conclusion :	74
V. Dimensionnement du CTA et canalisation :.....	77
V.1. Introduction :	77
V.2. Les types du CTA :	77
V.2.1. CTA simple flux :.....	78
V.2.2. CTA double flux :.....	78
V.3. Les composants du CTA :	79
V.3.1. Les ventilateurs :	80
V.3.2. Les filtres :.....	82
V.4. Dimensionnement du CTA :	84
V.5. Canalisation :.....	85
V.6. Conclusion :	86
Conclusion générale :	90
Annexes :	91
Bibliographie :	94

Introduction générale :

Aujourd'hui avec une croissance permanente des prix de l'énergie et face aux objectifs du développement durable, la maîtrise de l'énergie est devenue un enjeu majeur dans tous les domaines d'activités. Pour les professionnels de l'énergie, le premier enjeu est de concevoir des systèmes et procédés énergétiques avec de meilleures efficacités. Ces systèmes et procédés énergétiques doivent être à la fois économiques et respectueux des normes environnementales en vigueur.

Dans un certain nombre d'ateliers de traitement de surface et peinture, ils existent des rejets thermiques à des températures plus ou moins élevés. Plusieurs voies sont envisageables pour la récupération de cette chaleur. D'un côté, il est possible de transformer cette énergie thermique en électricité au moyen de générateurs thermoélectriques et de l'autre côté, il existe la possibilité de faire la transformation de la chaleur en énergie mécanique, avec des machines thermiques basées sur le cycle thermodynamique de RANKINE, de BRAYTON ou de STIRLING. On peut aussi récupérer les calories de ces rejets thermique en utilisant un échangeur thermique. C'est dans cette vision que s'inscrit notre travail. Qui s'intéresse à la conception d'un échangeur thermique convenable pour récupérer les calories perdues en extraire l'air chaud des cabines de peintures chez Zenith Fonderie.

Les échanges thermiques interviennent dans de nombreux secteurs d'activités humaines. Dans la plupart de ces activités, le transfert de chaleur doit s'effectuer sans altération des milieux intervenant dans le transfert thermique. L'utilisation d'équipements spécifiques d'échange est alors nécessaire. Ces équipements sont connus sous la dénomination d'échangeurs de chaleur. Ce sont des systèmes thermodynamiques présents dans toutes les unités industrielles dans lesquelles interviennent les processus d'extraction de chaleur.

L'échangeur de chaleur est un équipement qui permet d'assurer un transfert de chaleur d'un fluide chaud à un fluide froid sans contact direct entre les deux. Le souci technologique majeur des échangeurs de chaleur est l'amélioration de l'échange thermique entre les deux fluides.

Le présent travail est une étude, dimensionnement et amélioration d'un locale de peinture. Pour ce faire, il nous a paru intéressant d'entamer nos travaux, par une présentation de l'entreprise

Zénith Fonderie. Ce préalable sera suivi d'une synthèse bibliographique permettant de couvrir les principes de transfert de chaleur qui sont en relation directe avec notre étude, Cette étude sera faite en se basant sur des différentes corrélations existantes dans la littérature des transferts thermiques ce qui permet le calcul de dimensionnement d'échangeur et qui va nous guider à collecter des idées générales sur des échangeurs thermiques pour effectuer le choix technologique d'échangeur convenable dans notre cas. Par la suite sera abordée l'étude expérimentale. Elle traitera d'une part l'analyse fonctionnelle et dimensionnement d'échangeur thermique et d'autre part l'amélioration du système de filtration et dimensionnement du CTA.

Finalement, ce rapport sera terminé par une conclusion générale qui résume les principaux résultats obtenus.

Chap. I : Préambule sur l'organisme d'accueil.

- I. Présentation de Zénith Fonderie et ses activités
- II. Organisations des ressources humaines et cartographie de l'entreprise

I. Présentation de Zénith Fonderie et ses activités :

I.1. Présentation de l'organisme :

La société ZENITH Fonderie, est une fonderie de fabrication des pièces en alliages de zinc (ZAMAK) et d'alliage d'aluminium (par injection sous pression).

L'entreprise travaille pour de grands donneurs d'ordre dans l'électricité et le bâtiment tels que Schneider Electric, Valéo, Saint Gobain, Sevax et Néopost industrie.

Créée en 2007 à Ain-Sebaâ, Zenith Fonderie est issue d'un partenariat franco-marocain. Elle revendique un savoir-faire dans l'étude, l'analyse de la valeur et la recherche d'optimisation de pièces. En 2015 Zenith Fonderie investit 3 millions d'euros pour déménager dans une nouvelle usine avec une superficie de 5000 m² sur un hectare de terrain à Berrechid près de l'aéroport de Casablanca.

Cette société faisant partie du Groupe TPM Industrie a acquis une expérience et un savoir-faire lui permettant aujourd'hui d'offrir des produits de haut niveau de qualité.

Au sein de la société ZENITH Fonderie il existe quatre activités :

I.2. Les activités principales de l'entreprise :

I.2.1. Le moulage :

Dans la fonderie, les pièces métalliques sont fabriquées par remplissage d'une empreinte avec un alliage métallique en fusion. Deux types d'alliage principale sont utilisées par Zenith Fonderie : L'un à base de zinc (ZAMAK), l'autre à base d'aluminium.

Le **Zamak** est un alliage à base de zinc essentiellement auquel sont liés de l'aluminium, du magnésium et du cuivre. Il tire son nom de l'acronyme en allemand de chaque élément entrant dans sa composition : **Z**ink, **A**luminium, **MA**gnésium et **K**upfer (cuivre). (1)

Moulage sous pression :

Le moulage sous pression est un processus de moulage de métal qui se caractérise par le fait de forcer le métal fondu sous haute pression dans une cavité de moule . La cavité du moule est créée à l'aide de deux matrices en acier à outils trempées qui ont été usinées en forme et

fonctionnent de manière similaire à un moule d'injection pendant le processus. La plupart des pièces moulées sous pression sont fabriquées à partir de métaux non ferreux. Selon le type de métal coulé, une machine à chambre chaude ou froide est utilisée. (2)



Figure 1: Machine d'injection ZAMAK robotisée.

Moulage en coquille :

Procédé très ancien, le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, appelé coquille, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée. Dans cette cavité dénommée empreinte, l'alliage liquide est versé par l'intermédiaire d'un orifice de remplissage. Le remplissage de la coquille se fait sous la seule action du poids de l'alliage soit par coulée directe, de haut en bas, dite en chute ou par gravité, soit, suivant le principe des vases communicants, de bas en haut, dite en source. (3)



Figure 2 : Moulage en coquille.

1.2.2. Usinage des pièces

L'usinage est une famille de procédés de fabrication de pièces par enlèvement de copeaux. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de façon à donner à la pièce brute la forme et les dimensions voulues, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision. (4)



Figure 3 : Machine-outil à commande numérique.

L'usinage par enlèvement de matière est réalisé toujours en regroupant les opérations par catégorie. On distingue 4 classes importantes en usinage traditionnel :

- le tournage,
- le fraisage,
- le perçage-alésage-taraudage
- la rectification.

1.2.3. Traitement de surface



Figure 4 : Traitement de surface des pièces métalliques.

Après l'usinage ou moulage, les pièces métalliques doivent être protégées contre la corrosion en vue d'assurer par la suite bonne adhérence de la peinture sur la surface.

Cette nouvelle série d'opération intitulée « traitement de surface » a lieu dans des bacs respectivement de traitement et de rinçage :

Cette zone est composée de plusieurs bacs on peut les partager en deux familles :

Les bacs de traitement :

Deux bacs de dégraissage chimique : Avant d'assembler ou de traiter les pièces il convient de nettoyer leur surface pour enlever les graisses qui existent sur la surface des pièces. La durée de cette opération est de 10min.

Bain de passivation : C'est le bain responsable de la protection des pièces par formation d'une couche protectrice de chrome trivalent à une température de 60°C et pH égal à 3,5 pendant 50 secondes.

Les bacs de rinçage :

Bain de rinçage triple cascade : Il existe deux bacs, l'un pour rincer les pièces après traitement de dégraissage et l'autre après traitement de passivation.

Bain d'attente : c'est un bain de rinçage des pièces avant le traitement de passivation. Il est composé essentiellement de l'eau déminéralisée pour éviter l'entraînement des impuretés (les traces de produit de dégraissage chimique) dans le bain de passivation.

Bain tiède : Il est composé essentiellement de l'eau tiède déminéralisée. Il a un double rôle, d'abord le rinçage à nouveau des pièces pour éliminer le reste du produit de passivation, de plus il donne aux pièces une certaine température qui facilite leur séchage pendant l'étuvage. Il est à noter qu'avant de passer à l'étuve, les pièces sont soufflées à l'air comprimé afin d'enlever l'eau de rinçage piégée dans les trous.

1.2.4. La peinture

Cette dernière activité consiste à déposer sur la surface des pièces traitées une couche mince de peinture d'une épaisseur de 25 à 30 micromètres. En suivant les étapes suivantes :

Etape 1 :

On organise les pièces dans ces porteurs.

Chaque genre de pièces ont des porteurs avec structure déférente, pour bien assurer la stabilité et la fixation des pièces durant la peinture.

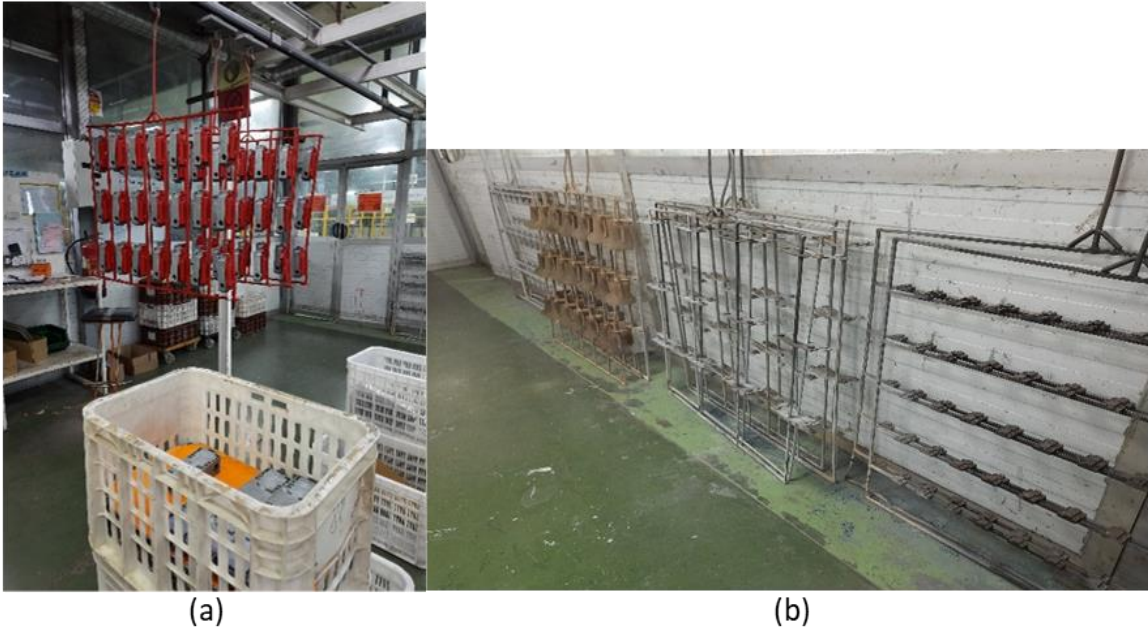


Figure 5 : (a) Pièces près pour la peinture ; (b) Les porteurs de pièces.

Etape 2 :

Les pièces sont chauffées à une température de 80°C avant la peinture (Mauvais aspect en température basse).



Figure 6 : Four de chauffage.

Etape 3 :

Elle consiste à protéger et améliorer l'aspect des pièces par déposition de deux couches de peintures.



Figure 7 : Peindre les pièces métalliques avec pistolet de pulvérisation.

Etape 4 :

Après on fait entrer les pièces dans une chambre un peu plus chaude et isolé contre la poussière, pour faire le dégazage.



Figure 8 : Chambre de dégazage.

Etape 5 :

Finalement on les remet dans un autre four de même température (80°C) pour sécher la peinture.

II. Organisations des ressources humaines et cartographie de l'entreprise :

II.1. Organigramme générale.

L'**organigramme** est une représentation schématique des liens fonctionnels, organisationnels et hiérarchiques d'une **entreprise**. Il sert ainsi à donner une vue d'ensemble de la répartition des postes et fonctions au sein d'une structure. (5)

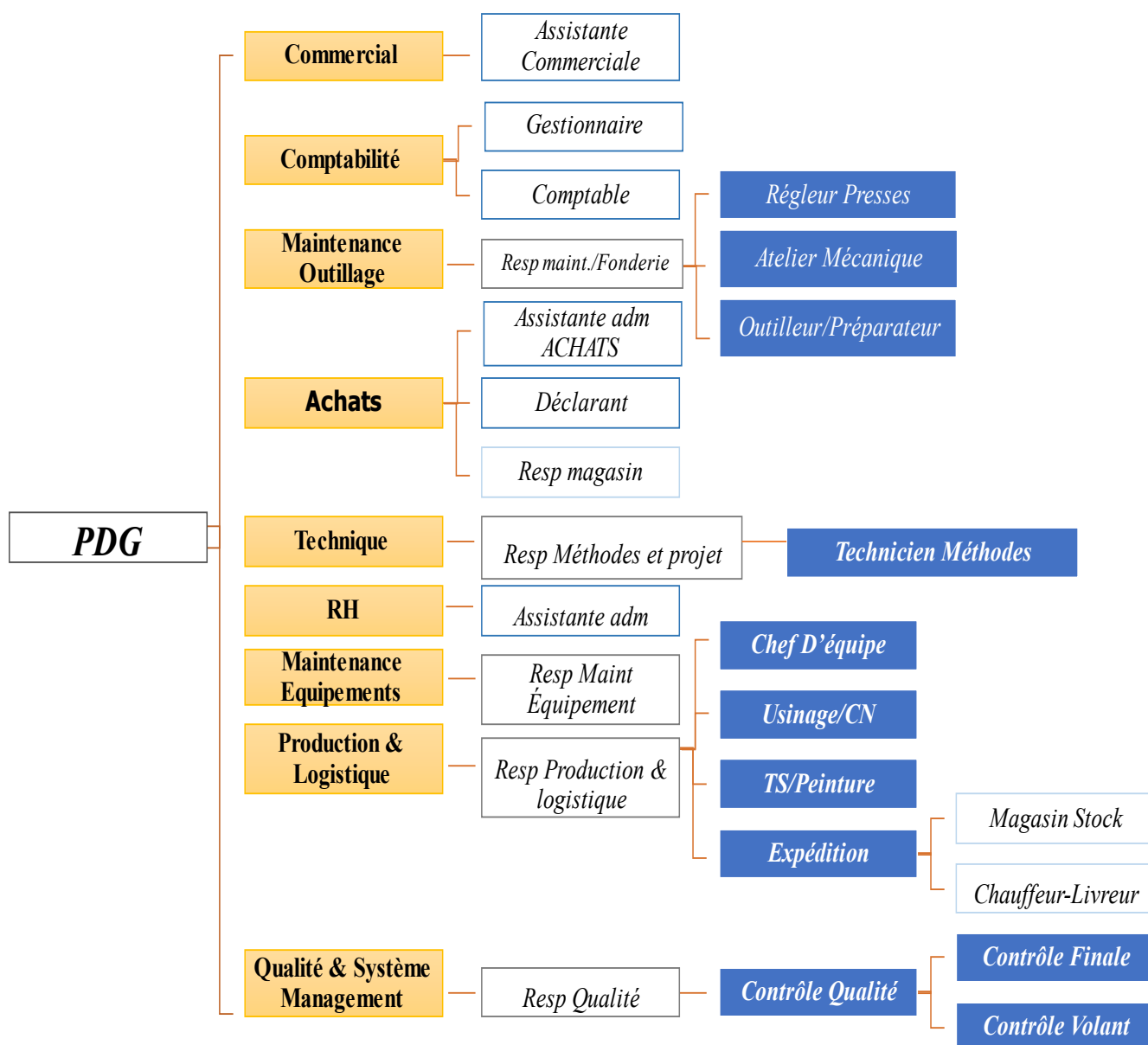


Figure 9 : L'organigramme générale de Zénith Fonderie.

II.2. Cartographie Zenith Fonderie :

Une cartographie des processus représente la réalité des processus de l'entreprise de la manière la plus fidèle possible. Il s'agit d'une démarche qui vise l'amélioration. Le processus schématisé doit donc être bien compris pour être analysé en vue de futures améliorations. (6)

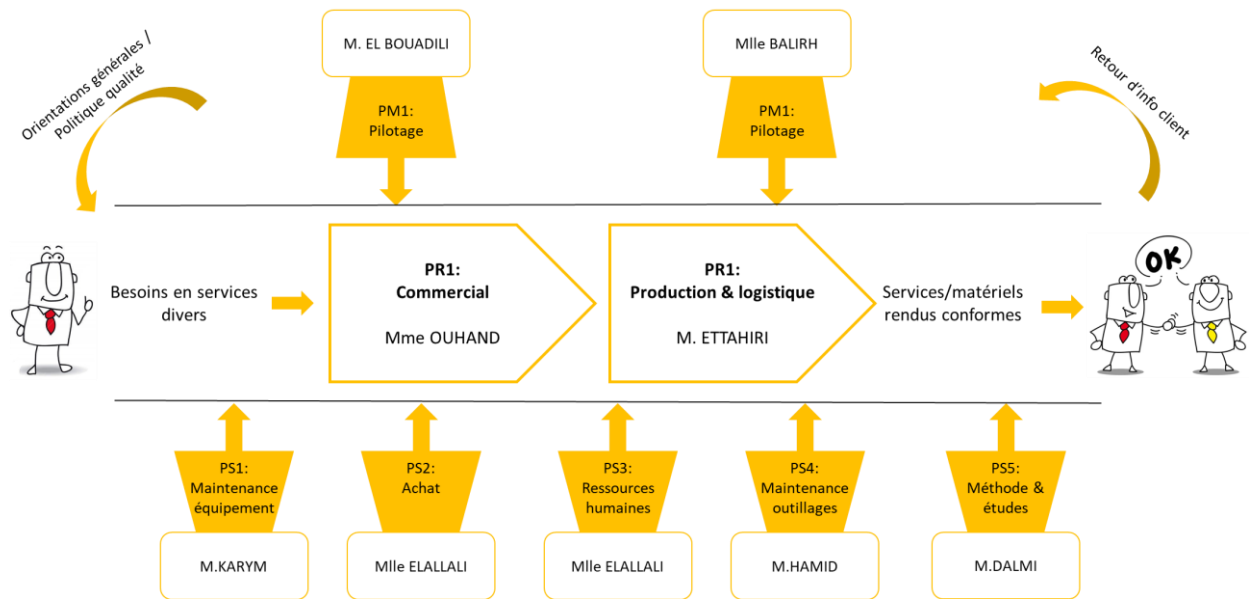


Figure 10: Cartographie Zenith Fonderie.

Chap. II : Etude bibliographique

- I. Introduction**
- II. Le transfert de chaleur**
- III. Récupération de chaleur avec un échangeur thermique**
- IV. Conclusion**

I. Introduction :

Les transferts thermiques sont omniprésents tant dans la vie même de notre planète (la fusion des glaciers, le réchauffement des eaux des océans, les cycles climatiques), que dans l'existence humaine sur terre, exprimés par des gestes quotidiens de l'individu (réglage de la température du corps humain, préparation de la nourriture, réalisation d'un microclimat dans un habitat) ou par des techniques très diversifiées conduisant au progrès de la civilisation (utilisation de l'énergie thermique de diverses origines, moteurs thermiques, échangeurs de chaleur, isolation thermique).

L'étude de ce dernier s'appuie sur les principes de la thermodynamique :

- Le premier principe, qui exprime la loi de la conservation de l'énergie (L'énergie n'est ni créée ni détruite, mais seulement transformée d'une forme à l'autre).
- Le deuxième principe, qui établit le sens naturel de la propagation de la chaleur, toujours de la source ayant une température plus élevée (corps chaud) vers la source dont la température est plus basse (corps froid).

L'étude de phénomènes thermiques qui accompagnent la propagation de la chaleur et l'analyse du taux de transfert thermique ayant lieu dans un système, représente l'objectif fondamental de la science du *transfert de chaleur*. La connaissance de la distribution de la température dans un tel système est nécessaire dans l'étude du transfert thermique.

Les problèmes de transfert thermique jouent un grand rôle dans les applications techniques, soit que les échanges doivent être importants et rapides, on cherche à obtenir un excellent transfert thermique.

II. Le transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur étudie le transport de la chaleur. La chaleur est une forme d'énergie qui correspond à la température sensible ressentie au quotidien. Pour les observations physiques, il faut définir clairement les termes.

Dans ce qui suit, les principes de base du transfert de chaleur vont être expliqués afin de pouvoir étudier par la suite les mécanismes concrets. L'observation est basée sur l'état stationnaire. On a un équilibre énergétique. Les températures ne changent plus.

II.1. Mécanismes du transfert de chaleur

Quel que soit le mécanisme de transmission, la différence de température est toujours à l'origine d'un flux thermique. Plus la différence de température est élevée, plus l'effort d'équilibrage de la température est important. Ceci revient à dire que flux thermique élevé et gradient de température élevé ne vont pas l'un sans l'autre. Les différences de température stimulent l'effort d'équilibrage qui implique l'échange d'une quantité de chaleur (énergie thermique). On distingue 3 mécanismes du transfert de chaleur : la conduction, la convection et le rayonnement.

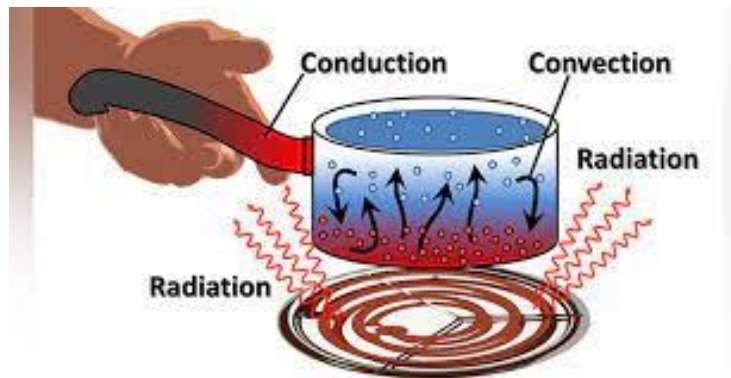


Figure 11: Les trois modes de transfert de chaleur.

II.1.1. Conduction :

La conduction thermique résulte de « chocs » à l'échelle moléculaire et atomique. Elle va donc être liée à la structure et à l'organisation du matériau. Elle peut avoir lieu dans les solides et dans une moindre mesure dans les fluides, plus dans les liquides que dans les gaz. C'est un phénomène ; de transport de la chaleur ; très analogue à la conduction de l'électricité. Il s'agit d'un transfert d'énergie à petite échelle, dans un corps localement au repos. Nous parlons de conducteur et d'isolant de la chaleur. Elle est décrite par la loi de Fourier (1807). Elle peut aussi

être définie, par une simple explication, comme un phénomène par lequel l'énergie est transférée des zones à haute température vers des zones à basse température. Dans n'importe quel milieu, ce mode de transfert thermique tend à uniformiser la répartition d'énergie cinétique des particules constituant dans la masse du corps. Des exemples typiques pour la conduction sont : le transfert de chaleur par des parois de bâtiments, des conduites qui transportent des différents agents chauds ou froids, etc.

La conduction thermique se produit à l'intérieur de substances qui n'ont pas une température uniforme. Ainsi qu'entre des substances de températures différentes. Tous les états d'agrégation permettent ce mécanisme de transmission.

L'image de droite montre une vue en coupe (A-A) d'une casserole chauffée. La plaque de cuisson chaude (1) transfère la chaleur à l'eau (3) à travers le fond de la casserole (2). Le flux thermique est représenté par des flèches rouges.

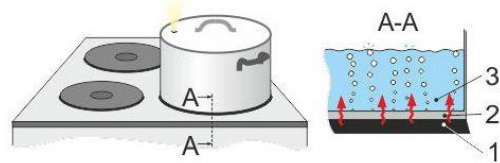


Figure 12 : Le transfert de chaleur à l'eau dans une casserole.

II.1.2. Convection :

Le phénomène de convection se réfère au transfert thermique qui a lieu dans les fluides liquides ou gaz en mouvement. La convection est le processus de transfert thermique déterminé par le mouvement des particules élémentaires d'un fluide entre des zones ayant des températures différentes ; ce mouvement entraîne un mélange intense des particules fluides, qui changent de l'énergie (chaleur) et de la quantité de mouvement (impulse) entre elles. Ayant toujours lieu dans un milieu fluide (Fig. II.2. [131]), elle a comme caractéristique de base le fait que le transfert de chaleur est intimement lié par le mouvement de ce milieu (d'ailleurs son nom vient du verbe latin *convehere* qui signifie porter avec soi).

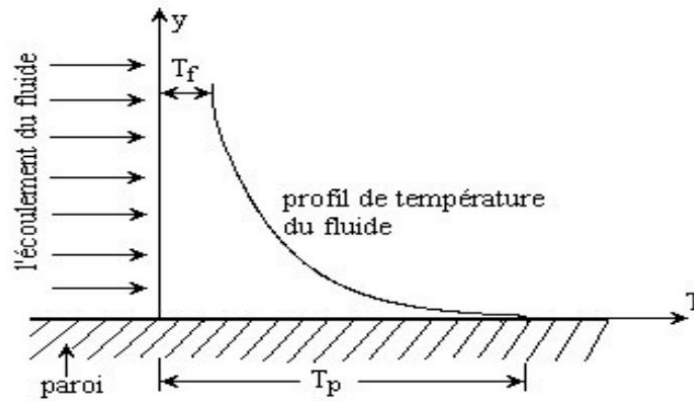


Figure 13 : Transfert thermique par convection entre la paroi chaude et le fluide froid.

Il convient de distinguer **la convection forcée** (mouvement créé par une différence de pressions) dans laquelle le fluide est mis en mouvement par un apport d'énergie mécanique extérieure (pompe, une soufflerie, ventilateur, ...) de **la convection naturelle** (libre) dans laquelle le fluide prend, en son sein, l'énergie nécessaire au mouvement (variation de masse volumique associée à une variation de température par exemple ; si le fluide est isotherme, il n'y a pas de mouvement).

(A) Tour de refroidissement - convection libre : l'eau chaude s'évapore et réchauffe l'air. La vapeur et l'air s'élèvent en raison des différences de densité.

(B) Ventilateur d'un processeur d'ordinateur - convection forcée : la chaleur du processeur d'ordinateur (3) est conduite dans des ailettes de refroidissement (2) (conduction thermique). Le ventilateur (1) assure un refroidissement efficace grâce à un écoulement d'air élevé.

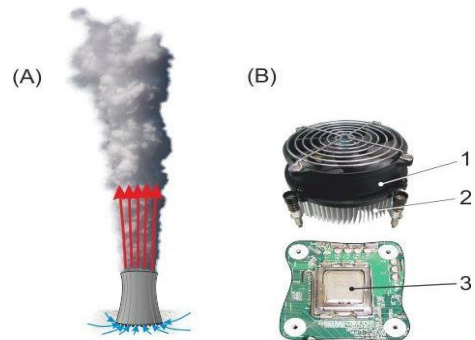


Figure 14 : (A) Tour de refroidissement ; (B) Ventilateur d'un processeur d'ordinateur.

II.1.3. Rayonnement :

C'est une transmission d'énergie à distance, entre deux corps séparés ou non (sans aucun contact entre eux), par un milieu matériel (transformation d'énergie thermique d'un émetteur en énergie électromagnétique, propagation, transformation partielle en énergie thermique sur un corps récepteur). C'est le cas de l'énergie qui nous vient du soleil. L'interprétation physique est la suivante : tout corps, ayant une température supérieure à $T=0^{\circ}\text{K}$, émet des particules désignées par "photons" ; ceux-ci se déplacent à la vitesse de la lumière et transportent une énergie fonction de leur "longueur d'onde".

Sur toutes les surfaces, de l'énergie est dissipée et absorbée sous forme de rayonnement électromagnétique. Tous les types de rayonnement s'accompagnent d'énergie. L'échange augmente ou diminue la quantité de chaleur d'un corps.

Le soleil est le meilleur exemple de rayonnement calorifique.

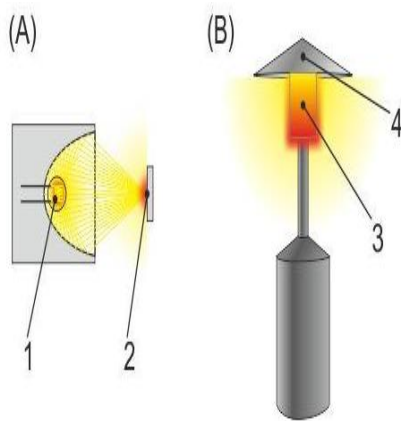


Figure 15 : (A) Spot halogène avec focale ; (B) Parasol chauffant.

Des applications techniques sont représentées à gauche :

(A) Spot halogène avec focale : Le rayonnement de la lampe halogène (1) est concentré dans la focale (2), ce qui chauffe cet endroit. Le " brasage à la lumière " en constitue une application. Lors du brasage à la lumière, l'énergie de rayonnement est utilisée pour faire fondre la soudure au foyer.

(B) Parasol chauffant : Une flamme fait rougir la surface (3) sur la partie supérieure. Cela dégage de la chaleur, qui réchauffe l'environnement. La hotte (4) se trouvant au-dessus de l'objet incandescent réfléchit vers le bas la partie qui est émise vers le haut

En résumé, les trois mécanismes de transfert de la chaleur sont :

- **La conduction** : Qui représente les échanges à travers les parois (le plus souvent métalliques),
- **La convection** : Qui représente le transport de chaleur dans un fluide en écoulement.
- **Le rayonnement** : Qui représente les échanges radiatifs entre les fluides et les parois (principalement infra rouge) bien que ce dernier soit souvent négligeable (car pris en compte uniquement pour un fonctionnement à haute température).

II.2. Les coefficients du transfert thermique :

Déterminés à partir de la méthode d'analyse dimensionnelle (théorème de **Vaschy-Buckingham** ou théorème des groupements π), les nombres qui caractérisent les écoulements et les transferts d'énergie associés sont :

II.2.1. Le nombre de Reynolds :

Il représente le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses, il est donné par :

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu}$$

- D_h : Le diamètre hydraulique [m]
- μ : Viscosité dynamique [Pa.s]
- ν : Viscosité cinématique [m²/s]
- ρ : La masse volumique [kg/m³]
- V : Vitesse d'écoulement [m/s]

II.2.2. Le nombre de Prandtl :

Le nombre de Prandtl. Il représente le rapport de la diffusivité moléculaire due à la quantité de mouvement par la diffusivité thermique.

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{\lambda}$$

- μ : Viscosité dynamique [Pa.s]
- C_p : Capacité calorifique [J/kg.K]
- λ : Conductivité thermique [W/m.K]

Ce nombre est calculable pour un fluide donné indépendamment des conditions expérimentales (il ne dépend de la température que par l'intermédiaire de la capacité calorifique) et caractérise l'influence de la nature du fluide sur le transfert de chaleur par convection.

Le nombre de Prandtl caractérise la distribution des vitesses par rapport à celle des températures, c'est une caractéristique du fluide

II.2.3. Le nombre de Nusselt :

C'est un coefficient adimensionnel d'échange de chaleur, il représente le rapport du transfert de chaleur par convection à celui par conduction dans une couche de fluide.

$$Nu = \frac{h_c \cdot L}{\lambda}$$

- h_c : Coefficient d'échange [W/m².K]
- L : Longueur caractéristique [m]
- λ : Conductivité thermique [W/m.K]

Il caractérise le type de transfert de chaleur, en permettant de quantifier l'augmentation de l'échange de chaleur due à l'écoulement du fluide. Le nombre de Nusselt moyen est donné par la formule suivante :

$$Nu_m(x, y) = \frac{1}{A} \int_0^L Nu(x, y) dx$$

Il doit être constant lorsque les parois horizontales sont adiabatiques. Cette propriété est un indicateur de la précision des calculs.

L'application de l'analyse dimensionnelle montre que la relation liant le flux de chaleur transféré par convection forcée aux variables dont il dépend, peut être recherchée sous la forme d'une relation entre trois nombres adimensionnels :

$$Nu = f(Pr, Re)$$

Corrélations empiriques en convection forcée sur un plan : (Annexe 4)

– **Ecoulement turbulent :**

$$Nu = 0,035 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}, \quad \text{pour } Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0,5$$

– **Ecoulement laminaire :**

$$Nu = 0,0628 \cdot Re^{0,5} \cdot Pr^{1/3}, \quad \text{pour } Re < 5 \cdot 10^5 \text{ et } 0,5 \leq Pr \leq 10$$

II.3. Régimes d'écoulement :

La vitesse du fluide au contact de la paroi peut être plus ou moins importante, il convient de distinguer deux types d'écoulement :

- **L'écoulement laminaire** pour lequel le fluide s'écoule le long de la paroi sous forme de filets qui restent parallèles. Ceci a lieu pour de faibles vitesses du fluide et l'échange de température entre les filets ne peut se faire que par conduction (coefficient de conductivité du fluide λ) car il n'y a aucun mélange de matière.
- **L'écoulement turbulent** pour lequel la vitesse moyenne du fluide est beaucoup plus importante.

Il y a un véritable mélange des molécules de fluide. Néanmoins, il existe au contact de la paroi une zone où les molécules sont freinées et où leur vitesse est beaucoup plus faible, c'est la

couche limite dont l'épaisseur est mal connue et où on peut supposer que le régime est laminaire. Dans cette couche limite, les échanges de chaleur se font également par conduction. Etant donné que le coefficient de conductivité des gaz est très faible, la résistance thermique de la couche limite est très grande.

Dans ce cas, il y existe donc une variation de température importante. Dans le cas de la convection forcée, les échanges de chaleur sont plus régis par la vitesse imposée au fluide que par les différences de température.

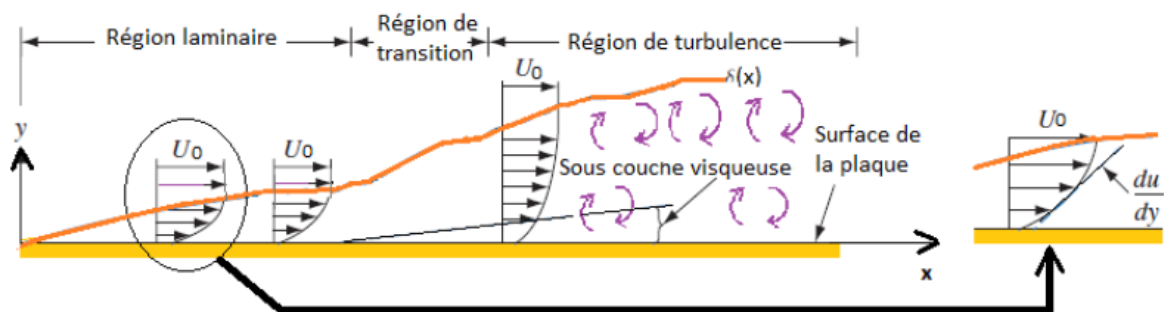


Figure 16 : Développement de l'écoulement d'un fluide sur une plaque plane, trois régimes d'écoulement sont visibles : laminaire, transitoire, et turbulent

II.3.1. Régimes thermiques :

Régime permanent :

La température en tout point du milieu (système) est indépendante du temps.

Régime périodique établi :

La température, en tout point, effectue des oscillations périodiques indépendantes de la température initiale.

Régime transitoire :

Qui correspond à l'évolution d'un système d'un état initial vers un état final provoquée par un changement à l'instant initial des sources ; le champ de température $T(M, t)$ dépend du champ de température initial $T(M, 0)$ et du temps.

Régime variable :

Pour lesquels les sources évoluent constamment, le champ de température $T(M, t)$ dépend des valeurs instantanées des sources et des évolutions antérieures.

II.4. Modes d'écoulement :

Les échangeurs de chaleur sont classifiés selon la configuration d'écoulement des fluides considérés et selon leur type de construction.

On distingue trois modes d'écoulement : (8)

- **Écoulement à co-courants** : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans le même sens ; la température de sortie du fluide froid ne peut pas être supérieure à la température de sortie du fluide chaud.



Echangeurs cocourant

Ces échangeurs sont utilisés pour de très faibles puissances échangées et ne sont pas adaptés à notre cas.

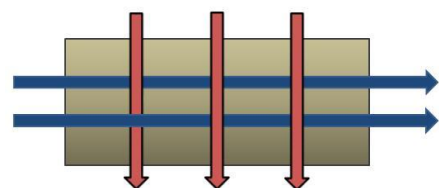
Écoulement à contre-courants : les deux fluides s'écoulent parallèlement et dans des sens opposés ; la température de sortie du fluide froid peut être supérieure à la température de sortie du fluide chaud. Cette disposition est l'une des plus favorables pour l'échange



Echangeurs contre-courant

thermique. De plus, un échangeur à contre-courants nécessite, pour un même flux de chaleur, des surfaces d'échanges plus faibles qu'un échangeur à co-courants. En revanche, la paroi qui sépare les deux fluides subit des contraintes mécaniques plus importantes dues à une plus grande variation de température.

Écoulement croisé avec ou sans brassage : les deux fluides s'écoulent perpendiculairement l'un à l'autre. Le fluide non brassé est canalisé alors que l'autre fluide circule librement et peut être considéré comme partiellement brassé. Le brassage a pour effet



Echangeurs à courant croisé

d'homogénéiser les températures dans les sections droites de la veine fluide. Les échangeurs à courants croisés sont plus compacts et plus efficace pour un même volume donné.

En résumé, les trois modes d'écoulement sont :

- celui à **co-courants** (écoulements parallèles des fluides et dans la même direction)
- celui à **contre-courants** (écoulements parallèles des fluides mais dans des directions inverses)
- et celui à **courants croisés** (écoulements perpendiculaires entre les deux fluides)

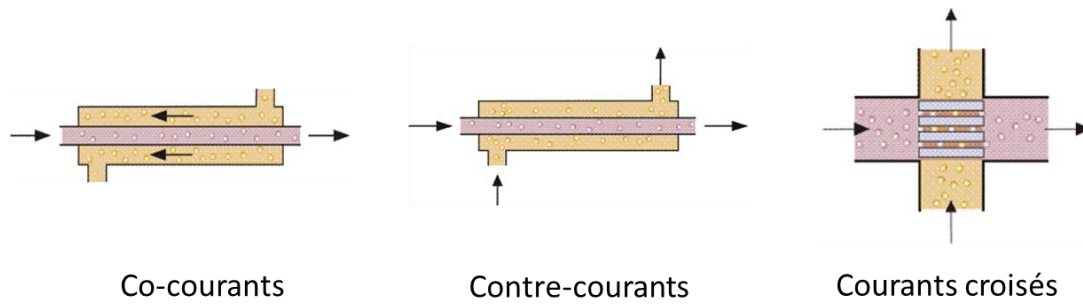


Figure 17: les trois modes d'écoulement.

Pour plus d'efficacité, les échangeurs de chaleur sont conçus pour maximiser la surface de la paroi entre les deux fluides, tout en minimisant la résistance à l'écoulement du fluide à travers l'échangeur. Les performances de l'échangeur peuvent également être affectées par l'ajout d'ailettes ou d'ondulations dans une ou les deux directions, ce qui augmente la surface et peut canaliser l'écoulement du fluide ou induire des turbulences. (9)

III. Récupération de chaleur avec un échangeur thermique :

III.1. Les échangeurs thermiques :

Un échangeur de chaleur est un dispositif utilisé pour transférer de l'énergie thermique (enthalpie) entre deux ou plusieurs fluides, entre une surface solide et un fluide, ou entre des particules solides et un fluide, à différentes températures et en contact thermique.

Les échangeurs de chaleur sont utilisés dans les industries des procédés, de l'énergie, du pétrole, des transports, de la climatisation, de la réfrigération, de la cryogénie, de la récupération de chaleur, des carburants alternatifs et d'autres industries.

Les exemples courants d'échangeurs de chaleur que nous connaissons dans l'utilisation quotidienne sont les radiateurs automobiles, les condenseurs, les évaporateurs, les préchauffeurs d'air et les refroidisseurs d'huile.

Les échangeurs de chaleur peuvent être classés de différentes manières.

Dans de nombreux échangeurs de chaleur, les fluides sont séparés par une surface de transfert de chaleur et, idéalement, ils ne se mélangent pas et ne fuient pas. De tels échangeurs sont dits à transfert direct, ou simplement récupérateurs.

Par contre, les échangeurs dans lesquels il y a un échange de chaleur intermittent entre les fluides chauds et froids – par stockage d'énergie thermique et en libération à travers la surface ou la matrice de l'échangeur - sont dits du type à transfert indirect, ou simplement régénérateurs.

III.2. Technologie des échangeurs

Difficile d'être exhaustif sur la description technologique des échangeurs tant la diversité de ces appareils et de leurs variantes en fonction des constructeurs est importante. La Figure 4 rappelle de façon synthétique les principales classes d'échangeurs suivant des critères strictement technologiques.

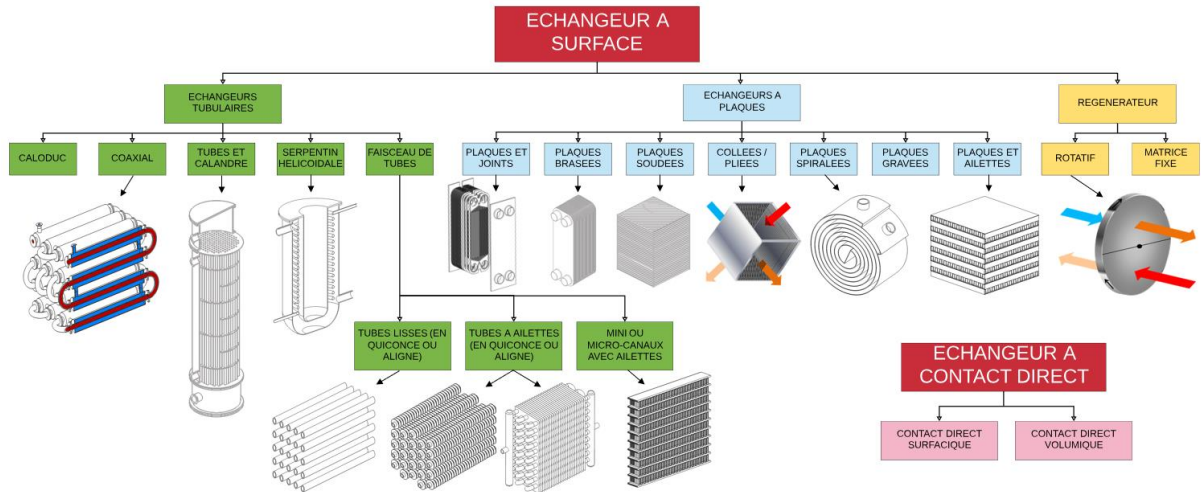


Figure 18: Principales technologies d'échangeurs thermiques. (10)

Les échangeurs tubulaires (Tubes et calandre, coaxial...) sont les plus répandus et représentaient, en 1998, quasiment 50% des parts de marché en Europe. Les échangeurs dits compacts (échangeurs à plaques et joints par exemple), qui ont connus une croissance importante dans les années 90, tendent à faire diminuer ce pourcentage mais la grande adaptabilité des échangeurs tubulaires (tenue en pression et en température, diversité des matériaux...etc.) fait qu'il est difficile d'assurer leurs remplacements par d'autres technologies.

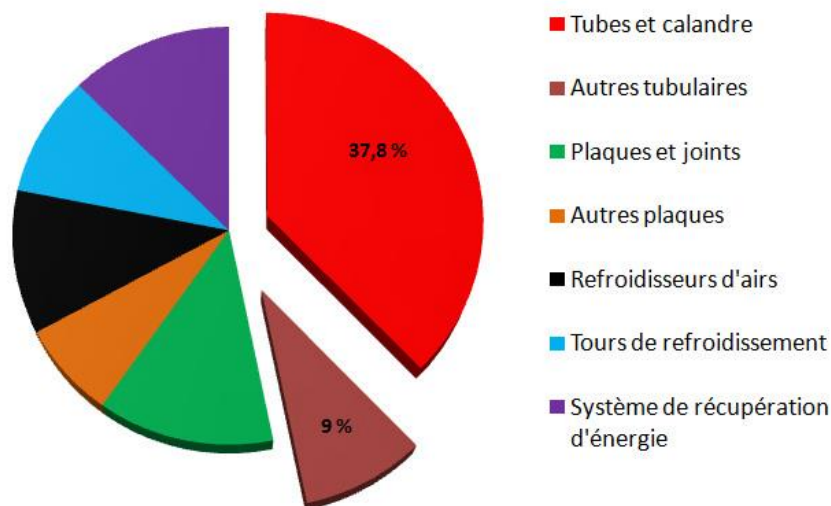


Figure 19: Répartition en pourcentage des recettes par type d'échangeur sur le marché total de l'échangeur en Europe (données 1998). (11)

III.3. Les systèmes de récupération de chaleur air-air :

En dehors du recyclage direct de l'air, et de l'intervention d'une pompe à chaleur, on distingue quatre méthodes de récupération d'énergie thermique :

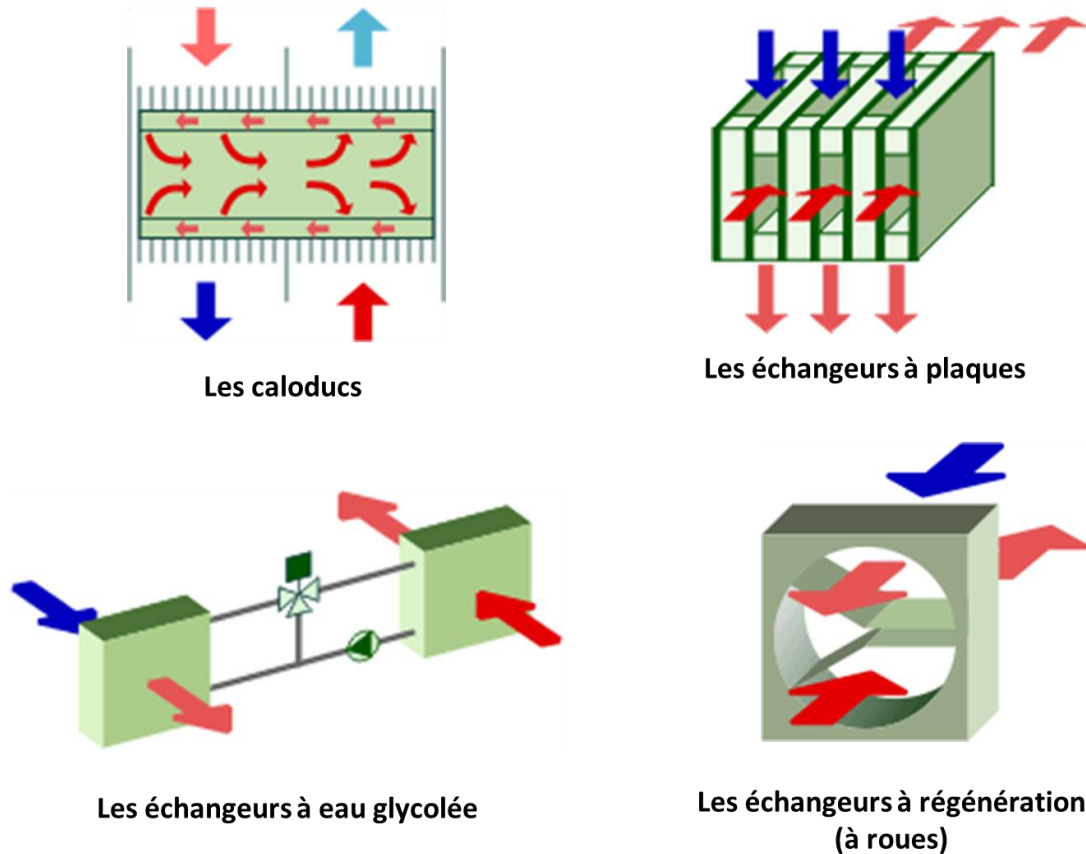


Figure 20: Les quatre méthodes de récupération d'énergie thermique.

III.3.1. Les caloducs :

Le caloduc est un super conducteur de chaleur fonctionnant en cycle fermé selon le principe évaporation – condensation, avec retour de liquide soit par gravité, soit par capillarité.

Son intérêt provient de la valeur très élevée de la chaleur latente de changement de phase comparée à la chaleur spécifique.

Il est constitué d'une enceinte hermétiquement scellée, contenant un fluide frigorigène. Le choix du fluide caloporteur dépend de la température de travail prévue.

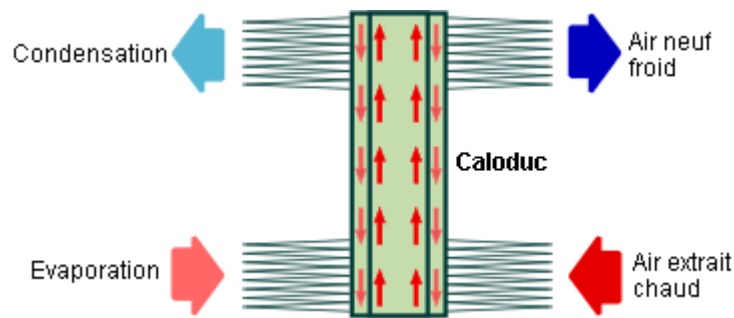


Figure 21 : Fonctionnement des caloducs.

Le flux d'air chaud circulant dans la partie inférieure du tube cède sa chaleur au fluide liquide et le porte à ébullition. La vapeur ainsi formée monte dans la partie haute du tube où elle se trouve en contact avec l'air froid. Le gaz va se condenser sur la paroi interne du tube en cédant sa chaleur de condensation, puis va retomber naturellement par gravité dans la partie inférieure pour un nouveau cycle.

De nombreux caloducs toujours en fonctionnement travaillent avec un fluide frigorigène de la catégorie des chlorofluorocarbures (CFC) actuellement interdits dans les nouveaux matériels.

La **disposition verticale** est caractéristique du **type à gravité**. Il existe également des tubes horizontaux où la circulation se fait par capillarité. Ce dernier système est alors réversible et peut donc fonctionner en été.

Ce type de récupérateur se caractérise par sa faible masse, l'absence de pièces en mouvement et un encombrement réduit. Les conduits d'air repris et d'air neuf doivent cependant être proches.

Concernant le fonctionnement, une régulation est à prévoir, de même il faut également prévoir un entretien du récupérateur. (12)

Avantages

- Faible encombrement,
- Peu de maintenance,
- Système statique (pas d'énergie d'appoint),
- Réversibilité pour le type horizontal à capillarité.

Désavantages

- Amenée et évacuation d'air doivent être adjacentes,

- Régulation de température limitée,
- Risque de givre mais seuil assez bas,
- En cas de panne, il y a risque de contamination de l'air par le fluide frigorigène,
- Pas réversible, donc pas de fonctionnement d'été possible pour le type gravitaire.

III.3.2. Les échangeurs à eau glycolée :

Le récupérateur à eau glycolée est constitué de deux batteries, en général constituées de tubes en cuivre et d'ailettes en aluminium (éventuellement cuivre/cuivre ou l'ensemble en acier galvanisé), placées l'une dans le groupe d'extraction, l'autre dans le groupe de pulsion.

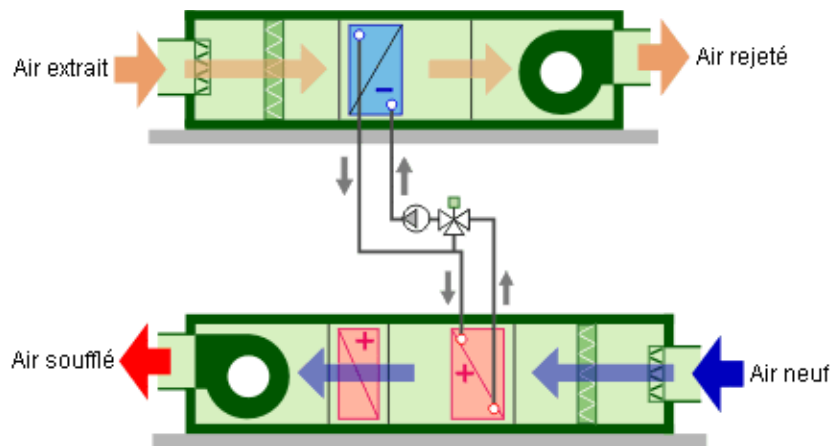


Figure 22 : Fonctionnement d'un échangeur à eau glycolée.

Les batteries de pulsion et d'extraction sont reliées entre elles par un circuit de tuyauteries comprenant des vannes d'isolement, une pompe de circulation, un vase d'expansion, un orifice de remplissage et divers appareils de mesure (thermomètres et manomètre).

Dans le circuit ainsi constitué circule de l'eau glycolée (antigel). Ce fluide caloporteur sert de vecteur de transport des calories puisées dans l'air extrait (chaud, par ex : 20°C) vers l'air neuf (froid, par ex : - 10°C).

En descendant en dessous du point de rosée, la chaleur latente de la vapeur d'eau contenue dans l'air extrait peut-être récupérée. Ce système n'assure cependant pas de transfert d'humidité. Il n'y a aucune contamination de l'air frais par l'air vicié. (12)

Avantages

- Les flux d'air neuf et d'air rejeté sont totalement séparés, il n'y a donc pas de risque de contamination,

- Flexibilité dans la disposition des gaines d'air neuf et d'air évacué,
- Régulation de température très simple à réaliser par une vanne 3 voies,
- Groupement possible de plusieurs installations (la source de chaleur ne doit pas forcément provenir de l'installation de ventilation).

Désavantages

- Transfert de chaleur latente limité car la température du fluide glycolé est peu souvent en dessous de la température de rosée de l'air extrait,
- L'énergie consommée pour la pompe eau glycolée réduit le rendement net de récupération. Une valeur de 5 % est un ordre de grandeur,
- Perte de charge relativement importante,
- Rendement généralement faible,
- La boucle d'eau demande une surveillance et un entretien supplémentaire vu le risque de corrosion et la présence d'une pompe de circulation,
- La présence de glycol comme antigel accroît la perte de charge côté eau et réduit le transfert de chaleur,
- Coûts importants pour des petites installations,
- Sans mesures appropriées, il y a risque de givre sur l'air extrait.

III.3.3. Les échangeurs à plaques :

L'échangeur de chaleur est constitué de plaques, de tubes ou de gaufrages de type « nid d'abeilles », de faible épaisseur en aluminium ou matière plastique qui séparent les veines d'air.

(12)

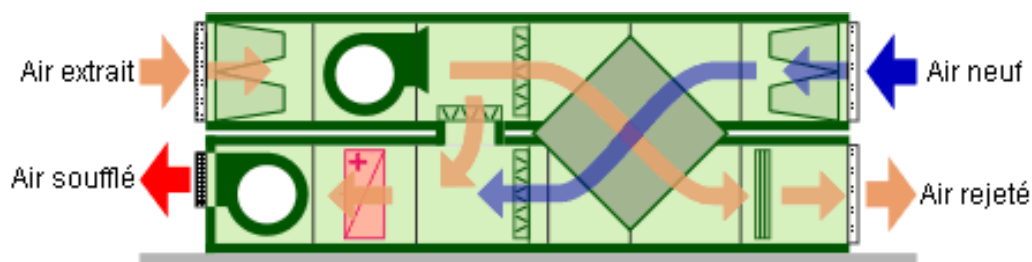


Figure 23 : Fonctionnement d'un échangeur à plaques.

Avantages

- Simple et fiable,
- Grande durée de vie et pratiquement pas de panne,
- Absence de pièces en mouvement, sécurité de fonctionnement,

- Peu de maintenance nécessaire,
- Faible risque de contamination de l'air frais en cas de bonne conception,
- Exécution en divers matériaux et nombreuses combinaisons possibles,

Désavantages

- Disposition Air neuf/Air rejeté proche,
- Sans by-pass, il n'y a pas de régulation de température et donc un risque de surchauffe en été,
- Danger de givre par température extérieure basse et par dépassement du point de rosée, il faut être attentif à la régulation si on souhaite tenir compte du récupérateur pour dimensionner les chaudières et les batteries de chauffe,
- L'échangeur présente une perte de charge relativement importante, surtout à de grands débits,
- En cas de panne des équipements mal conçus peuvent être source de bruit ainsi que de fuites et donc de contamination.

Les plaques sont assemblées entre elles par collage ou soudage et placées dans un châssis rigide. La distance entre les plaques est très faible, entre 5 et 10 mm ; (13)

Ce grand écart présente les avantages suivants :

- Faible résistance
- Moins d'encrassement
- Performance maintenue
- Nettoyage plus facile

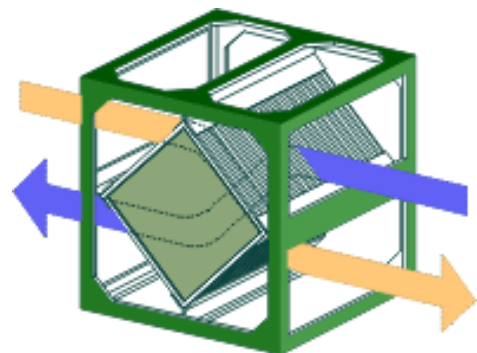


Figure 24: Echangeur à plaques

Les courants sont généralement croisés. Afin de maximiser l'échange convectif, les plaques peuvent être gaufrées et créer de la sorte une turbulence. En faisant varier la dimension des plaques et leur nombre, on peut obtenir de multiples variantes.

Le principe est très simple. L'air chaud évacué, p. ex. d'un local de peinture, est transmis à l'échangeur de chaleur par le biais d'un système de conduites raccordés. À l'intérieur, une partie de cette chaleur est extraite de l'air pour être stockée dans des lamelles en aluminium.

En même temps, l'air frais froid traverse l'échangeur de chaleur de l'autre côté des lamelles en aluminium. L'énergie thermique est ainsi transmise et retournée dans le local de peinture.

1. Air chaud évacué, 2. Air froid évacué, 3. Air froid, 4. Air chauffé

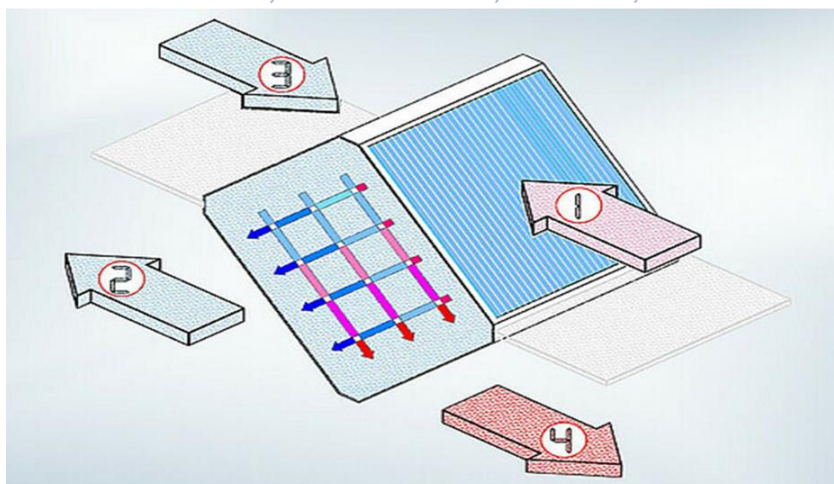


Figure 25: Fonctionnement d'un échangeur à plaques

Le rendement de l'échangeur de chaleur à courants croisés s'élève à 50-70 %. Ce rendement un peu plus faible que celui des autres échangeurs, est néanmoins relativisé par les avantages cités précédemment présentés par les installations d'une certaine taille.

Ce type d'échangeur de chaleur est généralement parfaitement approprié pour les petites et moyennes entreprises et aide à économiser facilement un maximum d'énergie pour un volume d'air petit à moyen.

III.3.4. Les échangeurs à roue :

L'échangeur rotatif, à roue ou roue thermique, est un échangeur de type air/air, le principe de fonctionnement de base est de récupérer la chaleur contenue dans l'air évacué des bâtiments pour réchauffer l'air froid extérieur (hiver) introduit pour le renouvellement d'air.

Suivant sa conception, il récupère soit la chaleur sensible (celle que l'on peut sentir avec nos sens) contenu dans l'air, soit il absorbe la chaleur latente et la chaleur sensible. La roue est constituée de couches superposées de feuille d'aluminium ou d'inox, une lisse l'autre ondulée constituant des canaux triangulaires ou les flux d'air circulent à contre-courant permettant ainsi l'échange de chaleur. (14)

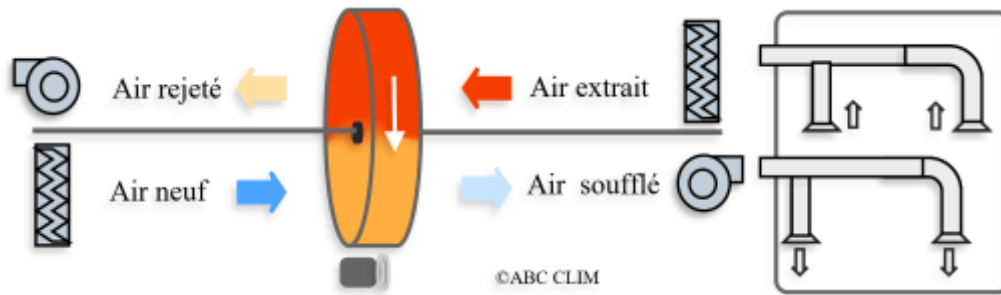


Figure 26 : Fonctionnement d'un échangeur rotatif.

Avantages

- Dépendant du média de transfert choisi, l'énergie sensible et l'humidité peuvent être transférées, ce qui permet de diminuer la taille de l'humidificateur éventuel,
- Rendement très élevé (de 75 à 95%),
- Perte de charge relativement faible en comparaison de l'efficacité,
- Faible encombrement pour la roue,
- Fonctionnement été possible dans le cas de matériau hygroscopique,
- Pas d'évacuation de condensats,
- Encrassement et givrage limité du fait de l'inversion régulière du sens des flux d'air (la filtration reste cependant obligatoire).

Désavantages

- Contamination de l'air neuf possible, principalement avec les régénérateurs statiques à clapet unique.
- Amenée et évacuation d'air doivent être adjacentes,
- Consommation d'énergie pour l'entraînement de la roue,
- Nécessité de l'entretien du système d'entraînement,
- Dans les roues la section de purge qui limite la contamination réduit l'efficacité de récupération,
- Le rendement est influencé par les positions relatives de l'échangeur de récupération et des ventilateurs de pulsion et de reprise.

Tableau 1: Résumé des caractéristiques des récupérateurs. (15)

	Boucle à eau glycolée	Échangeur à plaques	Caloduc	Échangeur par accumulation
Nécessité de placer les conduits d'air côtes-à-côtes	non	oui	oui	oui
Possibilité d'échange d'humidité	non	non	non	oui
Existence de pièces en mouvement (risque de panne)	oui	non	non	oui
Rendement en chaleur sensible	40 – 80 %	50 – 85 %	50 – 60 %	75 – 95 %
Encombrement spécifique en m pour 10 000 m ³ /h	0,5 – 1	1,5 – 2	0,5	0,5 – 2
Danger de gel	oui	oui	oui	non
Mélange entre l'air neuf et l'air vicié	non	non	non	oui
Perte de charge type en Pa	150 – 250	120 – 250	180	150

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modes du transfert de chaleur en se basant sur celui de la convection thermique. Plusieurs études numériques et/ou expérimentales ont été réalisées sur ce sujet voire son importance dans les différents domaines du milieu industriel et même dans la vie courante (chauffage, climatisation, etc.).

Le chapitre suivant est consacré à réaliser une étude pour dimensionner un échangeur de chaleur convenable à des conditions d'usine pour récupérer le maximum possible des calories.

Chap. III : Analyse, études et solutions

- I. Mise en situation le problème**
- II. Analyse fonctionnelle**
- III. Etude et dimensionnement d'un échangeur thermique**
- IV. Système de filtration**
- V. Dimensionnement du CTA et canalisation**

I. Mise en situation le problème :

I.1. Introduction :

L'atelier de peinture est destiné pour produire des pièces fabriquées en zamak de 80000 à 100000 pièces mensuel de différentes tailles et différentes couleurs.

Le local est d'une surface de (18 x 12) m² et de 4m de hauteur.

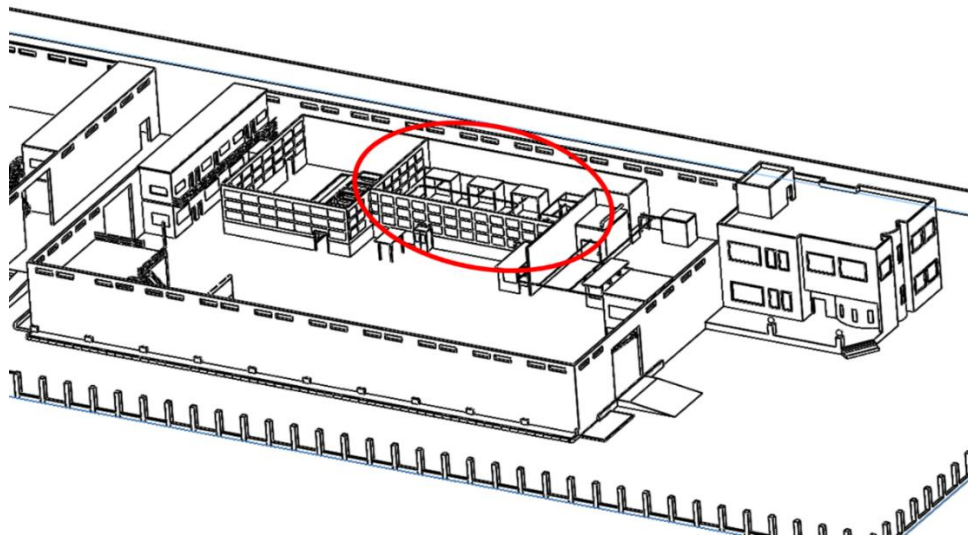


Figure 27 : Dessin perspective du local de peinture.

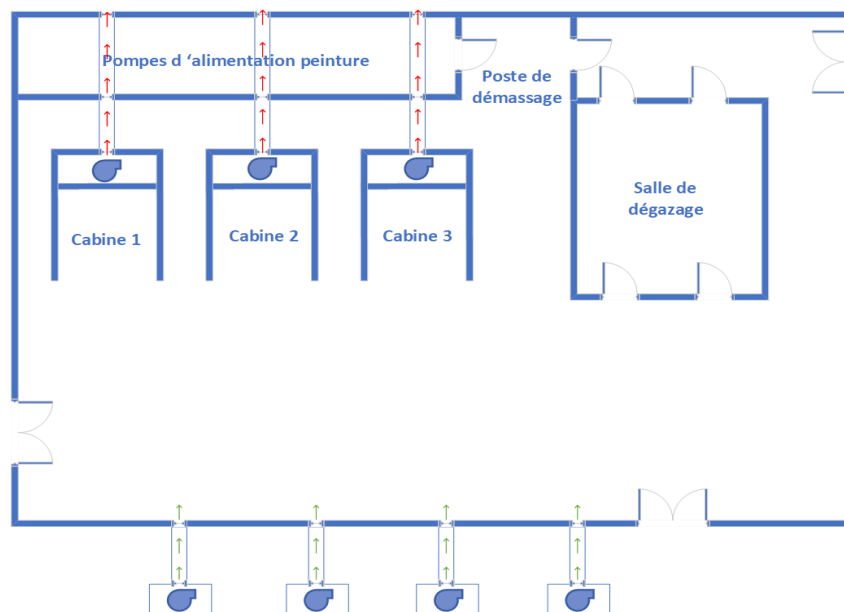


Figure 28 : Synoptique du local de peinture et système de distribution d'air.

Les ventilateurs de type DTS-18/18 avec un débit maximal de 14 500 m³/h utilisés dans la distribution et l'extraction sont toujours en fonctionnement pour que l'air dans la cabine soit plus pur suivant les normes. Il est interdit de faire recirculer l'air des cabines de peinture dans l'atelier à cause des solvants, les carbures organiques volatiles (COV).

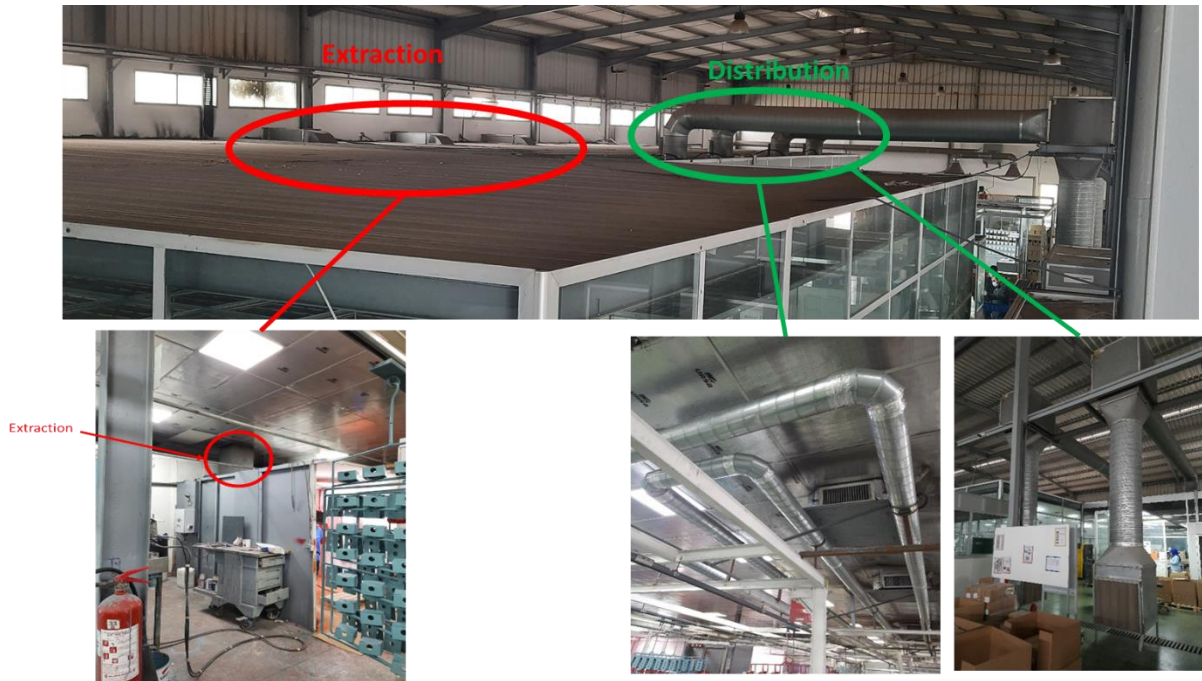


Figure 29 : Canalisation de système de distribution de l'air

I.2. Description du problème :

Pour avoir une bonne qualité de peinture il faut avoir un intervalle de température qui compris entre (18→28°C), la température nominale que la société essaye de maintenir à l'intérieur est de 22°C pendant les périodes froides, et quand la température de l'extérieur est inférieure à 18°C on est obligé d'allumer les pompes à chaleur pour chauffer l'air de distribution.

On souhaite récupérer les calories de l'air chaude extrait des cabines de peintures, pour économiser l'énergie de chauffage.

- **Calculons l'énergie rejetée par heure des 3 ventilateurs avec un débit de 14 500 m³/h pour chaque un.**

Soit l'air à T1 = 22°C rejeté à l'extérieur où il fait T3 = 6°C (la température minimale à Berrechid (Annexe 2)).

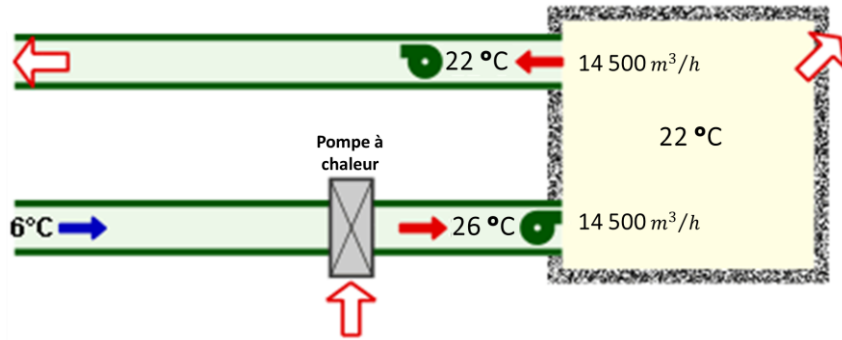


Figure 30 : Description simplifié du système de ventilation.

La quantité de chaleur Q_c contenue dans ce m^3 d'air rejeté est égale au produit du volume d'air par la chaleur volumique de l'air ($0,34 \text{ Wh/m}^3\text{°C}$) et par l'écart de température entre l'air rejeté et l'air à l'extérieur (ΔT).

$$Q_c = 0,34 [\text{Wh/m}^3\text{°C}] \times 1 [\text{m}^3] \times (22[\text{°C}] - 6[\text{°C}]) = 5,44 \text{ Wh.}$$

$$\text{Énergie rejetée par heure : } 5,44 [\text{Wh/(m}^3\text{/h)}] \times 14\,500 [\text{m}^3\text{/h}] \times 3 = 236,64 [\text{kWh}]$$

Soit une installation de ventilation assurant un débit de $43\,500 \text{ m}^3\text{/h}$ ($14\,500 \times 3$) et fonctionnant 8 h par jour, 5 jours par semaine et 24 semaines par an.

L'énergie rejetée à l'extérieurs par an est de :

$$236,64 [\text{kWh}] \times (8 \times 5 \times 24) [\text{h/an}] = 227\,174 [\text{kWh/an}]$$

Cela implique une énergie perdue de $227\,174 \text{ kWh/an}$ qui coute un peut prêt $230\,000 \text{ Drh/an}$. (Prix d'électricité au Maroc ($0.9 \rightarrow 1.2 \text{ Drh/KWh}$)). (16)

Quelle est la solution idéale pour récupérer cette énergie ?

I.3. Solution proposée :

Un récupérateur de chaleur sur l'air extrait permet, en gros, de récupérer 50 % de cette consommation.

Donc la quantité de chaleur récupérer est : $Q_c / 2 = 2,72 \text{ Wh}$.

$$Q_c / 2 = \frac{0,34 [\text{Wh/m}^3\text{°C}] \times 1 [\text{m}^3] \times (22[\text{°C}] - T_2 [\text{°C}])}{2} = 2,72 \text{ Wh.} \Rightarrow T_2 = 14\text{°C}$$

Autrement dit en utilisant l'échangeur thermique, on aura au moyen un air extrait à l'extérieur de $T_2 = 14^\circ\text{C}$ au lieu de 22°C .

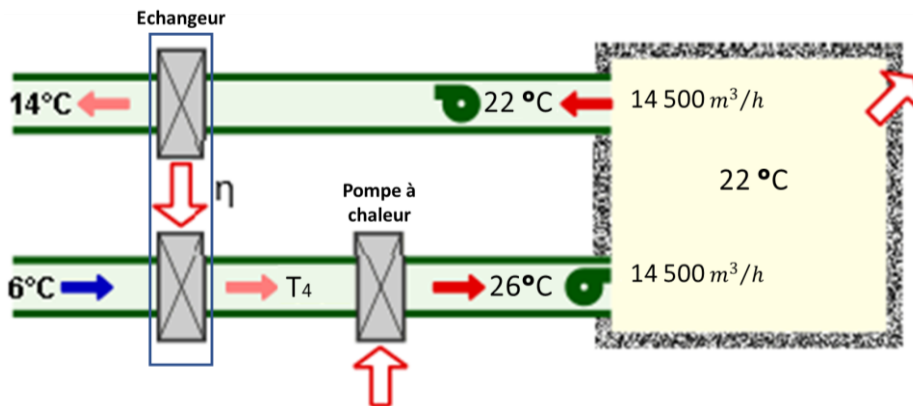


Figure 31 : Description simplifié du problème à résoudre.

T_4 est la température d'air neuf après le chauffage en utilisant l'échangeur thermique, qu'on va le conclure par la suite.

I.4. Conclusion :

Une investigation financière a fait l'objet de ce travail, est ce que l'échangeur thermique mérite vraiment l'investissement ? Autrement dit, cette solution apport-elle du bien pour notre entreprise ? Ce qu'on va essayer de prouver dans la suite de notre étude.

II. Analyse fonctionnelle :

II.1. Introduction :

Chaque produit industriel passe par un cycle de vie dès l'idée jusqu'à l'utilisation, et pour assurer le fonctionnement correct de notre projet il faut bien étudier l'analyse fonctionnelle (AF). Elle permet d'avoir une vision claire des exigences attendues du produit.

Le but de l'AF est d'optimiser la conception ou la reconception de produits en s'appuyant sur les fonctions que doit réaliser le produit, et permet d'éviter certains pièges classiques de la conception (aveuglement, manque d'objectivité, mauvaise gestion des priorités), et oriente les concepteurs vers des solutions techniques.

II.2. Bête à cornes :

Pour justifier la conception de notre projet, il faut expliciter l'exigence fondamentale qui exprime avec rigueur le but et les limites de l'étude.

Afin d'énoncer le besoin, il faut poser les trois questions suivantes concernant notre projet :

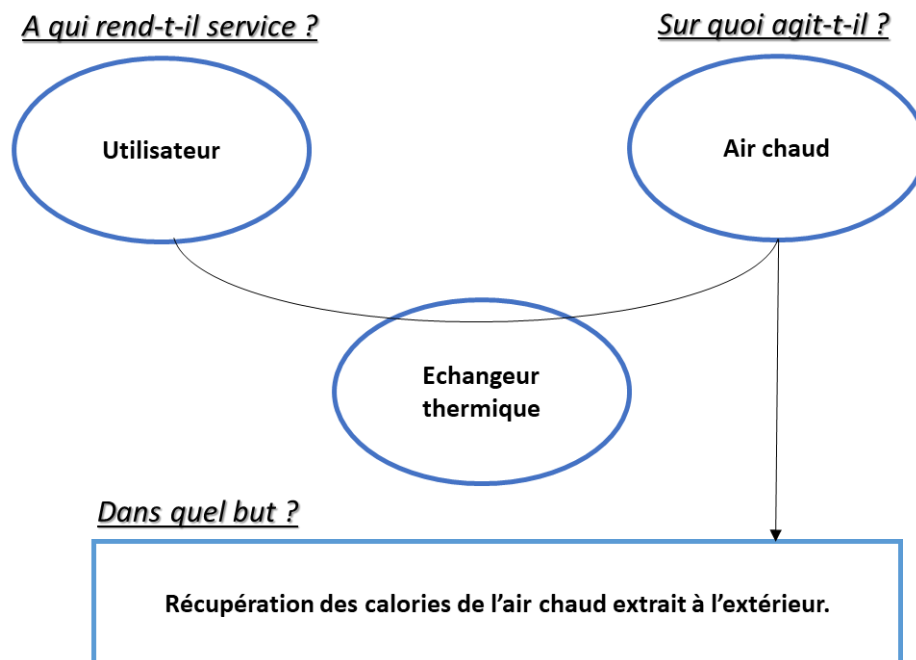


Figure 32 : Diagramme Bête à corne.

II.3. Diagrammes pieuvre

C'est la fonction qui satisfait le besoin. Elle assure la prestation du service rendu. C'est la raison pour laquelle le produit a été créé.

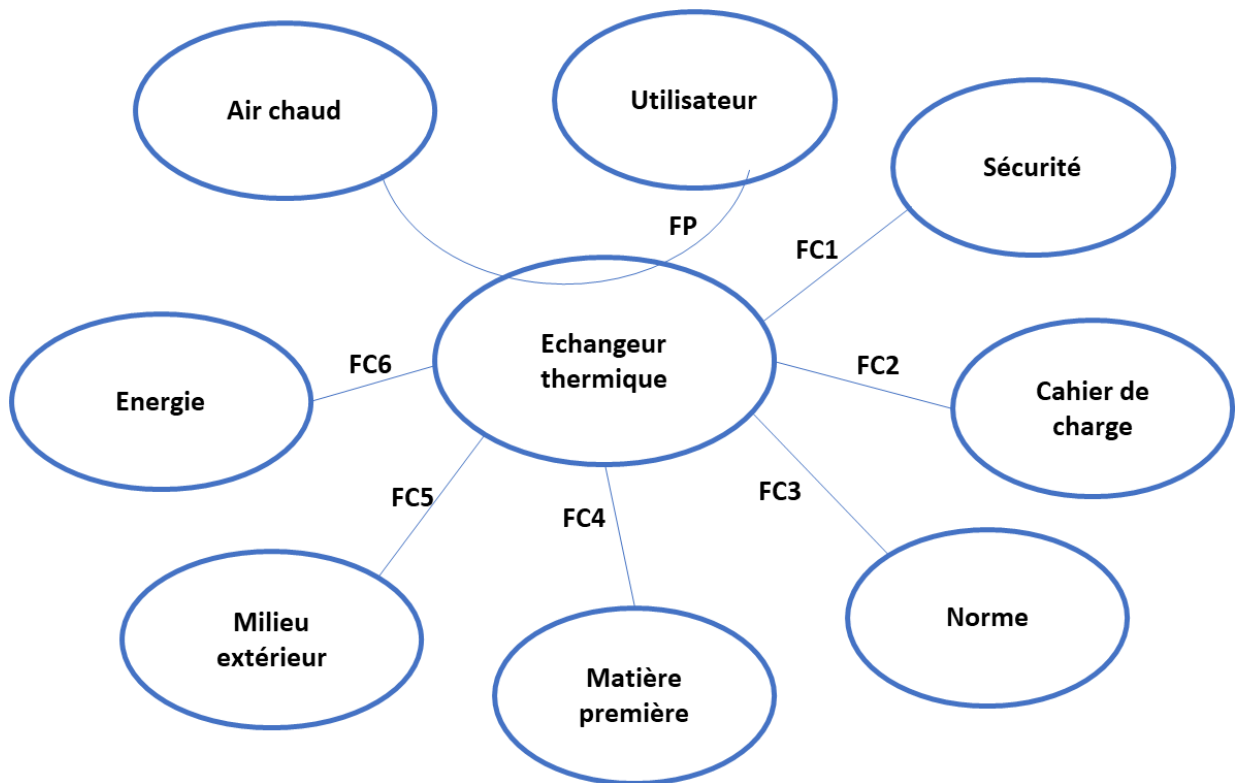


Figure 33 : Diagramme Pieuvre.

FP : Récupération des calories de l'air chaud extrait à l'extérieur.

FC1 : Protéger les biens et les personnes.

FC2 : Satisfaire le cahier des charges.

FC3 : Respecter les normes.

FC4 : Utiliser les matières premières disponibles et favorables.

FC5 : Résister aux conditions défavorables des milieu extérieur.

FC6 : Permettre à économiser la consommation d'énergie.

II.4. Diagramme S.A.D.T :

La méthode SADT, ou méthode d'analyse fonctionnelle descendante, est une méthode graphique qui part du général pour aller au particulier. Elle permet de décrire des systèmes complexes où coexistent et les différents flux de matière d'œuvre.

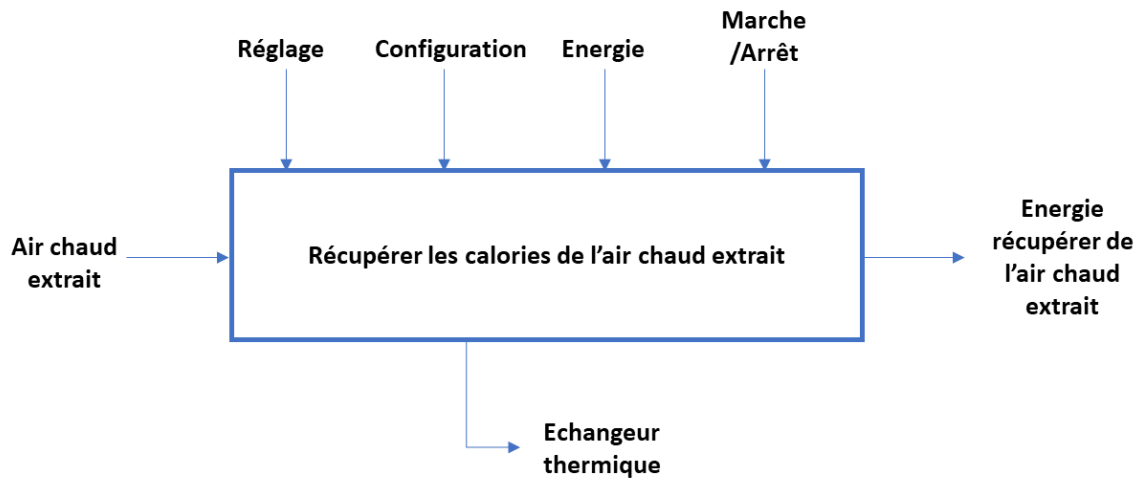


Figure 34 : Diagramme SADT.

II.5. Diagramme FAST :

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technic) permet de traduire chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) constructive(s). (17)

Le diagramme FAST constitue alors un ensemble de données essentielles permettant d'avoir une bonne connaissance d'un produit complexe et ainsi de pouvoir améliorer la solution proposée.

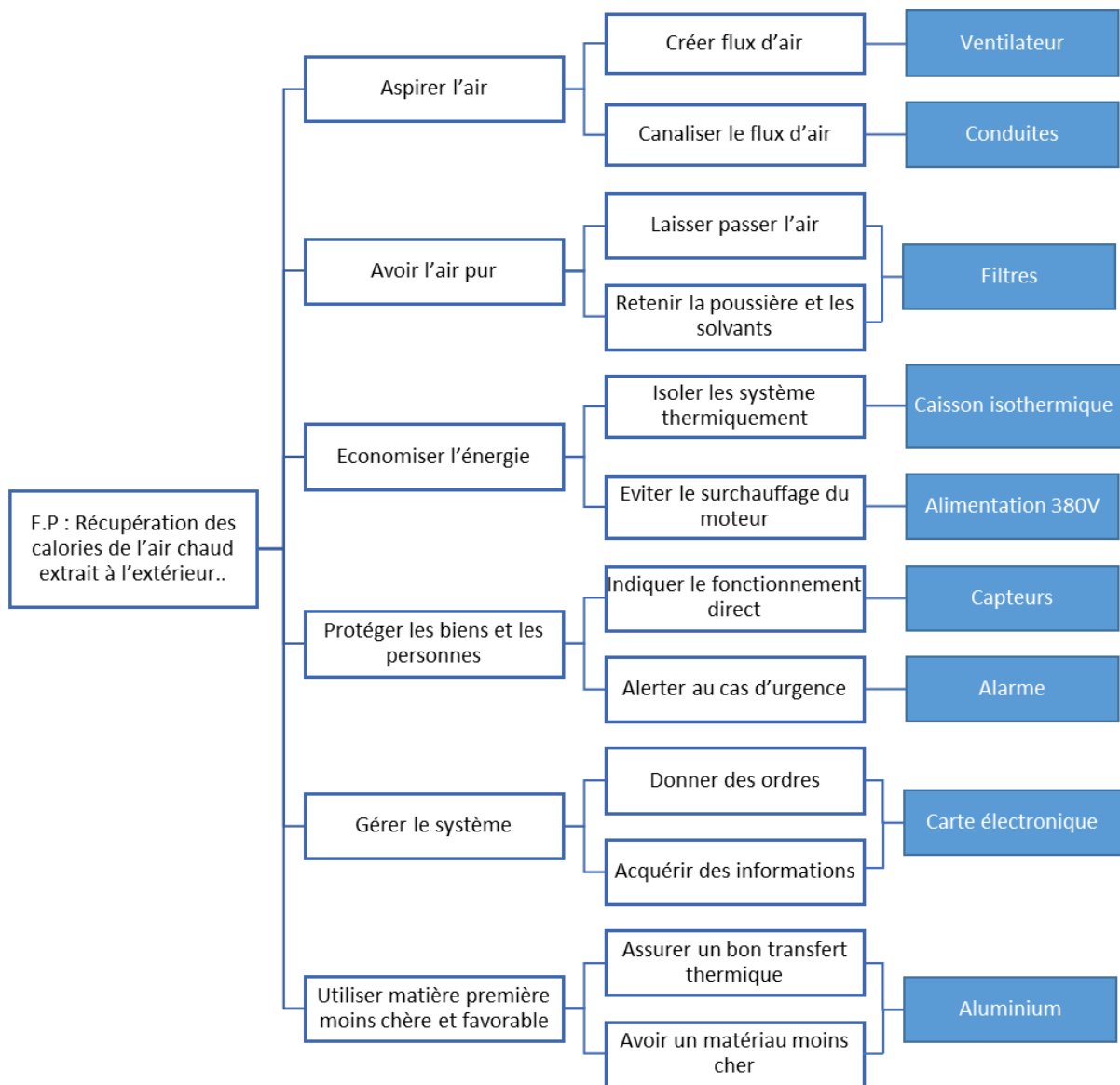


Figure 35 : Diagramme FAST.

II.6. Conclusion :

L'analyse fonctionnelle nous a permis de conclure le cahier de charge suivant :

Tableau 2 : Le cahier de charge.

Fonctions	Critères	Niveaux d'exigence
Création de flux d'air	Débit de ventilation	4,03 m ³ /s
Canaliser le flux d'air	Les conduites	Suivant les normes européens
Protéger les biens et les personnes	- Les capteurs - Les alarmes	- Capteur de position - Anémomètre - Thermomètre
Eviter le surchauffage	Alimentation électrique	380V
Utiliser matière première moins chère et favorable	- Prix - Conductivité thermique - Inoxydable	Aluminium
S'adapter au local	- Poids - Dimensions	< 133 Kg < (1200 x 1200 x 1000) mm ³
Avoir l'air pur	Filtres	Changeable facilement

III. Etude et dimensionnement d'un échangeur thermique :

III.1. Introduction :

Pour la réalisation de notre échangeur il faut d'abord choisir l'échangeur convenable pour nos conditions d'usine, pour passer ensuite à l'étape du dimensionnement en utilisant les principes du transfert thermique et thermodynamique.

III.2. Choix technologique :

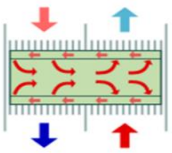

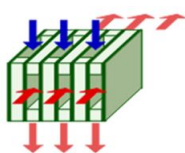
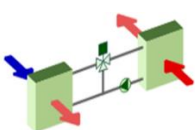
On peut connaître l'échangeur convenable parmi les 4 échangeurs disponibles (les caloducs, à plaques, à roue, à eau glycolée) en appliquant une méthode très connue par la sélection du choix optimal parmi plusieurs possibilités, cette méthode est **Méthode de Pugh**.

III.1.1. Méthode de Pugh :

La matrice de Pugh, ou matrice de décision, est un outil simple d'aide à la décision multicritères permettant de progresser dans la résolution de problèmes de décision où plusieurs objectifs. L'objectif de cet outil est d'effectuer le choix optimal malgré des critères conflictuels. L'outil s'utilise dans des contextes variés, telle la conception de produit, le choix de processus de fabrication ou sélection d'une opportunité d'amélioration, et est intégré à la philosophie Six Sigma. (18)

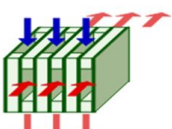
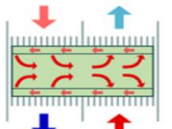
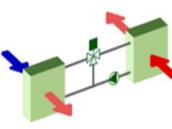

On commence par le classement des échangeurs, en utilisant Benchmarking et le tableau 1, pour trouver la solution de base, et après on peut appliquer la méthode de Pugh. Sur une échelle de 1→5, on obtient le tableau suivant :

Tableau 3 : Classement des échangeurs.

Critères	 Les caloducs	 Les échangeurs à régénération (à roues)	 Les échangeurs à plaques	 Les échangeurs à eau glycolée
Coûts	2	4	5	1
Volume	5	2	3	1
Encombrement	5	3	2	5
Design	2	4	4	2
Facile à fabriquer	2	4	5	2
Isolation air neuf /air vicié	5	1	5	5
Echange humidité	1	5	1	1
Rendement	2	5	4	3
Durabilité	4	2	5	2
Nombre de pièces	4	4	5	2
Perte de charge	4	5	3	2
Somme	36	39	42	26
Classement	3	2	1	4

On prend l'échangeur à plaque comme solution de base et on le compare avec les autres types des échangeurs pour conclure si notre choix primaire est optimal.

Tableau 4 : Matrice de Pugh

Critères	 Les échangeurs à plaques	 Les caloducs	 Les échangeurs à eau glycolée	 Les échangeurs à régénération (à roues)
Coûts	0	-	-	-
Volume	0	+	-	-
Encombrement	0	+	+	+
Design	0	0	0	0
Facile à fabriquer	0	-	-	-
Isolation air neuf /air vicié	0	0	0	-
Echange humidité	0	-	-	+
Rendement	0	0	0	+
Durabilité	0	-	-	-
Nombre de pièces	0	-	-	-
Perte de charge	0	+	0	+
Somme des -		5	6	6
Somme des +		3	1	4
Somme des 0		3	4	1
Score net		-2	-5	-2

En appliquant cette méthode, on confirme que l'échangeur à plaques est le meilleur choix pour nos conditions.

III.3. Dimensionnement thermique de l'échangeur :

L'épaisseur des plaques est de 1 à 1,5 mm pour le verre et de l'ordre de 0,5 mm pour les métaux (aluminium, acier inox), l'écartement varie entre 5 et 10 mm ; (19)

On prend $b=1m$, $e=1m$ et $a=5mm$, comme des cotes initiales pour notre échangeur.

Et on prend l'aluminium comme matériau pour notre échangeur (conductivité thermique important $\lambda_{Alu} = 230 W/m.K$; Resistance contre la corrosion ; Prix abordable)

Notre objectif est de déterminer la surface d'échange qui va nous permettre d'avoir la température souhaiter. Ce qui va nous permettre de savoir le nombre de plaques, et en fin la dimension complète de notre échangeur.

Pour cela on va suivre la méthodologie suivante :

III.3.1. La méthodologie de calcul :

Dans nos calculs suivants, on va dimensionner l'échangeur pour une seule cabine. Il sera boucau mieux qu'avoir un seul échangeur pour les trois cabines pour les deux raisons essentielles suivantes :

- Avoir un échangeur avec une dimension très grande.
- La nécessité d'arrêter toutes les cabines dans la maintenance.

Etape1 : Calcule des caractéristiques d'air :

Pour la convection forcée et naturelle, les principes corrélations sont données en Annexe 3. Les propriétés du fluide (Cp , ρ , λ , μ) sont calculées expérimentalement en fonction de la température.

Corrélations entre 0° et 100°C pour l'air : (Annexe 3)

La masse volumique $\rho = \frac{353}{(T+273)}$ [kg/m³]

Capacité calorifique $Cp = 1008$ [J/kg.K]

Conductivité thermique $\lambda = 7.57 \times 10^{-5} \times T + 0.0242$ [W/m.k]

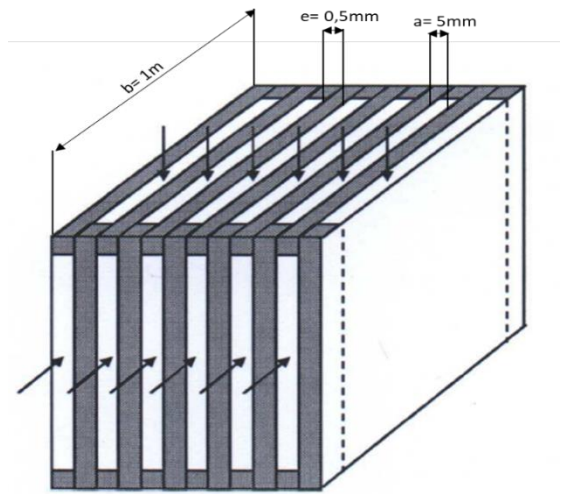


Figure 36: Les dimensions initiales de l'échangeur.

- b : Largeur de la plaque [m]
- e : Epaisseur de la plaque [m]
- a : Ecart entre 2 plaques [m]

Viscosité dynamique $\mu = 10^{-5}(0.0046 T + 1.7176)$ [Pa.s]

Nombre de Prandtl $Pr = -2.54 \times 10^{-4} T + 0.7147$

T	ρ	Cp	λ	μ	Pr
°C	kg/m ³	J/kg.K	W/m.K	Pa.s	
6	1,265	1008	0,0247	1,75E-05	0,71
22	1,197	1008	0,0259	1,82E-05	0,71

Etape2 : Calcul le nombre de Reynolds :

Il représente le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses, il est donné par :

$$Re = \frac{V \cdot D_h}{\nu} = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu}$$

Dans notre cas on a une conduite rectangulaire $\Rightarrow D_h = \frac{2ab}{a+b}$ (21)

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_h}{\mu} = \frac{Q \cdot \rho \cdot D_h}{(a \cdot b) \cdot \mu} = \frac{2 \cdot Q \cdot \rho}{(a + b) \cdot \mu}$$

- D_h : Le diamètre hydraulique [m]
- μ : Viscosité dynamique [Pa.s]
- ν : Viscosité cinématique [m²/s]
- ρ : La masse volumique [kg/m³]
- V : Vitesse d'écoulement [m/s]
- b : Largeur de la plaque [m]
- a : Ecart entre 2 plaques [m]
- Q : Débit volumique [m³/s]

On a un débit d'air d'extraction maximal de $14500 \text{ m}^3/\text{h} = 4,03 \text{ m}^3/\text{s}$

T	ρ	μ	Re
°C	kg/m ³	Pa.s	
6	1,265	1,75E-05	5,81E+05
22	1,197	1,82E-05	5,27E+05

Etape3 : Calcul le nombre de Nusselt :

On a les conditions d'un écoulement turbulent ($Re > 5 \cdot 10^5$ et $Pr \geq 0,5$), donc :

$$Nu = 0,035 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

T	Re	Pr	Nu
°C			
6	5,81E+05	0,71	1,28E+03
22	5,27E+05	0,71	1,18E+03

Etape4 : Calcul des coefficients d'échanges h_{c1} et h_{c2} : (22)

$$Nu = \frac{h_c \cdot b}{\lambda} \Rightarrow h_c = \frac{Nu \cdot \lambda}{b}$$

- h_c : Coefficient d'échange [W/m².K]
- b : Largeur de la plaque [m]
- λ : Conductivité thermique [W/m.K]

T	λ	Nu	hc
°C	W/m.K		W/m ² .K
6	0,0247	1,28E+03	31,15
22	0,0259	1,18E+03	30,53

Etape5 : Calcul des coefficients d'échanges global k :

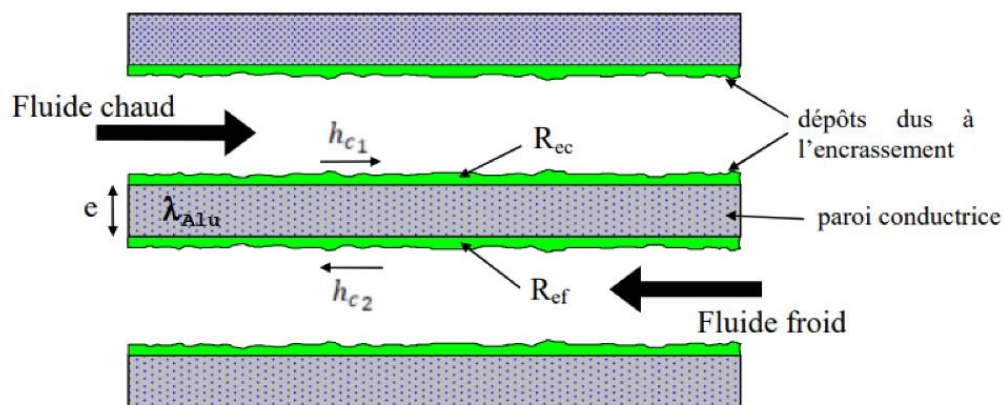


Figure 37 : Schéma de principe d'un échangeur de chaleur.

Si on suppose que les transferts de chaleur entre le fluide et la paroi, d'épaisseur e et de conductivité thermique λ , se font essentiellement par convection, K peut s'écrire de la manière suivante :

$$k = \frac{1}{\frac{1}{h_{c1}} + \frac{1}{h_{c2}} + \frac{e}{\lambda_{Alu}} + R_{ec} + R_{ef}}$$

- h_{c1} : Coefficient d'échange au niveau de fluide chaud [W/m².K]
- h_{c2} : Coefficient d'échange au niveau de fluide froid [W/m².K]
- R_{ec} : La résistance thermique d'encrassement au niveau de fluide chaud [$m^2 \cdot K/W$]
- R_{ef} : Les résistance thermique d'encrassement au niveau de fluide froid [$m^2 \cdot K/W$]
- e : Epaisseur de la plaque [m]
- λ_{Alu} : Conductivité thermique d'aluminium [W/m.k]

R_{ec} et R_{ef} : Les résistances thermiques d'encrassement dont les valeurs typiques dans notre cas :

$$R_{ec} = 6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot K/W \text{ et } R_{ef} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot K/W$$

$$R_{ec} + R_{ef} = (6 \cdot 10^{-4} + 4 \cdot 10^{-4}) = 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot K/W$$

$$k = 15,27 \text{ W/m}^2 \cdot K$$

Etape6 : Calcul de ΔT_{Lm} : (23)

Le ΔT_{Lm} (DTLM : Différence de Température Logarithmique Moyenne) est la moyenne logarithmique des pincements de température à chaque extrémité de l'échangeur.

$$\Delta T_{Lm} = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\log\left(\frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}\right)}$$

On prend le rendement $\eta=80\%$

$$T_4 = T_3 + (T_1 - T_2) * \eta = 6 + (22 - 14) * 0.8 = 12,4^\circ C$$

$$\text{Donc } \Delta T = T_4 - T_3 = 12,4 - 6 = 6,4K$$

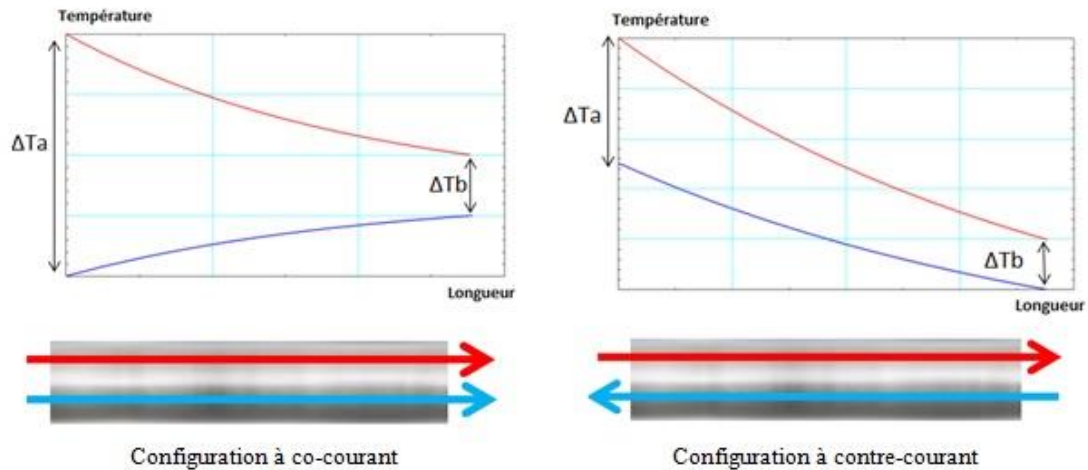


Figure 38 : DTLM pour les modes d'écoulement :co-courant et contre-courant.

Pour s'assurer de notre choix d'écoulement, on va déterminer la valeur du DTLM dans les deux cas de configuration de base d'écoulement des fluides (co-courant et contre-courant).

Co-courant :

$$\Delta T_{Lm} = \frac{(22 - 6) - (14 - 12,4)}{\log\left(\frac{22 - 6}{14 - 12,4}\right)} = 6,25 \text{ K}$$

Contre-courant :

$$\Delta T_{Lm} = \frac{(22 - 12,4) - (14 - 6)}{\log\left(\frac{22 - 12,4}{14 - 6}\right)} = 8,78 \text{ K}$$

Donc le flux contre-courant est le plus efficace (assure mieux le transfert de chaleur).

Etape7 : Calcul de puissance thermique :

$$\Phi = q_m * Cp * \Delta T$$

$$Q = \frac{q_m}{\rho} \Rightarrow q_m = \rho * Q$$

$$\Phi = \rho * Q * Cp * \Delta T$$

$$\Phi = 32875,81 \text{ W}$$

- Φ : Puissance thermique [W]
- q_m : Débit massique [kg/s]
- Cp : Chaleur massique [J/kg.K]
- ρ : La masse volumique [kg/m³]

- Q : Débit volumique [m^3/s]

Etape 8 : Calcul de surface d'échange :

Si T_c et T_f sont les températures des deux fluides (chaud et froid) de l'élément dS de la surface d'échange. Le flux thermique $d\Phi$ échangé entre les deux fluides à travers dS peut s'écrire :

$$d\Phi = k(T_c - T_f) dS$$

- k : Coefficients d'échange globale [$W/m^2.K$]

Le flux de chaleur $d\Phi$ transmis du fluide chaud au fluide froid à travers l'élément dS s'écrira, dans le cas de l'échangeur à courants parallèles :

$$d\Phi = -\dot{m}_c * Cp_c * dT_c = \dot{m}_f * Cp_f * dT_f$$

Tel que :

- " $-\dot{m}_c * Cp_c * dT_c$ " est le flux perdu par le fluide chaud.
- " $\dot{m}_f * Cp_f * dT_f$ " est le flux gagné par le fluide froid.

- \dot{m}_c et \dot{m}_f : Débits massiques des fluides chaud et froid [kg/s]
- Cp_c et Cp_f : Chaleurs massiques des fluides chaud et froid [$J/kg.^\circ C$]

$$\begin{aligned} \Rightarrow dT_c &= -\frac{d\Phi}{\dot{m}_c * Cp_c} \quad ; \quad dT_f = -\frac{d\Phi}{\dot{m}_f * Cp_f} \\ dT_c - dT_f &= d(T_c - T_f) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c * Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f * Cp_f}\right) d\Phi \\ \Rightarrow d(T_c - T_f) &= -\left(\frac{1}{\dot{m}_c * Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f * Cp_f}\right) * k(T_c - T_f) dS \\ \Rightarrow \frac{d(T_c - T_f)}{(T_c - T_f)} &= -\left(\frac{1}{\dot{m}_c * Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f * Cp_f}\right) * k dS \end{aligned}$$

Hypothèse : k = constant le long de l'échangeur ;

$$\Rightarrow [\log(T_c - T_f)]_{S=0}^S = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c * Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f * Cp_f}\right) * k S$$

• A l'entrée de l'échangeur ($x=0$) $T_c - T_f = T_{c_e} - T_{f_e}$

• À la sortie de l'échangeur ($x=L$) $T_c - T_f = T_{c_s} - T_{f_s}$

$$\Rightarrow \log\left(\frac{T_{c_s} - T_{f_s}}{T_{c_e} - T_{f_e}}\right) = -\left(\frac{1}{\dot{m}_c * Cp_c} + \frac{1}{\dot{m}_f * Cp_f}\right) * k S$$

Mais on peut également exprimer le flux total échangé en fonction des températures d'entrée et de sortie des fluides ; c'est faire le bilan enthalpique global de chaque fluide, ce qui s'écrit :

$$\begin{aligned}\Phi &= -\dot{m}_c * Cp_c * (T_{c_e} - T_{c_s}) = \dot{m}_f * Cp_f * (T_{f_s} - T_{f_e}) \\ \Rightarrow \log\left(\frac{(T_{c_s} - T_{f_s})}{(T_{c_e} - T_{f_e})}\right) &= -\left(\frac{T_{c_e} - T_{c_s}}{\Phi} + \frac{T_{f_s} - T_{f_e}}{\Phi}\right) * k S \\ &= -\left((T_{c_e} - T_{c_s}) + (T_{f_s} - T_{f_e})\right) * \frac{k S}{\Phi}\end{aligned}$$

Expression d'où on tire finalement la puissance thermique totale échangée, dans l'hypothèse d'une circulation à courants parallèles :

$$\Phi = \frac{(T_{c_e} - T_{c_s}) + (T_{f_s} - T_{f_e})}{\log\left(\frac{(T_{c_s} - T_{f_s})}{(T_{c_e} - T_{f_e})}\right)} * k * S$$

Soit $\Delta T_{Lm} = \frac{(T_{c_e} - T_{c_s}) + (T_{f_s} - T_{f_e})}{\log\left(\frac{(T_{c_s} - T_{f_s})}{(T_{c_e} - T_{f_e})}\right)}$: Différence de Température Logarithmique Moyenne [K].

Donc
$$\Phi = k * S * \Delta T_{Lm} \Rightarrow S = \frac{\Phi}{k * \Delta T_{Lm}} = 245,36 \text{ m}^2$$

Etape9 : Calcul de nombre de plaques :

On prend $S_{\text{plaque}} = 1,5 \text{ m}^2$

N.B : S_{plaque} n'est pas la dimension de toute la plaque, mais seulement la dimension du surface échange contre-courant dans notre plaque.

Ce mode d'écoulement est connu par **contre-courant croisé**.

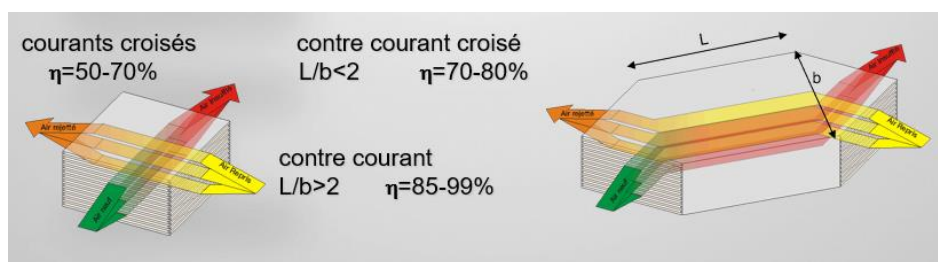


Figure 39: Les types de double flux avec leurs rendements. (24)

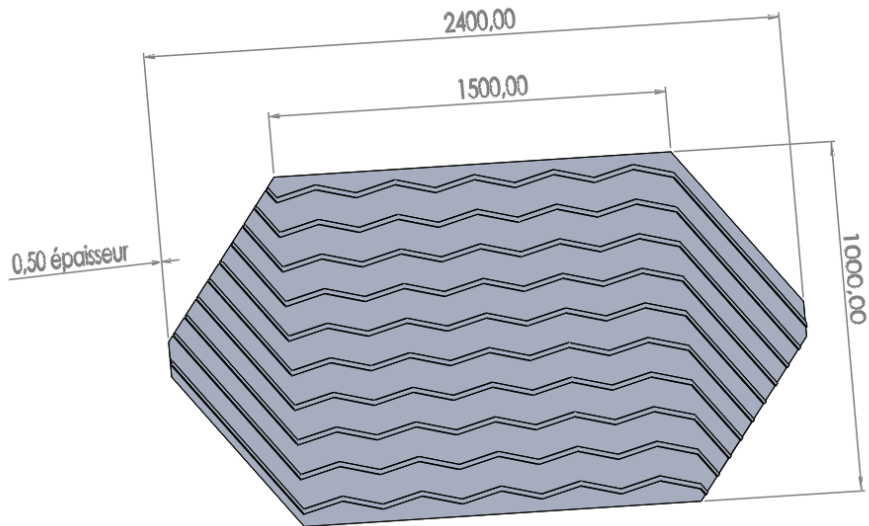


Figure 40 : Les dimensions de la plaque.

Donc
$$\text{Nbr_Plaques} = \frac{S}{S_{\text{Plaque}}} = 164,36 \sim 165 \text{ plaques}$$

Etape10 : Dimension final de notre échangeur :

On a la hauteur de l'échangeur $c = 165 \times (5 + 0,5) \times 10^{-3} = 0,904 \text{ m}$

Donc
$$\text{Dim_échangeur} = 2400 \times 1000 \times 904 \text{ mm}^3$$

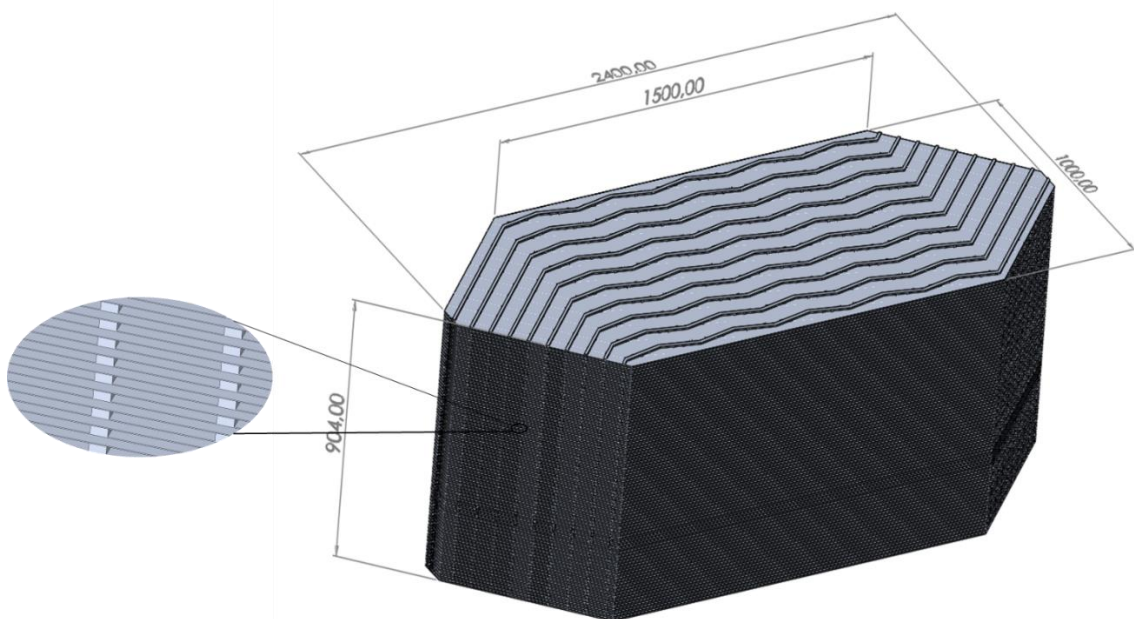


Figure 41 : Les dimensions de l'échangeur à plaque.

On peut clairement remarquer que les dimensions de notre échangeur sont relativement grandes. Pour cela on trouve la plupart des échangeurs avec des ailettes. L'ajout d'ailettes augmente la surface d'échange principale. (25)

III.3.2. Les ailettes :

L'ailette est un dispositif qui permet d'accentuer les échanges de chaleur.

Elles sont fréquemment utilisées pour le refroidissement.

Le coefficient de conductivité de l'air est inférieur d'environ 25 fois à celui de l'eau. Pour évacuer la même quantité de chaleur, il faut donc **augmenter** considérablement **la surface** métallique en contact avec le fluide de refroidissement. Technologiquement cela se traduit par l'utilisation d'ailettes. (26)

Ce type de refroidissement est utilisé dans les moteurs, en effet le critère est le fonctionnement du moteur dans toutes les situations et donc il vaut mieux utiliser l'air.

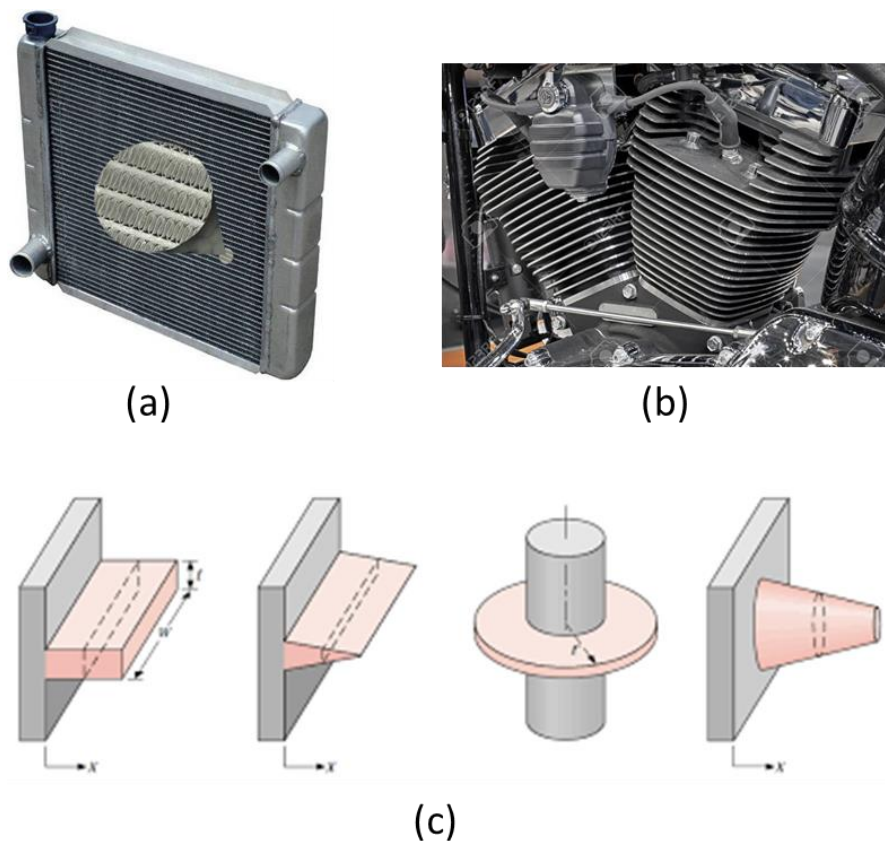


Figure 42 : Les ailettes d'échange de chaleur : (a) Radiateur d'automobile ; (b) Moteur refroidi par air ; (c) Les différentes géométries des ailettes.

III.3.3. Echangeur de chaleur à plaques avec les ailettes :

Ce type d'échangeur comporte des ailettes ondulées (le plus souvent de section triangulaire et rectangulaire) ou des entretoises prises en sandwich entre des plaques parallèles (appelées plaques ou plaques de séparation). Les plaques plates séparent les deux courants de fluide, et les ailettes forment les passages d'écoulement individuels. Des passages de fluide alternés sont reliés en parallèle par des collecteurs appropriés pour former les deux côtés de fluide ou plus de l'échangeur.

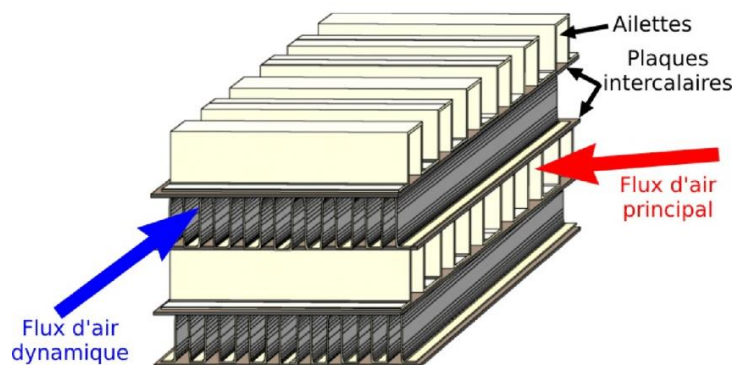


Figure 43 : Exemple d'échangeur thermique formé d'ailettes entre les plaques.

Les ailettes sont formées par moulage ou par laminage et sont fixées aux plaques par brasage, soudage, collage, soudage, ajustement mécanique ou extrusion. Des ailettes peuvent être utilisées des deux côtés dans des échangeurs de chaleur gaz-gaz. Dans les applications gaz-liquide, les ailettes ne sont généralement utilisées que du côté gaz ; s'ils sont utilisés du côté liquide, ils sont utilisés principalement pour la résistance structurale et le mélange de l'écoulement. Des ailettes sont également parfois utilisées pour le confinement de la pression et la rigidité.

Pour les applications de ventilation (c.-à-d., préchauffage ou pré-refroidissement de l'air entrant dans un bâtiment/pièce), l'échangeur plaque-ailette est fabriqué à l'aide de papier traité au Japon (hygroscopique) et à la limite de température de fonctionnement de 508°C.

Ainsi, les plaques et les ailettes sont faites à partir d'une variété de matériaux, de métaux, de céramiques et de papiers.

La sélection de la surface de l'ailette de chaque côté du fluide est totalement libre, comme l'exige la conception, en faisant varier la hauteur et la densité de l'ailette. L'épaisseur des ailettes communes est comprise entre 0,05 et 0,25 mm ; La hauteur des ailettes peut varier de 2 à 25 mm ; (25)

Les échangeurs à plaques et à ailettes sont fabriqués dans pratiquement toutes les formes et tailles et sont fabriqués à partir d'une variété de matériaux.

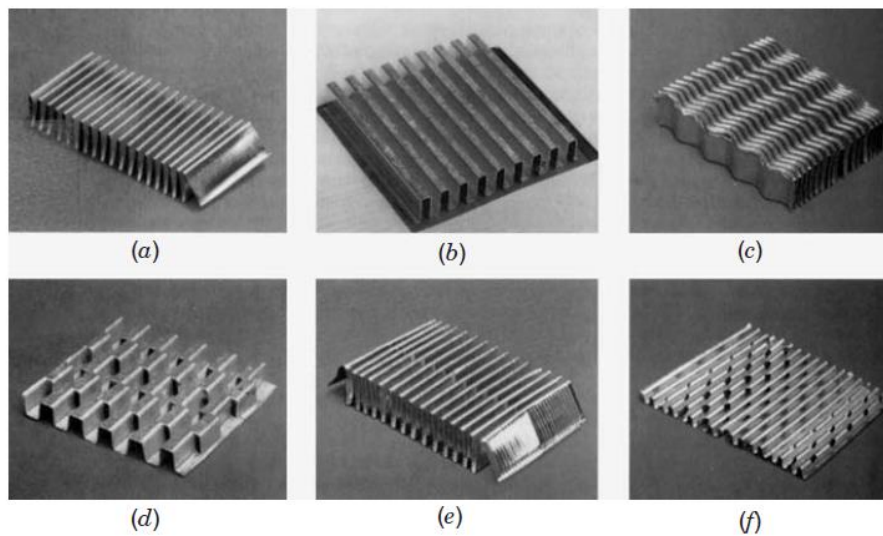


Figure 44 : Géométrie des ailettes ondulées pour échangeurs de chaleur à ailettes en plaques : (a) ailette triangulaire unie ; (b) ailette rectangulaire lisse ; (c) ailettes ondulées ; (d) ailette en bande décalée ; (e) ailette à volets multiples ; (f) ailette perforée.

Depuis les années 1910, les échangeurs à plaques et à ailettes sont fabriqués dans l'industrie automobile (tubes cuivre-ailettes en laiton), depuis les années 1940 dans l'industrie aérospatiale (à l'aide d'aluminium) et dans les applications de liquéfaction de gaz depuis les années 1950 à l'aide d'aluminium en raison des meilleures caractéristiques mécaniques de l'aluminium à basse température. Ils sont aujourd'hui largement utilisés dans les centrales électriques (turbine à gaz, vapeur, nucléaire, pile à combustible, etc.), les centrales propulsives (automobile, camion, avion, etc.), les systèmes à cycles thermodynamiques (pompe à chaleur, réfrigération, etc.), et dans les systèmes électroniques, cryogéniques, de liquéfaction de gaz, de climatisation et de récupération de chaleur résiduelle.

La compacité consiste à ajouter la surface étendue (ailettes) et à utiliser des ailettes avec la densité des ailettes (fréquence des ailettes, ailettes/m ou ailettes/in.) aussi élevée que possible sur un côté du fluide ou sur les deux côtés, en fonction des exigences de conception. L'ajout d'ailettes triangulaire en aluminium de 0,2 mm d'épaisseur et 5 mm de hauteur peut **augmenter** la surface de **5 fois** la surface principale en général. (25)

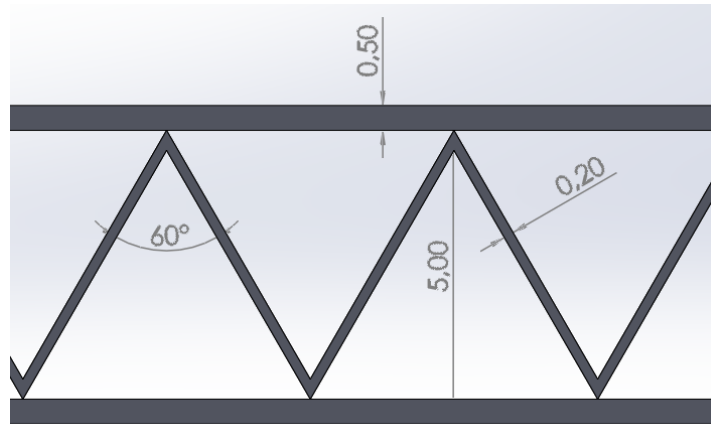


Figure 45 : Les dimensions des ailettes.

III.3.4. Dimensionnement d'échangeur de chaleur avec les ailettes :

On passe maintenant directement à les 3 dernières étapes de notre méthodologie de calcul, pour conclure la dimension finale de notre échangeur à plaques.

Étape8 : Calcul de surface d'échange :

$$S_{finale} = \frac{S}{5} = 49,07m^2$$

Étape9 : Calcul de nombre de plaques :

On prend $S_{plaque} = 0,49 m^2$ (0,7m x 0,7m)

N.B : S_{plaque} n'est pas la dimension de toute la plaque, mais seulement la dimension du surface décharge contre-courant dans notre plaque.

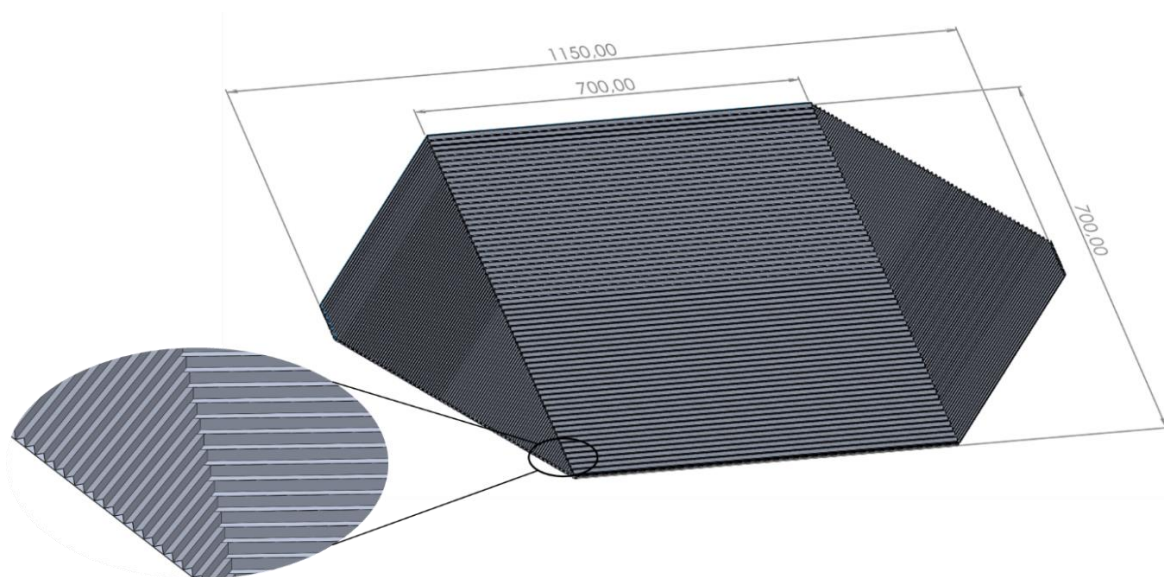


Figure 46 : Les dimensions finals de la plaque.

Donc
$$Nbr_Plaques = \frac{S_{finale}}{S_{Plaque}} = 100,15 \sim 101 \text{ plaques}$$

Etape10 : Dimension final de notre échangeur :

On a la hauteur de l'échangeur $c = 101 \times (5 + 0,5) \times 10^{-3} = 0,556 \text{ m}$

Donc $Dim_échangeur = 950 \times 500 \times 556 \text{ mm}^3$

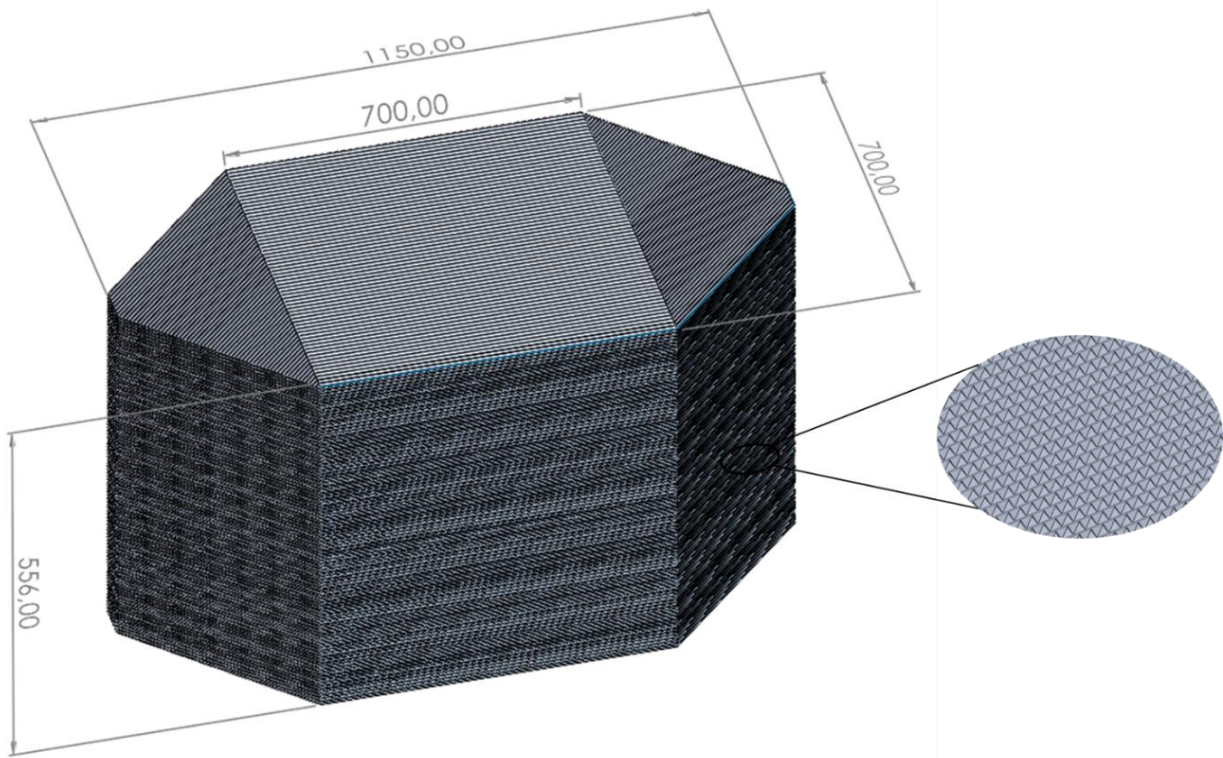


Figure 47 : Les dimensions finals de l'échangeur à plaque.

III.4. Conclusion :

On ajoute une coque à nos plaques pour protéger notre échangeur, on aura les dimensions finales de $(1170 \times 720 \times 576 \text{ mm}^3)$.

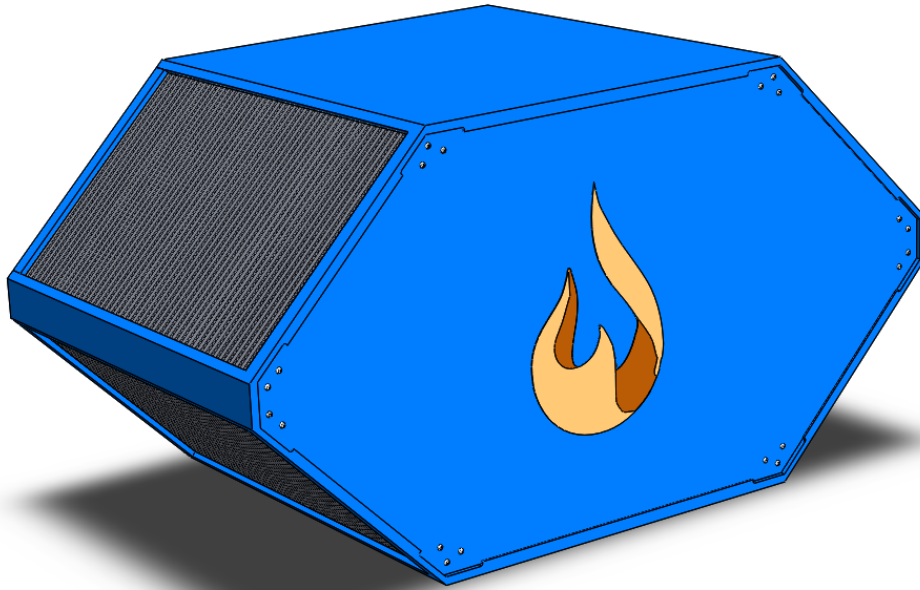
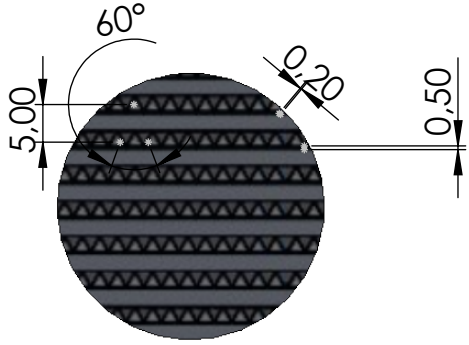
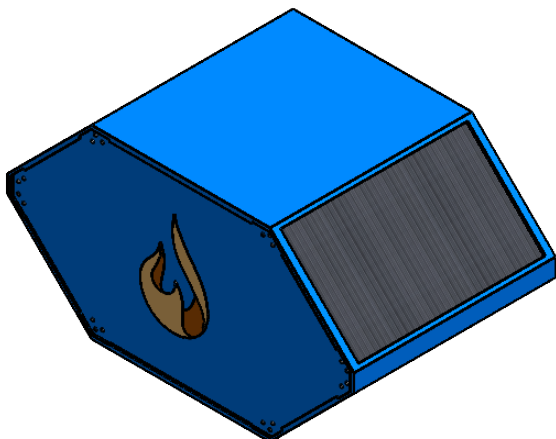
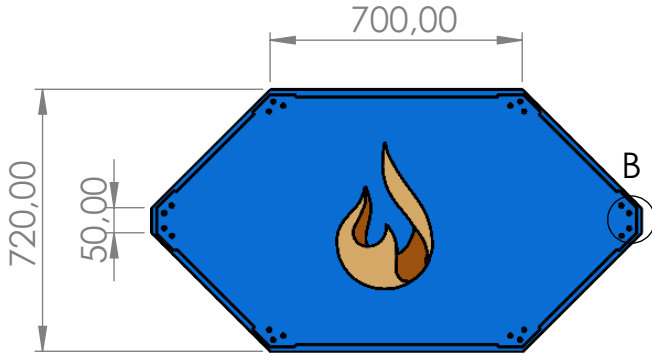
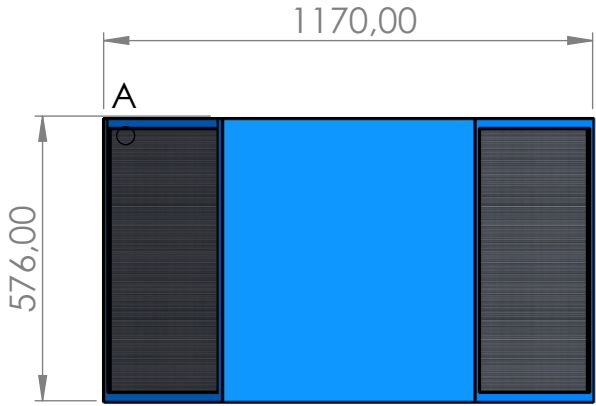


Figure 48 : Vue en perspective d'échangeur à plaques.

L'échangeur est maintenant avec une dimension convenable, mais le problème qui se pose est l'air extrait de la cabine n'est pas bien filtrer, et ça va causer la diminution d'efficacité de notre échangeur et l'endommager avec le temps. Pour cela il sera mieux d'améliorer le système de filtration de nos cabines.



DÉTAIL A
ECHELLE 1 : 1



DÉTAIL B
ECHELLE 1 : 3

Dessiné par :	FATHALLAH Hamza	
No. DE PLAN	Echangeur	
ECHELLE: 1:15	FEUILLE 1 SUR 1	A4



IV. Système de filtration :

IV.1. Introduction :

Il faut bien comprendre le fonctionnement de nos cabines de peinture et leurs systèmes de filtration, pour qu'on puisse détecter le problème.

IV.2. La cabine de peinture :

C'est une enceinte ouverte à ventilation horizontale.

Le peintre est placé à l'intérieur et dirige le jet de son pistolet vers la paroi arrière de la cabine, équipée d'un filtre sec et d'une ouverture d'aspiration de l'air pollué. La profondeur jusqu'au fond de la cabine et la distance jusqu'au sujet à peindre est suffisantes pour que l'aérosol de peinture ne ressorte pas de l'enceinte ventilée.

Les objets à peindre sont placés à une hauteur telle que l'ouverture d'aspiration soit dans la zone du jet de pulvérisation afin d'éviter que l'aérosol en excès ne ressorte de la cabine.



Figure 49: La cabine de peinture.

Les mesures de vitesse d'air sont effectuées dans la cabine vide. La moyenne des mesures de vitesse doit être supérieure ou égale à 0,5 m/s avec aucune vitesse inférieure à 0,4 m/s. L'efficacité de la ventilation dépend de la vitesse de l'air, de l'homogénéité du flux d'air et du débit en m³/s. (27)

Nos cabines sont de surface 2,5 x 3 m², et en utilisant les ventilateurs de débit 4,03 m³/s, en aura une vitesse maximale de 0,537 m/s pour chaque cabine.

On mesure la vitesse d'extraction d'air dans les cabines chaque jour en utilisant un **anémomètre**.

L'**anémomètre** est un appareil de mesure utilisé pour mesurer la vitesse du vent, des gaz et du débit d'air. Il vous permet également de mesurer de nombreux autres paramètres supplémentaires tels que la température et la pression. (28)



Figure 50 : (a) Anémomètre à hélice ;
(b) Anémomètre à résistance thermique.

Il existe 2 types d'anémomètre : Anémomètre à hélice et Anémomètre à résistance thermique.

A Zenith fonderie, on utilise l'anémomètre à hélice pour mesurer les vitesses d'extraction d'air dans les cabines.



Figure 51 : l'anémomètre utilisé.

La mesure des vitesses d'air sont effectuées autant que possible dans une portion de gaine rectiligne aussi loin que possible d'un obstacle ou changement de direction. La mesure des vitesses nécessite un important quadrillage de la section de la gaine car la répartition des vitesses n'est pas homogène.

$V = 0.41 \text{ m/s}$	$V = 0.51 \text{ m/s}$	$V = 0.43 \text{ m/s}$
$V = 0.45 \text{ m/s}$	$V = 0.53 \text{ m/s}$	$V = 0.47 \text{ m/s}$

Figure 52 : Le quadrillage de la cabine avec exemple des mesures.

L'anémomètre ne nous donne jamais une valeur fixe. C'est pour cela on prend le max et le min dans chaque partie et on calcule le moyen.

2699	23/03/2022	CABINE 1			CABINE 2			CABINE 3		
2700		0,6	0,41	0,75	0,43	0,53	0,62	0,56	0,52	0,58
2701		0,51	0,18	0,62	0,35	0,44	0,46	0,45	0,37	0,37
2702		0,7	0,58	0,71	0,5	0,45	0,51	0,59	0,56	0,52
2703		0,52	0,29	0,62	0,38	0,25	0,23	0,51	0,48	0,31
2704										
2705	24/03/2022	CABINE 1			CABINE 2			CABINE 3		
2706		0,64	0,44	0,76	0,44	0,5	0,41	0,66	0,62	0,51
2707		0,43	0,23	0,51	0,26	0,37	0,35	0,59	0,46	0,35
2708		0,6	0,53	0,48	0,34	0,44	0,44	0,53	0,53	0,64
2709		0,46	0,43	0,26	0,16	0,34	0,2	0,39	0,46	0,43
2710										
2711	25/03/2022	CABINE 1			CABINE 2			CABINE 3		
2712		0,42	0,32	0,71	0,41	0,53	0,54	0,58	0,59	0,42
2713		0,21	0,17	0,59	0,33	0,42	0,31	0,43	0,46	0,29
2714		0,48	0,51	0,57	0,49	0,55	0,51	0,52	0,6	0,59
2715		0,37	0,38	0,42	0,41	0,3	0,37	0,38	0,39	0,44
2716										

Figure 53 : Exemples des mesures de vitesse en m/s pendant 3 jours.

IV.3. Le système de filtration de la cabine :

Il existe trois systèmes de filtration d'air pollué : rideaux liquides, filtres secs, claires-voies. Ces dispositifs sont sans efficacité sur le captage des vapeurs de solvants. (27)

Rideaux d'eau

Une nappe d'eau coule le long d'un plan vertical ou légèrement incliné. Une pompe ou la poussée de l'air aspiré assure la remontée de l'eau et le recyclage. Derrière le rideau d'eau, il peut y avoir un laveur où l'eau est pulvérisée pour débarrasser l'air pollué des particules solides qui vont se décanter dans un ou plusieurs bacs situés en partie basse. La réduction des risques d'incendie, l'efficacité de la rétention des constituants solides des peintures et le maintien dans le temps des caractéristiques de la ventilation initiale conduisent à recommander ce genre d'épuration.

Filtres secs

Les filtres secs sont utilisés dans les cabines ouvertes et fermées. La plupart du temps, ils sont constitués de matériaux en fibres non tissées de réaction au feu : non inflammable. Ces matériels peuvent présenter une assez bonne efficacité lorsqu'ils sont neufs, mais ils se colmatent progressivement. Ils perdent alors leur efficacité et deviennent une source d'incendie. Leur nettoyage n'étant pas possible, il est nécessaire de les remplacer périodiquement. L'utilisation de filtres secs est contre-indiquée dans les cabines où l'on met en œuvre des peintures ou vernis nitrocellulosiques en raison de la propension du filtre encrassé à s'enflammer.

Pour connaître l'état d'encrassement des filtres, il faut installer un appareil de contrôle permettant de déterminer le moment où le filtre doit être changé, afin de respecter les conditions de ventilation minimales des cabines définies précédemment. Cet appareil de contrôle peut être par exemple un indicateur de pression différentielle ou la mesure de la durée d'utilisation.

Claire-voie

Les systèmes de traitement par claire-voie de l'air pollué sont déconseillés et doivent être réservés à des opérations occasionnelles.

En effet, les claires-voies sont constituées d'un assemblage de tôles métalliques sur lesquelles l'aérosol en excès se trouve projeté. Une partie des rejets n'est pas retenue et se dépose plus loin, dans la gaine d'extraction, sur les pales du ventilateur, et est évacuée dans l'atmosphère extérieure, ce qui contribue à la pollution de l'environnement. De plus, l'encrassement des tôles du double fond et des gaines est rapide. L'efficacité initiale de l'aspiration diminue vite si un nettoyage fréquent n'est pas effectué, et l'accumulation des vieilles peintures constitue un risque d'incendie dans toute la gaine encrassée.

Cette cabine adopte le système à **filtration à sec**. En utilisant 3 filtres (Filtre choc, Filtre plissé et Filtre à poche).

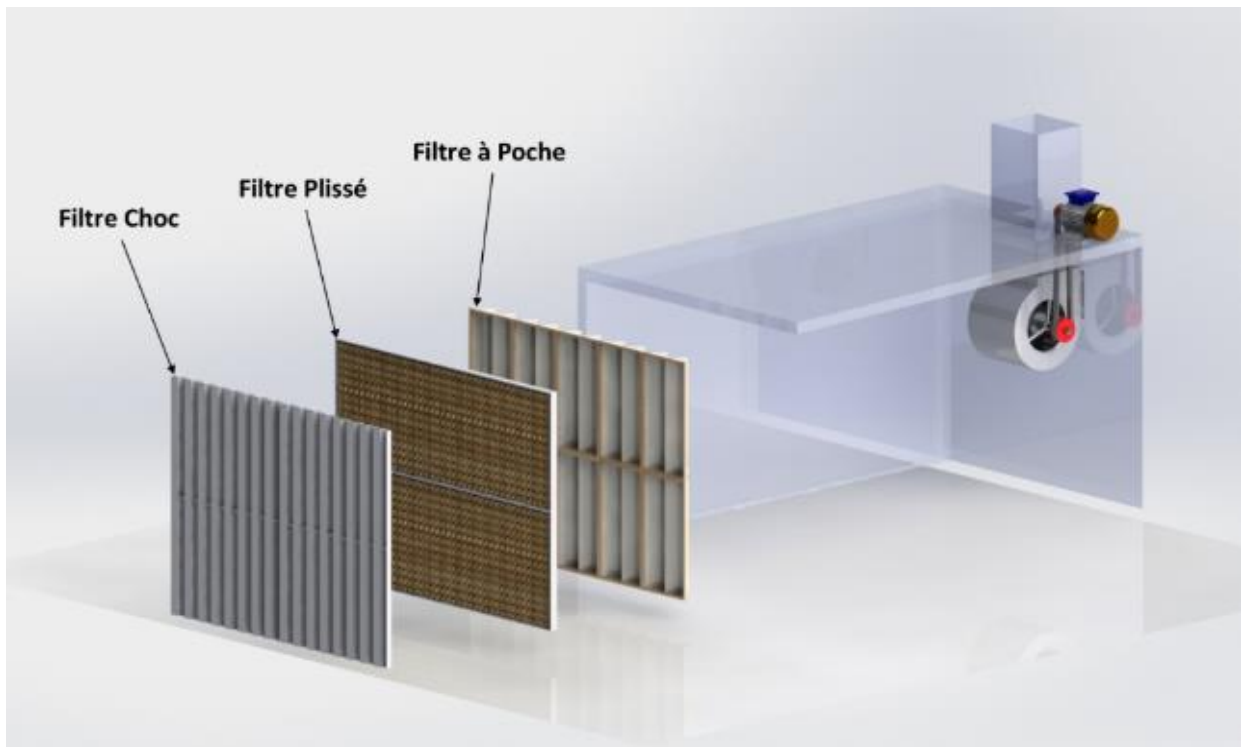


Figure 54: Le système de filtration de la cabine.

IV.3.1. Filtre choc :

Le filtre à choc est généralement utilisé pour effectuer une préfiltration et protéger les autres filtres. Il est facile à nettoyer.



Figure 55 : Filtre choc métallique.

IV.3.2. Filtre plissé :

Le type de filtre utilisé pour nos cabines de peinture est PROCART H. Il est conçu spécialement pour collecter toutes les particules dans l'air provenant de tous types de poussières et de peintures y compris poudre, vernis, laques... Il s'agit d'une combinaison de PROCART et d'une couche finale en polyester non tissé 50g/m² permettant de conjuguer une grande capacité de rétention avec une finesse de filtration très importante. (29)

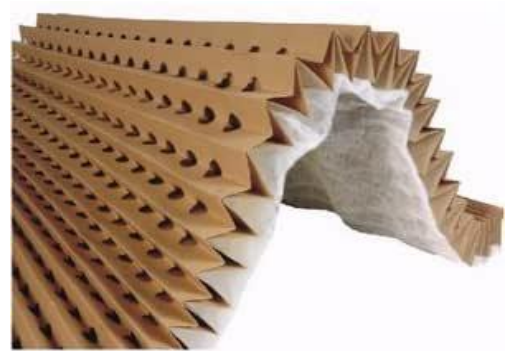


Figure 56 : Filtre PROCART H.

Avantages :

- **Double filtration :** Le PROCART H assure une excellente filtration. Selon les qualités de peinture, l'efficacité atteint 98,2 %. Grâce au polyester non tissé ajouté au filtre carton, la finesse de filtration est beaucoup plus élevée que sur les autres types de filtre car la peinture reste en surface du non tissé.

- **Bonne capacité de charge** : Contrairement aux filtres classiques, il augmente d'efficacité au fur et à mesure qu'il se charge ; selon les qualités de peinture, l'efficacité atteint 98,2 % (extraits secs).
- **Constance du flux d'air** : Avec le filtre PROCART H, l'installation de peinture est protégée car le filtre maintient une vitesse d'air constante et régulière jusqu'à saturation du filtre.
- **Rigidité** : Le design de la forme des plis procure au filtre PROCART H une très bonne rigidité.
- **Fabrication régulière et homogène** : La fabrication des filtres PROCART H est entièrement automatisée. Ceci rend impossible les risques de décalage de plis ou de pastilles encore fixées au carton.
- **Economique et performant** : Grâce à ses plis en accordéon et à sa couche supérieure en polyester, les over sprays sont extrêmement retenus, ainsi le nettoyage de la cabine se fait très facilement.
- **Ecologique** : Tous les surplus de peinture sont stockés dans le filtre et ne sont à aucun moment rejetés dans l'environnement car la forme en V du filtre empêche l'over spray de rebondir et de sortir du filtre.
- **Facilité de stockage** : Quel que soit la hauteur du filtre, la surface par boîte est la même pour chaque type de filtre.
- **Facilité d'utilisation** : L'installation et le remplacement du filtre sont simples. Aucun grillage de soutien n'est nécessaire, par conséquent, l'accès à la chambre d'extraction est libre. Une barre de maintien au milieu peut être installée.

IV.3.3. Filtre à Poche :

Le type de filtre utilisé pour nos cabines de peinture est PROKRAFT 8c avec un polyester non tissé ajouté au filtre. Ce filtre est fait de forme des poches (des plis) pour augmenter la surface de filtration.

Les PROKRAFT 6c et 8c sont composés de 6 et 8 couches de papier Kraft, permettant de retenir les particules fines dans l'air ou provenant de tous types de peinture solvantés et hydro (poudres, vernis, eau, laques...). Ces résidus doivent être non seulement aspirés mais aussi retenus. Grâce à ses nombreuses couches PROKRAFT 6c et 8c, utilisant le principe de filtre choc, offrent une grande capacité de rétention et une finesse de filtration extrêmement importante. (30)



Figure 57 : Filtre à poche utilisé.

Avantages :

- **Efficacité de masse :** Grâce à leurs 8 couches de papier kraft, le filtre PROKRAFT 8c offre une excellente filtration. Ces filtres sont efficaces dans toutes les situations, ils s'adaptent aux cas de pulvérisations multiples.
- **Finesse de filtration :** S'il s'agit de produits hydrosolubles ou de peintures et laques thermodurcissables, l'efficacité de filtration est égale à 96% ; la filtration est aussi très efficace en ce qui concerne les apprêts primaires soit 90%. Le PROKRAFT 8c permet de capturer les particules les plus fines qui seraient passées outre les premières couches de papier kraft.
- **Perte de charge et débit d'air constants :** Le design et la composition de PROKRAFT 8c permet de maintenir une faible perte de charge (et débit) quel que soit le degré d'encrassement du filtre. Ce PROKRAFT n'est que très peu résistant à l'air et laisse celui-ci circuler librement.
- **Ecologique :** Les filtres PROKRAFT sont élaborés à base de produits naturels et biodégradables uniquement. Grâce à leur haute efficacité et capacité de charge, les surplus de peintures ne sont pas rejetés dans l'atmosphère.

- **Facilité d'utilisation** : Le montage/ démontage ainsi que l'entretien de ce type de filtre sont très simples à réaliser.

IV.4. Amélioration sur le système de filtration :

IV.4.1. Description du problème :

On trouve un problème au niveau d'étanchéité. Donc la méthode de collage ou la méthode d'utilisation n'est pas parfaite.

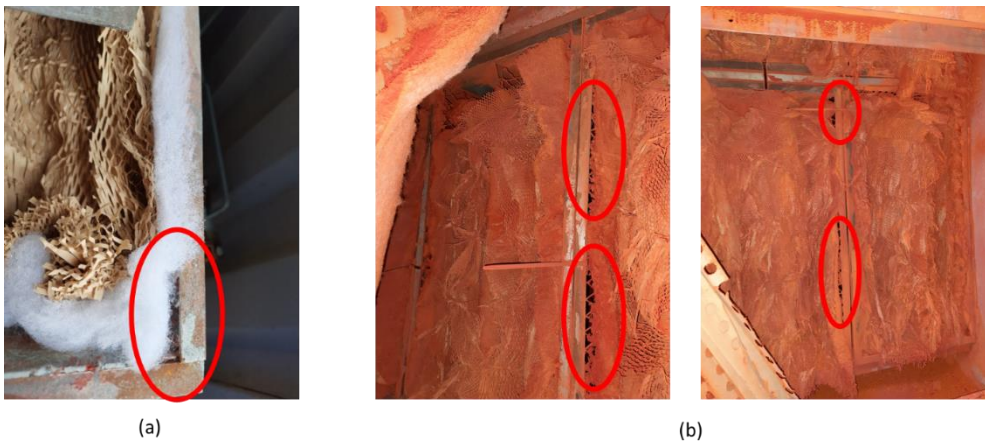


Figure 58 : Problème d'étanchéité : (a) avant l'utilisation ; (b) en cours d'utilisation.

On a essayé de trouver une solution pour assurer l'étanchéité de notre filtre.

IV.4.2. La conception des filtres :

Changement de la géométrie du filtre en polyester, de tel sort qu'il occupe toute la surface pour assurer l'étanchéité.

Etape 1 : Dimensionnement de la cage de filtre :

On prend les caractéristiques du cage pour déterminer la forme et les dimensions de filtre polyester.

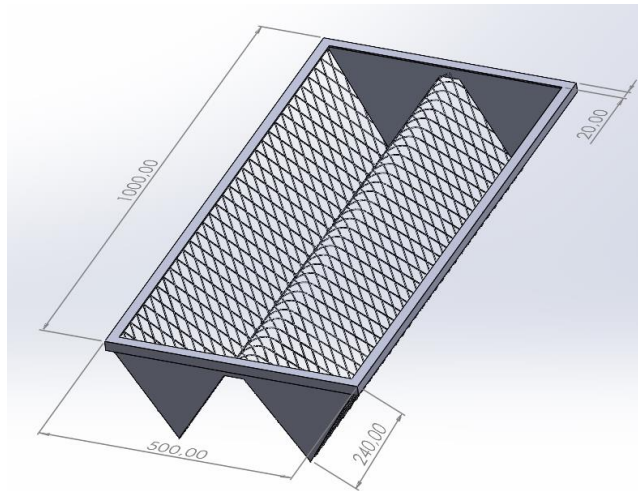


Figure 59 : Les dimensions de la cage.

Etape 2 : Conclure le dimensionnement de filtre polyester :

Afin de construire la forme des poches, on réalise dans le plan son patron. Pour cela on dessine « à plat » chaque face.

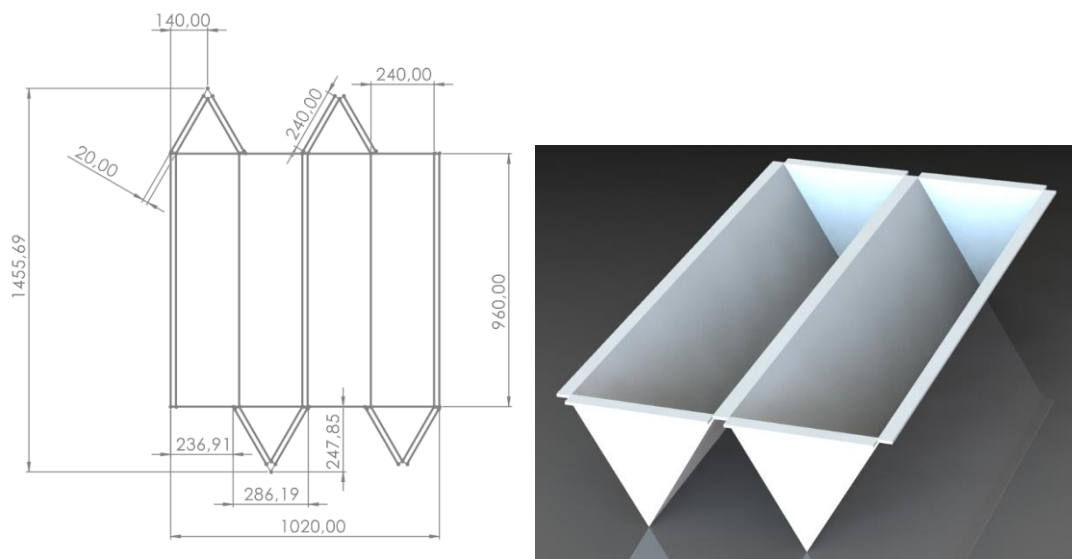


Figure 60 : La deuxième étape du dimensionnement de filtre polyester.

Etape 3 : Construire un gabarit :

En utilisant un roulant de carton disponible, on construit un gabarit pour l'utiliser de manière répétitive pour créer la même structure.



Figure 61 : La troisième étape du dimensionnement de filtre polyester.

Etape 4 : Le découpe du polyester :

En utilisant le gabarit construit, on découpe notre filtre en polyester.



Figure 62 : La quatrième étape du dimensionnement de filtre polyester.

Etape 5 : Collage du polyester et l'assemblage de l'ensemble :

On plie en fonction de toutes les lignes de notre forme et on colle les rebords à l'endroit correspondant. Après on positionne le polyester construit dans la cage, et on le fixe en utilisant la même colle.



Figure 63 : La quatrième étape du dimensionnement de filtre polyester.

Etape 6 : la découpe du filtre PROKRAFT 8c (La 2ème couche de notre filtre à poche) :

On découpe le PROKRAFT 8c pour s'adapter à notre cage.



Figure 64 : La cinquième étape du dimensionnement de filtre polyester.

Etape 7 : Montage finale du filtre à poche :

On colle le filtre PROKRAFT 8c. Et voilà, notre filtre est prêt.



Figure 65 : La sixième étape du dimensionnement de filtre polyester.

On peut clairement remarquer que même la méthode de fixation des filtres dans la cage (le collage) à plusieurs inconvénients :

- La nécessité de beaucoup de temps et d'efforts pour bien fixer les filtres dans la cage.
- La perte d'une quantité importante de la colle.
- La difficulté de nettoyage de la cage pour l'utiliser à nouveau.

Donc il faut mieux penser à une autre conception de la cage pour éviter ces inconvénients.

IV.4.2. La conception de la cage :

Etape 1 :

On prend notre cage, et on va essayer d'ajouter des améliorations pour éviter les inconvénients déjà citer.



Figure 66 : La première étape de la conception de la cage.

Etape 2 :

On utilise un fer plat soudé sous forme rectangulaire pour fixer nos filtres

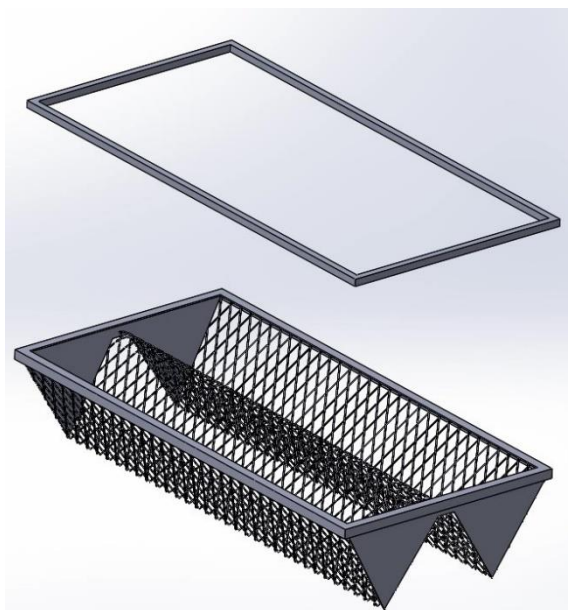


Figure 67 : La deuxième étape de la conception de la cage.

Etape 3 :

On remplace le fer corner type L dans le cadre par un corner type T (pour avoir une structure qui facilite le dépôt du fer plat dans sa position).

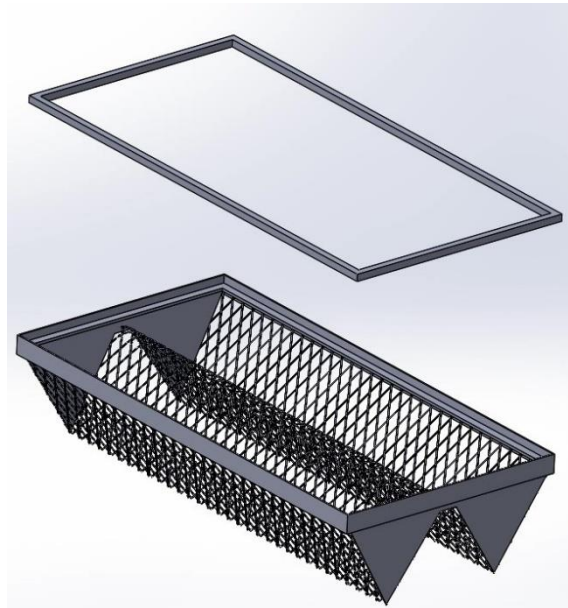


Figure 68 : La troisième étape de la conception de la cage.

Etape 4 :

Pour garder la forme de nos poches même pendant l'utilisation on a ajouté des fers ronds.

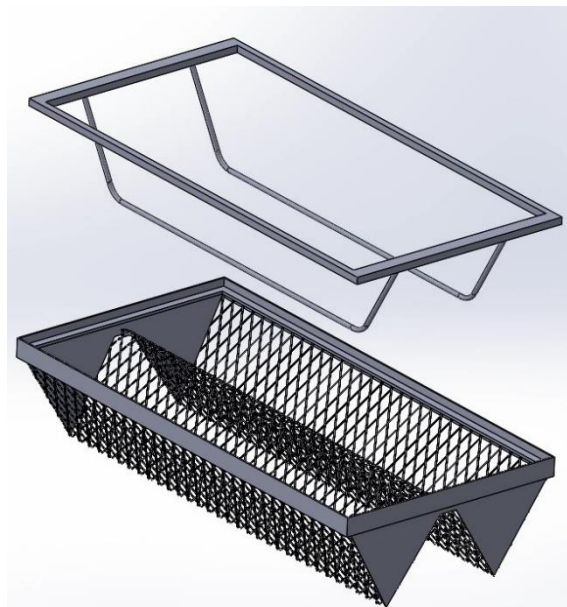


Figure 69 : La quatrième étape de la conception de la cage.

Etape 5 :

On utilise le rivetage pour la fixation.

C'est la solution la plus pratique et la plus économique. Si on utilise des vis ou des boulons, on aura besoin de les nettoyer pour démonter notre cage. Et la difficulté du nettoyage parfait empêche la réutilisation des vis ou des boulons.

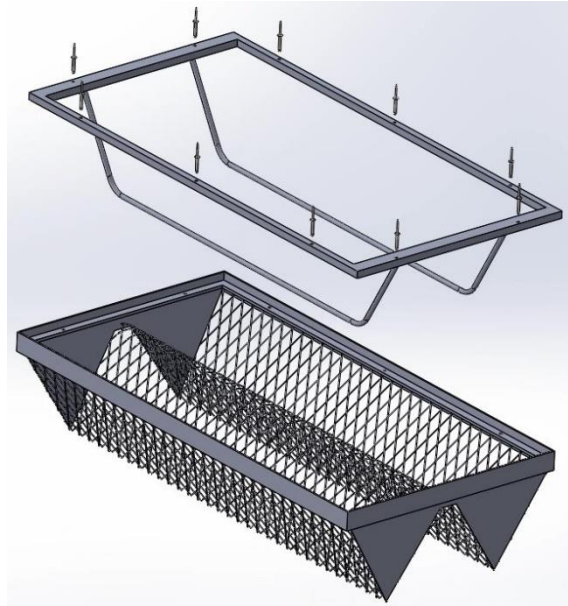


Figure 70 : La cinquième étape de la conception de la cage.

Et voilà. Notre cage est prête.

IV.5. Conclusion :

En utilisant cette cage on assure plus d'étanchéité, et le changement de notre filtre à poche demande moins de temps et d'effort, et même plus économique.

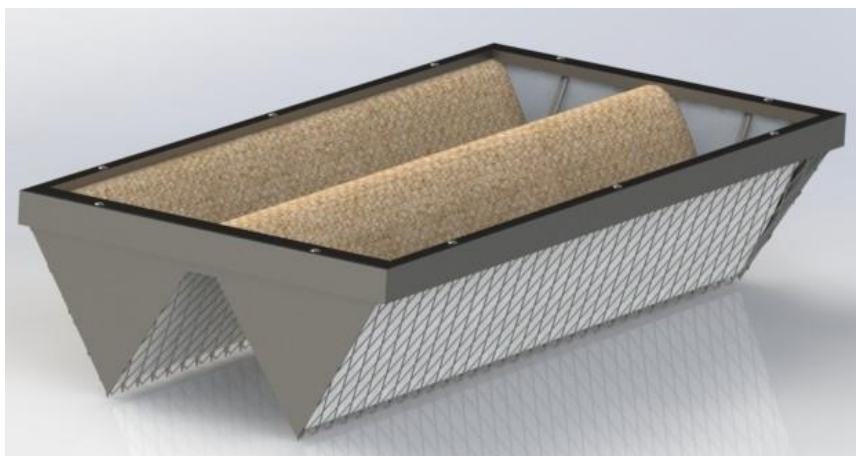


Figure 71 : Vue en perspective du filtre à poche.

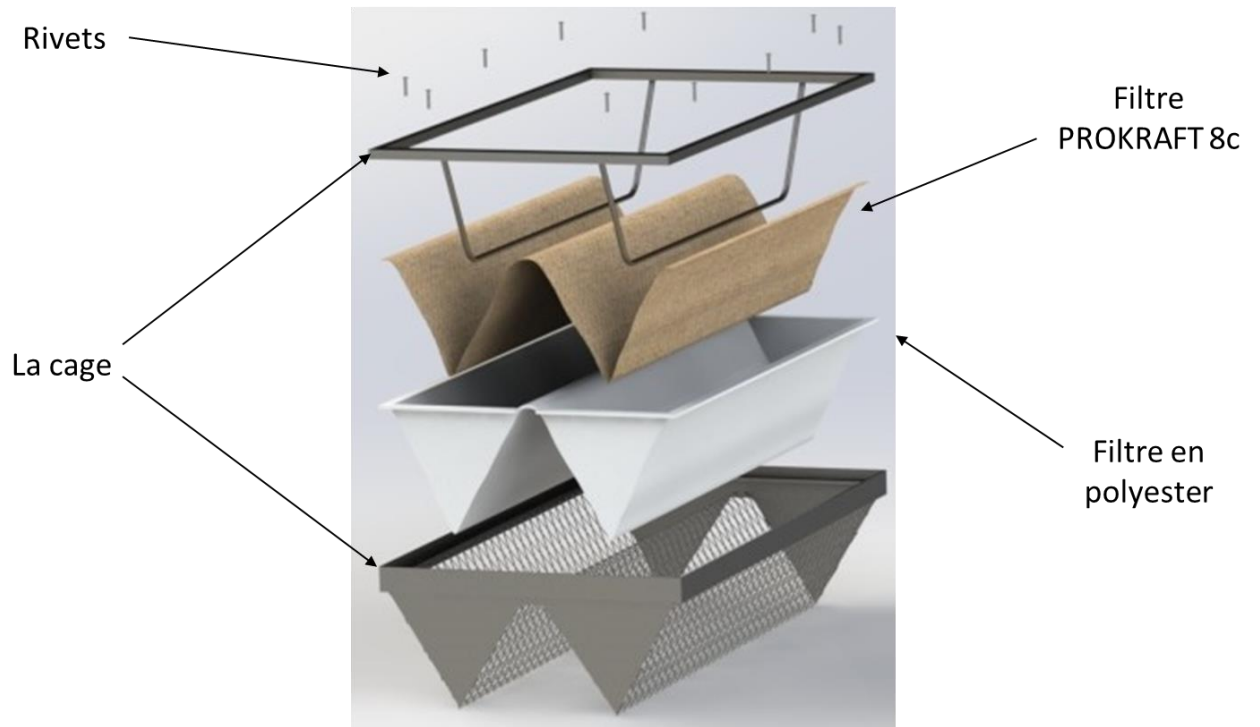


Figure 72 : Vue en perspective éclatée du filtre à poche.

4

3

2

1

F

F

E

E

D

D

C

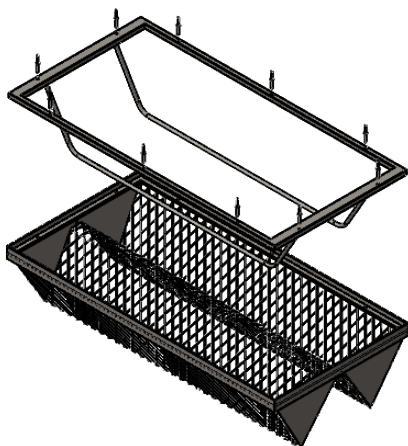
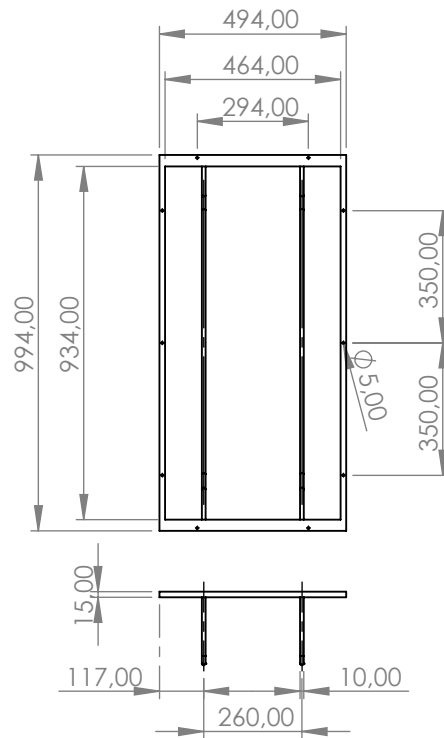
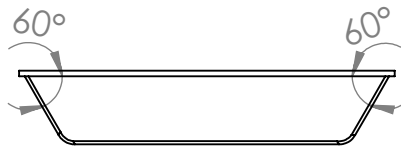
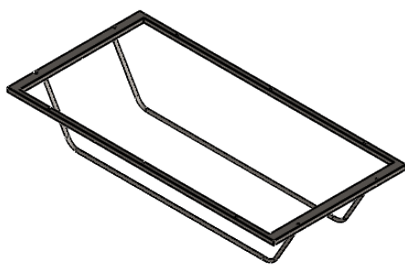
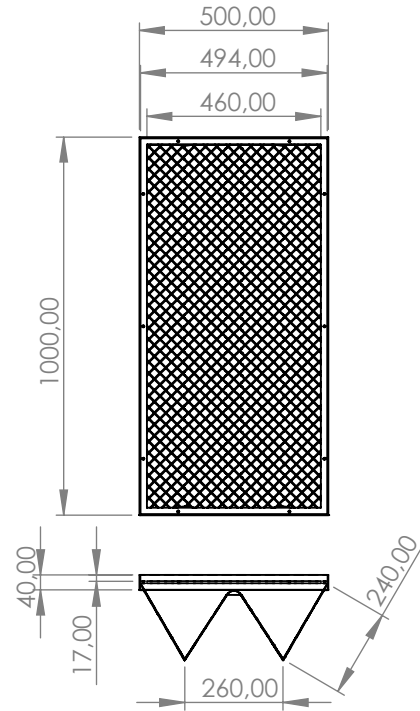
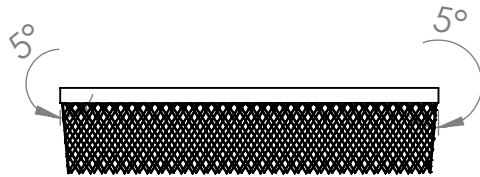
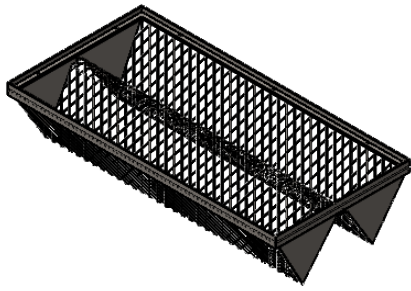
C

B

B

A

A



Dessiné par : FATHALLAH Hamza	
No. DE PLAN	
Cage F.à poche	
ECHELLE: 1:20	FEUILLE 1 SUR 1
A4	

4

3

2

1

V. Dimensionnement du CTA et canalisation :

V.1. Introduction :

Une centrale de traitement d'air est un élément technique dédié au chauffage au rafraîchissement, à l'humidification ou à la déshumidification des locaux tertiaires ou industriels, c'est un système tout air à débit constant ou variable. (31)

La CTA est un système est préconisé pour des grands espaces tels que supermarchés, hôpitaux, entreprises, salles blanches, dans lesquels on veut maintenir de très bonnes conditions de température, été comme hiver.



Figure 73 : Centrale de traitement d'air.

V.2. Les types du CTA :

Il existe deux types de centrales de traitement d'air : (32)

- La CTA simple flux, elle est soit tout air neuf, soit tout air repris ou encore en mélange des deux flux
- La CTA double flux, elle permet toutes les combinaisons possibles entre la reprise d'air, l'air neuf, l'air rejeté, l'air traité suivant la configuration.

V.2.1. CTA simple flux :

La Centrale de Traitement d'air simple flux ne traite **qu'un seul flux d'air** (en extraction d'air vicié, en recyclage ou en soufflage d'air neuf).

Sa fonction : prendre l'air extérieur, lui faire subir un traitement (le chauffer ou le refroidir, le purifier) et l'insuffler via le réseau de gaines aérauliques dans les locaux.

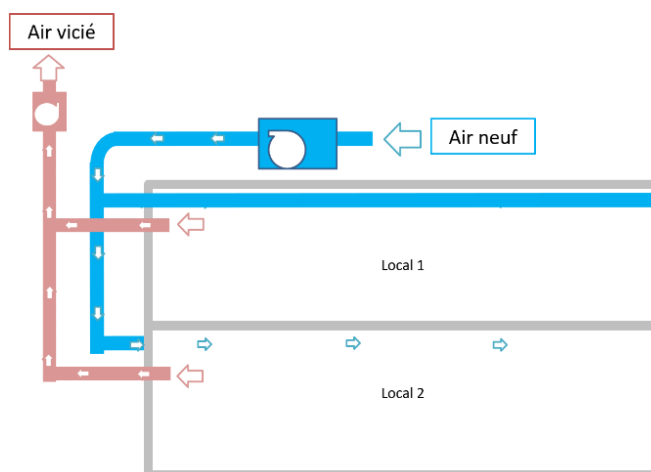


Figure 74 : Fonctionnement du CTA simple flux.

La CTA simple-flux est composée de modules de ventilation, de modules de batteries électriques (ou autre énergie) de chauffe et de refroidissement, d'une section de filtration, permettant de :

- Ventiler par l'introduction d'air neuf et d'extraire l'air vicié,
- Filtrer l'air, et de le purifier à l'aide de lampe UV,
- Rafraîchir par soufflage d'air froid et/ou de chauffer par soufflage d'air chaud,
- Humidifier par vaporisation d'eau et/OU de déshumidifier par condensation de la vapeur d'eau

L'air traité sera ensuite diffusé dans les locaux desservis grâce à des réseaux de conduits de gaines.

V.2.2. CTA double flux :

La Centrale de Traitement d'air **double flux** traite à la fois **l'extraction et le soufflage** et qui permet toutes les combinaisons possibles entre les 2 flux d'air.

Sa fonction : Même fonction que la CTA simple flux avec Reprise de l'air dans les pièces nécessitant une extraction d'air et expulsion hors du bâtiment.

N.B : CTA double flux est le type de CTA utiliser pour les échangeurs à chaleur.

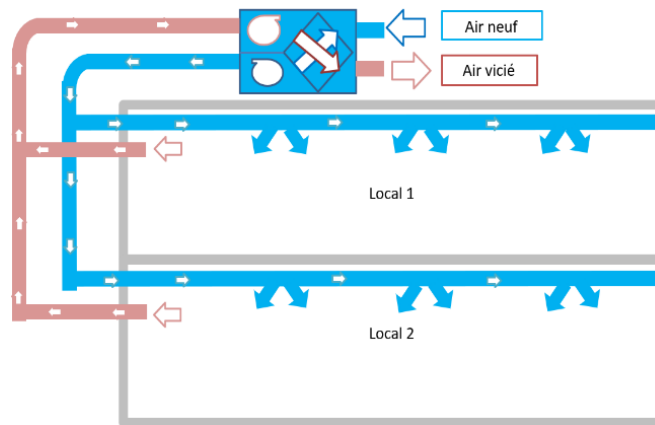


Figure 75 : Fonctionnement du CTA double flux.

La CTA double flux permet d'effectuer les mêmes tâches que la CTA simple flux, mais dispose de caissons d'échange, qui permettent de récupérer des calories, en utilisant la chaleur de l'air repris pour réchauffer l'air entrant.

La CTA double flux est installée dans les locaux avec du personnel (salle de réunion, accueil, espace ouvert...) tandis que le simple flux est installé dans les lieux de stockage, sanitaires, local à pollution spécifiques.

V.3. Les composants du CTA :

Les principaux composants que l'on peut retrouver dans le groupe de ventilation ou le caisson de traitement d'air sont les suivant :

- Les moteurs et entraînements
- Les filtres
- Le récupérateur de chaleur

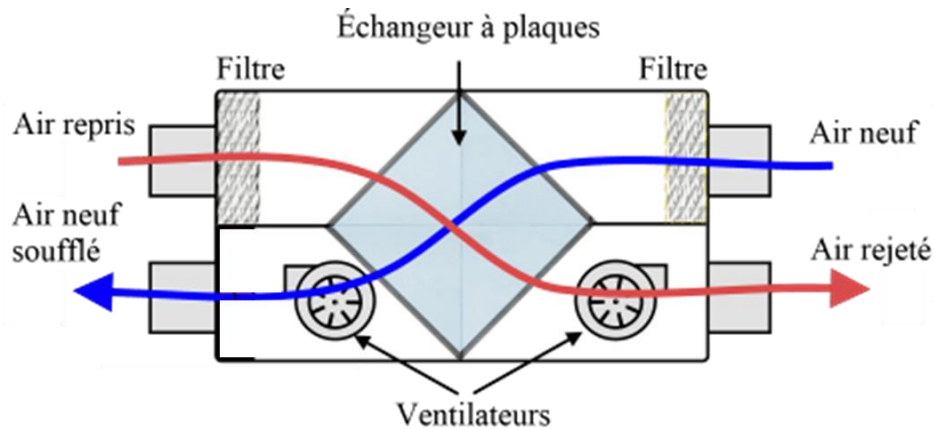


Figure 76 : Les composants du CTA.

V.3.1. Les ventilateurs :

Un ventilateur est composé d'un moteur électrique entraînant une turbine ou une hélice. L'énergie cinétique fournie par le moteur électrique à la turbine ou à l'hélice permet le déplacement de l'air directement dans une pièce ou à travers une gaine. (33)

Les ventilateurs axiaux ou hélicoïdes :

Les **ventilateurs axiaux** sont également appelés **ventilateurs hélicoïdes**.

La spécificité de ces ventilateurs est qu'ils aspirent et refoulent l'air dans l'axe à **180°** axialement. L'air est ainsi aspiré et propulsé parallèlement à l'axe de rotation du **ventilateur**. Ils ne génèrent pas de pressions trop importantes, mais peuvent en revanche fournir de **très forts débits d'air**.

Les ventilateurs axiaux peuvent atteindre des rendements très élevés. L'implantation de ce type de **ventilateur** dans certains process industriels peut être limitée si la perte de charge du circuit est élevée. De plus les **ventilateurs axiaux** sont plus « sensibles » aux conditions d'alimentation en **air**, que les **ventilateurs radiaux** par exemple. (34)



Figure 77 : Ventilateur

Les ventilateur centrifuges :

Le **ventilateur centrifuge** (concept proche de celui de la pompe centrifuge) est un dispositif mécanique dans lequel l'air entre dans le ventilateur à travers son œil central pour en être expulsé au travers de la jante, ce qui en fait tantôt un dispositif de soufflage (comme un sèche-cheveux) et tantôt un dispositifs d'aspiration, parfait pour par exemple extraire l'air vicié d'une mine en le relâchant dans l'atmosphère. (35)

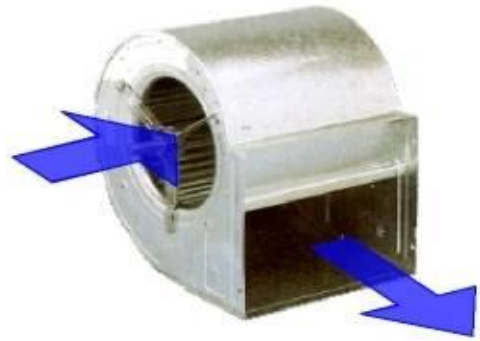


Figure 78 : ventilateur

Pour assurer une bonne performance du ventilateur, la forme de l'orifice d'aspiration est circulaire et la forme de l'orifice de refoulement est rectangulaire. (33)

Pour conclure : Dans le cas d'un ventilateur **centrifuge**, l'aspiration de l'air se fait axialement et le refoulement radialement. Pour un ventilateur **axial**, l'air est véhiculé parallèlement à l'axe de la roue.

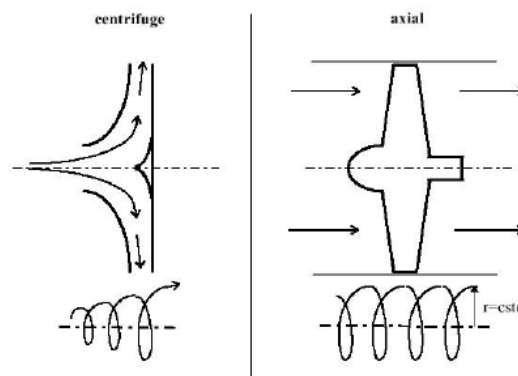


Figure 79 : Sens général de l'écoulement d'air dans les deux types de ventilation.

Dans le domaine de construction des CTA, les constructeurs utilisent souvent **la ventilation centrifuge**. Pourquoi ?

Les ventilateurs axiaux peuvent faire circuler de gros débit d'air de façon économique. Par contre, ils n'ont pas beaucoup de force pour combattre les restrictions. Les ventilateurs centrifuges ont plus de force pour combattre les restrictions.

Plus il y a de la restriction à combattre, mieux il vaut privilégier un ventilateur centrifuge. (36)

Les restrictions sont comme les courbes sur une route. Plus il y a de courbes, moins une auto peut avancer rapidement. Plus il y a de restrictions dans un réseau de ventilation, moins il y aura de débit d'air.

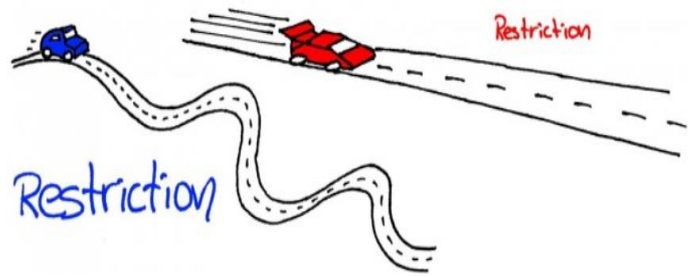


Figure 80 : Les restrictions.

V.3.2. Les filtres :

On classe les filtres à couche poreuse en fonction de leur efficacité :

Filtres à basse efficacité (classes G1 à G3) :

Les filtres à chocs ou labyrinthe sont composés de profilés en quinconce qui interceptent les particules de graisse, principalement :

- Par effet d'inertie : à chaque virage autour d'un profilé, les particules sont projetées en dehors du flux d'air.
- Par condensation des particules sur les surfaces "froides". Dès lors, le rendement s'accroît avec une diminution de la vitesse de l'air. Le filtre à choc est donc l'outil optimal pour la filtration de l'air dans des zones humides, genre laverie ou lave-casseroles.

Les filtres à treillis correspondent à des filtres plans composés d'un treillis de fils d'acier. Ils s'encrassent plus facilement que les filtres à choc et sont moins facilement nettoyés.

Ces types de filtres sont généralement utilisés pour effectuer une préfiltration.



Figure 81 : Filtre à treillis métallique et filtre à choc.

Filtres à moyenne efficacité (classes G1 à G4) :

La surface filtrante est composée de fibre de verre grossière ou de fibre synthétique maintenue dans des cadres en carton ou métallique. Les filtres peuvent être plan ou légèrement plissés pour augmenter la surface filtrante, donc la longévité. On trouve également des médias en mousse de polyuréthane ou polyester expansée, utilisée sous forme de couches planes ou des tricots en fil d'acier galvanisé ou inoxydable, montés dans des cadres.



Figure 82 : Filtre plan.

Ils fonctionnent principalement par l'effet d'inertie des particules.

Filtres à haute efficacité (classes F5 à F9) :

Ces filtres sont composés soit d'un papier-filtre plissé en cellulose ou en fibres de verre, soit de poches (on parle de filtres à poches) disposées dans un cadre sous forme de sacs flottants qui leur donnent une surface de filtration pouvant aller jusqu'à 27 fois la surface frontale.

Les filtres à poches ont une forte capacité de colmatage et un coût d'exploitation peu élevé.

Ils fonctionnent principalement par effet d'interception et de diffusion. Ils sont largement utilisés pour la filtration de l'air dans les systèmes de ventilation.



Figure 83 : Filtre à poches et filtre à dièdre.

Filtres à très haute efficacité ou absolus (classes H10 à H14) :

Le milieu filtrant est constitué de papiers de fibres de verre maintenues par un liant, pour les plus hautes efficacités, ou bien d'un mélange de fibres de cellulose et de fibres minérales. Ces papiers sont plissés sur toute la profondeur du filtre. Chaque pli est parfois maintenu par un séparateur ondulé. La surface de filtration peut atteindre 100 fois la surface frontale pour les filtres dits absolus.



Figure 84 : Filtre absolu.

Dans ces filtres, c'est l'effet de diffusion qui devient prépondérant.

V.4. Dimensionnement du CTA :

L'air repris (sortie de cabine de peinture) est bien filtré grâce aux filtres déjà cités (les 3 filtres de la cabine), donc on va ajouter juste un filtre de faible efficacité G pour assurer une filtration parfaite et éviter l'endommagement de notre échangeur à plaques.

On utilisera aussi un filtre G pour filtrer l'air neuf pris de l'extérieur de la poussière. Et bien sûr on va ajouter un filtre à choc métallique à l'extérieur pour la protection.

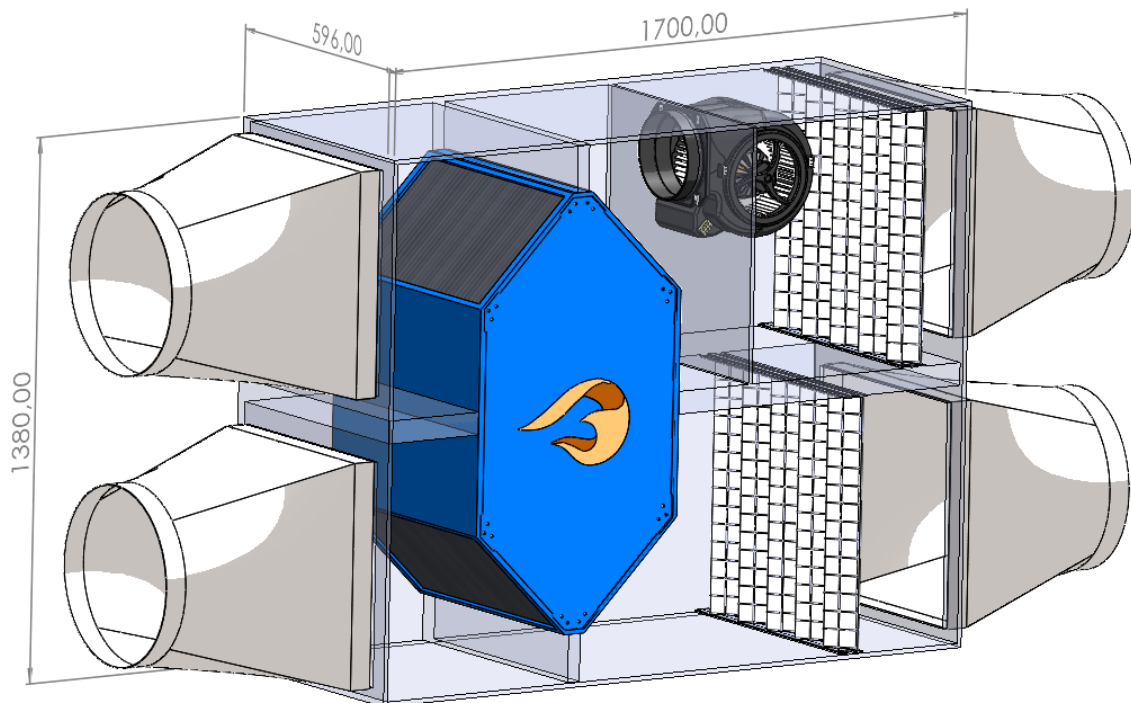


Figure 85 : Dimensionnement du CTA.

En tenant compte d'espace pour la ventilation et la filtration, on aura un CTA de dimension $1500 \times 584,50 \times 1200 \text{ mm}^3$.

V.5. Canalisation :

On a besoin de trois CTA dans la cabine. Un CTA par cabine. Nos calculs précédents sont basés à ce point-là.

Les dimensions des raccords et des conduites sont standard dans le marché. On choisit des dimensions convenables pour éviter toute sorte de haute pression et de turbulence.

On raccorde les entrées et les sorties de notre CTA avec des trémies carrés ronds (500 x 500 to 400). Cette dimension-là est assez suffisante pour éviter haute pression dans notre CTA.

On termine notre système de canalisation en tenant compte des normes.

On aura le système suivant :

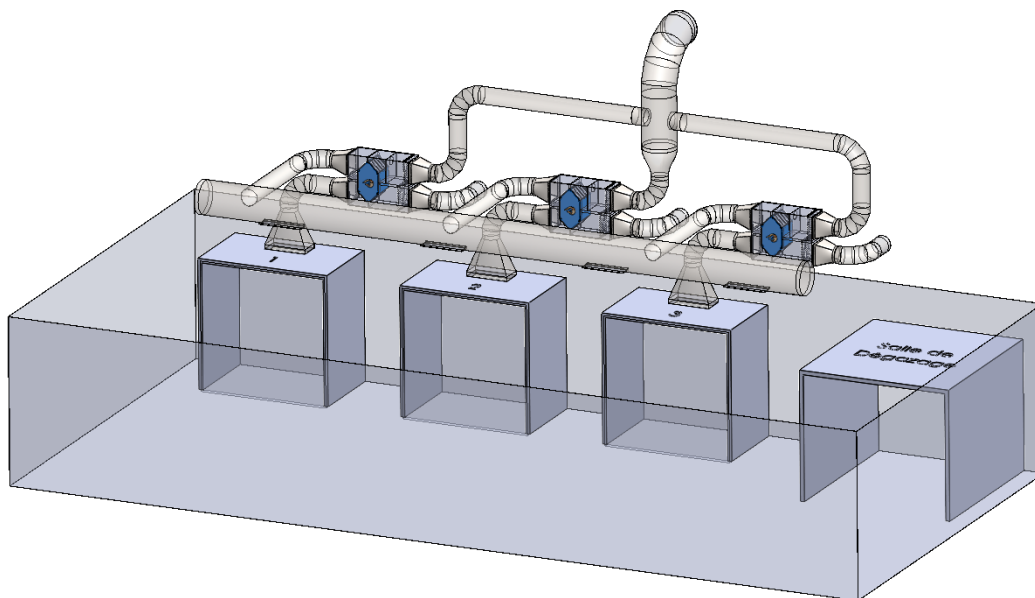


Figure 86 : Système de canalisation dans la zone de peinture en intégrant les 3 CTA.

On finalise notre chapitre par un simulation thermo-hydraulique de la zone de peinture avec les 3 CTA.

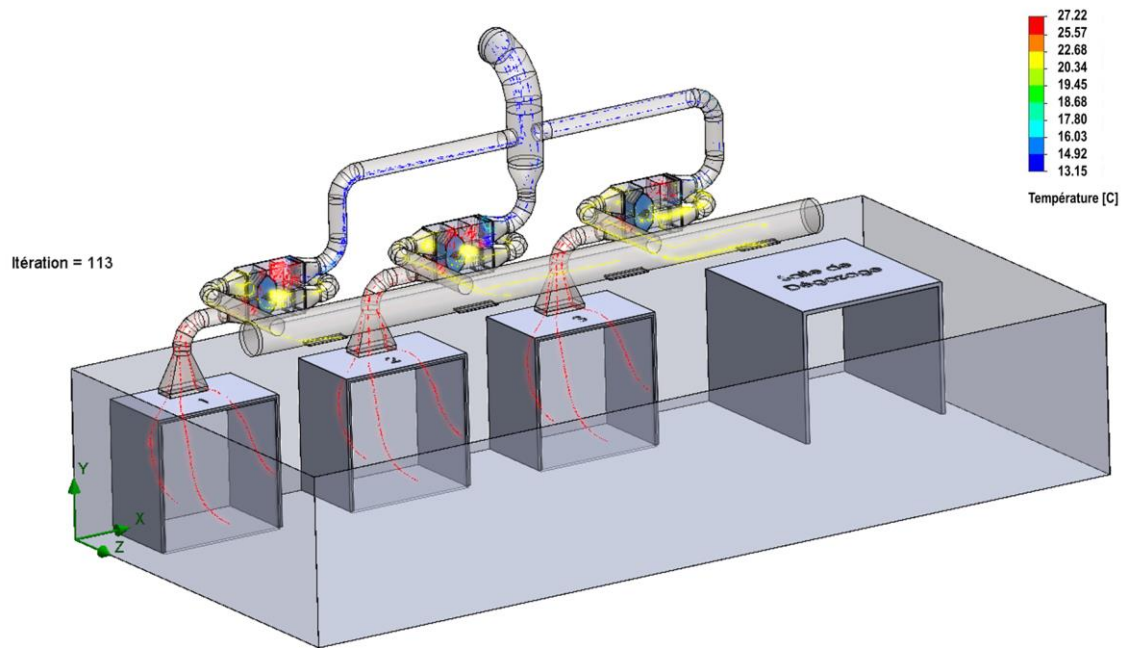


Figure 87 : Lignes de courant de l'air chaude (coloré par la température) dans la zone de peinture.

V.6. Conclusion :

Cette partie est consacré pour le montage complet d'échangeur dans la zone de peinture avec une proposition de la canalisation adapté à notre cas. Les dessins et même la simulation se sont faits dans SolidWorks.

En utilisant cette solution la quantité de chaleur récupérer est :

$$\frac{5,44}{2} \times 80\% = 2,176 \text{Wh.}$$

Énergie récupérée par heure : $2,176 \text{ [W/(m}^3\text{/h)]} \times 14\,500 \text{ [m}^3\text{/h]} \times 3 = 94,656 \text{ [kWh]}$

L'énergie récupérée par an est de :

$$94,656 \text{ [kWh]} \times 960 \text{ [h/an]} = 90\,870 \text{ [kWh/an]}$$

Puissance électrique des 3 ventilateurs = $1,5 \text{ [kW]} \times 3 = 4,5 \text{ kW}$.

Le supplément de consommation électrique sera donc de :

$$4,5 \text{ [kW]} \times 960 \text{ [h]} = 4320 \text{ [kWh/an]}$$

Le gain de l'énergie est donc : $90\,870 \text{ [kWh/an]} - 4320 \text{ [kWh/an]} = 86\,550 \text{ [kWh/an]}$

Cela implique un prix un peut prêt $86\,550 \text{ Drh/an}$.

Si on ne tient compte que du récupérateur et de son placement, on peut estimer l'investissement à $6\,250 \text{ €}$ ($66\,000 \text{ Drh}$). (12)

Le temps de retour sur investissement est donc de :

$$RI = \frac{66\,000 \text{ [Drh]} \times 3}{86\,550 \text{ [Drh/an]}} = 2,28 \sim 3 \text{ [ans]}$$

Cette solution n'est pas très rentable dans le sens des financiers qui exigent un retour de 3 ans, mais elle ne représente pas une dépense, puisqu'il y a toujours une récupération d'énergie. Investissons donc dans la technologie plutôt que dans le combustible.

Dessiné par : FATHALLAH Hamza

No. DE PLAN

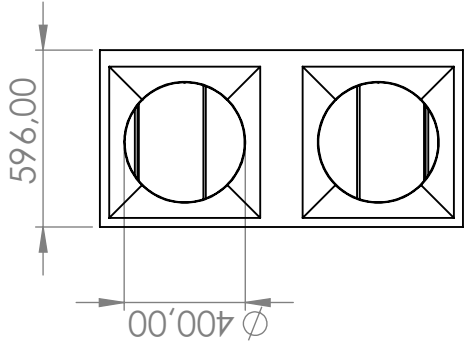
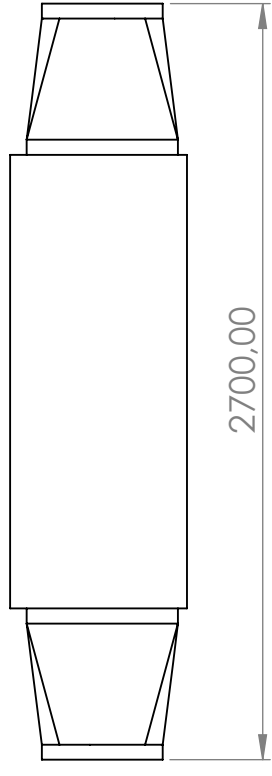
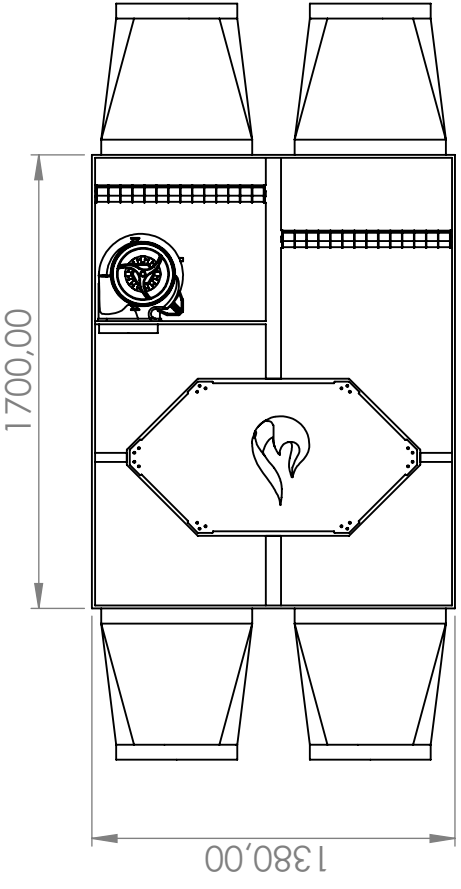
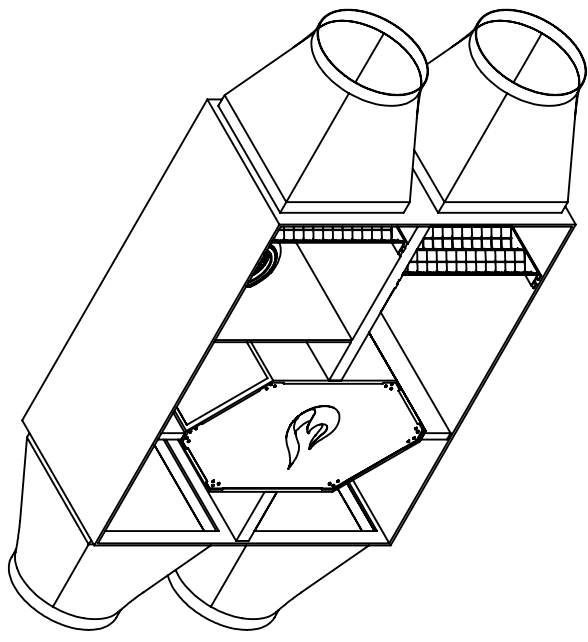
CTA

ECHELLE: 1:25

A4



FEUILLE 1 SUR 1



D

C

B

A

D

C

B

A

1
2
3
4
5
6

1
2
3
4
5
6

6

5

4

3

2

1

6

5

4

3

2

1

A

Dessiné par :

FATHALLAH Hamza

No. DE PLAN

Cabines_CTA

A4

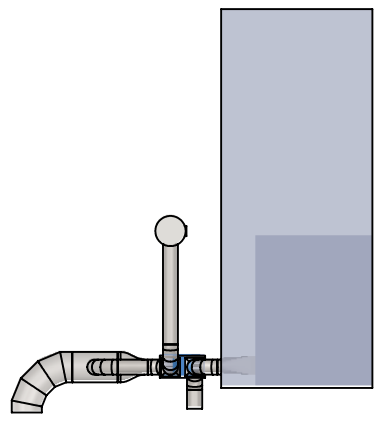
ECHELLE:1:200

FEUILLE 1 SUR 1

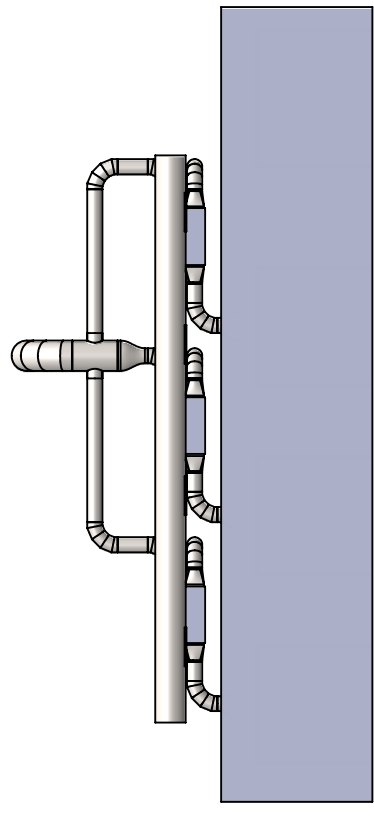


A

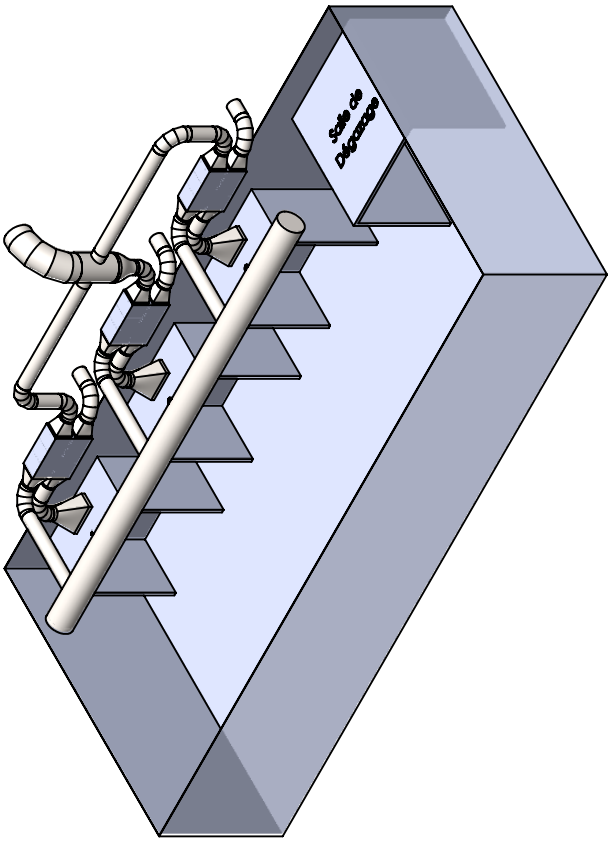
B



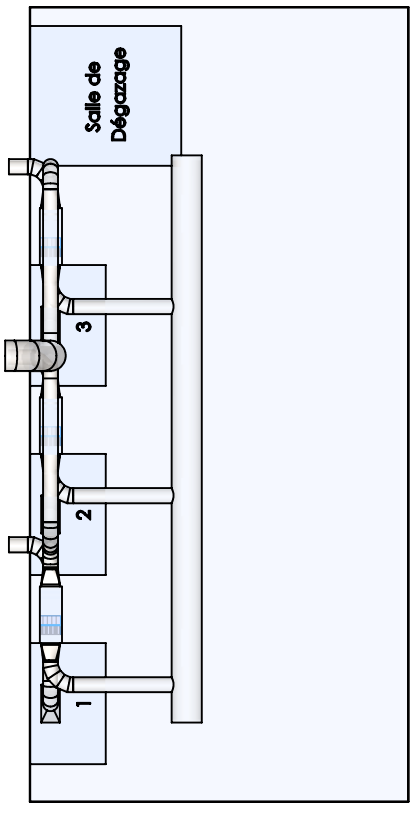
B



C

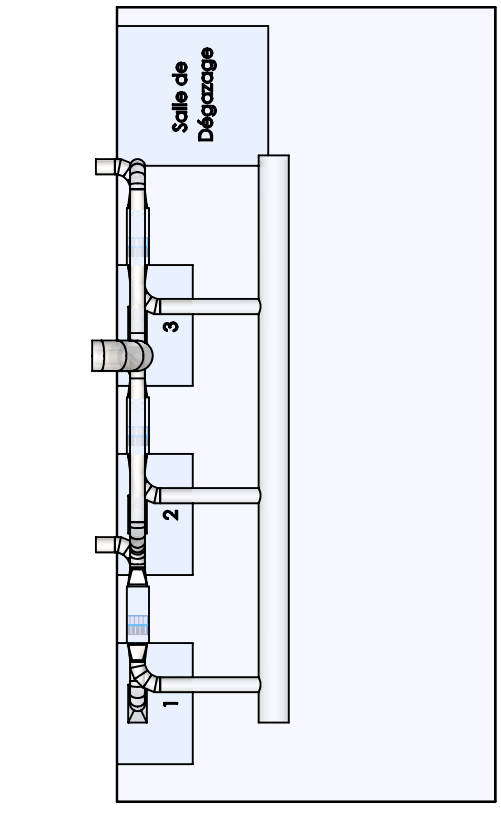


C



D

D



6

5

4

3

2

1

6

5

4

3

2

1

Conclusion générale :

L'objectif principal de ce projet était de développer une méthode pour récupérer le maximum possible des calories d'air chaud chauffer par une pompe à chaleur, extrait de local de peinture vers l'extérieur. Pour cela, nous avons proposé une approche de conception en se basant sur des corrélations dans la littérature du transfert thermique.

Dans le but d'avoir une meilleure efficacité thermique, on a choisi l'**échangeur à plaques** car il est le plus adaptable à notre cas en le comparant avec les autres échangeurs disponibles dans le marché, et on prend comme matériau l'aluminium grâce à sa conductivité thermique important, sa résistance contre la corrosion et bien sûr son prix qui est abordable.

Nous avons explicité, de manière détaillée dans la partie expérimentale, la méthodologie de conception globale, où on a remarqué que les dimensions calculées sont relativement grandes pour un échangeur thermique à nos conditions ($2400 \times 1000 \times 904 \text{ mm}^3$). Pour cela on a pensé à ajouter des ailettes avec des dimensions précises qui ont augmenté la surface d'échange principale de 5 fois.

L'échangeur est maintenant avec une dimension convenable ($1170 \times 720 \times 576 \text{ mm}^3$), mais le problème qui se pose est le risque d'endommagement d'échangeur à cause de l'air chaude extrait de la cabine qui n'est pas bien filtrer. Pour cela on a pensé à améliorer le système de filtration de nos cabines.

La cabine de peinture regroupe 3 filtres : filtre choc, filtre plissé et filtre à poche ; ce dernier ne fonctionne pas comme il faut. A cette raison on a suggérer une autre conception qui va non seulement augmenter l'efficacité de filtration, mais aussi économiser le temps de changement et la matière.

Pour l'installation de notre échangeur on a fait la conception d'une centrale de traitement d'air (CTA) qui nous donne les dimensions suivantes : ($1700 \times 596 \times 1380 \text{ mm}^3$).

Et finalement, pour renforcer ce travail on a suggéré une méthode de canalisation dans notre zone de peinture en intégrant nos trois CTA.

La période de stage effectué au Zenith fonderie et plus précisément dans l'atelier TS-peinture m'a donné l'occasion d'approfondir dans le domaine thermiques et énergétiques, et de découvert les rouages de ce monde-là.

Annexes :

Annexe 1 : La fiche technique des ventilateurs utilisées.

Características técnicas	Technical characteristics	Technische Daten	Caractéristiques techniques				
Modelo Model Modell Modèle	Velocidad Speed Drehzahl Vitesse Máx. (r/min)	Potencia instalada Installed Power Nenn-leistung Puissance installée Máx. (kW)	Caudal máximo Maximum Airflow Maximaler Volumenstrom Débit maximum (m³/h)	Temperatura del aire Air temperature Lufttemperatur Température de l'air (°C) mín. máx.		Peso aprox. Approx. weight Ung. Gewicht Poids approx. (kg)	According ErP
DTS-7/7	2500	1,10	3650	-20	+80	5,0	2015
DTS-9/9	1800	1,50	5700	-20	+80	9,0	2015
DTS-10/10	1700	1,50	6500	-20	+80	10,5	2015
DTS-12/12	1400	1,50	8050	-20	+80	15,5	2015
DTS-15/15	1000	1,50	11000	-20	+80	24,0	2015
DTS-18/18	700	1,50	14500	-20	+80	33,5	2015
DTC-7/7	2500	1,10	3650	-20	80	6,0	2015
DTC-9/9	2100	1,50	5700	-20	80	11,5	2015
DTC-10/10	1700	1,50	6500	-20	80	13,5	2015
DTC-12/12	1400	2,20	9150	-20	80	18,5	2015
DTC-15/15	1100	3,00	13650	-20	80	27,5	2015
DTC-18/18	900	3,00	19050	-20	80	38,5	2015

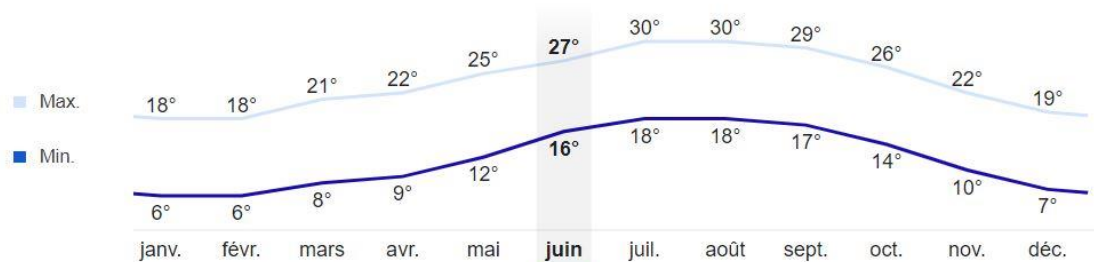
Annexe 2 : Les moyennes météorologiques à Berrechid.

Berrchid

Moyennes météorologiques

Résumé Graphiques

Températures (°C)



Annexe 3 : Calculs expérimentales des propriétés d'air en fonction de la température avec des corrélations. (7)

Propriétés de l'air à 1 atm						
θ	ρ	c_p	λ	$\frac{10^7}{\mu}$	$10^5 \alpha$	Pr
°C	kg m ⁻³	J.kg ⁻¹ .°C ⁻¹	W.m ⁻¹ .°C ⁻¹	Pa.s	m ² .s ⁻¹	
0	1.292	1006	0.0242	1.72	1.86	0.72
20	1.204	1006	0.0257	1.81	2.12	0.71
40	1.127	1007	0.0272	1.90	2.40	0.70
60	1.059	1008	0.0287	1.99	2.69	0.70
80	0.999	1010	0.0302	2.09	3.00	0.70
100	0.946	1012	0.0318	2.18	3.32	0.69
120	0.898	1014	0.0333	2.27	3.66	0.69
140	0.854	1016	0.0345	2.34	3.98	0.69
160	0.815	1019	0.0359	2.42	4.32	0.69
180	0.779	1022	0.0372	2.50	4.67	0.69
200	0.746	1025	0.0386	2.57	5.05	0.68
220	0.700	1028	0.0399	2.64	5.43	0.68
240	0.688	1032	0.0412	2.72	5.80	0.68
260	0.662	1036	0.0425	2.79	6.20	0.68
280	0.638	1040	0.0437	2.86	6.59	0.68
300	0.616	1045	0.0450	2.93	6.99	0.68

Corrélations entre 0 et 100 °C

(θ : température en °C ; T température en K)

Pour l'air

- $\rho = \frac{353}{(\theta + 273)}$ kg m⁻³
- $c_p = 1008$ J.kg⁻¹.°C⁻¹
- $\lambda = 7.57.10^{-5}\theta + 0.0242$ W.m⁻¹.°C⁻¹
- $\mu = 10^{-5}(0.0046\theta + 1.7176)$ Pa.s
- $\alpha = 10^{-5}(0.0146\theta + 1.8343)$ m².s⁻¹
- $Pr = -2.54.10^{-4}\theta + 0.7147$
- $\beta = \frac{1}{T}$ K⁻¹

Annexe 4 : Corrélations du nombre Nusselt dans le cas d'un écoulement sur un plan. (7)

Corrélations pour le calcul des coefficients de transfert en convection forcée	
Caractéristiques du fluide calculées à $\theta_f = \frac{\theta_p + \theta_m}{2}$	
Géométrie	Corrélation
Écoulement sur un plan	<p>$Nu(x)$: Nu à la distance x du bord du plan \overline{Nu}_L : Nu moyen sur la longueur L du plan</p> <p><u>Écoulement turbulent :</u></p> $Nu(x) = 0.0288 Re(x)^{0.8} Pr^{1/3}$ $\overline{Nu}_L = 0.035 Re_L^{0.8} Pr^{1/3} \quad Re > 5 \cdot 10^5 \text{ et } Pr \geq 0,5$ <p><u>Écoulement laminaire :</u></p> $Nu(x) = 0.324 Re(x)^{0.5} Pr^{1/3}$ $\overline{Nu}_L = 0.628 Re_L^{0.5} Pr^{1/3} \quad Re \leq 5 \cdot 10^5 \text{ et } 10 \geq Pr \geq 0,5$

Bibliographie :

1. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Zamak>. [En ligne]
2. https://stringfixer.com/fr/Die_cast. [En ligne]
3. QUINSAT, Bruce ANGLADE - Hélène HORSIN MOLINARO - Pierre MELLA – Yann. *Le moulage en coquille : procédé de réalisation de pièces métalliques*. s.l. : Ecole normal supérieure Paris-Saclay.
4. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Usinage>. [En ligne]
5. <https://www.petite-entreprise.net/P-2196-81-G1-organigramme-definition-et-role.html>. [En ligne]
6. <https://blog.hubspot.fr/marketing/cartographie-des-processus>. [En ligne]
7. Bordjane, M. Mustapha. *Modes de transfert thermique (cours & exercices corrigés)*.
8. Sylvie DUCROS, Eric MASSON, Yann ROGAUME. *ETAT DE L'ART DE LA TECHNOLOGIE GENERATEUR D'AIR CHAUD A PARTIR DE BIOMASSE* . s.l. : ADEME, juin 2010 .
9. <https://greth.fr/echangeur-thermique/>. [En ligne]
10. MARVILLET.C, MANIFICAT.A, BERRADA.N et WEBER.C. *E.Book TOME 1: Echangeurs Thermiques -: Technologies, Conception et dimensionnement, GRETh 2014*.
11. Markets, European Heat Exchanger. *Frost & Sullivan, 1999*.
12. <https://energieplus-lesite.be/>. [En ligne]
13. <https://www.schuko.de/fr/produits-et-systemes/extraction-de-brouillard-de-peinture/echangeur-de-chaleur>. [En ligne]
14. <https://www.abcclim.net/echangeur-rotatif-roue-thermique.html>. [En ligne]
15. <https://energieplus-lesite.be/concevoir/ventilation/choisir-les-composants/choisir-un-recupereur-de-chaleur-d1/>. [En ligne]
16. <http://www.one.org.ma/>. [En ligne]
17. <http://jackadit.com/index.php?p=ecoconception3>. [En ligne]
18. <https://guidesaideconception.uqar.ca/guide-des-meilleures-pratiques/a-z/matrice-de-pugh>. [En ligne]
19. Rouland, E. *Les Échangeurs Thermiques*. s.l. : Université de Rouen.
20. *Transfert thermique par convection*. s.l. : FSAC- Master Energies Renouvelables.

21. <https://www.thermal-engineering.org/fr/quel-est-le-diametre-hydraulique-definition/>. [En ligne]
22. Marty, Ph. TRANSFERTS THERMIQUES CONVECTIFS.
23. <https://www.barriquand.com/dimensionner-echangeur-thermique-mode-emploi/>. [En ligne]
24. <https://www.helios-fr.com/>. [En ligne]
25. RAMESH K.SHAH, DUSAN P.SEKULIC. *Fundamentals of heat exchanger design*.
26. Robert, Heitor. *Ailettes de refroidissement*.
27. Pulvérisation de produits liquides. *Cabine de peinture*. s.l. : OPPBTP.
28. <https://www.conrad.fr/articles/inspiration/fonctionnement-anemometre>. [En ligne]
29. <http://www.profilt.net/fr/procart-h/>. [En ligne]
30. <http://www.profilt.net/fr/prokraft-6c-8c/>. [En ligne]
31. <https://www.abcclim.net/centrale-traitement-air.html>. [En ligne]
32. <http://froidsolution.fr/pages/ventilation/>. [En ligne]
33. Yahmed, Fathi Ben. *Les Ventilateurs*.
34. <https://www.rosenberg-france.fr/ventilateurs-axiaux/>. [En ligne]
35. https://fr.wikipedia.org/wiki/Ventilateur_centrifuge. [En ligne]
36. <https://www.maintenancequebec.com/choisir-ventilateur-bonne-application/>. [En ligne]
37. A, GUARRIGUE.A, GOUBIER.C, HUETZ.J, MARVILLET.C, MERCIER.P, VIDIL.R. *Echangeurs de chaleur, Techniques de l'ingénieur, traité Génie énergétique, Références B2340, B2341, B2342, B2343, B2344*.
38. T.KUPPAN. *Heat exchanger design handbook*.
39. https://www.encyclopedie-energie.org/les-echangeurs-de-chaleur/#_ftnref2. [En ligne]
40. Marbaix, Jean-Claude. *Les récupérateurs de chaleur en ventilation et conditionnement d'air*.